



**6181A-T4 ALÜMİNYUM ALAŞIM SAC MALZEME İÇİN JOHNSON-
COOK MODEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE TAHMİN
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ecenur Öztürk

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ecenur ÖZTÜRK

25/06/2024

6181A-T4 ALÜMİNYUM ALAŞIM SAC MALZEME İÇİN JOHNSON-COOK
MODEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE TAHMİN
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ecenur ÖZTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Bu çalışmada 6181A-T4 alüminyum alaşımlı sac metal malzemesinin Johnson-Cook model parametrelerinin belirlenmesi ve tahmin performansının değerlendirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında LS-DYNA analiz yazılımı ve Johnson-Cook modeli kullanılarak 6181A-T4 alüminyum alaşım sac malzemenin belirlenen ürün geometrisi üzerinden deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle bu çalışma için standart, a çentikli, 4a çentikli, 20a çentikli olmak üzere dört farklı numune şeklinde 25 mm/dk, 125 mm/dk, 500 mm/dk, 1000 mm/dk olan dört farklı çekme hızında 16 adet farklı sayısal analiz modeli kurularak her sayısal analiz modeli için çalışmadaki numuneye ve çekme hızına ait farklı deneysel verilerden yararlanılmıştır. Bu kapsamda bu numunelere ait farklı çentik büyüklüğünde radyüsler ve üç eksenli gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu üç eksenli gerilme değerleri sırasıyla standart numunede 0.333, a çentik büyüklüğünde 0.738, 4a çentik büyüklüğünde 0.451, 20a çentik büyüklüğünde ise 0.358 olarak elde edilmiştir. Johnson-Cook modeline ait pekleşme parametreleri olan A, B, n, C analitik yöntemlerle elde edilirken hasar parametreleri olan D_1 , D_2 , D_3 , D_4 ise optimizasyonla belirlenmiştir. Bu doğrultuda analiz ile gerçek sonuçlar karşılaştırılarak Johnson-Cook model parametrelerinin modelinin tahmin performansı değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 91518

Anahtar Kelimeler : Johnson-Cook, alüminyum, sac metal, hasar analizi

Sayfa Adedi : 83

Danışman : Prof. Dr. Ahmet GÜRAL

İkinci Danışman : Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

DETERMINATION OF JOHNSON-COOK MODEL PARAMETERS FOR 6181A-T4 ALUMINIUM ALLOY SHEET MATERIAL AND EVALUATION OF PREDICTION PERFORMANCE

(M. Sc. Thesis)

Ecenur ÖZTÜRK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

In this study, it has been studied to determine the parameters of the Johnson-Cook Model of 6181A-T4 aluminum alloy sheet metal material and to evaluate its prediction performance. Within the scope of this thesis study, deformation analyses of 6181A-T4 aluminum alloy sheet metal material were carried out over the specified product geometry by using the LS-DYNA analysis software and the Johnson-Cook model. First of all, 16 different numerical analysis models were established for this study in four different tensile speeds of 25 mm/min, 125 mm/min, 500 mm/min, 1000 mm/min in the form of four different specimens: standard, a notched, 4a notched, 20a notched, and for each numerical analysis model, different experimental data belonging to the specimen and tensile speed in the study were used. In this context, the radiuses and triaxial stress values of four different notch sizes of these specimens were calculated. These triaxial stress values were obtained as 0.333, 0.358, 0.451 and 0.738 for the standard specimen, notch size standard, a, 4a and 20a, respectively. While the plasticity parameters A, B, n, C of the Johnson-Cook model was obtained by analytical methods, the damage parameters D_1 , D_2 , D_3 , D_4 were determined by optimization. In this direction, the prediction performance of the Johnson-Cook model parameters model was evaluated by comparing the analysis with the actual results.

Science Code : 91518

Key Words : Johnson-Cook, aluminium, sheet metal, damage analysis

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet GÜRAL

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın en başından en sonuna kadar olan tüm süreçte desteklerini esirgemeyen, kıymetli bilgi ve tecrübelerini daima benimle paylaşan değerli danışmanlarım Prof. Dr. Ahmet GÜRAL ve Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU' na içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3. TEZİN AMACI	17
4. ALÜMİNYUM SAC MALZEMELERİ VE PEKLEŞME, HASAR ANALİZ MODELLERİ.....	19
4.1. Alüminyum Alaşım Sac Malzemeler	19
4.2. Metal Şekillendirme İşlemlerinde Pekleşme ve Hasar Modelleri.....	20
4.3. Gerilme-Birim Deformasyon İlişkisi	24
4.3.1. Mühendislik gerilmesi ve gerçek gerilme deformasyon ilişkisi	24
4.3.2. Üç eksenli gerilme ile deformasyon ilişkisi	26
5. MATERYAL VE YÖNTEM	27
5.1. Malzeme	27
5.2. Johnson-Cook Pekleşme ve Hasar Parametrelerinin Belirlenmesi	28
5.2.1. Johnson-Cook pekleşme modeli parametrelerinin matematiksel olarak belirlenmesi.....	28
5.2.2. Johnson-Cook hasar parametrelerinin nümerik olarak belirlenmesi.....	35
5.2.3. Johnson-Cook hasar parametrelerinin optimizasyonu	36
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	39

	Sayfa
6.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....	39
7. KOPMA YÜZEYLERİNİN VE KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ	59
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. 6181A-T4 alüminyum malzemesinin kimyasal kompozisyonu	27
Çizelge 5.2. 6181A-T4 alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri	27
Çizelge 6.1. Çentik büyüklüğü ve radyus değerlerine göre belirlenen üç eksenli gerilme değerleri.....	42
Çizelge 6.2. 6181A-T4 alüminyum malzemesinin Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeline ait malzeme sabitleri ve parametreleri	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Akma dayanımının belirlenmesi	27
Şekil 5.2. Birim şekil değiştirme-gerilme grafiği	28
Şekil 5.3. C parametresinin analitik olarak belirlenmesi	29
Şekil 5.4. “25 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değiştirme grafiği	30
Şekil 5.5. “125 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değiştirme grafiği	30
Şekil 5.6. “500 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değiştirme grafiği	31
Şekil 5.7. “1000 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değiştirme grafiği	31
Şekil 6.1. 25 mm/dk’lık hızda standart ve farklı çentik değerlerine sahip numunelerin mühendislik gerilme ve mühendislik gerinim grafiği	38
Şekil 6.2. Standart çekme numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri	40
Şekil 6.3. a çentikli deney numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri	41
Şekil 6.4. 4a çentikli deney numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri	41
Şekil 6.5. 20a çentikli deney numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri	42
Şekil 6.6. Farklı üç eksenli gerilme değerleri ve şekil değiştirme oranlarında akma dayanımının değişimi	43
Şekil 6.7. Üç eksenli gerilme değerlerine göre gerçek birim şekil değiştirme hasar noktası değerleri	44
Şekil 6.8. Üç eksenli gerilme değerlerine göre çekme dayanımı değerleri	45

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. “25 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	47
Şekil 6.10. “125 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	48
Şekil 6.11. “500 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	48
Şekil 6.12. “1000 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	49
Şekil 6.13. Deformasyon hızı ile akma dayanımı grafiği.....	50
Şekil 6.14. Deformasyon hızı ile çekme dayanımı grafiği.....	51
Şekil 6.15. Deformasyon hızı ile pekleşme katsayısı grafiği	52
Şekil 6.16. Deformasyon hızı ile mukavemet katsayısı grafiği.....	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Hasar parametreleri için kurulan optimizasyon haritası	34
Resim 5.2. Hasar parametrelerinin optimizasyon başlangıç değerleri	34
Resim 6.1. Standart, a, 4a ve 20a çentik değerlerinde çekme testi deney numuneleri	35
Resim 6.2. 25 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü	36
Resim 6.3. 125 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü	36
Resim 6.4. 500 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü	37
Resim 6.5. 1000 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü	37
Resim 6.6. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları	46
Resim 6.7. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları	46
Resim 6.8. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları	46
Resim 6.9. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları	47
Resim 7.1. Standart numunelerin 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	54
Resim 7.2. Standart numunelerin 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	55
Resim 7.3. Standart numunelerin 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	56
Resim 7.4. Standart numunelerin 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	57

Resim	Sayfa
Resim 7.5. “20a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.....	58
Resim 7.6. “20a” çentik standardına göre 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.....	59
Resim 7.7. “20a” çentik standardına göre 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.....	60
Resim 7.8. “20a” çentik standardına göre 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.....	61
Resim 7.9. “4a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.....	62
Resim 7.10. “4a” çentik standardına göre 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	63
Resim 7.11. “4a” çentik standardına göre 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	64
Resim 7.12. “4a” çentik standardına göre 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	65
Resim 7.13. “a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	66
Resim 7.14. “a” çentik standardına göre 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	67
Resim 7.15. “a” çentik standardına göre 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	68
Resim 7.16. “a” çentik standardına göre 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
m^2	Metrekare
Gpa	Gigapascal
Mpa	Megapascal
Pa	Pascal
mm^2	Milimetrekare
N	Newton
mm	Milimetre
kN	Kilonewton
dk	Dakika
F	Kuvvet
Δl	Uzunluk Değişimi
l_0	İlk Uzunluk Değeri
A_0	İlk Kesit Alanı
s^{-1}	1/Saniye
HB	Brinell Sertlik Birimi
W/m.K	Isıl İletkenlik Katsayısı
$^{\circ}C$	Celsius
C_0	Hesaplanan Akma Dayanımı
σ_g	Gerçek Gerilme
k_h	Mikroyapısal Gerilme Yoğunluğu
σ_m	Ortalama Gerilme
σ_m	Mühendislik Gerilmesi
ε_m	Mühendislik Birim Deformasyonu
ε_g	Gerçek Birim Deformasyon
E	Elastisite Modülü
α	Sıcaklık Etkisi Parametresi

Simgeler**Açıklamalar**

t	Ortalama Tane Çapı
a	Çentik Büyüklüğü
n	Pekleşme Katsayısı
m	Termal Yumuşama Katsayısı
η	Üç Eksenli Gerilim
R	Radyus
$\Delta\varepsilon$	Gerinimdeki Değişim
ε^P	Eşdeğer Plastik Birim Şekil Değiştirme
ε_0^P	Birim Şekil Değiştirme Hızı Oranı
ε_0^*	Başlangıç Deformasyon Oranı
ε_f^{-P}	Kırılma Birim Şekil Değiştirme Değeri
ε^*	Gerilme Oranı
T	Malzeme Sıcaklığı
T_{erime}	Malzemenin Erime Sıcaklığı
T_{oda}	Oda Sıcaklığı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BŞD	Birim Şekil Değiştirme
DIC	Dijital Görüntü Korelasyonu
FFLD	Kırılma Şekillendirme Limit Diyagramını
FLD	Şekillendirme Limit Diyagramı
GTN	Gurson-Tveergaard-Needleman
SEM	Scanning Electron Microscope
TFD	Üç Eksenli Hasar Diyagramı
J-C	Johnson-Cook

1. GİRİŞ

Günümüzde alüminyum benzersiz özelliklerde kombinasyonu ile birçok farklı endüstride yaygın olarak kullanılan önemli bir yapısal malzemedir. Genel olarak alüminyum ve alüminyum alaşımlarının hafifliği, mukavemeti ve korozyona dayanıklılığı onları havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrileri de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanım için ideal kılmaktadır. Günümüzde alüminyum alaşımlarının diğer malzemelere kıyasla avantajlı özellikleri ve uygun maliyetleri nedeniyle havacılık, otomotiv, ambalaj, inşaat ve diğer birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının özelliklerini sırasıyla inceleyecek olursak alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluğa sahip olması onları çelik gibi diğer metallerden daha hafif yapmaktadır [1].

Bu özelliği de onları otomotiv, savunma ve inşaat dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanım için ideal kılmaktadır. Alüminyum alaşımları, mukavemetlerini arttırmak için ısıtılma işlemine tabi tutulur ve bu da onları yüksek gerilimli uygulamalarda yüksek mukavemete sahip olmaları sayesinde kullanıma uygun hale getirmektedir [2]. Korozyona direnmeye yardımcı olan doğal bir koruyucu oksit tabakasına sahiptir bu nedenle iyi bir korozyon direnci bulunmaktadır. Aynı zamanda alüminyum alaşımları yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasıyla ısı eşanjörlerinde, radyatörlerde ve diğer ısı transfer uygulamalarında yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasıyla elektrik iletimi ve elektrik üretiminde kullanım için ideal olmaktadır.

Havacılık endüstrisinde, alüminyum ve alüminyum alaşımları, uçuş stresine dayanabilecek hafif yapıların oluşturulmasına izin veren mukavemet / ağırlık oranları nedeniyle uçak ve uzay aracı yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca otomotiv endüstrisinde otomobil ve kamyon gövdeleri, tekerlekler ve diğer bileşenleri yapmak için de kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarından 6xxx serileri iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, korozyon direnci ve ısıtılma işlemi ile istenen özelliklerinin daha iyi hale getirilmesini göstermektedir.

Alüminyum alaşımlarında farklı ısıtılma işlemleri uygulanabilir ve bu ısıtılma işlemi Tx sembolü ile alaşımların numarasının yanına yazılarak malzeme hakkında bize bilgi vermektedir. Bu sayede malzemenin işleme tabi tutulduğu yaşlandırma işlemi hakkında bilgi vermektedir.

Malzemenin doğal ve yapay yaşlandırılmasına göre kazandığı özellikler de farklılık göstermektedir. Doğal yaşlandırılmış alüminyum alaşımları, alaşımın belirli bir süre boyunca oda sıcaklığında yaşlanmasına izin verildiği süreçten geçenlere verilen isim olmaktadır. Bu işlem alaşımın mukavemetini ve diğer mekanik özelliklerini geliştirebilen intermetalik bileşiklerin alaşım içinde çökmesine neden olmaktadır. Yapay yaşlandırılmış alüminyum alaşımları ise yaşlanma sürecini hızlandırmak için alaşımın yüksek sıcaklıklara tabi tutulduğu süreçten geçen alaşımlara verilen isim olmaktadır. Genel olarak hem doğal hem yapay yaşlandırılmış alüminyum alaşımları yaşlandırılmamış alüminyum alaşımlarına kıyasla geliştirilmiş yorulma mukavemeti, artan korozyon direnci ve diğer mekanik özellikleri sergilemektedir. Tüm bu özelliklerin yanı sıra malzemenin uğradığı hasara bağlı olarak mukavemet, tokluk, süneklik, elastik modül, sertlik, termal iletkenlik gibi birçok özelliği değişmektedir [3] Bu malzemelerden biri olarak da 6181A-T4 sayılabilmektedir [4].

Metallerin mekanik işlemlerle hedeflenen şekle getirilmesi plastik şekillendirme olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla çekme, haddeleme, dövme, ekstrüzyon, bükme, derin çekme olarak sayılabilmektedir. Yapılan plastik şekillendirme işlemlerinin analizleri sonlu elemanlar yöntemi, üç boyutlu gerilme analizleri ya da analitik modeller ile gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerin gerçekleştireceği analiz yazılımları sırasıyla ABAQUS, ANSYS, DEFORM olmaktadır.

Bunlardan kırılma mekaniği analizi malzemenin stres altındaki davranışlarını analiz etmek ve hasar noktalarını tahmin etmek için matematiksel modellerin kullanılmasını içermektedir.

Malzemelerin yüksek birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklıklardaki davranışını modelleyebilmek için hasar modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hasar modelleri mevcut birim şekil değiştirme miktarı, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklığına bağlı olarak gerilme değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Hasarların modellenmesinde Johnson-Cook, Gurson-Tvergaard-Needleman ve Tatsuoka modelleri belirli malzemeler veya yükleme türleri için kullanılmaktadır. Bunlardan Johnson-Cook hasar modeli özellikle uçak parçaları ve otomotiv parçaları gibi malzemelerin yüksek deformasyon oranlarında deformasyonunu içeren işlemlerin simülasyonunda yaygın olarak kullanılan bir model olmaktadır. Tüm bunlara ilave olarak Johnson-Cook hasar modeli ani yükleme, çarpma veya metal kesme gibi diğer yüksek gerilme oranlarına maruz kalan

malzemelerde hasar birikimini tahmin etmek için de kullanılmaktadır. Deneysel bir modeldir yani ilk prensiplerden ziyade deneysel verilere dayandığı ve malzemelerin dinamik yükleme koşulları altındaki davranışlarını simüle etmek için mühendislik alanında yaygın olarak kullanıldığı anlamına gelmektedir [5]. Johnson-Cook hasar modeli diğer hasar modellerinin uygulanamayabileceği aşırı yükleme koşullarında malzemelerin davranışını tahmin etmek için oldukça yararlıdır. Johnson-Cook hasar modelinin en önemli özelliklerinden biri sıcaklığın, deformasyon oranının ve malzeme mukavemetinin hasar biriktirme süreci üzerindeki etkilerinin dikkate alınmasıdır.

Bu faktörlerin malzemelerin dinamik yükleme koşullarında hasar şekli üzerinde birbiri ile etkisi olmaktadır. LS-DYNA analiz yazılımında model ve bu modele ait malzeme özelliklerine göre deformasyon şartları ve sınır koşulları belirlenmektedir. Belirlenen şartlar altında bilgisayar destekli yazılımda tahmin parametreleri elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında LS-DYNA analiz yazılımı ve MAT-15 Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeli kullanılarak 6181A -T4) malzemesinin astmE-8 çekme test standardına uygun model üzerinden deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. LS-DYNA analiz yazılımı analiz sürecinde malzeme özelliklerinin daha doğru bir şekilde anlaşılması ve daha doğru benzetim sonuçlarına ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda önce 6181A -T4'e ait malzemenin pekleşme ve hasar modeli parametreleri belirlenirken daha sonra analiz ile gerçek sonuçlar karşılaştırılarak hasar modelinin tahmin performansı değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında incelenen malzemenin mevcut birim şekil değiştirme miktarının birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklıklardaki davranışını modelleyebilmek için hasar modellerine ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir. Benzer konular üzerine daha önce literatürde yapılan çalışmalar incelenerek sırasıyla verilmiştir.

Topilla ve diğerleri farklı haddelme yönlerinde kesilen ve farklı deformasyon oranlarında üç eksenliliğe sahip çift fazlı DP600 ve DP800 çeliklerinde makro mekanik ve mikro mekanik davranışlarının incelenmesinde gerilme-gerinim davranışını deneysel belirlemişlerdir. Çalışmalarında modellerin parametrelerini Johnson-Cook hasar modeli ve Gurson, Johnson-Cook hasar kriterlerine göre tanımlanmıştır. Yüksek mukavemetli DP600 ve DP800 çeliklerinin farklı deformasyon hızlarında (25mm/dk, 125mm/dk ve 500mm/dk) aynı zamanda farklı çentik değerlerine sahip (standart, 20a, 4a ve a) çekme deney numunelerinde mühendislik gerilme birim deformasyon eğrileri incelenmiştir. Çalışmalarındaki verilere göre hız ile malzemenin şekillendirme kabiliyetinin azaldığını bunun yanı sıra maksimum çekme dayanımı ve akma dayanımı değerlerinin hem hız hem de malzemelerin üç eksenli gerilme değerleri ile artış gösterdiğini bildirmişlerdir [6].

Korkmaz ve diğerleri 304 paslanmaz çeliğinin sac hidro-kesme yöntemi ile kesilebilmesini deneysel çalışma ile yapmadan önce LS-DYNA sonlu elemanlar analiz yazılımında Johnson-Cook malzeme modeli ile analizi gerçekleştirerek kesme işlemlerinde hangi parametrelerin etkili olduğunu belirlemişlerdir. Farklı üç eksenli gerilme değerleri elde etmek için farklı çentik değerlerinde (a, 4a, 20a) ve farklı deformasyon oranlarında ($0.0016 s^{-1}$, $0.0083 s^{-1}$, $0.042 s^{-1}$, $0.16 s^{-1}$, $0.33 s^{-1}$) 0.7mm kalınlığındaki numunelerini çekme testine tabi tutmuşlardır. Mühendislik gerilme birim deformasyon eğrileri incelendiğinde başlangıç üç eksenli gerilme değeri arttıkça malzemenin % uzama değeri azalırken gerilme değerinde artış olduğunu saptamışlardır. Aynı zamanda numunelerin şekillendirme kabiliyeti deformasyon hızı ile azalırken gerilme değerinde artış görüldüğünü bildirmişlerdir. Bu sayede deneysel verilerle uyumluluğun sağlanması ile doğru parametrelerin belirlenmesini sağlamışlardır [7].

Uz ve diğerleri T4 ve T6 ısıtılmalı 6061 alüminyum alaşımının tek eksenli ve iki eksenli çekme deneylerindeki düzenli ve düzensiz uzama bölgelerinin davranışını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Aynı zamanda şekil değişimiyle oluşan boşluk oranını belirlemek için boyun vermiş ve düzgün uzamış çekme testi numunelerinde yoğunluk ölçümleri yapmışlardır. Sonuçlar ile eşdeğer plastik genleşme ve boşluk hacim oranı grafikleri çıkarmışlardır. Çalışmalarında parametre değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek için çekme testini Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) hasar modeli ile ABAQUS sonlu elemanlar analiz yazılımı simüle ederek ampirik olarak elde edilen GTN model parametrelerini doğrulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar ile 6061 alaşımında iki eksenli gerilme durumundaki plastik deformasyonda tek eksenli gerilmadaki plastik deformasyon durumuna göre daha az boşluk oluşumuyla hasar oluştuğunu bildirmişlerdir [8].

Korkmaz, Nimonic 80A nikel esaslı süper alaşımın malzeme modeli kullanılarak malzeme yapısal denklem parametrelerinin yani Johnson-Cook parametrelerinin deney düzeneğinde belirlenmesi ve uygulanabilirliğinin araştırılmasını çalışmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde belirlenen malzemenin işleme analizlerini yapabilmek için öncesinde Johnson-Cook malzeme modeline ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için önce malzemeyi $10s^{-3}$, $10s^{-2}$, $10s^{-1}$ deformasyon oranlarında yarı-statik hızlara tabi tutmuştur. Daha sonra 370, 720, 954 s^{-1} deformasyon oranlarında dinamik testler ve $10^{-3} s^{-1}$ hızında 300, 600 ve 900 °C sıcaklıklarda yüksek sıcaklık testleri uygulamıştır. Tüm bunlardan elde ettikleri veriler yardımıyla Nimonic 80A malzemesinin Johnson-Cook parametrelerini belirlemiştir. Ardından karbür kesici takımlarla Nimonic 80A malzemesine ait tornalama deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonlu elemanlar metodu tabanlı tornalama simülasyonları yaparak deneysel ve nümerik analiz sonuçlarını karşılaştırarak oluşturulan malzeme modelinin doğruluğunu değerlendirmiştir. Nimonic 80A alaşımının akma gerilmelerinin basma ve çekme testleri için artan deformasyon hızıyla arttığını, malzemeye ait önce sırasıyla Johnson-Cook çekme parametreleri olan A, B, n, C ve m değerlerini elde ettikten sonra Johnson-Cook basma parametrelerinin değerlerine ulaşmıştır. İstatistiksel olarak hata kontrol yöntemlerine göre, ortalama yüzde hata 4,75 olurken radyal kuvvet için 5,51 ve ilerleme kuvveti için 5,16 olarak bildirmiştir. Bu değerlerin Nimonic 80A alaşımının işlenmesi için geliştirilen sonlu elemanlar modelinin ve bu modelleme sırasında belirlenen sınır şartlarının (sürtünme katsayısı, ağ yapısı, eleman boyutu, vb.) uygun olduğunu Johnson-Cook modeli ile bildirmiştir [9].

Tamer, 316L paslanmaz çeliğinin kırılma davranışlarının nümerik ve deneysel karşılaştırılması üzerine çalışmıştır. Bunun için Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) ve Johnson-Cook (J-C) hasar modelleri karşılaştırılması için küresel zımba (out of plane) testleri gerçekleştirilerek malzemenin kırılma davranış grafiklerini elde etmiştir. Nümerik sonuçları Simufact ve Ls-Dyna yazılımları kullanılarak hesaplamıştır. GTN ve J-C hasar modellerinden ulaşılan sonuçlara göre kırılma noktalarında deneye göre çok az sapma olduğunu bunun yanı sıra Şekillendirme Limit Diyagramının sol tarafındaki kırılma eğrisinin J-C hasar modeline kıyasla GTN hasar modeli ile daha keskin olarak tahmin edildiği ile karşılaşılsa da her iki model de malzemenin kırılma eğrisi üzerinde doğru tahminlerde bulunduğunu bildirmiştir [10].

Yang ve diğerleri, yüksek gerilme oranlarında yarı statik ön gerilime sahip AA6061-O alüminyum alaşımını Johnson-Cook hasar modeline uygulanabilirliği üzerine çalışmışlardır. Alüminyum alaşımını yarı statik gerilme altında farklı ön gerilme katsayılarında ve farklı deformasyon oranlarında yüksek hızlı çekme testine maruz bırakmışlardır. Belirledikleri Johnson-Cook hasar modeli ile LS-DYNA analiz yazılımı kullanarak sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Ardından gerilmeleri dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniği kullanarak ön gerilme arttıkça akma oranının önemli ölçüde arttığını bunun yanında ön gerinim katsayısı arttıkça yüksek hızlı çekme gerilmesi sınırının azaldığını ve toplam çekme gerilmesi sınırının arttığını bildirmişlerdir. Tüm bu çalışmalar doğrultusunda dijital görüntü korelasyonu tekniği tarafından kaydedilen numunelerin gerinim alanının hasar modeli ve sayısal analiz simülasyonu ile elde edilmiş gerinim alanı ile uyumlu olduğunu bildirmişlerdir [11].

Davaze ve diğerleri, yarı statik ve dinamik yükler altında çift fazlı DP450 çelik sacın plastik ve kırılma davranışları üzerine çalışmışlardır. Sünek çatlama davranışının tahmini ve kırılma kriterlerinin eksikliklerinin üstesinden gelmek için Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) hasar modelinden destek almışlardır. Malzemenin plastik ve kırılma davranışını modellerken uygun denklemleri seçebilmek için öncesinde çeşitli karakterizasyon testlerini içeren farklı yükleme ve gerilme durumlarına ait çekme deneyleri yapmışlardır. Modeli daha sonra başka bir numune geometrisi üzerinde doğrulamışlardır. Farklı gerilme durumlarının yükleme oranları için testler ve simülasyonlar arasındaki karşılaştırmalar GTN hasar modelinin ve numunelerin hem yükleme-yer değiştirme eğrilerinin hem de çatlak oluşumu açısından makroskopik tepkisinin çok yakın bir doğrulukla tahmin edilebildiğini göstermişlerdir [12].

Chiyatan ve Uthaisangsuk, yüksek mukavemetli çeliklerin yüksek gerilme oranlı deformasyonu altında hem mekanik davranışlarını hem hasar davranışlarını deneyler ve hasar modelleri ile incelemişlerdir. 780 ve 1000 kalite ferritik-martensitik çift fazlı (DP) çeliklerin gerilme hızının mekanik özellikleri ve kırılma mekanizması üzerindeki etkileri hem deneyler hem de mikro mekanik bazlı modellemeler üzerinden araştırmışlardır. İncelenen çelikler için yarı statik deformasyon oranı (0.001 s^{-1}), orta deformasyon oranı ($0.5-1 \text{ s}^{-1}$), yüksek deformasyon oranı ($1500-2500 \text{ s}^{-1}$) olarak çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Bunlara dayanarak değişen deformasyon oranları altında DP çeliklerinin lokal deformasyonu ve hasarı üzerindeki mikro yapının etkilerini araştırmak için iki boyutlu temsili hacim elemanları kullanılarak sonlu elemanlar simülasyonları yapmışlardır. İnceledikleri faz bileşenlerinin farklı deformasyon oranlarına yönelik akış eğrileri Johnson-Cook hasar modeli ile dislokasyona dayalı bir teori kullanılarak tanımlamışlardır. Ayrıca numune mikro yapılarındaki lokal çatlak mekanizmalarını tanımlamak için hıza bağlı olarak J-C hasar modeline dayalı deforme fazları hesaplanan lokal gerilmeleri ve hasar gelişimlerini incelemişlerdir. Mikro yapı özelliklerinin özellikle faz gruplarının düşük ve yüksek gerilme oranı deformasyonu altında DP çeliklerinin gerilme sertleşmesini ve sünekliğini farklı şekillerde etkilediğini tespit etmişlerdir. Her iki çeliğin mikroyapılarındaki hasar başlatma ve yayılması simülasyonlar tarafından tahmin edilen çeşitli deformasyon hızlarında deneysel sonuçlarla oldukça yakın sonuçlar gösterdiğini bildirmişlerdir [13].

Ganjani, gerilme üç eksenliliğine ve Lode açısına bağımlılığı göz önünde bulundurarak sünek kırılmayı tahmin etmek için bir hasar modeli üzerinde çalışmıştır. Çalışmada hasar mekaniğinin sürekliliği temel alınarak bir hasar modeli oluşturulması amaçlanmıştır. Hasar modelini geliştirmek için plastik ve hasar olarak iki farklı akma yüzeyi oluşturulmuştur. Hem üç eksenli gerilme hem de Lode açısı parametresini içeren sünek kırılma modeli olan Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) hasar modeli oluşturma üzerinde çalışmıştır. Bu modeli dört farklı metal alaşımının (HY100 çeliği gibi) kırılma lokuslarını oluşturmak için kullanmıştır. Tahmin modeli aynı zamanda çelik HY100 ve çelik A533B için gerilme üç eksenli gerilme değerlerine bağımlılığının araştırılmasını da içermiştir. Modelin performansının doğrulamak için TRIP690 çeliğinin Kırılma Şekillendirme Limit Diyagramını (FFLD) oluşturarak incelemiştir. Modelin hem düşük hem yüksek üç eksenli gerilmelerindeki sünek kırılmaya ait parametreleri doğruladığını bunun yanı sıra sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS/Explicit'de modelin açık gerilme entegrasyonu algoritmalarıyla açıklamıştır. Elde

ettiği model parametreleri, kuvvet ve hasar sonuçlarının yanı sıra kırılma şekli için deneysel veriler ile simülasyon arasında mükemmel bir korelasyon olduğunu bildirmiştir [14].

Zhang ve diğerleri, Al 6016-T4 malzemesinin deneysel testler ve simülasyonlar yardımıyla sünek kırılma kriteri ile sünek kırılma tahmini üzerine çalışmalarını yürütmüşlerdir. Kesmeden tek eksenli gerilime kadar değişen farklı gerilme durumlarındaki sünek kırılma kriteri ve sünek kırılma başlangıcını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu süreçte çekme test cihazında farklı malzeme yönelimlerindeki altı tip numuneyi çeşitli gerilme durumlarını elde etmek için köpek kemiği örnek modelinde tasarlamışlardır. Bu numuneleri gerinim sertleştirme davranışını karakterizasyonu ve anizotropik Drucker verim fonksiyonunun kalibrasyonu için test etmişlerdir. Al6016-T4'ün plastik deformasyon sürecini tanımlamak için sayısal sonlu elemanlar analizinde modüler bir gerinim sertleştirme modeli ve anizotropik Drucker akma fonksiyonu belirlemişlerdir. Mesafe-yük eğrileri ve deney ile simülasyon sonuçları arasındaki değerleri karşılaştırılarak doğrulamışlardır. Belirledikleri sünek kırılma kriterinin kesmeden tek eksenli gerilime kadar sünek kırılmanın başlangıcını doğru bir şekilde tahmin ettiğini bildirmişlerdir [15].

Aktürk, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ALSİ10Mg malzemesinin malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmasını incelemiştir. ALSİ10Mg alaşımlı numunelerini yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri uygulayarak kuramsal malzeme modellerinden biri olan Johnson-Cook malzeme modelini belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Yarı-statik çekme testlerini oda sıcaklığında ve 10^{-3} , 10^{-2} , $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranlarıyla gerçekleştirmiştir. Yüksek sıcaklıkta çekme testlerini ise 10^{-3} s^{-1} referans deformasyon oranında ve 24, 150, 300°C sıcaklıklarda yapmıştır. Çalışmalarındaki verileri kullanarak Johnson-Cook parametrelerini belirlemiştir. Ardından Johnson-Cook malzeme modelini sonlu elemanlar tabanlı sayısal analiz yazılımı olan ANSYS'eyükleyerek oluşturulan çekme simülasyonu ve deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Deney ve simülasyon arasında yaklaşık %7.5 fark olduğunu bildirmiştir. Oda sıcaklığında ve farklı deformasyon oranlarında yarı-statik çekme testleri ve simülasyonları incelendiğinde tüm numunelerde artan deformasyon oranına bağlı test ve simülasyonlar arasındaki sapma miktarının arttığını saptamıştır. Aynı zamanda 0 ve 90 derece hadde yönlü AlSi10Mg alaşımının yarı-statik ve yüksek sıcaklık etkilerine gösterdiği davranışları ölçerek alaşımın Johnson-Cook parametrelerinin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu kanıtlayarak literatüre katmıştır [16].

Lin ve arkadaşları, deformasyon parametrelerinin ve gerilme üç eksenliliğinin Al-Zn-Mg-Cu alaşımındaki kırılma davranışları ve mikro yapısal değişimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Gerilme oranındaki artış ile birlikte kırılma yüzeyi alanının azaldığını mikro boşlukların gerilme yönüne dik olarak büyüdüğünü ve düşük gerilme oranlarında daha kolay birleşerek çatlaklara neden olduğunu belirtmişlerdir. Böylece artan gerilme oranı ile birlikte hasar geriniminin de arttığını bildirmişlerdir. Aynı zamanda gerilme üç eksenliliğinin düşük olduğunda numunenin radyal bileşen gerilmesinin çok küçük olmasından dolayı mikro boşlukların radyal yön boyunca birleşmesinin pek mümkün olmadığını açıklamışlardır. Sonuç olarak gerilme üç eksenliliği azalmasıyla deformasyon geriniminin arttığını ve gerilme üç eksenliliği azaldıkça kırılma yüzeyinin alanının azaldığını bildirmişlerdir. Ana hasar mekanizmalarının mikro boşlukların çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi ile oluşması nedeniyle taneler arası deformasyon daha yüksek gerilme hızında ya da daha büyük gerilme üç eksenliliğinde mikro boşluklar gerilme yönüne dik olarak büyüme eğiliminde olduklarını açıklamışlardır. Bunların birbirine bağlanmasıyla malzeme deformasyonunu hızlandırdıklarını bildirmişlerdir [17].

Huang ve diğerleri, DP900 çeliği üzerinde üç eksenli gerilme değerine bağlı kırılma kriterinin araştırılması ve karşılaştırılması üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında yeni önerilen kırılma kriterlerinin malzemelerin farklı oranlarda kırılma davranışını doğru tahmin edip edemeyeceğini doğrulamayı amaçlamışlardır.

Metalin gerilme ve hasar davranışını doğru tahmin etmek için kullandıkları sonlu elemanlar simülasyonu malzeme oluşturma davranışını simüle etmek için etkili bir yöntemdir. Çünkü malzeme zamana bağlı yükleme yollarına maruz kaldığında deformasyon oranı malzemenin kırılma davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Bunun için öncesinde malzeme modeli denklemi parametreleri belirlenmiştir. Bu denklemler sayesinde gerilme, gerinim ve deformasyon hızı etkileri de dahil olmak üzere malzemenin yüke göre mekanik özelliklerini tanımlamışlardır. Johnson-Cook modeli gerilme oranının elastik plastik ve sünek hasar üzerindeki etkisini dikkate alarak gerilme oranına bağlılık ilişkisini logaritmik bir biçimde ifade edebilmiştir. J-C modelinin avantajı malzeme parametrelerini kalibre etmek için farklı deformasyon oranları altındaki tek eksenli gerilim-gerinim ilişkisini kullanabilmesidir. Sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS DP900 çeliğinin çekme ve kesme testlerini simüle etmek için kullanmışlardır. Ardından simülasyon ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Deformasyon oranı (10^{-3} s^{-1} ila 10^{-2} s^{-1}) olduğunda, deformasyon oranına göre doğruluk

artar ve diğer modellere göre en yüksek kalır. Önerilen üç kırılma kriterine bağlı hata aralıkları %8'i geçmeyen izin verilen bir aralıkla kabul edilebilir sonucunu bildirmişlerdir. [18].

Kim ve diğerleri, gerilme üç eksenli ve Lode açısı dikkate alınarak DP980 yüksek mukavemetli metal levhalar için arıza yüzeyinin deneysel olarak belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, DP980 sayfalarında üç eksenli gerilim durumları altında başarısızlık tahminini araştırmışlardır. İlk olarak, numunelerin şekillerini, karşılık gelen çekme testleriyle indüklenen saf kayma, tek eksenli gerilme, çift eksenli deformasyon gibi belirli üç eksenli gerilme durumlarını kullanarak belirlemişlerdir. Hasar meydana geldiğinde, hasar lokusundaki eşdeğer gerilme, dijital görüntü korelasyonu (DIC) vasıtasıyla elde edilir ve daha sonra, LS- DYNA 'nın sonlu elemanlar analizi yazılımında uygulamak üzere üç eksenli hasar diyagramının (TFD) oluşturulduğu üç eksenli ve Lode açısına göre çizmişlerdir. Doğrulamayı sayısal sonuçların çapak alma testi verileriyle karşılaştırılmasıyla yapmışlardır. Bunun yanında GISSMO hasar parametrelerini kullanarak sonlu elemanlar analizinde yük delme stok eğrileri, hasar sonuçları ile gerçek test sonuçlarını doğrulamışlardır [19].

Caro ve diğerleri, nikel bazlı süper alaşım malzemelerin uçak motoru bileşimi kullanımında yüksek derecede geri yaylanma riski ve şekillendirilebilirlik sorunları ile karşılaşılması nedeniyle 718 alaşımının sac metal şekillendirilmesi sırasındaki hasar modeli ve kırılma davranışı üzerinde çalışmışlardır. 718 alaşımı malzemesini oda sıcaklığında gerçekleştirilen şekillendirme testlerinde geri çekilme bölgelerinde şekillendirme limit diyagramı (FLD) kullanılarak inceleme yapıldığında tahmin edilemeyen durumlar gözlemlenmiştir. Bu durumlar malzemedeki geri esnemeye ve tahmin edilemeyen şekil bozulmalarına yol açmaktadır. LS-DYNA analiz yazılımı kullanılarak 718 alaşımı üzerinde yapılan şekillendirme simülasyonlarında hasar parametrelerinin önceden tahmin edilebilmesi için geliştirilmiş artımlı gerilim durumuna bağlı hasar modeli olan GISSMO'yu izotropik Von-Mises ve anizotropik Barlat Yld2000-2D akma kriterleri ile birleştirmişlerdir. Dört farklı numune geometrisi üzerinde çekme, düzlem gerinim, kesme ve çift eksenli dijital görüntü korelasyon yönteminin ölçüm değerlerinden yardım almışlardır. Analiz yazılımında simüle ettikleri hasar modeli ve test edilen geometrilerdeki gerinimlerin literatürde bulunan teorik üç eksenli gerilme değerleriyle uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Tahmin edilebilir şekil bozulmaları anizotropik model göz önüne alındığında malzeme hasarı riski

olmadan başarılı şekillendirme prosedürlerini tasarlamak ve metal levha şekillendirme işlemlerinin geri esneme tahmininin doğruluğunu artırmak amacıyla çalışmışlardır. Bu sayede şekillendirme simülasyonlarında GISSMO hasar modelini kalibre etmek için dijital görüntüleme korelasyon sistemi ile birlikte kullanılmasıyla elde edilen değerlerin doğru tahmin parametrelerine ulaştığı doğrulanmıştır [20].

Tang ve diğerleri, sıcak preslenmiş 22MnB5 çeliğinin üç noktalı bükme testleri altında farklı yükleme koşullarındaki hasar davranışlarını ve sünek kırılmasını sayısal olarak modellemişlerdir. Çalışmalarında, malzemenin tek eksenli çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinin küçük farklar gösterdiğini, bunun sebebinin malzemenin ısıtma sırasında tamamen östenitleşmesi ve martensitik dönüşüme uğraması olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, malzemenin deformasyon davranışını modellemek için izotropik sertleştirme ile Von-Mises akma kriterini kullanmışlardır. Üç eksenli gerilme ve hasar gelişimini tahmin etmek adına, tüm numuneleri sonlu elemanlar simülasyonlarıyla modellemişlerdir. 22MnB5 sac levhası için kalibre edilen plastisite ve DF2015 sünek kırılma kriteri, Abaqus/Explicit sayısal analiz yazılımı kullanılarak, sıcak preslenmiş U şekilli kiriş düzeninin üç noktalı bükme sürecini simüle etmek için kullanılmıştır. Sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, hasarın dağılımı, hasarın başladığı yer ve zımbanın aşağı ilerlemesiyle oluşan makroskobik çatlakların gerilme durumları tutarlılık göstermiştir.

DF2015 sünek kırılma kriterinin kırılma tahmin doğruluğunu doğrulamak için yük-yer değiştirme eğrisi ile simüle edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalar neticesinde, simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, U şekilli numunenin gerçek geometrisi ile model arasındaki uyumsuzluk ve martenzitin sıcak presleme işlemi sırasında eşit dağılamaması nedeniyle oluşmuştur. Simülasyonlar, maksimum kuvvetin yaklaşık %8 oranında fazla, yer değiştirmenin ise yaklaşık %6 oranında eksik tahmin edildiğini göstermiştir. Hem sonlu elemanlar analizi sonuçları hem de deneysel çalışmalar, DF2015 sünek kırılma kriterinin karmaşık üç noktalı eğilme testinin kırılma morfolojisini ve çatlak konumunu doğru tahmin edebildiğini doğrulamıştır. Çalışmalarında çekme numunelerinin kırılma yüzeyleri ile maksimum kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi analiz etmiş, gerilimin artmasıyla boşlukların dönerek maksimum kayma gerilmesi etkisiyle numunenin bozulmasına yol açtığını bildirmişlerdir [21].

Rastellini ve diğerkleri, çok eksenli gerilmelere maruz kalan 3D sac metal parçaların şekillendirme limitini tahmin etmek için üç eksenli hasar diyagramı üzerine çalışmışlardır. Geleneksel Şekillendirme Limit Eğrileri (FLC) sadece düzlem içi yükleme durumlarında geçerli olduğundan üç eksenli yüklemeye maruz kalan malzemelerde geçerli olmadığı için çalışmalarında malzemenin yüklemesi boyunca biriken plastik gerilmeye dayanan yeni bir hasar kriteri önermişlerdir. Hasardaki eşdeğer plastik gerilmeyi üç eksenli gerilme açısından ilişkilendirmişlerdir. Üç eksenli kırılma eğrisini elde etmek için elasto-plastik malzeme parametreleri kullanılarak laboratuvarında üç eksenli test yapmışlardır. Şekillendirme Limit Eğrileri noktalarını önerilen üç boyutlu hasar kriteri içeren yeni bir üç eksenli hasar diyagramı (TFD) ile eşleştirmişlerdir. Üç eksenli hasar diyagramı (TFD) kriterinin metal şekillendirme bileşenlerinin hasarını ve fizibilite tahmin etme kapasitesini doğrulamak için sayısal simülasyon yazılımı olan Stampack'i kullanmışlardır. Programda oluşturulan birinci hasar kriteri olarak geleneksel şekillendirme limit eğrileri (FLC) ile üçgen kabuk elemanlar ikincisinde ise üç eksenli hasar diyagramı (TFD) hasar kriteri ile altı yüzlü üç boyutlu katı elemanlar kullanılmışlardır. Simülasyon sonuçlarını fiziksel endüstriyel parça ile doğrulanmış ve aralarındaki farkın minimum olduğunu paylaşmışlardır. Kabuk ve katı analizleri karşılaştırdıklarında çok eksenli yüklerde geleneksel şekillendirme limit eğrileri (FLC) güvenilir bir kriter olarak artık geçerli olmadığını üç eksenli gerilme yaklaşımının daha güvenilir sağladığını bildirmişlerdir [22].

Simonetto ve diğerkleri, AA7075 alüminyum alaşımı sac malzemenin değişen sıcaklık ve üç eksenli gerilme durumlarında deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Pürüzsüz, çentikli ve kayma gibi farklı numune konfigürasyonları kullanırken sıcaklığı -100°C ile 300°C arasında değiştirerek üç eksenli gerilme değerleri ile boyun verme eğrisi elde ederek modellemişlerdir. Bunlar doğrultusunda gerilme durumundan bağımsız olarak test edilen sıcaklığın düşürüldükçe numunede uzamanın monoton şekilde arttığını ve malzemenin şekillendirilebilirliğini desteklediğini görmüşlerdir. Bu durumun deforme olan numuneler üzerinde gerçekleştirilen mikroyapısal ve mekanik incelemeler sonucunda oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklardaki deformasyonun kaba intermetalik parçacıkların sayısını önemli ölçüde arttırdığını ortaya çıkarmıştır. Beklenilenin aksine sıfırın altındaki deforme edici sıcaklıklarda metaller arası parçacıkların parçalanmasını ve yüksek yoğunluklu çökeltilerin ve dislokasyonların oluşumunu desteklediğini görmüşlerdir [23].

Wang ve diğerleri, magnezyum alaşımlı levhaların gerilme durumu ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan anizotropik kırılma davranışını incelemişlerdir. Bu doğrultuda kırılma testlerini oda sıcaklığında sac haddeleme yönüne göre farklı yönlerde kesilmiş numune geometrileri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kırılma gerilmesin değerlerini dijital görüntü korelasyonu yaklaşımıyla ve kırılma yüzeylerini niteliksel olarak stereoskopi ve taramalı elektron mikroskobu ile karakterize etmişlerdir. Ardından AZ31 magnezyum alaşımlı sac numunenin kırılma yeri gerilim durumu, sıcaklık ve haddeleme yönünün bir fonksiyonu olarak yeniden yapılandırmışlardır. Kırılmanın yerini analitik olarak tahmin edebilmek için Modifiye Mohr Coloumb (MMC) kırılma kriterine sıcaklığa bağlı bir parametre eklemişlerdir. Yeni önerilen kriteri daha önce belirtilen testlerden elde edilen deneysel verilere dayanarak kalibre ederek değişen sıcaklıklarda gerilimin baskın olduğu bölgeler için AZ31 magnezyum alaşımlı sac numunenin kırılma yerini tahmin etmeye uygun olduğunu kanıtlamışlardır. Sıcaklık ve haddeleme yönünün bir fonksiyonu olarak farklı geometrilerdeki numunelerin mekanik tepkisini incelediklerinde üç eksenli yüklemenin kırılma anında hem maksimum yükü hem de maksimum darbeyi etkilediğini paylaşmışlardır. Beklenildiği gibi sıcaklık ve haddeleme yönüne bağımsız olarak maksimum yük düz numune tarafından minimum yük ise kesme numunesi tarafından gösterilmiştir. Oda sıcaklığında ve 100°C'deki kırılma gerilme değerleri dijital görüntü korelasyonu yaklaşımı ile ölçülürken 300°C'deki kırılmanın son derece sünek olan yapısından dolayı kırılmanın başlangıcını belirlemek için yükün kullanıldığı yeni bir yöntem önermişlerdir. Üç eksenli yükleme koşulunun sıcaklık ve haddeleme yönünden bağımsız olarak maksimum yük ve kırılma mesafesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bununla beraber sıcaklığın artmasıyla maksimum yükün önemli ölçüde azalmasına katkıda bulunurken tam tersine haddeleme yönünün etkisinin ikinci sırada önemi olduğunu paylaşmışlardır. Anizotropi katsayısının sıcaklıktan bağımsız olarak üç eksenli gerilimin arttıkça azaldığını ve sıcaklık yükseldiğinde anizotropinin azaldığını görmüşlerdir. Deneysel olarak belirlenen kırılma eğrileri numunenin haddeleme yönünü ikinci dereceden etkilerken kırılma geriliminin yükleme koşulu ve sıcaklıktan birinci dereceden etkilendiğini paylaşmışlardır [24].

Aktarılan literatür çalışmalarında endüstride kritik öneme sahip olan metallerin plastik şekillendirilme süreçlerinde malzeme davranışının doğru anlaşılacak üretim süreçlerinde en uygun şekilde optimize edilmesi için gerçekleştirilen analizlerden bahsedilmektedir. Metallerin plastik şekillendirilmesi aşamalarını analiz edebilmek için hem deneysel çalışmalara hem de sonlu elemanlar analizlerine yer verildiği görülmektedir. Deneysel

alışmalar yaparak malzemenin gerilme-gerinim davranışını belirleyecek testlerle desteklemişlerdir. Gerçekleştirdikleri sonlu elemanlar analizleri ile nümerik verileri kullanarak simülasyonlar yaptıkları görölmektedir. Bu analizlerde yaygın olarak malzeme modellerinden Johnson-Cook ve Gurson-Tvergaard-Needleman modelleri yaygın olarak kullanarak deneysel verilerle sonlu elemanlar analizi sonuçları değerlerinin tutarlılığı paylaşılmaktadır.

6181A-T4 alüminyum alaşımlı sac metal malzemesinin Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeli parametrelerinin belirlenmesi ve tahmin performanslarının değerlendirilmesi üzerine gerçekleştirilen bu çalışmada, 6181A-T4 yaşlandırma ısıı işlemi görmüş alüminyum alaşımı kullanılması çalışmaya özgünlük katmaktadır. Dört farklı numune şeklinin (standart, a çentikli, 4a çentikli, 20a çentikli) farklı çekme hızlarında analiz edilmesiyle gerilme konsantrasyonları ve üç eksenli gerilme durumları hesaplanmıştır. Farklı ekme hızlarında (25 mm/dk, 125 mm/dk, 500mm/dk, 1000 mm/dk) gerçekleştirilen analizler malzemenin hıza bağımlı davranışını inceleme olanağı sunmaktadır. Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeline ait pekleşme parametrelerinin analitik yöntemlerle, hasar parametrelerinin ise optimizasyonla belirlenmesi 6181A-T4 yaşlandırma ısıı işlemi görmüş alüminyum alaşımına özgü modelin doğruluğunu arttırmaktadır. Kullanılan ift yönlü yaklaşım sayesinde oluşturulan malzeme modelinin doğrulanmasında hem teorik hem de nümerik yöntemlerin kullanımı yer almaktadır. Sonlu elemanlar analizinde LS-DYNA analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar ile numunelerin malzeme davranışlarının yüksek oranda tutarlılıkla modellenmesi sağlanmaktadır.

3. TEZİN AMACI

Günümüzde alüminyum alaşımlarının kullanım talebinin artması çeşitli endüstrilerde hafif ve dayanıklı malzemelere olan talebin artmasının yanı sıra gelişmiş özelliklere sahip alüminyum alaşımlarının üretilmesini mümkün kılan teknolojideki gelişmeler de dahil olmak üzere bu faktörlerin kombinasyonundan kaynaklanmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının kullanımının artmasının temel nedenlerinden biri yakıt tasarruflu araçlara olan talebin artmasıdır. Alüminyum alaşımları, hafif ve güçlü oldukları için otomobil ve uçak yapımında kullanılmaktadır. Bu da yakıt verimliliğini artırmaya ve emisyonları azaltmaya yardımcı olmaktadır. Tüm bu avantajları sayesinde alüminyum alaşımlarının nihai üründen önceki adımlarda, analiz ve tasarım aşamalarında mekanik özelliklerinin bilinmesi en verimli ve en optimum ürünün oluşmasına fayda sağlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında 6181A-T4 alüminyum alaşım sac malzeme için Johnson-Cook malzeme modelinde parametrelerin belirlenmesi ve tahmin performansının değerlendirilmesi beraberinde literatüre kazandırılması üzerinde çalışılmıştır.

Bu bağlamda dört farklı üç eksenli gerilme değerine sahip numuneler ile dört farklı çekme hızında gerçekleştirilen çekme testleri sayesinde çalışılan malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Sonlu elemanlar analizinde oluşturulacak 6181A-T4 özelindeki malzeme modelleme çalışmaları ile Johnson-Cook pekleşme ve hasar parametrelerinin elde edilerek malzeme ve hasar modeli denklemlerinin oluşturulup literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

4. ALÜMİNYUM SAC MALZEMELERİ VE PEKLEŞME, HASAR ANALİZ MODELLERİ

4.1. Alüminyum Alaşım Sac Malzemeler

Alüminyum alaşımlı sac malzemeler temelde ilk metal olarak alüminyumdan ardından bu alüminyum alaşımına spesifik özellikler kazandırma amacıyla ilave edilen bakır, magnezyum, silisyum, mangan ve çinko olarak sayılabilecek farklı miktarlarda başka elementlerden oluşmaktadır. Alüminyum alaşımlı sac metal bir malzemenin içeriği, özel alaşım türüne ve kullanım amacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Alüminyum serilerini incelediğimizde, 1xxx serisinin %99 oranında alüminyum içerdiği, 2xxx serisinin ana alaşım elementinin bakır olduğu görülmektedir. Bunu yanı sıra 3xxx serisi ana alaşım elementi mangan, 4xxx serisinde silisyum olmaktadır. 5xxx serisinin ana alaşım elementi magnezyumdur. 6xxx serisi alüminyum alaşımında magnezyum ve silisyum bir arada bulunmaktadır. 7xxx serisinin temel alaşım elementi çinko olup, 8xxx serisinde lityum bulunurken kalay ilavesi yapılabilmektedir.

1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx serisi alüminyum alaşımları, esas olarak alüminyumdan oluşurken ısıtılma işlemi görmeyen alaşımlar olarak bilinmektedir. Bu serilere belirli özellikler elde etmek için az miktarda diğer elementler eklenmektedir. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlar ise alüminyum, bakır, magnezyum, silikon, mangan ve çinkodan oluşmakta ve ısıtılma işlemi uygulanabilmektedir. Bu ısıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlar, ısıtılma işlemi görmeyenlere göre daha güçlüdür olmaktadır [25].

Alüminyum alaşımlı sac metallerin endüstride geniş bir alanda büyük bir öneme sahip olmasının ana nedeni çeşitli avantajlara sahip olması olmaktadır. Hem hafifliği hem de dayanımının iyi olması oldukça farklı alanlarda ve geniş bir yelpazedeki uygulamalar için onları ideal bir tercih yapmaktadır. Birçok malzemenin hızla zarar görebileceği ortamlarda korozyona karşı dirençli bir yapıda olması malzeme seçiminde önceliklendirilmesinde rol oynamaktadır. Bu malzemeler aynı zamanda kolay işlenebilir ve şekillendirilebilir olmalarıyla farklı üretim proseslerinde ön plana çıkmalarını sağlamaktadır. Çevreye duyarlı bir seçenek haline gelmesinde geri dönüştürülebilir olmasının büyük bir önemi bulunmaktadır. Tüm bunların yanı sıra termal iletkenliğinin ve elektriksel iletkenliğinin iyi olması sayesinde elektronik sektöründe de ön plana çıkmaktadır [26].

Alüminyum alaşımları, uçak ve uzay aracı üretim proseslerinde özellikle kanat kaplamaları, gövde panelleri gibi uçağın komponentlerinde yaygın olarak kullanılmasıyla havacılık endüstrisinde kullanımı yaygın olan bir malzeme olmaktadır. Otomotiv sektörünün yanı sıra kamyon ve tren parçalarının imalatında önemli bir rol oynamaktadır.

Gövde ve şasi yapımında alüminyum alaşımlı sac malzemelerin hafiflikleri ve sağladıkları dayanıklılık avantajları sayesinde aynı zamanda araç çarpışma yönetme ve takviye sistemleri gibi kritik bileşenlerde de bu özelliğiyle tercih edilmektedir. Süspansiyon sistemleri aracın şasi ile tekerlekler arasındaki bağlantıyı sağlarken alüminyum alaşımı hafifliği ve sağlamlığı ile bu alanda tercih edilmesiyle ön plana çıkmaktadır.

Fren sistemlerinde ise alüminyum alaşımlarının kullanımıyla aracın performansını etkileyen yakıt verimliliğini etkileyen ağırlık etmeninde hafiflik özelliği sayesinde avantaj sağlamaktadır [26-27].

4.2. Metal Şekillendirme İşlemlerinde Pekleşme ve Hasar Modelleri

Pekleşme modelleri metal şekillendirme işlemlerinde metallerin deformasyon davranışlarını doğru tahmin etme ve yorumlayabilme konusunda oldukça önemli olmaktadır. Bu modeller metallerin şekillendirilme prosesinde oluşturulacak tasarımı en uygun şekilde elde etmek ve ortaya çıkacak ürünün kalitesiyle birlikte verimliliğini arttırmak amacıyla malzeme özelliklerini, yükleme koşullarını ve geometrik faktörleri göz önüne almaktadır. Bunların dışında sektörde kullanımı olmayan geliştirme aşamasında bulunan malzemelerin performanslarını simüle ederek metal şekillendirme proseslerinin gelişmesine ve ilerlemesine olanak sağlamaktadır. Metal şekillendirme işlemlerinde çalışılan numunenin malzemesinde meydana gelebilecek plastik deformasyonları en doğru şekilde tanımlamak için malzemenin elastik ve plastik davranışlarını temsil edecek modellere gerek duyulmaktadır. Bu modeller sonlu elemanlar analizi yazılımlarındaki denklemlerde malzeme modelleri olarak ifade edilmektedir.

Bir malzemenin genel gerilme durumunda plastik davranışını modelleyebilmek için üç temel unsura ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan birincisi akmanın başladığı andaki gerilme bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir akma kriteri ikincisi, gerilme ve deformasyon oranı bileşenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir akma kuralı ve üçüncüsü şekil alma işlemi

süresinde başlangıç akma gerilmesinin evrimini açıklayan pekleşme kuralı olarak yer almaktadır. Aynı zamanda plastisite modelleri pekleşme açısından değerlendirildiğinde temelde izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme yaklaşımlarını oluşturan iki ana başlığa ayrılmaktadır [28].

Elastik malzemelerin davranışını tanımlamak için Hooke Kanunu kullanılmaktadır. Bu kanun, gerilme ve gerinim arasında doğrudan lineer bir ilişki kurmaktadır. Ancak plastik malzemelerin davranışında bu durum farklıdır. Plastik gerinimler yalnızca gerilme parametreleriyle tanımlanamamaktadır. Çünkü plastik gerinimler, malzemenin maruz kaldığı tüm yükleme geçmişine ve gerilme durumuna nasıl ulaşıldığına bağlı olmaktadır [29].

Malzemenin plastik bölgedeki davranışı karmaşık olarak adlandırılmaktadır. Bu durumu daha kolay yönetebilmek için plastik davranışlar modelleme yoluyla incelenmektedir. Bu modelleri desteklemek için çeşitli kabuller geliştirilmiştir bunlar malzeme modelleri başlığında toplanabilmektedir [30].

Birçok mühendislik problemlerini modellemek ve simüle etmek için kullanılan farklı sonlu elemanlar analiz programları bulunmaktadır. Bu programlarda çeşitli plastisite ve hasar modelleri bulunmaktadır. Metal şekillendirme ve deformasyon analizlerinde yaygın olarak Johnson-Cook pekleşme modeli tercih edilmektedir. Mühendislik malzemeleri için en yaygın bilinen modeller Johnson-Cook ve Zerilli- Armstrong olarak bilinmektedir. Johnson-Cook modeli denklemlerinde de malzeme davranışını karakterize etmek için belirlenmesi gereken bazı malzeme sabitleri bulunmaktadır. Malzeme sabitlerinin sıcaklık, deformasyon oranı ve malzeme türüne bağlı oldukları bilinmektedir. Bu nedenle malzeme davranışının doğru belirlenmesi için farklı şartlar altında malzeme sabitlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Zerilli-Armstrong malzeme modeli termodinamik teori temelli bir modeldir. Zerilli-Armstrong malzeme modelinde yer alan C_0 ise Eş.4.1 ile hesaplanabilen temsili bir akma dayanımı olmaktadır.

$$C_0 = \sigma_g + k_h t^{-1/2} \quad (4.1)$$

Eş.4.1’de yer alan parametreler sırasıyla C_0 akma dayanımını σ_g çözünen maddelerin katkısını ve başlangıçtaki dislokasyon yoğunluğunu temsil ederken k_h mikroyapısal gerilme yoğunluğunu ve t ise ortalama tane çapını ifade etmektedir [31].

Johnson-Cook malzeme modeli yarı ampirik model olup denklemlerin formu yapılan özelleştirilmiş çalışmalarla birlikte modellenen malzemeye bağlı olmaktadır.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (4.2)$$

Eş.4.2’de verildiği gibi ilk parantez malzemenin gerilme etkisini göstermektedir. A sabiti referans koşullar altında malzemenin akma gerilmesini temsil ederken B (mukavemet katsayısını) gerinim sertleştirme sabitini, ϵ gerinimi, n ise gerinim sertleşme katsayısını (pekleşme üstelini) ifade etmektedir.

İkinci parantez ise malzeme üzerindeki deformasyon oranının etkisini göstermektedir. C sabiti deformasyon oranının gerilme katsayısı ve ϵ^* ise gerilme oranını temsil etmektedir. Üçüncü parantezdeki T sıcaklığı ve m ise termal yumuşama katsayısını temsil ederek sıcaklığın malzeme üzerindeki etkisini göstermektedir.

Johnson-Cook modeli malzeme sabitlerini belirlemek için belirli adımları takip etmektedir. Önce malzemenin gerilme-gerinim tepkisini anlamak için gerinim testleri uygulanmaktadır. Ardından farklı sıcaklıklarda ve gerinim hızlarında akma dayanımı, akış gerilmesi, gerinim hızı, sıcaklık ve plastik gerinim ile ilişkilendirilen Johnson-Cook malzeme modelinin denklemi oluşturulmaktadır. Öncelikle A, B, C ve n olan pekleşme parametreleri elde edilmektedir. Sonraki adım ise Johnson-Cook malzeme modeli için gerekli olan malzeme sabitlerinin hesaplanmasında regresyon analizi veya optimizasyon tekniklerinin kullanılması olmaktadır. Tüm bu hesaplamalar doğrultusunda Johnson-Cook malzeme modelinin tahminleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmakta gerekli ise malzeme sabitlerinde revizyona yapılmaktadır.

Johnson-Cook malzeme modelinin temel yapısı, malzemenin gerilme altındaki kırılma tokluğunu ve kırılmaya karşı direncini temsil eden bir kırılma yasasına dayanmaktadır. Bu model Eş.4.3’te yer almaktadır.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (4.3)$$

Eş.4.3'te D , kırılma tokluğunu ifade ederken sırasıyla $\Delta \varepsilon$ gerinimdeki değişimi, ε_f ise kırılma gerinimini ifade etmektedir. Bu eşitlik bir malzemenin kırılma tokluğunun kırılma gerinimi başına gerinimdeki değişikliklerin toplamıyla ilişkisi hakkında bilgi vermektedir. Kırılma tokluğu ne kadar yüksekse malzemenin gerilim altında kırılmaya karşı o kadar dirençli olduğu anlaşılmaktadır. D ile temsil edilen kırılma tokluğu, $D \geq 1$ şartlarda ε_f ile temsil edilen kırılma gerinimi Eş.4.4'e dönüşmektedir.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \eta][1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}^*)][1 - D_5 T^*] \quad (4.4)$$

Verilen Eş.4.4'ün yapısı ve model parametrelerinin spesifik değerleri modellenecek malzemenin yüklendiği koşullara yani gerilme, deformasyon hızı ve sıcaklık gibi durumlara bağlı olmaktadır.

Eş.4.4'te yer alan sırasıyla D_1 , D_2 , D_3 parametrelerinde malzemenin hasar modeline ait üç eksenli gerilme parametreleri temsil edilirken D_4 ile deformasyon hızının parametresi, D_5 ile sıcaklığın parametresi ifade edilmektedir [32].

Eş.4.4'te yer alan $D_3 \sigma^*$ aynı zamanda $-D\eta$ değerine karşılık gelmektedir. Buradaki η üç eksenli gerilmeyi temsil ederken T^* ise homolog sıcaklığı temsil etmektedir. Homolog sıcaklık Eş.4.5'te verilmektedir.

$$T^* = (T_{\text{malzeme sıcaklığı}} - T_{\text{oda sıcaklığı}}) / (T_{\text{malzemenin erime sıcaklığı}} - T_{\text{oda sıcaklığı}}) \quad (4.5)$$

Üç eksenli gerilme değeri ise Eş.4.6'da yer aldığı şekilde ortalama gerilmenin eş değer gerilmeye oranı olarak ifade edilmektedir.

$$\eta = \sigma_m / \bar{\sigma} \quad (4.6)$$

Eş.4.6'da yer alan $\bar{\sigma}$ eşdeğer gerilmeyi ifade ederken σ_m ise Eş.4.7'de verildiği üzere ortalama gerilmeyi temsil etmektedir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (4.7)$$

Johnson-Cook malzeme modeli parametrelerinin elde edilmesinde farklı testler yapılmaktadır. Çeşitli çentik faktörüne sahip numuneler ile testler yapılarak gerilim değerleri elde edilmektedir. Farklı çentik gruplarında yer alan numuneler kullanılarak gerilmeler hesaplanacaksa her üç eksene uygun gerilme değerleri hesaplandıktan sonra Eş.4.7'ye yerleştirilmektedir. Ardından elde edilen ortalama gerilmenin eş değer gerilmeye oranlanmasıyla üç eksenli gerilme ifadesi olan Eş.4.8 elde edilmektedir [33].

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (4.8)$$

4.3. Gerilme-Birim Deformasyon İlişkisi

4.3.1. Mühendislik gerilmesi ve gerçek gerilme deformasyon ilişkisi

Mühendislik gerilmesi olarak bahsedilen gerilme malzemeye uygulanan kuvvetin malzeme kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu kapsamda mühendislik gerilmesinin birim olarak genelde Pa ya da MPa olarak hesaplanabilmesi için uygulanan kuvvetin N ya da kN olarak alınmasıyla birimi m² ya da mm² olan malzemenin kesit alanına bölünmesiyle birim alana düşen kuvvet hesaplanmış olmaktadır.

Eş.4.9'da öncelikle mühendislik gerilmesi aktarılmaktadır.

$$\sigma_m = F / A_0 \quad (4.9)$$

Ardından yapılan deneyler sonucunda kuvvet ile deformasyon miktarının ilişkisi Eş. 4.10'da verilen formülle hesaplanmaktadır. ε birim deformasyonu ifade etmektedir.

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.10)$$

Gerçek gerilme değerinin ve gerçek gerilme-birim deformasyon miktarının hesaplanması gerektiğinde sırasıyla Eş.4.11 ve Eş.4.12'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (4.11)$$

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + \varepsilon_m) \quad (4.12)$$

Deformasyon malzemenin orijinal şekil veya boyutlarında meydana gelen değişiklikleri ifade etmektedir. Malzemenin maruz kaldığı birim başına kuvvete bağlı ortaya çıkmaktadır. Malzemelerin mekanik davranışlarını tanımlayan önemli kavramlardan biri de deformasyon olarak yer almaktadır. Deformasyon ise çeşit olarak elastik ve plastik deformasyon olmak üzere iki farklı kavrama ayrılmaktadır. Elastik deformasyon, malzemenin elastik sınır içinde deformasyona uğradığı bir bölge olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede malzemenin gerilme uygulandığında geçici olarak bir şekil değişimine uğraması ancak uygulanan gerilme ortadan kaldırıldığında başlangıçtaki haline geri dönmesi durumunu ifade etmektedir.

Farklı mühendislik disiplinlerinde malzemelerin farklı yükler altında kalıcı deformasyon göstermeden nasıl davranacağını anlaşılmaması oldukça önem arz etmektedir. Bu durum temelde malzemenin iç yapısındaki atomların oluşturduğu kimyasal bileşiklerin en küçük temel yapısı olan moleküler bağların esnekliği, atomların hareket kabiliyeti, kristal yapının esnekliği, moleküler zincirler ve bu zincirlerin yapıları ile ilgili olmaktadır. Bunun yanı sıra atomlar arası kuvvetler olarak adlandırılan çekme ve itme kuvvetleri de malzemenin elastik deformasyonunu iç yapısal olarak etkilemektedir. Gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkiyi malzemenin elastik bölgesinde geçerli olacak şekilde Eş.4.13'deki Hooke Yasası açıklamaktadır. Denklem E ile ifade edilen Young modülünün diğer adıyla elastisite modülünün birim deformasyonu ile beraber gerilme değerini etkilediği görülmektedir.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.13)$$

Hook Yasasına göre malzemenin sadece elastik bölgesinde gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkinin doğru orantıda olduğu bilgisi ifade edilmektedir.

Plastik deformasyon elastik sınır aşıldığında malzemenin kalıcı deformasyona geçtiği bölgede meydana gelen deformasyon olarak adlandırılmaktadır. Malzemenin maruz kaldığı gerilme arttıkça deformasyon oranı artsa da bu ilişki lineer bir şekilde gerçekleşmemektedir. Bu plastik deformasyon bölgesinde, malzemenin gerilme-deformasyon grafiğinde plastik deformasyona geçtiği belirgin bir akma noktası bulunmaktadır. Bu belirgin akma noktası

aşıldıktan hemen sonra devamındaki plastik deformasyonda ise malzemeye ait olan belirgin akma noktasını aşan gerilmelerle beraber devam eden akma sonrası davranış temsil edilmektedir.

Akma noktası temelde malzemenin plastik deformasyona geçtiği noktanın gerilme seviyesini belirtmektedir. Bu nokta, malzemenin elastik deformasyon bölgesinden plastik deformasyon bölgesine geçişini belirleyerek malzemenin karakteristik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Akma noktasındaki gerilme seviyesi, akma gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Bu değer malzemenin tasarımsal özellikleri, dayanıklılığı ve işlenebilirliği hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Akma dayanımını belirlerken gerilme-deformasyon grafiğinden belirgin akma değeri gösteren nokta alınmaktadır. Belirgin bir değer yoksa bu aşamada elastik bölgenin belirli bir oranda ötelenmesiyle genellikle %0.2'lik deformasyon değerine kadarlık değerde ötelenerek oluşturulan nokta akma noktası değeri olarak alınmaktadır.

4.3.2. Üç Eksenli gerilme ile deformasyon ilişkisi

Üç eksenli gerilim malzemenin maruz kaldığı gerilimin x, y ve z olmak üzere üç farklı ekseninde oluşturulduğu gerilme şartını ifade etmektedir. Üç eksenli gerilim ile deformasyon ilişkisi incelendiğinde malzeme üzerine üç farklı ekseninde uygulanan gerilim durumlarının ölçülmesiyle deformasyon analizi hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmadaki sırasıyla standart, a, 4a, 20a olarak belirlenen farklı çentiklerdeki numuneler sayesinde çalışılan malzemenin özellikleri ve davranışı hakkında daha geniş bir yelpazede incelenmiştir. Numunelere çentik formu kazandırılmasıyla malzemenin çatlama ve hasar eğiliminin değerlendirilmesi aynı zamanda dayanım özelliklerinin anlaşılması sağlanmıştır. Üç eksenli gerilme farklı değerlerdeki çentikli numunelerin çalışılmasıyla malzemenin çatlama eğilimi, çatlak büyüme hızı, malzemenin dayanıklılık sınırları ve kırılma mekanizmaları ile ilgili karşılaştırmalı bilgi sahibi olunmasını sağlamaktadır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Malzeme

Bu çalışmada 3mm kalınlığına ve 2.71 g/cm^3 yoğunluğuna sahip 6181A-T4 alüminyum alaşımlı sac malzeme kullanılmıştır. 6181A-T4 malzemesi endüstride TL091 ticari adı ile de bilinmektedir. Malzemenin üreticisi Unitech firmasıdır. Bu malzeme yaygın olarak otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Çizelge 5.1. ve Çizelge 5.2’de 6181A-T4 alüminyum malzemesinin sırasıyla kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 5.1. 6181A-T4 alüminyum malzemesinin kimyasal kompozisyonu

Element	Ağırlıkça %
Alüminyum, Al (Esas Element)	Diğer Elementler
Cr	1.82
Cu	2.36
Fe	1.78
Mg	3.48
Mn	1.27
Si	1.78
Ti	1.46
Zn	2.61

Çizelge 5.2. 6181A-T4 alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri

Akma Dayanımı	163.09 MPa
Çekme Dayanımı	312.77 MPa
Elastisite Modülü	69 GPa
Sertlik (Brinell)	60 HB
Termal İletkenlik	150W/m.K
Termal Genleşme Katsayısı	$23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Uzama	%20

5.2. Johnson-Cook Pekleşme ve Hasar Parametrelerinin Belirlenmesi

Johnson-Cook malzeme modelinin uygulanmasında sonlu elemanlar analizi yöntemlerinden destek alınmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli karmaşık deformasyon koşulları altındaki metal malzemelerin davranışını en doğru şekilde belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir matematiksel malzeme modelidir.

Bu matematiksel malzeme modeli sayesinde akma gerilmesi, plastik deformasyon gibi çalışılan malzemeye özgü özelliklerin belirlenebilmesi oldukça önemlidir. Matematiksel malzeme modelleri yaygın olarak metal şekillendirme işlemlerindeki, farklı yükler altındaki patlama veya çarpışmalardaki, geniş deformasyon oranı aralığındaki malzeme davranışının modellenmesinde kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında yer alan Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri hesaplanırken önce analitik olarak pekleşme parametreleri hesaplanmıştır. Ardından sonlu elemanlar analizi için gerekli malzeme modelinin kurulmasında yazılımsal olarak LS-DYNA bunun yanı sıra hasar parametrelerinin hesaplanıp optimizasyonunun yapılması için ise LS-OPT optimizasyon yazılımından destek alınmıştır.

5.2.1. Johnson-Cook pekleşme modeli parametrelerinin matematiksel olarak belirlenmesi

Johnson-Cook matematiksel malzeme modeli malzemenin hem plastik bölgesinde hem de elastik bölgesinde nasıl davranacağını tanımlanmasını sağlamaktadır. Bu matematiksel malzeme modeli Eş.5.1’de yer aldığı şekilde çeşitli kritik parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler sırasıyla A akma dayanımını, B mukavemet katsayısını, n pekleşme üstelini, C ise birim şekil değiştirme hızını duyarlılık katsayısını temsil etmektedir.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (5.1)$$

Eş.5.1’de sırasıyla ilk parantez malzemenin gerilme etkisini, ikinci parantez malzeme üzerindeki deformasyon oranının etkisini, üçüncü parantez ise sıcaklığın malzeme üzerine etkisini belirtmektedir.

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (5.2)$$

Eş.5.2'deki deformasyon oranı eşdeğer plastik birim şekil değiştirmenin birim şekil değiştirme hızı oranını temsil etmektedir. Bu aynı zamanda Eş.5.3'te belirtildiği gibidir.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 \left(1 + \frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^m}{1 + \alpha \ln\left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0}\right)} \quad (5.3)$$

Eş.5.3'te verilenler ε_0 başlangıçtaki plastik akma gerilmesini, T_0 ve T_m referans sıcaklıklarını, α sıcaklık etki parametresini, ε_0^* başlangıç deformasyon oranını ifade etmektedir.

$$T^* = \frac{(T-T_{oda})}{(T_{erime}-T_{oda})} \quad (5.4)$$

Eş.5.4'te ki parametreler sırasıyla T ile malzeme sıcaklığı, T_{oda} ile oda sıcaklığı, T_{erime} ile malzemeye ait ergime sıcaklığı değerleri temsil edilmektedir. Bu çalışmadaki çekme testinde farklı sıcaklıklar kullanılmadığı için m değeri 1 olarak alınmaktadır.

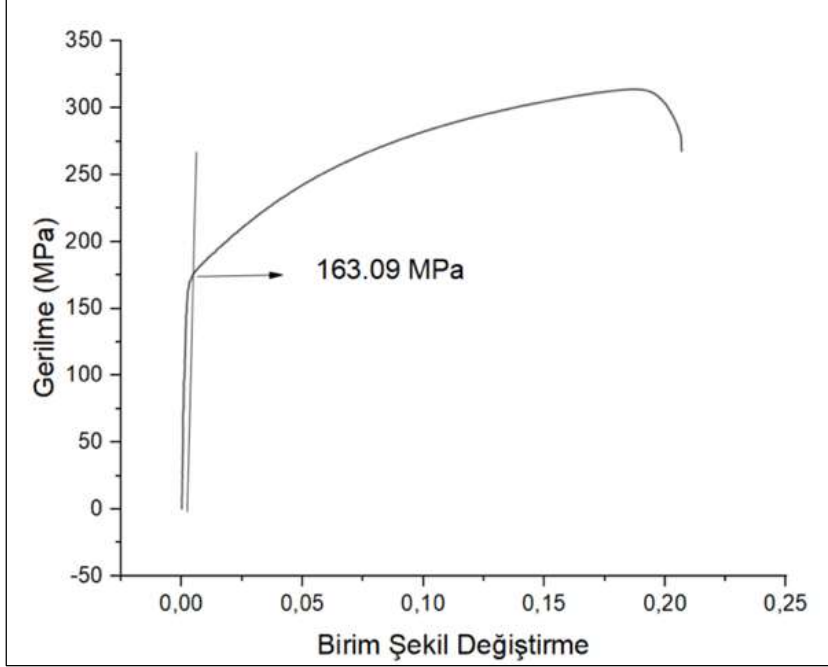
Eş.5.1'deki Johnson-Cook matematiksel malzeme modeline ait pekleşme parametreleri sırasıyla aşağıda aktarıldığı şekilde belirlenmiştir.

Parametre A'nın belirlenmesi

A ile temsil edilen parametre malzemenin akma dayanımını belirtmektedir yani belirli bir yüke maruz kalan malzemenin şekil değiştirmeye başlamadan maruz kaldığı gerilme değerini ifade etmektedir. Aslında bu değer malzemenin özgün mukavemet özelliğini ifade etmektedir kısacası belirli yük altında ne kadarlık bir uzama ya da gerilme gösterebileceğini temsil etmektedir.

Akma gerilmesine ait akma noktası ise oldukça kritiktir çünkü bu nokta aşıldıktan sonra malzemenin elastik davranışı sona erir ve plastik deformasyona geçer bu nedenle meydana gelen gerilmeler arttıkça kalıcı deformasyonlar meydana gelirken malzeme şeklini değiştirmeye başlamaktadır. Çalışmada yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme

ve birim şekil değiştirmeye ait grafik olan Şekil 5.1 incelendiğinde akma noktasına ait gerilmenin 163.09 MPa olduğu görülmektedir.

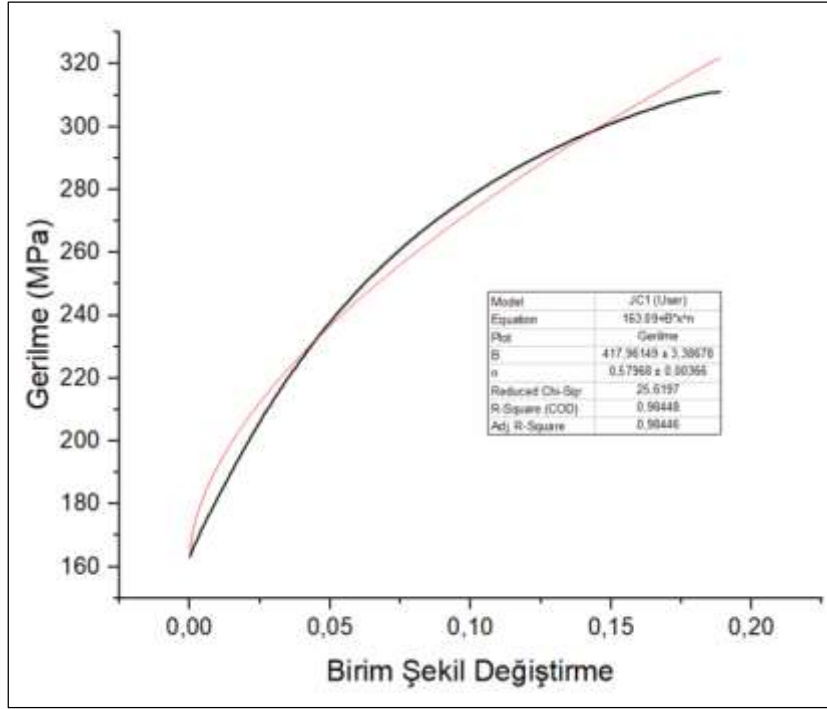


Şekil 5.1. Akma dayanımının belirlenmesi

A parametresi 163.09 MPa olarak elde edilmektedir.

Parametre b ve n'nin belirlenmesi

Denklemdaki parametrelerden B mukavemet katsayısını temsil ederken n ise pekleşme üstelini ifade etmektedir. B ve n parametreleri 25 mm/dk referans deformasyon hızında gerçekleştirilen çekme testinin sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden elde edilmektedir. Bu eğrideki akma noktasıyla çekme noktası arasına $A+B \varepsilon^n$ formülasyonunun uyarlanmasıyla B'nin ve n'nin değeri hesaplanmaktadır. Şekil 5.2'de B ve n parametreleri birim şekil değiştirme-gerilme grafiğinde yer almaktadır.



Şekil 5.2. Birim şekil değiştirme-gerilme grafiği

B parametresinin değeri 417.961 MPa olarak hesaplanırken n ise 0.579 olarak hesaplanmaktadır.

Parametre c'nin belirlenmesi

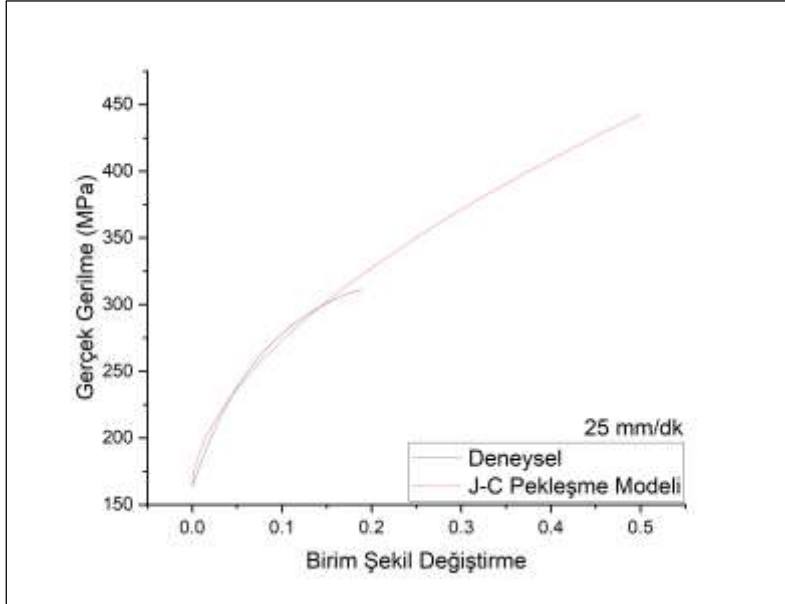
Johnson-Cook malzeme modeli denkleminde C parametresi birim şekil değiştirme hızı duyarlılığını temsil eden parametredir. Bu tez çalışmasında 25 mm/dk (0.008333 s^{-1}), 125 mm/dk (0.04167 s^{-1}), 500 mm/dk (0.16667 s^{-1}), 1000 mm/dk (0.33333 s^{-1}) çekme hızlarında çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

Eş.5.1'deki Johnson-Cook matematiksel malzeme modeli temel alındığında bu çalışmada farklı sıcaklıklarda deneme yapılmamıştır bunun yerine oda sıcaklığında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sıcaklık parametresi etkisiz kalmıştır.

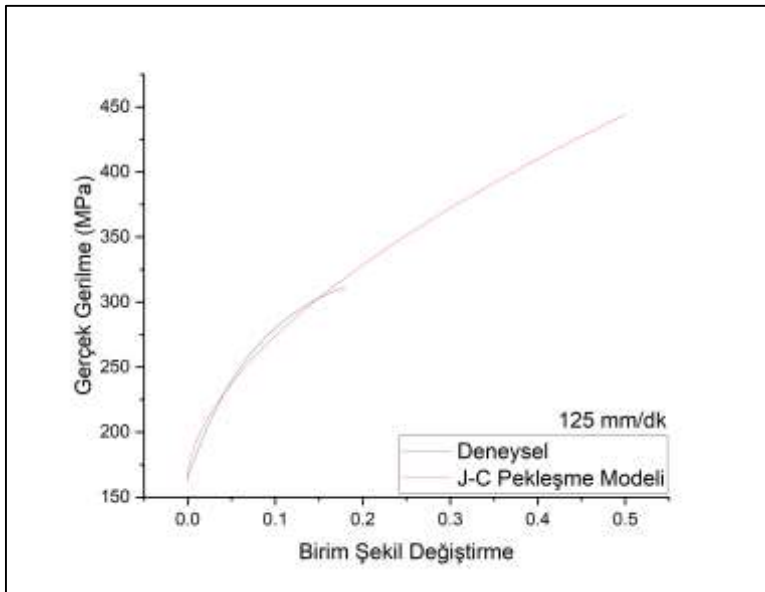
$$\frac{\sigma}{A+B \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n} = (1+C \ln(\dot{\epsilon}^*)) \quad (5.5)$$

Eş.5.5 çalışmanın yapıldığı dört farklı çekme testi hızı için uygulanmıştır. Eşitliğin $y=mx+c$ doğrusuna benzetilmesiyle burada m yerine C ve x yerine $\ln(\dot{\epsilon}^*)$ ifadelerine yer verilerek

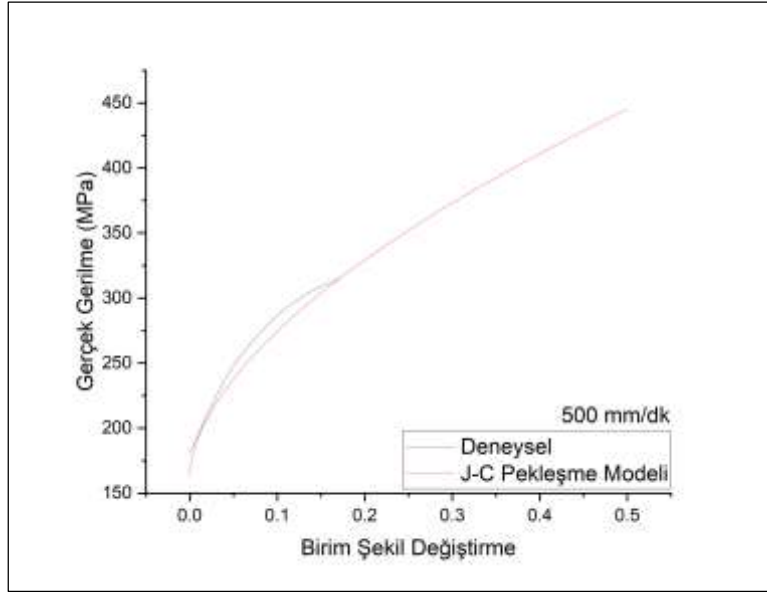
bakıldığında sayısal değerlerin oldukça yakın olduğu ve tutarlı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.



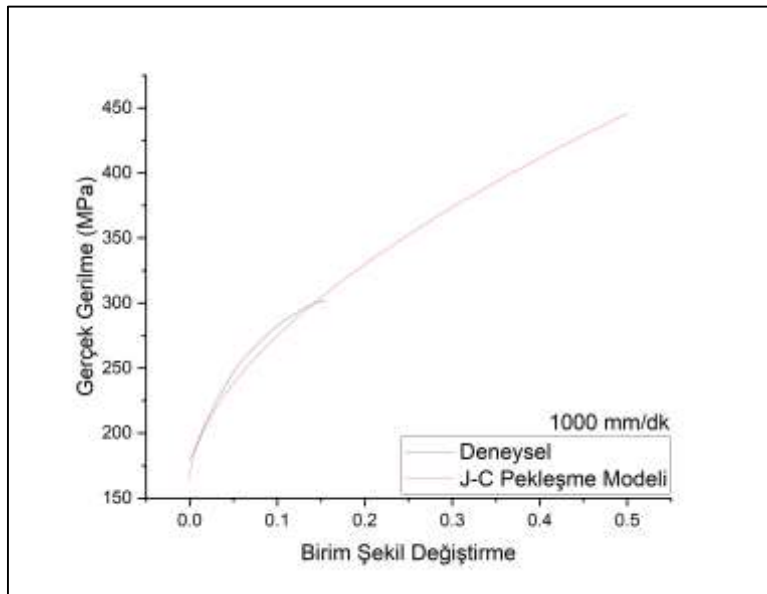
Şekil 5.4. “25 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.5. “125 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.6. “500 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değişirme grafiği



Şekil 5.7. “1000 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve J-C pekleşme modeli matematiksel sonuçlarına ait çekme testinin gerçek gerilme -birim şekil değişirme grafiği

D₁, D₂, D₃, D₄ ve D₅ hasar parametrelerinin belirlenmesi

Öncelikle D₁, D₂ ve D₃ hasar parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreleri belirleyebilmek için 25 mm/dk hızındaki çekme verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada farklı sıcaklıklarda çekme testi yapılmadığı için hasar parametrelerinden D₅’in değeri sıfır olarak yer almaktadır.

Bu duruma göre denklem tekrardan düzenlendiğinde Eş.5.7'nin Eş.5.8'e dönüştüğünü görmekteyiz.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)][1 + D_4 \ln(\varepsilon^*)][1 + D_5 T^*] \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)][1 + D_4 \ln(\varepsilon^*)] \quad (5.8)$$

Burada ε_f kırılma birim şekil değiştirme değeri ise η üç eksenli gerilme değeri olmaktadır. Bunun yanı sıra üç eksenli gerilme denklemi olan Eş.4.8 sayesinde hesapladığımız değerler sırasıyla çentik 20a için 0.358, 4a için 0.451, a için 0.738 ve standart numune için 0.333 olarak hesaplanmıştır. Bu farklı çentikli test numuneleri için kırılma birim şekil değiştirme değerleri 25 mm/dk'lık deformasyon hızında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilmiştir.

Hasar parametrelerinden olan D_4 parametresi farklı deformasyon hızları kullanılarak belirlenebilmektedir. Eş.5.5'in içerdiği beş farklı hasar parametresinden çalışma sırasında farklı sıcaklıklarda çalışılmadığı için D_5 parametresinin sıfır değerini almasıyla Eş.5.9 elde edilmiştir.

$$\frac{\varepsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)]} = [1 + D_4 \ln(\varepsilon^*)] \quad (5.9)$$

Eş.5.9'un $y = mx + c$ doğrusuna benzetilmesiyle y yerine $\varepsilon_f / [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)]$, m yerine D_4 , x yerine $\ln(\varepsilon^*)$, C yerine de 0.00181 değerlerine yer verilmektedir.

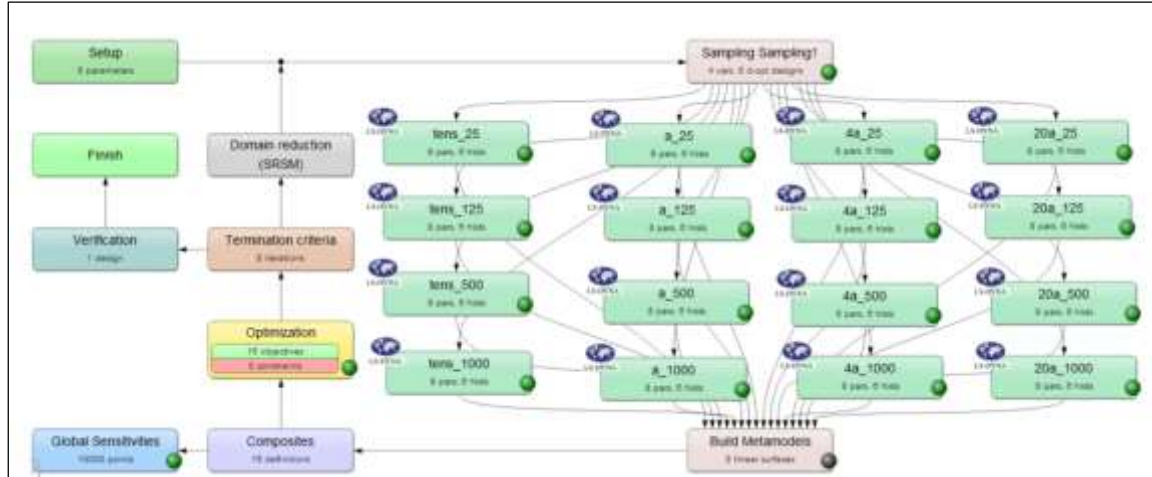
5.2.2. Johnson-Cook hasar parametrelerinin nümerik olarak belirlenmesi

LS-DYNA sonlu elemanlar analiz yazılımında bulunan 15 numaralı malzeme kartı hem pekleşme parametrelerini hem de hasar parametrelerini içermektedir. Bu nedenle Johnson-Cook pekleşme modelinde bulunan parametreler sırasıyla bu kart kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma için dört farklı çekme hızında (25 mm/dk, 125 mm/dk, 500 mm/dk, 1000 mm/dk) ve dört farklı numunede (standart, a çentikli, 4a çentikli, 20a çentikli) toplamda 16 farklı sayısal analiz modeli analiz yazılımına kurulmuştur.

Johnson-Cook pekleşme parametreleri analitik olarak belirlendikten sonra hasar parametreleri nümerik olarak hesaplanmıştır. Bu amaç ile Johnson-Cook matematiksel malzeme modelinin pekleşme parametreleri A, B, n, C'nin ardından hasar parametreleri olan D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 'in en uygun değerlerini hesaplayabilmek için LS-OPT optimizasyon yazılımında optimize edilmiştir. Bunun için önce 25 mm/dk'lık deformasyon hızında çekme testine tabi tutulan standart çentiksiz numunenin malzeme modeli LS-DYNA' da kurulmuştur. Bunların yanı sıra A, B ve n parametrelerinin optimum değerleriyle beraber C parametresine ait standart çentiksiz numunenin 25 mm/dk, 125 mm/dk, 500 mm/dk, 1000 mm/dk deformasyon hızlarındaki çekme testlerinin sayısal analiz modelleri kurulmuştur. Johnson-Cook malzeme modeli denkleminde ait C parametresinin farklı hızlardaki sayısal analiz modelleri LS-OPT optimizasyon yazılımında optimize edilerek C parametresi elde edilmiştir. Ardından her sayısal analiz modeli için elde edilecek nümerik parametreler çalışmadaki dört farklı numuneye ve dört farklı çekme hızına ait deneysel verilerden faydalanılarak tamamlanmıştır.

5.2.3. Johnson-Cook hasar parametrelerinin optimizasyonu

Johnson-Cook hasar modeli parametreleri olan D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 'in değerlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle Johnson-Cook modelinin pekleşme parametreleri A, B, n, C sabit tutulmuştur. Bunun yanı sıra çekme testleri dört farklı hız ve çentik değerli numunelerle oda sıcaklığında gerçekleştirildiği için sıcaklık değişkeni etkili olmamaktadır. Bu nedenle D_5 hasar parametresi sıfır olduğu için sabit tutulmuştur. Johnson-Cook hasar modeline ait hasar parametreleri belirlenirken sırasıyla standart çentiksiz, 20a, 4a ve a çentikli numunelerin dört farklı deformasyon hızındaki çekme testlerinin sayısal analiz modelleri ve deneysel mühendislik çekme eğrileri kullanılarak optimize edilmiş ve hasar parametreleri elde edilmiştir.



Resim 5.1. Hasar parametreleri için kurulan optimizasyon haritası

Problem global setup

Parameter Setup Stage Matrix Sampling Matrix Resources Features

☐ Show advanced options

Type	Name	Starting	Minimum	Maximum	Delete
Continuous	d1	0.04	0.02	0.10	
Continuous	d2	2.6	1	4.4	
Continuous	d3	-8.25	-11	-5	
Continuous	d4	-0.05	-0.07	-0.03	
Constant	a	0.16309			
Constant	b	0.41796			
Constant	c	0.00181			
Constant	n	0.57968			

Add...

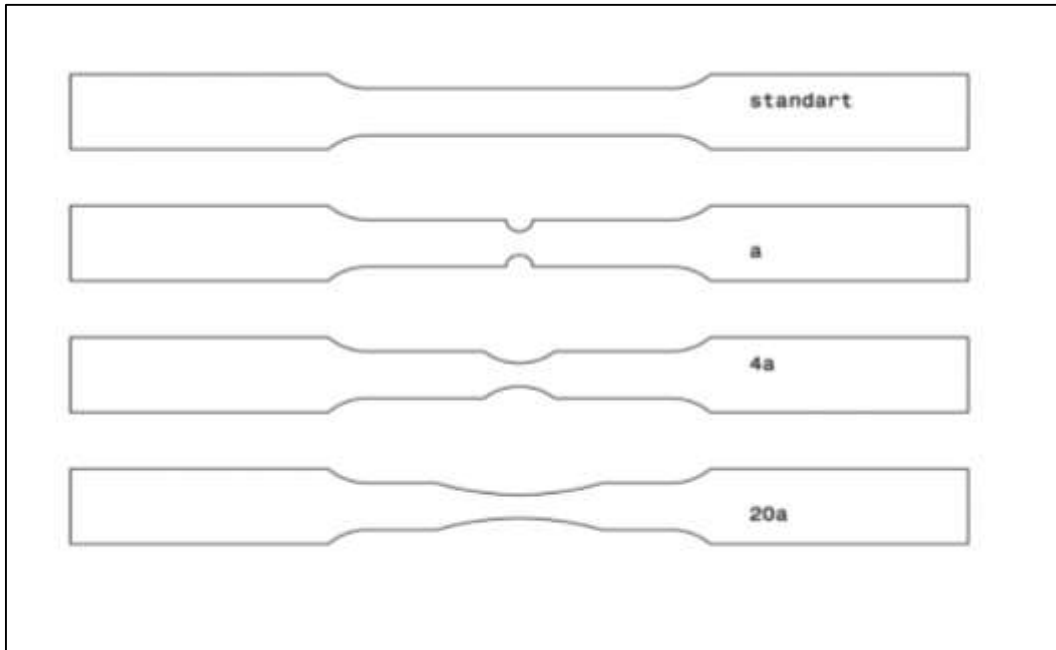
OK

Resim 5.2. Hasar parametrelerinin optimizasyon başlangıç değerleri

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

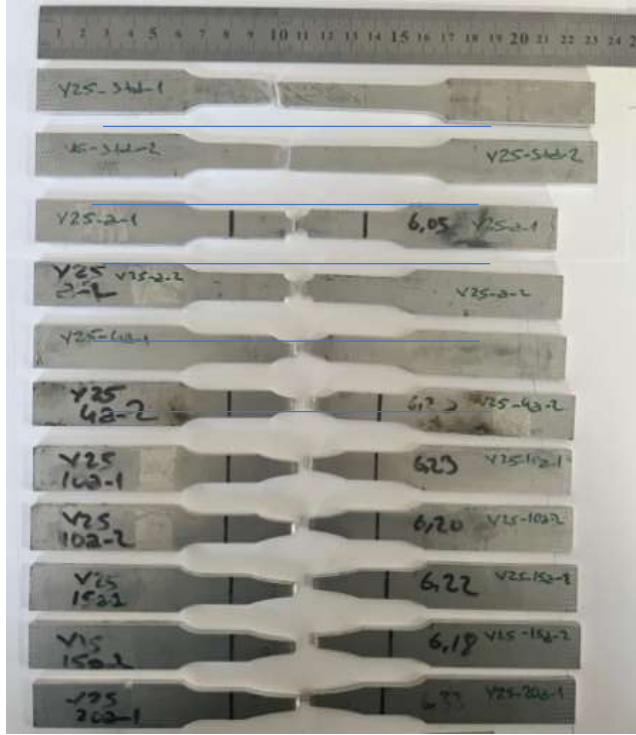
6.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Çalışmadaki malzemede farklı değerlerde üç eksenli gerilme değerleri meydana getirmek için numune üzerinde farklı değerlerde çentikler oluşturulmuştur. Farklı değerlerdeki çentikler sırasıyla standart, a, 4a, 20a olarak belirlenmiş olup bu numunelere 25 mm/dk, 125 mm/dk, 500 mm/dk, 1000 mm/dk'lık hızlarda çekme testi yapılmıştır.

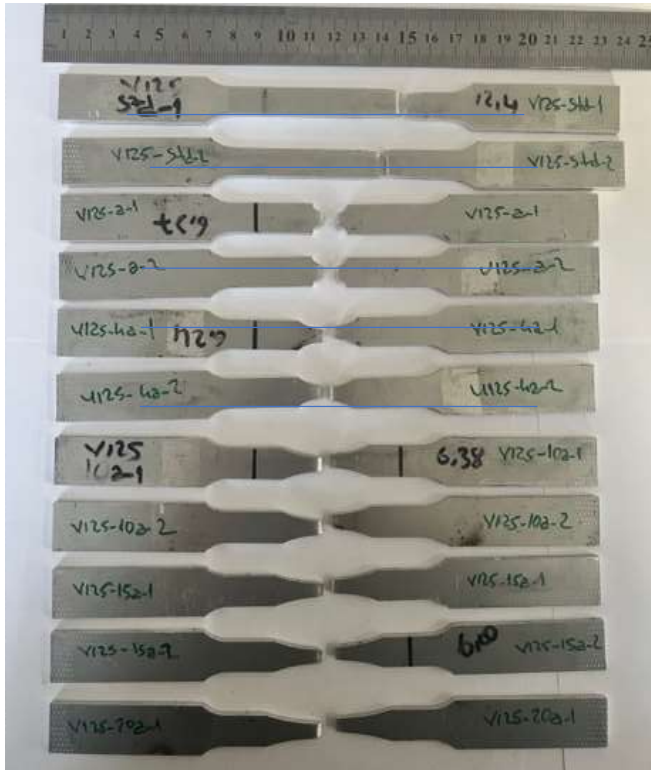


Resim 6.1. Standart, a, 4a ve 20a çentik değerlerinde çekme testi deney numuneleri

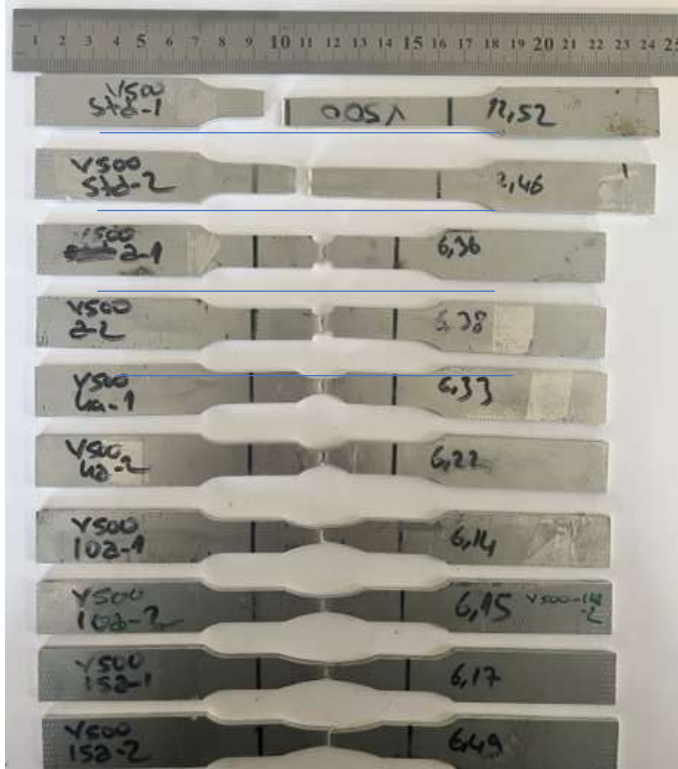
Çalışmada kullanılan numunelerin çekme testine maruz kaldıktan sonraki görünüşleri sırasıyla Resim 6.2, Resim 6.3, Resim 6.4 ve Resim 6.5’de yer almaktadır.



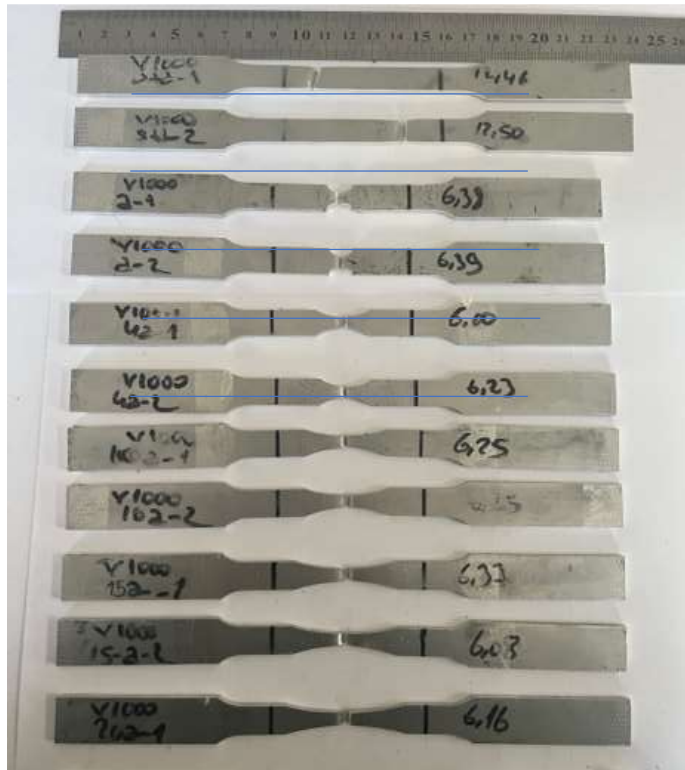
Resim 6.2. 25 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü



Resim 6.3. 125 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü



Resim 6.4. 500 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü



Resim 6.5. 1000 mm/dk'lık hızda çekme testi uygulanan numunenin görüntüsü

Çalışmadaki farklı çentik ve radyus değerlerine ait üç eksenli gerilmeler Eş.6.1'den hesaplanarak bulunmuştur.

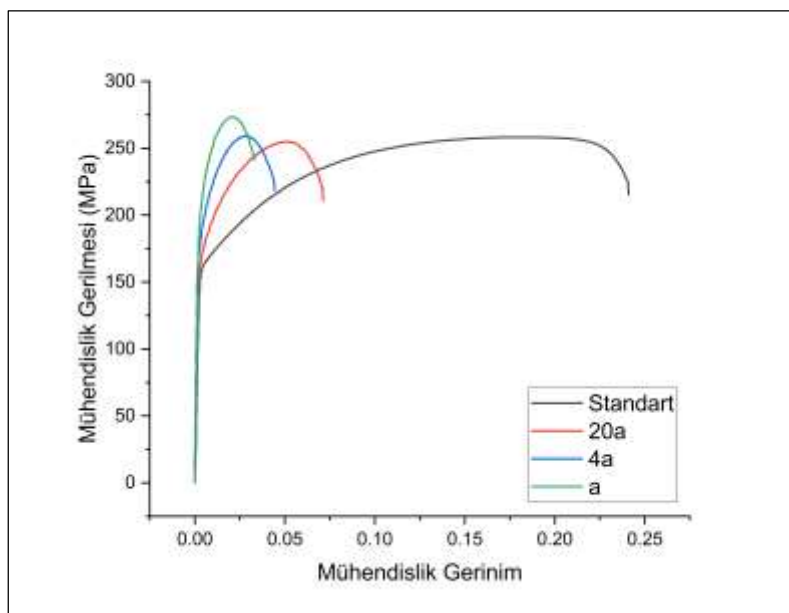
$$\eta = 1/3 + \ln(1 + a/2R) \quad (6.1)$$

Çizelge 6.1. Çentik büyüklüğü ve radyus değerlerine göre belirlenen üç eksenli gerilme değerleri

Çentik Büyüklüğü (a)	Radyus (R)	Üç Eksenli Gerilme (η)
Standart	∞	0.333
a	3.125	0.738
4a	12.5	0.451
20a	62.5	0.358

Eş.6.1'de çentik büyüklüğü değerini temsil eden a'nın yerine 3.125 yazılarak Çizelge 6.1'de yer alan her radyus değeri için sırasıyla üç eksenli gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 6.1'de 25 mm/dk'daki gerilme ve gerinim eğrileri bulunmaktadır. Çalışmada ki çekme testi sırasında numuneler sırasıyla 25 mm/dk, 125 mm/dk, 500 mm/dk, 1000 mm/dk'lık hızlarda çekilmiştir. Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'de farklı çentik değerlerine sahip 3 milimetre kalınlığındaki 6181A-T4 alüminyum alaşımının mühendislik gerilme birim deformasyon eğrileri ve deformasyon oranları grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 6.1. 25 mm/dk'lık hızda standart ve farklı çentik değerlerine sahip numunelerin mühendislik gerilme ve mühendislik gerinim grafiği

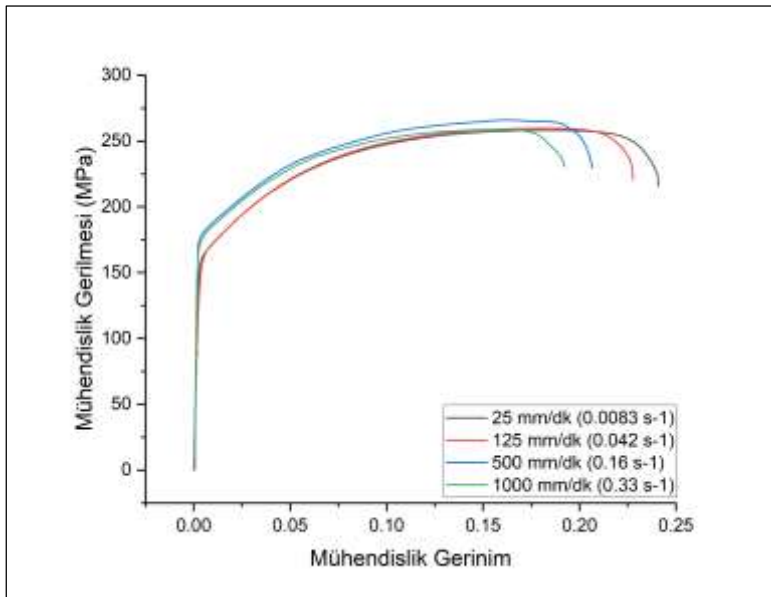
6181A-T4 alüminyum alaşımı bir alüminyum, magnezyum ve silisyumun oluşturduğu alaşımdır ve T4 temper durumunda bulunmaktadır. Bu temperlenme durumu alaşımın mekanik özelliklerini sırasıyla dayanım, sertlik, tokluk gibi özelliklerin iyileştirilmesinin yanı sıra şekillendirilebilirliği de etkileyebilmektedir. Malzemenin deformasyon hızı ise malzemenin iç yapısı, sıcaklık, maruz bırakılan dış kuvvetlerin büyüklüğü ve şekillendirme prosesinin detayları gibi farklı çeşitli faktörlere bağlı olmaktadır. Malzemelerin şekillendirilebilirlik kabiliyetleri genel anlamda deformasyon hızı ile azalmaktadır. Çalışmada malzemenin sırasıyla 0.0083 s^{-1} , 0.042 s^{-1} , 0.16 s^{-1} , 0.33 s^{-1} deformasyon oranlarına sahip olduğunu ve şekillendirilebilirlik kabiliyetleri Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere numunelerin şekillendirilebilirlik kabiliyetleri genelde deformasyon oranları ile azalırken gerilme değerlerinde artış görülmektedir. Şekil 6.6’daki grafiğin yardımıyla akma dayanımındaki değişim net bir şekilde gösterilmektedir. Bu grafikten de anlaşıldığı üzere farklı üç eksenli gerilme ve deformasyon oranları için malzemenin akma dayanımı genel anlamda artış göstermektedir.

Şekil 6.2 ’deki standart çekme numunesine ait mühendislik gerilme ve mühendislik gerinim grafiğine ait eğriler farklı deformasyon hızlarında incelenmektedir. Mühendislik gerinimi olarak bahsedilen ifade numunenin orijinal boyutlarına göre gerçekleşen değişimini göstermektedir. Standart çekme numunesine ait gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde hem 25 mm/dk’lık hem 125 mm/dk’lık deformasyon hızında gerilme arttıkça gerinim değerinin 0.15’e kadar elastik deformasyon bölgelerinin aynı gerilme ve gerinim değerleri içerisinde olduğu ve akma noktasının 163 MPa olduğu görülmektedir. Akma noktasının aşılmasıyla plastik deformasyon bölgesinde mühendislik gerilmesinin 163 MPa’ dan 274 MPa ’a kadar yükselirken mühendislik geriniminin 0.20’yi aşmasıyla 125 mm/dk’lık deformasyon hızının 0.22’lik gerinim değerinde kopma olduğu 25 mm/dk’lık deformasyon hızında ise 0.25’lik gerinim değerine kadar ulaşarak koptuğu görülmektedir. 500 mm/dk’lık ve 1000 mm/dk’lık deformasyon hızındaki eğriler incelendiğinde akma gerilmesinin 177 MPa olduğu ve bunun aşılmasıyla 1000 mm/dk’lık deformasyon hızındaki eğrinin maksimum 251 MPa ‘a kadar yükselirken 500 mm/dk’lık deformasyon hızındaki eğrinin 263 MPa ’a kadar yükseldiği ardından sırasıyla 0.18 ve 0.22 gerinim değerlerinde kopma noktasına ulaştıkları görülmektedir. Standart çekme numunesine ait bu gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde en büyük mühendislik gerinim değerine 25 mm/dk deformasyon hızında, en büyük mühendislik gerilme değerine 500 mm/dk’lık deformasyon hızında ulaşıldığı görülmektedir.

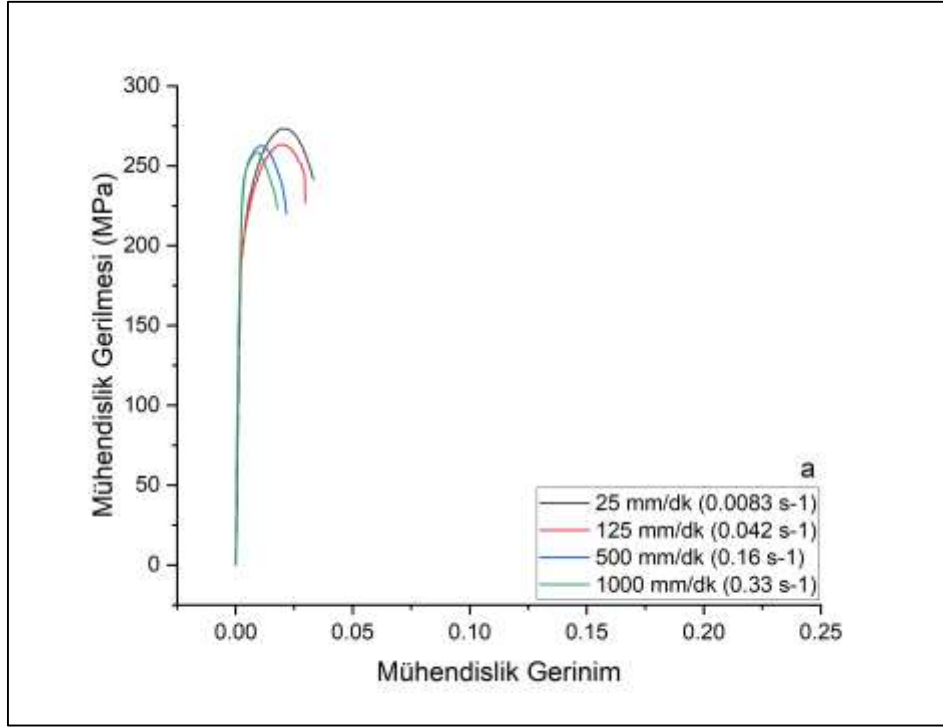
Şekil 6.3'deki a çentikli deney numunesine ait dört farklı deformasyon hızında çekme testinin mühendislik gerilme-mühendislik gerinim grafiği bulunmaktadır. 25 mm/dk'lık deformasyon hızında hem en yüksek mühendislik gerilme değeri olan 270 MPa 'a çıkıldığı hem de en yüksek mühendislik gerinim değeri olan 0.033'e ulaşıldığı görülmektedir. 500 ve 1000 mm/dk'lık deformasyon hızında yaklaşık olarak 240 MPa'lık en yüksek akma gerilmesi değerlerine ulaşıldığı ve bu şekilde plastik deformasyon bölgesine geçtiği görülmektedir.

Şekil 6.4'deki 4a çentikli deney numunesi incelendiğinde hem en yüksek akma gerilmesi değerlerine 244 MPa da hem de en yüksek mühendislik gerilmesi değeri olan 263 MPa 'a 1000 mm/dk'lık deformasyon hızında ulaşıldığı görülmektedir. En büyük mühendislik gerinimi 0.047'de 25 mm/dk'lık deformasyon hızında meydana gelmektedir.

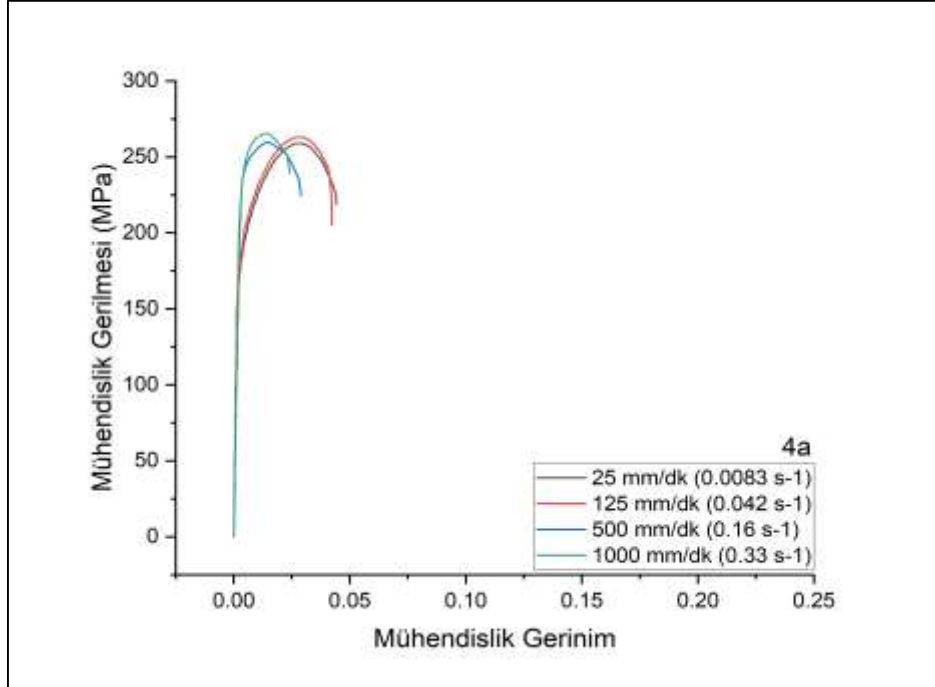
Şekil 6.5'deki 20a çentikli deney numunesine ait olan dört farklı deformasyon hızındaki mühendislik gerilim-mühendislik gerinim grafiğine ait eğriler yer almaktadır. En büyük akma gerilmesi değerine 1000 mm/dk'lık deformasyon hızıyla 221 MPa da ulaşılmıştır. En büyük mühendislik gerilmesi değerine 264 MPa da 125 mm/dk'lık deformasyon hızında ulaşılırken en büyük mühendislik gerinimine 0.075 gerinim değerinde ulaşıldığı görülmektedir.



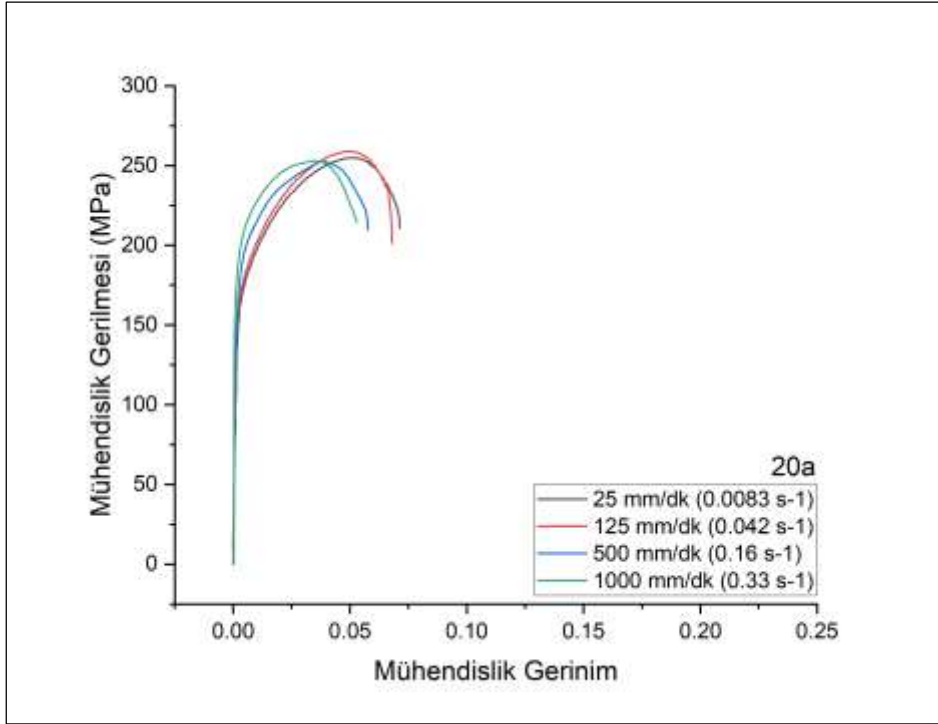
Şekil 6.2. Standart çekme numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri



Şekil 6.3. a çentikli deney numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri



Şekil 6.4. 4a çentikli deney numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri

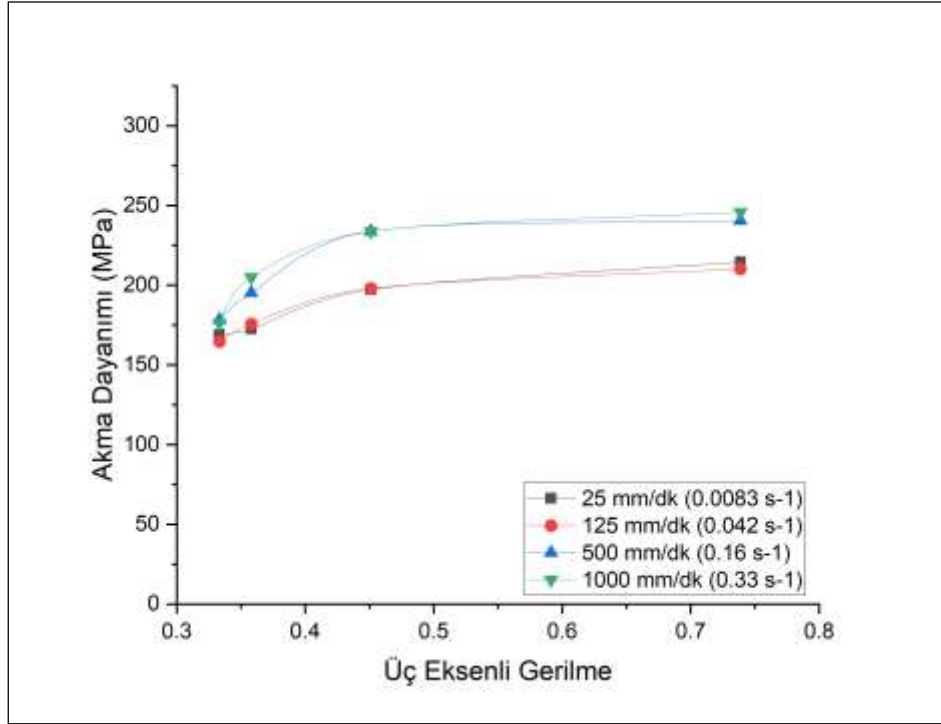


Şekil 6.5. 20a çentikli deney numunesine ait farklı çekme hızlarında elde edilmiş çekme eğrileri

Şekil 6.6'da farklı dört farklı deformasyon hızında üç eksenli gerilme değerlerine ait akma dayanımlarına ait eğriler incelenmektedir. Deformasyon hızı malzemenin akma dayanımı ve üç eksenli gerilme değerleri üzerinde oldukça önemli bir şekilde etki etmektedir. 25 mm/dk'lık deformasyon hızında sırasıyla üç eksenli gerilme değerleri 0.333, 0.358, 0.451, 0.738 olduğunda akma dayanımı değerleri de 163 MPa, 175 MPa, 187 MPa ve 212 MPa olmaktadır. 125 mm/dk'lık deformasyon hızında aynı üç eksenli gerilme değerlerinde sırasıyla 173 MPa, 175 MPa, 194 MPa ve 206 MPa olduğu 500 mm/dk'lık deformasyon hızında 176 MPa, 198 MPa, 227 MPa, 238 MPa iken 1000 mm/dk'lık deformasyon hızında ise 176 MPa, 212 MPa, 239 MPa, 246 MPa olduğu görülmektedir.

Akma dayanımları esas alındığında ise 0.333 değerindeki üç eksenli gerilme ait olan başlangıçtaki üç eksenli gerilme durumuna ait olan numuneye 500 mm/dk'lık deformasyon hızı uygulandığında 177 MPa'lık en yüksek başlangıç akma dayanımı değerinden başladığını 125 mm/dk'lık deformasyon hızında ise 167 MPa'lık en düşük başlangıç akma dayanımı değerinde olduğu görülmektedir. Dört farklı deformasyon hızındaki eğriler göz önüne alındığında en yüksek deformasyon hızındaki 100 mm/dk da en yüksek akma dayanımı değerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum numuneye ait olan malzemenin

yüksek deformasyon hızının etkisiyle daha kısa bir sürede daha yüksek değerde gerilmelere maruz kalarak daha büyük enerji absorbe ederek malzemenin mekanik bir özelliği olan akma dayanımının daha yüksek bir değere ulaşmasıyla gözlemlenebilmektedir.



Şekil 6.6. Farklı üç eksenli gerilme değerleri ve şekil değiştirme oranlarında akma dayanımının değişimi

Şekil 6.7'deki dört farklı deformasyon hızına göre numunenin gerçek birim şekil değiştirme hasar noktası değerleri ve üç eksenli gerilme değerlerinden oluşan eğriler incelenmektedir. Dört farklı deformasyon hızında numunenin üç eksenli gerilme değerleri 0.333'teyken her en yüksek gerçek birim şekil değiştirme hasar noktası değerine sahip olmaktadır. Bu üç eksenli gerilme değerleri sırasıyla 0.333, 0.358, 0.451, 0.738 olarak üç eksenli gerilme değeri artması ile gerçek birim şekil değiştirme hasar noktası değerlerinde azalma gerçekleşmektedir.

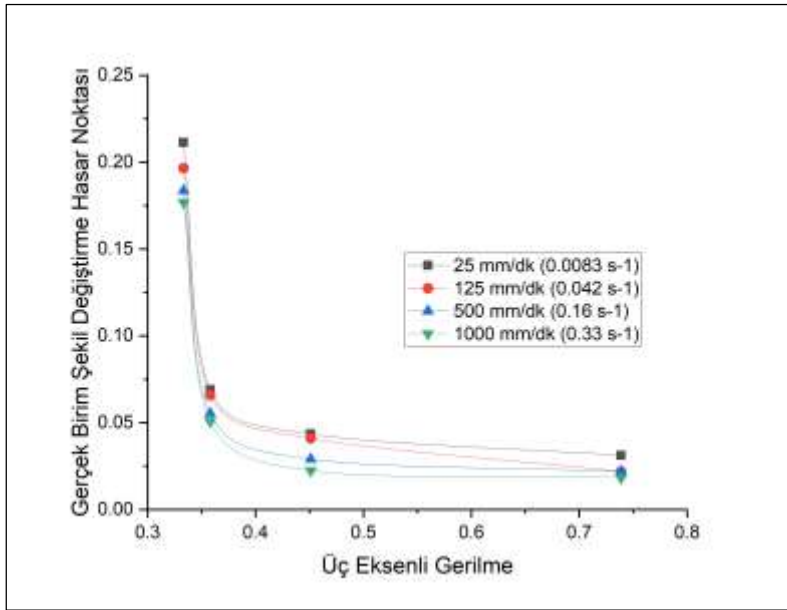
BŞD (birim şekil değiştirme) değerinin 50 mm ölçüm çizgisi çizilerek elde edildiği çekme eğrisi grafiklerinde deformasyon hızı arttıkça Şekil 6.7'de görüldüğü gibi malzemenin kırılma anındaki BŞD (birim şekil değiştirme) değerlerinde azalma meydana gelmektedir.

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (6.2)$$

Gerçek birim şekil değiştirme hasar noktasını elde ettiğimiz formül Eş.6.3'te yer almaktadır.

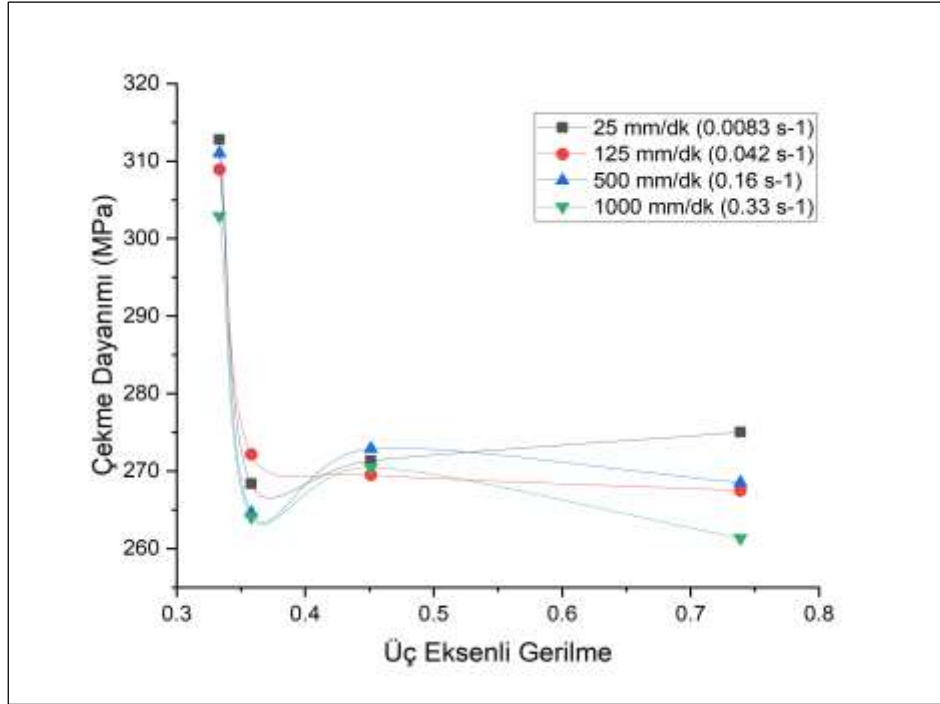
$$\varepsilon_f = \ln (A_0 / A_f) \quad (6.3)$$

Çekme testine ait dört farklı çentikteki numunelerin kopmaya ait uzama değerleri hesaplanırken kumpas ile kesit alanındaki değişiklikler ölçülürken Eş.6.3'teki denklemden yararlanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Üç eksenli gerilme değerlerine göre gerçek birim şekil değiştirme hasar noktası değerleri

Şekil 6.8'de üç eksenli gerilme değerlerine göre çekme dayanımı değerleri incelenmektedir. Dört farklı deformasyon hızında numunenin başlangıçtaki üç eksenli gerilim değerleri 0.33'teyken her çekme dayanımları 1000 mm/dk'lık çekme hızında 303 MPa olarak en düşük değerde yer alırken 25 mm/dk'lık çekme hızında 313 MPa olarak en yüksek değerdeki çekme dayanımı elde edildiği görülmektedir. Üç eksenli gerilim değerinin artmasıyla çekme dayanımlarının tüm deformasyon hızlarında 273 MPa ile 265 MPa aralığında yer alarak başlangıca göre azaldığı takip edilirken üç eksenli gerilmenin 0.450 olmasıyla çekme dayanımının 270 MPa ile 275 MPa aralığına yükseldiği görülmektedir. Üç eksenli gerilmenin daha da yükselmesiyle en baştaki durumda gözlemlendiği gibi en yüksek çekme dayanımı değerinin 25 mm/dk'lık çekme hızında elde edilirken en düşük çekme dayanımı değerinin 1000 mm/dk'lık çekme hızında elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.8. Üç eksenli gerilme değerlerine göre çekme dayanımı değerleri

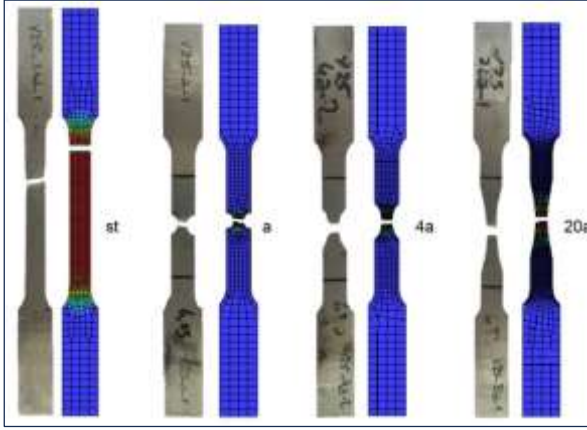
Eş.6.4'te verilen Johnson-Cook malzeme modeline ait parametreler Çizelge 6.2.'de verilmektedir. Johnson-Cook malzeme modeline ait parametrelerin elde edilmesiyle 6181A-T4 malzemesine ait malzeme modeli oluşturulmuştur.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (6.4)$$

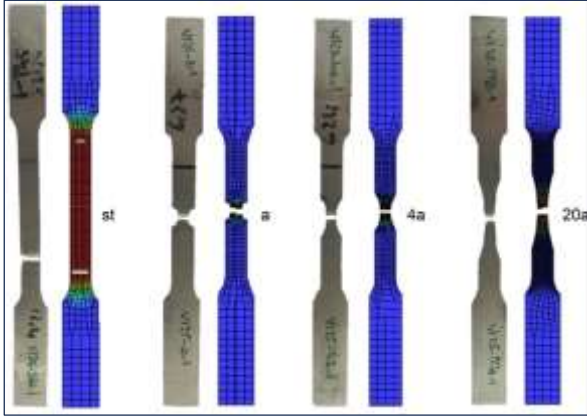
Çizelge 6.2. 6181A-T4 alüminyum malzemesinin Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeline ait malzeme sabitleri ve parametreleri

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
163.09	417.96	0.57968	0.00181	1
D1	D2	D3	D4	D5
0.0648346	2.00176	-7.73319	-0.0532084	0

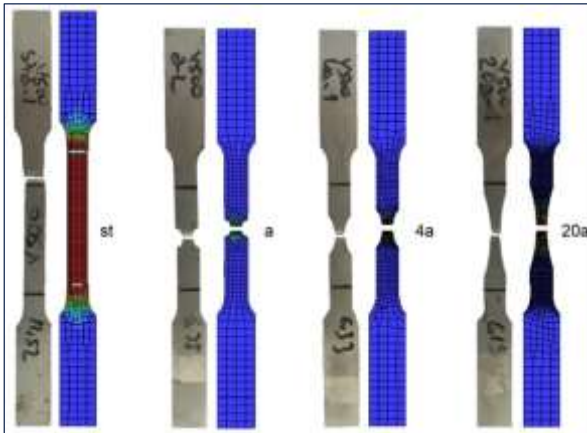
Oluşturulan Johnson-Cook malzeme modeli ile sonlu elemanlar analizinde simüle edilen sırasıyla 25mm/dk, 125mm/dk, 500mm/dk, 1000mm/dk çekme hızlarında simüle edilen numunelerin ve aynı çekme hızlarında deneysel olarak gerçekleşen çekme testi sonucuna göre numunelerin görselleri Resim 6.6 ile Resim 6.9 arasında yer almaktadır.



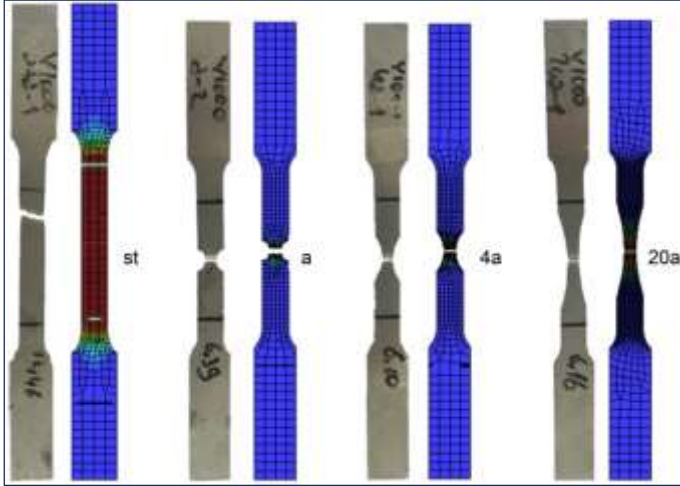
Resim 6.6. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları.



Resim 6.7. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları.



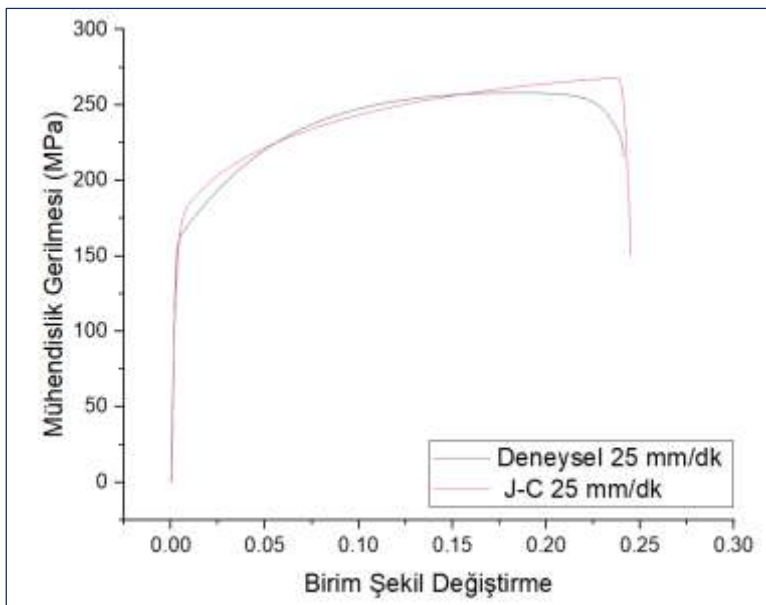
Resim 6.8. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları.



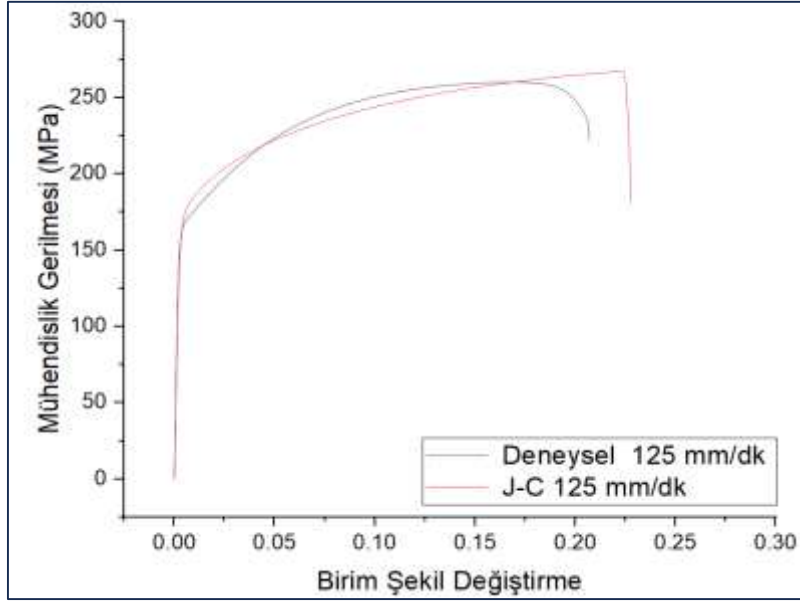
Resim 6.9. “Standart”, “a”, “4a”, “20a” çentikli numuneler için 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen deneyel ve simülasyon sonuçları.

Deneyel çekme testi sonuçları ve simülasyon çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması

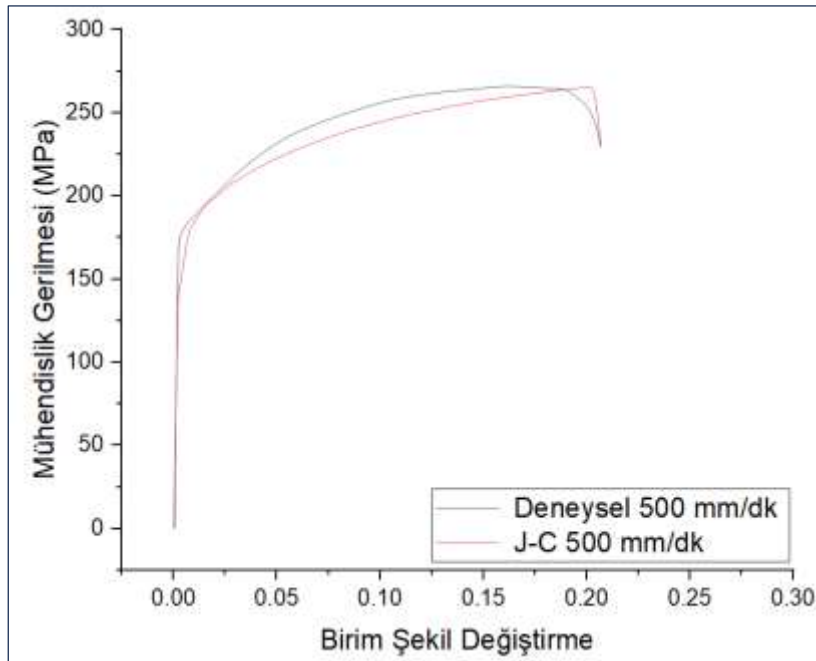
Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de ki grafiklerde sırasıyla dört farklı hızda gerçekleştirilen deneyel ve Johnson-Cook modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafikleri yer almaktadır. Eğriler incelendiğinde deneyel gerçekleştirilen ve Johnson-Cook malzeme modeline ait mühendislik gerilmesi ve birim şekil değiştirme sonuçlarının birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir.



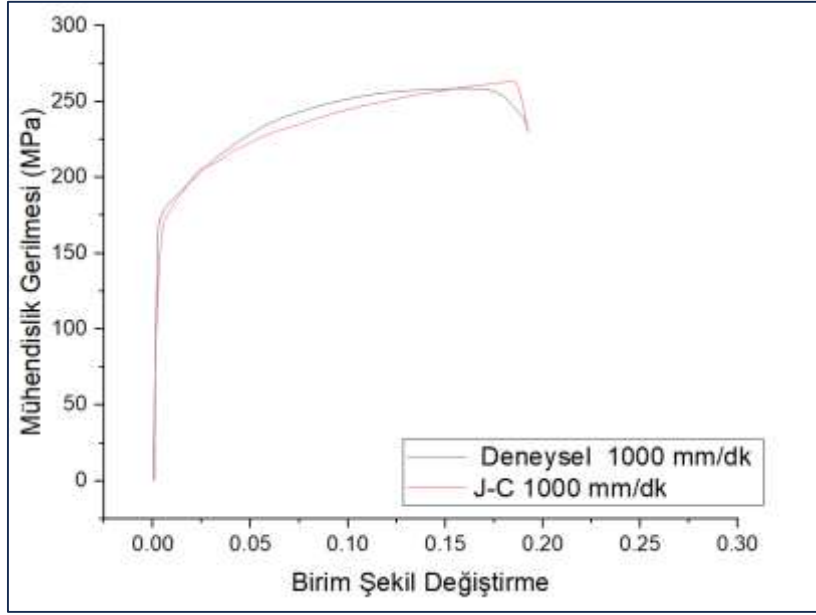
Şekil 6.9. “25 mm/dk” çekme hızındaki deneyel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 6.10. “125 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değişirme grafiği



Şekil 6.11. “500 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değişirme grafiği



Şekil 6.12. “1000 mm/dk” çekme hızındaki deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme testlerinin mühendislik gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği

Mekanik özelliklerin incelenmesi

Standart düz numunede dört farklı deformasyon hızının akma dayanımına, çekme dayanımına, pekleşme katsayısına, mukavemet katsayısına olan etkilerinin simülasyonda ve deneysel çekme testindeki sonuçlarının incelenmesine Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da yer verilmektedir.

Deformasyon hızı ve akma dayanımı ilişkisi (A)

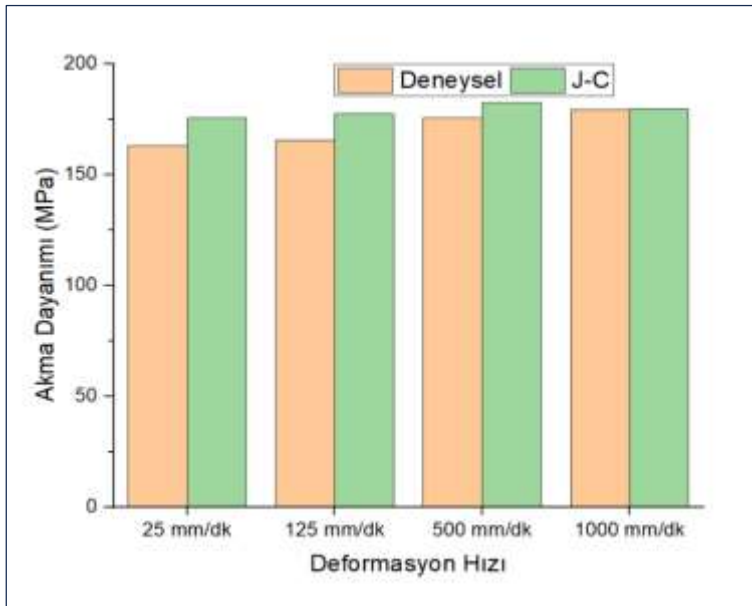
Akma dayanımı malzemenin uygulanan kuvvetlerinin artırılmasıyla şekil değiştirebilme yeteneğinin ve dayanıklılığının bir ölçüsü olmaktadır. Şekil 6.13’de deneysel sonuçlara ve sonlu elemanlar analizi ile yapılan çekme testine ait deformasyon hızı ve buna bağlı akma dayanımının değişimi bulunmaktadır.

Deformasyon hızı 25 mm/dk’dan başlayarak 1000 mm/dk olan deformasyon hızına kadar akma dayanımının deneysel değerlerinin 163 MPa ’dan başlayarak en fazla 177 MPa ‘a kadar arttığı gözlemlenmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile oluşturulan Johnson-Cook malzeme modeli ise 25 mm/dk’da 176 MPa ’dan başlayarak 500 mm/dk’da en yüksek değeri olan 192 MPa’a ulaştığını 1000 mm/dk’da ise 177 MPa ‘a düştüğünü gözlemlenmektedir.

1000 mm/dk da hem deneysel hem de Johnson-Cook malzeme modeline bağılı kalınarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizine ait akma dayanımında eşit değere ulaşılmıştır.

Şekil 6.13’de yer alan sütun grafiğı incelendiğinde dört farklı deformasyon hızındaki deneysel sonuçlara ait akma dayanımının deformasyon hızının değeri yükseldikçe arttığı anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra Johnson-Cook malzeme modeli kurularak simüle edilen çekme testine ait akma dayanımı değelerinin 25 mm/dk’dan 500 mm/dk’lık deformasyon hızına kadar 177 MPa’dan 186 MPa’a kadar yükseldiğı ardından 1000 mm/dk da ise 179 MPa’a düştüğü gözlemlenmektedir. Bu grafiğı göre deneysel çalışmaya ait deformasyon hızının artışıyla akma dayanımının da artışa geçerken Johnson-Cook malzeme modeline ait simüle edilen çalışmanın akma dayanımı değerin deformasyon hızıyla yükseldiğı fakat 500 mm/dk aşıldığında azalma görülmektedir.

Bu durum deneysel ve Johnson-Cook malzeme modeli kurularak simüle edilen çekme testinin uyumlu olduğunu göstermektedir.

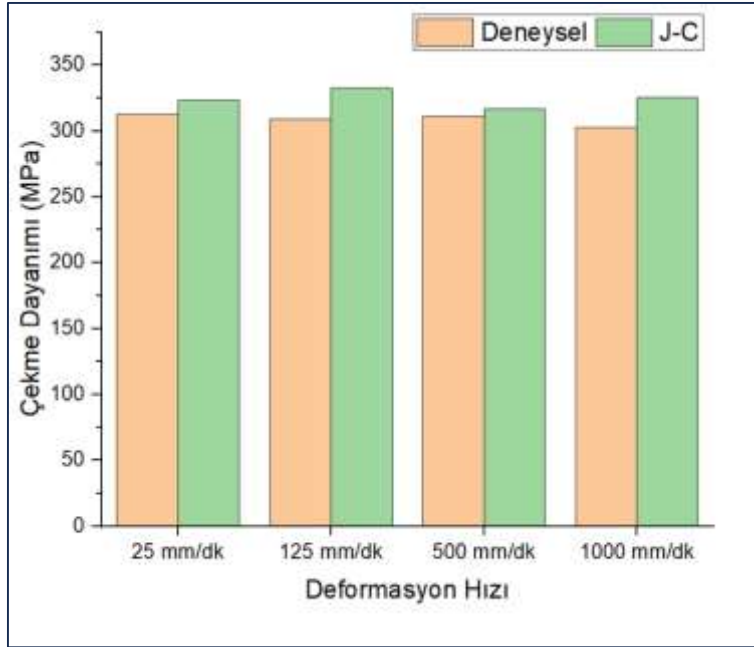


Şekil 6.13. Deformasyon hızı ile akma dayanımı grafiğı

Deformasyon hızı ile çekme dayanımı ilişkisi

Çekme dayanımı malzemenin kopma noktasına ulaşmadan önce ne kadar dayanıklı olduğunun bir ölçüsü olarak ifade edilmektedir.

Şekil 6.14’de değişen deformasyon hızına bağlı olarak çekme dayanımı değerinin değişimi görülmektedir. 25 mm/dk’da deneysel çekme dayanımının 322 MPa iken 125 mm/dk ve 500 mm/dk’da 315 MPa değerine düşerken 1000 mm/dk’da ise 311 MPa olduğu görülmektedir. Johnson-Cook malzeme modeline bağlı çekme dayanımı 25 mm/dk çekme hızında 325 MPa’ dan 125 mm/dk çekme hızında 343 MPa ‘a çıkmaktadır. Çekme hızı arttığında 500 mm/dk’da ise 315 MPa ‘a düşerken 1000 mm/dk’da 25 mm/dk’ lık hızda olduğu gibi 325 MPa ‘a çıkmaktadır. Çekme dayanımları incelendiğinde dört farklı deformasyon hızı değerinde de Johnson-Cook malzeme modeline ait çekme dayanımının deneysel değerlerden daha yüksek olduğu fakat yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.14. Deformasyon hızı ile çekme dayanımı grafiği

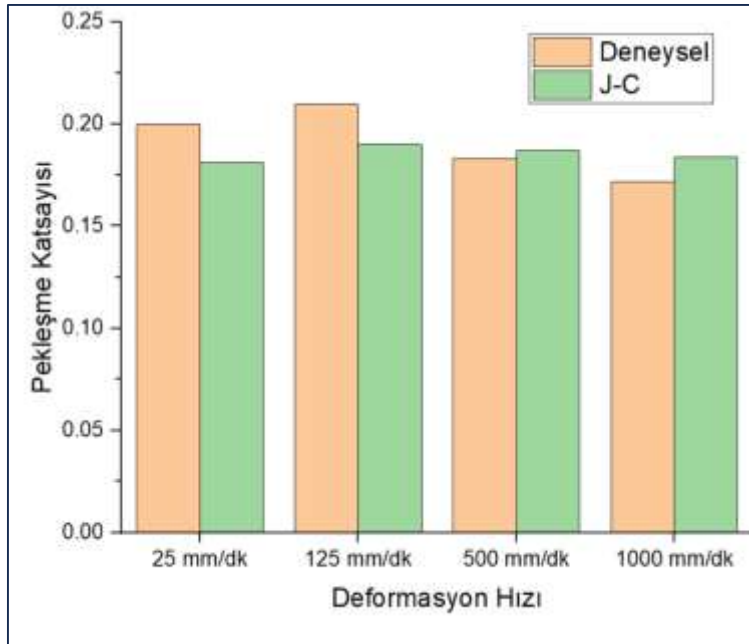
Deformasyon hızı ve pekleşme katsayısı ilişkisi (n)

Pekleşme katsayısı plastik deformasyon süreçlerinde malzemenin uğradığı deformasyonun ardından son durumda ne kadar dirençli olduğunu belirtmektedir. Bu kapsamda pekleşme katsayısı malzemelerin mekanik özelliklerinin anlaşılmasında ve tahmin edilmesinde önemlidir bunun yanı sıra pekleşme katsayısı ne kadar yüksekse malzeme plastik deformasyon sonrası o kadar dayanıklı hale gelmektedir.

Şekil 6.15’de değişen deformasyon hızına bağlı pekleşme katsayısı değerleri verilmektedir.

25 mm/dk’dan 125 mm/dk deformasyon hızına kadar deneysel çalışmanın Johnson-Cook malzeme modelinde 0.20 pekleşme katsayısı değerinde başlayarak 0.22’ye yükseldiğini bu süreçte J-C malzeme modelinin 0.18’den 0.19 a yükseldiği görülmektedir.

Deneysel çalışma ve Johnson-Cook malzeme modeli sonuçlarına göre pekleşme katsayısının 25 mm/dk’dan 1000 mm/dk’lık deformasyon hızına önce artıp sonra ise azaldığı gözlemlenmektedir.



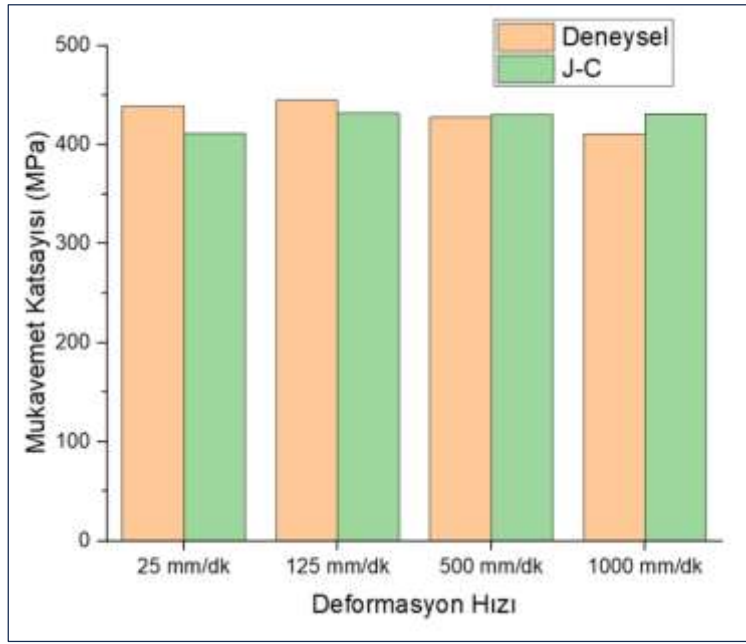
Şekil 6.15. Deformasyon hızı ile pekleşme katsayısı grafiği

Deformasyon hızı ve mukavemet katsayısı ilişkisi (b)

Mukavemet katsayısı malzemenin uğradığı gerilme altındaki dayanıklılığının bir ölçüsüdür ve malzemenin maruz kalabileceği maksimum gerilme değerini tahmin etmek için kullanılan bir terimdir.

Şekil 6.16’da deformasyon hızına bağlı değişen mukavemet katsayısı incelenmektedir.

Artan deformasyon hızı ile 25 mm/dk deformasyon hızından 125 mm/dk'ya deneysel çalışmanın çekme testinin sonuçlarının 442 MPa' dan 454 MPa 'a yükseldiği ardından 500 mm/dk'da 430 MPa 'a ardından da 401 MPa'a düştüğü görülmektedir. Johnson-Cook malzeme modeline bağlı mukavemet katsayısının 25 mm/dk deformasyon hızından 1000 mm/dk'ya kadar 416 MPa'dan 444 MPa'a yükseldiği ardından 430 MPa 'a devamında 442 MPa 'a olduğu gözlemlenmektedir.

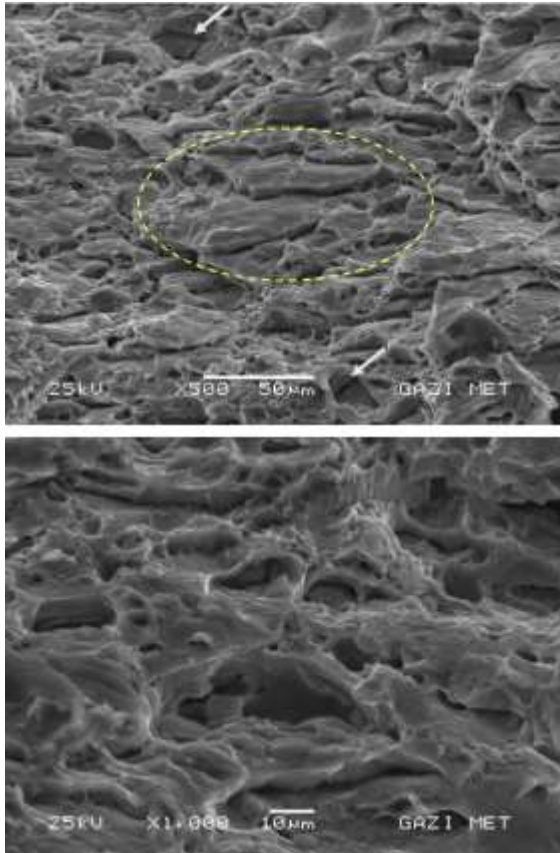


Şekil 6.16. Deformasyon hızı ile mukavemet katsayısı grafiği

7. KOPMA YÜZEYLERİNİN VE KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

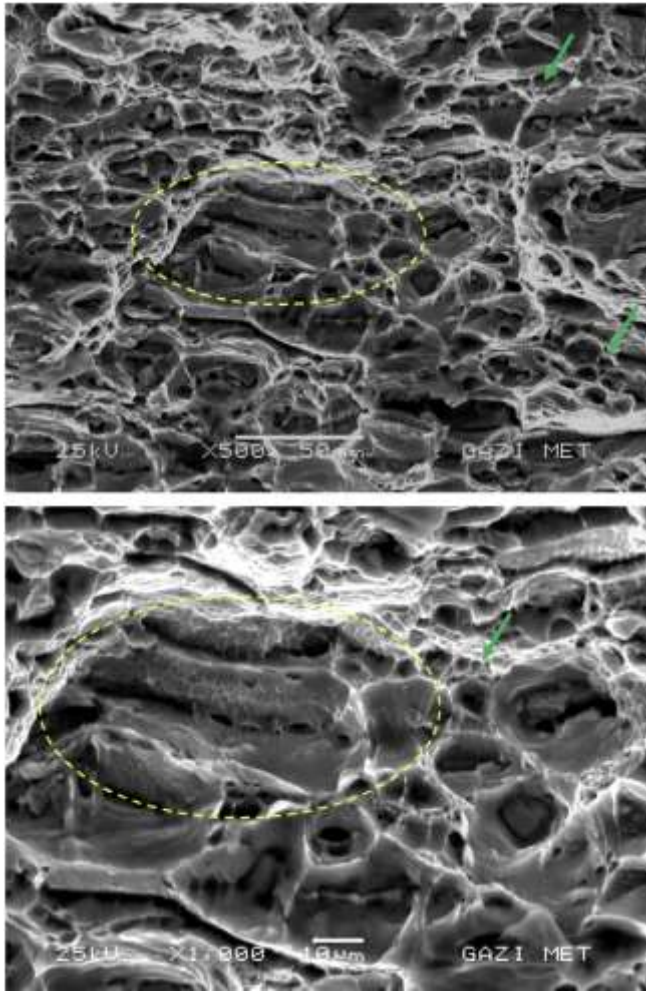
Kopma yüzeylerinin incelenmesi

Resim 7.1’de standart numunelerin 25 mm/dk’lık çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey SEM (taramalı elektron mikroskobu) morfolojileri verilmiştir. Resim 7.1’de 25 mm/dk çekme hızında en fazla süneklik değeri sağlamasına rağmen kopma morfolojilerinde süneklik oluşumuna neden olan dimple morfolojilerinin hadde etkisi yönünde oluşumuna neden olmuştur (sarı oval bölge). Çentikli numunelerden ve diğer çekme hızlarından bile en yüksek süneklik değeri veren bu numunede gri ok ile gösterilen bölgelerde derin dimple içlerinde tane içi kırılmaların varlığı görülebilir. Bunun muhtemel nedeni maksimum çekme gerileşeninden sonra deformasyon sertleşmesinin de sonucu olarak gerilme transferinin tane içinde yarıлма (klivaj) morfolojisine yol açmıştır.



Resim 7.1. Standart numunelerin 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

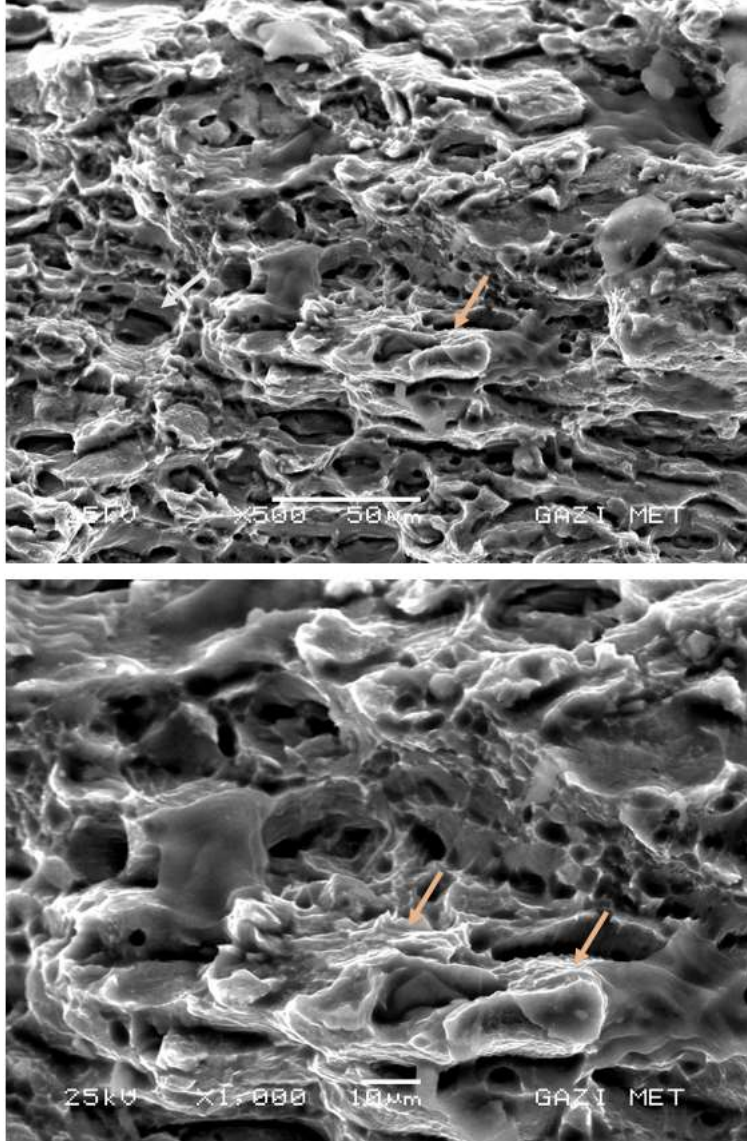
Resim 7.2’de standart numunenin 125 mm/dk çekme hızında yüksek süneklik değeri sağlanmış ve kopma morfolojilerinde süneklik oluşumuna neden olan dimple morfolojileri hem hadde etkisi yönünde hem de hadde yönünün etkisinden etkilenmeyen bölgelerde gerçekleşmiştir. Bu kopma yüzeyinde gerçekleşen tipik dimple alanları tane sınırlarına yakın kısımlarda yoğunlaşmıştır. Ayrıca yine bu kopma yüzeyinde yeşil ok ile gösterilen noktalarda mikro-boşlukların varlığı ile mikro-çatlakların oluşumuna hazır duruma geldiği anlaşılabılır. Bu oluşumla esasen yüksek süneklik gösteren malzemelerde maksimum çekme gerilmesinden sonra ortaya çıkar ki; erken dönem kırılmayı geciktiren bir durumdur.



Resim 7.2. Standart numunelerin 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.3’de 500 mm/dk çekme hızında aynı hızdaki diğer çentik standartlarına göre yüksek süneklik değeri sağlamanın nedeni kopma morfolojilerinde tane sınırlarına yakın yoğunlaşmış dimple morfolojileridir. Aynı zamanda bu oluşumlar, çekme yönünde tırtıklı (serrated) olarak uzamıştır (turuncu ok ile gösterilmiş). Bu kopma modunda, tipik sünek

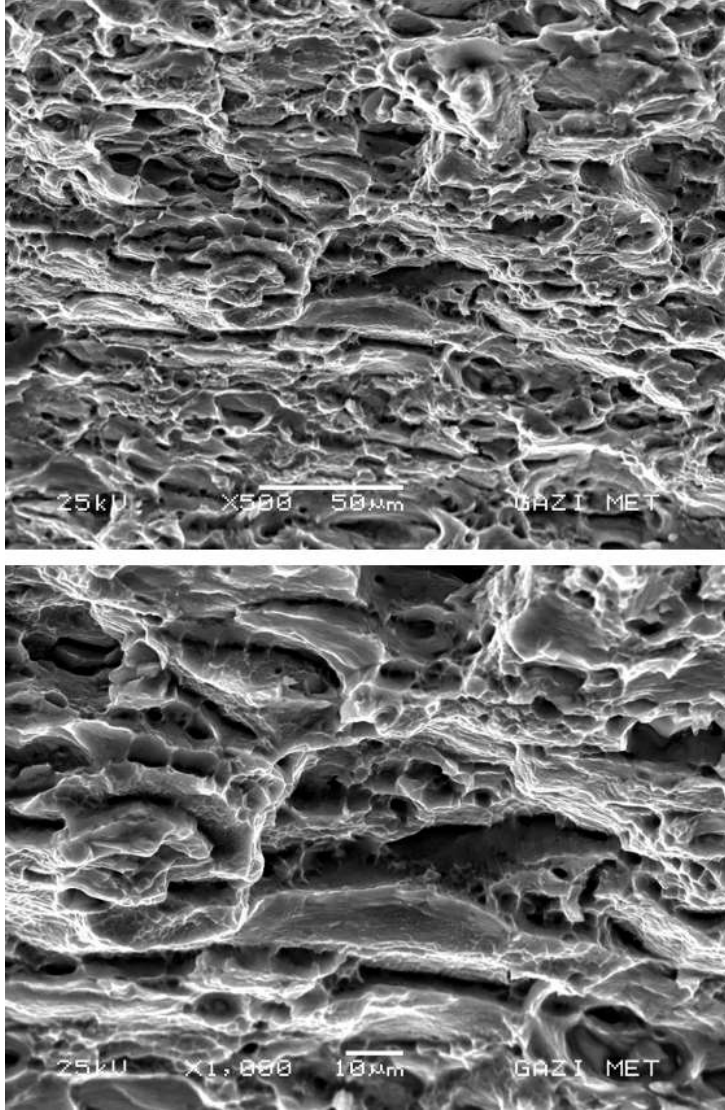
kopmanın hemen hemen tüm tipleri gerçekleşmiştir. Hem makro hem de mikro dimple alanların baskın olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda maksimum çekme gerilmesinden sonra gerilme transferinin deformasyon sertleşmesinden dolayı makro dimple diplerinde tane içi kırılmaların varlığı görülmektedir (gri ok ile gösterilmiştir).



Resim 7.3. Standart numunelerin 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.4'de 1000 mm/dk çekme hızında diğer çentik standartlarına göre halen fazla süneklik değeri sağlamasının sonucu olan kopma morfolojilerinde yoğunlaşmış mikro ve makro dimple alanları bulunmaktadır. Aynı zamanda çekme hızının artışı ile birlikte az miktarda klivaj tip kopma modları gerçekleşmiştir. Deformasyon hızının artışı ile tane içi kayma yerine muhtemel ikiz düzlemlerinde ve Alüminyum alaşımlarında da olduğu gibi

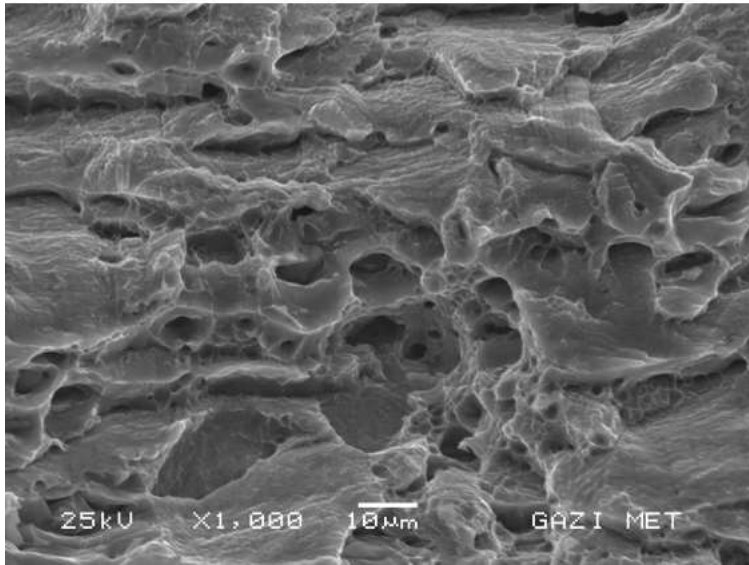
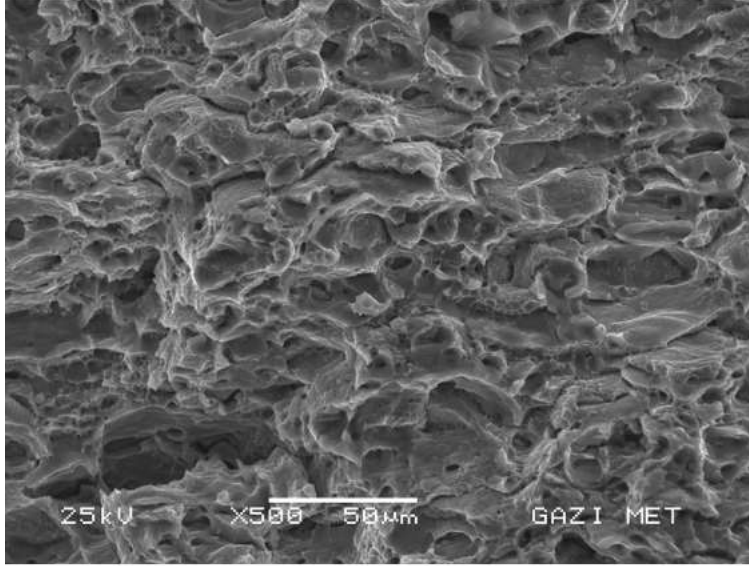
YMK kristal sisteminin atomik yoğunluğu düşük olan düzlemleri olan $\{110\}$ ve $\{100\}$ düzlem ailesinde klivaj kırılmalar beklenebilir. Çünkü deformasyon hızının artışı ile atomik dizilimi en yoğun düzlem olan $\{111\}$ düzlem ailesinde sünek kopmaya neden olan kritik kaydırma (dolayısı ile dislokasyon hareketi için) yeterli zaman verilmediğinde ikiz düzlemlerinde klivaj kopmaya neden olabilir.



Resim 7.4. Standart numunelerin 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.5’de, “20a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey SEM morfolojileri verilmiştir. Resim 7.5’de 25 mm/dk çekme hızında en fazla süneklik değeri sağlamasına rağmen kopma morfolojilerinde oldukça düşük oranda mikro dimple kopma modunun hakim

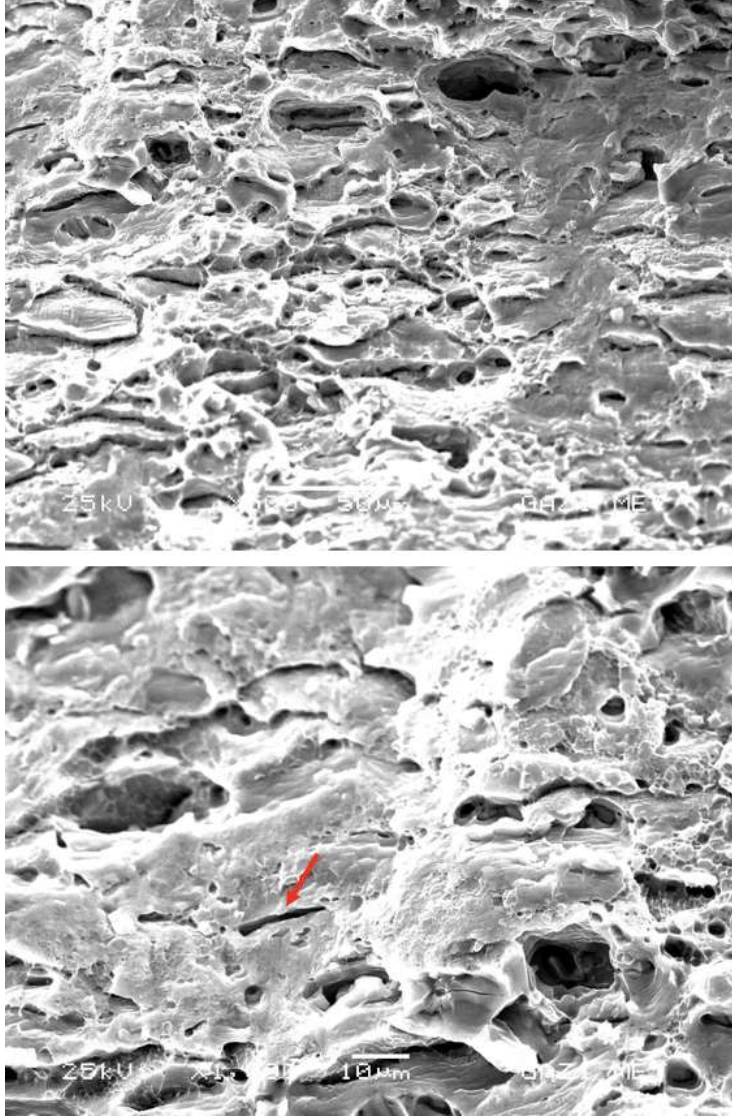
olması diğer çentik standartlarından daha düşük süneklik sergilemesine neden olmuştur. Bu kısıtlı süneklik alanları bölgesel ve mikro-dimple olarak ortaya çıkmıştır.



Resim 7.5. “20a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

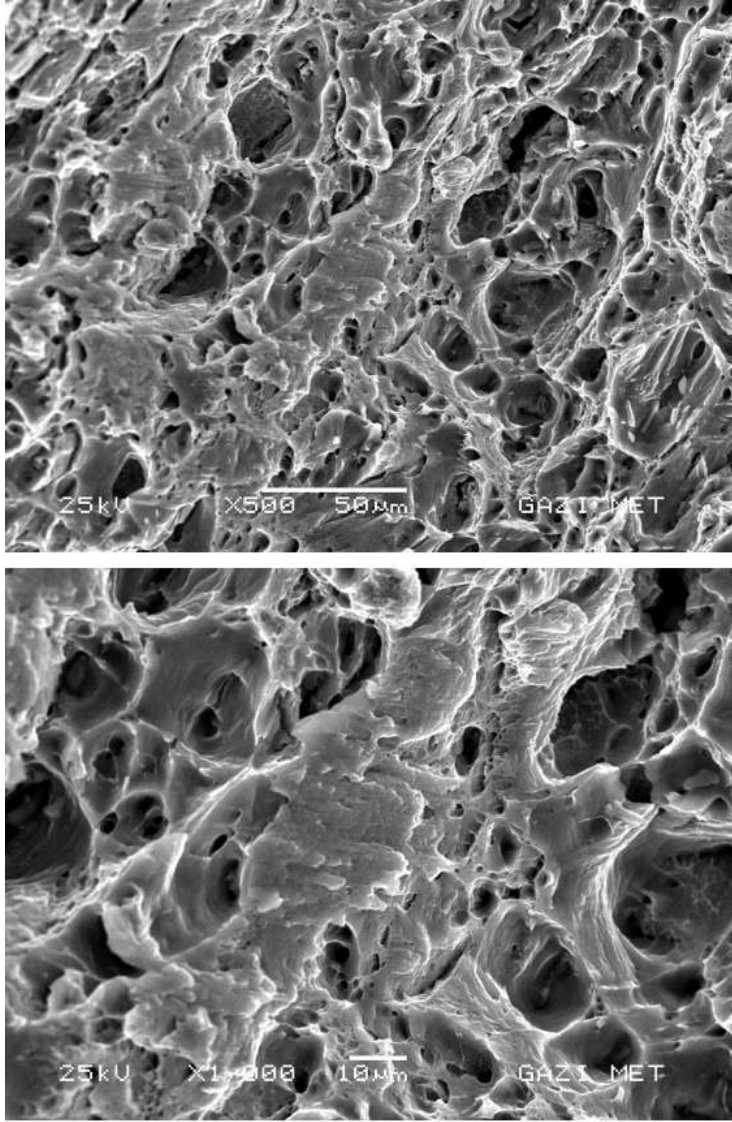
Resim 7.6’da “20a” çentik standardına sahip numunenin 125 mm/dk çekme hızında kısmen daha az süneklik değerlerine sahip olmasına neden olan derin makro-boşlukların çatlak ilerlemesine neden olduğu düşünülmektedir. Bu çekme hızında klivaj kopmalardan daha ziyade inklüzyonların neden olduğu ara yüzey ayrışmasının tane içindeki kayma başlamadan önceki hasarların başlaması neden olabilir. Beraberinde kırmızı ok ile gösterilen bölgede tane içi klivaj kırılmaların kesit boyunca devam etmemesi muhtemelen ara yüzey

ayrışmasının daha önce başlamasından dolayı toplam kopma enerjisinin klivaj kırılmanın tane içinde durmasına sebep olmuş olabilir.



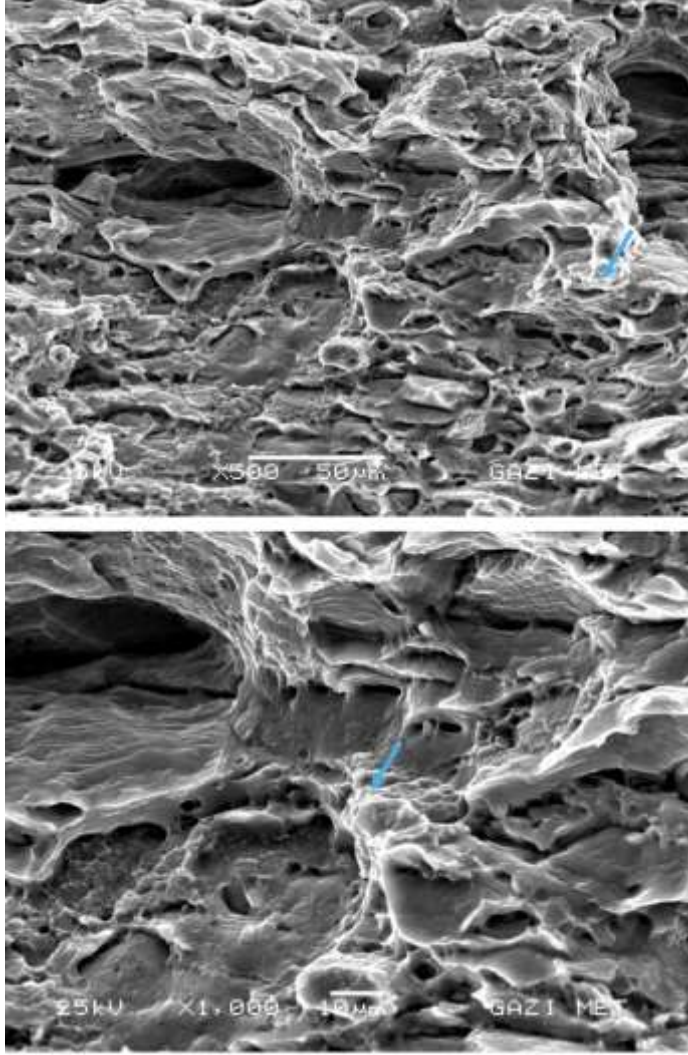
Resim 7.6. “20a” çentik standardına göre 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.7’de, “20a” çentik standardına sahip numunenin 500 mm/dk çekme hızında daha az süneklik değerlerine sahip olmasının nedeni kopma yüzeylerindeki yoğun derin ayrışma boşluklarıdır. Bu boşluklanma morfolojileri her ne kadar dimple oluşumlarına benzer olsa bile bu derin oyukların içinde klivaj kopma durumlarının varlığı gerçekleşmiştir. Çekme hızının artışı ile birlikte yüzey merkezli kübik (YMK) kristal sistemlerde yoğun kayma düzlemleri olan (111) farklı düzlem ailesinde erken zamanda deformasyon pekleşmesinden dolayı klivaj kırılmayı {111} düzlem ailesinde gerçekleştirmiş olabilir.



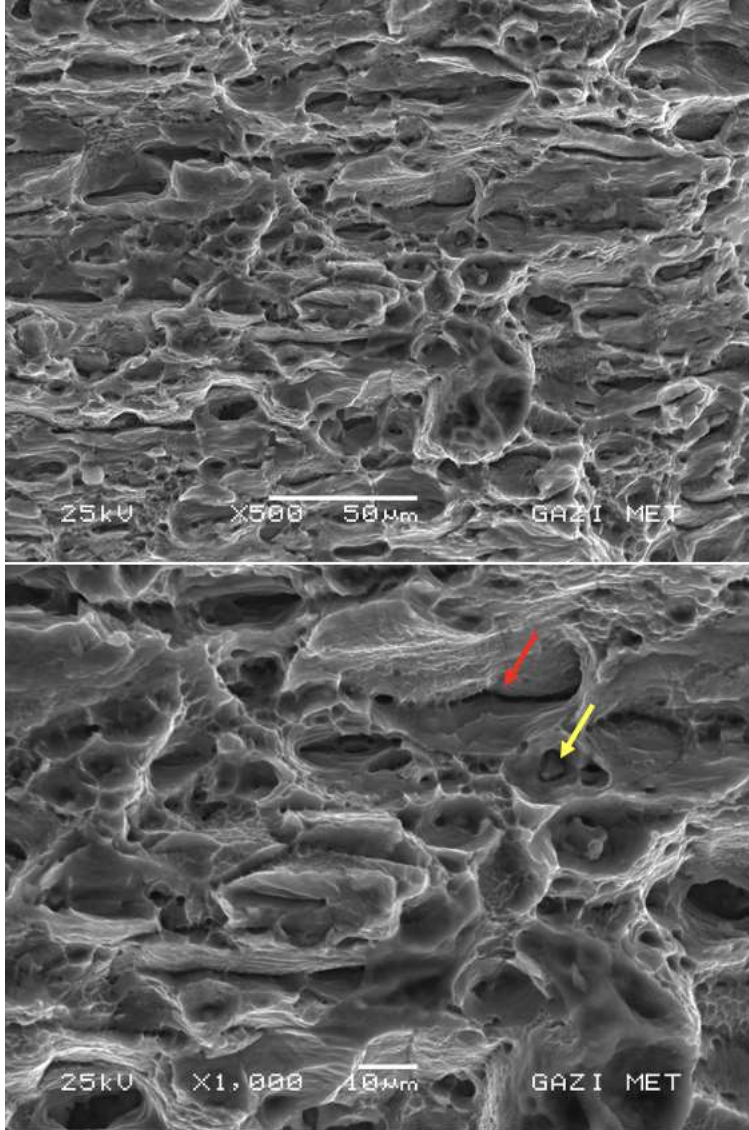
Resim 7.7. “20a” çentik standardına göre 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.8’de, “20a” çentik standardına sahip numunenin 1000 mm/dk çekme hızında daha az süneklik değerlerine sahip olmasına rağmen halen tane sınırlarına yakın bölgelerde mikro dimple kopma varlığı belirgindir (mavi ok ile gösterilen bölgeler). Bu mikro dimple alanlar bu çentik standardında etkili süneklik sergilemeyecek kadar azdır. Bu çekme hızlarında oldukça makro ölçüdeki oyukların yüksek çekme hızında tane sınırlarından ayrılarak tanelerin bütünü ile koptuğu düşünülmektedir. Çok yüksek çekme hızlarında kritik kaydırma gerilmesinin tane içinden tane sınırlarına transfer olması durumunda tane sınırından ayrışma söz konusu olabilir ve süneklik değerinin düşük çıkması ile sonuçlanabilir.



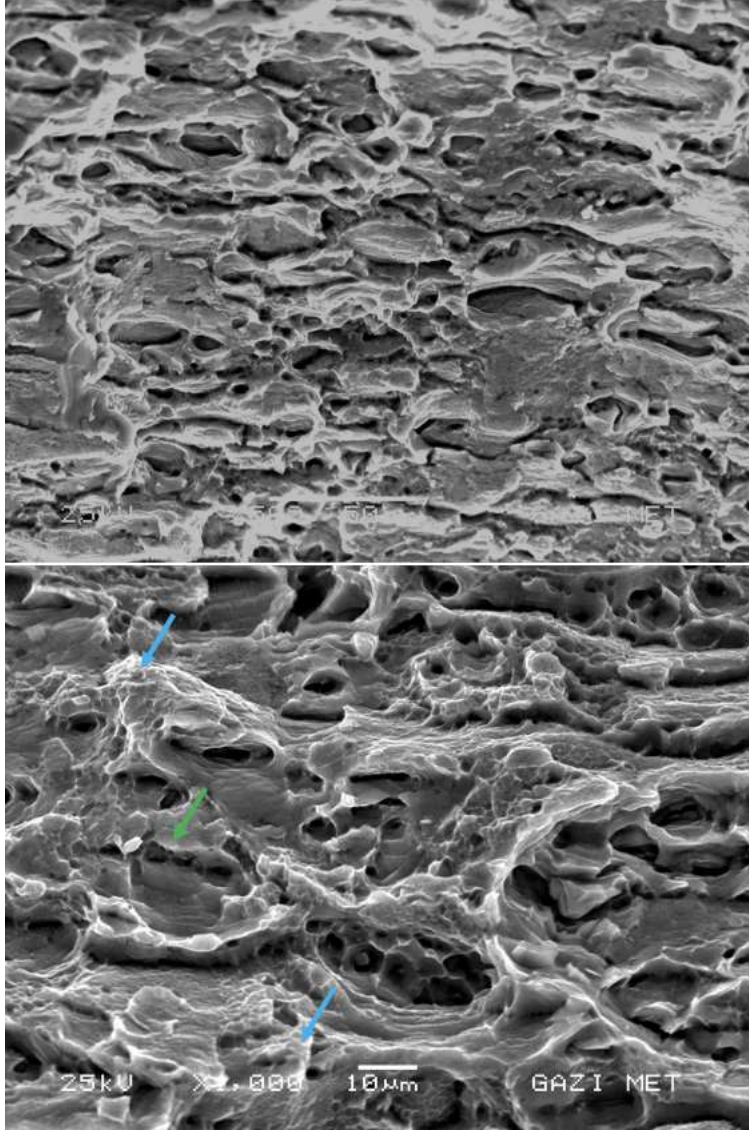
Resim 7.8. “20a” çentik standardına göre 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.9’da “4a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey SEM morfolojileri verilmiştir. Resim 7.9’da en fazla süneklik değeri sağlanan 25 mm/dk çekme hızında kopma morfolojilerinde kısmen sık ve geniş alana yayılmış makro dimple kopma modu hakimdir. Yine bu kopma yüzeylerinde derin dimple bölgelerinin içlerinde inklüzyon kalıntılarının varlığı görülebilir bunlar x1000 SEM görüntüsünde sarı ok ile işaretlenmiştir. Ayrıca kristalin farklı düzlemleri üzerindeki klivaj yarılmalarının varlığı da kırmızı ok ile işaretlenmiştir. Bu oluşumlar sünekliği bir miktar kısıtlamış olabilir.



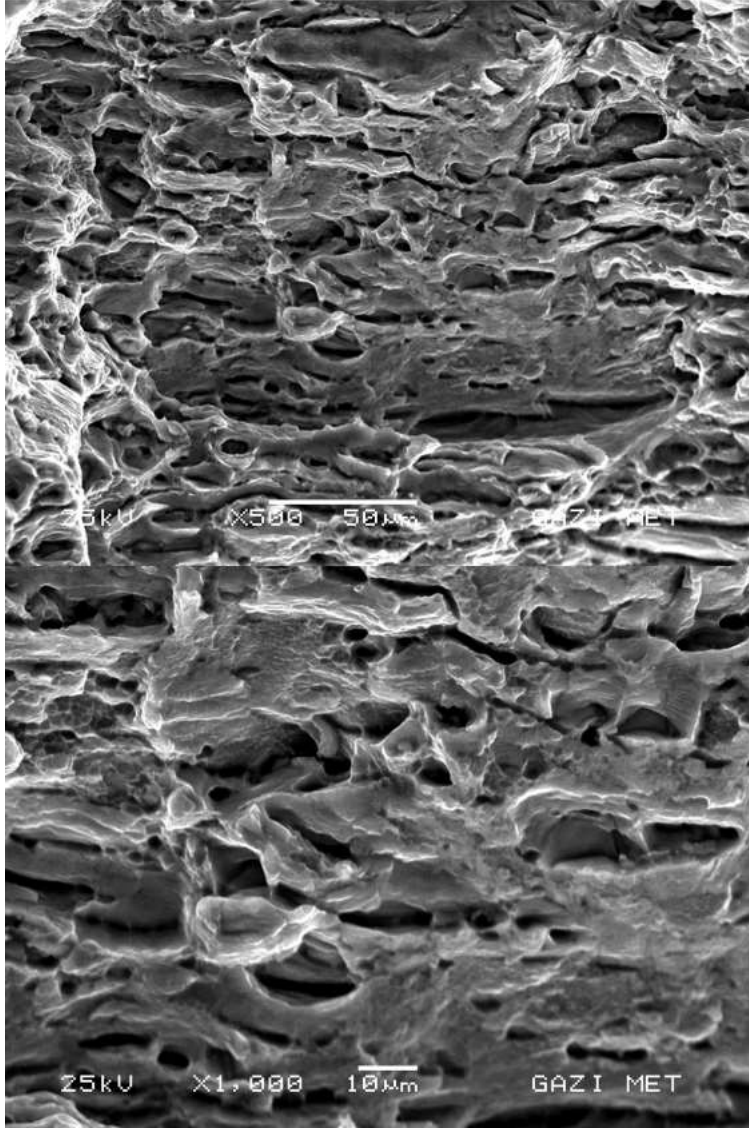
Resim 7.9. “4a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.10’da “4a” çentik standardına sahip numunenin 125 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilen çekme testi sonrası farklı büyütme oranlarında SEM kopma yüzeyi verilmiştir. Çekme hızı 25 mm/dk’lık çekme hızına göre artırıldığında bile süneklik değerinin benzerlik sağladığı bilinmektedir. Bu numunelerde SEM kopma yüzeylerinde derin olmayan geniş dimple kopmalar ile tane sınırlarına yakın kısımlarda mikro dimple kopmalar görülmektedir ve mavi ok ile gösterilmiştir. Bununla birlikte, yeşil ok ile gösterilen noktalarda mikro-boşlukların varlığı ile mikro-çatlakların oluşumuna hazır duruma geldiği anlaşılabılır. Bu durumun gerçekleşmesi sünekliklerin bu çekme hızında bile halen yüksek kalmasına bir delil niteliğindedir.



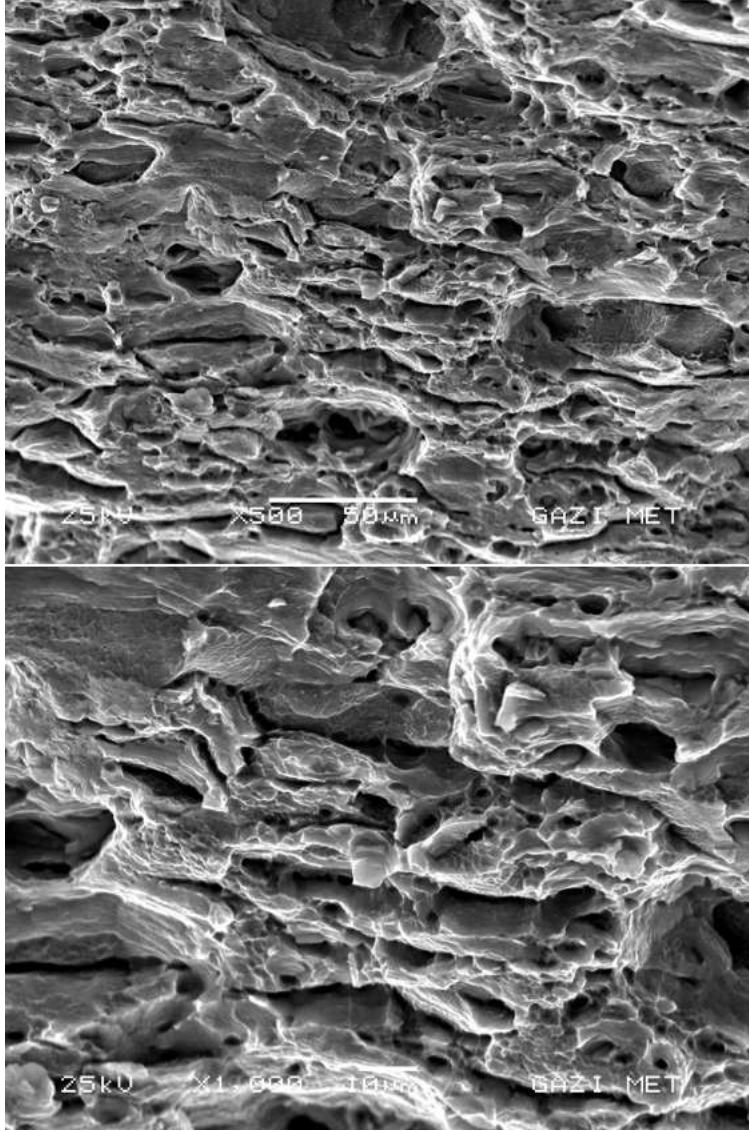
Resim 7.10. “4a” çentik standardına göre 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.11’de “4a” çentik standardına sahip numunenin 500 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilen çekme testi sonrası farklı büyütme oranlarında SEM kopma yüzeyi verilmiştir. Bu çekme hızında süneklik değerlerinin önemli ölçüde azalmasına neden olan tane içi kırılmaların baskın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte dimple kopma modlarının bölgeselleştiği ve daha geniş alanlara yayıldığı anlaşılmıştır. Çatlak ilerlemesi sadece tane içi değil, taneler arası dimple olmayan ayrışma şeklinde oluşmuştur. Bu çekme hızında tane içi kayma yerine muhtemelen ikizlenme sınırları boyunca klivaj oluşumları gerçekleşmiştir.



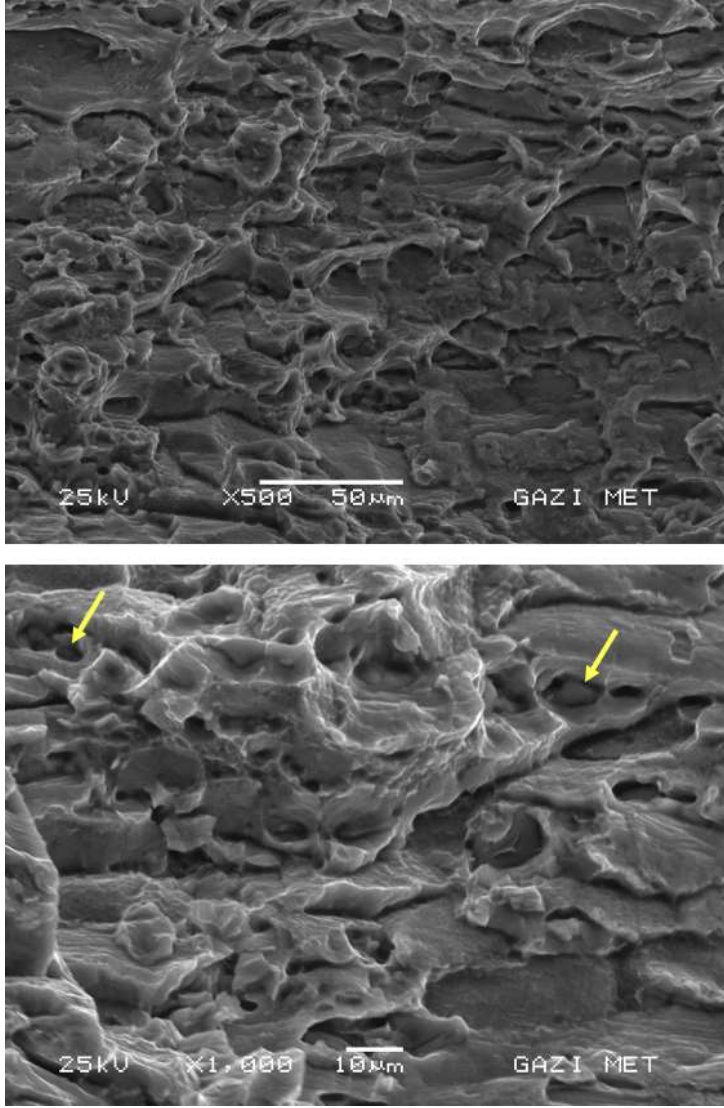
Resim 7.11. “4a” çentik standardına göre 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.12’de “4a” çentik standardına sahip numunenin 1000 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilen çekme testi sonrası farklı büyütme oranlarında SEM kopma yüzeyi verilmiştir. Bu çentik standardında, yüksek çekme hızlarında önemli ölçüde tane içi kopmaların ve dolayısıyla klivaj kopma modların oluşumu gerçekleşmiştir. Klivaj kopma süneklik değerlerinin azalmasına yol açmaktadır. Kısım de olsa bölgeselleşmiş dimple kopma alanları ise oldukça sık ve mikro çaplara sahiptir. Bu oluşum süneklik değerlerine ciddi bir katkı sağlamaz.



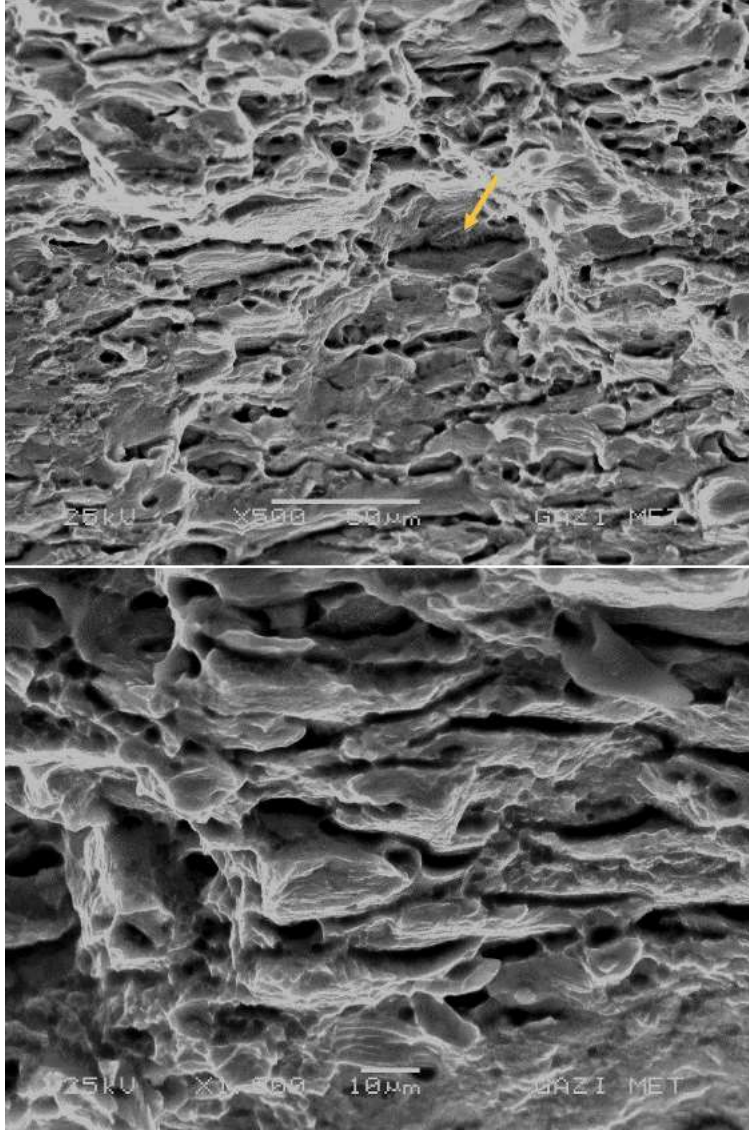
Resim 7.12. “4a” çentik standardına göre 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.13’de “a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey SEM morfolojileri verilmiştir. Resim 7.13’de en fazla süneklik değeri sağlanan 25 mm/dk çekme hızında kopma morfolojilerinde derin dimple (çukurlu;gamzeli) kopma modunun hakim olduğu görülebilir. Aynı zamanda bu dimple modlarının haddeleme hattı yönünde uzadığı görülebilir. Ayrıca x1000 büyütme oranında ayrıntılı SEM kopma yüzeyi incelemesinde sarı okla gösterilen yerlerde inklüzyonların varlığı görülmüştür. Ancak bu inklüzyonların süneklik değerlerine önemli bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Çünkü klivaj (yarılma; ayrışma) kırılmaya neden olmamıştır.



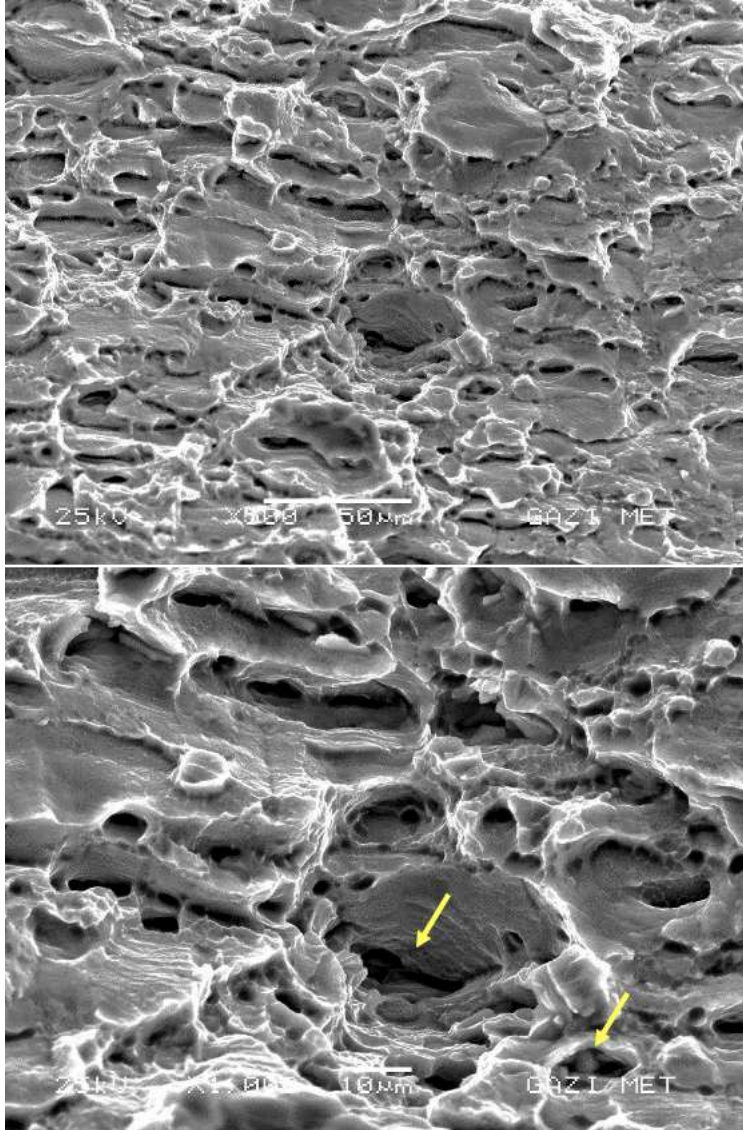
Resim 7.13. “a” çentik standardına göre 25 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.14’de “a” çentik standardına sahip numunenin 125 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilen çekme testi sonrası farklı büyütme oranlarında SEM kopma yüzeyi verilmiştir. Bu çekme hızında süneklik değerinin 25 mm/dk’lık çekme hızına göre kısmen düşük çıktığı bilinmektedir. Çekme hızının artışı ile SEM kopma yüzeylerinde dimple kopma modları kısmen azalarak lokal bölgelerde görülmüştür. Aynı zamanda tane içinde farklı düzlemler yönünde muhtemelen klivaj tipi ayrışmaların olduğu düşünülmektedir ve x500 büyütmeli SEM üzerinde turuncu ok ile işaretlenmiştir. X1000 büyütmeli SEM kopma yüzeylerinde lokal dimple kopma haricinde muhtemelen tane sınırı ayrışması gerçekleştiği düşünülen bölgeler bulunmaktadır.



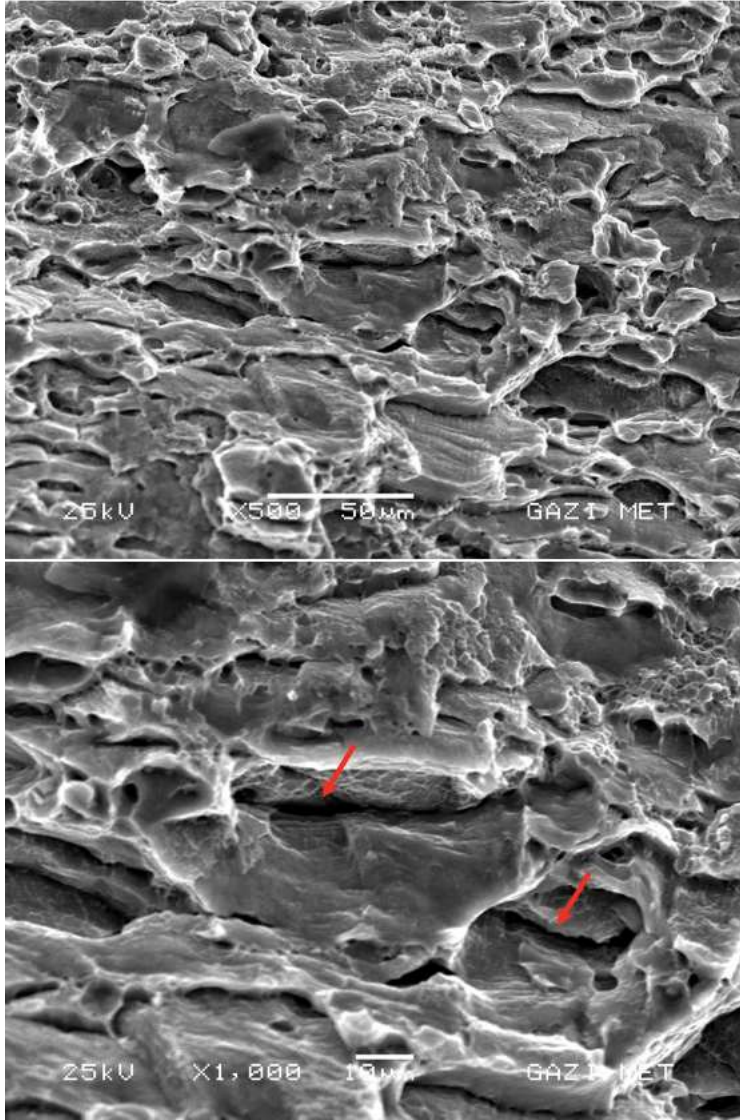
Resim 7.14. “a” çentik standardına göre 125 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.15’de “a” çentik standardına sahip numunenin 500 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilen çekme testi sonrası farklı büyütme oranlarında SEM kopma yüzeyi verilmiştir. Bu kopma yüzeylerinden çekme hızının artışına bağlı olarak dimple kopma modlarının daha lokalize ve daha az oranda olduğu açıkça görülebilir. Bunun dışında kalan diğer kopma modlarının klivaj olması nedeniyle süneklik değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. X1000 büyütmeli SEM görüntüsünde derin kopma bölgelerinin içinde yine inklüzyon varlığı dikkat çekmektedir (sarı ok ile). Muhtemelen bu inklüzyonların varlığı erken zamanda kırılma hasarının başlangıcı olan mikro-boşlukların oluşumuna yol açmıştır.



Resim 7.15. “a” çentik standardına göre 500 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Resim 7.16’da “a” çentik standardına sahip numunenin en yüksek çekme hızı olan 1000 mm/dk’lık çekme hızında gerçekleştirilen çekme testi sonrası farklı büyütme oranlarında ki SEM kopma yüzeyi verilmiştir. Kopma yüzeylerinden anlaşıyor ki; yüksek çekme hızlarının dimple kopma alanlarını ciddi oranda azalttığı anlaşılmıştır. Bu SEM görüntülerinde SEM görüntü yüzeyinde tipik klivaj modunun belirgin olmadığı ancak kırmızı ok ile gösterilen yerlerde klivaj derinliğinin tane içinde farklı düzlemlere yayıldığı anlaşılmaktadır. Bu nedenler bu çekme hızında süneklik değerlerinin daha düşük olmasıyla sonuçlanmasına yol açmıştır.



Resim 7.16. “a” çentik standardına göre 1000 mm/dk çekme hızlarında gerçekleştirilmiş çekme testi sonrası elde edilen farklı büyütme oranlarında kopma yüzey morfolojileri.

Sonuç olarak, numunelerin kopma yüzey morfolojileri hem çentik faktöründen hem de çekme hızından etkilenerek farklı morfolojilere sahip oldukları görülmüştür. Ancak kopma morfolojilerinin çekme hızına daha fazla bağlı olduğu söylenebilir. Üç eksenlilik değeri 20a olduğunda süneklik değerleri daha az çıkmasına rağmen hemen hemen tüm numunelerin kopma yüzeylerinde hem mikro hem de makro süneklik kopma morfolojileri daha çok hakimdir. Bu aynı zamanda bu çalışmada kullanılan alüminyum alaşımından dolayıdır. Alüminyum gibi YMK (yüzey merkezli kübik) kristal yapılarıdaki malzemelerde sünek kopma davranışı gerçekleşebilir. Bu YMK sistemlerinde hem atomik paketlenme hem de atomik düzlem yoğunlukları çok fazladır. Dolayısı ile yüksek çekme hızlarında bile halen kayma plastik deformasyon mekanizmasının aktif olduğu söylenebilir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Bu tez çalışmasında 6181A-T4 alüminyum alaşımlı sac metal malzemesinin Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeli parametrelerinin belirlenmesi ve tahmin performansının değerlendirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda sırasıyla aşağıda yer verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- LS-DYNA analiz yazılımı sayesinde 6181A-T4 alüminyum alaşımlı sac metal malzemesinin belirlenen çekme testi hızlarında (25 mm/dk, 125 mm/dk, 500 mm/dk, 1000 mm/dk) mekanik özelliklerinin deneysel çalışma ile karşılaştırılarak daha yüksek tutarlılık ile daha doğru benzetim sonuçlarına ulaşılması sağlanmıştır. Johnson-Cook malzeme modeline ait pekleşme parametreleri analitik hesaplamalarla elde edilirken Johnson-Cook hasar modeline ait parametreler LS-OPT yazılımı sayesinde nümerik olarak elde edilmiştir.
- 6181A-T4 alüminyum alaşımlı yaşlandırma ısısal işlemi görmüş sac malzemesine ait analitik ve nümerik hesaplamalarla değerleri bulunan pekleşme parametrelerinin A, B, n, C ve hasar parametrelerinin D_1, D_2, D_3, D_4 değerleri Johnson-Cook malzeme modeline yerleştirildiğinde oluşan malzeme modeli Eş.8.1'de ve hasar modeli Eş.8.2'de yer almaktadır.

Johnson-Cook Malzeme Modeli

$$\sigma = (163.09 + 417.96\varepsilon^\eta)(1 + 0.00181 \ln \varepsilon^*)(1 - T^*)^m \quad (8.1)$$

Johnson-Cook Hasar Modeli

$$\varepsilon_f = [0.169 + 2.053 \exp(-7.125 \eta)] [1 - 0.053 \ln \varepsilon^*] \quad (8.2)$$

- Çekme testlerinde artan üç eksenli gerilme değerleri incelendiğinde birim şekil değiştirme hasar noktası değerlerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmadaki gerçek birim şekil değiştirme hasar noktasının üç eksenli gerilim değerinin artmasıyla

azalmasının nedeni yükselen deformasyon hızlarında malzemenin daha kısa birim zamanda daha hızlı hasara uğramasıdır. Bu nedenle bölgesel gerilmelerin yoğunlaşmasıyla beklenen deformasyon süresinden çok daha erken bir zamanda gerçekleşmesi, yükselen deformasyon hızlarında malzemenin daha kısa sürede çok daha yoğun bir şekilde enerjiye maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Ardından iç yapıdaki deformasyon mekanizmalarını etkilemesiyle birim şekil değiştirme hasar noktası değerlerini öne çekmesiyle açıklanmaktadır.

- Çalışmadaki artan deformasyon oranları dikkate alındığında (0.0083 s^{-1} , 0.042 s^{-1} , 0.16 s^{-1} , 0.33 s^{-1}) çekme numunelerine (standart, 20a, 4a, a,) ait mühendislik gerilim-mühendislik gerinim eğrileri incelendiğinde en yüksek değerdeki gerinim değerine tüm numunelerde daima 25 mm/dk'lık çekme hızında ulaşıldığı görülmektedir.
- Sırasıyla 0.0083 s^{-1} , 0.042 s^{-1} , 0.16 s^{-1} , 0.33 s^{-1} olarak artan deformasyon oranlarında üç eksenli gerilmenin azaldığı gerilme değerlerinde ise artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Standart düz numunede dört farklı deformasyon hızı için simülasyon ve deneysel çekme testi sonuçlarının karşılaştırılmasından yapılan çıkarım ile artan deformasyon hızı ile beraber akma dayanımının arttığını gözlemlenmiştir.
- Çalışmadaki çekme hızının 25 mm/dk'dan 500 mm/dk'ya yükselmesiyle çekme dayanımının deneysel çalışmada aynı kalırken Johnson-Cook malzeme modeline ait sonuçlarda ise önce artıp sonra azaldığı buna rağmen tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.
- Pekleşme katsayısının artan deformasyon hızıyla beraber hem deneysel çalışmada hem de Johnson-Cook malzeme modeli sonuçlarına göre önce artıp sonra azaldığı ve değişimlerin her iki durumda da uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Yükselen deformasyon hızıyla beraber mukavemet katsayısındaki değişim incelendiğinde 25 mm/dk'lık deformasyon hızından 1000 mm/dk'lık deformasyon hızına çıkıldığında deneysel çalışmada önce arttığı sonra azaldığı takip edilirken Johnson-Cook malzeme modeline ait sonuçlarda önce arttığı sonra stabil olarak kendi içinde daha tutarlı kaldığı gözlemlenmiştir.
- Dört farklı çekme hızına ait hem standart hem çentikli numuneler incelendiğinde üç eksenli gerilme değerinin artmasıyla akma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde üç eksenli gerilme değerleri incelendiğinde çekme hızı arttıkça akma dayanımının da daha yüksek olduğu görülmüştür.

- Gerçek birim şekil değiştirme hasar noktası değerinin (ϵ_f) üç eksenli gerilme değeri arttıkça daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı çentik faktörüne sahip numuneler incelendiğinde birim zamanda daha yüksek hızda çekilen numuneler daha erken hasar noktasına ulaşmıştır.
- “20a” çentikli numunelere uygulanan çekme hızı arttıkça kritik kayma gerilmesinin tane içinden tane sınırlarına transfer olmasıyla tane sınırlarında ayrışma olmaktadır. Böylece çekme hızı arttıkça süneklik değerinin azaldığı görülmüştür.
- “a” çentikli ve “4a” çentikli numunelerde çekme hızının artışıyla SEM kopma yüzeylerinde dimple (çukurlu) kopma modları kısmen azalarak lokal bölgelerde olduğu belirlenmiştir.
- Standart numunelerde çekme hızının artmasına bağlı olarak klivaj (yarılma) tip kopma modlarının gerçekleştiği görülmüştür.
- Tüm SEM morfolojileri sonucunda numunelerin kopma yüzeylerinin hem çentik faktörü hem de çekme hızından etkilendiği görülmektedir. SEM morfolojileri incelendiğinde kopma morfolojilerinin çekme hızına çentik faktöründen daha fazla bağlı olduğu görülmüştür.
- SEM görüntüleri incelendiğinde farklı üç eksenli gerilme değerlerine ait tüm numunelerin kopma yüzeylerinde hem mikro hem makro sünek kopma morfolojilerinin hâkim olduğu görülmüştür.
- Standart, a, 4a ve 20a çentikli numunelerin kırılma morfolojileri incelendiğinde çalışılan malzemenin alüminyum olmasından dolayı YMK (yüzey merkezli kübik sistemlerinde) kristal yapılarda meydana gelen sünek kopma davranışını belirten dimple (çukurlu) kopma morfolojileri bulunmaktadır. Yüksek çekme hızlarında bile halen kayma plastik deformasyon mekanizmasının aktif olduğu görülmüştür.

Öneriler

Bu çalışmada oda sıcaklığında 25mm/dk ile 1000 mm/dk çekme hızları aralığında yapılarak 6181A-T4 alüminyum alaşımlı sac metal malzemesi özelinde Johnson-Cook pekleşme ve hasar modeli elde edilmiştir. Sıcaklığın etkisinin dikkate alınması gereken durumunda Johnson-Cook malzeme modelindeki sıcaklık değişkeni ve hasar modelindeki D_5 parametresinin yerleştirilerek malzeme ve hasar modeli için hesaplama yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Bal, B. (2018). Determination of Material Response and Optimization of Johnson-Cook Damage Parameters of Aluminium 7075 alloy. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi* 6(2), 343-354.
2. Avşar, M. (2011). *Yaşlandırma parametrelerinin AA6061 alüminyum alaşımının mekaniksel özelliklerine ve şekillendirmeye olan etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
3. Onur, A. (2014). *AA6XXX serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırılma işlemine bağlı olarak işlenebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
4. Çimen, M. (2012). *Gaz türbinli motorlarda yorulma hasarı ve Ti-6Al-4V malzemesinin yüksek sıcaklıktaki sürtünme yorulması davranışının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
5. Yegin, M. B. (2013). *High strain rate characterization of engineering materials*, Master Thesis, Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
6. Topilla, L. (2022). *Çift fazlı çeliklerde şekillendirme ve kırılma karakteristiğinin mikroyapı seviyesinde deneysel ve nümerik incelenmesi*, Doktora Tezi, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
7. Korkmaz, H. G. (2018). *Sac Hidro-Kesmede Proses Parametrelerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
8. Uz, E. (2022). *T4 ve T6 ısıtılmış 6061 alüminyum levhanın iki eksenli gerilmeler altında şekil değiştirmesinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
9. Korkmaz, M. E. (2018). *Nikel esaslı süper alaşımın (NIMONIC 80A) malzeme yapısal denklem parametrelerinin belirlenmesi ve uygulanabilirliğinin araştırılması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
10. Tamer, Y. (2019). *Numerical and experimental comparison of fractural characteristics of 316L stainless steel*, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara.

11. Yang, S., Sun, L., Deng, H., Li, G., Cui, J. (2020). A modified johnson-cook model of AA6061-O aluminum alloy with quasi-static pre-strain at high strain rates. *International Journal of Material Forming*, 14,677-689.
12. Davaze, V., Vallino, N., Feld-Payet, S., Langrand, B., Besson, J. (2020). Plastic and fracture behavior of a dual phase steel sheet under quasi-static and dynamic loadings. *Engineering Fracture Mechanics*, 235(1-2).
13. Chiyatan, T., Uthaisangsuk, V. (2020). Mechanical and fracture behavior of high strength steels under high strain rate deformation: experiments and modelling. *Materials Science and Engineering: A*, 779.
14. Ganjiani, M. (2020). A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and lode angle. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 84.
15. Zhang, S., Lu Y., Shen Z., Zhou S., Lou Y. (2019). Prediction of ductile fracture for Al6016-T4 with a ductile fracture criterion: experiment and simulation. *International Journal of Damage Mechanics*,1-23.
16. Aktürk, M. (2021). *Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesinin malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
17. Lin, Y.C., Zhu X., Dong W., Yang, H., Xiao, Y., Kotkunde N. (2020). Effects of deformation parameters and stress triaxiality on the fracture behaviors and microstructural evolution of an Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 832(154988).
18. Huang, Y., Tuo, Z., Qu, K., Yue, Z., Badreddine, H., Gao, J., Qiu, Y., Sun, J. (2021). Investigation and comparison of three noval strain rate-dependent fracture criteria. *Materials Science and Technology*, 37(11), 958-968.
19. Kim, M., Lee, H., Hong, S. (2019). Experimental determination of the failure surface for DP980 high-strength metal sheets considering stress triaxiality and lode angle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100,2775-2784.
20. Caro, L. P., Schill, M., Haller, K., Odenberger, E., Oldenburg, M. (2020). Damage and fracture during sheet-metal forming of alloy 718. *International Journal of Matel Forming*, 13, 15–28.

21. Tang, B., Wu, F., Guo, N., Liu, J., Ge, H., Bruschi, S., Li, X. (2020). Numerical and experimental study on ductile fracture of quenchable boron steels with different microstructures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3, 55-65.
22. Rastellini, F., Socorro, G., Onate, E. (2016). A triaxial failure diagram to predict the forming limit of 3D sheet metal parts subjected to multiaxial stresses. *Journal of Physics Conference Series*, 734.
23. Simonetto, E., Bertolini, R., Ghiotti, A., Bruschi, S. (2020). Mechanical and microstructural behaviour of AA7075 aluminium alloy for sub-zero temperature sheet stamping process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 187.
24. Wang, Q., Bertolini, R., Bruschi, S., Ghiotti, A. (2019). Anisotropic fracture behavior of AZ31 magnesium alloy sheets as a function of the stress state and temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*, 163.
25. Demir, E. (2008). *Alüminyum alaşımlarda ısıtıl işlem etkilerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
26. Aydın, H., Gören, R., Cengiz, N. M. (2020). İkiz merdane yöntemi ile 1XXX serisi alüminyum levha üretimindeki proses parametrelerinin özellikler üzerindeki etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(1), 146-152.
27. Stojanovic, B., Bukvic, M., Epler, I. (2018). Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(2), 52-62.
28. Esener, E. (2018). Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1)171-181.
29. Dieter, G. E. (1961). *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, 6-15.
30. Taylor, G. I. (1934). The mechanism of plastic deformation of crystals. *Part I. theoretical. proceedings of the Royal Society of London Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 145(885), 362-387.
31. Jörgen, B. (2015). Mechanics of Solid Polymers: Theory and Computational Modeling. *Elsevier Science*, 353-369.
32. Aktürk, M. (2021). *Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ALSİ10MG malzemesinin malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

33. Korkmaz, H. G. (2018). *Sac hidro-kesmede proses parametrelerinin deneysel ve sayısal olarak belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.



Gazili olmak ayrıcalıktır