

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Ti6AL4V ALAŞIMININ JOHNSON-
COOK AKIŞ VE HASAR MODELİ PARAMETRELERİNİN ANALİZ
PROGRAMLARI YARDIMI İLE ELDE EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem ARSLAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Kasım 2024

Bu tez çalışması **22.Fen.Bil.49** numaralı proje ile Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Tİ6AL4V ALAŞIMININ
JOHNSON-COOK AKIŞ VE HASAR MODELİ
PARAMETRELERİNİN ANALİZ PROGRAMLARI YARDIMI İLE
ELDE EDİLMESİ**

Adem ARSLAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Kasım 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Adem ARSLAN tarafından hazırlanan “Toz Metalurjisi ile Üretilen Ti6AL4V Alaşımının Johnson-Cook Akış ve Hasar Modeli Parametrelerinin Analiz Programları Yardımı İle Elde Edilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 05/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi **İmza**

Üye : Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU
Eskişehir Osmangazi Üni. Müh. Mim. Fakültesi **İmza**

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20 /11/ 2024

İmza

Adem ARSLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ JOHNSON—COOK AKIŞ VE HASAR MODELİ PARAMETRELERİNİN ANALİZ PROGRAMLARI YARDIMI İLE ELDE EDİLMESİ

Adem ARSLAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Akış gerilmesi ve hasar modelleri simülasyon programlarında kullanılan malzemenin farklı sıcaklıklarda ve farklı hızlarda deformasyona uğraması durumunda nasıl cevap vereceğini tanımladığımız matematiksel modellerdir. JC akış ve hasar modeli pratikte en çok kullanılan malzeme modellerinden birisidir. Bu araştırmada, model parametrelerini elde etmek için standartlara uygun olarak hazırlanan farklı çentik oranlarında dairesel formdaki Ti6Al4V alaşımlarına çekme testi uygulanarak gerilme ve gerinme değerleri elde edilmiştir. Kullanılan numuneler toz metalurjisi yöntemiyle dikey katmanlı olarak üretilmiş, üretim sonrası numunelerde oluşan artık gerilmeyi ve çarpılmayı sönmek için sabit sıcaklıkta gerilim giderme fırınlarında iki saat bekletilmiştir. Daha sonra fırından çıkarılıp tablalardan ayrılan numunelere CNC tezgahlarında farklı çentik radyüsleri açılmıştır.

Instron 8081 hidrolik yorulma cihazında tek eksenli çekme deneyine tabii tutulan Ti6Al4V alaşımı numunelerden alınan datalar FINDJC programında işlenmiştir. Bu program gerinme gerilme verileri üzerinde matematiksel işlemlerle hem çekme grafiği üzerinden hesaplanan dataları hem de diğer model parametrelerini elde etmek için özel olarak yazılmıştır. Farklı regrasyon ve eğri uydurma algoritmaları kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda JC akış ve hasar model parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen parametreler daha önce yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan bu çalışmada JC akış ve hasar modeli parametrelerine çok daha

ekonomik, daha basit test yöntemleri ve daha basit test cihazları kullanılarak ulaşılmıştır.

2024, xiii + 88 sayfa

Anahtar Kelimeler: Johnson-Cook Malzeme Modeli, SHPB Testi, Ti6Al4V Alaşımı,
Çekme Deneyi, Hasar Parametreleri



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

TITLE OF THESIS
TITLE OF THESIS (Devam)

Adem ARSLAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ahmet ÇETKİN

Flow stress and damage models are mathematical models that define how the material used in simulation programs will respond when deformed at different temperatures and speeds. The JC flow stress and damage model is one of the most commonly used material models in practice. In this research, tensile tests were applied to circular Ti6Al4V alloys with different notch ratios prepared in accordance with the standards in order to obtain model parameters, and stress and strain values were obtained. The samples used were produced as vertical layers by powder metallurgy method and kept in constant temperature stress relief furnaces for two hours to absorb the residual stress and distortion formed in the samples after production. Then, different notch radii were opened on CNC machines for the samples that were removed from the furnace and separated from the tables.

The data obtained from the Ti6Al4V alloy samples subjected to uniaxial tensile test in the Instron 8081 hydraulic fatigue device were processed in the FINDJC program. This program was specially written to obtain both the data calculated from the tensile graph and other model parameters by mathematical operations on the strain stress data. As a result of optimization using different regression and curve fitting algorithms, JC flow stress and damage model parameters were obtained. When the obtained parameters were compared with other previous studies, similar results were obtained. In this study, JC flow stress and damage model parameters were obtained using much more economical, simpler test methods and simpler test devices.

2024, xiii + 88 pages

Keywords: Johnson-Cook Material Model, SHPB Test, Ti6Al4V Alloy, Tensile Test,
Damage Parameters



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumu belirlemede ve çalışma sonuçlarının değerlendirilmesine kadar olan tüm süreçte desteğini hiç esirgemeyip değerli fikirlerini benimle paylaşıp beni yönlendiren, aynı zamanda bu süreci kolaylaştırıp başka süreçler hakkında da fikir edinmemi sağlayan, değerli zamanını ayıran danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarlarındaki çalışmalarında bilgilerini benimle paylaşan değerli hocalarıma ve 22.Fen.Bil.49 numaralı proje ile maddi destek sağlayan BAP Koordinasyon birimine, her konuda yardımını esirgemeyen tüm akademik ve üniversite personeline çok teşekkür ederim.

Tez aşaması sürecinde numune temini konusunda karşılaştığım sorunlarda gösterdiği ilgi ve gayretten dolayı Artuk Aviation Savunma San. ve Tic.A.Ş. firmasına ve değerli çalışanı Mehmet Keskin'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayatımın her alanında ve tez sürecinde maddi ve manevi desteklerinden dolayı babam Memet ARSLAN, annem Nezahat ARSLAN' a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım. Zorlu tez süreci boyunca bana destek olan kardeşim Furkan ARSLAN ve Merve ARSLAN'a teşekkür ederim.

Adem ARSLAN
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
2.1 Malzeme Muayene Yöntemleri	7
2.1.1 Tahribatsız Muayene Yöntemleri	7
2.1.2 Tahribatlı Muayene Yöntemleri	7
2.1.2.1 Çekme Deneyi.....	8
2.2.1.2 Çekme Deneyi Standartları	8
2.2 Metalik Malzemelerin Elastik-Plastik Bölge Davranışları.....	10
2.2.1 Mühendislik Gerilmesi-Gerçek Gerinme	13
2.2.2 Pekleşme Sertleşmesi	15
2.3 Akış Gerilmesi Modelleri	17
2.3.1 Fenomonolojik Kurucu Modeller	20
2.3.2 Fiziksel Temelli Kurucu Modeller	23
2.4 Hasar Kriterleri	27
2.5 Johnson-Cook(JC) Malzeme Modeli.....	30
2.5.1 JC Akış Gerilmesi Malzeme Sabitlerinin Belirlenmesi.....	32
2.5.2 JC Hasar Modeli Malzeme Sabitlerinin Bulunması	34
2.6 Dinamik-Yarı Statik Gerilim Testleri.....	36
2.6.1 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Deneyi	38
3. MATERYAL ve METOT	41
3.1 Gerilme Üç-Eksenliliği	41
3.2 Sonlu Elemanlar Modeli	43
3.2.1 Sonlu Elemanlar Analizinde Mesh Yapısının Önemi	44

3.3 Toz Metalurjisiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Temel Özellikleri	48
3.4 Numuneler ve Test Cihazları	51
3.5 JC Parametelerinin Elde Edilmesi için Kullanılan Programın Arayüzleri.....	55
4. BULGULAR	58
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	67
6. KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	88



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A_0	İlk Alan
B	Gerinim Sertleştirme Sabiti
C	Gerinim Oranı Güçlendirme Katsayısı
D_{1-5}	Hasar Modeli Parametreleri
E	Young Modülü
σ	Gerilme
σ_{φ}	Çekme Gerilmesi
σ_k	Kopma Gerilmesi
$\sigma_{\max}$	Maksimum Gerilme
σ_A	Akma Gerilmesi
σ_{eq}	Eşdeğer Akış Gerilimi
σ_D	Hasar Gerilmesi
σ_m	Ortalama Gerilme
ρ	Yoğunluk
ν	Poisson Oranı
η	Gerilme Üç Eksenliği
K_H	Sertleşme Katsayısı
n_H	Gerilme Pekleşme Üssü
T^*	Homolog Sıcaklık
ε_{eq}	Eşdeğer Plastik Gerinim
m	Termal Yumuşama Katsayısı
Δ_{ε}	Eşdeğer Plastik Gerinim Artışı
C_{RT}, C_H	Malzeme Sabitleri
F	Kuvvet

Kısaltmalar

AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BCC	Body Centred Cubic
CAD	Computer Numerical Control
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computer Numerical Control
DIC	Digital Image Correlation
FCC	Face Centred Cubic
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
JC	Johnson Cook
KH	Khan-Huang Model

SHPB	Split Hopkinson Pressure Bar
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangle Language
ZA	Zerilli-Armstrong Model



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Sac Tipinde Dikdörtgen Şekilli Deney Numunesinin ASTM E8:2016 Tanımlanmış Ölçüleri.....	9
Şekil 2.2 Sac Tipinde Dikdörtgen Şekilli Deney Numunesinin ISO 6992-1:2016 Standardında Tanımlanmış Hali.....	9
Şekil 2.3 Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisindeki Elastik ve Plastik Bölgeler.....	10
Şekil 2.4 Yük Altındaki Bir Metal İçin Tipik Gerilim-Gerinim Grafiği.....	11
Şekil 2.5 Akma Kriteri Yüzeyleri.....	13
Şekil 2.6 Mühendislik ve Gerçek Gerilme-Gerinme Eğrisi.....	14
Şekil 2.7 a) $0.01 s^{-1}$ Gerinim Hızıyla Farklı Sıcaklıklarda 42crmo Çeliği İçin Tipik Gerçek Gerilim-Gerinim Eğrileri b) Tipik Akış Gerilme Eğrisi.....	18
Şekil 2.8 Hiperbolik sinüs denklemi ile deneysel ve hesaplanan akış gerilimi arasındaki karşılaştırma.....	25
Şekil 3. JC Modelinde A, B ve N Parametrelerini Elde Etmek İçin Hazırlanan $\ln(\sigma - A) \sim \ln(\dot{\epsilon})$ Grafiği.....	32
Şekil 3.1 JC Modelinde C Parametresini Elde Etmek İçin Düzenlenen $\frac{\sigma}{(A+B\dot{\epsilon}^n)} - 1 \sim \ln(\dot{\epsilon}^*)$ Grafiği.....	33
Şekil 3.2 JC Modelinde C Parametresini Elde Etmek İçin Düzenlenen $\ln\left(\frac{\sigma}{(A+B\dot{\epsilon}^n)} - 1\right) \sim \ln(T^*)$ Grafiği.....	34
Şekil 3.3 JC Modelinde D_4 Hasar Parametresini Elde Etmek İçin Düzenlenen $\frac{\epsilon_f}{(D_1+D_2e^{(D_3\eta)})} \sim \ln(\dot{\epsilon}_p^*)$ Grafiği.....	36
Şekil 3.4 Farklı Strain Rate Oranları ve Endüstriyel Karşılıkları.....	37
Şekil 3.5 Çeşitli Mekanik Deformasyon Operasyonlarına Karşılık Gelen Gerinim Oranları.....	37
Şekil 3.6 Dalganın Yayılımı.....	39
Şekil 3.7 SHPB Deney Düzeneği.....	39

Şekil 4. σ Yüküne veya Temel Gerilimlere Bağlı Olarak Sırasıyla Soldan Sağa, Tek Eksenli Gerilim, İki Eksenli Bir Gerilim ve Üç Eksenli Gerilim Durumları....	41
Şekil 4.1 Oda Sıcaklığında Gerçekleşen Deneylerde Farklı Numune Yapılarının Plastik Gerinme ile Gerilme Üç Eksenlilik Değerleri.....	42
Şekil 4.2 Bir Aerobacket'in Statik Analizi (Sol Üst); Alışveriş Sepeti (Sağ Üst); Krank Mili (Sağ Alt); Bir Zincir Bağlantısının Dinamik Analizi (Sol Alt).....	44
Şekil 4.3 Tipik Sonlu Elemanlarda Mesh Ağ Yapısının Geçiş Örnekleri. (a) 2 Elemandan 1 Elemana Geçiş. (b) 1 Elemandan 3 Elemana Geçiş. (C) 2 Elemandan 4 Elemana Geçiş.....	45
Şekil 4.4 Ti6Al4V Alaşımına Uygulanan Mesh Yapısı.....	46
Şekil 4.5 Dairesel Çekme Numunesinde Boyun Oluşumu.....	47
Şekil 4.6 Mesh Boyutunun Gerilme Üç Eksenliliğine Olan Etkisi.....	47
Şekil 4.7 Ti6Al4V'nin İmalat Endüstrisindeki Uygulamaları Uçak Motoru Kanatları..	49
Şekil 4.8 Ti6Al4V'nin İmalat Endüstrisindeki Uygulamaları Türbin Kanatları.....	49
Şekil 4.9 Katmanlı Üretim Proses Zinciri.....	51
Şekil 4.10 Çekme Deneyi İçin Hazırlanan Numune Ölçüleri ve a/2R Oranları.....	52
Şekil 4.11 Solidworks Programında Yarıçapı 0.75 mm Olan Numenin Katı Modeli.....	53
Şekil 4.12 a) Ti6Al4V Numunelerinin Üretildiği 3D Baskı Cihazı b) Isıl İşleme Tabi Tutulmamış, İşlenmemiş Ti6Al4V Alaşımı.....	53
Şekil 4.13 EOS M290 Cihazından Çıkan Numunelerin Plakaya Yapışmasını Önlemek Amacıyla Tutucular.....	53
Şekil 4.14 EOS M290 Cihazından Çıkan Numunelerin CNC Ve Torna Tezgahında Talaşlı İmalat Aşamaları.....	54
Şekil 4.15 Instron 8801 Hidrolik Yorulma Test Cihazı.....	55
Şekil 4.16 FIND_JC Programının Ana Arayüzü.....	57
Şekil 4.17 FIND_JC Programının Akış Gerilmesi Hesaplama Arayüzü.....	57
Şekil 5.1 Farklı Test Hızlarında Numunelerin Ortalama Değeri.....	60

Şekil 5.2 Farklı Test Hızlarında Numunelerin R-Kare Eğrileri ve Regresyon Grafiği...	61
Şekil 5.3 Farklı Test Hızlarında JC Sünek Hasar Parametreleri ve D_4 İçin Hesaplanan Regresyon Eğrisi	64
Şekil 5.4 ABAQUS’de Modellenen Çentik Radyüslü Numuneye Ait Gerilme Üç Eksenlilik Değeri.....	66
Şekil 5.5 Test ve Analiz Verileri.....	67
Şekil 6. Farklı Test Verileri ile Elde Edilmiş Gerçek Gerilme-Gerçek Gerinme Eğrileri.....	67
Şekil 6.1 Farklı Test Verileri İle Elde Edilmiş JC Hasar Parametrelerinin Gerilme Üç Eksenliği – Kırılma Gerinmesinin Mevcut Çalışma Ve Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 ISO 6892-1:2016 ve ASTM E8:2016 İçin Çekme Deneyinin Uygulanacağı Oda Sıcaklık Aralığının Değerleri.....	9
Çizelge 2.2 ISO 6892-1 Standardında Sac Şeklindeki Numunenin Uzunluk Değerleri....	9
Çizelge 2.3 Farklı Gerinim Hızı Rejimleri İçin Test Yöntemleri.....	38
Çizelge 2.4 Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özellikleri.....	50
Çizelge 2.5 Ti6Al4V Tozunun Ağırlıkça % Kimyasal Bileşimi.....	50
Çizelge 2.6 Ti6Al4V Alaşımının İmalatında Kullanılan Ana Proses Parametreleri.....	54
Çizelge 2.7 Farklı Çalışmalara Ait JC Parametreleri.....	58
Çizelge 2.8 ABAQUS Ve Analitik Yöntemlerden Elde Edilen Gerinme Oranı ve Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Gerilme Üç Eksenliliğine Karşılık Eşdeğer Gerinme Değerleri	63
Çizelge 2.9 Farklı Hızlar Altında JC Sünek Hasar Parametreleri.....	66
Çizelge 3. Farklı Çalışmalara Ait JC Parametreleri.....	68
Çizelge 3.1 Farklı Hızlar Altında JC Sünek Hasar Parametreleri	68

1. GİRİŞ

Yeni ve gelişmiş teknolojilerin ortaya çıkmasıyla mevcut altyapıların iyileştirilmesiyle birlikte, her özel uygulama için uygun malzeme seçimi günümüzde çoğu endüstride hayati bir önem kazanmıştır (Huang vd. 2018). Bu durum, mühendislik tasarımlarının daha sürdürülebilir, maliyeti etkin ve işlevsel bir şekilde kullanmak için gereklidir. Malzeme bilimi, mühendislerin belirli uygulamalar için uygun malzemeleri seçmelerine imkan tanırken, aynı zamanda yeni teknolojilerin entegrasyonu da sürecin önemli bir parçasıdır. Bunların yanında sürdürülebilir malzeme kullanımı geri dönüşüm ve döngüsel ekonomi kavramları da mühendislik alanında giderek daha fazla önemli hale gelmektedir. Sonuç olarak, malzeme seçimi ve teknolojiye gelişmeler mühendislik alanındaki yeniliklerin yapıtaşını oluşturmakla birlikte daha verimli, etkin ve çevre için sürdürülebilir çözümler geliştirmeye yönelmektedir (Deb vd. 2022).

Mühendislik uygulamaları için malzemeler, imalattan farklı aşamalara kadar çok çeşitli deformasyon oranlarına ve sıcaklıklara maruz kalır. Örneğin yüksek hızlı işleme sırasında yaşanan dinamik gerinim oranları ve yüksek sıcaklıklar, şekillendirme işlemlerinde gerilmenin yarı statik doğası, elektro-darbeleri şekillendirme sırasında yüksek gerinim oranlı deformasyon, markalama ve derin çekme gibi sac metal şekillendirme sırasında düşük gerinim oranı ve ortalama sıcaklıklar buna örnektir. Ayrıca malzeme hizmete girdikten sonra malzemenin çok yönlülüğü nedeniyle çeşitli sıcaklık ve deformasyon oranı koşullarını içeren uygulama alanlarının belirlenmesini gerektirir. Bu nedenle malzemenin yük altında iken veya hasar oluşabilecek önleyebilmek, malzemenin her koşulda nasıl davrandığını bilmek zorunlu hale gelmiştir (Immanuel ve Panigrahi 2018).

Bir malzemenin deformasyon davranışının incelenmesi, malzemenin çeşitli mühendislik uygulamalarında uygulanabilirlik düzeyini belirleyen en önemli noktalardan biridir. Deformasyon davranışının en temel parametrelerden biri, malzemenin akış gerilimidir. Gerilim-gerinim oranı, sıcaklık, malzemenin mikro yapısı, yapılan proseslerin geçmişi, ortam koşulları akış gerilimini etkileyen parametrelerdir (William ve Callister 2001).

Malzemelerin akış gerilimini belirlemek için farklı test yöntemleri kullanılır. Bu testler,

malzemenin deformasyon davranışı hakkında bilgi sahibi olmayı ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği değerlendirmek için önem arz etmektedir. Malzemenin tüm çalışma koşulları altındaki performansını değerlendirmek, kapsamlı deneyler yapmak için büyük miktarda zaman, malzeme ve çaba gerektirdiğinden pratik zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu süreç malzemenin bilinmeyen işlem koşulları altında davranışını anlamamıza yardımcı olacak tahmini modellerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu modeller genellikle matematiksel/analitik, fenomenolojik veya ampirik yöntemlerle geliştirilmektedir (Deb vd. 2022).

Malzemenin mekanik davranışlarının anlaşılması için Poisson oranı (ν) ve Elastisite modülü (E) gereklidir. Ancak gerilim-gerinim ilişkisinin doğrusal olmadığı elastoplastik problemleri çözmek için Poisson oranı ve Elastisite modülüne ek olarak tek eksenli gerçek gerilim-gerinim bilgisine sahip olmak esastır. Genellikle gerilim-gerinim eğrisi çekme testiyle belirlenir. Çekme testinden elde edilen gerilim-gerinim ilişkisi iki bölüme ayrılır. Bir numunenin boyun bölümü, maksimum yüklemede durumunda boyun oluşmadan önce düzgün şekilde deforme olur fakat boyun oluşuktan sonra düzgün bir şekilde deforme olmamaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda çeşitli metallerin gerilim-gerinim ilişkisini, pekleşme davranışını, düzgün veya düzgün olmayan deformasyon bölgelerini tanımlamak için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Gerçek gerilme-gerinme eğrisi, mühendislik gerilim-gerinim verilerinden doğrudan dönüştürme, sonlu eleman simülasyonları gerçekleştirme gibi çeşitli yollardan elde edilebilir. Elbette bu yöntemler malzeme özelliklerine ve gerinim aralığına bağlıdır (Kweon vd. 2021). Üniform deformasyon bölgesinde oluşan gerçek gerilme-şekil değiştirme ilişkisi çekme deneyi yardımıyla tanımlanabilir. Bu tür testler henüz boyun vermenin gerçekleşmediği mühendislik gerilme-şekil değiştirme değerlerini, gerçek gerilme-şekil değiştirme değerlerine dönüştürme ve bunlara uygun bir denklem kullanarak eğri uydurma yöntemini içermektedir (Mondal vd. 2014, Sainath vd. 2015, Li vd. 2016).

Üniform ve üniform olmayan bir deformasyon bölgesindeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tanımlamak için, gerçek gerilme-şekil değiştirme verilerini üniform deformasyon bölgesine uydurma ve uydurulan eğriyi üniform olmayan deformasyon bölgesine genişletme yöntemleri vardır (Choung vd. 2012, Schneider vd. 2015, Agirre vd. 2018, Pham vd. 2018, Othmen vd. 2020).

Sünek malzemelerin gerçek gerilme-şekil değiştirme modellerini türetmek için çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Considere 1985, sünek malzemeler için boyun oluşumunu tahmin etmek için analitik bir fonksiyon oluşturmuştur. Malzemenin sertleşme oranı geometrik yumuşama oranına eşit olduğunda boyun oluşumunun başladığı gözlenmiştir. Bu gözleme dayanarak Considere'nin oluşturmuş olduğu analitik fonksiyon önerilmiştir. Ayrıca çeşitli araştırmacılar deneysel ölçümlerden gerçek gerilme-şekil değiştirme ilişkisini kurmaya çalışmışlardır. Bunlar arasında Bridgman 1952, Needleman 1972, Cabezas ve Calentano 2004 tarafından yapılan araştırmalar mevcuttur. Bu araştırmalara göre maksimum gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme çekme testlerinin sonunda çekme numunelerinin boyun bölgesinin eğriliğinden ve yarıçapından belirlenebileceğini söylemişlerdir (Shen ve Jones 1993, Ling 1996, Choung ve Cho 2008, Majzoobi vd. 2015). Fakat bu yöntemin doğruluğu numunelerin boyun eğriliğinin ve yarıçapının doğru şekilde ölçülmesine bağlıdır. Ancak boyun deformasyon morfolojisinin karmaşıklığı nedeniyle numunelerin boyun eğriliğini ve yarıçapını doğru şekilde ölçmek zordur. Bu nedenle birçok araştırmacı sünek malzemelerin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme modellerini belirlemek için sonlu elemanlar analizini hata oranını en aza indirme teknikleriyle birlikte kullanmaya çalışmışlardır (Zhang ve Li 1994, Joun vd. 2007, Joun vd. 2008, Tao vd. 2009, Kamaya vd. 2015, Wang vd. 2016, Cai vd. 2023).

Sonlu elemanlar analizi (SEA), çoğunlukla matematikçiler, mühendisler ve bilim insanları tarafından kullanılan bir bilgisayar simülasyon tekniğidir (Huebner vd. 2001, Pathare ve Opara 2014). Bir ürünün gerçek hayatta maruz kalacağı kuvvetlere, titreşime, ısıya, akışa ve diğer fiziksel etkilere nasıl tepki vereceğini tahmin etmek için kullanılabilen sayısal bir simülasyon tekniğidir. SEA, bir ürünün kırılıp kırılmayacağını, yıpranıp yıpranmayacağını veya tasarlandığı şekilde çalışıp çalışmayacağını gösterebilir.

Diğer sayısal tekniklerde olduğu gibi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve SEA son zamanlarda birçok endüstride güçlü ve yaygın bir araç haline gelmiştir. Çözümler matematiksel fizik, sayısal yöntemler, kullanıcı arayüzleri ve fütüristik görselleştirme tekniklerinin zengin bir dokusunu temsil etmektedir (Norton ve Sun 2006, Xia ve Sun 2002). SEA'daki mühendislik hesaplamalarının temel amacı, mühendislik tasarımları ve kararları oluşturmaya ve haklı çıkarmaya yardımcı olan, fiziksel sistemlerin belirli

dayatılan koşullara tepkisiyle ilgili bilgiler elde etmektir. Sonlu elamanlar yöntemi mühendisler tarafından yapısal analizler yürütmek için kullanılan baskın strateji olmaya devam etmektedir (Biancolini ve Brutti 2003).

Analiz edilecek malzemenin mukavemetinin bilinmesi, karar vermede önemli bir unsur olarak tanımlanmıştır (Kheyr ve Mortezaei 2007). Basit tasarım ve değerlendirme prosedürlerinin kullanımı, özellikle mukavemet, elastik olmayan davranış, tepki ve yük dağılım özellikleri gibi birçok malzeme parametresi bilinmeden gerçekçi bir değerlendirmeye tabii tutulamaz. Bu davranışları tahmin etmek için kapsamlı analitik veya deneysel yöntemlerin kullanılması gerekir fakat bu yöntemler birçok durumda yeterince ekonomik değildir. Bu yüzden dolayı SEA birçok yapı için bu koşulları hem ekonomik hem de daha kısa bir sürede gerçekleştirme potansiyeline sahiptir (Cook vd.2002, De Borst vd. 2012, Hughes 2012, Schaldach vd. 2000). SEA sıklıkla çeşitli zaman alıcı ve pahalı deneysel testlere bir alternatif olarak kullanılır ve herhangi bir tasarım konseptini simüle etmede aynı zamanda bu konseptin hemen hemen her ortamdaki davranışını belirlemede yararlı olduğunu kanıtlamıştır (Rao 2010, Sirekha ve Bashetty 2010). Sonuç olarak SEA, prototip oluşturmaya, zaman ve kaynak israfına gerek kalmadan, bir model geliştirilip tutarlılığı doğrulandıktan sonra yeni bir tasarım olasılığını değerlendirmeye yardımcı olmaktadır (Chandrupatla vd. 2002, Delele vd. 2010, Rao 2010, Reh vd. 2006, Sirekha ve Bashetty 2010).

Yük altında davranışları merak edilen malzemelerin bu koşullar altındaki davranışını SEA’da modelleyebilmek için o malzemeye ait mekanik özelliklerin iyi bilinmesi ve SEA modellemesine aktarılması gerekmektedir. Malzemeyi tanımlayan özelliklerin başında gelen elastisite modülü, akma mukavemeti gibi son derece önemli olan parametreler birçok kişi tarafından bilinse de özellikle şekil değiştirmenin çok hızlı olduğu çarpma ve patlama gibi durumlarda yeterli parametreler değildir. Ancak hem her hızda hem de her sıcaklık için tek tek deney yapmak imkansızdır. Bunun yerine bu davranışların tanımlanabilen temel davranış modellerini programa girmek gerekir. Bu programlar interpolasyon ve ekstrapolasyon tekniğini kullanarak her durum için anlık değışimleri çözüm modeline uygular (Çetkin 2022).

Bu çalışmada Johnson Cook akış gerilmesi ve hasar parametrelerini elde etmek için

Ti6Al4V alaşımının toz metalurjisi ile farklı çentik değerlerine sahip dairesel numuneler etildikten sonra tek eksenli çekme deneyine tabii tutularak gerilim-gerinim eğri grafiği elde edilmiştir. Sonlu elemanlar paket programlarında dairesel numune simetrik olarak modellenmiş ve tek eksenli çekme deneyinden elde edilemeyecek veriler elde edilerek, her iki veriyle birleştirilip regresyon ve eğri uydurma tekniği yardımıyla Johnson-Cook (JC) parametreleri elde edilmiştir. Yapılan alışmayla Split Hopkinson Pressure Bar testi vb. testler yerine daha ekonomik olarak benzer sonuçlara ulaşılabildiği görülmüştür.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, makine mühendisliğinin en eski bilimsel çalışmalarından biridir. Özellikle otomobil, havacılık ve askeri endüstrilerde daha güçlü, daha hafif ve dayanıklı mühendislik malzemelerine yönelik yoğun bir talep oluşmaktadır. Bunun yanı sıra malzemenin mekanik özelliklerin belirlenmesi esas olarak deneysel testleri gerektirmektedir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde deneylerin ekonomik olmadığı bir gerçektir. Yapının malzeme özelliklerini karakterize etmek için yapılan deneysel testler çok pahalı olduğundan, malzemenin yapısal tepkisini tanımlayan hesaplamalı araçlara olan ihtiyaç gün geçtikçe daha da artmaktadır (Reichert 2010).

Bilgisayar becerilerindeki gelişmeyle birlikte malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlama çabasında olan araştırmacılar dikkate değer ölçüde hesaplamalı simülasyonlara yönelmiştir. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) yazılımlarının geliştirilmesi, bilim adamlarının ve şirketlerin araştırma harcamalarını azaltmasına ve çok fazla testten kaçınmasına olanak tanımıştır. Sonlu elemanlarda herhangi bir malzemenin mekanik tepkisini ölçmek için bünye denklemleri olarak bilinen malzeme modellerine ihtiyaç vardır. Bu modeller mühendislik malzemelerinin tüm mekanik özelliklerini, gerilim-gerinim durumlarını birbirine bağlayan kurucu modellere ihtiyaç duymaktadır. Birçok alaşımın akma dayanımının artan deformasyon hızıyla arttığı deneysel testlerde görülmüştür. Yani metaller deformasyon hızı yüksek olduğunda deformasyona daha fazla direnç gösterirler. Tam tersi, sıcaklık yükseldiğinde ise daha sünek deformasyon davranışı gösterir. Bu nedenle herhangi bir kurucu modelin, malzeme davranışını doğru şekilde tanımlamak için deformasyon hızını ve sıcaklık etkilerini içermesi gerekir.

Belirli deformasyon hızı, sıcaklık ve yük altında malzemelerin nasıl davranış sergileyeceği kritik öneme sahiptir. Bu parametreler malzemenin mukavemetini, sünekliğini ve dayanıklılığını doğrudan etkiler. Bu yüzden dolayı belirli uygulamalar yapılmadan önce o malzemenin kullanım amacına uygun olup olmadığı anlamak için fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerini belirlemek için teste tabii tutulur.

2.1 Malzeme Muayene Yöntemleri

Malzeme test yöntemleri, malzeme seçimi ve seçilen bu malzemenin görevini yerine getirip getirmeyeceğini belirlemek için veya malzemenin kimliğini oluşturan nitelikleri belirlemek için yapılan deney silsilesidir (Çetkin 2022). Malzeme test yöntemlerinin iki ana hedefi vardır. Bunlardan biri ve en önemlisi malzeme satışa sunulmadan önce hatalarının tespiti. Diğer ise iş parçasının, yük esnasında oluşacak gerilmeye nasıl tepki vereceğini önceden görmektir. Malzeme test yöntemlerinin fazlalığı, bu yöntemler arasında seçim yapmayı kolaylaştırmakla birlikte seçim yapılırken öncelikli olarak test yönteminin istenilenleri karşılaması ve maliyeti dikkate alınır. Çünkü bazı yöntemler pahalı donanımlar ve eğitimli kişiler istemektedir. Temel olarak malzeme test yöntemleri iki ana kategoriye ayrılabilir:

- i. Tahribatsız testler
- ii. Tahribatlı testler.

2.1.1 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız test yöntemi, kalite kontrol için en önemli aşamalardan birisi olup, üretimi tamamlayıcı son noktadır. Tahribatsız test yöntemi, tahribatlıya kıyasla daha az zaman alıcı, ekonomik ve daha zahmetsiz bir yöntemdir. Günümüzde mümkün olduğunca üretim süreçlerinin kontrolünde, üretim maliyetlerini düşürüp kalite seviyesini korumak ve ürün bütünlüğüne zarar vermemek için imalat ve hizmet içi denetimlerde kullanılmaktadır. Ultrasonik test, radyografik test, manyetik parçacık testi, sıvı penetrant testleri tahribatsız test yöntemlerine örnek olarak verilebilir.

2.1.2 Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Tahribatlı test yöntemleri genellikle emek isteyen, uzman kişilerin yardımıyla yapılması mümkün olan test yöntemleridir. Çeşitli ortam şartlarında ve sıklıkla taşınabilir olması zor olan, ekipmanları taşıyarak sahada birkaç saat çalışması gerekebilecek eğitimli ve yetenekli personel gerektirmektedirler. Ek olarak birçok durumda yeterince doğru veriler elde etmek için birden fazla ölçüm alınması gerekmektedir. Bazı yöntemler ise operatörün

ölçümleri ne kadar titizlikle gerçekleştirdiğine bağlıdır. Düzgün yapılmadığı takdirde önemli hatalara ve sapmalara yol açabilmektedir. Yarı veya tam otonom yöntemler arasında sıkı bir entegrasyon yapıldığı takdirde ölçüm tutarlılığı, doğruluğu ve hassasiyeti arttırabilir. Çekme-basma testi, sertlik testi, aşınma testi, üç nokta eğilme testi, Charpy darbe testi, yorulma testi, sürünme testi vb. gibi testler tahribatlı test yöntemlerine örnek olarak verilebilir. Özellikle çekme deneyi malzemeye ait temel imalat bilgilerini verdiği için metal endüstrisinde sık kullanılan bir deney yöntemidir.

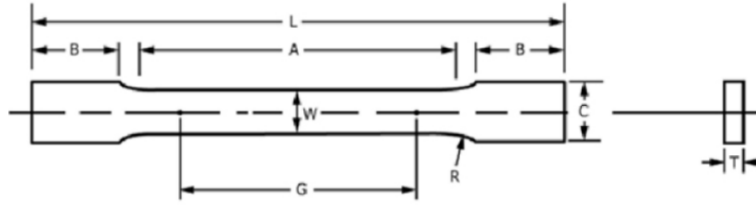
2.1.2.1 Çekme Deneyi

Metal malzemelerin çekme deneyi, metallerin çeşitli malzeme özelliklerini belirlemek için önemli bir nicel yöntem olmakla birlikte bilimsel araştırma ve mühendislik alanlarında en yaygın kullanılan test yöntemlerinden biridir (Huang vd. 2022, Quanjin vd. 2020, Tvergaard 1993). Geleneksel metal çekme deneyleri malzeme özelliklerini ölçmek için bir çekme test makinesi ve ekstansometre kullanmaktadır. Ancak bu yaklaşım yalnızca elastik aşamadaki sınırlı deformasyon sonuçlarını yakalayıp metal numunenin maruz kaldığı çekme davranışının diğer aşamalarını ele alamaz. Aynı zamanda boyun vermeyi, nihai uzamayı ve diğer temel malzeme parametrelerini çekme testlerinden sonra sıklıkla manuel olarak ölçülmesi gerekir. Fakat boyun bölgesinin gerilim-şekil değiştirme eğrisi de dahil olmak üzere, bir çekme testinin tüm aşamaları boyunca birden fazla malzeme özelliğini kapsamlı bir şekilde ölçmek için uzman kişilere ve son derece hassas gelişmiş ölçüm araçlarına sahip olmak gerekmektedir (Peters ve Ranson 1982, Peters vd. 1983).

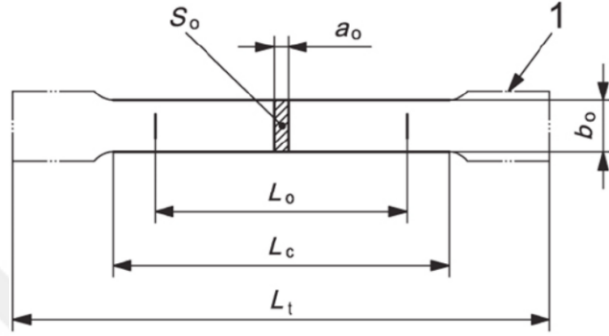
2.1.2.2 Çekme Deneyi Standartları

Çekme deneyi, uluslararası standartlara göre hazırlanmış numunenin deney cihazında belirli bir hız ve sıcaklıkta koparılması işlemidir. Bu değişkenler için ISO 6892-1:2016 ve ASTM E8:2016 vb. standartlar kullanılmaktadır.

Şekil 2.1’de sac şeklinde dikdörtgen kesitli çekme numunesi görülmektedir. Buna istinaden Çizelge 2.1’de dikdörtgen kesitli sacın özelliklerini tanımlayan ölçüler de verilmiştir. Aynı şekilde ASTM E8 standardında dikdörtgen şekline sahip sac Şekil 2.2’de ölçüler ise Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sac tipinde dikdörtgen şekilli çekme deney numunesinin ASTM E8:2016 tanımlanmış ölçüleri (İnt.Kyn.1)



Şekil 2.2 Sac tipinde dikdörtgen şekilli çekme deney numunesinin ISO 6892-1:2016 standardında tanımlanmış hali (İnt.Kyn.2)

Çizelge 2.1 ISO 6892-1 standardında sac şeklindeki numunenin uzunluk değerleri

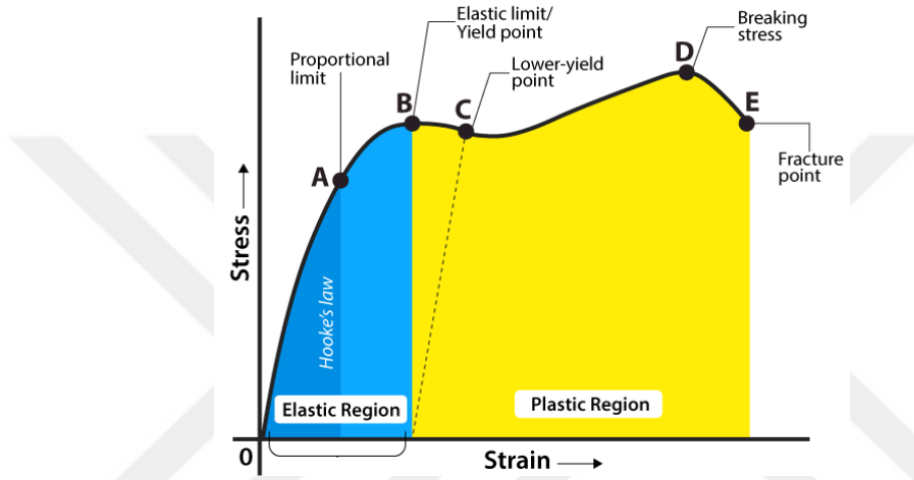
Numune Boyutu		(mm)
L_0	İlk ölçü uzunluğu	80
b_0	Gövde genişliği	20.0 ± 1.0
L_c	En küçük gövde uzunluğu	90
L_c	Önerilen gövde uzunluğu	120
L_T	Numunenin kavrama uçları arasında kalan gövde uzunluğu	140

Çizelge 2.2 ASTM E8 standardında sac şeklindeki numunenin uzunluk değerleri

Numune Boyutu		(mm)
G	İlk ölçü uzunluğu	200.0 ± 0.2
W	Gövde genişliği	40.0 ± 2.0
T	En küçük gövde uzunluğu	5
R	Önerilen gövde uzunluğu	25
L	Numunenin kavrama uçları arasında kalan gövde uzunluğu	450
A	En küçük numune gövde uzunluğu	225
B	Numune kavrama uçları uzunluğu	75
C	Gövde genişliği	50

2.2 Metalik Malzemelerin Elastik-Plastik Bölgedeki Davranışları

Malzemelerden parça imal edilirken çoğunlukla maruz kaldığı yük altında aşırı deformasyona uğrayıp kalıcı şekil değiştirmesi ve kırılarak hasara uğraması istenmez. Elastik bölge ise malzeme üzerinden yükleme kaldırıldığında kalıcı bir deformasyonun gözlenmediği bölgeye denir. Bazı malzemelere ise akma gerilmesinden daha büyük bir gerilim uygulandığında malzemede kalıcı şekil değişimi meydana gelmesiyle plastik deformasyon oluşur.



Şekil 2.3 Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde elastik ve plastik bölgeler (İnt. Kyn.3)

Genelleştirilmiş Hooke Yasası, artan gerinmenin bir sonucu olarak artan gerilmeye bağlı olarak yazılabilir. Basit bir eksenli yükleme için malzemenin elastik davranışı aşağıda verilen denklemde olduğu gibi tanımlanabilir.

$$\sigma_x = E \varepsilon_x, \sigma_y = -\gamma \frac{\sigma_x}{E}, \sigma_z = -\gamma \frac{\sigma_x}{E} \quad (2.1)$$

Burada $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ sırasıyla x, y ve z eksenindeki gerilmeyi, E malzemenin elastiklik modülünü, γ ise malzemenin Poisson oranıdır. Üç farklı yönde genelleştirilmiş Hooke kanunu aşağıda verilen şekilde yazılabilir. Bu denklemler elastiklik bünye denklemleri olarak da adlandırılır.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \gamma (\sigma_y + \sigma_z)) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \gamma (\sigma_x + \sigma_z)) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \right) \quad (2.4)$$

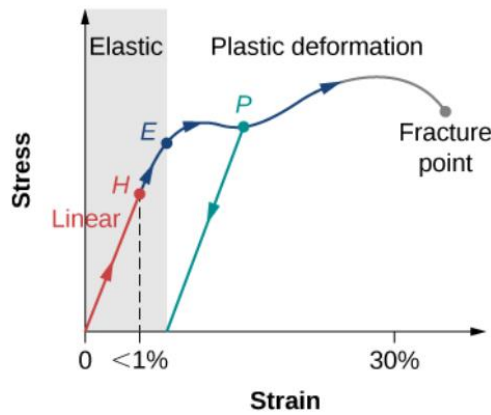
Aynı şekilde kayma gerinimleri de aşağıdaki şekilde verilir.

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (2.5)$$

G, Denklem 2.6'da verildiği gibi E elastik modülüne bağlı, homojen izotropik malzemelerin kayma modülünü verir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

Elastik sınırının ötesindeki gerilmeler için malzeme, plastik davranış sergiler. Bu davranış, malzemenin geri dönülmez şekilde deforme olduğunu, yüklemeyi kaldırılsa bile orijinal şekil ve boyutuna geri dönmediği anlamına gelir. Gerilme elastik sınırın üzerine kademeli olarak arttırıldığında malzeme plastik deformasyona uğramaya başlar. Gerilim ve gerinim arasındaki ilişkiyi gerilim-gerinim grafiği üzerinden açıklanabilir. Her malzemenin kendine ait karakteristik gerinim-gerilme eğrisi vardır. Şekil 2.6'da yük altında olan sünek bir metal için tipik gerilim-gerinim grafiği gösterilmektedir. Bu grafikte yük kademeli olarak arttırıldığında, yüksüz noktada (orijin) doğrusal davranış (kırmızı çizgi), H noktasındaki doğrusallık sınırı sona erer. H noktasının ötesindeki yük artışları için gerilme-gerinim ilişkisi doğrusal değildir ancak yine de elastiktir. Şekil 2.4'de H ve E noktaları arasında doğrusal olmayan bu bölge görülmektedir. Daha büyük yükler gerilimi, elastik davranışın sona erdiği ve plastik deformasyonun başladığı elastiklik sınırı E'ye taşır. Fakat esneklik sınırının ötesinde, yük kaldırıldığında, örneğin P'de malzeme yeşil çizgi boyunca yeni bir şekil ve boyut halini alır.



Şekil 2.4 Yük altındaki bir metal için tipik gerilim-gerinim grafiği (İnt.Kyn.4)

Bir malzemenin plastik akışı, belirli bir gerilme kombinasyonu ile belirli bir sınır değerini aştıktan sonra oluşur. Plastik akış koşulu, asal gerilme terimleri ile şu şekilde ifade edilebilir;

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (2.7)$$

Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilme yönlerindeki asal gerilmelerdir. Gerilim bileşenleri eşik bir değeri aştığında akma başlar. Akma olayının başlangıç noktasını tanımlamak için farklı akma kriterleri tanımlanmıştır. Şekil 2.5’de akma kriterleri yüzeyleri farklı araştırmacıların kriterlerine göre değişim göstermektedir. Birçok araştırmacı yeni akma kriterleri önermesine rağmen yaygın olarak kabul edilen, maksimum kayma gerilmesine dayanan Tresca akma kriteri, eşdeğer gerilme, çarpılma-biçim değiştirme teorisine dayanan Von Mises akma kriterleridir.

Tresca akma kriteri sünek malzemeler için çok iyi sonuçlar vermekle birlikte Tresca akma kriterine göre malzemenin herhangi bir bölgesinde akmanın başlaması için, o bölgedeki maksimum kayma gerilmesinin, tek eksenli çekme halinde akma sınırındaki kayma gerilmesine eşit veya büyük olması gerekir. Bu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\tau_{mak} > \tau_{ak} \quad (2.8)$$

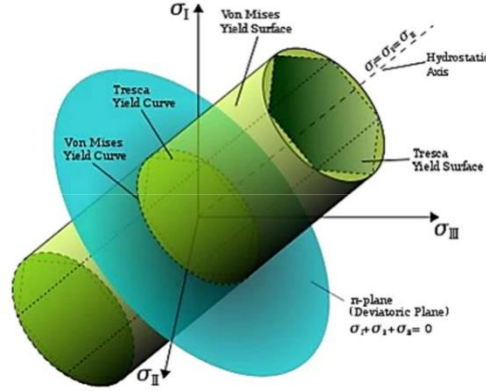
Von Mises akma kriteri teorisine göre, bir bölgedeki tüm kombine gerilmelerden dolayı oluşan enerji, test numunesine verilen enerjiye ulaşırsa, verimin bu noktada başladığı farz edilir. Bu kriterin yardımıyla birden fazla eksenli gerilme durumunu tek eksenli gerilme durumuna indirgeyerek birden fazla gerilme yerine de bir tane eşdeğer gerilme tanımlamaktadır. Bu eşdeğer veyahut efektif gerilme, akma noktasını aştığında o noktaya akma oluşumu olarak belirtilmektedir.

$$\sigma_{ef} \geq \sigma_{ak} \quad (2.9)$$

Eşdeğer gerilmenin normal ve kayma gerilmesi terimleri ile veya asal gerilme terimleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (2.11)$$



Şekil 2.5 Akma kriteri yüzeyleri (Glazoff 2014)

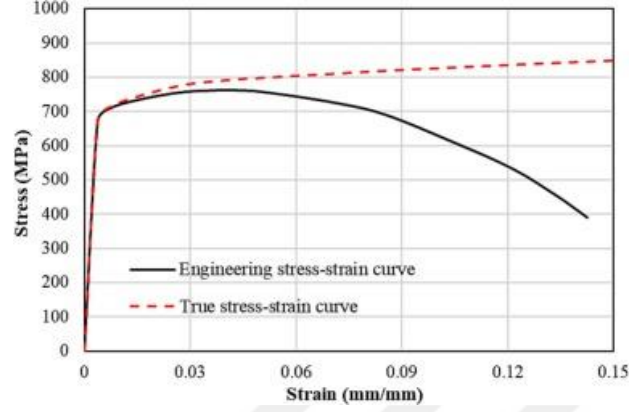
2.2.1 Mühendislik Gerilmesi – Gerçek Gerinme

Malzemelerin sahip oldukları özelliklere ait akma mukavemeti, kopma mukavemeti gibi dayanım değerleri vardır. Bu değerlerin elde edilmesi için çekme deneyi yapılır, deney sonucunda gerilim-gerinim eğrileri elde edilir. Böylece malzemenin ne zaman akmaya uğrayacağı, maksimum dayanabileceği nokta ve ne zaman kopacağına dair bilgilere ulaşılır. Gerçek gerilme, çekme testi boyunca malzemede gerçekleşen anlık kesit daralmasını hesaba katar. Mühendislik gerilmesi ise deney süreci boyunca kesitte meydana gelen kesit daralmasını dikkate almayıp, başlangıçtaki kesit alanını dikkate alır.

Her ne kadar Dijital Ölçü Korelasyonu (DIC) gibi gelişmiş ölçüm teknikleri olsa da bunların hala sınırlandırmaları vardır. Birincisi, yüzey gerinimini ölçebildiğini ancak kesit içindeki gerinimi yakalayamadığını; ancak kesit içindeki plastik şekil değiştirmenin çelik yapıların kopmasında/kırılmasında büyük rol oynadığını belirtmişlerdir. Bu sebeplerden dolayı hem test verilerini hem de sonlu elemanlar analizini kullanarak gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrisini oluşturmuşlardır (Jonas 2019).

$$\sigma_{tr} = \sigma_y(1 + \varepsilon_{eng}), \varepsilon_{tr} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (2.12)$$

Burada σ_{tr} , ϵ_{tr} , ϵ_{eng} , σ_y sırasıyla gerçek gerilme, gerçek gerinme, mühendislik gerinmesi ve akma gerilmesidir.



Şekil 2.6 Mühendislik ve gerçek gerilme-gerinme eğrisi (Cai vd. 2023)

Zhano ve Li (1994), yapmış oldukları çalışmada gerçek gerilim-gerinim ilişkisi için parametrelerin, amaç olarak deneysel bir yük-uzama eğrisi ile iteratif sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmesi önerisinde bulundular. Bu yöntemle deforme olmuş deney numunesi boyutlarının ölçümleri yapılmadan tek eksenli gerilme testi sonuçlarından gerçek gerilme-gerinme ilişkilerini kursa da asıl eksiklik boyun verme esnasında parçada oluşan karmaşık gerilim-gerinim ilişkisinin bilinmeyen bir deneme-hata prosedürü olarak ele alınmasıdır. Deney sonuçları ile iyi bir korelasyon elde edilene kadar bir dizi gerilme aralığı için kullanılır.

Zhano ve Li (1994) önerdiği yöntem hesaplama açısından uzun ve zaman alıcıdır. Ling (1996), numunenin boyun vermesi esnasında tek gerilmeli gerçek gerilmeye karşı gerçek gerilme ilişkisini belirlemek için ağırlıklı ortalama yöntemini önermiştir. Bu yöntemle boyun verme esnasında gerçek gerilim-gerinim fonksiyonu için birer alt ve üst sınırın tanımlanması gerektiğini, gerçek gerilim-gerinim ilişkisini bu iki sınırın ağırlıklı ortalaması olarak ifade etmektedir.

Ling (1996) önerdiği yönteme göre akış eğrisinin gerinim sertleştirme bölgesini temsil eden bir güç yasası uyumu alt sınır olarak kullanılabilirken doğrusal gerinim sertleştirme modelinin üst sınırı olarak da kullanılabilir. Örneğin ağırlıklı ortalama yöntemine dayanarak gerçek gerilme-gerinme ilişkisi;

$$\sigma_{tr} = \sigma_{tr-u} \left[\left(C \frac{\varepsilon_{tr}}{\varepsilon_{tr-u}} \right)^n (1 - C)(1 + \varepsilon_{tr} - \varepsilon_{tr-u}) \right] \quad (2.13)$$

Burada C bilinmeyen ağırlık katsayı sabiti, σ_{tr} gerçek gerilme, ε_{tr} gerçek gerinme, σ_{tr-u} ve ε_{tr-u} nihai gerilme mukavemeti (σ_u) ile ilişkili tanımlanan gerçek gerilme-gerinme n değeri deneysel sonuçların analizi ile farklı çelik kaliteleri için uygun bir n değeri belirlenir.

2.2.2 Pekleşme Sertleşmesi

Malzemenin gerilim-gerinim eğrisindeki elastik bölgede doğrusal olarak ilerlerken elastik bölgede orantılı değildir. Herhangi bir malzemenin akma dayanımının ötesine ulaşıldığında malzeme plastik olarak deforme olur. Akma noktasından sonra her malzeme kendine özgü gerilme-gerinme davranışı sergiler. Gerilme, akma sınırının üstünde bir değere ulaştığında ve elastik gerilme sıfıra eşit olduğunda sabit kalırsa, bu tip malzemelere mükemmel plastik denir. Elastik deformasyon sıfır olmadığı ve plastik deformasyon esnasında akma değerinin sabit olduğu noktada malzeme, elastik ve mükemmel plastik olarak modellenebilir.

“Sertleşme” teriminin topluluklara bağlı olarak çeşitli (ilişkili) anlamları vardır. Model türlerine ve değişkenlere (örneğin izotropik veya kinematik sertleşme gibi) atıfta bulunmak için akma gerilimindeki artışı ifade etmek veya bir noktadaki düzensizlik düzeyini tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Ayrıca, pekleşme sertleşmesi ve etkileri yalnızca uygulanan yükün genliğinin bir fonksiyonu olmayıp aynı zamanda uygulanan gerinim oranı gibi diğer faktörlerden etkilenen bir parametredir (Hoffmeister vd. 2011).

Yapısal metalik alaşımların işlenerek sertleşme davranışını tanımlayan gerilim-gerinim ilişkileri vardır. Bu ilişkiler iki kategoriye ayrılır. İlk olarak, gerilim ve gerinim kuvvet fonksiyonuyla ilişkilendirilen; burada mukavemet, gerilimle birlikte kopmaya kadar devam eder. İkinci olarak da gerilimi uzatılmış plastik şekil değiştirmede mukavemetin azaldığı negatif bir şekil değiştirme üstel değeriyle ilişkilendirmeler vardır (Jankowski 2023).

Metallerin maruz kaldıkları yük altında elastik bölgeyi geçtikten sonra kalıcı şekil değişimine uğraması ve buna istinaden mukavemet ve sertlik değerlerinin artmasına pekleşme denir. Diğer bir ifadeyle pekleşme, akma yüzeyinin şeklinin ve boyutunun

plastik deformasyon ya da yükleme süresince değişmesidir. Malzemeler plastik bölgede deformasyona uğradıklarında malzemenin direnci bir miktar artmaktadır. Metal ve alaşımlarının plastik davranışını tanımlayan Hollomon denklemi aşağıdaki gibidir (Hollomon 1945, Choudhary vd. 2001).

$$\sigma = K_H \varepsilon^{n_H} \quad (2.14)$$

Burada σ gerçek gerilmeyi, ε gerçek plastik gerinmeyi, K_H sertleşme katsayısını ne n_H ise gerinme pekleşme üstelini tanımlamıştır. Değişken akma ve benzer gerilme sertleştirme davranışı gösteren veyahut farklı sertleştirme davranışı ama benzer akma mukavemeti sergileyen malzemeler için akma ve gerinim sertleşmesi aynı işlemlerle tarif edilemez. Burada Hollomon tarafından verilen güç yasası ilişkisine ek bir tanım olarak mekanik değişim hikayesinin getirilmesi gerekliliğini doğurdu. Bu, düşük gerinmelerde akma nedeniyle pozitif sapmayı açıklayabilen ek bir gerilme terimi σ_0 ile başarılı olmuştur.

$$\sigma = \sigma_0 + K_L \varepsilon^{n_L} \quad (2.15)$$

Ludwik ilişkisinde olduğu gibi (Ludwik 1909) veya Swift tarafından önerildiği gibi malzemede kalmış olan ön gerinmeyi açıklayabilen ilave bir gerinme terimiyle tanımlanabilir (Swift 1952).

$$\sigma = K_S (\varepsilon_0 + \varepsilon)^{n_S} \quad (2.16)$$

Denklem 2.15 ve Denklem 2.16'da K_H ve K_S , sırasıyla Ludwik ve Swift denklemleri için güç katsayılarıdır. n_L ve n_S , sırasıyla Ludwik ve Swift denklemleri için gerinim sertleşme üstelleridir. Ludwingson ise istifleme hata enerjisi düşük olan bazı malzemelerin Hollomon ilişkisi ile tarif edilemediğini göstermiştir. Düşük gerinme değerlerinden elde edilen Hollomon'un denkleminde, büyük pozitif gerilme sapmasının ek bir terim kullanılarak aşılabileceğini önermiştir.

$$\sigma = K_1 \varepsilon^{n_1} + e^{K_2 + n_2 \varepsilon} \quad (2.17)$$

Burada K_1 , n_1 sırasıyla Hollomon denkleminde bulunan K_H , n_H ile aynıdır. K_2 , n_2 ise Ludwigson tarafından önerilen ek sabitlerdir (Ludwigson 1952).

Daha yüksek gerilme-gerinme davranışlarında ise gerilime doygunluk gösteren malzemeler söz konusu olduğunda, Voce farklı bir ilişki önerdi (Voce 1948).

$$\sigma = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_1)e^{n_v \varepsilon} \quad (2.18)$$

2.3 Akış Gerilmesi Modelleri

Akış gerilmesi, malzemeleri plastik olarak deforme sürecine devam etmek için gerekli gerilme değerini tanımlamada kullanılan bir terimdir (Lin vd. 2008). Sürekli olarak ortam mekaniğinde belirli bir malzemeye ait bu değer sıcaklık, gerilme-gerinme oranına bağlı olarak Denklem 2.19'daki haliyle yazılabilir.

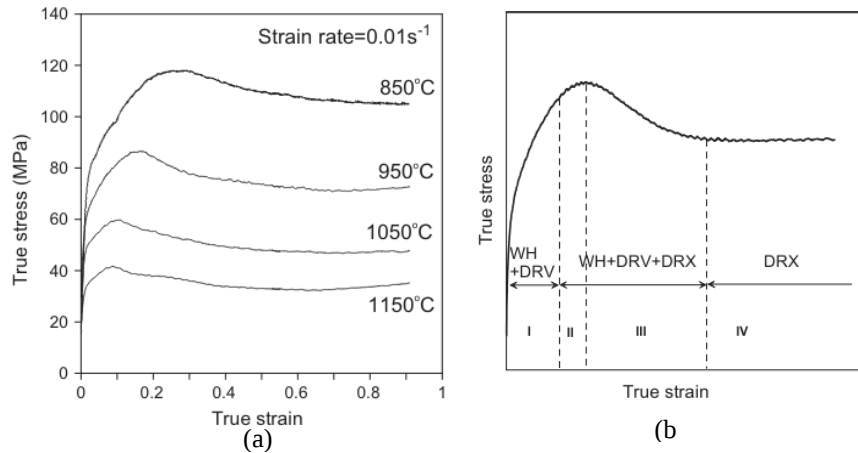
$$\bar{\sigma} = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (2.19)$$

Malzemelerin sıcak şekillendirme esnasında malzeme akış davranışı genellikle karmaşıktır. Sertleşme ve yumuşama mekanizmalarının her ikisi de gerinim, gerinim hızı ve şekillendirme sıcaklığı gibi birçok faktörden önemli ölçüde etkilenir. Bir yandan termo-mekanik parametrelerin belirli bir kombinasyonu belirli bir metalurjik olguya yol açmakla birlikte öte yandan, sıcak şekillendirme işlemi sırasında metalin mikroyapısındaki değişiklikler, metalin akma gerilimi gibi mekanik özelliklerini etkilediğinden dolayı şekillendirme işlemini de etkiler. Metallerin ve alaşımların sıcak deformasyon koşullarındaki akış davranışlarının anlaşılması, metal akış düzeni üzerindeki etkili rolünün yanı sıra metalurjik dönüşümün kinetiğini (statik, dinamik ve yeniden kristalleşme davranışları) tanımlamak içinde önemlidir (Lin vd. 2008, 2009).

Yapısal ilişkiler genellikle metallerin ve alaşımların plastik akış özelliklerini geçerli yükleme koşulları altında mekanik parça elemanlarının tepkisini belirlemek için bilgisayar kodunda kullanılabilecek bir biçimde tanımlamak için kullanılır. Bu esnada sayısal simülasyonlar ancak uygun bir kurucu model oluşturulduğunda gerçek anlamda güvenilir olabilir. Bu nedenle deneysel olarak ölçülen verilere dayanarak bir dizi

araştırma grubu, metallerin ve alaşımların sıcak deformasyon davranışlarını açıklamak için bünyesel denklemler geliştirmek için çaba sarf etmişlerdir (Lin ve Chen 2011).

Yapısal denklemler, genellikle metallerin termal deformasyon sırasındaki akış davranışını incelemek ve analiz etmek için kullanılır. Bunlar sayısal simülasyon ve şekillendirme işlemlerinin parametre optimizasyonu için önemli bir temel sağlar (Sung vd. 2010, Anand 1985). Yapısal denklemlerin oluşturulması için malzeme farklı sıcaklık ve gerinim hızlarında teste tabii tutulmalıdır. Test edilen tüm koşullar için sıcaklık ve gerinim hızının akış gerilimi üzerindeki etkisinin önemli olduğu açıktır. Gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrileri, küçük bir gerinimdeki en yüksek gerilimi sergiler, bundan sonra akış gerilimleri yüksek gerinimlere kadar monoton olarak azalır ve dinamik bir akış yumuşaması gösterir. Gerilme seviyesi, deformasyon sıcaklığının artması ve gerinim oranının azalmasıyla azalır. Bunun nedeni, daha düşük gerinim oranlarının ve daha yüksek sıcaklıkların enerji birikimi için daha uzun süre sağlaması ve dinamik olarak yeniden kristalleşmiş tanelerin çekirdeklenerek büyümesi ve dislokasyonun yok edilmesi için malzeme sınırlarında daha yüksek hareketlilik sağlayıp akış gerilmesi seviyesini düşürmesidir. Aynı zamanda, pekleşme sertleşmesi ve termal olarak aktifleşen bölgenin yumuşama mekanizmalarının birleşik etkisi nedeniyle deneylerden elde edilen akış gerilimi Şekil 2.7(b)'de görüldüğü üzere dört farklı aşamada oluşur; Aşama I (pekleşme sertleşmesi aşaması), Aşama II (Geçiş aşaması), Aşama III (Yumuşama aşaması) ve Aşama IV (Sabit aşama) (Lin ve Chen 2011).



Şekil 2.7 (a) 0.01 s⁻¹ gerinim hızıyla farklı sıcaklıklarda 42CrMo çeliği için tipik gerçek gerilim-gerinim eğrileri; (b) Tipik akış gerilme eğrisi (Lin ve Chen 2011).

Yapısal denklemleri oluşturmak için farklı sıcaklıklarda birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin Lin vd. (2008), yapmış oldukları çalışmada 42CrMo çeliğine ait geniş şekillendirme sıcaklığı ve gerinim hızı üzerinde yapılan bazı termo-mekanik deneylerden şunları elde etmişlerdir:

- (1) Şekillendirme işleminin ilk aşamasında, pekleşme sertleşmesinin baskınlığından dolayı gerilimin aniden zirveye çıktığını;
- (2) Sıcaklık sabitken gerinim hızı arttığında veya gerinim hızı sabit tutulurken sıcaklık düştüğünde, artan pekleşme sertleşmesine bağlı olarak akış eğrisinin genel seviyesi buna uygun olarak arttığını;
- (3) Pekleşme yumuşaması ve pekleşme sertleşmesinin dengesi nedeniyle akış gerilimi kararlı durum bölgesini gösterir. Şekil 2.7(a)'da 42CrMo çeliğinin sıcak sıkıştırılmasından elde edilen tipik gerçek gerilim-gerinim eğrilerini göstermektedir.

Bilim adamları farklı malzeme ve deformasyon koşulları için genel olarak üç kategoride tanımlanabilecek çeşitli kurucu modeller önermişlerdir; Fenomenolojik modeller (Wu vd. 2013), fizik tabanlı modeller (Zerilli ve Armstrong 1987) ve yapay sinir ağı modelleri (Han vd. 2013) önermişlerdir. Yaygın fenomenolojik modeller Johnson-Cook (JC) (Johnson 1983, Liu vd. 2020) ve Arrhenius (Liu vd. 2020, Sellars ve McTegart 1966) modellerini içermektedir. Özellikle JC modeli daha az malzeme parametresi ve daha az hesaplama yapmanın verdiği avantaj nedeniyle malzemelerin mekanik davranışını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan, gerinim hızı ve sıcaklığın malzemelerin reolojik davranışı üzerindeki etkilerini içerir. Örneğin JC malzeme modelinde eşdeğer gerinme üç ana fenomene bağlanmıştır. Denklem 2.20'deki JC modelindeki gerinim güçlendirmesi (I), gerinim hızı etkisi (II), termal yumuşama etkisi (III) terimleri birbirinden ayrılmış ve birbirinden bağımsızdır (Lin ve Chen 2011, Jia vd. 2021).

$$\sigma_{eq} = \left[(A + B\epsilon_{eq}^n) \right]^I [(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)]^{II} [(1 - T^{*m})]^{III} \quad (2.20)$$

Her ne kadar kullanım kolaylığı ve hesaplama açısından JC akış gerilmesi modelindeki parametreler birbirinden bağımsız olsa da genellikle gerilim hızı ve termal yumuşamanın eşdeğer gerilme üzerindeki etkilerini tam olarak temsil etmekte başarısız olunmaktadır.

2.3.1 Fenomonolojik Kurucu Modeller

Ampirik gözlemlere dayalı olarak akış gerilmesinin bir tanımını sağlamakla birlikte bazı matematiksel fonksiyonlardan oluşur. Fakat fenomenolojik kurucu modeller, deneysel gözlemlere tam olarak uyan fiziksel parametrelerin eksikliği görülmektedir (Lin ve Chen 2011). En dikkat çeken özelliği ise malzeme sabitlerinin sayısını azaltması ve kolayca kalibre edilebilmesidir. Ancak ampirik özelliklerinden dolayı genellikle sınırlı uygulama alanlarında (sınırlı gerinim hızı ve sıcaklık aralığını kapsayan) kullanılmakla birlikte azaltılmış esneklik sağlarlar. Sık kullanılan bazı fenomenolojik modeller aşağıdaki gibidir.

- i) Johnson-Cook (JC) modeli
- ii) Khan-Huang (KH) modeli
- iii) Khan-Huang-Liang (KHL) modeli
- iv) Fields-Backofen (FB) modeli

Bu modellerden biri olan KH modeli için Khan ve Huang (1992) iri taneli Al 1100'ün geniş gerinim hızları aralığındaki davranışını simüle etmek için yapısal bir visko-plastik model (KH modeli) önerdiler. Bünye denklemi aşağıdaki gibidir.

$$J_2 = f_1(\varepsilon_2)f_2(D_2^p) \quad (2.21)$$

Burada J_2 , D_2^p ve ε_2 sırasıyla, deviatorik gerilimin ikincisi ile plastik deformasyon oranının ikincisi ve eşdeğer gerinimdir. Tek boyutlu durum için Denklem 2.22 şu şekilde yazılabilir.

$$\sigma = g_1(\varepsilon)g_2(\dot{\varepsilon}) \quad (2.22)$$

$$g_1(\varepsilon) = \left[3f_1 \left(\frac{3}{4} \varepsilon^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

$$g_2(\dot{\varepsilon}) = \left[f_2 \left(\frac{3}{4} \dot{\varepsilon}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

$g_1(\varepsilon)$ referans gerinim oranında gerilime karşı plastik gerinimin korelasyonunu karakterize ederken, $g_2(\dot{\varepsilon})$ gerinim hızına bağlı davranışı temsil etmektedir. σ , ε ve $\dot{\varepsilon}$ sırasıyla Von Mises eşdeğer gerilimi, birikmiş plastik şekil değiştirme ve eşdeğer plastik şekil değiştirme hızıdır.

KH modelinin en büyük eksikliği sıcaklığı gözden kaçırmasıdır. Malzemelerin pekleşme sertleşmesi davranışının iyi bir tahmini için gerinim ve gerinim hızının pekleşme sertleşmesi üzerindeki birleştirme etkilerinin dikkate alınması gerektiği açıktır (Kaan ve Liang 2000).

Khan ve Liang (2000), yapmış oldukları çalışmada antalum, %2.5 tungstenli tantal alaşımı ve AerMet 100 çeliğinin tek eksenli sabit gerinim hızlı basınç ve çekme testlerinden KHL modelinin parametrelerini belirlediler. Yapıcı modelin deneysel sonuçların karmaşık yükleme yollarını tahmin etme başarısı gösterilmiştir. Von Mises eşdeğer gerinim, gerilim ve gerinim hızını kullanan kurucu model mükemmel sonuçlar vermiştir. Bu nedenle KHL kurucu modeli, malzemenin karmaşık yükleme için sonlu deformasyonu tanımlamak için kullanılabilir.

Khan vd. (2000), KHL modeline Hall-Petch ilişkisini dahil etti (Denklem 2.25). σ_y akma gerilimi, d polikristalin ortalama tane boyutu, α ve κ malzeme sabitleridir. Bu denklem KHL modeline eklenerek tane boyutuna bağlı akma-gerilim bağımlılığı gösterilir. Ardından KHL visko-plastik kurucu modeli tam olarak sıkıştırılmış nanokristal demirin davranışını sunmak için tane boyutu bağımlılığı, pekleşme sertleşmesi, hız hassasiyeti ve sıcaklık etkisini içerecek şekilde değiştirilmiştir.

$$\sigma_y = \alpha + \frac{\kappa}{\sqrt{d}} \quad (2.25)$$

Tane boyutu nm olan demirin malzeme davranışı, akmadan önce genelleştirilmiş Hooke yasası ile tanımlanırken, tane boyutu etkisiyle değiştirilen KHL modeli akmadan sonra gerilim-şekil değiştirme davranışını göstermek için kullanılır. Sonuçlar değiştirilmiş KHL modelinin Denklem 2.26'da hem izotermal hem de adyabatik deneysel sonuçlarla iyi bir korelasyon verdiğini göstermektedir (Khan vd. 2000).

$$\sigma = \left[\left(\alpha + \frac{k}{\sqrt{d}} \right) + B \left(1 - \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{\ln D_0^p} \right)^{n_1} \varepsilon^{n_0} \right] \dot{\varepsilon}^C (1 - T^{*m}) \quad (2.26)$$

Fields ve Backofen (1957)'de birçok metal malzeme için Denklem 2.26'da gösterilen ortak formülü önermiştir. Burada k mukavemet katsayısı, n gerinim sertleştirme üssü ve m gerinim hızı hassasiyet üssüdür. Denklem 2.26 gerilim-gerinim ilişkisini tanımlamak için yaygın olarak kullanılır.

$$\sigma = k \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (2.27)$$

Cheng vd. (2008) yapmış oldukları çalışmada AZ31 magnezyum alaşımlı levhanın mekanik davranışlarını $0.1 - 0.0001 \text{ s}^{-1}$ gerinim hızı ve $423 - 573 \text{ K}$ sıcaklık aralığında tek eksenli çekme testleri ile araştırmış FB modelinin malzeme sabitleri olan n , k ve m 'yi sıcaklık ve/veya gerinim oranlarının bir fonksiyonu olarak elde etmişleridir (Denklem 2.28, 2.29 ve 2.30). Tahmin edilen ve deneysel sonuçlar arasındaki karşılaştırmalar, tahmin edilen sonuçların yalnızca tepe geriliminden önce deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde uyduğunu, özellikle düşük sıcaklık altında yüksek gerinim oranında olduğunu göstermektedir. Başka bir ifade ile FB modeli yalnızca daha yüksek bir gerinim oranı altında gerinim sertleşmesi aşamasında AZ31 magnezyum alaşım levhasının akış gerilim eğrilerini tanımlayabileceğini ve levhanın akış deformasyon davranışının daha düşük gerinim oranı altında daha yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşme yumuşama karakteri sergilediğini belirtmişlerdir.

$$n = 0.031 + 0.013 \log \dot{\varepsilon} + \frac{97.1}{T} \quad (2.28)$$

$$k = -156.4 + 9.1 \log \dot{\varepsilon} + \frac{244980.4}{T} \quad (2.29)$$

$$m = \frac{-145.263}{T} + 0.377 \quad (2.30)$$

Zhang (2003), yumuşatma davranışlarını tanımlamak için FB modeline yumuşatma parametrelerini dahil etmiştir. Denklem 2.30'da k , n ve m 'nin anlamları yukarıdakiler ile aynıdır, b malzeme sabiti, s artan gerginlikte magnezyum alaşımının yumuşama oranını temsil eder ve Denklem 2.31'deki gibi tanımlanabilir.

$$\sigma = k \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(bT + s\varepsilon) \quad (2.31)$$

$$s = \frac{d \ln \sigma}{d \varepsilon} \quad (2.32)$$

Cheng vd. (2008), Zhang (2003) tarafından önerilen benzer yöntemleri kullanarak FB modelini değiştirip ve yumuşatıcı bir öge içeren değiştirilmiş FB modelini AZ31 magnezyum alaşım levhası için aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir.

$$\sigma = 18015\varepsilon^{0.16}\dot{\varepsilon}^{0.083}\exp(-0.0078T - 0.8903\varepsilon) \quad (2.33)$$

2.3.2 Fiziksel Temelli Kurucu Modeller

Fenomenolojik modellerin sabitleri, deneysel verilerin bir eğriye uydurulması ve regresyonu yöntemiyle elde edilmektedir. Ancak fenomenolojik modellerde bazı eksiklikler olduğu aşıkardır, bu nedenle özellikle yüksek gerinim hızı ve sıcaklık altında deneysel sonuçlar iyi bir şekilde tanımlanamaz. Çünkü sıcak ve dinamik deformasyon sürecinde malzemenin iç mikro yapısı büyük ölçüde değiştiğinden fenomenolojik modeller doğru bir varsayımda bulunamamaktadır. Daha sonra dislokasyon dinamiği, termal aktivasyon vb. gibi deformasyon mekanizmalarını dikkate alan kurucu modellerin fiziksel mekanizmaya bağlı olarak kurulması gerektiği açık olarak görülmektedir. Son zamanlarda sıklıkla kullanılan fiziksel temelli modeller aşağıdaki gibidir (Lin ve Chen 2011).

- i) Zerilli-Armstrong (ZA) modeli
- ii) Dinamik yeniden kristalleşme (DRX) modeli
- iii) Preston-Tonks-Wallace (PTW) modeli
- iv) Rusinek-Klepaczko (RK) modeli

Zerilli ve Armstrong (1987), yapmış oldukları çalışmada ZA modelinin bir metalin elastik olmayan davranışını ve farklı yükleme koşulları altında akış gerilimini belirlemede büyük rol oynayan dislokasyon mekanizmalarına dayalı olarak türetilmiştir. Gerinim ve gerinim hızı sertleşmesinin, termal yumuşamanın metallerin ve alaşımların akış davranışları üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır. Akış gerilimi termal (σ_{th}) ve termal olmayan (σ_a) olmak üzere iki bileşene ayrılır.

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_{th} \quad (2.34)$$

Termal gerilim şu şekilde tanımlanabilir.

$$\sigma_{th} = \frac{M\Delta G_0}{Ab} e^{-\beta T} \quad (2.35)$$

$$\beta = -C_3 + C_4 \ln \dot{\epsilon} \quad (2.36)$$

Burada M yön faktörü, ΔG_0 0 K’deki termal aktivasyonun serbest enerjisidir. A, 0 K’deki aktivasyon alanı, b burgers faktörü, β ise gerinim ve gerinim hızıyla ilişkili parametredir. Hacim merkezli kübik kafes (BCC) metalleri için A sabittir (BCC metallerine örnek olarak demir, krom, tungsten verilebilir). Yüzey merkezli kübik kafes (FCC) metalleri için A, $\epsilon^{-\frac{1}{2}}$ ile orantılıdır (FCC metallerine örnek olarak alüminyum, bakır, nikel ve kurşun verilebilir). Bu nedenden dolayı iki tip metal için termal aktivasyon denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\sigma_{th} = C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) \quad (\text{BCC}) \quad (2.37)$$

$$\sigma = C_2 \epsilon^{\frac{1}{2}} (-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) \quad (\text{FCC}) \quad (2.38)$$

Termal aktivasyon gerilmesi ve akma gerilmesinin tane boyutu üzerindeki etkisinin tek bir C_0 parametresinde birleştirilmesi sonucu BCC ve FCC metalleri için denklemler aşağıdaki gibi verilebilir. $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, n$ malzeme sabitleridir.

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) + C_5 \epsilon^n \quad (\text{BCC}) \quad (2.39)$$

$$\sigma = C_0 + C_2 \epsilon^{\frac{1}{2}} \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) \quad (\text{FCC}) \quad (2.40)$$

Zhang vd. (2009), ZA modelindeki parametrelerin tüm deformasyon süreçleri boyunca çeşitli koşullarda sabit olarak kabul edildiğini, bunun gerçek süreçle uyuşmadığını ve tahmin doğruluğunu azaltacağını belirtmişleridir. Bu nedenden dolayı sıcaklığın, gerinim hızının ve deformasyon sürecinin geniş bir sıcaklık ve gerinim oranları aralığında IC10 alaşımının akış davranışları üzerindeki entegre etkileri dikkate alınarak değiştirilmiş bir

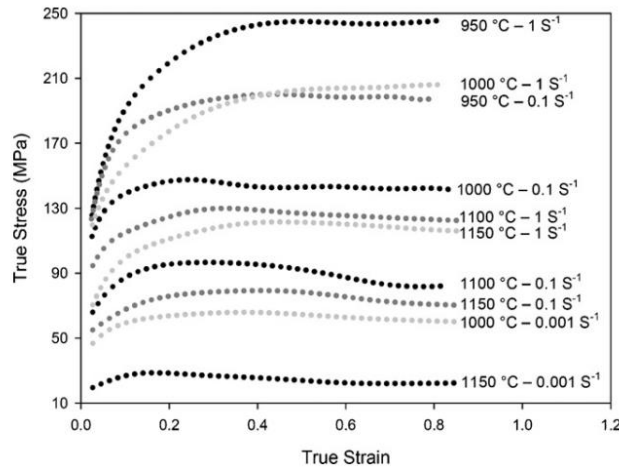
ZA modeli önermişlerdir. Değiştirilmiş ZA modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma = c_0 + c_1 \exp \left[\left(c_3'' T + c_4 T \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{r(\varepsilon)r(\dot{\varepsilon})} \right) \right) f(T) \right] + c_5 \varepsilon^n \quad (\text{BCC}) \quad (2.41)$$

$$\sigma = c_0 + c_2 \varepsilon^{1/2} \exp \left[\left(c_3'' T + c_4 T \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{r(\varepsilon)r(\dot{\varepsilon})} \right) \right) f(T) \right] \quad (\text{FCC}) \quad (2.42)$$

Mirzadeh ve Najafizadeh (2010), yapmış oldukları çalışmada 17-4PH paslanmaz çelik için tepe gerilimi, tepe gerinimi ve dört malzeme sabiti ile dinamik yeniden kristalleşme akış eğrisini basit bir biçimde tahmin etmek için yeni bir formülasyon geliştirmişlerdir. Malzeme sabitleri bir veya birden fazla deneysel akış eğrisinin doğrusal olmayan regresyonu ile bulunabileceğini ileri sürmüşlerdir. Hesaplanan sabitler deformasyon koşullarından bağımsızdır. Model aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\sigma}{\sigma_p} = a + b \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^{0.4} + c \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^{0.8} + d \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^{1.2} \quad (2.43)$$



Şekil 2.8 Hiperbolik sinüs denklemi ile deneysel ve hesaplanan akış gerilimi arasındaki karşılaştırma. Kesintisiz çizgiler hesaplanan akış eğrilerini temsil etmektedir (Mirzadeh ve Najafizadeh 2010).

Tepe gerilimi ve gerginlik deneysel akış eğrilerinden kolayca belirlenir. Bu karakteristik özellikler Zener-Hollomon parametresi açısından da ifade edilebilir.

$$\sigma_p = 0.66 \times Z^{0.18} \quad (2.44)$$

$$\varepsilon_p = 18 \times 10^{-3} \times Z^{0.11} \quad (2.45)$$

Guan vd. (2008) yapmış oldukları çalışmada AZ70 magnezyum alaşımının geniş deformasyon dereceleri, gerinim oranları ve sıcaklıklar üzerindeki sıcak deformasyon davranışını araştırmak için sıcaklık telafili gerinim oranı (Zener-Hollomon parametresi) sunarak yeni bir gerilim modeli önermiştir. Denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma = A + B_0 \ln Z + B_1 (\ln Z)^2 + B_2 (\ln Z)^3 \quad (2.46)$$

$$A = C_0 + C_1 \ln \varepsilon + C_2 (\ln \varepsilon)^2 + C_3 (\ln \varepsilon)^3 \quad (2.47)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.48)$$

Burada A , B_0 , B_1 , B_2 , C_0 , C_1 , C_2 ve C_3 deneysel verilerin uydurulması yoluyla elde edilebilen malzeme sabitleridir. AZ70 malzemesi için farklı sıcaklıklarda ve gerinim oranlarında öngörülen ve deneysel gerilim arasındaki bazı karşılaştırmalar, hesaplanan gerilimlerin deneysel gerilimlerle iyi bir uyuma sahip olduğunu ve modelin sıcak dövme işlemi ve AZ70 alaşımının sayısal simülasyonu hakkında teorik bir kılavuz olabileceğini belirtmişlerdir.

Preston vd. (2003) yapmış oldukları çalışmada patlayıcı yükleme ve yüksek hız darbelerinin sayısal simülasyonları için uygun bir metalik plastik akış modeli sunmuşlardır. Bu model düşük gerinim oranlarında uygulanan gerilime plastik gerinim oranının bağımlılığı Arrhenius formundadır ancak sıfır gerilimde tekil olan bir aktivasyon enerjisine sahiptir, böylece deformasyon oranı bu sınırdan sıfıra iner. Pekleşme sertleşmesi, genelleştirilmiş bir Voce yasası olarak modellenmiştir.

Bununla birlikte Preston-Tonks-Wallace modeli $10^7 s^{-1}$ 'den daha büyük ve aşırı yüklenmiş şok rejiminde malzemede oluşan plastik deformasyonu modelleyebilen bileşenlere sahiptir. Dolayısıyla bu model, diğer gerilme akış modelleri arasında en geniş gerilme oranları aralığı için kullanılabilir (Banerjee vd. 2015).

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = \left\{ 2 \left[\tau_s + \alpha \ln \left[1 + \varphi e^{\left(-\beta - \frac{\theta \varepsilon_p}{\varphi \alpha} \right)} \right] \right] \right\} \quad (\text{Termal rejimde}) \quad (2.49)$$

$$2\tau_s \mu(p, T) \quad (\text{Şok bölgesinde}) \quad (2.50)$$

$$\alpha = \frac{s_0 - \tau_y}{d}, \quad \beta = \frac{\tau_s - \tau_y}{\alpha}, \quad \varphi = e^\beta - 1 \quad (2.51)$$

Burada τ_s normalleştirilmiş sertleştirme doygunluk gerilmesi, s_0 K sıcaklığında τ 'nın değeri, τ_s normalleştirilmiş akma gerilmesi olarak verilmektedir. θ Voce sertleşme yasasında kullanılacak olan sertleştirme sabiti, d ise boyutsuz malzeme parametresidir.

Bu modellerden hariç Cowper-Symonds ve Piecewise gibi modeller de yüksek deformasyon hızlarındaki malzemelerin davranışları hakkında araştırmalarda kullanılmaktadır (Cowper vd. 1958, Simunovic vd. 2003).

2.4 Hasar Kriterleri

Hasar değişkeni olarak adlandırılan D , ilk olarak Kachanov tarafından mikro kusurların etkili olduğu yüzey yoğunluğu bakımından mikro çatlaklar nedeniyle olduğu varsayılan katılık ve bütünlük kaybını tanımlamak üzere hazırlanmıştır (Kachanov 1958). Buna dayanarak Rabotnov efektif gerilme ve hasar değişkenine bağlı olarak;

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1-D_1} \quad (2.52)$$

biçiminde tanımlanmıştır (Rabotnov 1969). Gerilme davranışını değiştiren tek şeyin efektif gerilme olduğunu varsayan Lemaitre (1971)'e göre doğrusal elastik gerilme ε_e ;

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_D}{E} = \frac{\sigma}{(1-D_1)E} \quad (2.53)$$

Bu varsayımlarla sürekli ortam mekaniğinden farklı olan elastik hasar mekaniği Denklem 2.53'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_{ij} = (1 - D_1)(\lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk}^e + 2\mu \varepsilon_{ij}^e) \quad (2.54)$$

Burada λ, μ Lamé sabitleri, δ_{ij} Kronecker operatörü ve ε_{ij}^e elastik gerilmedir. Genelleştirilmiş olarak akma fonksiyonu;

$$F = \sigma_{eq}(1 - D_1)(\sigma_y + R_a) \quad (2.55)$$

Burada σ_{eq} eşdeğer gerilme, σ_y başlangıçtaki akma gerilmesidir. R_a ise izotropik sertleşme skaler değişkeni olarak verilmektedir (Lemaitre 1971).

Hasar gerilmesi enerji salınım hızı y ile gerilme-şekil değiştirme durumu ve son olarak hasar mekaniği için önemli olan hasar gelişim yasası arasındaki ilişkiyi elde etmek için termodinamik potansiyel ve yayılma potansiyeli tanımlanmıştır. Termodinamik potansiyelde elastik ve plastik bölgeler bölgelerin olduğu ve neredeyse tüm literatürde $(1 - D_1)$ lineer kabul edilmiştir. Hasar gerinme enerjisi serbest bırakma oranı y şöyle ifade edilir;

$$y = -\frac{\sigma_{eq}}{2E} \left[\frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 + 2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.56)$$

Burada E Young modülü, ν Poisson oranı ve σ_m ise ortalama gerilmedir.

Geçmişte yapılan çalışmalarda basit çatlak kriterleri önerilmiştir. Bu kriterler sağlam bir temele dayanmamakla birlikte gözlem, deneyim ve basit matematiksel bir yapıya dayanır (Bao 2003). Bu ampirik kriterler sınırlı bir takım gerilme durumu üzerinde doğrulanmıştır. Denklem 2.56'daki skaler fonksiyon kritik bir C değerine ulaştığında kırılmanın malzemenin bir noktasında meydana geldiğini varsaymaktadır.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g(\sigma_{ij}) d\bar{\epsilon} = C \quad (2.57)$$

Burada g gerilme tensörünün bileşenlerinin bir fonksiyonu olan ağırlık fonksiyonudur. ϵ eşdeğer gerinme, $\bar{\epsilon}_f$ kırılmaya karşı eşdeğer gerinme ve C kalibrasyon sabitidir. Genellikle hasar göstergesi olarak adlandırılır (Fisher vd. 1995).

Denklem 2.56'da $g = 1$ olduğunda sınırlayıcı bir durum için geçerlidir. Farklı gerilme durumları için kırılmaya eşdeğer gerinme değerlerinin farklı olduğu kesin olarak anlaşılmasına rağmen, ABAQUS, LS-DYNA gibi önde gelen birçok ticari analiz programlarında kullanılmaktadır.

Cockcroft ve Latham (1968) yapmış oldukları çalışmada kırığın plastik gerilme yolu üzerine entegre edilen maksimum asal gerilme ile kontrol edildiğini tanımlamıştır. Buna göre;

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} d\bar{\epsilon} = C_{CL} \quad (2.58)$$

Burada C_{CL} malzeme sabitidir. Bu kritere dayanarak kayma veya çekme gerilmeleri sebebiyle kırılma çatlamaının oluşabileceğini ancak basma gerilmesi ile oluşmayacağı söylenebilir. Haddelme, ekstrüzyon vb. şekilde işlenebilirliğin gözlemlenmesi ile makul bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Brozzo vd. (1972) yapmış oldukları çalışmada metal levhanın işlenebilirlik/şekillendirilebilirlik sınırlarının tahmini için hidrostatik gerilmeye bağlı bir değişken önermiştir.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_{eq})} d\bar{\epsilon} = C_{BR} \quad (2.59)$$

Burada C_{BR} malzeme sabitidir. Clift vd. (1990) maksimum asal gerilmenin yerine denkleme eşdeğer gerilme değerini koymuş ve birim hacim başına genelleştirilmiş plastik çalışma kriterini önermiştir.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\epsilon} = C_C \quad (2.60)$$

Burada C_C bir malzeme sabitidir. Bu kriterin çatlak oluşum bölgesini başarılı bir şekilde tahmin ettiğini fakat üç tip metal şekillendirme işleminde çatlak oluşumunun meydana gelmesi gereken deformasyon seviyesine ulaşamadığı tespit edilmiştir.

Rice ve Tracey (1969) yaptıkları çalışmada boşluk genişlemesini literatürde bir hasar ölçüsü olarak göstermişlerdir.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} e^{\frac{3\sigma_m}{2\sigma_{eq}}} d\bar{\epsilon} = C_{RT} \quad (2.61)$$

Burada C_{RT} bir malzeme sabitidir. Gerilme üç eksenliliğinin sünek çatlak oluşumunda büyük rol oynadığı gerçeğine dayanan bir başka basit kriter literatürde ortaya çıkmıştır.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} d\bar{\epsilon} = C_H \quad (2.62)$$

C_H malzeme sabitidir. Bu sabitlerin integrasyonla birleştirilmesi ve iki veyahut daha fazla malzeme sabitinin varlığı, bu kriterlerin kalibrasyon prosedürünü zorlaştırmaktadır. Örnek olarak Johnson-Cook kriteri verilebilir. Burada $c_{jc1}, c_{jc2}, c_{jc3}$ malzeme sabitleridir.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{1}{c_{jc1} + c_{jc2} e^{c_{jc3} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)}} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (2.63)$$

Çubuklar üzerinde gerilme dalgası yayılımı ile birlikte bir basınç dalgası oluşturulur. Bu esnadan itibaren dalga ayrılarak, bir kısmı yansıtılır ve diğer kısmı ise giriş çubuğuna çubuğuna yayılır. Dalganın hareketi Denklem 2.63’de olduğu gibi tek boyutlu bir dalga yayılma teorisi ile açıklanmaktadır. Şekil 2.12’de verildiği gibi indüklenen boyuna doğrultudaki dalga $u(x, t)$, numunedeki yansıma ve iletimden sonra olayın ve iletim çubuklarının ortasında gerinim sinyalleri olarak ölçülür. $\epsilon_I, \epsilon_T, \epsilon_R$ ise sırasıyla çarpma, yansıma ve iletilen şekil değiştirme-gerinme dalgalarını ifade etmektedir. Ölçülen çubukların yer değiştirmesine bağlı dalga denklemi aşağıdaki gibidir. Dalga hızı c , E elastik modülü ve ρ kütle yoğunluğu ile belirlenmektedir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.64)$$

$$c_b = \sqrt{E_b / \rho_b} \quad (2.65)$$

2.5 Johnson-Cook Malzeme Modeli

Johnson-Cook (JC) malzeme modeli, yüksek sıcaklık, yüksek gerilme-gerinme hızında malzeme davranışını tanımlayabilen, metallerin darbe, aşırı plastik deformasyon benzeri problemleri için kullanılan popüler bir malzeme modelidir. Popülerliği, denklemlerin basit formlarından ve belirlenmesi nispeten kolay olan parametrelerden kaynaklanmaktadır (Yuguang vd. 2020, Çetkin 2022). Büyük deformasyonlar, yüksek gerinim oranları veya yüksek sıcaklıklar analiz için en yaygın kullanılan modeller Zerilli ve Armstrong (1987), Brozzo vd. (1972), Klepaczko ve Chiem (1986), Oyane (1972) ve Johnson ve Cook (1983) modelleridir.

Bu yapısal modeller malzemenin dinamik özelliklerini tanımlamak için çeşitli deformasyon hızlarında ve sıcaklıklarda akış gerilimini açıklayabilir. Diğer taraftan Johnson ve Cook (1983) tarafından tanımlanan hasar formülasyonun bazı korelasyon parametreleri kritik değerlere ulaştığında hasarın başlangıcını tahmin edebilir. Bir hasar formülasyonu eşdeğer gerinim oranı, gerilim üç eksenliliği ve geçiş sıcaklığı dahil olmak üzere birkaç mekanik özelliğe dayalı bir denklemdir. Bu faktörlerin hasarın oluşumunu uygun şekilde belirlediği kanıtlanmıştır ve JC modelinde dikkate alınmıştır (Liu vd. 2021).

JC akış gerilmesi modelinin yanı sıra malzemelerin dinamik performansını tanımlamak için diğer yapısal ve hasar modelleri önerilmiştir. Hopkinson (1914) yapmış olduğu çalışmada gerinim oranı ve deformasyon sıcaklığının plastik reolojik davranış üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur. Farklı kırılma modelleri önerilmiş ve bu modeller belirgin bir avantaj gösterse de birçok model parametresinin kullanılması nedeniyle pek tercih edilmezler. Ek olarak literatürde bulunmaları kolay değildir çünkü sıklıkla hassas bir şekilde kontrol edilen deneylerden veri gerektirmeleri ve bu modellerin sonlu elemanlar (FE) modelleme yazılımlarında kullanmak zordur. Bu nedenle basit birkaç parametreden oluşan JC modeli ilk tercih olmakta ve FE modelleme yazılımında uygun bir şekilde kullanılabilir.

JC modeli gerinim oranının geniş bir aralıkta değiştiği ve adyabatik sıcaklığın artmasıyla malzemenin yumuşadığı mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan malzeme modelidir. Johnson ve Cook (1983) tarafından temsil edilen plastise modeli plastik gerinim değerini Denklem 3’de verilen üç fonksiyonun çarpımı olarak tanımlamaktadır. İlk parantez, plastik deformasyon sırasında gerinim sertleşmesi etkisini ifade eden bir kuvvet fonksiyonunu tanımlamaktadır. İkinci parantez, gerinim oranının gerinim sertleşmesi değeri üzerindeki etkisinin bir fonksiyonudur ve gerinim oranının yarı statik yükteki gerinim oranına bağlı olarak gösterir. Üçüncü parantez, toparlanma ve yeniden kristalleşme nedeniyle sıcaklığın gerilme etkisini tanımlar. JC modelinin denklemi şöyle yazılabilir;

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (3)$$

Burada σ_{eq} eşdeğer akış gerilimi, A referans koşullarda malzemenin akma dayanımı, B gerinim sertleştirme sabiti, ε_{eq} eşdeğer plastik gerinim, n gerinim sertleştirme üssü, C gerinim oranı güçlendirme katsayısı, $\dot{\varepsilon}^*$ gerinim hızının referans gerinim hızına boyutsal olmayan oranı, T^* homolog sıcaklık ve m termal yumuşama katsayısıdır.

2.5.1 JC Akış Gerilmesi Malzeme Sabitlerinin Belirlenmesi

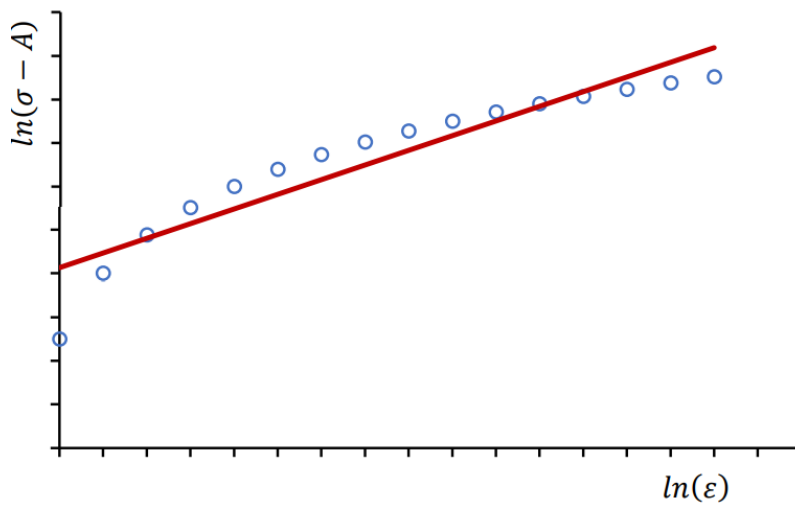
Denklem 3.1’de gerilim akışı tanımlayan şekil değiştirme hızının güçlendirmesi etkisi ve termal yumuşatma etkileri ihmal edilirse;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \quad (3.1)$$

Denklemini elde edilir. Denklem 3.1 yeniden düzenlenirse aşağıda gösterildiği gibi elde edilebilir.

$$\ln(\sigma - A) = n \ln(\varepsilon) + \ln(B) \quad (3.2)$$

Referans deformasyon koşulları altındaki gerilme-gerinme değerleri hesaba katılarak, Şekil 3’deki gibi $\ln(\sigma - A)$ ve $\ln(\varepsilon)$ arasındaki doğrusal ilişki birinci dereceden regresyon modelinden yardım alınarak n, B değerleri yaklaşık olarak elde edilebilir (Çetkin 2022).



Şekil 3. JC modelinde A, B ve n parametrelerini elde etmek için hazırlanan $\ln(\sigma - A) \sim \ln(\varepsilon)$ grafiği (Çetkin 2022).

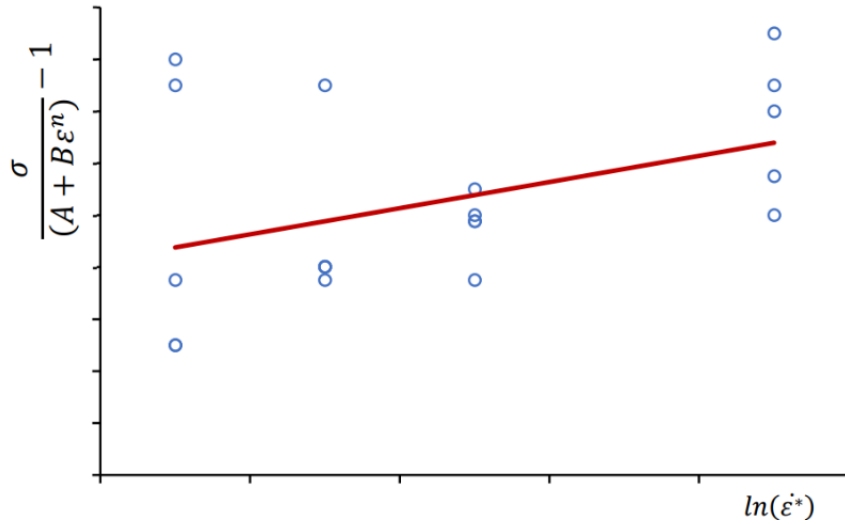
Termal yumuşama etkisi yok sayılırsa, Denklem 3 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3 yeniden düzenlendiğinde ise;

$$\frac{\sigma}{(A+B\varepsilon^n)} = (1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)) \quad (3.4)$$

elde edilir. A, B ve n değeri lineer regresyonla önceki işlemlerde bulunmuştu. Bulunmayan C değerini farklı hızlarda elde edilen değerleri koyduğumuz $\frac{\sigma}{(A+B\varepsilon^n)} - 1$ ile $\ln(\dot{\varepsilon}^*)$ arasında kalan eğrinin eğiminden bulmak kolay olacaktır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 JC modelinde C parametresini elde etmek için düzenlenen $\frac{\sigma}{(A+B\varepsilon^n)} - 1 \sim \ln(\dot{\varepsilon}^*)$ grafiği (Çetkin 2022).

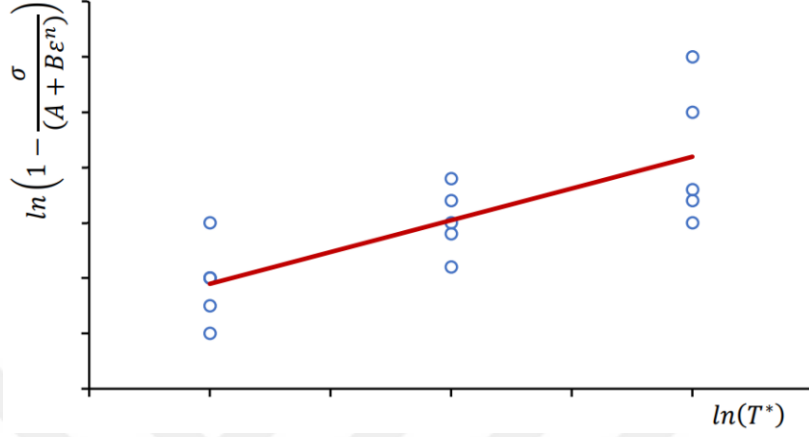
Bu sefer şekil değiştirme hızının güçlendirilmesi etkisi Denklem 3'den yok edilirse aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 - T^{*m}) \quad (3.5)$$

Denklem 3.5 yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{\sigma}{(A+B\varepsilon^n)} = (1 - T^{*m}) \quad (3.6)$$

elde edilir. A, B ve n değerleri lineer regresyonla bulunmuştur. Bulunmayan m değerini farklı sıcaklıklarda elde edilen değerleri kullandığımız $\ln\left(\frac{\sigma}{(A+B\varepsilon^n)} - 1\right)$ ile $\ln(T^*)$ arasındaki ilişkinin eğri eğimini kullanarak bulmak kolay olacaktır (Çetkin 2022).



Şekil 3.2 JC modelinde C parametresini elde etmek için düzenlenen $\ln\left(\frac{\sigma}{(A+B\varepsilon^n)} - 1\right) \sim \ln(T^*)$ grafiği (Çetkin 2022).

2.5.2 JC Hasar Modeli Malzeme Sabitlerinin Bulunması

JC modeli, kırılma gerilmesinin genellikle üç eksenlilik oranına, sıcaklığa ve gerilme oranına dayandığını belirtmektedir. JC kırılma modeli Denklem 3.7’de gösterildiği gibidir.

$$\left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \right) \right]^I [1 + D_4 \ln(\varepsilon_p^*)]^II [1 + D_5 T^*]^III \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de verilen D_{1-5} hasar modeli parametreleri, σ_m ortalama gerilmeyi ve σ_{eq} eşdeğer gerilmeyi tanımlamaktadır. Bir malzemenin hasarı toplu bir hasar denklemine göre belirlenmekte olup doğrusal bir şekilde aşağıdaki gibi verilir.

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \right) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de verilen Δ_ϵ eşdeğer plastik gerinim artışıdır ve ϵ_f mevcut gerilme, sıcaklık ve şekil değiştirme hızı parametreleri altında kırılmaya eşdeğer gerinimdir. Kırılma oluşumu nedeniyle deformasyon sırasında malzemenin mukavemeti azalır ve hasarın meydana gelip gelmediğini anlamak için yeterli gerilme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_D = (1 - D)\sigma_{eq} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 da gösterilen σ_D hasar gerilmesi ve D hasar parametresidir. $D > 1$ olduğunda hasar başlar. Gerilme üç eksenliliği ve eşdeğer gerilmenin büyüklüğü malzemenin plastik davranışı göz önüne alınarak boyun oluşumu gerçekleşene kadar olan bölgede hasarsız numuneler elde edilebilir (Murugesan vd. 2017).

Denklem 3.7’de hasarı oluşturan gerinimin büyüklüğünü tanımlayan parametrelerden şekil değiştirme hızının etkisi ve termal gerilme etkileri ihmal edilirse;

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}) \quad (3.10)$$

denklemini elde edilir. Referans deformasyon koşulları altındaki gerilme-gerinme değerleri hesaba katılarak, Şekil 3.2’deki gibi ϵ_f ve η arasındaki lineer ilişkiyi regresyon modelleri yardımıyla D_1, D_2, D_3 parametreleri yaklaşık olarak elde edilebilir (Çetkin 2022).

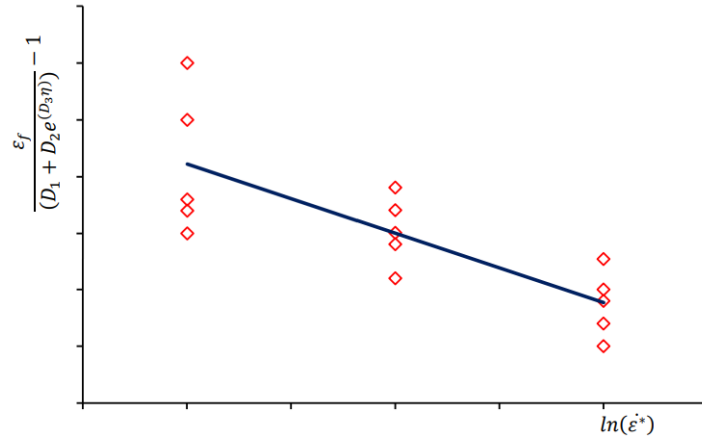
Denklem 3.7’de termal yumuşama etkisi yok edilirse, oluşan yeni denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})(1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}_p^*)) \quad (3.11)$$

Denklem 3.11 yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{\epsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} = 1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}_p^*) \quad (3.12)$$

elde edilir. D_1, D_2, D_3 değerleri daha önce doğrusal regresyon ile bulunmuştu. Bulunmayan D_4 değerini farklı sıcaklıklarla elde ettiğimiz değerleri $\frac{\epsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})}$ ile $\ln(\dot{\epsilon}_p^*)$ arasındaki ilişkiyi veren eğrinin eğiminden bulunabilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.3 JC modelinde D_4 hasar parametresini elde etmek için düzenlenen $\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} \sim \ln(\dot{\varepsilon}_p^*)$ grafiği (Çetkin 2022).

Denklem 3.7’de şekil değiştirme hızının güçlendirilmesi etkisi yok edilirse, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})(1 + D_5 T^*) \quad (3.13)$$

Denklem 3.13 yeniden düzenlendiğinde ise;

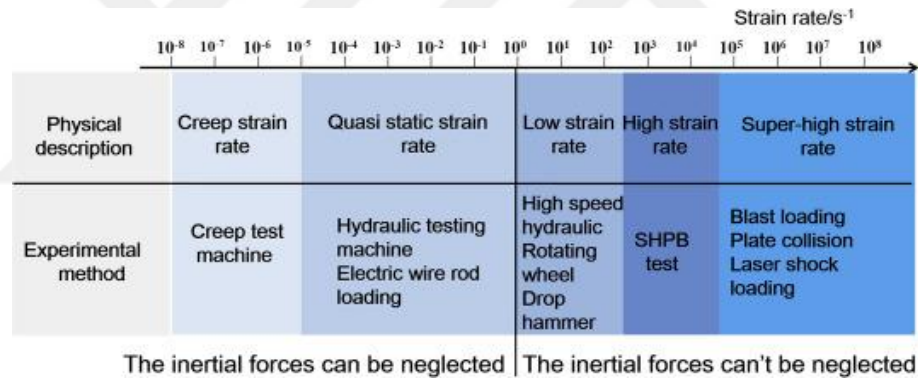
$$\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} = (1 + D_5 T^*) \quad (3.14)$$

Elde edilir. D_1 , D_2 ve D_3 değerleri daha önceki hesaplamalarda bulunmuştu. Bulunmayan m değerini farklı sıcaklıklarda elde ettiğimiz değerleri kullanarak $\left(\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} - 1\right)$ ile (T^*) arasındaki ilişkinin eğri eğiminden bulmak kolay olacaktır (Çetkin 2022).

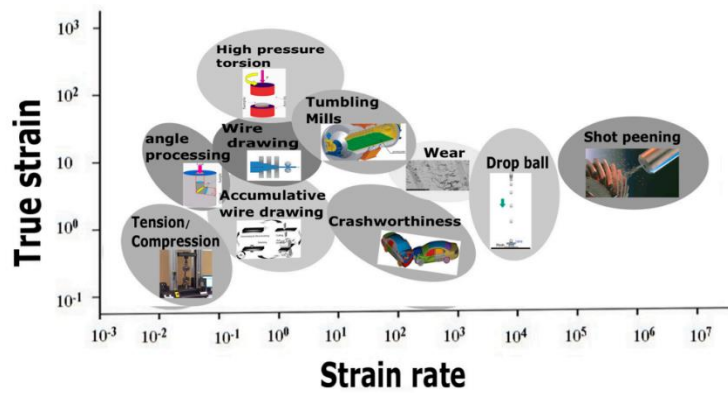
2.6 Dinamik-Yarı Statik Gerilim Testleri

Malzemeler statik ve dinamik yüklemeye maruz bırakıldıklarında farklı şekillerde deforme oldukları belirlenmiştir (Voyiadjis vd. 2002, Johnson 1972, Clifton 2000, Sadeghi vd. 2018, Rahmaan vd. 2015, Voyiadjis vd. 2013, Xue vd. 2012). Birçok endüstriyel uygulamalarda malzemenin dinamik tepkisi önemli bir araştırma alanıdır. Malzeme dış kuvvetlere maruz kaldığında malzemenin vereceği tepki; Yükleme türüne, yüklemenin doğasına, sıcaklık etkisine ve gerinim oranına bağlıdır. Gerinim oranı,

malzemede gerininin neden olduğu deformasyon oranıdır. Malzemeler farklı oranlarda ve yönlerde deformasyona uğrayabileceğinden zaman, hız ve diğer parametrelerle gerinim oranını belirlemek malzeme mukavemetinin ve özellikle gerilim-korozyon çatlamasının meydana geleceği noktanın belirlenmesi hayati önem taşır (Xue vd. 2012). Gerinim oranları genellikle farklı rejimlere ayrılır bunlar; Sürünme, yarı statik, orta, yüksek ve ultra yüksek gerinim oranları olarak gruplandırılabilir (Şekil 3.4). Mühendislik malzemeleri farklı endüstriyel işlemlerde kullanılmaktadır. Örneğin metal işleme operasyonlarında sırasında çok çeşitli gerinim oranlarına ve yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar. Aynı zamanda türbin kanatlarının dönüşü sırasında sürünme deformasyonu gibi koşullara, patlama ve darbe gibi tehlikelere de dayanmak zorundadır. Mekanik yapıların performansını ve güvenilirliğini arttırmak için gerinim oranı etkisi büyük bir rol oynamaktadır (Mirmomeni vd. 2016, Mirmomeni vd. 2015, Javidan vd. 2015).



Şekil 3.4 Farklı gerinim oranları ve endüstriyel karşılıkları (Li vd. 2019)



Şekil 3.5 Çeşitli mekanik deformasyon operasyonlarına karşılık gelen gerinim oranları (He vd. 2012, Nemat ve Nasser 2000)

Malzemenin farklı gerinim oranlarındaki akış davranışını anlamak daha önce askeri, nükleer ve balistik alanlarla sınırlıydı. Bu gibi alanlarda malzemenin güvenli tasarımı ve performansı çok önemlidir. Fakat deneysel tekniklerin ve hesaplamalı metotların ilerlemesiyle malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmeye ve dinamik plastik akışını tahmin etmeye yönelik araştırmalar önemli bir husus haline gelmektedir. Çeşitli mekanik deformasyon süreçleri Şekil 3.5’de görülmektedir (He vd. 2012, Nemat ve Nasser 2000).

Çizelge 2.3 Farklı gerinim hızı rejimleri için test yöntemleri (Nemat ve Nasser 2000)

Gerinim Oranı (s^{-1})	Deney Yöntemi
0.1 – 500	Düşme Testleri
200 – 10^4	Split Hopkinson Pressure Bar
10^3 – 10^4	Taylor Darbe Testi
$>10^5$	Gaz Tabancası

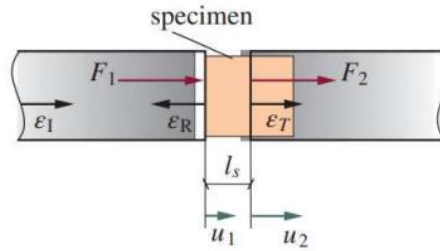
Mühendislik malzemelerinin gerinim oranı testinin, metal işleme operasyonları ve mühendislik yapı uygulamaları ve aynı zamanda mühendislik malzemelerinin üretilebilirliğini iyileştirmenin ne kadar önemli olduğu açıktır. Gerinim oranı testi alanındaki son gelişmelerle birlikte malzemelerin sergilediği akış davranışlarını doğru bir şekilde tahmin edebilir ve gerçek hayattaki çalışma koşullarıyla ilişkilendirilebilir. Farklı gerinim oranlarında deneylerin gerçekleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan test yöntemleri Çizelge 2.3’de verilmiştir (Nemat ve Nasser 2000).

2.6.1 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Deneyi

SHPB ismi John Hopkinson (1849-1898) ve oğlu Bertram Hopkinson’dan (1874-1918) türetilmiştir. John Hopkinson 1872 yılında demir teldeki gerilim dalgalarının yayılımını araştırmış ve oğlu Bertram Hopkinson ise patlama ile uygulanan dinamik yük yardımıyla basınç-zaman eğrisini elde etmek için bir basınç çubuğu icat etmiştir (Hopkinson 1914). Fakat ölçüm tekniğinin sınırlı olması nedeniyle ölçümler doğru sonuç vermemiştir. Daha sonra Davies (1948), elektrikselsel bir yöntem kullanarak ölçüm tekniğini geliştirmiş, ardından Kolski (1949), iki çubuğun (olay ve iletilen çubuk) arasında bir numune bulunan bölünmüş çubuk sistemini geliştirmiştir. Bu yüzden SHPB’ye Kolsky çubuğu da

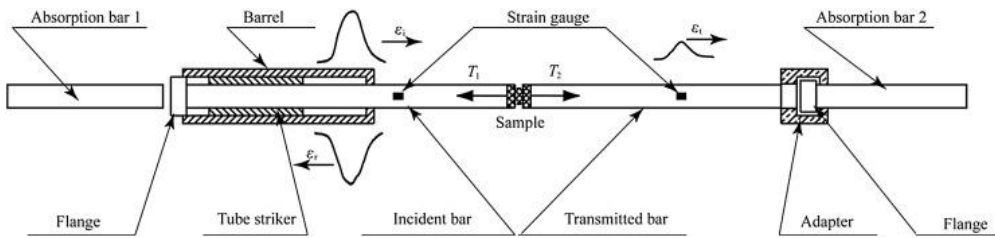
denmektedir (Xia ve Yao 2015).

SHPB deney düzeneği üç çubuktan oluşur: vurucu çubuk, olay çubuğu ve iletilen çubuktan oluşmaktadır (Gray ve Blumenthal 1998). Çarpıcı çubuğun olay çubuğunun serbest ucuna çarpması her iki yönde yayılan uzunlamasına sıkıştırıcı bir dalga oluşturur. Sola doğru yayılan dalga, çarpıcı çubuğun serbest ucunda tamamen serbest bırakılır ve olay sıkıştırıcı ε_I dalgasını oluşturur (Şekil 3.6). Bu sebepten dolayı ε_I dalgasının süresi vurucudaki uzunluğa ve uzunlamasına yol kat eden dalga hızına bağlıdır. Çubuk-numune arayüzüne ulaştığında, olay dalgasının bir kısmı yansıyan dalga ε_R olarak yansır ve geri kalanı numuneden iletilen dalga ε_T olarak iletilen çubuğa geçer. Gerinim ölçerler hem olay çubuğunda hem de iletilen çubuk üzerindeki gerilim dalgasını kaydetmek için kullanılır.



Şekil 3.6 Dalganın yayılımı (Çetkin 2022)

Birçok testte gerilim ölçerler ile numune arasındaki mesafe bilinmelidir. Bu da olay, yansıyan ve iletilen dalgaların başlangıç noktasını belirlemek için gereklidir. Ayrıca vurucu çubuğun hızı basit optik yöntemlerle de ölçülebilir.



Şekil 3.7 SHPB Deney Düzeneği (Huang vd. 2010)

SHPB deney düzeneğinde numune olay çubuğu ve iletim çubuğu arasına yerleştirilir ve olay çubuğunun diğer ucuna hava valfinden yüksek basınçlı hava veya farklı darbe yükleri uygulanır (Miao vd. 2022, Felten vd. 2022, Kimm ve Bergmann 2021). Ayrıca hareketi engellemek ve sönmölemek için iletim çubuğunun ucuna bir sönmöleyici

eklenir. Vurucu çubuk olay çubuğuna bir darbe yüküyle çarptığında bu iki çubuk arasına yerleştirilen numune plastik olarak deforme olur (Wang vd. 2020). Şekil 3.7’de görüldüğü üzere olay çubuğu ve iletim çubuğuna eşit mesafede monte edilen gerinim ölçerler sinyalleri algılar. Olay ve üretim çubuğunun ürettiği sinyaller zaman çizelgesinde gösterilir (Shihong vd. 2022). Deneysel düzenekte gerilim-şekil değiştirmelerin zamana göre değişimi belirlenip grafikleri elde edilir.

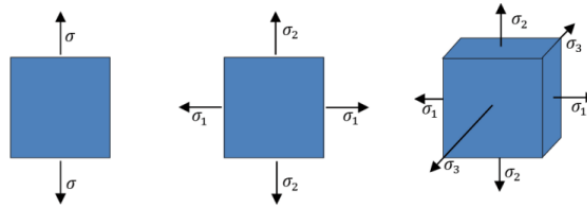


3. MATERYAL ve METOT

3.1 Gerilme Üç Eksenliği

Sünek metallerin kırılması uzun zamandır mühendisler için önemli bir sorun olmuştur. Doğru ve etkili kırılma modelleri, endüstriyel tasarım ve sonlu elemanlar simülasyonu için çok önemli bir yere sahiptir. Metallerde ve alaşımlarında sünek kırılma plastik deformasyon sırasında oluşan mikroskobik boşlukların büyüyüp birleşmesinden kaynaklanır. Bu boşluklar plastik deformasyonun etkisiyle önemli ölçüde genişleyip bozuldukça diğer boşluklar arasında bağlantı kurar ve boşluk birleşmesi sünek kırılmanın son aşamasıdır. Mikroskop altında sünek kırılmış malzeme yüzeyleri düzensiz ve pürüzlü görünür (Argon vd. 1975).

Herhangi bir malzemenin tek noktasındaki yük, bir gerilme durumu olarak adlandırılır. Gerilme durumu tek eksenli veya çok eksenli olabilir. İki boyutla bir durumda çok eksenli durumuna çift eksenli, üç boyutlu durumda ise üç eksenli gerilme olarak tanımlanır (Şekil 4). Gerilme malzemenin özelliklerine ve iç yapısına bağlı olmakla beraber uygulanan kuvvetin yönüne ve uygulandığı yere de bağlıdır. Gerilme üç eksenliliği kırılma için önemli bir parametredir. Özellikle tek bir gerilme durumunun uygulandığı malzemelerde gerilme durumu belirlenebilir fakat farklı gerilme durumları içerisinde gerilme üç eksenliliği nicel ve nitel olarak tanımlanmalıdır. Gerilme üç eksenlilik faktörü, kırılma ve gerilme durumu arasındaki bağlantıyı tanımlamak için kırılma modellerinde bir parametre olarak kullanılır (Marcadet vd. 2015).



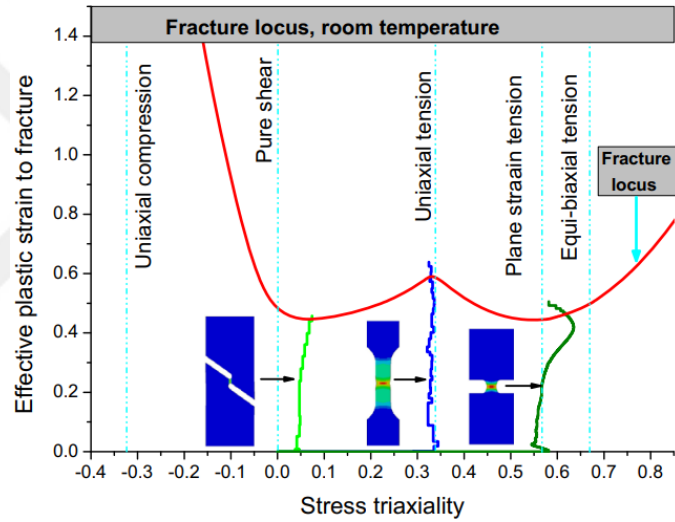
Şekil 4. σ yüküne veya temel gerilimlere bağlı olarak sırasıyla soldan sağa, tek eksenli gerilim, iki eksenli bir gerilim ve üç eksenli gerilim durumları (Trippel ve Harwick 2019)

Üç eksenlilik faktörü η , gerilim durumunun çok eksenlilik miktarını temsil eden skaler bir parametredir. Cauchy gerilim tensörünün hidrostatik kısmını tanımlar ve bir malzemedeki boşluk büyümesini karakterize etmektedir. Bu faktör hidrostatik gerilim p

veya ortalama gerilme σ_m ile σ_{VM} Von Mises eşdeğer geriliminin oranıdır (Mohr 2015, Hiermaier 2017).

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = \frac{-p}{\sigma_{VM}} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (3.15)$$

Gerilme üç eksenliği her ne kadar asal gerilmeler kullanılarak hesaplanabilse de bilgi eksikliği dolayısıyla bu yöntem deneysel sonuçlar için çoğunlukla kullanılmaz. Bridgman 1952, yapmış olduğu çalışmada çentik geometrisine sahip düzlem şekil değiştirme numunesi için yaklaşık çözüm önermiştir.



Şekil 4.1 Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde farklı numune yapılarının plastik gerilme ile gerilme üç eksenlilik değerleri (Mehari ve Han 2022)

Oda sıcaklığında yapılan çekme testleri için kırılmadaki eş değer plastik gerinime göre gerilme üç eksenlilik değerleri Şekil 4’de gösterilmiştir. Tek eksenli, düzlemsel gerilme ve kayma gerilmesi için ortalama gerilme üç eksenlilik değerleri 1/3, 0.57 ve 0.04 ‘dür (Mehari ve Han 2022). Johnson-Cook hasar gerinmesi genel olarak gerilme üç eksenlilik oranına, gerilme hızına ve sıcaklığa bağlı bir hasar modelidir. Tek eksenli çekme deneyleri ile istenen birçok parametreye ulaşmak mümkün iken gerilme üç eksenliliği bu testlerden elde edilemez. Gerilme üç eksenliliği ve eşdeğer gerilme, malzemenin boyun oluşumuna kadar plastik davranışı dikkate alınarak hasarsız numuneden elde edilebilir (Murugesan vd. 2017).

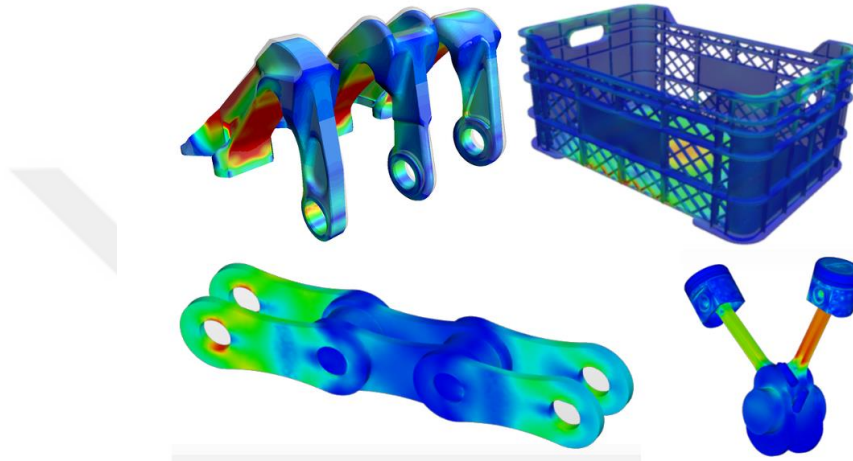
3.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar analizi (SEA), mühendislikte ve bilimde karmaşık yapısal ve fiziksel sistemlerin/malzemelerin gerçek hayatta maruz kaldıkları/kalacakları tepkilere karşı verilen yanıtları görmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar analiz yöntemi karmaşık geometrileri, malzeme özelliklerini, yük durumlarını basit, çözümlemeye uygun küçük parçalara/elemanlara ayırarak çalışmaktadır. Bu elemanların her biri üzerinde hesaplamalar yapıp ardından tüm elemanlardan elde edilen veriler birleştirilerek sistemin davranışı tahmin edilir. Mühendisler için SEA kullanmasındaki temel nedenlerin birkaçı tasarımların daha güvenli, dayanıklı ve verimli hale getirmelerine olanak tanınmasıdır. Gerçek dünya koşulları bilgisayar ortamında modellenip simüle edilir, bunun neticesinde yapılan tasarımlar üretim aşamasına geçmeden daha erken optimize edilip, prototip masrafları düşürülebilir.

SEA sıklıkla çeşitli zaman alıcı ve pahalı deneysel testlere bir alternatif olarak kullanılır (Delele vd. 2010). Aynı zamanda herhangi bir tasarım prototipini simüle etmede ve bu prototipin hemen hemen her ortamdaki davranışını belirlemede faydalı olduğu belirlenmiştir (Rao 2010, Sirekha ve Bashetty, 2010). Sonuç olarak SEA, yeni prototipler oluşturmak için zaman ve kaynak israfı yapmadan, yeni bir model geliştirilip analizi yapıldıktan sonra farklı bir tasarım olasılığını değerlendirmeye yardımcı olur (Chandrupatla vd. 2002, Delele vd. 2010, Rao 2010, Reh vd. 2006, Sirekha ve Bashetty 2010).

Sonlu elemanlar analizi mühendislik ve bilim gibi birçok alanda kullanılırken farklı analizleri yapabilmek için yapısal farklılıklar bulundurmaktadır. Örneğin doğrusal ve statik olmayan analizler için artımlı yük gereklidir. Daha basit bir ifadeyle matematiksel bir problemi çözmek için fizik-zaman ilişkisinin bölünmesi anlamına gelmektedir. Bunun için iki sınıflandırma yapılırsa: zamana bağlı veya zamandan bağımsız problemler olarak sınıflandırılabilir. Hızlanmanın etkileri belirgin olduğunda ve ihmal edilmediğinde bu problemlere “zamana bağlı” problemler denmektedir. Örnek olarak; Düşürme testleri, otomobil kazaları, balistik patlamalar vb. verilebilir. Kısacası gerinim oranı saniyede 10^{-3} ve daha fazlasına sahip olduğunda SE analizlerinde explicit yöntem kullanılmaktadır. Buna karşılık uygulanan yük yapıya veya yüzeye yavaşça

uygulandığında (masaya bilgisayar bırakılması gibi) yükleme “yarı statik” veya “zamandan bağımsız” olarak varsayılabilir. Bu şekilde tanımlanmasının ana nedeni yükleme süresinin ivme etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olması için yeterince yavaş olmasındandır. Gerinim oranı düşük problemlerde ise bu tip analizlerde implicit yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 4.2’de yapılan farklı sonlu elemanlar analizlerine örnekler verilmiştir (İnt. Kyn.11).

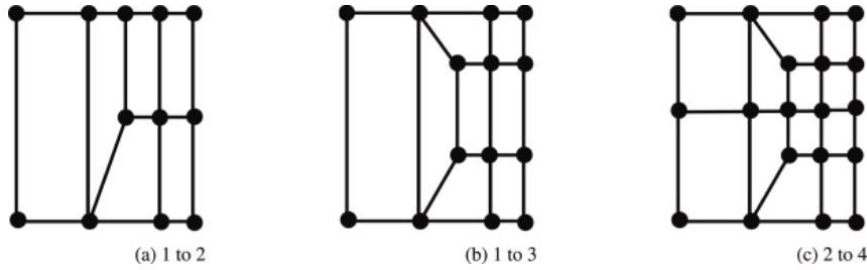


Şekil 4.2 Bir aerobasket’in statik analizi (sol üst); alışveriş sepeti (sağ üst); krank mili (sağ alt); bir zincir bağlantısının dinamik analizi (sol alt) (İnt. Kyn.5)

3.2.1 Sonlu Elemanlar Analizinde Mesh Yapısının Önemi

Sonlu elemanlar analizi, yapı ve malzeme mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarındaki problemleri çözmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında, malzemenin yük altındaki FE analizi mühendislik yapılarının güvenilirliğini değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle kırılma noktalarının gerçekleşeceği yerlerde meydana gelebilecek hasarların analizleri için bu noktalara olabildiğince küçük mesh ağ yapısı gerekmektedir. Bu nedenle üç boyutlu malzemelerin FE analizi için çok sayıda mesh ve eleman yapısı üzerinde zaman alıcı bir çalışma gereklidir. Kırılma noktasından uzakta olan bölgeler için kaba bir mesh ağ yapısı, yakın olan bölgeler için ince bir mesh yapısı hesaplama maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Mesh tipi seçimi yanı sıra farklı boyutlara sahip küresel ve bölgesel mesh ağlarını birbirine bağlamak için, farklı ağlar arasındaki eşleşmeyen ağları birleştirmek için etkili bir şema geliştirmeye ihtiyaç vardır (Liu vd. 2024).

Mesh geçiş tekniklerindeki yeniliklere rağmen, ticari SEA programlarının kabiliyetleri, özellikle katmanlı malzemelerde katmanlar arası etkileşim uygulanmasının esas olduğu büyük ölçekli yapıları modellemek için kullanıldığında sınırlı kalmaktadır. şekil 4.3’de kaba mesh yapısından daha ince mesh yapısına geçişte kullanılan bir elemandan iki elemene geçiş, bir elemandan  elemene geçiş ve iki elemandan dört elemene geçiş örnekleri verilmiştir (Liu vd. 2024).

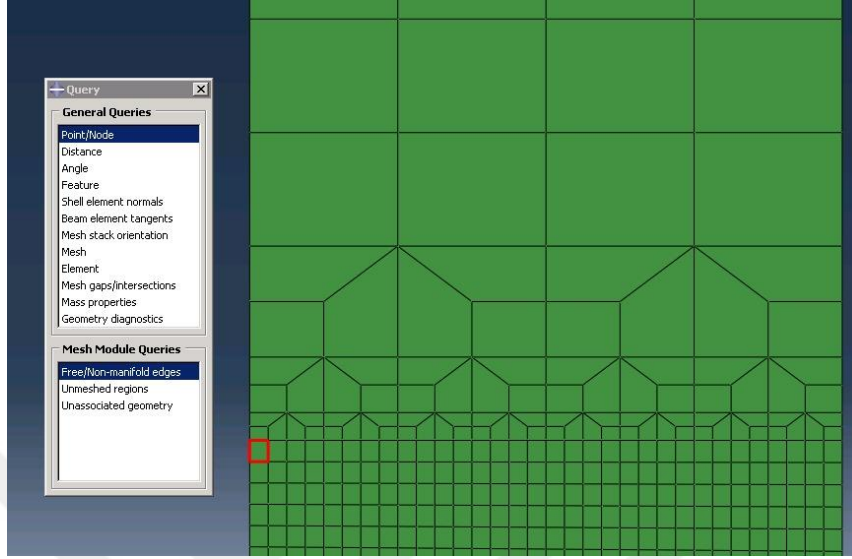


şekil 4.3 Tipik sonlu elemanlarda mesh ağ yapısının geçiş örnekleri. (a) 2 elemandan 1 elemene geçiş. (b) 1 elemandan 3 elemene geçiş. (c) 2 elemandan 4 elemene geçiş (Wellord ve Gorman 1987, Anderson vd. 2009)

Yapılan tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımının tek eksenli çekme deneylerini gerçekleştirdikten sonra ABAQUS paket programında numune eksenel simetrik olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar paket programlarının kullanılmasındaki temel sebeplerden biri oldukça pahalı ve ulaşılması zor olan deney düzeneklerinin sonlu elemanlar modellerinde analitik ve sayısal yöntemlerin yardımıyla gerçekleştirilmesine olanak tanınmasıdır. Ti6Al4V alaşımı ABAQUS eksenel simetrik olarak modellenip kabadan inceye geçen bir ağ yapısı ile manuel olarak mesh yapılmıştır. Mesh oluşturulurken şekil 4.5’de görüleceği üzere kırılmanın gerçekleşeceği çentik noktalarına daha yoğun bir mesh ağ yapısı uygulanmıştır. ABAQUS analiz programında otomatik mesh seçenekleri çentikli numune üzerinde düzenli ve sık bir mesh yapmak için yetersiz gelmektedir. Kırılmanın gerçekleşmeyeceği noktalarda yoğun mesh yapısının çözüm sürecini çok uzatacağı tecrübe edildikten sonra uzun uğraşlar sonucunda ve aynı zamanda numunenin geçiş bölgeleri arasındaki düzenli bir mesh ağ yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. şekil 4.4’de görüleceği üzere öncelikle dörtten sekize, sekizden on altıya, on altıdan otuz ikiye olacak şekilde kademeli mesh ağ yapısı uygulanmıştır.

Ti6Al4V alaşımının çentik noktalarına yoğun bir mesh yapısı uygulanmıştır. Sünek atlak oluşumunun bu noktalardan başlayacağı aynı zamanda gerilim üç eksenlilik

parametresinin sünek çatlak oluşumuna bağlı olduğu yapılan çalışmalarca kanıtlanmış ve çentikli deney numuneleri kullanılmıştır (Bao ve Wierzbicki 2004).



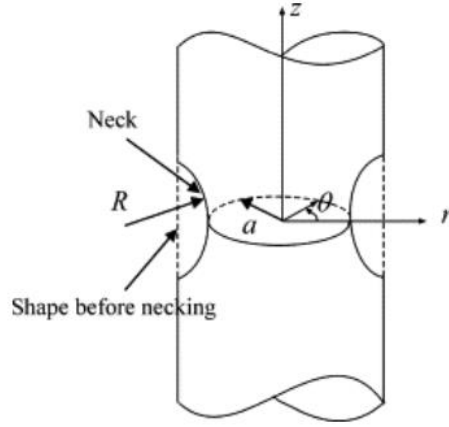
Şekil 4.4 Ti6Al4V alaşımına uygulanan mesh yapısı

Hancock ve Mackenzie 1976, çentikli çelik numuneler üzerinden çekme deneylerini gerçekleştirmiştir. Borvik vd. 2003, gerilim üç eksenliliği ile kırılma gerinimi arasında bir ilişki elde etmiştir. Lou vd. 2012, mikro boşlukların eşdeğer plastik gerinime göre orantılı olarak çekirdeklendiği, boşluk büyümesinin gerilim üç eksenliliğe bağlı olduğunu ve boşlukların birleşmesi sonucu maksimum kesme gerilmesi ile kırılmanın gerçekleştiğini belirtmiştir. Bridgman 1952, gerilim üç eksenliliği başlangıç geometrisine dayalı formülü kullanarak hesaplamış ve gerinimin minimum kesit boyunca sabit olduğunu varsaymıştır.

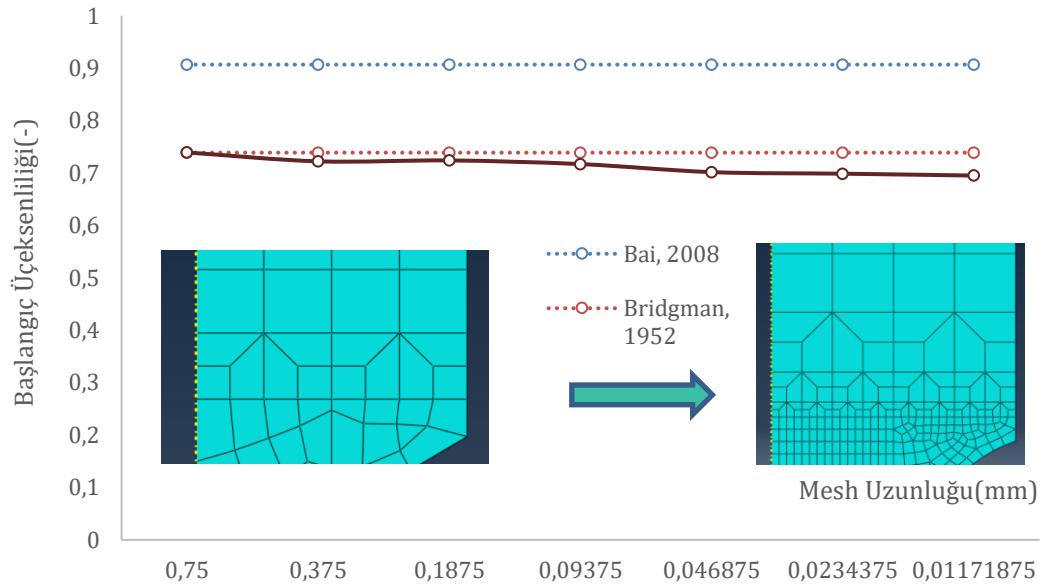
$$\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (3.16)$$

Bridgman 1952, boyun profili ile çatlak oluşumunun gerçekleştiği yer olan boyun merkezindeki gerilim üç eksenliliğinin hidrostatik basınç olmayan bir çekme çubuğu için Şekil 4.6'daki geometriye bakılarak Denklem 3.16 ile belirleneceğini ileri sürmüştür. Burada a ve R minimum kesitin yarıçapı ve çentiğin yarıçapıdır. Bai 2008 tarafından önerilen gerilme üç eksenlilik denklemi özellikle malzeme bilimi ve kırılma mekaniği çalışmalarında gerilme durumlarının kırılma üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanılır (Denklem 3.17).

$$\eta = \frac{1}{3} + \sqrt{2} \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (3.17)$$



Şekil 4.5 Dairesel çekme numunesinde boyun oluşumu (Bridgman 1952)



Şekil 4.6 Mesh boyutunun gerilme üç eksenliliğine olan etkisi

Bridgman 1952, hidrostatik basınç altındaki malzemelerde gerilme üç eksenliliğin etkilerini deneysel olarak gözlemlemiş ve bunun plastik deformasyon ve hasar davranışına olan etkisini açıklamıştır. Bai 2008 ise Bridgman'ın çalışmalarını temel alarak gerilme üç eksenliliğin hasar kriterlerine nasıl entegre edebileceğini araştırmıştır. Bai'nin çalışması, özellikle karmaşık gerilme durumlarında malzemelerin hasar

davranışını daha hassas bir şekilde tahmin etmek için gerilme üç eksenlilik oranının kullanılabileceğini savunmaktadır (Denklem 3.16). Sonuç olarak Bai farklı yükleme durumlarına göre malzemenin hangi noktada hasara uğrayacağına yönelik tahminlerin doğruluğunu arttırmak için gerilme üç eksenliliğin malzemelerin hasar modelleme sürecine entegre edilmesini gerektiğini belirtmiştir.

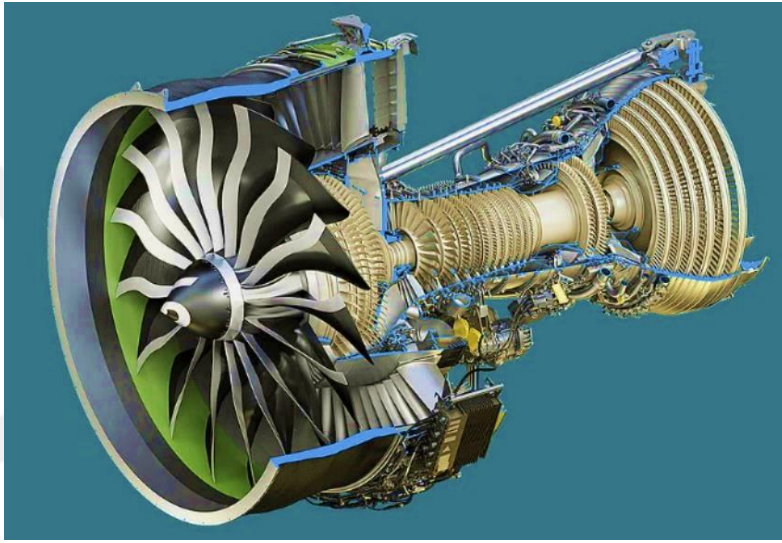
3.3 Toz Metalurjisi ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Temel Özellikleri

Üretim, insan ırkının kökenine kadar uzanan ve insanların dünyayı kendi ihtiyaçlarına göre uyarlama ihtiyacını yansıtan bir üretim tekniğidir. Bu nedenle hammaddeleri nihai ürünlere dönüştürme süreci olarak tanımlanabilir. Üretim ayrıca, üretilen ürünün kendisinden başka ürünler yapmak için kullanıldığı faaliyetleri de içerir (Kalpakjian 2014). İnsanlarla doğrudan bağlantılı bir araç olduğundan, insanlıkla aynı hızda evrimleşmek zorunda kalmıştır; Bunun sonucunda insanlık ilerledikçe yeni ihtiyaçların ve üretim süreçlerinin ortaya çıktığı anlamına gelmektedir. Katmanlı üretim (AM), mevcut üretim tekniklerinden biridir. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımları veya gerçek bir nesnenin taramalarını kullanarak tasarlanan nesnelerin somutlaştırılmasını mümkün kılar (Juarez ve Pena 2017). Çeşitli AM teknolojileri, havacılık, otomotiv, biyomedikal mühendisliği, inşaat ve diş hekimliği gibi önemli mühendislik ve tıp alanlarında büyük ilerlemelere yol açmıştır (Tamayo vd. 2021).

Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olan katmanlı üretim, bilgisayardan destekli tasarım programlarıyla oluşturulan modellerin katman katman üretimini içermekle birlikte benzersiz bir esneklik ve birçok geleneksel üretim yöntemlerinin kısıtlamasından uzaktır. Katmanlı üretim yöntemiyle imal edilen ve genellikle TC4 olarak adlandırılan Ti6Al4V alaşımı, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek kırılma tokluğu, mükemmel korozyon direnci ve üstün biyoyumluluk kombinasyonunu sağlayan bir $\alpha + \beta$ faz yapısına sahiptir (Donachie 2000, Cui vd. 2011). Mevcut titanyum alaşımlarının gelişmiş halini temsil eder ve dünya çapında en çok kullanılan ve başarılı bir titanyum alaşımı olarak küresel titanyum alaşımı üretiminin yaklaşık yarısına katkıda bulunur (Markhoff vd. 2017, Barriobero vd. 2017). Ti6Al4V alaşımının hafif ve mukavemetli özelliklerinin birleşimi nedeniyle özellikle jet motorları, gaz türbinleri ve çeşitli uçak

gövdesi elemanları olarak yüksek yapısal bileşenlerde kullanılır (Inagaki vd. 2014, Uhlmann vd. 2015, Boyer 1996, Singh vd. 2017).

Ti6Al4V alaşımının düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti, korozyon direnci ve biyouyumluluğu nedeniyle implantlar ve diğer tıbbi uygulamalar için ideal hale gelen nitelikleri biyomedikal sektöründe yaygın olarak benimsenmiştir. Ek olarak deniz mühendisliği, otomotiv, enerji ve kimya gibi çeşitli alanlarda kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve kullanılmıştır (Brunette vd. 2001, Bahl vd. 2021, Bordin vd. 2017).



Şekil 4.7 Ti6Al4V'nin imalat endüstrisindeki uygulamaları uçak motoru kanatları (İnt. Kyn.6)



Şekil 4.8 Ti6Al4V'nin imalat endüstrisindeki uygulamaları türbin kanatları (İnt. Kyn.7)

Geleneksel üretim tekniklerinin yanı sıra katmanlı üretim tekniklerinin karmaşık geometrilere sahip malzemelerin üretimi için sıkça kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise toz metalurjisiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri Çizelge 2.4’de ağırlıkça % kimyasal bileşimi Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri (Liang vd. 2018)

Malzeme Özellikleri	Değer
Yoğunluk (kg/m³)	4500
Young Modülü (GPa)	112
Poisson Oranı	0.34
Isı İletkenliği (W/mK)	7.6
Özgül Isı (J/kgK)	611
Erime Noktası (°C)	1650
Elastise Modülü (GPa)	110-114
Akma Dayanımı (MPa)	825-869
Kopma Uzaması (%)	6-10

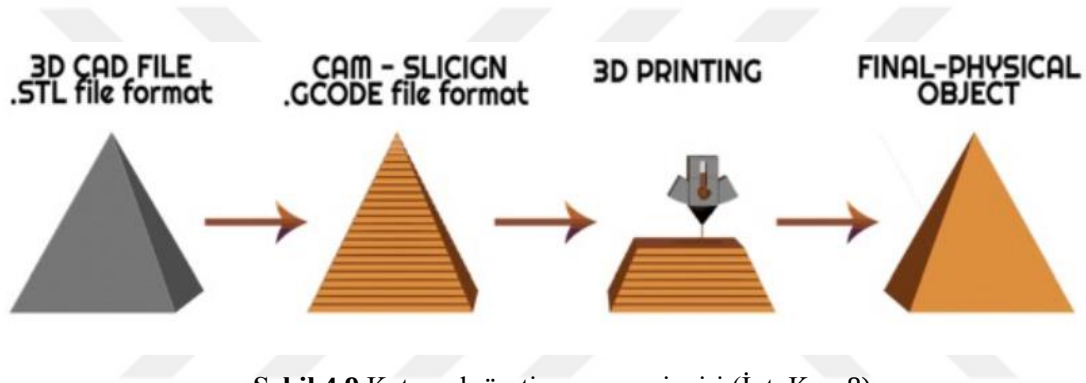
Çizelge 2.5 Ti6Al4V tozunun ağırlıkça % kimyasal bileşimi (Wang vd. 2022).

Elementler	Al	V	O	N	H	Fe	C	Ti
Kütlece %	6.14	4.07	0.1	0.022	0.0015	0.075	0.016	Denge
Oranları								

Eklemeli üretim (AM), ISO/ASTM 52900:2015’e göre genellikle katman katman 3B model verilerinden parçalar üretmek için malzemeleri birleştirme sürecidir; çıkarmalı/eksiltmeli veya biçimlendirici üretim metodolojilerinin aksine eklemeli üretimle üretilen bileşenler, ayrıntılara gösterilen aşırı dikkat sürünmeye, oksidasyona ve korozyona karşı direnç ve de en önemlisi yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini koruyabilme gibi yeteneklere sahiptirler (Sing ve Yeong 2020, Qin vd. 2020, ISO/ASTM 52900:2015, Jinoop vd. 2018).

Her AM süreci, 3 boyutlu yazdırılmış bir nesne elde etmek için aşağıdaki adımları içerir (Ishfag vd. 2021):

- i) İlk olarak üretilecek olan 3 boyutlu modelin oluşturulması için CAD (Computer Aided Design) yazılımı kullanılır.
- ii) Bu CAD modeli stereolitografi (STL) formatına dönüştürülür. (Stereolitografi esas olarak AM endüstrisinde standart bir uygulama olarak kabul edilir.)
- iii) II. Adımdaki dosya bir dilimleme yazılımı kullanılarak birkaç ince kesit katmanına dilimlenir.
- iv) Dilimlenen dosya üzerinden CNC (Computer Numerical Control) kodları kullanılarak gerçek parça makinede basılır.
- v) Son adımda genellikle yüzey işlemleri, sinterleme veya son işlem adımlarına ihtiyaç duyulur.

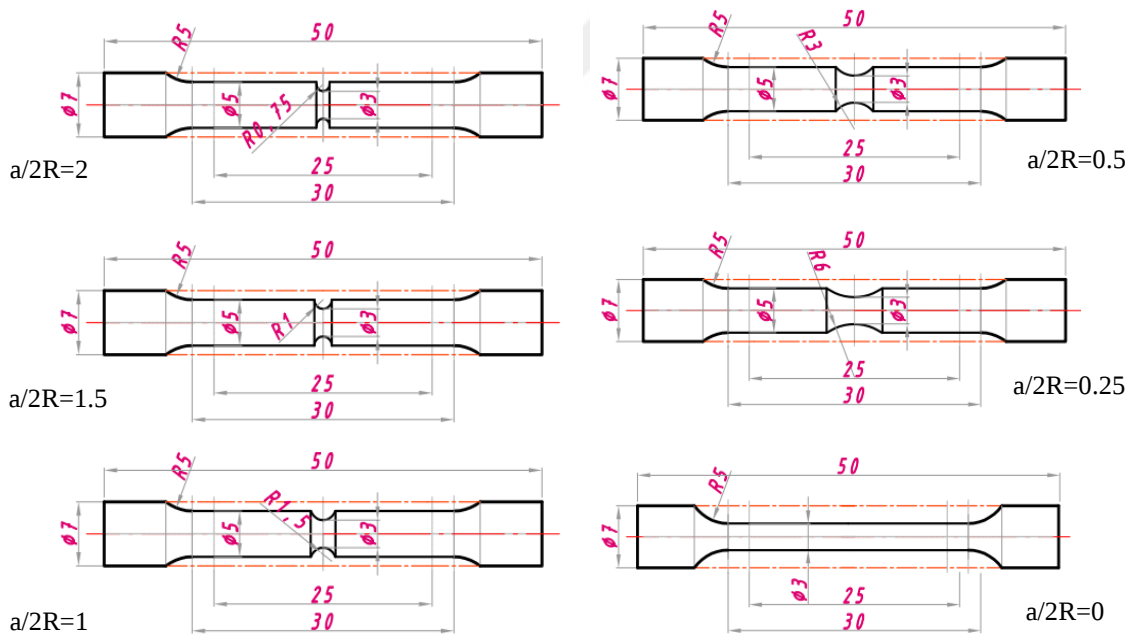


3.4 Numuneler ve Test Cihazları

TS EN ISO 6892-1 ve ASTM E8M, metalik malzemelerin çekme testinde kullanılan uluslararası standartlardır. Malzemelerin metalik özelliklerini doğru bir şekilde değerlendirmek için geliştirilmiş ayrıntılı yöntemler sunmaktadır. Bu standartlar, farklı ölçüm yöntemleri ve numune tiplerinin testlerin güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. TS EN ISO 6892-1 standardı metalik malzemelerin ortam sıcaklığında çekme deneyi ile ilgili prosedürleri belirler ve Avrupa Birliği normlarına uygun hale getirir. TS EN ISO 6892-1 standardı çekme deneylerinde kullanılan ölçüm yöntemlerinin detaylarını belirtir ve malzeme üreticilerinden mühendislik firmalarına kadar geniş bir endüstri yelpazesi tarafından kullanılır. Bu standardın amacı çekme testlerinde ölçülen değerlerin küresel olarak karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktır. TS EN ISO 6892-1 standardında çekme testin gerçekleştirilmesi için önerilen numune boyutları, numunenin ölçüm noktaları, test hızları ve çevresel faktörlerin nasıl kontrol edileceği gibi ayrıntılar yer

almaktadır. ASTM E8M standardı ise çekme deneylerinde kullanılan numunelerin geometrisine odaklanır ve test sırasında elde edilen verilerin güvenilirliğini arttırmak için belirli standart numune tiplerini (daireysel ve düz kesitli numuneler) tanımlar. Kısaca ASTM E8M standardı numune tipleri, çentik radyüsü ve test hızı gibi detayları belirtir ve küresel olarak diğer deneylerle karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır (Aydemir 2013).

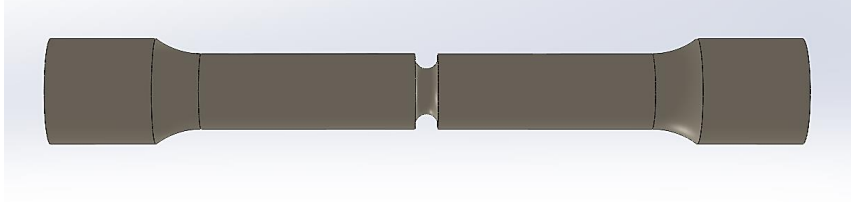
JC hasar gerinmesi, gerilme üç eksenlilik oranına, gerinme hızına ve sıcaklığa bağlı bir hasar modelidir. Bu değişim oranları için TS EN ISO 6892-1 ve ASTM E8M standartları göz önüne alınarak farklı boyun ve yarıçap oranındaki ($a/2R$) daireysel deney numuneleri farklı hızlarda çekme deneyine tabii tutulması gerekmektedir. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere farklı $a/2R$ oranına sahip numunelerin teknik resimleri verilmiştir. Şekil 4.12’de ise EOS M 290 cihazında üretilecek olan daireysel numuneler için 3D modelleme programı olan Solidworks’de her $a/2R$ numunesi için katı model oluşturulmuş ve cihaz için uygun olan STL formatına dönüştürülerek Artuk Aviation Savunma Sanayi ve Ticaret Limited şirketine teslim edilmiştir.



Şekil 4.10 Çekme deneyi için hazırlanan numune ölçüleri ve $a/2R$ oranları

Johnson-Cook hasar gerinmesi gerilme üç-eksenlilik oranına, gerinme hızına ve sıcaklığa bağlı bir hasar modeli olduğu daha önce bahsedilmiştir. Bu değişim oranları için farklı hızlarda, sıcaklıklarda boyun genişliği ve yarıçap oranında ($a/2R$) testlere tabii tutulması

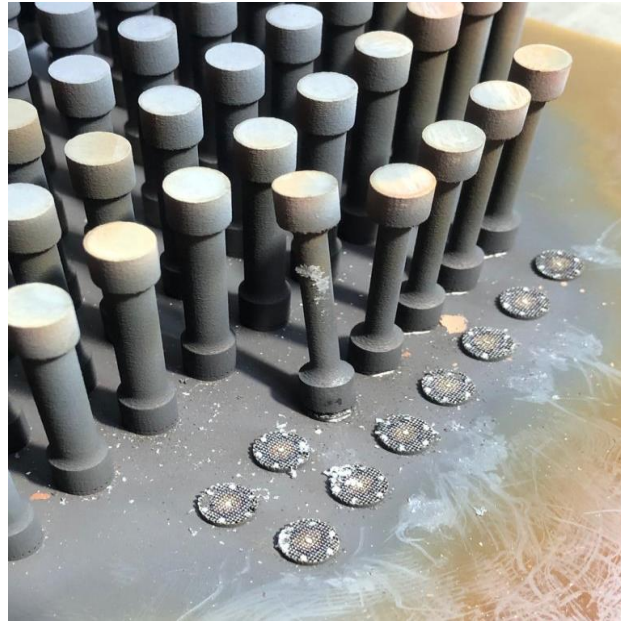
gerekmektedir. Farklı $a/2R$ oranına sahip numuneler Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.11'de ise 3D modelleme programı olan Solidworks'de her $a/2R$ numunesi için katı model oluşturulmuş ve STL formatına dönüştürülmüştür.



Şekil 4.11 Solidworks programında yarıçapı 0.75 mm olan numenin katı modeli



Şekil 4.12 a) Ti6Al4V numunelerinin üretildiği 3D baskı cihazı b) Isıl işleme tabi tutulmamış, işlenmemiş Ti6Al4V alaşımı



Şekil 4.13 EOS M290 cihazından çıkan numunelerin plakaya yapışmasını önlemek amacıyla tutucular

Çizelge 2.6 Ti6Al4V alaşımının imalatında kullanılan ana proses parametreleri

Parametre	Değer
Lazer Gücü, (W)	340
Katman Kalınlığı, (μm)	60
Kapak aralığı, (mm)	0.12
Lazer hızı, (mm/s)	1250
Enerji yoğunluğu, (J/mm^3)	37.78
Lazer deseninin stratejisi	67° dönüşlü şerit tarama deseni

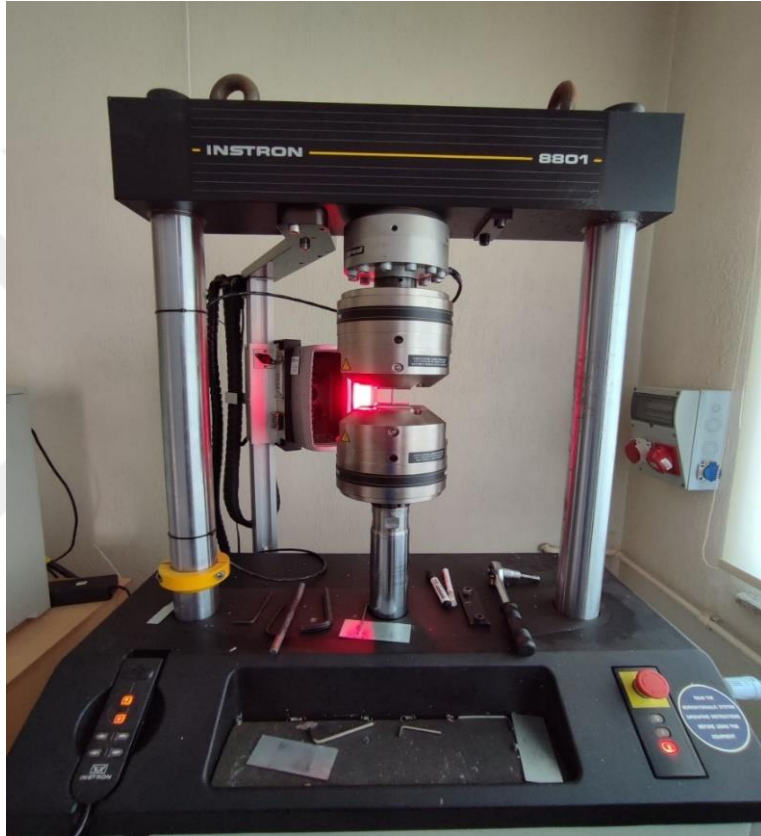


Şekil 4.14 EOS M290 cihazından çıkan numunelerin CNC ve Torna tezgahında talaşlı imalat aşamaları

Artuk Aviation Savunma Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinde toz metalurjisi ile farklı çentik radyüslerinde ve 60 μm katman kalınlığında, $\varnothing 7$ mm x 50 mm boyutlarında işlenmiş Ti6Al4V dairesel numuneler ticari olarak tedarik edilmiştir. Ayrıca 250 x 250 x 325 mm^3 yapı hacmine sahip ve maksimum lazer gücü 400 W ve odak çapı 100 μm olan güçlü bir fiber lazerle donatılmış EOS M 290 cihazında lazer toz yatak füzyonu (LPBF) metal 3B yazıcı kullanılarak argon gazı ortamında üretilmiştir (Şekil 4.12). LPBF Ti6Al4V'nin üretimi sırasında Alamos vd. 2020 tarafından 60 μm 'lik bir katman kalınlığı için önerilen standart baskı parametreleri kullanıldı. Kullanılan LPBF işlem parametreleri Çizelge 2.6'da verilmiştir. Numuneler dikey yönde üretilmiştir. (Şekil 4.13).

EOS M 290'da üretilen Ti6Al4V alaşımları cihazdan çıktıktan sonra numunede oluşan artık gerilmeyi sönmölemek için fırında bekletilmelidir. Fırında dakikada 5 °C ısınacak şekilde 800 °C kadar ısıtılmış ve 800 °C sabit sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Ardından

kademeli şekilde dakikada 5 °C olacak şekilde 175 °C ye soğutularak fırından çıkarılmıştır. Bu işlemler argon gazı altında, oksijen ile bağlantı kesilerek yapılmıştır. Fırından çıkarıldıktan sonra Ti6Al4V alaşımı R0.75, R1, R1.5, R3 ve R6 çentik radyüsleri açılmak için Şekil 4.15’de gösterilen CNC ve torna tezgahında işlenerek son hale getirilmiştir. Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji laboratuvarlarında Instron 8801 çekme tez cihazına bağlanarak 0.01, 0.1, 1 mm/s gerinim hızlarında çekme deneyi yapılmıştır.



Şekil 4.15 Instron 8801 hidrolik yorulma test cihazı

3.5 JC Parametrelerinin Elde Edilmesi için Kullanılan Programın Arayüzleri

JC akış gerilmesi ve hasar modelinin tüm parametrelerinin elde edilmesi ve işlenmesi için zorlu birtakım hesaplamalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca hesaplamaların uzun ve tekrarlanabilirliği fazla olduğundan dolayı bir matematik hesaplayıcı kullanmak şarttır. Fakat her deney sistemi için yapılan işlemlerin belirlenmesi, veri girişlerinin sağlanması problem olmaktadır. Bu işlemlerin rutin bir şekilde hesaplanıp raporlanması için bir program şarttır, bu yüzden dolayı FIND JC olarak adlandırılan programdan yardım

alınmıştır. Simülasyon ve test sonuçları farklı arayüzler kullanılarak programa giriş yapılmakta, program ise sayısal analiz yöntemlerinden eğri uydurma- regresyon yöntemlerini kullanarak hasar parametreleri elde edilmektedir. Şekil 4.16’da programın ana arayüzü görülmektedir. Burada A ve B kısımları sırasıyla JC akış gerilmesi ve JC sünek hasar parametresi, C ise karşılaştırma için Holloman pekleşme parametresi sonuçlarını vermektedir. D bölümünde ise testler için % akma gerilmesi, maksimum gerilme, elastise modülü vb. bazı önemli parametreler bulunmaktadır. E bölümünde ise yapılan deney cihazlarının kullanıcıya sunduğu veri tipinin farklılığından (txt, dat, xlxs, vb.) dolayı farklı dosya tipleri seçimlerinin yapıldığı kısımdır. Tüm seçeneklerin doğruluğunun kontrolü F bölümünde, eğri uydurma, eğri uydurma başarısı ve regresyon grafik seçenekleri ise G bölümünde verilmiştir (Çetkin 2022).

FIND_JC programının en önemli olan kısmı Şekil 4.17’de görülen ekrandır. Her bir numune için hesaplanan sonuçlar bu ekranda görülmektedir. Bu noktada numunelerinin boyutlarının girilmesi, ekstansometreye göre seçim, kritik noktaların manuel olarak seçilmesi gibi seçenekler bulunmaktadır. Defalarca farklı numuneler üzerinden sonuçları kontrol edilmiş ve sonuçları başarıyla bulduğu tespit edilmiştir (Çetkin 2022).

Johnson-Cook's Coefficients				Example			
A	0	Mpa	RSqr	0	Mj/m3		
B	0	Mpa	AdRS	0	Mj/m3		
n	0			0	N/mm2		

Hollomon's Coefficients				Values from Tensile data			
K	0	Mpa	RSqr	0	Mpa		
n	0	mm/mm	AdRS	0	Mpa		

Balance				COMPUTE				New this file can use.			
Tolerance for rupture point (%)				0							
Tolerance for prep. point (%)				0							
Tolerance for yield point (%)				0							
Specify prep. point from...				0							
Prep. Stress is... (Mpa)				0							
Prep. Strain is... (%)				0							
Specify yield start point from...				0							
Yield Stress is... (Mpa)				0							
Yield Strain is... (%)				0							
Specify Max point from...				0							
Maximum Stress is... (Mpa)				0							
Maximum Strain is... (%)				0							
Specify break point from...				0							
Break Stress is... (Mpa)				0							
Break Strain is... (%)				0							
Use Strain data from Video-Extensometer...				0							
Data Correction and Specify Start Point...				0							

Sample Dimensions			
Jaw Span	Length		
Support Span / Video	Sample Span		
Thickness	Thickness		
Width	Width		
Area	Area		

Ready for computing....

Graphics
Load - Tensile extension

Şekil 4.16 FIND_JC Programının Ana Arayüzü (Çetkin 2022)

The Six stress Parameters of Johnson-Cook Model			
A	0	Mpa	
B	0	Mpa	
n	0		
C	0		
m	0		

The Failure parameters of Johnson-Cook Model's			
D1	0	Mpa	
D2	0	Mpa	
D3	0		
D4	0		
D5	0		

Parameters of Hollomon's Model			
K	0	Mpa	
n	0		

Data's calculated by according to A:			
Prop. Limit Stress	0	Mpa	
Yield Stress	0	Mpa	
Rapture Stress	0	MPa	
Maximum Stress	0	MPa	
ϵ in rapture	0	%	
ϵ in max	0	%	
Toughness	0	Mj/m3	
Resilience	0	Mj/m3	
Young Modulus	0	MPa	

The material constants parameters are A, B, n, C and m. A is the yield stress of the material under reference conditions, B is the strain hardening constant, n is the strain hardening coefficient, C is the strengthening coefficient of strain rate, and m is the thermal softening coefficient.

The model parameters D1, D2 and D3 are belong stress triaxiality and strain to fracture. The strain rate and the temperature dependent damage parameters D4 and D5 obtained from a series of tests

Initials			
TEST MACHINES			
EVOLUTION FROM...			
SELECT PARAMETER TYPE			
DATA STEP			
Effect Type			
EFFECTS			
Number of The Strain Rate Groupings	1	Number of Thermal Softening	1
Optimization Process For Strain Rate and Temperature Effect			
Optimization Process is Enable			
Parameter Data From Mean Value Or All Parameters			
Data from Mean Values			
Test Numbers are OK			
All Test Options are Carefully Selected			
Files Select And Evaluation			
RESET			
Graphics			
Strain Rate (mm/s)		Temperature (C)	
Strain Rate and Temperature			
PLOT			
Evaluation For Only Unique File			
Select a file for JC parameter			

Şekil 4.17 FIND_JC Programının Akış Gerilmesi Hesaplama Arayüzü (Çetkin 2022)

4. BULGULAR

JC modeli, plastik deformasyon ve malzemenin hasara uğrayacağı noktaların analizlerinde kullanılan sıcaklık, gerilme hızı ve plastik deformasyon etkilerini hesaba katan bir malzeme modelidir. JC modeli özellikle çarpma, yüksek hızlı deformasyon, balistik analiz ve metal şekillendirme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Metal şekillendirme endüstrisinde ve diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında, sıcaklık ve hız değerleri malzemenin akma dayanımını, kırılma eğilimini ve deformasyon yeteneğini doğrudan ölçmektedir. Sonuç olarak JC parametrelerinin doğru bir şekilde kalibre edilebilmesi için hız ve sıcaklık referanslarının, malzemenin kullanım alanındaki çevresel koşullara uygun olarak seçilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Yanlış referans değerler kullanıldığında simülasyon gerçeği yansıtmayabilir. Bu da malzemede beklenmedik hatalara, performans yetersizliğine ve güvenlik sorunlarına yol açabilir. Yapılan çalışmada JC akış ve hasar modeli parametrelerinin belirlenmesinde 0.01, 0.1, 1 mm/s farklı gerilme hızları referans alınmıştır. Çekme deney numunesi olarak toz metalurjisi ile üretilen $\varnothing 7$ mm x 50 mm boyutlarında Ti6Al4V alaşımı AKÜ Teknoloji laboratuvarlarında bulunan Instron 8801 servo-hidrolik çekme cihazı ile çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen ham datalar FIND JC'ye aktarılmıştır. Burada gerekli optimizasyon-regresyon-eğri uydurma gibi yöntemler veri tipinin uygunluğuna göre seçilmesinin ardından JC akış gerilmesine ait olan A, B, n ve C parametreleri parametreleri ve Holloman pekleşme katsayıları bulunmuştur. Çizelge 2.7'de ise farklı hız koşullarında JC akış gerilmesine ait parametreler ve Holloman pekleşme parametreleri yer almaktadır. Şekil 5.1-a'da 0.01 mm/s, Şekil 5.1-b'de 0.1 mm/s ve Şekil 5.1-c ise 1 mm/s farklı hızlarda çekilen numunelerin FIND JC'den alınan grafikleri verilmiştir.

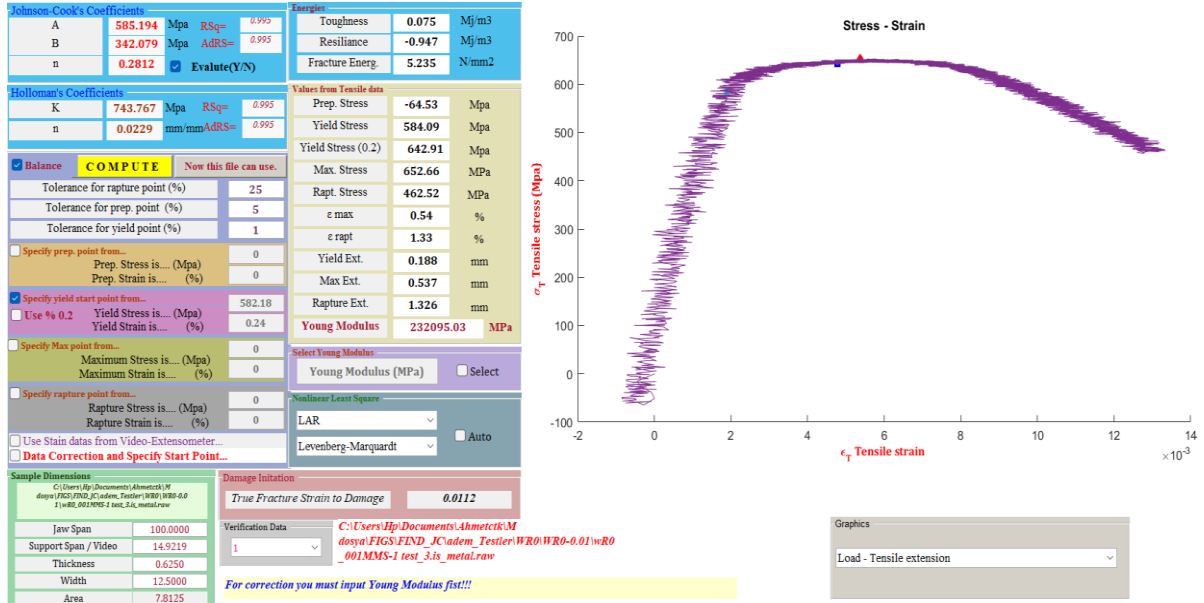
Çizelge 2.7 Farklı hız koşullarında JC akış gerilmesi ve Holloman pekleşme parametreleri

Test Hızı (mm/s)	A	B	n	C	K**	n**
0.01	585.194	342.079	0.2812		743.767	0.0229
0.1	673.745	503.634	0.2877	0.1004	878.404	0.0239
1	918.589	3298.419	0.7857		1103.738	0.0251

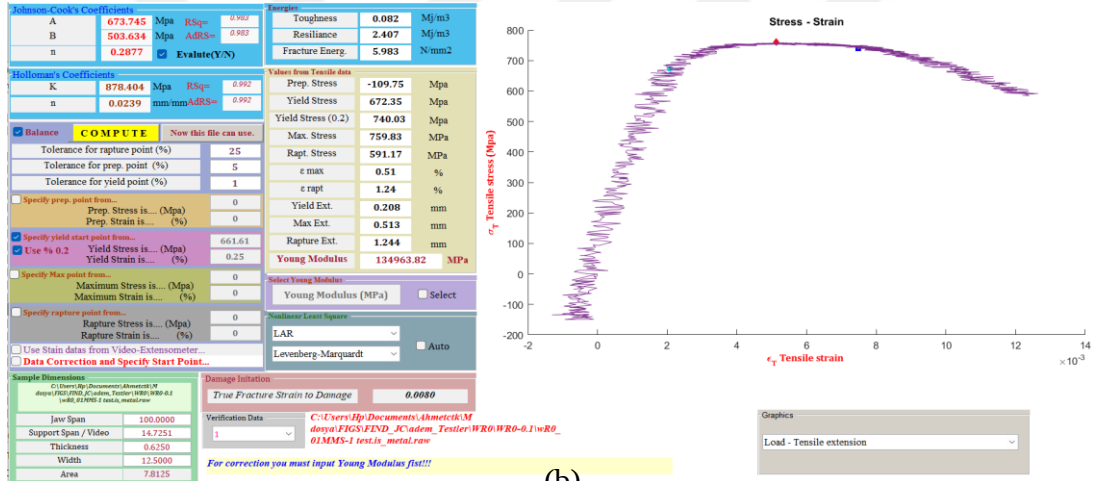
Instron 8801 çekme cihazında farklı hızlar altında yapılan çekme deneyleriyle referans deformasyon koşulları altındaki gerilme-gerinme değerleri hesaba katılarak Şekil 3'deki gibi grafik oluşturulmuştur. $\ln(\sigma - A)$ ile $\ln(\varepsilon)$ arasındaki doğrusal ilişki regresyon modelinin yardımıyla A, B, n değerleri elde edilmiştir. C değerini bulmak için ise Denklem 3.3'de gerekli düzenlemeler yapıldığında Denklem 3.4 vasıtasıyla Şekil 3.1'deki grafiğin eğiminden C değeri bulunmuştur.

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (3.18)$$

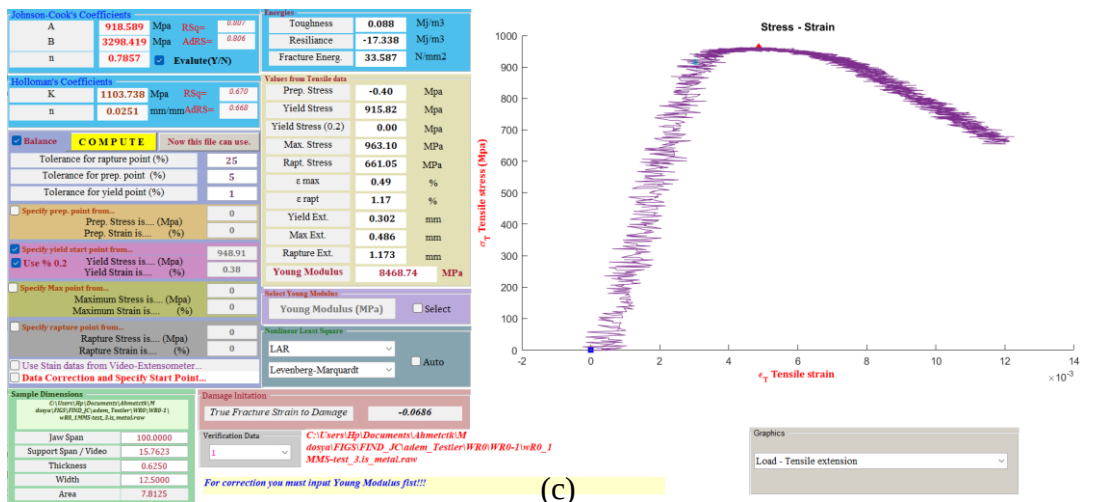
Denklem 3.18'de görüldüğü üzere R^2 ifadesi determinasyon katsayısı olarak tanımlanmakla birlikte, bulduğumuz parametrelerin gerçek eğriye ne kadar yaklaştığını gösteren değerdir. Pay ve payda değerleri bire eşit olduğunda %100'lük bir doğruluk olduğunu göstermektedir. Uymayan noktalarda ise ne kadar yaklaşıldığını hesaplama yoluyla vermektedir.



(a)

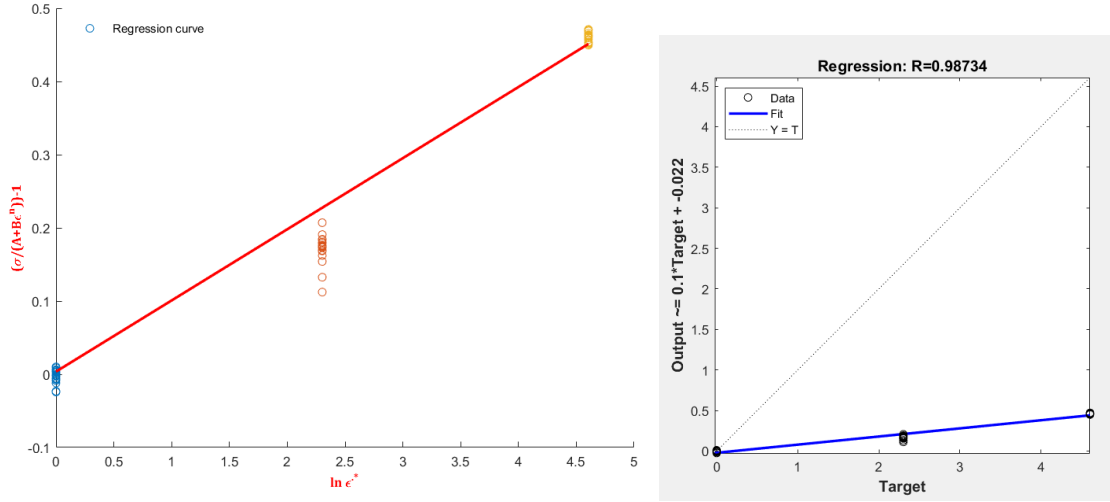


(b)



(c)

Şekil 5.1 Farklı test hızlarında numunelerin ortalama değeri



Şekil 5.2 Farklı test hızlarında numunelerin R-kare eğrileri ve regresyon grafiği

R^2 eğrisi, istatistikte ve veri analizinde kullanılan bir ölçüt olmakla birlikte modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu göstermektedir. R^2 'nin alabileceği değerler 0 ile 1 arasında değişmektedir. 0 değeri aldığı anda modelin hiçbir veriyi açıklayamadığını yani modelin tahminiyle gerçek değerler arasında bir ilişki olmadığını, 1 değerini aldığı anda ise modelin veriyi mükemmel şekilde açıkladığını ve model ile gerçeklik arasındaki doğruluğun tam olduğunu göstermektedir. Şekil 5.2'de görüleceği üzere R^2 değeri 0.98734 bulunmuştur.

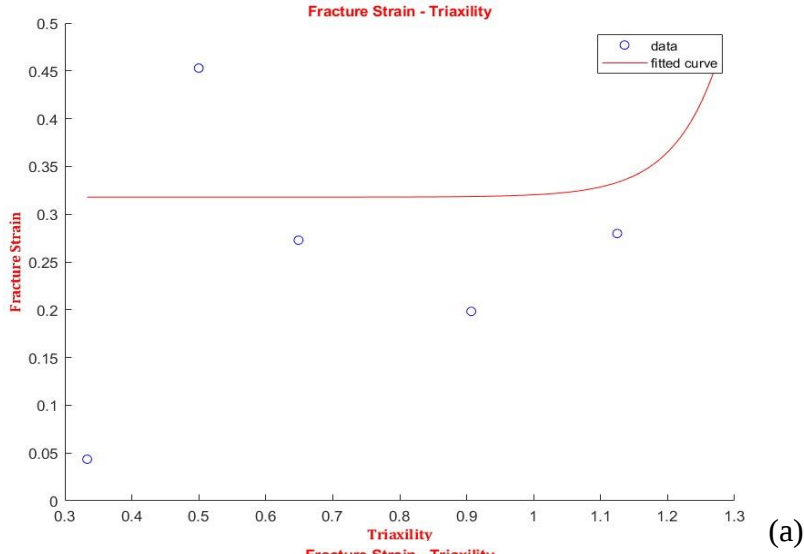
Johnson Cook sünek hasar parametrelerini elde etmek için gerilme üç eksenlilik oranı, gerilme hızı ve sıcaklığa bağlıdır (Zhanga vd. 2015, Banarjee vd. 2015). Sünek hasar parametreleri malzemenin farklı şartlar altında nasıl hasar göreceğini tahmin etmek için kullanılır. Bu parametreler üç ana faktöre bağlıdır;

Birinci faktör olarak gerilme üç eksenlilik bir malzemenin birden fazla eksenle (x,y,z) gerilmeye maruz kaldığı durumdur. Malzeme normal ve kayma gerilmelerinin kombinasyonuna maruz kaldığında hasar mekanizması değişebilir. Çizelge 4.1'de gerilme oranının sabit tutulup a/R oranlarının artması sonucu gerek ABAQUS gerekse de analitik yöntemler olarak gerilme üç eksenliliğin arttığını göstermiştir. Diğer bir faktör olan gerilme hızı, malzemedeki deformasyonun ne kadar hızlı gerçekleştiğini ifade eder. Yüksek gerilme hızlarında malzeme daha fazla dayanıklılık gösterir. Örneğin Çizelge 2.8'de gerilme oranındaki artış eşdeğer gerilme değerlerini arttırdığı görülmektedir. Aynı zamanda a/R oranlarının artması eşdeğer gerilimde de artış yaşandığını göstermektedir.

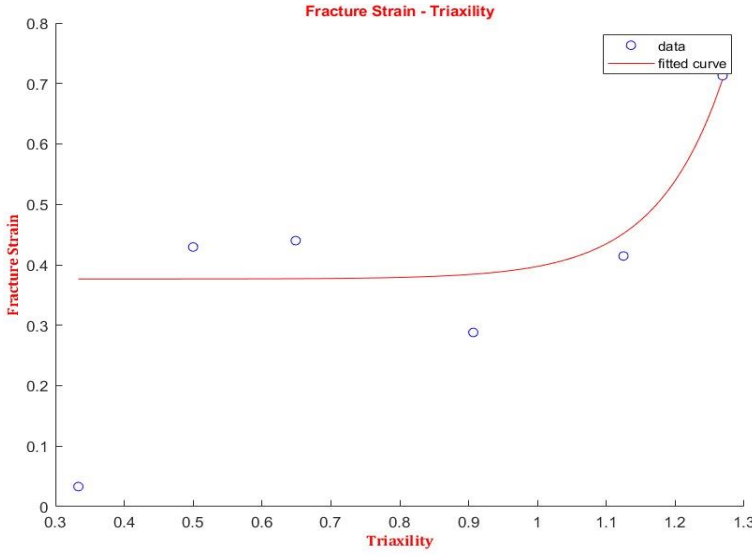
Bridgman 1952, yüksek hidrostatik basınç altında plastik deformasyonun ve hasarın nasıl değiştiğini inceleyen ilk deneysel çalışmalardan biridir. Hidrostatik basıncın ve gerilme üç eksenliliğin malzeme hasar modeli davranışlarını doğrudan etkilediğini deneysel olarak gözlemlemiştir. Bridgman'ın yapmış olduğu deneylerde yüksek hidrostatik basınca maruz kalan malzemelerin deformasyon sırasında daha sünek bir davranış sergilediğini ve hasara karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir. Bai 2008 ise yalnızca Von Mises gerilmesinin hasar modeli tahmininde yeterli olmadığını, yüksek gerilme üç eksenlilik durumlarında gerilme üç eksenliliğinin hasar modeli kriterlerine eklenmesinin tahminleri daha doğru hale getirdiğini belirtmiştir. Bu yaklaşım, özellikle çekme ve basma gibi karmaşık yüklemelerde kırılabilirlik ve sünekliği daha doğru şekilde öngörme açısından önemlidir. Bai'nin üç eksenlilik modeli, özellikle otomotiv, havacılık ve yapı mühendisliğinde malzeme seçimi ve tasarım kararlarında kullanılmaktadır. Model, yüksek yüksek hızda yükleme veya karmaşık gerilme durumları altında malzemelerin nasıl davranacağını hassas bir şekilde tahmin etme avantajı sağlar. Bai ve Bridgman'ın yapmış oldukları çalışmalar karşılaştırıldığında; Bridgman, gerilme üç eksenlilik ve hidrostatik basıncın malzeme üzerindeki hasar etkisini deneysel olarak incelerken; Bai, gerilme üç eksenlilik parametresini doğrudan hasar modeli kriterine dahil etmiş ve özellikle yüksek hız ve karmaşık yükleme durumlarında malzemenin hasara uğrayacağı andaki tahminlerin doğruluğunu arttırmıştır. Çizelge 2.8'de ise analitik ve Abaqus'den deneysel olarak elde edilmiş gerilme üç eksenlilik değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.8 ABAQUS ve analitik yöntemlerden elde edilen gerinme oranı ve farklı yöntemlerle hesaplanan gerilme üç eksenliliğine karşılık eşdeğer gerinme değerleri

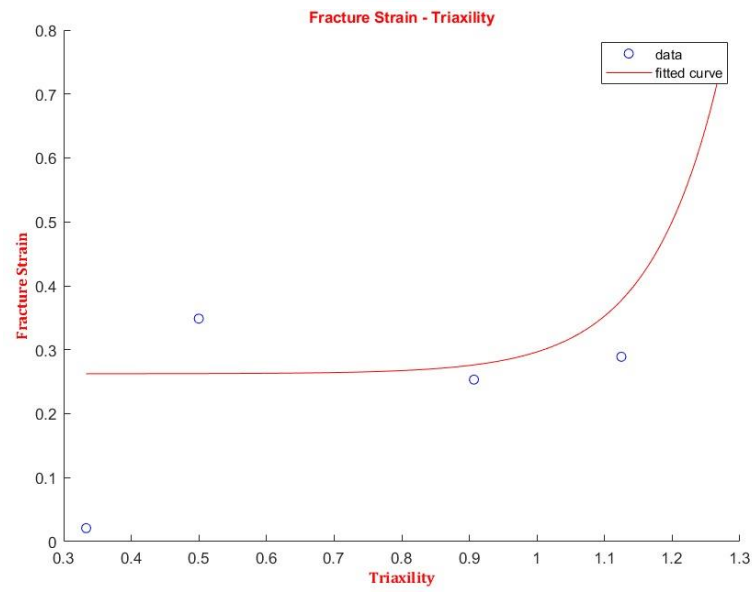
Gerinme Oranı	a/R	Gerilme Üç Eksenliliği				Eşdeğer Gerinme
		Abaqus	Analitik	Ortalama	Hasar	
SR=0.0004	1.875	1.268692	0.894494	1.210797	1.12966	0.453154
	1.5	1.12475	0.81423	0.977116	1.02356	0.279752
	1	0.906748	0.695511	0.880375	0.916444	0.198234
	0.5	0.648906	0.529738	0.708151	0.723306	0.172773
	0.25	0.499904	0.428648	0.634666	0.620138	0.152933
	0	0.333333	0.333333	0.333379	0.333332	0.043488
SR=0.004	1.875	1.268692	0.893839	1.392705	1.10699	0.712912
	1.5	1.12475	0.813636	1.002114	1.04047	0.414624
	1	0.906748	0.695406	0.897982	0.92356	0.288089
	0.5	0.648906	0.528884	0.729402	0.755507	0.240067
	0.25	0.499904	0.428506	0.595472	0.636431	0.22952
	0	0.333333	0.333334	0.333361	0.33335	0.033121
SR=0.04	1.875	1.268692	0.893749	1.116218	1.13337	0.736583
	1.5	1.12475	0.8139	0.99886	1.0791	0.289076
	1	0.906748	0.695144	0.927711	0.971936	0.268741
	0.5	0.648906	0.529016	0.735929	0.767089	0.253318
	0.25	0.499904	0.428352	0.600329	0.6358	0.148706
	0	0.333333	0.334289	0.333352	0.333337	0.021009



(a)

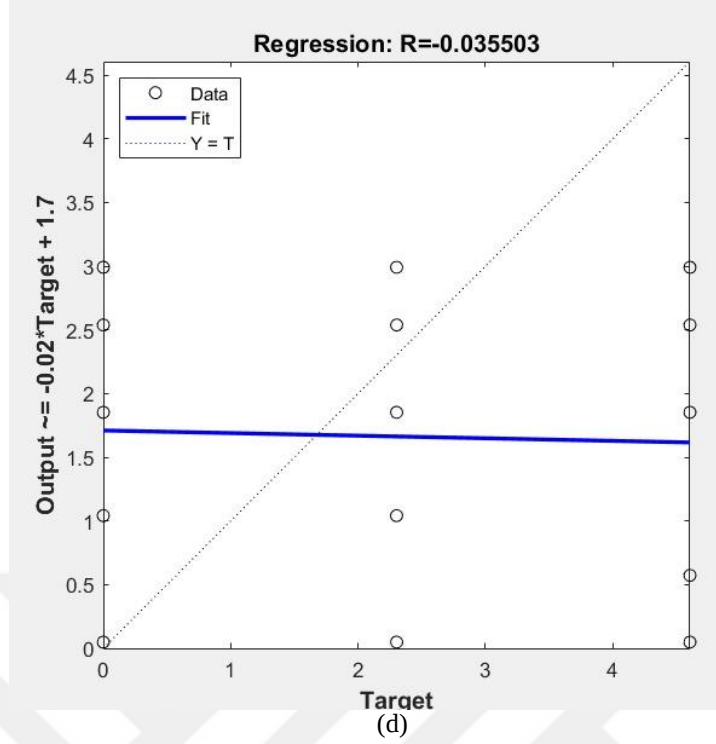


(b)



(c)

Şekil 5.3 Farklı test hızlarında JC sünek hasar parametreleri ve D_4 için hesaplanan regresyon eğrisi



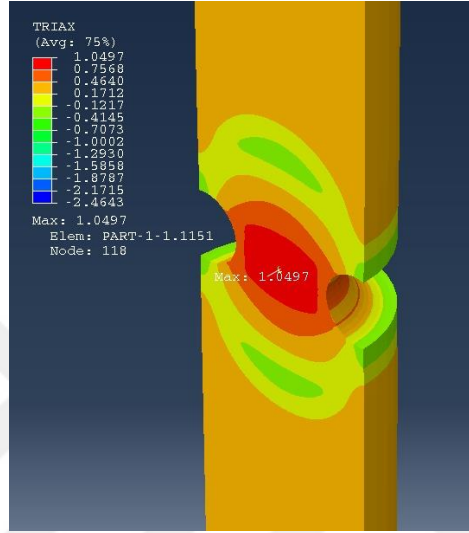
Şekil 5.3(devam) Farklı test hızlarında JC sünek hasar parametreleri ve D_4 için hesaplanan regresyon eğrisi

Johnson Cook malzeme ve hasar modeli parametrelerini belirlemek amacıyla çekme testleri yapılmıştır. Düşük gerinim hızlarında ve oda sıcaklığında Instron 8081 test makinesinde gerçekleştirilerek elastik sabitler, başlangıç akma gerilimi olan A , sertleştirme parametreleri B ve n belirlenmiştir. Aynı makinede, farklı çentik radyüslerine sahip dairesel numuneler üzerinde çekme testleri yapılarak kırılma gerinimleri belirlenmiş ve bundan yola çıkarak hasar modeli parametreleri olan D_1 , D_2 ve D_3 bulunmuştur. Çizelge 5.2’de ise bu değerler tablolastırılmıştır. Şekil 5.2’de sırasıyla 0.01 mm/s (Şekil 5.3-a), 0.1 mm/s (Şekil 5.3-b) ve 1 mm/s (Şekil 5.3-c) test hızlarında numunelerden elde edilen grafikler verilmiştir.

JC hasar modeli sabitlerini belirlemek için hasar gerinmesi olan ϵ_f , kırılma anındaki gerinimdir. Denklem 5.2’de A_0 başlangıç alanı, A_f kırılma anındaki son alandır. Hasar anındaki üç eksenlilik oranını σ^* değerlendirmek için farklı çentik radyüslere sahip numunelerin çekme testi (yarı statik gerinim hızı ve oda sıcaklığı) için bir elesto-plastik FE analizi uygun mesh ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FE analizinden,

numune hasarı esnasındaki radyüslü bölgeden ortalama gerilim ve Von Mises gerilimi değerlendirilmiş, buna istinaden gerilim üç eksenlilik oranı verisi elde edilmiştir (Şekil 5.4). JC hasar modelini kullanarak ve hasar geriniminin üç eksenlilikle değişimini analiz ederek D_1 , D_2 ve D_3 belirlenmiştir.

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (5.2)$$



Şekil 5.4 ABAQUS’de modellenen çentik radyüslü Ti6Al4V numunesine ait gerilme üç eksenlilik değeri

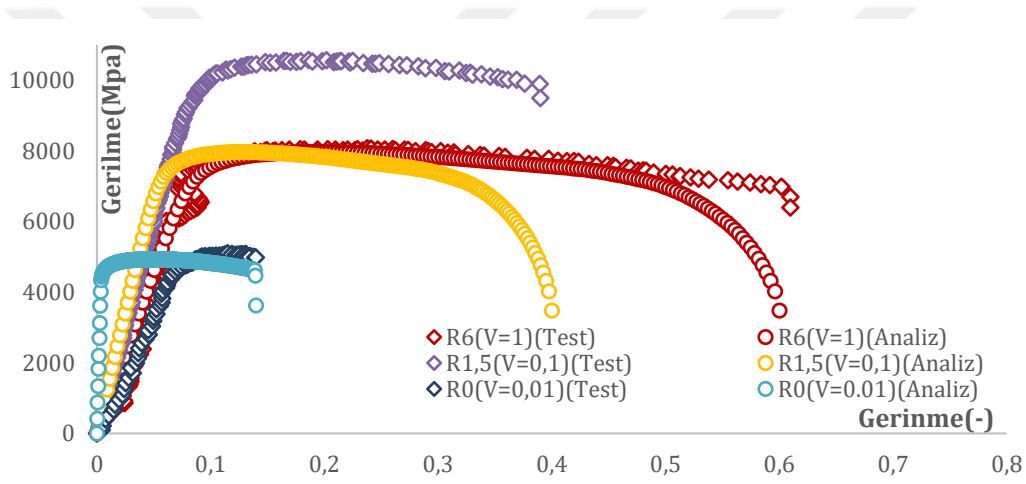
JC modelinin D_4 parametresi sünek hasar modelinde kullanılan ve malzemenin kırılma eğilimini tanımlayan parametredir. Malzemenin gerilme üç eksenlilik altında kırılma davranışını tahmin etmek için kullanılır. Şekil 5.3’de JC sünek hasar parametreleri ve D_4 için hesaplanan regresyon grafiği verilmiştir. Çizelge 2.9’da ise D_1 , D_2 , D_3 ve D_4 parametreleri tablolastırılmıştır.

Çizelge 2.9 Farklı hızlar altında JC sünek hasar parametreleri

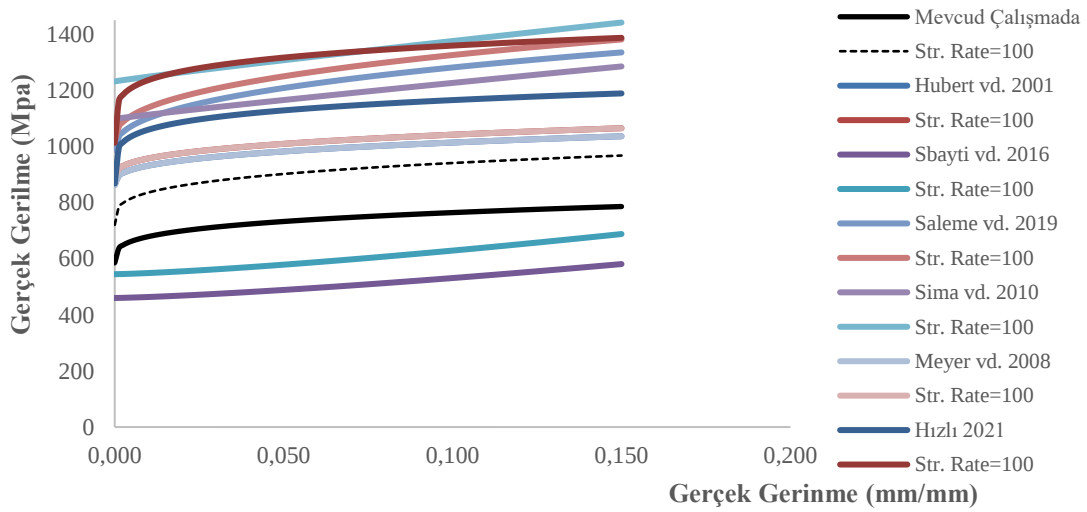
Test Hızı (mm/s)	D_1	D_2	D_3	D_4
0.01	0.3179	0.0000	14.8779	
0.1	0.3765	0.0000	10.2749	-0.0204
1	0.2765	0.0000	9.7070	

6. TARTIŞMA ve SONUÇ

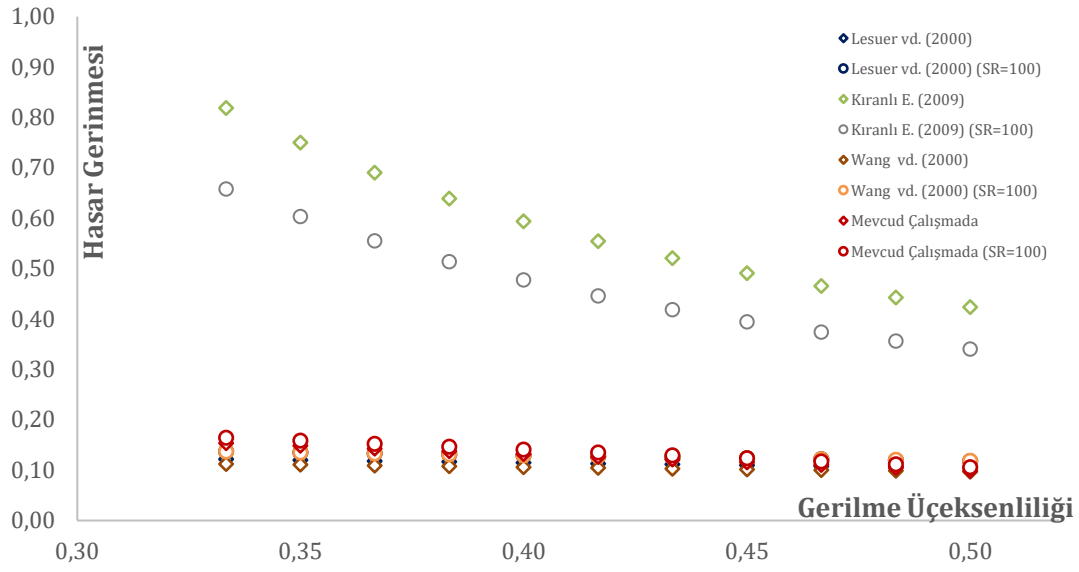
Yapılan bu çalışmada toz metalurjisi ile üretilen farklı çentik radyüslerindeki Ti6Al4V alaşımı tek eksenli çekme deneyleri ile sonlu elemanlar programında gerçek test ortamı ve numunesinin modellenmesi sonucu elde edilen gerilme-gerinme grafiği Şekil 5.5’de verilmiştir. FE simülasyonları tarafından tahmin edilen veriler, kapsamlı deneysel testlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, FE simülasyonları ile deneysel değerler arasında yüksek bir uyum sağlandığını göstermektedir. Bu durum, kullanılan modelin ve hesaplama yönteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini pekiştirirken, malzeme davranışının tahmin edilmesinde sonlu eleman analizlerinin etkinliğini vurgulamaktadır.



Şekil 5.5 Test ve analiz verileri



Şekil 6. Farklı test verileri ile elde edilmiş gerçek gerilme-gerçek gerinme eğrileri



Şekil 6.1 Farklı test verileri ile elde edilmiş JC hasar parametrelerinin gerilme üç eksenliliği – kırılma gerinmesinin mevcut çalışma ve diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Çizelge 3. Farklı çalışmalara ait JC parametreleri

Referans	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	Ref. Rate
Mevcut Çalışmada (SR=100)	-3.4556	3.7212	-0.0915	0.0074	0.01
Lesuer (2024) (SR=100)	-0.09	0.25	-0.5	0.014	0.01
Kıranlı E. (2009) (SR=100)	0,294	8,63	-8,4	-0,0213	0.01
Wang vd. (2000) (SR=100)	0,021	0,132	-1,1	0,0238	0.01

Çizelge 3.1 Farklı hızlar altında JC sünek hasar parametreleri

Referans	A	B	n	C
Mevcut Çalışmada	673.7	503.6	0.28	0.100
Lee ve Lin (1998)	782.7	498.4	0.28	0.028
Meyer ve Klenopis (2001)	862.5	331.2	0.34	0.012
Kay (2003)	1098	1092	0.93	0.014
Seo vd. (2005)	997.9	653.1	0.45	0.0198
Sima ve Özel (2010)	1098	1092	0.93	0.0014

JC hasar modeli parametrelerinin gerilme üç eksenliliği-kırılma gerinmesi arasındaki ilişki açısından farklı test verileri ile elde edilmesi, kırılma davranışlarının tahmininde farklılıklara yol açabilir. Şekil 6.1’de farklı test verileri ile oluşturulmuş gerilme üç eksenliliği-kırılma gerinimi arasındaki ilişki mevcut çalışma ile diğer çalışmalara göre yaklaşımı verilmiştir.

Farklı test verilerini elde eden Sima ve Özel (2010), Ti6Al4V alaşımının işlenmesi sonucunda tırtıklı talaş oluşumunu modellenmesi için malzeme yapı modelleri ve elastik-viskoplastik sonlu eleman formülasyonlarının etkisini araştırmış ve talaş oluşum sürecinde malzeme özellikleri ve sürtünme doğru şekilde tanımlandığı takdirde sonlu elemanlar yönteminin güvenilir olduğunu belirtmişlerdir.

Seo vd (1998), yapmış oldukları çalışmada 25 °C ile 1000 °C arasındaki sıcaklıkta ve 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 gerinim hızlarında Ti6Al4V numunesini Split Hopkinson Pressure Bar deney düzeneğinde çarpışma testlerine tabii tutmuşlardır. Aynı zamanda artan sıcaklığın pekleşme üzerinde ters orantıya sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Kay (2003), 0.312 inç çapında Ti6Al4V alaşımını oda sıcaklığında 0.0001, 0.1 ve 2150 gerinim hızlarına tabii tutarak balistik çarpışma testlerine tabii tutmuştur. Deney düzeneği olarak SHPB düzeneği kullanılmıştır.

Lee ve Lin (1998), SHPB deney düzeneğini kullanarak Ti6Al4V alaşımını 700 °C ile 1100 °C arasındaki sıcaklıklarda 100 °C arttırım yaparak, 2000 s^{-1} gerinim hızında teste tabii tutmuştur. Beş farklı yüksek sıcaklığa tabii tutulan Ti6Al4V alaşımının sıcaklık etkisi altında akış geriliminin azaldığına, yüksek sıcaklık rejimlerinde malzemede hızlı bir yumuşamanın meydana geldiğini göstermişlerdir.

Johnson-Cook malzeme modelinin hem akış gerilmesi hem de sünek hasar parametrelerinin farklı malzemeler için elde edilmesi uzun yıllardır araştırma konusu olmuş ve halen de devam etmektedir (Akram vd. 2018, Rule 1997, Banerjee vd. 2015, Zhanga vd. 2015). Literatürde yapılan çalışmalarda deney düzeneği olarak SHPB gibi pahalı ve ulaşılabilirliği kolay olmayan deney düzenekleri kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada ise Ti6Al4V alaşımı öncelikle tek eksenli çekme deneylerine tabii tutulup elde edilen veriler FIND JC programına aktararak uygun veri tipleri seçildikten sonra gerilme akış parametreleri bulunmuştur. Tek eksenli çekme testlerinden elde edilemeyen verilerden dolayı, sonlu elemanlar analizinde Ti6Al4V numunesi eksenel simetrik olarak modellenmiş ve kırılmanın gerçekleşeceği noktalara yoğun bir mesh ağ yapısı manuel olarak uygulanmıştır. Sonlu elemanlarda gerçekleştirilen testler sonucu JC hasar

parametreleri elde edilmiştir. Çizelge 3’de farklı test verileri ile elde edilmiş JC akış gerilme parametreleri ile mevcut çalışmaya ait elde edilen parametreler beraber verilmiştir. Katsayı değerleri her ne kadar farklı görünse de Şekil 6’da gösterildiği üzere benzer gerilme-gerilme eğrisini tanımlamaktadır. Farklı test verileri ile elde edilmiş JC hasar parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgede Lesuer 2024, Kıranlı 2009, Wang vd. 2000, çalışmalarında görülen hasar parametreleri mevcut çalışma ile beraber verilmiştir.

Bu çalışmaya ait JC hasar parametrelerinin gerilme üç eksenliliği-kırılma gerinmesi Şekil 5.3’de verilmiştir. Sonuç olarak Ti6Al4V alaşımının JC akış gerilmesi ve malzeme modeli parametrelerinin yapılan diğer çalışmalarla benzer sonuçlar içerdiğini fakat deney yöntemi olarak SHPB benzeri testler kullanmak yerine sonlu elemanlar ve analitik yöntemlerin beraber kullanılarak zaman, kaynak ve ekonomik koşulları minimuma indirgeyerek benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Ti6Al4V alaşımı iyi bir mukavemet değerlerine sahip olduğu, deformasyon hızının artmasıyla az miktarda olsa da pekleşme davranışı sergilemektedir. Ti6Al4V alaşımının deformasyon hızının yanında sıcaklıkla olan değişiminin de hesaba katıldığı JC akış gerilmesi ve hasar modeli parametreleri üzerinde çalışılmalıdır. Bunun yanında toz metalurjisi üretim tekniğindeki yatay ve dikey üretim tekniği, katman kalınlığı vb. parametrelerin malzeme davranışı üzerindeki etkileri detaylı araştırılmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- Agirre J, Galdos L, Argandona E S, Mendiguren J, Hardening Prediction of Diverse Materials Using the Digital Image Correlation Technique, *Mech. Mater.* 124, 2018, 71-79.
- Al-Rubaie K S, Melotti S, Rabelo A, Paiva J M, Elbestawi Mma, Veldhuis Smc, 2020, Machinability of Slm-Produced Ti6al4v Titanium Alloy Parts. *J. Manuf. Process.* 57, 768–786.
- Anderson B D, Benzley S E, Owen S J, Automatic All Quadrilateral Mesh Adaption Through Refinement and Coarsening, İn: B. Clark (Ed.), *Proceedings of the 18th International Meshing Roundtable, Imr 2009*, Springer-Verlag Berlin, 2009, 557–574.
- Arcos Juarez G, Pena J A, *Manufactura Aditiva Para Prototipado Rapido*, Jovenes En La Cienc. 3-2, 2017, 2230 –22349.
- Asm Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation (2000). ASM International, Isbn-10: 0871703890, Isbn-13: 978-0871703897
- Aydemir B, Metalik Malzemelerin Çekme Deney Standardı En Iso 6892-1'in Getirdiği Değişiklikler, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2013, (10) 61-70.
- Bai Y, Teng X, Wierzbicki T, On the Application of Stress Triaxiality Formula for Plane Strain Fracture Testing", *Journal of Engineering Materials And Technology*, April 2009
- Bai Y, Wierzbicki T, A New Model of Metal Plasticity and Fracture with Pressure and Lode Dependence, 2008, *Int. J. Plast.*, 24, 1071–1096.
- Balcı A, Çiçek A, Uçak N, Aslantas K, Investigation of The Effects of Heat Treatment and Hot İsostatic Pressing on Micro-Drilling of Ti6al4v Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion, *Mechanics of Materials* 185, 2023, 104756

- Banerjee B, Dhar S, Acharyya S, Datta D, Nayak N, Determination of Johnson Cook Material and Failure Model Constants and Numerical Modelling of Charpy Impact Test of Armour Steel, 2015, Mater. Sci. Eng. A, 640, 200–209.
- Bao Y, Dependence of Ductile Crack Formation In Tensile Tests on Stress Triaxiality, Stress and Strain Ratios. Eng. Fract. Mech., 2005, 72, 505–522.
- Bao Y, Prediction of Ductile Crack Formation In Uncracked Bodies, 2003, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma, Usa.
- Bao Y, Wierzbicki T, On Fracture Locus In The Equivalent Strain and Stress Triaxiality Space. Int J Mech Sci 2004, 46, 81–98.
- Biancolini M E, Brutti C, 2003, Numerical and Experimental Investigation Of the Strength of Corrugated Board Packages. Packaging Technology and Science, 16(2), 47–60.
- Bodner S R, Partom Y, Constitutive Equations for Elastic-Visco plastic Strain hardening Materials, J. Appl. Mech. 42 (1975) 385–389.
- Borvik T, Hopperstad O S, Berstad T, on the Influence Of Stress Triaxiality and Strain Rate on The Behaviour of a Structural Steel. Part II. Numerical Study. Euro J Mech A/Solids 2003, 22, 15–32.
- Bridgman P W, 1952, Studies In Large Plastic Flow and Fracture, Mcgrawhill, New York
- Bridgman P W, Studies In Large Plastic Flow and Fracture. Cambridge, Ma: Harvard University Press, 1952.
- Brozzo P, Deluca B, Rendina R, A New Method for The Prediction of Formability In Metal Sheet, Sheet Metal Forming and Formability, 1972, In Proceedings of the 7th Biennial Conference of the Iddrg.
- Brunig M, Chyra O, Albrecht D, Driemeier L, Alves M, A Ductile Damage Criterion at Various Stress Triaxialities, 2008, Int. J. Plast, 24, 1731–1755.

- Cai W, Li X, Li G Q, Improved True Stress-Strain Model of High-Strength Steels for Fracture Simulation In Fire, J. Constr. Steel Res. 211, 2023, 108145.
- Cao T S, Gachet J M, Montmitonnet P, Bouchard P O, A Lode-Dependent Enhanced Lemaitre Model for Ductile Fracture Prediction at Low Stress Triaxiality, 2014, Eng. Fract. Mech., 124–125, 80–96.
- Chandrupatla T R, Belegundu A D, Ramesh T, Ray C, 2002, Introduction to Finite Elements In Engineering, Vol 2, Upper Saddle River, Nj: Prentice Hall.
- Chen W, Song B, 2011, Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Application, Springer, Isbn 978-1-4419-7981-0.
- Cheng Y Q, Zhang H, Chen Z H, Xian K F, Flow Stress Equation of Az31 Magnesium Alloy Sheet During Warm Tensile Deformation. J Mater Process Technol, 2008, 208, 29–34.
- Choung J M, Cho S R, Study on True Stress Correction from Tensile Tests, J. Mech. Sci. Technol. 22, 2008, 1039–1051
- Choung J, Shim C, Song H, Estimation of Failure Strain of Eh36 High Strength Marine Structural Steel Using Average Stress Triaxiality, Mar. Struct. 29, 2012, 1-21.
- Clift S E, Hartley P, Sturgess C E N, Rowe G W, Fracture Prediction In Plastic Deformation Processes, 1990, International Journal of Mechanical Sciences 32, 1-17.
- Clifton R J, Response of Materials Under Dynamic Loading. Int. J. Solids Struct. 2000, 37, 105–113.
- Cockcroft M G, Latham D J, Ductility and The Workability of Metals, 1968, Journal of The Institute of Metals 96, 33-39.
- Considere A, Annales Des Ponts Et Chaussees 9, 1985, Pp. 574–775.

- Cook R, Malkus D, Plesha M, Witt R, 2002, Concepts and Applications of Finite Element Analysis (4th Ed.). New York: Wiley.
- Cowper G R, Symonds P S, Strain Hardening and Strain Rate Effects in The Impact Loading of Cantilever Beams, 1958, Brown University, Applied Mathematics Report.
- Çetkin A, Alüminyum 6061 Alaşımının Sünek Hasar Parametrelerinin Mekanik Test Ve Simülasyon İle Tayin Edilmesi, 2022
- Davies R M, A Critical Study of The Hopkinson Pressure Bar. Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 1948;240(821):375-457.
- De Borst R, Crisfield M A, Remmers J J, Verhoosel C V, 2012, Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures. John Wiley & Sons.
- Deb S, Muraleedharan A, Immanuel R, Panigrahi S, Racineux G, Marya S, Establishing Flow Stress Behaviour of Ti-6al-4v Alloy and Development of Constitutive Models Using Johnson-Cook Method and Artificial Neural Network For Quasi-Static And Dynamic Loading, Theor. Appl. Fract. Mech. 119 (2022).
- Delele M A, Verboven P, Ho Q T, Nicolai B M, 2010, Advances In Mathematical Modelling of Postharvest Refrigeration Processes. Stewart Postharvest Review, 6(2), 1–8.
- Felten M, Fries M, Fila T Vd., High Strain-Rate Compression Experiments on Ni/Polyurethane Hybrid Metal Foams Using the Split-Hopkinson Pressure Bar Technique, Advanced Engineering Materials, 24,2022.
- Feng K, Zhang H, Cheng X, Fan Q, Mu X, Xiong N, Achieving Excellent Strength ductility Synergy of Ti6al4v Alloy Produced by Powder Metallurgy and Thermomechanical Treatment, Vacuum 217 (2023) 112448.

- Fields D S, Bachofen W A, Determination of Strain Hardening Characteristics by Torsion Testing. *Astm, Proc Am Soc Test Mater* 1957;57:1259–72.
- Fisher F D, Kolednik O, Shan G X, Rammerstorfer F F, A Note on Calibration of Ductile Failure Damage Indicators, 1995, *International Journal of Fracture*, 73 345-357.
- Gama B A, Lopatnikov S L, Gillespie Jr J W, 2004, Hopkinson Bar Experimental Technique: A Critical Review. *Appl Mech Rev*, 144(4), Sf. 223-250.
- Gray G T, Blumenthal W R, Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Soft Materials. In: Kuhn H, Medlin D, Editors. *Asm Handbook. Mechanical Testing and Evaluation*, Vol. 8. Ohio, Usa: Asm International; 2000. P. 1093–114.
- Guan S K, Wu L H, Wang L G, Flow Stress and Microstructure Evolution of Semicontinuous Casting Az70 Mg-Alloy During Hot Compression Deformation. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2008; 18: 315–20.
- Gupta N K, Iqbal M A, Sekhon G S, *Int. J. Impact Eng.* 32, 2006, 1921–1944
- Hammer J T, Plastic Deformation and Ductile Fracture of Ti-6al-4v Under Various Loading Conditions. Master's Thesis, The Ohio State University, Federal Aviation Administration (Faa) William J. Hughes Technical Center, 2014.
- Hammou A D, Duong P T M, Abbes B, Makhlouf M, Guo Y Q, 2012, Finite-Element Simulation with A Homogenization Model and Experimental Study Of Free Drop Tests Of Corrugated Cardboard Packaging. *Mechanics & Industry*, 13(3), 175-184.
- Hancock J W, Mackenzie A C, On the Mechanisms of Ductile Failure In High-Strength Steels Subjected to Multi-Axial Stress-States. *J Mech Phys Solids* 1976, 24, 147–69.
- He Z, He Y, Ling Y, Wu Q, Gao Y, Li L, Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Trip Steels. *J. Mater. Process. Technol.* 2012, 212, 2141–2147

- Hiermaier S, Physics of Failure - Lecture 11, Sustainable Systems Engineering – Inatech, Freiburg im Breisgau, 2017
- Hoge K G, Mukherjee A K, The Temperature and Strain Rate Dependence of The Flow Stress of Tantalum, J. Mater. Sci. 12,1977, 1666–1672.
- Hopkinson B, A Method of Measuring the Pressure Produced In The Detonation of High Explosives or By The Impact of Bullets. Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 1914;213(497-508):437–56.
- Huang D, Zhang L, Wang W, Mu H, Test on Post-Fire Residual Mechanical Properties of High Strength Q690 Steel Considering Tensile Stress In Fire, J. Constr. Steel. Res. 194 (2022) 107340.
- Huang J, Guo Y, Qin D, Zhou Z, Li D, Li Y, Influence of Stress Triaxiality on The Failure Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Under A Broad Range Of Strain Rates, Theor. Appl. Fract. Mech. 97 (2018) 48–61.
- Huang S, Chen R, Xia K W, Quantification of Dynamic Tensile Parameters of Rocks Using a Modified Kolsky Tension Bar Apparatus. Journal Of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2010;2(2):162–8.
- Huebner K H, Dewhurst, D L, Smith D E, Byrom T G, 2001, The Finite Element Method for Engineers. New York: John Wiley & Sons.
- Hughes T J, 2012, The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. Courier Corporation.
- Immanuel R J, Panigrahi S K, Deformation Behavior of Ultrafine Grained A356 Material Processed by Cryorolling and Development of Johnson-Cook Model, Mater. Sci. Eng., A 712 (2018) 747–756,

- Ishfaq K, Abdullah M, Mahmood M A, A State-Of-The-Art Direct Metal Laser Sintering of Ti6Al4V And AlSi10Mg Alloys: Surface Roughness, Tensile Strength Fatigue Strength And Microstructure. Opt Laser Technol 2021;143(June):107366.
- Iso-Astm, 52900:2015(En), Additive Manufacturing, General Principles, Terminology.
- Janis S K, Bergmann J A , Deformation Behaviour Of 42CrMo4 Over A Wide Range Of Temperatures And Strain Rates In Split-Hopkinson Pressure Bar Tests, Material Science And Engineering A.826,2021.
- Jansen J, Ein Werkstoff model Für Eine Aluminium-Druckgusslegierung Unter Statischen Und Dynamischen Beanspruchungen - Ph.D., 2007
- Jinoop A N, Subbu S K, Kumar R A, Mechanical and Microstructural Characterisation on Direct Metal Laser Sintered Inconel 718, Int. J. Addit. Subtractive Mater. Manuf. 2, 2018.
- Johnson G R, Cook W H, A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates And High Temperatures, In: Proceedings Of The 7th International Symposium On Ballistics, The Hague South Holland, The Netherlands, 1983.
- Johnson W, Impact Strength of Materials; Johnson, W., Ed.; Edward Arnold: London, UK, 1972.
- Jones A C, A Method for Developing the True Stress-Strain Relationship for Structural Steels Based On Tension Coupon Tests, Dissertation, Department Of Civil, Architectural And Environmental Engineering, University Of Texas At Austin, 2019
- Joun M, Choi I, Eom J, Lee M, Finite Element Analysis of Tensile Testing With Emphasis On Necking, Comput. Mater. Sci. 41, 2007, 63–69.

- Joun M, Eom J G, Lee M C, A New Method for Acquiring True Stress-Strain Curves Over a Large Range of Strains Using A Tensile Test And Finite Element Method, Mech. Mater. 40 ,2008, 586-593.
- Kachanov L M, Time of The Rupture Process Under Creep Conditions, 1958, Izv Akad Nauk S.S.R., Otd. Tekhn. Nauk 8, 26-31.
- Kaiser M A, 1998, Advancements In The Split Hopkinson Bar Test, Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia
- Kalpakjian S, Manufactura, Ingenieria Y Tecnologia, Pearson Educacion, 2014, P. 608.
- Kay, Gregory, Failure Modeling of Ti6al4v 2024-T3 With the Johnson-Cook Material Model. Office Of Aviation Research, Federal Aviation Administration, 2003
- Khan A S, Liang R Q, Behaviors of Three Bcc Metal Over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures: Experiments And Modeling. Int J Plast 1999;15: 1089–109.
- Khan A S, Liang R Q, Behaviors of Three Bcc Metals During Non-Proportional Multi-Axial Loadings: Experiments and Modeling. Int J Plast 2000;16: 1443–58.
- Khan A S, Zhang H Y, Takacs L, Mechanical Response and Modeling of Fully Compacted Nanocrystalline Iron And Copper. Int J Plast 2000; 16:1459–76.
- Kheyr A A, Mortezaei A, 2007, Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Bridges. Journal Of Transportation Research, 3(4), 315–320.
- Kıranlı E, Determination of Constitutive Equation of a Biomedical Grade Ti6al4v Alloy for Cross-Wedge Rolling. Master's Thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir, Turkey, 2009.
- Klepaczko J R, Chiem C Y, On Rate Sensitivity of F.C.C. Metals, Instantaneous Rate Sensitivity and Rate Sensitivity of Strain Hardening, J. Mech. Phys. Solids 34 (1986) 29–54.) (M. Oyane, Criteria of Ductile Fracture Strain, Bull. Jsme 15 (1972) 1507–1513.

- Kolsky H, An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. Proceedings Of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 1949; B62(11):676–700.
- Kweon H D, Kim J W, Song O, Oh D, Determination of True Stress-Strain Curve Of Type 304 And 316 Stainless Steels Using A Typical Tensile Test And Finite Element Analysis, Nucl. Eng. Technol. 53, 202, 647.
- Lemaitre J, Evaluation of Dissipation and Damage In Metals Submitted to Dynamic Loading, 1971, In "Proceedings Icm" Kyoto, Japan.
- Lesuer D R, Experiment Investigations Of Material Models for Ti-6al-4v Titanium And 2024-T3 Aluminum, Technical Report, 2000.
- Li K, Wang Y, Zhao Y, Jin C, Tang H, Zou Q, Et L. High Strain Rate of Quartz Glass And Its Effects During High-Speed Dicing. Ceram Int 2019,45,13523–9.
- Li L, Liu S, Ye B, Hu S, Zhou Z, Quantitative Analysis of Strength and Plasticity of A 304 Stainless Steel Based on The Stress-Strain Curve, Met. Mater. Int. 22, 2016, 391-396.
- Liang X, Liu Z, Wang B, Et Al. Modeling Of Plastic Deformation Induced By Thermomechanical Stresses Considering Tool Flank Wear In High-Speed Machining Ti-6al-4v, Int J Mech Sci 2018; 140:1–12.
- Lin Y C, Chen X M, A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Descriptions for Metals and Alloys In Hot Working, Mater. Des. 32, 2011, 1733–1759.
- Ling Y, Uniaxial True Stress-Strain After Necking, Amp Journal of Technology 5, 1996, 37-48.
- Liu S, Shin Y C, 2019, Additive Manufacturing of Ti6al4v Alloy: A Review. Mater. Des. 164, 107552

- Liu X, Ma H, Fan F, Modified Johnson-Cook Model of Swrh82b Steel Under Different Manufacturing and Cold-Drawing Conditions, *J. Constr. Steel Res.* 186, 2021.
- Liu X, Miao X Y, Mousavi S S, Chen X, Finite Element Mesh Transition for Local–Global Modeling of Composite Structures, *Composites Part C: Open Access*, Volume 15, 2024, 10051.
- Lou Y S, Huh, H, Lim S, Pack K, 2012. New Ductile Fracture Criterion For Prediction Of Fracture Forming Limit Diagrams Of Sheet Metals. *International Journal Of Solids And Structures* 49, 3605-3615.
- Majzoobi G H, Fariba F, Pipelzadeh M K, Hardy S J, A New Approach For The Correction Of Stress-Strain Curves After Necking In Metals, *J. Strain Anal.* 50-2, 2015, 125–137
- Marcadet S J, Roth C C, Erice B, Mohr D, A Rate-Dependent Hosford-Coulomb Model for Predicting Ductile Fracture at High Strain Rates, *Edp Sciences*, 2015
- Mehari Z A, Han J, Numerical Prediction of Ductile Fracture During the Partial Heating Roll Forming Process of Dp980, *Int. J. Fract.* 234 (2022) 97–112
- Miao Y, Wang Y Vd., Theoretical Instructions For Experimenting Controllable Hopkinson Pressure Bar, *Polymer Testing* 108, Elsevier, 2022.
- Mirone G, A New Model for The Elastoplastic Characterization and The Stress- Strain Determination on The Necking Section of a Tensile Specimen, *Int. J. Solid Struct.* 41, 2004, 3545-3564.
- Mirone G, Corallo D, A Local Viewpoint for Evaluating The Influence Of Stress Triaxiality And Lode Angle On Ductile Failure And Hardening, 2010, *Int. J. Plast.*, 26, 348–371.
- Mirzadeh H, Najafizadeh A, Flow Stress Prediction at Hot Working Conditions. *Mater Sci Eng A* 2010, 527, 1160–4.

- Mohr D, Dynamic Behaviour of Materials and Structures, Lecture 7, Eth Zürich, Fall 201.
- Mondal C, Podder B, Kumar K R, Yadav D R, Constitutive Description of Tensile Flow Behavior of Cold Flow-Formed Afnor 15cdv6 Steel at Different Deformation Levels, J. Mater. Eng. Perform. 23 (2014) 3586-3599
- Multiaxial Loading Conditions, 12. European Ls-Dyna Conference, 2019, Koblenz, Germany
- Murugesan M, Lee S, Kim D, Kang Y H, Kim N, A Comparative Study Of Ductile Damage Models Approaches For Joint Strength Prediction In Hot Shear Joining Process, 2017, Procedia Eng., 207, 1689–1694.
- Needleman A, A Numerical Study of Necking in Circular Cylindrical Bars, J. Mech. Phys. Solids 20, 1972, 111–127.
- Nemat-Nasser S, Introduction to High Strain Rate Testing. Asm Handb. 2000, 8, 427–428.
- Norton T, Sun D W, 2006, Computational Fluid Dynamics (Cfd)—An Effective and Efficient Design and Analysis Tool for The Food Industry: A Review. Trends In Food Science & Technology, 17(11), 600-620.)
- Othmen K B, Haddar N, Jegat A, Manach P, Elleuch K, Ductile Fracture of Aisi 304L Stainless Steel Sheet In Stretching, Int. J. Mech. Sci. 172, 2020, 105404.
- Paredes M, Grolleau V, Wierzbicki T, On Ductile Fracture Of 316L Stainless Steels at Room and Cryogenic Temperature Level, Materialia 10, 2020, 100624.
- Paredes M, Sarzosa D F B, Savioli R, Wierzbicki T, Jeong D Y, Tyrell D C, Ductile Tearing Analysis of Tc128 Tank Car Steel Under Model I Loading Condition, Theor. Appl. Fract. Mech. 96, 2018, 658-675.
- Pathare P B, Opara U L, 2014, Structural Design of Corrugated Boxes for Horticultural Produce: A Review. Biosystems Engineering, 125, 128-140.

- Peters W H, Ranson W F, Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis, Opt. Eng. 21 (3), 1982, 213427.
- Peters W H, Ranson W F, Sutton M A, Chu T C, Anderson J, Application of Digital Correlation Methods to Rigid Body Mechanics, Opt. Eng. 22 (6), 1983, 226738.
- Pham Q, Lee B, Park K, Kim Y, Influence of The Post-Necking Prediction of Hardening Law On The Theoretical Forming Limit Curve Of Aluminium Sheets, Int. J. Mech. Sci. 140 ,2018, 521-536.
- Preston D L, Tonks D L, Wallace Dc, Model of Plastic Deformation for Extreme Loading Conditions. J Appl Phys 2003,93,211–20.
- Qin Y, Qi Q, Shi P, Scott P J, Jiang X, Automatic Generation of Alternative Build Orientations for Laser Powder Bed Fusion Based on Facet Clustering, Virtual Phys. Prototyp. 15 (2020) 307–324.
- Quanjin M, Rejab M R M, Halim Q, Merzuki M N M, Darus M A H, Experimental Investigation Of the Tensile Test Using Digital Image Correlation (Dic) Method, Materials Today: Proceedings 27 (2020) 757–763.
- Rabotnov Y, Creep Problems of Structural Members, 1969, North-Holland, Amsterdam.
- Rahmaan T, Bardelcik A, Imbert J, Butcher C, Worswick M J, Effect of Strain Rate On Flow Stress And Anisotropy Of Dp600, Trip780, And Aa5182-O Sheet Metal Alloys. Int. J. Impact Eng. 2016, 88, 72–90.
- Ram N, Gautam V, Evaluation of Johnson-Cook Material Model Parameters for Si-Mo-Cr Ductile Cast Iron. Materials Today Proceedings. 61(1),2022.
- Rao S S, The Finite Element Method In Engineering, 2010, Elsevier.
- Reh S, Beley J D, Mukherjee S, Khor E H, Probabilistic Finite Element Analysis Using Ansys. Structural Safety, 28(1), 2006, 17-43.

- Rice J R, Tracey D M, On the Ductile Enlargement of Voids In Triaxial Stress Fields, 1969, Journal Of The Mechanics And Physics Of Solids 17, 201-217
- Robertson K D, Chou S C, Rainey J H, 1971, Design and Operating Characteristics Of A Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus, Army Material And Mechanical Research Center, Watertown, Massachusetts.
- Saboori M, Champiaud H, Gholipour J, Gakwaya A, Savoie J, Wanjara P, Extension of Flow Stress-Strain Curves of Aerospace Alloys After Necking, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 83, 2016, 313–323.
- Sadeghi H, Davey K, Darvizeh R, Darvizeh A, A Scaled Framework for Strain Rate Sensitive Structures Subjected to High Rate Impact Loading. Int. J. Impact Eng. 2019, 125, 229-245.
- Sainath G, Choudhary B K, Christopher J, Samuel E I, Mathew M D, Applicability of Voce Equation For Tensile Flow And Work Hardening Behaviour Of P92 Ferritic Steel, Int. J. Pres. Ves. Pip. 132, 2015, 1-9
- Schaldach, G, Berger L, Razilov I, Berndt H, 2000, Computer Simulation For Fundamental Studies And Optimisation Of Icp Spray Chambers. Berlin, Germany: Isas Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy) Current Research Reports.
- Schneider R, Grant R J, Sotirov N, Falkinger G, Grabner F, Reichl C, Scheerer M, Heine B, Zouaoui Z, Constitutive Flow Curve Approximation of Commercial Aluminium Alloys at Low Temperatures, Mater. Des. 88, 2015, 659-666.
- Sebek F, Kubik P, Hulka J, Petruska J, Strain Hardening Exponent Role In Phenomenological Ductile Fracture Criteria, Vol. 57, 2016, Pp. 149–164.
- Senseny P E, Duffy J, Hawley R H, Experiments on Strain Rate History and Temperature Effects During The Plastic Deformation Of Close-Packed Metals, J. Appl. Mech. 45 (1978) 60–66.

- Shihong X, Luan X, Liang Z, Fracture Analysis of Ultrahighstrength Steel Based On Split Hopkinson Pressure Bar Test, Mpdi, 2022.
- Sima M, Özel T, 2010, Modified Material Constitutive Models for Serrated Chip Formation Simulations and Experimental Validation In Machining Of Titanium Alloy Ti-6al-4v. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50, 943–960
- Simunovic S, Fekete J, Meulemann D, Et Al, Modeling of Strain Rate Effects In Automotive Impact, 2003, Sae-Paper No. 2003-01-1383, Detroit, Mi, Usa.
- Sing S L, Yeong W Y, Laser Powder Bed Fusion for Metal Additive Manufacturing: Perspectives on Recent Developments, *Virtual Phys. Prototyp.* 15, 2020, 359–370.
- Srirekha A, Bashetty K, Infinite to Finite: An Overview of Finite Element Analysis. *Indian Journal of Dental Research*, 21(3), 2010, 425-432.
- Tamayo J A, Riascos M, Vargas C A, Baena L M, Additive Manufacturing of Ti6al4v Alloy Via Electron Beam Melting for The Development of Implants for The Biomedical Industry, *Heliyon* 7,2021.
- Temmler A, Graichen K, Donath J, 2010, Laser Polishing In Medical Engineering. *Laser Tech. J.* 7, 53–57.
- Trippel A, Harwick W, High-Strength Alloyed Steel: Modelling Dynamic And
- Tvergaard V, Necking In Tensile Bars with Rectangular Cross-Section, *Comput. Method. Appl. M.* 103 (1), 1993, 273–290.
- Voyiadjis G Z, Faghihi D, Localization In Stainless Steel Using Microstructural Based Viscoplastic Model. *Int. J. Impact Eng.* 2013, 54, 114–129.
- Voyiadjis G Z, Palazotto, A.N.; Gao, X.L. Modeling of Metallic Materials At High Strain Rates With Continuum Damage Mechanics. *Appl. Mech. Rev.* 2002, 55, 481–493
- Wang C, Suo T, Li Y, Xue P, Tang Z, A New Experimental and Numerical Framework For Determining Of Revised J-C Failure Parameters. *Metals* 2018, 8.

- Wang F, Liu S, Cao L, Research on Dynamic Compressive Behaviours of Marble Under High Strain Rates with Split Hopkinson Pressure Bar, *J. Struct. Geol.* 138, 2020.
- Wang Y, Li J, Liu K, Et Al. Experiment and Numerical Study of Chip Formation Mechanism During Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V Alloy. *J Manuf Process* 2022, 84, 1246–57.
- Wei C X, He C L, Chen G, Sun Y Q, Ren C Z, 2023. Material Removal Mechanism And Corresponding Models In The Grinding Process: A Critical Review. *J. Manuf. Process.* 103, 354–392.
- Wellford L C, Gorman M R, A Finite Element Transitional Mesh Generation Technique, *Numer. Tech. Eng. Anal. Des.* (1987) 627–632.
- William D, Callister J, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 2001.
- Xia B, Sun D W, 2002, Applications of Computational Fluid Dynamics (Cfd) In The Food Industry: A Review. *Computers And Electronics In Agriculture*, 34(1), 5-24.
- Xia K W, Yao W, Dynamic Rock Tests Using Split Hopkinson (Kolsky) Bar System – A Review, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 7 (1) (2015) 27–59.
- Xue P, Iqbal N, Liao H J, Wang B, Li Y L, Experimental Study, On Strain Rate Sensitivity of Ductile Porous Irons. *Int. J. Impact Eng.* 2012, 48, 82–86.
- Cao Y, Zhen Y, Song M, Yi H, Li F, Li X, Determination of Johnson–Cook Parameters and Evaluation of Charpy Impact Test Performance for X80 Pipeline Steel, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 179, 2020.
- Zerilli P J, Armstrong R W, Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations. *J Appl Phys*, 1987, 61, 1816–25.

Zhang H J, Wen W D, Cui H T, Xu Y A, Modified Zerilli–Armstrong Model for Alloy
Ic10 Over a Wide Range of Temperatures and Strain Rates. Mater Sci Eng A
2009,526-16

Zhang K S, Li Z H, Numerical Analysis of The Stress-Strain Curve and Fracture Initiation
for Ductile Material, Eng. Fract. Mech. 49-2, 1994, 235–241

Zhang X H, Experimental and Numerical Study of Magnesium Alloy During Hotworking
Process. Phd Thesis, Shanghai Jiaotong University; 2003.

Zhao H, Gary G, 1996, On the Use of Shpb Techniques to Determine the Dynamic
Behavior of Materials In The Range Of Small Strains. International Journal of
Solids and Structures, 33(23), Sf. 3363-3375.

Zhao K, Wang L, Chang Y, Yan J, Identification of Post-Necking Stress-Strain Curve for
Sheet Metals By Inverse Method, Mech. Mater. 92, 2016, 107-118.

İnternet Kaynakları

- 1-https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_38.html, 15.07.2024
- 2-<https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/88/iso-6892-1-ve-astm-e8-cekme-deney-standartlari-arasindaki-farkliliklar.html>, 13.07.2024
- 3-<https://byjus.com/physics/stress-and-strain/>, 21.07.2024
- 4- <https://voliro.com/blog/non-destructive-hardness-testing/>, 05.11.2024
- 5- <https://feaassist.uk/product/vuexpan-training-package>, 05.11.2024
- 6-<https://www.tei.com.tr/urunler/uluslararasi-motorlara-imalat-katkilari/ge9x>, 05.11.2024
- 7-<https://tr.etertitanium.com/news/development-and-trend-of-titanium-alloy-material-68529046.html>, 05.11.2024
- 8-<https://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>, 05.11.2024

