



**33MnCrB5 BORLU ÇELİĞİN MALZEME  
YAPISAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ  
VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
DOĞRULANMASI**

**Emre TEKER**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ**

**33MnCrB5 BORLU ÇELİĞİN MALZEME YAPISAL  
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMANLAR  
YÖNTEMİYLE DOĞRULANMASI**

**Emre TEKER**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ**

**KARABÜK  
Ocak 2021**

Emre TEKER tarafından hazırlanan “33MnCrB5 BORLU ÇELİĞİN MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRULANMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ .....  
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 14/01/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN (BÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nafiz YAŞAR(KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. ....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Emre TEKER

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### 33MnCrB5 BORLU ÇELİĞİN MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRULANMASI

Emre TEKER

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ

Ocak 2021, 78 sayfa

Bu çalışma, 33MnCrB5 bor katkılı çeliğin malzeme modelini literatüre kazandırmayı amaçlamaktadır. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, 33MnCrB5 bor katkılı iş parçası malzemesinden oluşturulan numuneler oda sıcaklığında (24° C)  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızlarında yarı-statik çekme testlerine ve en düşük gerinim hızı olan  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> hızında 300, 600 ve 900 ° C sıcaklık değerlerinde yüksek sıcaklık çekme testlerine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen çekme testleri sonucu 33MnCrB5 bor katkılı çeliğine ait parametreler, en popüler model olan Johnson-Cook malzeme modeli ile belirlenmiştir. İkinci aşamada, belirlenen malzeme model parametreleri kullanılarak Ansys analiz programında tanımlanan malzeme modeli üzerinde yarı-statik ve yüksek sıcaklık etkisi altında çekme testi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, gerçekleştirilen deneysel

çekme testlerinden elde edilen sonuçlar ile ansys simülasyon programında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda yarı-statik etki altında akma gerilmesi için % 5,04, maksimum gerilme için % 5,57, uzama değeri için ise % 5,68 sapma olduğu ve yüksek sıcaklık etkisi altında akma gerilmesi için %9,42 bulunurken, maksimum gerilme için % 11,49 ve uzama değeri için % 7,63 sapma olduğu tespit edilmiştir. Yapılan testler ve kıyaslamalar neticesinde malzeme modelinin doğruluğu ve uygulanabilirliği ispatlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** 33MnCrB5, Johnson-Cook, Gerinim Hızı, ANSYS, Simülasyon, Çelik,

**Bilim Kodu** : 91433

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **DETERMINATION OF MATERIAL STRUCTURAL PARAMETERS AND VERIFICATION BY FINITE ELEMENT METHOD OF 33MnCrB5 BORON STEEL**

**Emre TEKER**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ**

**January 2021, 78 pages**

This study aims to bring the material model of 33MnCrB5 boron doped steel to the literature. The study consists of three stages. In the first stage, the samples created from 33MnCrB5 boron doped workpiece material was subjected to semi-static tensile tests at room temperature (24 ° C) at  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  and  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> strain velocities and to high temperature tensile tests at the lowest strain rate of  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> at 300, 600 and 900 ° C temperatures. As a result of the tensile tests performed, the parameters of 33MnCrB5 boron doped steel were determined with Johnson-Cook material model which the most popular model. In the second stage, quasi-static and high temperature tensile test simulations were performed on the material model defined in the Ansys analysis program using the determined material model parameters. In the third stage, the results obtained from the experimental tensile tests and the tensile tests performed in the ansys simulation program were compared. As a result of the

comparison, it is found that there is a deviation of % 5.04 for the yield stress, % 5.57 for the maximum stress, % 5.68 for the elongation value under semi-static effect and deviation of % 9.42 for the yield stress, % 11,49 for the maximum stress, % 7.63 for the elongation value under high temperature. As a result of the tests and comparisons, the accuracy and applicability of the material model has been proven.

**Key Word** : 33MnCrB5, Johnson-Cook, Strain Rate, ANSYS, Simulation, Steel

**Science Code** : 91433



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam ve danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca her an yanımda olduklarını bildiğim, maddi ve manevi hiçbir desteklerini benden esirgemeyen babam Metin TEKER'e, annem Nurgül TEKER'e ve kardeőim Yasin TEKER'e tüm kalbimle sonsuz sevgi ve őükranlarımı sunarım.

Son olarak tükenmez sabır ve sevgisi ile bana destek veren, daima yanımda olan Sude Ece YEŐİL'e çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜRDE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR .....	3
2.1. BOR KATKILI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KULLANIMI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	3
2.2. JOHNSON-COOK MALZEME MODELİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	5
2.3. ANSYS ANALİZ YÖNTEMİNİN KULLANIMI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	8
2.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	9
BÖLÜM 3 .....	11
KURAMSAL TEMELLER .....	11
3.1. ÇELİKLER VE TÜRLERİ .....	11
3.1.1. Karbon Çelikleri .....	11
3.1.2. Alaşımli Çelikler.....	13
3.1.3. Paslanmaz Çelikler .....	13

	<u>Sayfa</u>
3.1.4. Takım Çelikleri .....	14
3.2. MALZEME YAPISAL DENKLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE UYGULANMASI .....	14
3.2.1. Yapısal Denklem Parametrelerinin Belirlenmesi .....	14
3.2.2. Yapısal Denklem Parametrelerinin Uygulanması .....	16
3.2.2.1. Johnson-Cook Modeli ve Denklemi .....	16
3.2.2.2. Johnson-Cook Kırık Modeli ve Denklemi .....	17
3.3. MALZEME YAPISAL DENKLEM PARAMETRELERİNDE UYGULANAN TEST YÖNTEMLERİ .....	18
3.3.1. Çekme Testi Yöntemi .....	19
3.3.2. Basma Testi Yöntemi .....	24
3.3.3. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Çekme/Basma Testi Yöntemi .....	25
3.4. ANSYS ANALİZ YÖNTEMİ .....	25
3.4.1. Ansys Workbench Modülleri .....	27
3.4.1.1. Statik Analiz .....	27
3.4.1.2. Dinamik Analiz .....	28
3.4.1.3. Termal Analiz .....	28
3.4.1.4. Akış Analizi .....	29
3.4.1.5. Harmonik Analiz .....	29
3.4.1.6. Modal Analiz .....	29
3.4.1.7. Spektrum Analiz .....	30
3.4.2. Ansys Analiz Adımları .....	30
3.4.3. Ansys Analiz Raporu Hazırlama ve Yorumlama .....	31
 BÖLÜM 4 .....	 32
DENEY MALZEMESİ VE ÇALIŞMA AŞAMALARI .....	32
4.1. DENEY MALZEMESİ .....	32
4.2. TESTLER İÇİN GEREKLİ NUMUNELERİN OLUŞTURULMASI .....	33
4.2.1. Yarı-statik ve Yüksek Sıcaklık Çekme Testleri için Numune Tasarımı .....	33
4.2.2. Torna Tezgâhında Numune Oluşturma ve Kesici Takım .....	34
4.3. YARI-STATİK ÇEKME TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ .....	35

4.4. YÜKSEK SICAKLIKLARDA ÇEKME TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ .....	38
4.5. 33MnCrB5 İÇİN JOHNSON-COOK MALZEME PARAMETRELERİNİN BULUNMASI .....	39
4.5.1. Johnson-Cook malzeme modeli için ‘‘A, B ve n’’ parametrelerinin belirlenmesi .....	39
4.5.2. Johnson-Cook malzeme modeli için ‘‘C’’ parametresinin belirlenmesi	41
4.5.3. Johnson-Cook malzeme modeli için ‘‘m’’ parametresinin belirlenmesi	42
4.6. YARI-STATİK VE YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ ALTINDA ÇEKME TESTLERİ SİMÜLASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ .....	44
4.6.1. Kütüphane Malzeme Oluşturma .....	45
4.6.2. Malzeme Geometrisi Hazırlama ve Mesh Örne .....	45
4.6.3. Malzeme Modelinin, Yük ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi .....	46
4.6.4. Çözüm Bulma ve Raporlama.....	47
BÖLÜM 5 .....	48
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	48
5.1. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	48
5.1.1. Yarı-Statik Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	48
5.1.2. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	49
5.2. ÇEKME TESTİ SİMÜLASYONLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	50
5.2.1. Yarı-Statik Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	50
5.2.2. Yüksek Sıcaklık Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	53
5.3. DENEY VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI .	56
5.3.1. Yarı-Statik Etki Altında Gerçekleştirilen Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	56
5.3.2. Yüksek Sıcaklıklarda Gerçekleştirilen Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	63
BÖLÜM 6 .....	69
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	69
6.1. SONUÇLAR .....	69

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.2. ÖNERİLER .....	71
KAYNAKLAR .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Çekme testi için kullanılan numune çeşitleri. ....	19
Şekil 3.2. Çekme testi düzeneği. ....	20
Şekil 3.3. Zamanla artan çekme kuvveti sonucu numune üzerinde oluşan değişim değerleri. ....	21
Şekil 3.4. Gerilim-gerinim grafiği. ....	21
Şekil 3.5. Gerçek gerilme-gerinim eğrisi ve mühendislik gerilm-gerinim eğrisinin karşılaştırılması. ....	23
Şekil 4.1. 33MnCrB5 çelik malzemesi. ....	33
Şekil 4.2. Yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testi numune tasarımı. ....	33
Şekil 4.3. Torna tezgâhı numune oluşturma. ....	34
Şekil 4.4. Yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri için oluşturulan numuneler. ....	35
Şekil 4.5. Yarı-statik çekme-basma test cihazı. ....	35
Şekil 4.6. Numune tutucu. ....	36
Şekil 4.7. Zwick/Roell test cihazı bilgisayar ekran görüntüsü. ....	37
Şekil 4.8. Oda sıcaklığında (24 °C), $10^{-1}$ , $10^{-2}$ ve $10^{-3}$ s <sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde çekme testi uygulanan numuneler. ....	37
Şekil 4.9. Yüksek sıcaklık çekme testi için ısıtma fırını. ....	38
Şekil 4.10. Referans gerinim hızında ( $10^{-3}$ s <sup>-1</sup> ), 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıkları için çekme testi uygulanan numuneler. ....	39
Şekil 4.11. Oda sıcaklığı ve referans gerinim hız değeri (24 °C ve $10^{-3}$ s <sup>-1</sup> ) altında gerçekleştirilen çekme testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafiği. .	40
Şekil 4.12. Oda sıcaklığı (24 °C) değerinde $10^{-1}$ , $10^{-2}$ ve $10^{-3}$ s <sup>-1</sup> gerinim hızlarında gerçekleştirilen çekme testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafiği. .	41
Şekil 4.13. ‘C’ parametresi belirlemek için logaritmik ilişki. ....	42
Şekil 4.14. .... Referans gerinim hız ( $10^{-3}$ s <sup>-1</sup> ) değerinde, 24 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C değerlerine göre gerilme-gerinim grafiği. ....	43
Şekil 4.15. ‘m’ parametresi belirlemek için logaritmik ilişki. ....	44
Şekil 4.16. 33MnCrB5 malzemesini kütüphanede tanımlama. ....	45
Şekil 4.17. Mesh örülen malzeme modeli. ....	46
Şekil 4.18. Yük ve sınır şartlarının belirlenmesi. ....	47

## Sayfa

Şekil 5.1. $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.....	51
Şekil 5.2. $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.....	51
Şekil 5.3. $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.....	52
Şekil 5.4. 300 °C sıcaklık değeri için elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları..	54
Şekil 5.5. 600 °C sıcaklık değeri için elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları..	54
Şekil 5.6. 900 °C sıcaklık değeri için elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları..	55
Şekil 5.7. $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.....	60
Şekil 5.8. $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.....	61
Şekil 5.9. $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.....	61
Şekil 5.10. $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızı için gerçekleştirilen SEM analizi.....	62
Şekil 5.11. 300 °C için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları...	66
Şekil 5.12. 600 °C için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları...	66
Şekil 5.13. 900 °C için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları...	67
Şekil 5.14. 600 °C sıcaklık değeri için gerçekleştirilen SEM analizi. ....	68

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Yapısal denklemler ve parametreleri. ....	15
Çizelge 4.1. 33MnCrB5 çekme testi için JC parametreleri.....	44
Çizelge 5.1. Yarı-statik çekme testi sonuçları.....	48
Çizelge 5.2. Yüksek sıcaklık çekme testi sonuçları. ....	49
Çizelge 5.3. Yarı-statik çekme testi simülasyon sonuçları. ....	52
Çizelge 5.4. Yüksek sıcaklık çekme testi simülasyon sonuçları. ....	56
Çizelge 5.5. Yarı-statik için deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Çizelge 5.6. Yarı-statik etki altında elde edilen gerilme ve uzama değerleri için sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.....	59
Çizelge 5.7. Yüksek sıcaklık için deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması. ....	63
Çizelge 5.8. Yüksek sıcaklık etkisi altında elde edilen gerilme ve uzama değerleri için sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu. ....	65



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Mn	: Mangan
Cr	: Krom
B	: Bor
Ni	: Nikel
Fe	: Demir
Mo	: Molibden
Cu	: Bakır
Zr	: Zirkonyum
C	: Karbon
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
P	: Fosfor
W	: Volfram
V	: Vanadyum
$\epsilon_f$	: Kırılma gerilimi
$D_{1,2,3}$	: Gerilme parametreleri
$D_4$	: Gerinim hız parametresi
$D_5$	: Yüksek sıcaklık parametresi
$\Delta\epsilon$	: Plastik gerilme artış değeri
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik gerilmesi
$\sigma_g$	: Gerçek gerilme
$\sigma_n$	: Numunedeki gerilme
$\epsilon_{müh}$	: Mühendislik gerinimi
$\epsilon_g$	: Gerçek gerinim
$\Delta T$	: Plastik gerilme artış değeri

- $\rho$  : Yoğunluk  
 $A$  : Referans gerinim hızındaki akma gerilmesi  
 $B$  : Pekleşme modülü  
 $C$  : Gerinim hız sabiti  
 $m$  : Sıcaklık sabiti  
 $n$  : Pekleşme üst katsayısı  
 $P$  : Uygulanan yük  
 $A_0$  : Başlangıç kesit alanı  
 $A_a$  : Anlık kesit alanı  
 $l_s$  : Mastarın ölçüldüğü son uzunluk  
 $l_o$  : Mastarın ölçüldüğü ilk uzunluk  
 $T_r$  : Referans sıcaklık  
 $T_m$  : Ergime sıcaklığı  
 $E$  : Elastisite modülü

## KISALTMALAR

- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- HSS : High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
- DIC : Digital Image Correlation (Dijital Görüntü Korelasyonu)
- AISI : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
- PHBÇ : Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu
- TTT : Time-Temperature-Transformation (Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm)
- J-C : Johnson-Cook
- SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
- CAE : Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
- CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
- SAW : Submerged Arc Welding (Tozaltı Ark Kaynağı)
- APDL : ANSYS Parametric Design Language (ANSYS Parametrik Tasarım Dili)
- PSD : Power Spectral Density (Spektral Güç Yoğunluğu)
- UDF : User Defined Functions (Kullanıcı Tanımlı İşlevler)
- EPMA : Electron Probe Micro Analysis (Elektron Probu Mikro Analiz)
- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- MSE : Hata Kararlar Ortalaması
- RSME : Hata Kareler Ortalaması Karekökü
- $R^2$  : Belirlilik Katsayısı
- MAPE : Ortalama Mutlak Yüzde Hata

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Otomotiv sektöründe kullanılan pek çok parçanın imalatında, daha yüksek pasif güvenlik, daha hafif ağırlık ve yüksek mukavemet değerlerine sahip çeliklerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple otomotiv sektöründe kullanılan parçaların imalatı için kullanım alanı şartlarının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Son zamanlarda, kullanım alanı şartları belirlenen bir malzeme için çalışacağı şartlarda sahip olacağı dayanım değerleri sonlu elemanlar yöntemi üzerinden yapılan çekme ve basma testi simulasyon programları kullanılarak optimize edilebilmektedir. Deneysel çalışmaların uzun bir zaman alması ve maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile simülasyon programları bu malzemelerin plastik deformasyon süreçlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat malzemenin doğru ve uygulanabilirliğinin olduğunu kanıtlayabilmek için malzemenin yapısal denklem parametrelerinin tam olarak belirlenmesi ve malzeme modelinin doğru seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, yarı-statik etki ve yüksek sıcaklık etkisi altında malzemelerin plastik deformasyon süreçlerinin simülasyonlarında en uygun olarak kabul edilen Johnson-Cook malzeme modeli, malzemenin yapısal denklem parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Plastik deformasyon yöntemleri için ise sonlu elemanlar simülasyon programlarının malzeme kütüphanesinde bulunan malzeme modelleri kullanılmaktadır. Ancak, malzemelerin üretim parametreleri, kimyasal bileşimleri vb. durumlara bağlı olarak mekanik, fiziksel ve termal özelliklerinde farklılıklar oluşmaktadır. Bu sebeple sonlu elemanlar analizi ile elde edilen malzeme modeli parametrelerinin, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen malzeme modeli parametreleri ile uyum içerisinde olması oldukça önemlidir. Literatürde 33MNCrB5 bor katkılı çeliğin yapısal denklem parametreleri bulunmadığından dolayı Johnson-

Cook (J-C) model parametreleri kullanılarak belirlenmesi tez çalışmasının temel amacını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında deneyi yapılacak olan malzemenin Johnson-Cook model parametrelerini belirlemek amacı ile sırasıyla aşağıdaki test aşamaları uygulanmıştır. Öncelikle deney malzemesinden oluşturulan numuneler, yarı-statik etki ve yüksek sıcaklık etkisi altında çekme testlerine tabii tutulmuştur. Oda sıcaklığında derecesinde, düşük gerinim hızlarında yarı-statik çekme testleri ve en düşük gerinim hızında, yüksek sıcaklık değerlerinde yüksek sıcaklık çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm bu testlerden çıkan sonuçlar neticesinde 33MnCrB5 çeliğine ait Johnson-Cook parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, malzemenin belirlenmiş model parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar metodu tabanlı ansys simülasyon programında yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise deney sonuçları ile ansys analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, 33MnCrB5 çeliğinin malzeme modelinin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜRDE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

#### 2.1. BOR KATKILI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KULLANIMI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

M. Ganapathy ve ekibi çalışmalarında su verilmiş 22MnB5 bor çeliğinin sıcak şekillendirilmesi üzerine fiziksel çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bor katkılı çeliğin sıcak şekillendirme koşulları altındaki termo-mekanik özelliklerini incelemek için Gleeble 3800 malzeme simülatörünü kullanarak çekme testi simülasyonları uygulamışlardır. Biçimlendirildikten sonra tavlanan malzemenin sertlik, mukavemet, süneklik gibi mekanik özellikleri ölçümü yapılmıştır. Ayrıca mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilen sıcak şekillendirme koşulları için ( $420^{\circ}\text{C} - 620^{\circ}\text{C}$ ), malzemenin çekilebilirliğinin olumsuz etkileneceği bir şekilde gerinim yumuşaması gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, 22MnB5 bor çeliğinin daha yüksek sıcaklıklarda ( $> 400^{\circ}\text{C}$ ) ısıtılmasının, biçimlendirme işlemi sonrası malzemenin mukavemet ve süneklik değerlerini olumsuz etkileyeceği belirlenmiştir [1].

Huiping Li ve ekibi çalışmalarında bor katkılı B1500HS çeliğinin sıcak şekillendirilmesi üzerine araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bor katkılı çeliğin yapısal denklem ilişkisini belirlemek adına ferrit+perlit, östenit, beynit ve martenzit olmak üzere 4 farklı mikroyapıda oluşturulan numuneleri, Gleeble 1500D simülatör programını kullanarak  $20^{\circ}\text{C} - 900^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarında ve  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızlarında çekme testine tabii tutmuşlardır. Sonucunda hesaplama verileri ile deneysel sonuçları karşılaştırmış olup, verilerin oldukça tutarlı olduğunu gözlemlemişlerdir [2].

Jixuan Zhao ve ekibi çalışmalarında bor katkılı Q235 düşük karbonlu çeliğin sıcak sünekliği üzerine araştırma gerçekleştirmişlerdir. Gleeble 1500 malzeme simülatörü kullanılarak bor katkılı çeliğin 600–1300 ° C'de sahip olduğu mekanik özellikleri ve sıcak sünekliğini incelemişlerdir. Taramalı mikroskop kullanılarak incelenen örnekler sonucunda bor içeren Q235 çeliği, bor içermeyen Q235 çeliğine göre daha güçlü bir sıcak süneklik göstermiştir. Elde edilen bilgiler doğrultusunda bor katkısının sıcak sünekliği önemli ölçüde etkilediği görülmüştür [3].

Xiangyi Ren ve ekibi çalışmalarında Ca-Ti ile modifiye edilmiş yüksek bor katkılı HSS (Yüksek Hızlı Çeliği) için yüksek sıcaklık altında aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Ca-Ti modifikasyonunun amacı aşınma koşulları altında borokarbürün stabilitesini iyileştirmektir. Elde edilen sonuçlar, alaşımın sahip olduğu mikroyapının matris ve ötektik borokarbürden oluştuğunu göstermiştir. Yüksek sıcaklık altında yapılan aşınma deneyi sonucunda yüksek bor katkılı HSS (Yüksek Hızlı Çeliği) için daha iyi oksitlenme direnci ve mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek borlu yüksek hız çeliğinin aşınma direncinin, T15 yüksek vanadyum yüksek hız çeliğinden çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [4].

Zhen Liu ve ekibi çalışmalarında 650 °C sıcaklıkta, 5000 saat yaşlandırılan bor katkılı G115 çeliğin sahip olduğu mikroyapıyı ve mukavemet gelişimini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, bor katkısının mikroyapının gelişimini ve dislokasyon yoğunluğunun azalma oranını yavaşlatacağı görülmüştür. Elektron probu mikro-analizörü (EPMA) çalışmaları, çeliğe ilave edilen bor katkısının M23C6 karbürlerine girerek C atomlarını değiştireceğini ve yaşlanma esnasında kabalaşma oranlarını azaltacağını göstermiştir. Yaşlanma sırasında bor katkısının dislokasyonu kuvvetlendirerek G115 çeliğin akma mukavemetinin azalmasını yavaşlattığı görülmüştür [5].

M. Naderi ve ekibi çalışmalarında bor katkısı içeren ve bor katkısı içermeyen çeliklerin sıcak presleme sonrası sahip oldukları mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelemişlerdir. Bor alaşımlı çelikler ve bor alaşımı içermeyen çelikler, su ve nitrojen ile soğutma ortamı kullanılarak sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Preslenen numunelerin mikroyapı analizleri ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bor

alaşımli çeliklerin akma ve çekme dayanımlarının bor alaşımsız çeliklerden daha fazla olduğunu göstermiştir. Ayrıca bor alaşımli çelikler için martensitik ve beynitik bir mikroyapı bulunurken bor alaşımsız çeliklerde martensitik ve beynitik fazlarına ek olarak bir miktar ferrit fazı olduğu gözlemlenmiştir [6].

P.Namkhang ve ekibi çalışmalarında sıcak presleme işlemlerinde bor alaşımli çeliğin sahip olduğu mikroyapıyı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada bor alaşımli çeliğin sıcak preslenmesi, deneysel yöntemler ve sonlu elemanlar analizi simülasyon sonuçları ile incelenmiştir. Belirlenen numunenin belli bölgelerinden analiz ölçümü, sertlik ölçümü gerçekleştirilmiş olup, çekme testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında gerilme-uzama tepkileri hesaplanmıştır. Ayrıca zaman-sıcaklık-dönüşüm (TTT) diyagramına bağlı olarak mikro yapı bileşenleri ve dayanım değerleri tahmin edilmiştir. Yapılan çalışma sonrasında mikroyapı ve mekanik özellikler için deneylerden elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz simülasyonlarından elde edilen sonuçların uyumlu olduğu belirlenmiştir [7].

## **2.2. JOHNSON-COOK MALZEME MODELİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Biswajit Banerjee ve ekibi çalışmalarında, AISI 4340 çeliğinin farklı sıcaklıklar altında sahip olduğu mekanik sınır gerilme değerlerini ve Johnson-Cook malzeme modelini bulmayı amaçlamışlardır. Mekanik sınır gerilme değerleri ve Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak elde edilen akma gerilme değerlerini belirli bir gerinim ve sıcaklık seviyesinde karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak mekanik sınır gerilme model parametrelerinin bulunmasının Johnson-Cook model parametrelerinin bulunmasından daha kolay bulunduğunu tespit etmişlerdir. Fakat bununla birlikte Johnson-Cook simülasyonlarının, mekanik sınır gerilme simülasyonlarından %50 daha hızlı gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Bu sonuçlar ışığında tüm araştırmacılar Johnson-Cook malzeme modelinin daha uygun olduğunu ve AISI 4340 gibi pek çok çeliğin işleme simülasyonlarında kullanılabilirliğinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [8].



Xinyuan Qian ve ekibi çalışmalarında CuCrZr alaşımının sahip olduğu dinamik davranışı Parçalı hopkinson basınç çubuğu kullanarak pek çok gerinim oranı ve sıcaklıklar için incelemiştir. Deneysel sonuçlarına göre Johnson-Cook modeli kullanılarak yapısal bir denklem oluşturulmuştur. Ancak gerinim etkilerinin, dinamik davranış üzerindeki gerilme hızı ve sıcaklık değerleriyle bağımsız olmaması nedeniyle gerinim, gerilme hızı ve sıcaklığın birleşik etkilerini hesaba katmak için değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar orijinal Johnson-Cook modeli ile karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir [9].

Mehmet Erdi Korkmaz ve ekibi çalışmalarında yüksek sürünme direnci, oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklıkta korozyona karşı dirençli yapıya sahip malzeme olan Nimonic 80A alaşımının Johnson-Cook model parametrelerini belirlemiştir. Model parametrelerini belirlemek için üç farklı türde çekme testi uygulamışlardır. Belirlenen J-C parametrelerini kullanarak sonlu eleman analiz programlarında test simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık, yarı-statik ve dinamik olarak gerçekleştirilen üç farklı test için deney ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile uyumlu olup olmadığı incelenmiştir. Elde edilen değerler ışığında Johnson-Cook model parametrelerinin doğruluğu belirlenmiştir [10].

Liqun Niu ve ekibi çalışmalarında A356 alaşım çeliği için sıkıştırma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu çelik için öngörmüş oldukları gerinim yumuşatma iyileştirmesini içeren değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli oluşturmuşlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda değiştirilmiş Johnson-Cook modelinin orijinal JC modeline göre daha iyi korelasyon ve daha az mutlak hataya sahip olduğunu görmüşlerdir. Bununla birlikte sonlu elemanlar programlarında ve sabit redüksiyon hızında termal sıkıştırma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonucunda yeni oluşturulan Johnson-Cook modelin A356 alaşım çeliği için yüksek tutarlılığa sahip olduğunu kanıtlamışlardır [11].

Y.C. Lin ve ekibi çalışmalarında yüksek mukavemetli alaşım çeliğine, (1123–1373) K sıcaklık aralığında ve (0.0001–0.01) s<sup>-1</sup> başlangıç gerinim hızlarında tek eksenli çekme testleri uygulayarak alaşım çeliğinin sahip oldukları davranışları

incelemişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlar doğrultusunda, incelenen çeliğin davranışlarını açıklamak adına gerinim, gerinim hızı ve deformasyon sıcaklığının birleşik etkilerini dikkate alan değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli belirlemişlerdir. Sonucunda değiştirilmiş Johnson-Cook modelinin elde edilen deneysel sonuçlar ile uyduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle değiştirilmiş Johnson-Cook modelinin yüksek mukavemetli çeliklerin akış gerilimleri için iyi bir tahmin verebileceği ispatlanmıştır [12].

Jin Qiang Tan ve ekibi çalışmalarında 7050-T7451 alüminyum alaşımı için  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $800 \text{ s}^{-1}$ ,  $1900 \text{ s}^{-1}$  ve  $2900 \text{ s}^{-1}$  gerinim hızlarında yarı-statik ve dinamik testler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma ekibi, deneysel sonuçlardan elde edilen veriler doğrultusunda değiştirilmiş bir Johnson-Cook modelinin uygun olacağını önermişlerdir. Orjinal Johnson-Cook modeli ve Khan – Liu (KL) modeli, değiştirilmiş olan Johnson-Cook modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonucunda değiştirilmiş olan Johnson-Cook modelinin sahip olduğu doğruluk değerinin diğerlerinden daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [13].

Sandeep Yadav ve ekibi çalışmalarında yumuşak çeliklerin kaynaklanması esnasında yüksek sıcaklığa ve gerilmelere maruz kaldığını gözlemlemiştir. Malzemenin yüksek sıcaklık deformasyonlarına karşı davranışını incelemek için gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın etkisini dahil eden bir Johnson-Cook modeli oluşturmuşlardır. Daha sonra sonlu elemanlar analiz programlarında yarı-statik ve orta gerinim hızlarında Johnson-Cook malzeme modeli değerleri dahil edilerek çekme testi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekme testi simülasyonları sonucunda elde edilen gerilme-gerinim eğrisi deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında tutarlı oldukları görülmüştür [14].

Sonika Sahu ve ekibi çalışmalarında AA1100 alüminyum alaşımı için  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ve  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızlarında çekme testleri gerçekleştirerek Johnson-Cook malzeme parametrelerini belirlemişlerdir. Elde edilen parametreler doğrultusunda sonlu eleman analiz yazılımı kullanılarak test simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Sonucunda yarı-statik gerinim hızlarında sonlu elemanlar sonuçları ile deneysel sonuçların bir uyum içerisinde olduklarını ispatlamışlardır [15].

### 2.3. ANSYS ANALİZ YÖNTEMİNİN KULLANIMI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

R. Vijayakumar ve ekibi çalışmalarında Solidworks programını kullanarak tekerlik jantı modellemesini oluşturmuşlardır. Ansys Workbench analiz programına aktarılan bu jantlar için 6061 ve 6066 alüminyum alaşımları kullanarak hem statik hem de dinamik testler uygulanmıştır. Jantın değişken koşullar için göstermiş olduğu davranışların incelenmesi ve performanslarının gözlemlenmesi sağlanmıştır. Analiz sonucu elde edilen sonuçlar doğrultusunda Ansys analiz programı, hem statik hem de dinamik koşullar altında etkin bir kullanıma sahip olabilecek jant yapısını göstermiştir [16].

P. Sai Teja ve ekibi çalışmalarında bir uzay roketinde kullanılmak üzere roket motoru geliştirmişlerdir. Modellemeyi Catia üzerinden gerçekleştiren ekip, gerekli tasarım parametreleri ile birlikte Ansys analiz programında gerilme, gerinim ve deformasyon analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ansys programından elde edilen veriler doğrultusunda yeniden tasarımı gerçekleştirilmiş roket motorunun daha önceki roket motoru ile aynı çap ve uzunluk değerlerine sahip olmasına rağmen daha iyi performansa sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [17].

Semih Taşkaya ve ekibi çalışmalarında Ramor 500 çeliğinin SAW (Tozaltı Ark Kaynağı) ile birleştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Birleştirme işlemi sonrasında çeliğin termomekanik analizini, Ansys analiz programında gerçekleştirmişlerdir. Sonucunda da Ansys analiz programı, kaynak dikişinden temel malzemeye homojen bir dağılım olduğunu göstermiştir. Ansys programından elde edilen termomekanik analiz sonuçlarına göre kaynak gerilmelerinde, ısı girdilerinin ve deformasyon sonucunda, elastik ve mekanik gerilme değerlerinin fazlasıyla arttığı gözlemlenmiştir [18].

Shwetank Avikal ve ekibi çalışmalarında Ansys programını kullanarak ağır hizmet kamyonlarının ön aks kiriş analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Aks model tasarımı Siemens NX programında gerçekleştirilmiş olup, yorulma ömrü analizlerini gerçekleştirmek için Ansys programına aktarılmıştır. Çalışma AISI1045, AISI4134,

AISI 4130, AISI 4150 ve Ç50 olmak üzere toplam 5 farklı malzeme için gerçekleştirilmiştir. Ansys programı üzerinden gerçekleştirilen analizler sonucunda uygulanan 5 farklı çelik için aksların yorulma ömürlerinin istenilen düzeyde olduğu ispatlanmıştır [19].

Tang Zhaoping ve ekibi çalışmalarında sabit bilyalı rulmanlar için temas analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sabit bilyalı rulman için 3D modelleme, Ansys programı içinde gömülü APDL (Ansys Parametrik Tasarım Dili) kullanılarak oluşturulmuştur. Modelleme işlemleri sonrası Ansys analiz programından temas analizleri simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ansys temas analizleri simülasyonları sonucunda sabit bilyalı rulman için elde edilen hesaplama değerlerinin, teorik hesaplama değerleri ile tutarlı olduğu görülmüştür [20].

O. Rybdylova ve ekibi çalışmalarında çok bileşenli damlacık ısıtması ve buharlaşması için yeni bir model tasarlamışlar ve bunu Ansys fluent programına uygulamışlardır. Kullanıcı tanımlı işlevler (UDF) aracılığıyla yeni uygulanan model ile Ansys fluent programının tahminleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Ortam havasında buharlaşan ve soğutulan bir etanol ve aseton karışımından oluşan damlacıklar için daha önce yeni uygulanan modelle tahmin edilen sonuçlar ile Ansys fluent analiz programına uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar, birbirleriyle karşılaştırılmış olup iyi bir uyum içinde oldukları görülmüştür [21].

Ahmet Numan Özakın ve ekibi çalışmalarında hava bazlı PVT sisteminin enerji ve ekserji analizlerini incelemişlerdir. Panel yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı ve soğutma kanalının hava hızı dağılımı, Ansys Fluent programı ile analiz edilmiş olup elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Sonucunda Ansys Fluent programıyla elde edilen sıcaklık kontur görüntüleri ile deneysel olarak elde edilen değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür [22].

#### **2.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde, bor katkılı alaşımların işlenebilirliği ve modelleme yapılması üzerine pek çok çalışma olduğu görülmüştür. Fakat 33MnCrB5

alaşım çeliği üzerine malzeme modeli olmamasından dolayı deformasyon süreçleri ile ilgili bir çalışma bulunamamıştır. Talaşlı imalat üzerine yapılan araştırmalar hem zaman yönünden oldukça uzun sürmekte hem de maliyet açısından pahalı olmaktadır. Bu nedenle nümerik modelleme, kesme işlemlerinin modellenmesinde alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise kesme işlemlerinde en yaygın kullanılan nümerik yöntemdir. Ansys, Abaqus, Deform vb. analiz programları sayesinde talaş oluşum sürecinde kesme kuvvetleri, sıcaklık ve gerilmeler önceden tahmin edilebilmektedir. Ayrıca bu tür analiz programları, düşük maliyetlerde işlemlerin gerçekleştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi bu avantajları sayesinde mühendislik tasarımları ve imalat süreçlerinin analizinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Sonlu elemanlar modellemelerinin yapıldığı simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile plastik deformasyon sürecinde elde edilen sonuçlar (sıcaklık, kuvvet, vb.) birbirleri ile uyuşmalıdır. Bu sebeple simülasyon programlarında, doğru modellemenin önemi büyüktür. Doğru modelleme, elde edilecek sonuçların doğru ve gerçekçi olması demektir. Doğru modelleme parametrelerinin elde edilebileceği yapısal malzeme modellerinden en uygun olarak kabul edileni, Johnson-Cook malzeme modelidir. Simülasyon programının malzeme kütüphanesinde bulunan hazır malzeme modelleri, gerçekleştirilen simülasyon çalışmaların büyük bir bölümünde kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında ise literatürde bulunmayan 33MnCrB5 alaşım malzemesine ait Johnson-Cook malzeme model parametresi belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonrasında ise oluşturulan malzeme model parametreleri simülasyon programlarına eklenerek, yarı-statik ve yüksek sıcaklık etkisi altında çekme testleri simülasyonları gerçekleştirilecektir. En son aşamada ise uygulanabilirlik düzeyini belirleyebilmek için deneysel sonuçlar ile simülasyon programından elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilecektir. Çalışma neticesinde literatürde bulunan eksikliklerin giderilmesinin yanı sıra malzemelerin kullanım alanı olan otomotiv sektörüne büyük katkı sağlanacağına inanılmaktadır.

## BÖLÜM 3

### KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. ÇELİKLER VE TÜRLERİ

Çelik, yapısında % 2'ye kadar karbon (C), % 1'e kadar manganez (Mn), % 0,05'ten az kükürt (S), % 0,5'e kadar silisyum (Si) ve % 0,05'ten az fosfor (P) elementi bulunan demir karbon alaşımıdır [23]. Çeliğe farklı özellik kazandırmak için yapısında bulunan elementlerin kimyasal bir bileşim geçirmesi gerekmektedir. Genellikle demirin alaşımlayıcı maddesi karbon olsa da çeliğe farklı özellikler kazandırmak için krom (Cr), nikel (Ni), vanadyum (V) ve volfram (W) gibi elementler demir alaşımlamada kullanılabilir. Alaşımlamada kullanılan bu elementler ile çeliğin sertlik, süneklik, dayanım, elektrik direnci ve mıknatıslanma gibi özellikleri geliştirilebilmektedir [24].

Çelikler özellikle binalarda, altyapı üretiminde, gemilerde, otomobillerde, çeşitli makinelerde, silahlarda, aletlerde ve aksesuarlarda kullanılmaktadır. Günümüzde, her yıl yaklaşık 1.9 milyar ton üretimi gerçekleşen çelik dünyada en çok kullanılan ortak malzemelerden birisi konumundadır. Dünyada kullanılan en önemli çelik standartları TS (Türkiye Standardı), EN (Avrupa Standardı), DIN (Alman Standardı) ve SAE, AISI, ASTM, ASME (Amerikan Standardı)'dır [25]. Bilinen en eski metallere biri olan çelikler, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından belirtildiği gibi madde sentezleri açısından aşağıda belirtilen şekilde dört gruba ayrılmaktadır.

##### 3.1.1. Karbon Çelikleri

Karbon oranına göre çelikler düşük, orta ve yüksek karbonlu olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Düşük karbonlu çelikler, bileşimlerinde %0.2 seviyesine kadar karbon bulduran çeliklerdir. Çekme mukavemetleri düşük ve oldukça yumuşak bir

yapıya sahiptirler. Düşük karbonlu çelikler, sertleştirilebilmeye, şekillendirilebilme süreçlerine, kesit boyutlarının değişimine ve termal işlemlere karşı çok hassastır [26]. Kaynak olma özellikleri ise çok iyidir. Dünyadaki çelik üretiminin en büyük kısmını düşük karbonlu çelikler oluşturmaktadır. Düşük karbonlu çelikler, genellikle civata üretiminde, somun üretiminde, ıslah edilebilir makine parçaları imalatında, inşaat sektörü ve temel yapıların oluşturulması işlemlerinde tüketilen çubuk ve profillerde kullanılmaktadır [27].

Orta karbonlu çelikler, bileşimlerinde %0.2 ile %0.6 oranında karbon bulunduran çeliklerdir. Düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek, yüksek karbonlulara göre ise daha düşük seviyede çekme mukavemetine sahiptirler. Isıl işlem sayesinde yeterli derecede sertleştirilebilme imkanına sahiptirler. Bu sayede üretilecek parçanın, sertlik, tokluk ve korozyon direnci gibi özellikleri iyileştirilebilir [28]. Şekil alabilme ve işlenebilme yeteneğinin düşük olması nedeni ile kaynak işlemlerinde meydana gelen kontrolsüz ısıl etkiler, çeliğin yapısal değişiminin de kontrolsüz olmasına sebebiyet verebilir. Bu nedenle kaynak işlemleri sırasında özel itina gerekmektedir. Genellikle makine imalat sanayisinde, civata, somun, dingil, gemi şaftı, dişli çark, transmisyon mili, frezeli mil, yük kancası, ray, kazma, kürek gibi araç gereçlerin yapımında kullanılır.

Yüksek karbonlu çelikler, bileşimlerinde %0,60 oranından daha fazla karbon bulunduran çeliklerdir. Sertlik, çekme ve akma mukavemeti değerleri, düşük ve orta karbonlu çeliklere göre daha fazla, sünekliği ise daha azdır. Isıl işlem uygulamaları ile sertleştirilebilme imkanı sayesinde yüksek sertlik seviyelerine çıkabilirler. Ayrıca düşük ve orta karbonlu çeliklere göre daha kolay su alabilme yeteneğine ve daha fazla martenzitik sertlik değerlerine sahiptirler. Yüksek sertliği sayesinde aşınmaya ve darbelere karşı dirençli olmaktadır. Fakat sertlik seviyesinin fazla olması nedeniyle işlenme ve şekil alabilme kabiliyetleri oldukça düşüktür [29]. Kaynak kabiliyetlerinin oldukça düşük olmasından dolayı özel teknikler ile yapılan kaynaklar için uygundur. Takım üretiminde ve 0,08-5,5 mm çapında tel yapımında yaygın olarak tercih edilmektedirler. Yüksek karbonlu çelik teller, metalik malzemeler arasında en yüksek çekme dayanıma sahip olup çelik halat veya testere teli olarak kullanılmaktadırlar [30]. Yüksek karbonlu çeliklerin karbon oranı, en fazla %2

seviyesine çıkabilir. Karbon oranı %2 seviyesinden fazla olan çelikler, dökme demir olarak adlandırılmaktadır.

### **3.1.2. Alaşımli Çelikler**

Alaşım çelikler, bileşimlerinde %1'den az karbon bulunduran çelikler olup, çeliğin özelliğini değiştirmek için alüminyum, krom, kobalt, bakır, kurşun, manganez, fosfor, silisyum, kükürt, tungsten ve vanadyum gibi elementler bileşime ilave edilir. Alaşım elementlerinin ana metalle birleşmesi sonucu tok ama aynı zamanda sünek bir yapıda katı çözeltili oluşmaktadır. Bu elementler çeliğin, yorulma dayanımını, korozyon dayanımını, elektrik direncini, yüksek sıcaklığa karşı dayanımını, sertlik değerini arttırmaktadır [31]. Ayrıca malzemenin sertleştirilebilme özelliğinin gelişimine, tane oluşumunun azalmasına, karbit oluşumuna, miknatıslanma özelliğinin gelişmesine yardımcı olmaktadır.

### **3.1.3. Paslanmaz Çelikler**

Paslanmaz çelikler, bileşime belirli bir oranda krom ilave edilerek paslanmaya karşı dayanıklılık sağlayan çeliklerdir. Çelik bileşimine ilave edilen krom, çeliğin oksijenle temas ettiği hallerde krom-oksit adında ince bir film tabakası oluşturarak çeliğin paslanmaya karşı korunmasını sağlar [32]. Bununla birlikte çeliğin içerisine eklenen elementler, çeliğin korozyon dayanımına etki etmektedir. Çeliğe ilave edilecek nikel, molibden ve krom gibi elementler korozyon direncini arttırırken; karbon, kükürt gibi elementlerin çelik yapısında artması, korozyon direncini düşürmektedir. Ayrıca çeliğin yapısına bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot gibi bazı elementlerin eklenmesi ile olumlu etkiler sağlanabilmektedir. Mükemmel korozyon direnci, yüksek mukavemet, işleme performansı ve düşük maliyeti gibi avantajlarından dolayı paslanmaz çelik, petrol, petrokimya endüstrisi, gemi yapımı ve basınçlı kap endüstrileri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [33]. Aynı zamanda pompa ve kompresör parçaları, nükleer mühendislik, havacılık endüstrisi, otomotiv sanayi, kağıt sanayi, rezistanlar, ısı değiştiriciler ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ekipmanlar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptirler.



### **3.1.4. Takım Çelikleri**

Takım çelikleri, bileşimlerinde yüksek oranda karbon bulunduran çeliklerin sıcaklık dayanımını ve mukavemet değerini arttırmak için tungsten, molibden, kobalt ve vanadyum gibi elementlerin ilave edilmesiyle oluşturulmaktadır. Takım çeliklerinin mukavemet, sertlik, tokluk, süneklik, aşınma direnci, sıcaklık direci, ısı iletim kabiliyeti, işlenebilirlik kabiliyeti ve şekillendirilebilirlik yeteneği oldukça yüksektir. Mukavemet ve sertlik değerlerinin oldukça yüksek olmasından dolayı pahalı çeliklerdir. Takım çelikleri bünyesinde içerdiği elementler sayesinde kesme ve delme işlemlerinde mükemmel sonuç imkanı vermektedir. Genellikle, talaşlı veya talaşsız imalatta, sıcak veya soğuk haldeki iş parçalarını kesme, dövme ve sıkıştırma yöntemlerinden biri veya birkaçı ile şekillendirme işi yapmak için kullanılmaktadır [34].

## **3.2. MALZEME YAPISAL DENKLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE UYGULANMASI**

### **3.2.1. Yapısal Denklem Parametrelerinin Belirlenmesi**

Pek çok malzemenin uygulaması birbirinden farklı gerinim hızları ve farklı sıcaklık değerlerinde gerçekleşmektedir. Malzemeler sıcaklık ve gerinim hız değerlerinin farklı olduğu ortamlarda farklı mekanik tepkiler göstermektedirler. Bu nedenle malzemelerin kullanım alanına bağlı olarak farklı sıcaklıklarda ve gerinim hızlarında test edilerek mekaniksel davranış özelliklerini tahmin etmek gerekmektedir. Ayrıca pek çok farklı sıcaklık değerinde ve farklı gerinim hızlarında test edilmesi gereken malzeme, maliyet açısından oldukça pahalı ve zaman açısından oldukça fazla zaman alıcı olmaktadır. Teknolojinin gelişimi ile tüm bu olumsuz şartların önüne geçilerek malzemelere ait yapısal denklemler geliştirilmiştir. Gerilme, gerinim hızı ve sıcaklık fonksiyonuna bağlı olarak malzemenin statik ve dinamik yükler altında sahip olduğu karmaşık yapının modellenmesi için yapısal denklemler oluşturulmuştur [35]. Yapısal denklem, yarı-statik ( $10^{-3} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ ) ve dinamik gerinim hızlarında ( $> 100 \text{ s}^{-1}$ ) malzemelere ait mekaniksel davranışları modelleyebilmelidir. Çizelge 3.1

malzemelerin modellenmesinde en yaygın kullanılan yapısal denklemleri ve bu denklere ait parametreleri içermektedir.

Çizelge 3.1. Yapısal denklemler ve parametreleri.

Yazarlar	Denklemler	Parametreler
Ludwik	$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$	$\sigma_0, K, \varepsilon^n$
Holloman	$\sigma = K\varepsilon^n$	$K, n$
Swift	$\sigma = K(\varepsilon_1 + \varepsilon)^n$	$K, n$
Voce	$\sigma = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_1)\exp(-n\varepsilon)$	$\sigma_0, \sigma_1, n$
Ludwingson	$\sigma = K_1\varepsilon^{n_1} + \exp(K_2 + n_2\varepsilon)$	$K_1, K_2, n_1, n_2$
Gladman	$\sigma = \sigma_0 + K_1 \ln \varepsilon + K_2 \varepsilon$	$\sigma_0, K_1, K_2$
El-Magd and Troost	$\sigma = K\varepsilon^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m$	$K, n, m, \dot{\varepsilon}_0$
Reiff	$\sigma = \left[ K_1 + K_2 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{m}} + K_3 \sqrt{\varepsilon} \right]$	$K_1, K_2, K_3, m$
Cowper Symond	$\sigma_y = [\sigma_0 + \beta E_P \varepsilon_{eff}^P] \left[ 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_P}{D}\right)^{\frac{1}{P}} \right]$	$D, P$ $\sigma_y = \text{İlk akma gerilmesi}$ $E_P = \text{Plastik sertleşme modülü}$
Zerilli and Armstrong	$\sigma = \sigma_0 + K_1 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}}\right)^{-K_3 T} + \frac{K_2}{e^{-K_4 T}} \varepsilon^n + K_5 d^{-\frac{1}{2}}$	$\sigma_0, K_1, K_2, K_3,$ $K_4, K_5, n, \dot{\varepsilon}_0$
Johnson and Cook	$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] [1 - (T^*)^m]$	$A, B, n, C, m$

## 3.2.2. Yapısal Denklem Parametrelerinin Uygulanması

### 3.2.2.1. Johnson-Cook Modeli ve Denklemi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan deneysel yöntemler ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Fakat teknolojinin gelişmesiyle ve deneysel yöntemlerin pahalı olması nedeni ile malzeme üzerinde yapılan bu testler bilgisayar ortamında modelleme yapılarak gerçekleştirilebilir hale getirilmiştir. Malzemelerin yüksek sıcaklık değerlerinde ve birim şekil değiştirme hızlarında sahip olduğu davranışı modelleyebilmek için mukavemet değerlerinin bulunması gerekmektedir. Her malzemenin farklı mukavemet değerlerine sahip olduğu bilinmektedir. Farklı mukavemet değerlerine sahip her malzeme için bu değerler, en yaygın olarak kullanılan Johnson-Cook malzeme modeli ile belirlenerek bilgisayar ortamına aktarılabilir ve ne tür bir performans sergileyeceği test edilebilir. Johnson-Cook modeli, malzemenin sahip olduğu akma mukavemetini, pekleşme özelliklerini, yüksek sıcaklıklarda sahip olduğu davranışlarını ve yüksek plastik deformasyon esnasında sahip olduğu davranışı ifade etmektedir. Johnson-Cook modeli birim şekil değiştirme değeri, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa bağlı bir şekilde malzemenin sahip olduğu gerilme değerlerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemdir. Johnson-Cook modeli Çizelge 3.1 üzerinde bulunan diğer modellerden farklı olarak yarı ampirik olması ve modele ait mekaniksel davranışların belirlenmesinin daha kolay olması nedeniyle yüksek gerinim hızı deformasyonlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Johnson-Cook modeline ait denklem Eş. 3.1 şeklinde ifade edilmektedir.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - (T^*)^m] \quad (3.1)$$

Burada  $[A + B\varepsilon^n]$ , en düşük gerinim hızında gerinim fonksiyonu olarak izotermal gerilmeyi vermekte;  $\left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]$ , gerinim hızının göstermiş olduğu etkiyi vermekte ve  $[1 - (T^*)^m]$ , termal etkileri vermektir. Denklemden kullanılan sabitler (A, B ve n), referans gerinim hızında ve yarı-statik gerinim hızlarında elde edilen gerilme-gerinim eğrisinden bulunmaktadır. Ayrıca  $T^*$  Eş. 3.2 şeklinde ifade edilebilir.

$$T^* = \frac{T-T_r}{T_m-T_r} \quad (3.2)$$

Burada,  $T_r$ : referans sıcaklığını ve  $T_m$ : ergime sıcaklığını göstermektedir.

Johnson-Cook modelinin oluşturabilmesi için yarı-statik, izotermik ve iki farklı gerinim hızı şeklinde en az 3 eşdeğer nitelikte gerilme-gerinim eğrisi bulunmalıdır. Ayrıca sıcaklık sabiti için, yüksek sıcaklıkta bir ek eğriye daha ihtiyaç duyulmaktadır [36]. Yüksek gerinim hızlarının olduğu testlerde, malzemenin plastik deformasyona uğrayacağı ve bundan dolayı ısınmanın gerçekleşeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Pek çok malzeme uğranılan plastik deformasyonun %90'a yakın bir bölümü, ısı olarak materyal üzerinde dağılmaktadır [37]. Plastik deformasyon etkisi ile artan sıcaklık, Eş. 3.3'de bulunan denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\Delta T = \frac{\alpha}{\rho c} \int \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.3)$$

### 3.2.2.2. Johnson-Cook Kırık Modeli ve Denklemleri

Johnson-Cook kırık modeli malzemenin kendisine uygulanan kırılma kuvvetine karşı göstermiş olduğu gerinimin yansıttığı yüklemeyi ele almaktadır. Johnson-Cook kırık modeline ait parametreler en az üç test sonucunda belirlenebilir. Öncelikle Eş. 3.4'de bulunan denklem üzerindeki  $\varepsilon_f$  (Kırılma Gerilimi) değerini belirlemek adına çentik yarıçapı farklı olan numuneler kullanılarak teste tabi tutulur. Sonraki aşamada  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  bulmak için malzeme yarı-statik ve izotermal şartlar altında testlere tabi tutulmaktadır. Son olarak  $D_4$  değerini bulmak için farklı gerinim hızlarında sahip olunan yüksek gerinim oranı testleri uygulanmaktadır.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - D_5 T^*] \quad (3.4)$$

Burada, plastik gerilimdeki artış değeri ( $\Delta\varepsilon$ ), kırılmaya karşı gösterilen gerinim değeri ( $\varepsilon_f$ ) oranı 1,0 değerine eşit veya üzerinde ( $D \geq 1,0$ ) ise  $\varepsilon_f$ : kırılmaya karşı gerinimi,  $D_1, D_2, D_3$ : gerilme parametreleri,  $D_4$ : gerinim hız parametresi,  $D_5$ : yüksek

sıcaklık parametresi ve  $\sigma^* = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}$  ( $T^*$ : Sabit veya  $\sigma^* \leq 1,5$  durumlarında) olarak tanımlanmaktadır. Plastik gerilimdeki artış değerinin ( $\Delta\varepsilon$ ), kırılmaya karşı gösterilen gerinim değerine ( $\varepsilon_f$ ) oranı 1,0 değerinin altında ise Eş. 3.5'de bulunan denklem geçerli olmaktadır.

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (3.5)$$

### 3.3. MALZEME YAPISAL DENKLEM PARAMETRELERİNDE UYGULANAN TEST YÖNTEMLERİ

Yapısal denklem parametreleri belirlenen malzeme için uygulanacak mekanik test yöntemi, test edilecek malzemenin tepkisi ile ilişkili olmaktadır. Farklı gerinim hızı rejimlerinde yaygın olarak kullanılan test yöntemleri, mekanik özellikleri belirlemek için kullanılır. Yarı-statik testler ve sürünme testleri, çoğunlukla  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında sabit hız test cihazları ile yapılmaktadır. Gerinim hızlarında meydana gelen artış doğrultusunda ( $>100 \text{ s}^{-1}$ ), yapısal denklem parametreleri belirlenen malzemelerin testleri için farklı test yöntemleri kullanılabilir. Bu farklı test yöntemleri arasında, yalnızca Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu (PHBÇ) yöntemi, malzemenin tek bir teste tabi tutulmasıyla gerilme-gerinim eğrisini ve gerinim davranışlarının sonuçlarını vermektedir. PHBÇ,  $100-1000 \text{ s}^{-1}$  gerilme hızı aralığında devamlı olarak artan gerilme hızlarında malzemenin test edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir [38,39]. Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu (PHBÇ) yönteminde test edilen malzemenin denge deformasyonu gerçekleştirdiği kabul edilmektedir. Bu sebeple malzemenin kendine uygulanan yüklere karşı göstermiş olduğu atalet etkileri ihmal edilmektedir.

Malzemelerdeki mekanik davranış analizi için yapılan mekanik testler; Çekme/Basma Testi, Sertlik Testi, Ani Darbe Testi, Yorulma Testi ve Diğer Testler (Eğilme Testi, Burulma Testi, Bükülme Testi, Sürünme Testi) şeklindedir. Çekme/Basma Testi, farklı gerinim hızlarında malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Malzeme, yarı-statik testlere

tabii tutulamayacak hızlara ( $>100 \text{ s}^{-1}$ ) ulaşmış ise dinamik test yöntemlerine başvurulmalıdır.

### 3.3.1. Çekme Testi Yöntemi

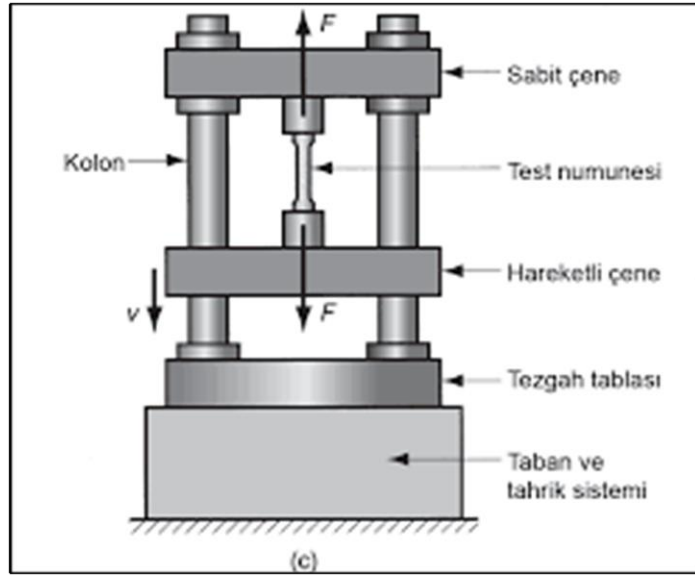
Çekme Testi, malzemenin statik veya yarı-statik kuvvetlerin etkisi altında kendisine uygulanan kuvvetlere karşı göstermiş olduğu mukavemet değerlerini, bölgelerini ve şekil değiştirme miktarını gösteren test yöntemidir. Çekme testi yöntemi, eksenal şekilde uygulanan gerinim hızlarında numunenin göstermiş olduğu davranışı belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Çekme testi metaller, elastomerler, kauçuklar, kompozitler, plastikler vb. pek çok malzeme üzerinde uygulanabilir. Boru biçiminde bulunan malzemelerin deformasyon ölçümlerini ele almak için dijital görüntü korelasyon (DIC) sistemi kullanılarak çift eksenli çekme testi cihazı geliştirilmiştir. Digital Image Correlation (DIC) yöntemi, kontur deformasyonunu, gerinim ve gerilme değerlerini ölçmek için temassız bir optik tekniktir [40]. Deformasyon sürecinin başından sonuna kadar geçen süre boyunca doğru ve sürekli ölçülebilirlik çift eksenli çekme testi cihazı sayesinde gerçekleştirilebilmektedir [41]. Pek çok malzemeye uygulanabilen çekme testi numuneleri genellikle Şekil 3.1’de belirtilen hallerde bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Çekme testi için kullanılan numune çeşitleri.

Çekme testi için öncelikle test edilecek numune ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu) standartlarında tanımlanan boyut, şekil ve test prosedürüne uygun bir

biçimde hazırlanır. Hazırlanan numune çekme testini gerçekleştirecek test makinesinin çenelerine yerleştirilir. Sonrasında çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney parçasına değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır. Test aşamasında numuneye uygulanan her bir yük değerine karşılık numunenin göstermiş olduğu uzama miktarı eşzamanlı olarak kaydedilir [42]. Şekil 3.2' de çekme testine ait test düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme testi düzeneği.

Her malzeme bir atom topluluğundan oluşmaktadır. Malzemedan alınan numuneye çekme işlemi uygulanırken, atomların arasında bulunan yayların uzamasına bağlı olarak numune uzamaktadır. Malzeme, kendisine uygulanan kuvvet bırakıldıktan sonra tekrar eski haline dönebiliyor ise bu malzemenin elastik bölgede olduğunu gösterir. Malzeme kendisine uygulanan kuvvet bırakıldıktan sonra eski formunu kaybetmiş ise bu malzemenin plastik bölgede olduğunu göstermektedir. Şekil 3.3 numuneye uygulanan ve zamanla artan çekme kuvveti sonucu numune üzerinde oluşan gerinimleri göstermektedir.





Gerilim-gerinim grafiği iki bölgeden oluşmaktadır. Elastik bölge, gerilim değeri ile gerinim değerinin doğrusal olarak orantılı olduğu bölgedir. Bu bölge içinde yüklemeye bağlı oluşan deformasyon yük kalkması durumunda ortadan kalkacak ve malzeme tekrar eski formuna geri dönecektir. Elastik bölge akma noktasına kadar devam etmektedir. Akma noktasından sonra malzeme plastik bölgeye girecek ve bu bölgede malzeme üzerinde yükleme sonucu oluşan deformasyonların geri döndürülebilirliği mümkün olmayacaktır. Malzeme üzerine zamanla yüklemenin devam etmesi durumunda malzeme dayanım gösteremeyecek duruma gelmekte ve belverdiği bölümden kopma gerçekteşmektedir.

Çoğunlukla bilgisayar ortamına bağlı bir şekilde çalışan çekme testi düzeneğinden elde edilen uzama verileri malzemenin mekanik özellikleri ve karakteri hakkında bilgi vermektedir. Bilgisayarlar tarafından, test esnasında numune üzerine uygulanan yük ve numunenin yapmış olduğu uzama değeri, eşzamanlı olarak kaydedilmektedir. Uzama değeri, video veya mekanik ekstansometreler ile de yapılabilmektedir. Deney aşamasında elde edilen uzama verileri için mühendislik gerilme-gerinim eğrisi, aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilebilir:

$$\text{Mühendislik gerilmesi} = \sigma_{müh} = \frac{P}{A_0} \quad (3.6)$$

$$\text{Mühendislik gerinimi} = \varepsilon_{müh} = \frac{l_s - l_0}{l_0} \quad (3.7)$$

Yukarıda eşitliklerde,  $P$  uygulanan yük değeri,  $A_0$  başlangıçtaki kesit alanının değeri,  $l_s$  mastarın ölçüldüğu son uzunluk değeri,  $l_0$  mastarın ölçüldüğu ilk uzunluk değerini vermektedir. Gerçek gerilme-gerinim eğrisi aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilebilir:

$$\text{Gerçek gerilme} = \sigma_g = \frac{P}{A_a} \quad (3.8)$$

$$\text{Gerçek gerinim} = \varepsilon_g = \frac{l_s}{l_0} \quad (3.9)$$

Eş. 3.8'de gösterilen  $A_a$  değeri, anlık kesit alanını ifade etmektedir. Gerçek gerilme-gerinim eğrisi ve mühendislik gerilme-gerinim eğrisi aşağıda gösterildiği gibi sabit hacim ilişkisi kurarak birbiri ile ilişkilendirilebilir:

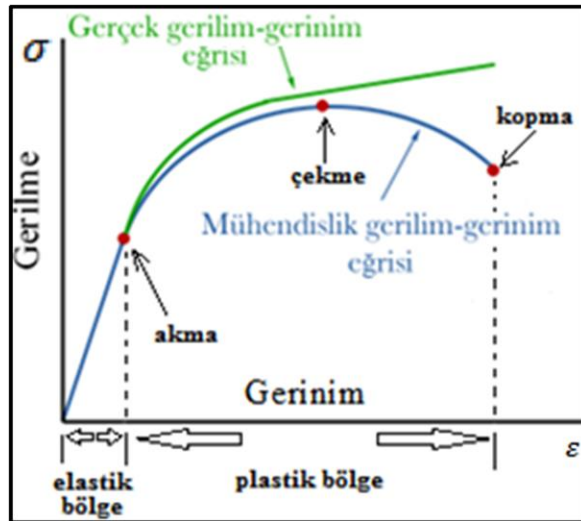
$$A_1 l_1 = A_2 l_2 = \text{sabit}$$

Yukarıdaki hacim ilişkisinde,  $A_1$  başlangıç kesit alanını,  $A_2$  son kesit alanını,  $l_1$  başlangıçtaki master uzunluğu değerini,  $l_2$  ise son master uzunluğu değerini göstermektedir. Gerçek gerilme ve gerinim değerleri sabit hacim ilişkisi kullanılarak aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_g = \sigma_{müh}(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_g = \ln(\varepsilon_{müh} + 1) \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.6-3.11'de bulunan tüm denklemler, maksimum gerilme mukavemeti değerine ( $\sigma_{max}$ ) kadar geçerli olmaktadır. Şekil 3.5'de gerçek gerilme-gerinim eğrisi ve mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 3.5. Gerçek gerilme-gerinim eğrisi ve mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin karşılaştırılması.

Elastik bölgedeki gerilme-gerinim eğrisi kullanılarak malzemenin elastik modülü (Young modülü:  $E$ ) bulunabilir. Eş. 3.12'de elastik modül hesaplama formülü verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

### 3.3.2. Basma Testi Yöntemi

Basma testlerinde uygulanan yöntem, çekme testinin tamamen tersidir. Çoğunlukla gevrek malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde, dövme ve ekstrüzyon gibi kalıcı deformasyonların öngörüldüğü durumlarda basma testleri gerçekleştirilmektedir [43]. Basma mukavemet değerlerinin, çekme mukavemet değerlerinden yüksek olduğu metal dışı malzemelerin (tuğla, beton) veya metalik malzemelerin (dökme demir, alaşımlar) mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır.

Basma testinde iki paralel tabla arasında, silindir veya küp şeklinde bulunan numunenin üzerine uygulanan basma kuvveti sonucunda meydana gelen şekil değişimleri ele alınmaktadır. Kuvvete bağlı oluşan şekil değişimleri ekstansometre yardımı ile ölçülmektedir. Basma kuvveti ile numunenin çapı artmakta ve buna bağlı olarak uzunluk azalmaktadır. Basma kuvvetinde numune kesit alanı devamlı olarak artış göstermekte olduğundan çekme testinde meydana gelen belverme durumu burada oluşmamaktadır.

Basma testi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiğinde sahip olunan elastik deformasyon bölgesi ile çekme testi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiğinde sahip olunan elastik deformasyon bölgesi birbirine çok benzerdir. Çekme testi sonucu oluşturulan diyagramda, malzemenin maksimum çekme dayanımı mevcuttur. Malzemede gerilme değeri, çekme dayanımı noktasına kadar artış halinde iken bu noktadan sonra azalma oluşmaktadır. Fakat basma testi sonucu oluşturulan diyagramda gerilme daima artış halindedir. Bu durum ise basma testinde numune kesitinin daima artmakta olmasından kaynaklanmaktadır.

### **3.3.3. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Çekme/Basma Testi Yöntemi**

Metal iş parçasının yüksek sıcaklık ve gerilim etkisine maruz kaldığı durumlarda göstermiş olduğu davranışı belirlemek için yüksek sıcaklık çekme ve basma testleri uygulanmaktadır [44–46]. Endüstri alanında kullanılan, yüksek sıcaklıklara maruz kalacak yüksek performanlı çelikler ve metaller ile birlikte jet motorları, enerji jeneratörleri gibi pek çok farklı alanda yüksek sıcaklık testleri rutin olarak uygulanmaktadır. Yüksek sıcaklık çekme ve basma testleri, yarı-statik çekme ve basma testlerinin yüksek sıcaklıklar altında gerçekleştirilmesi işlemidir.

### **3.4. ANSYS ANALİZ YÖNTEMİ**

Üretimi gerçekleştirilecek olan bir parça, üretim öncesi tasarım ve analizi olmak üzere iki farklı süreçten geçmesi gerekmektedir. Hatalı tasarım sonucu üretilen ürün veya çalışma koşullarına uygun şartları sağlamadan üretimi gerçekleştirilen ürün, hem müşteri açısından hem de üretici firma açısından büyük zararlar doğurabilmektedir. Bu nedenle tasarım ve analiz çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Özellikle yüksek maliyetli veya hassas ölçüm değerlerinin istendiği ürünlerin üretimi öncesi bu tarz süreçlerin uygulanması gerekmektedir. Ansys analiz programı, CAE (bilgisayar destekli mühendislik) yazılımları arasında en yaygın olarak kullanılan programdır. Sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayalı analiz programlarından olan Ansys, Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım) programları ile entegre bir şekilde çalışmakta olup, Computer Aided Design (CAD) programlarında yapılan tasarımların analizlerini gerçekleştirilebilir. Günümüzde Ansys analiz programı, havacılık, otomotiv, kimyasal işleme, inşaat, tüketim malları, elektronik, enerji, sağlık hizmetleri, denizcilik ve malzeme endüstrileri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [47].

Ansys, içinde küçük ve çok sayıda karmaşık geometride parça bulunduran montajlanmış cisimlerin her bir parçasını ayrı ayrı analiz edebilmektedir. Ayrı ayrı analiz edilen tüm parçalar için sonuçları birleştirerek tek ve tutarlı bir analiz sonucu vermektedir. Gerçekte sahip olunan ürünleri dijital ortamda modellemeye imkan tanıyan Ansys, bilgisayar tabanlı sayısal teknikleri kullanarak fizik problemlerini

çözmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle ve bilgisayarların imalat sanayisinde kullanılmaya başlanması ile birlikte pek çok makine elemanı kolayca incelenebilmekte ve her türlü mühendislik analizleri gerçekleştirilerek optimum sonuçlar elde edilebilmektedir. Günümüzde kullanılmaya başlayan bilgisayarların, hızlı ve yüksek kapasiteye sahip olması ile birlikte sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayalı mühendislik analiz programları, mühendisler ve işletmeciler tarafından kullanılmaktadır. Ansys analiz programının kullanımının pek çok avantajının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Ansys kullanımının avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir [48].

#### Avantajları:

- Elde edilen sonuçların duyarlılığı kontrol edilebilmektedir.
- Mühendislik veya matematiksel olarak ele alınabilmektedir.
- Karmaşık yapıya sahip geometriler kolaylıkla modellenmektedir. Malzeme, düzensiz ve homojen olmayan bir yapıda bulunsada dahi herhangi bir problem meydana gelmeden çözümlenebilmektedir.
- Üretimi yapılacak parça için herhangi bir prototip yapmaya gerek kalmadan, bilgisayar ortamında çözülebilmektedir.
- Farklı malzeme türleri kullanılabilir.
- Aynı model birden fazla problemin çözümünde kullanılabilir.

#### Dezavantajları:

- Analiz ve simülasyon işlemlerini gerçekleştirmek için bilgisayar ihtiyacı doğmaktadır.
- Analiz uygulanacak modeller genellikle kabullenmeler içermektedir.
- Analiz sonrası sahip olunan değerlerin doğruluğu, girilen verilerin doğruluğuna bağlıdır. Fiziksel verilerin veya eleman verilerinin programa yanlış işlenmesi durumunda hata kaçınılmazdır.
- Bazı modellerin analiz edilmesinde zorluklar meydana gelmektedir.
- Genelde sönüm ihmal edilmektedir.

### 3.4.1. Ansys Workbench Modülleri

ANSYS analiz yöntemini sayesinde statik analiz, dinamik analiz, termal analiz, akış analizi başta olmak üzere pek çok farklı analiz ve simülasyon işlemleri gerçekleştirilebilir. ANSYS Workbench üzerinde yer alan tüm modüller, birbiri ile bağlanabilmektedir. Bağlanan tüm modüller bir uyum içerisinde çalışmakta ve çok fonksiyonlu ileri analiz imkanı sağlamaktadır. Workbench üzerinde yer alan modüllerden bazıları hakkında temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

#### 3.4.1.1. Statik Analiz

Çoğunlukla doğrusal veya doğrusal olmayan şekillerde, statik yüklemeye maruz kalan malzemenin yer değiştirme, gerilme vb. davranışlarını belirleyen analiz türüdür. Statik analiz işleminin gerçekleştirilmesi ile malzemenin, yapının veya bir sistemin üzerine gelen kuvvet ve darbeleri, malzemenin yapısını, yapıyı veya sistemin yapısını bozmadan önce tespit edilmesi sağlanabilir. Statik analiz sayesinde önceden tespit edilen problemler engellenebilir. Günümüzde otomotiv endüstrisi, makine endüstrisi, savunma sanayi, robotik otomasyon endüstrisi, inşaat endüstrisi, gemi endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi gibi pek çok alanda statik analiz kullanılmaktadır. Statik analiz zamana bağlı bir analiz değildir; anlık analizdir. Durağan yükleri ve kısıtlamaları anlık olarak analiz etmektedir. Statik analizi sonucunda, analizi gerçekleştirilen malzemenin, yapının veya bir sistemin aşağıdaki özellikleri tespit edilebilmektedir.

- Malzemenin, yapının veya sistemin karşı koyabileceği yük değeri,
- Malzemenin, yapının veya sistemin ne kadar sehim yapacağı,
- Malzeme, yapı veya sistem üzerinde oluşan maksimum, minimum ve eşdeğer gerilme değerlerinin seviyesi,
- Malzemenin, yapının veya sistemin ne kadar güvenilir olduğu.

### 3.4.1.2. Dinamik Analiz

Malzemenin, yapının veya bir sistemin üzerine, hareket eden zamana bağı olarak gelen yüklerin oluşturmuş olduğu gerilim ve gerinim değerlerini belirleyen analiz türüdür. Ayrıca hareket analizleri de gerçekleştirilmektedir. Zamana bağı veya belirli bir frekans değerine göre çözüm istenildiği durumlarda dinamik analiz kullanılmaktadır. Dinamik analizden, statik analizde olduğu gibi otomotiv endüstrisi, makine endüstrisi, savunma sanayi, robotik otomasyon endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi gibi alanlarda yararlanılmaktadır. Dinamik analiz, zamana bağı olmasından dolayı zor ve zaman almaktadır. Bununla birlikte yüksek kapasiteli bilgisayar ihtiyacı doğurmaktadır. Dinamik analiz sonucunda analizi gerçekleştirilen malzeme, yapı veya bir sistem için aşağıdaki cevaplar elde edilebilir.

- Malzemenin, yapının veya sistemin doğal frekans değeri,
- Malzemenin, yapının veya sistemin üzerinde ne zaman deformasyon gerçekleşeceği,
- Malzemenin, yapının veya sistemin üzerinde oluşan değişken yüklemelere karşı vermiş olduğu tepki.

### 3.4.1.3. Termal Analiz

Malzemeler ısınması sonucu genişmekte ve bu genişleme sonrasında malzeme üzerinde ısıl gerilmeler meydana gelmektedir. Termal analiz ısı enerjisi nedeniyle malzeme üzerinde oluşabilecek deformasyonu incelemek ve önceden engellemek adına uygulanmaktadır. Termal analiz yöntemindeki asıl amaç malzeme üzerinde oluşan sıcaklığın dağılım alanlarının ve bu alanların etkilerinin incelenmesidir. Bina içi havalandırma sistemlerinde, elektronik sistem ve cihazlarda, otomotiv endüstrisinde, makine endüstrisinde, ısıtma veya soğutma sistemlerinde, uzay, havacılık ve savunma sanayisinde termal analiz yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Zamana bağı ve zamandan bağımsız olmak üzere iki çeşit termal analiz metodu mevcuttur. Malzemenin, yapının veya bir sistemin termal denge sıcaklığı bulunacak ise zamana bağı (transient), denge süresi önemli değil ise zamandan bağımsız (steady-state) metod kullanılmaktadır.

#### **3.4.1.4. Akış Analizi**

Ansys analiz programı katı modeller dışında sıvı, gaz ve yarı akışkan haldeki maddelerin analizlerini de gerçekleştirebilmektedir. Akış analizi, gelişmiş akışkanlar dinamiği hesaplarını yapabildiği bir modüldür. Ansys akış analizi, akış, ısı transferi, türbülans ve endüstriyel uygulamalarda, modelleme ihtiyaçlarında kullanılmaktadır. Günümüzde akış analizi uçak, gemi, tren ve otomobil gibi taşıtlar için hava ve su ortamındaki analizi, uçak kanatları üzerindeki hava akış analizi, herhangi bir canlılığın dolaşım sistemi analizi, türbinlerdeki akış analizi, bina tesisatı içerisinde su akış analizi gibi pek çok analizin gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Akış analizi ile gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde ürün imalat öncesi geliştirilebilmektedir. Ayrıca akış sonucu oluşabilecek hasarların önüne geçilmektedir. Hava akış analizi işlemi de akış analizi ile gerçekleştirilebilmektedir.

#### **3.4.1.5. Harmonik Analiz**

Malzemenin, yapının veya bir sistemin üzerine zamanla değişen şekilde uygulanan yüklere karşı verdiği cevabı belirlemek için uygulanan analiz türüdür. Ansys, belirli bir frekans seviyesinde hareket eden sinüzoidal değişken yüklere, kararlı durum sinüzoidal cevabını belirleyerek, bir yapı üzerinde harmonik analiz işlemi yapabilmektedir.

#### **3.4.1.6. Modal Analiz**

Modal analiz, ansys üzerinde titreşen bir sistemin dinamik davranışlarını gösteren matematik modelini oluşturmak için gereken parametreleri (doğal frekans, mod şekillerini, titreşim biçimlerini, sönüm vb.) bulmak için kullanılmaktadır. Yarı-statik analiz türünde, malzeme, yapı veya sistem üzerine uygulanan kuvvet, çok yavaş bir hız değerinde uygulanmakta ve bu sebeple hızlanma değeri ihmal edilmektedir. Dinamik analizde ise ivmenin oluşturmuş olduğu etki göz ardı edilememektedir. Modal analiz türü yarı-statik ve dinamik analiz türlerinin aksine sistemin yanıt sınırlarına (ne zaman, ne olur ve maksimum yer değiştirme vb.) genel bir akış olanağı sağlamaktadır.



### 3.4.1.7. Spektrum Analiz

Bir yanıt spektrumu veya bir spektral güç yoğunluğu (PSD) girişi (rastgele titreşimler) nedeniyle oluşan gerilmeleri hesaplamak için kullanılan modal analizin bir uzantısıdır.

### 3.4.2. Ansys Analiz Adımları

ANSYS üzerinde analizi gerçekleştirilecek malzemenin, yapının veya bir sistemin belirli adımları izlemesi ile analizi gerçekleştirilmektedir. Ansys workbench üzerinde yer alan tüm analiz türleri için bu kural geçerlidir. Analizi gerçekleştirilecek olan malzeme, yapı veya bir sistem için izlenmesi gereken adımlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Malzeme geometrisi hazırlama
- Malzemeye mesh örme
- Malzeme modeli tanımlama
- Yük ve sınır şartları belirleme
- Çözüm ayarlama ve çözüm
- Sonuç değerlendirme ve rapor oluşturma

Tüm analiz türleri için birinci adımda analizi yapılacak parçanın Ansys SpaceClaim programında veya diğer CAD (Computer Aided Desing) programlarında 3D tasarımı gerçekleştirilir. Genellikle tasarımları gerçekleştirmek için Solidworks, Catia V5 gibi CAD programları kullanılmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen parça Ansys Workbench yazılımına import edilerek yüklenmektedir. İmport işlemi sonrasında yüklenen parça üzerinde herhangi bir hata, eksik veya fazla bölge var ise parça geometrisi düzenlenerek analize hazır hale getirilir. Ansys sistemine yüklenen parça için ikinci adımda mesh örme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemde, parça için uygun olan mesh örme işlemi gerçekleştirilmektedir. Mesh, hücrelerden ve noktalardan oluşan bir ağıdır. Mesh, karmaşık bir geometriye sahip parçayı, simülasyonun yürütüleceği küçük parçalara ayırarak optimum bir analiz imkânı sağlamaktadır. Mesh örme işlemi sonrasında üçüncü aşamada malzeme modeli tanımlanmaktadır.

Bu adımda malzemeye ait elastikiyet modülü, yoğunluğu, akma dayanımı gibi değerler girilerek malzeme modeli oluşturabilir veya direkt olarak kütüphanede hazır tanımlı bir şekilde bulunan malzeme modeli kullanılabilir. Dördüncü adımda analizi gerçekleştirilecek parça için yük ve sınır şartları belirlenir. Sonrasında gerçek çalışma koşullarına uygun bir şekilde yük ve sınır şartları (parça üzerine uygulanan kuvvet ve momentler, yer çekimi ivmesi gibi yükler, sürtünme kuvveti vb.) atanmaktadır. Ayrıca burada karmaşık yapıya sahip parçanın kontak bölgelerinde düzenlenmektedir. Beşinci adımda çözüm ayarları gerçekleştirilir ve parça çözüme bırakılır. Altıncı ve son adımda ise çözümden elde edilen gerilme değerleri ve alanları, deformasyon bölgeleri, yorulma ömrü, gerinim değerleri gibi pek çok sonuç resimlenerek raporlanmaktadır. Sonrasında uzmanlar tarafından bu raporlardan alınan bilgiler doğrultusunda gerekli yorumlamalar yapılmakta, kararlar alınmakta ve öneriler sunulmaktadır.

### **3.4.3. Ansys Analiz Raporu Hazırlama ve Yorumlama**

Ansys analiz raporlarının hazırlanması ciddiyet gerektiren bir alandır. Bu tarz çalışmalar bilimsel disiplin altında yürütülmektedir. Rapor oluşturulurken istenilen herhangi bir standart mevcut ise öncelikle bu standart için belirlenen detaylar incelenmeli ve bu doğrultuda ilerlenmelidir. Ayrıca raporların, yüksek lisans tezi veya doktora tezi formatında hazırlanması önemlidir. Rapor kapağı, sayfa numaraları, içindekiler kısmı, resimler ve alt yazıları, şekiller ve numaraları gibi pek çok alan uygun bir formatta olmalıdır. Analiz programından elde edilen sonuçlar doğrultusunda hazırlanan rapor, alınacak kararlar ve üzerine sunulacak görüş önerileri nedeni ile ayrı bir değere sahiptir. Analiz işlemi gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçların yorumlanması, karar verilmesi ve öneriler sunulması gerekmektedir. Bu ihtiyaçları gidermek için mühendislik bilgisine ve tecrübesine ihtiyaç söz konusudur. Ayrıca karar verme aşamasında, alınacak kararların uygunluğu için öncelikle deneysel sonuçlar veya analitik çözümler ile kıyaslanması gerekmektedir.

## BÖLÜM 4

### DENEY MALZEMESİ VE ÇALIŞMA AŞAMALARI

Çalışma kapsamında yüksek mukavemet değerlerine sahip ve otomotiv sektöründe pek çok alanda güvenlik anlamında kullanılan 33MnCrB5 çeliğinin malzeme modelinin belirlenmesi ve uygulanabilirliği üzerine incelemeler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen işlemler beş çalışma aşamasından meydana gelmektedir:

- Malzemenin tedariki,
- Tedarik edilen malzemelerin üzerinde tornalama işlemi gerçekleştirilerek gerekli numunelerin oluşturulması,
- Numunelerin yarı-statik ve yüksek sıcaklık testlerine tabi tutulması ile gerekli malzeme model parametrelerinin belirlenmesi,
- Ansys programında, numunenin gerekli model parametrelerinin kullanılması ile analizlerinin gerçekleştirilmesi,
- Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile Ansys analiz programından elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.

#### 4.1. DENEY MALZEMESİ

Ana malzeme olarak yüksek mukavemet değerine sahip olan bor katkı maddesini içeren 33MnCrB5 çeliği kullanılmıştır. 33MnCrB5 çeliğinden yüksek sıcaklık ve yarı-statik çekme testlerinde kullanılmak üzere 20 mm çapında ve yaklaşık 900 mm uzunluğunda 2 adet olarak temin edilmiştir. Şekil 4.1'de deneylerde kullanılan malzemeye ait görsel mevcuttur. 33MnCrB5 çeliğinin kimyasal bileşimi %97,3 Fe, %1,30 Mn, %0,36 C, %0,299 Cr, %0,245 Si, %0,223 Cu, %0,103 Ni, %0,0531 Mo, %0,0425 Ti, %0,0216 Al, %0,0151 Sn, %0,017 P, %0,0074 Co, %0,0067 W, %0,0022 S, %0,0016 V, %0,0015 B, %0,0013 Pb şeklindedir.

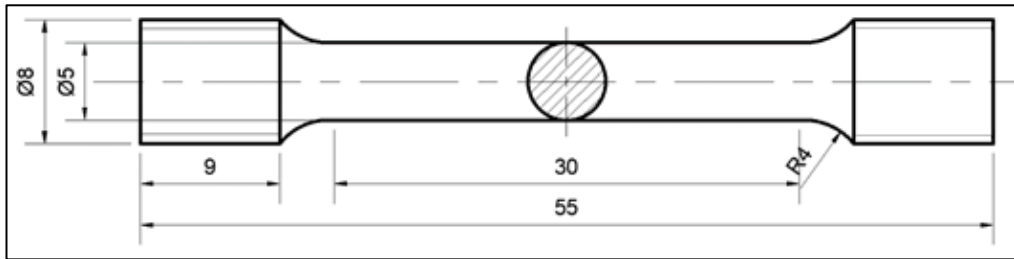


Şekil 4.1. 33MnCrB5 çelik malzemesi.

## 4.2. TESTLER İÇİN GEREKLİ NUMUNELERİN OLUŞTURULMASI

### 4.2.1. Yarı-statik ve Yüksek Sıcaklık Çekme Testleri için Numune Tasarımı

Yarı-statik ve yüksek sıcaklık değerlerinde uygulanan çekme testleri için kullanılan numune, ölçüleri ile birlikte Şekil 4.2'de verilmiştir. Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü bünyesinde bulunan çekme testi cihazına uygun bir şekilde TS EN ISO 6892-1 ve TS 206 standardında özel bir firmada numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 4.2. Yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testi numune tasarımı.

Oda sıcaklığında (24 °C),  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde yarı-statik ve 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklarında yüksek sıcaklık çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.2. Torna Tezgâhında Numune Oluşturma ve Kesici Takım

Numuneler Jetco JML-5020B marka torna tezgâhlarında oluşturulmuştur. Numune oluşturmak için Korloy NC3120 marka kesici uç kullanılmıştır. Şekil 4.3'te numune oluşturma sırasında torna tezgâhından alınan görsel mevcuttur.



Şekil 4.3. Torna tezgâhı numune oluşturma.

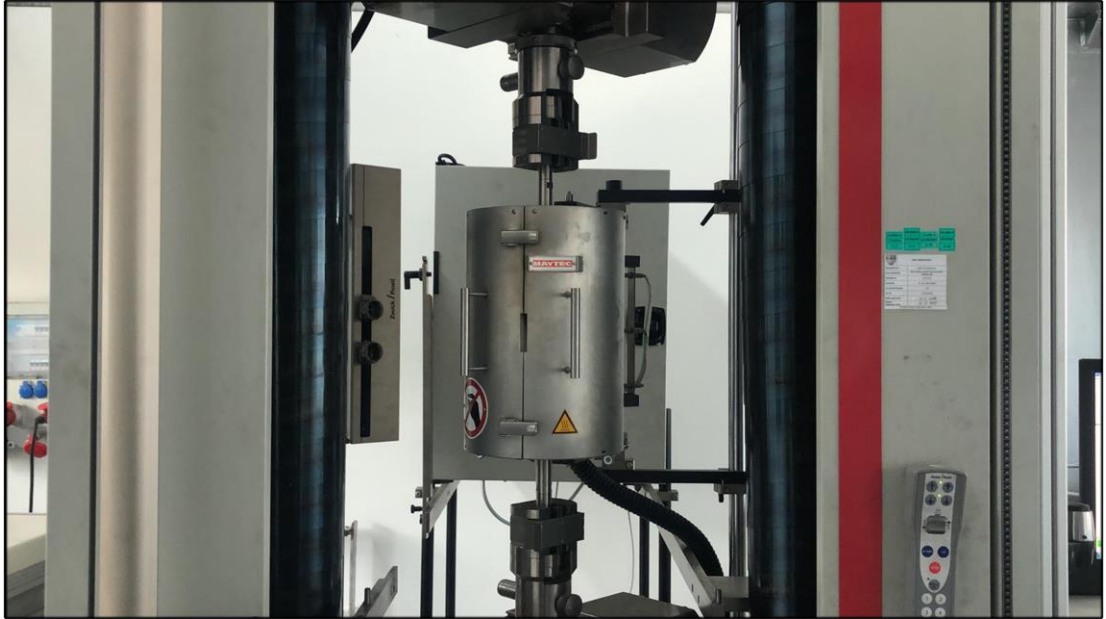
Oda sıcaklığında (24 °C),  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde yarı-statik çekme ve 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklarında yüksek sıcaklık çekme testlerini gerçekleştirmek için Şekil 4.2'de verilen çap ve boy değerlerinde oluşturulan numunelere ait görsel Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri için oluşturulan numuneler.

### 4.3. YARI-STATİK ÇEKME TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

33MnCrB5 bor katkılı çeliğin yarı-statik çekme kuvvetinde sahip olduğu değerleri belirlemek için Karabük Üniversitesi Demir-Çelik Enstitüsünde bulunan Zwick/Roell Z600 Universal çekme-basma test cihazı kullanılmıştır. TS EN ISO 6892-1 ve TS 206 standartlarına uygun bir şekilde ve sınır şartları dikkate alınarak gerçekleştirilen çekme testi için kullanılan çekme-basma test cihazı Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Yarı-statik çekme-basma test cihazı.

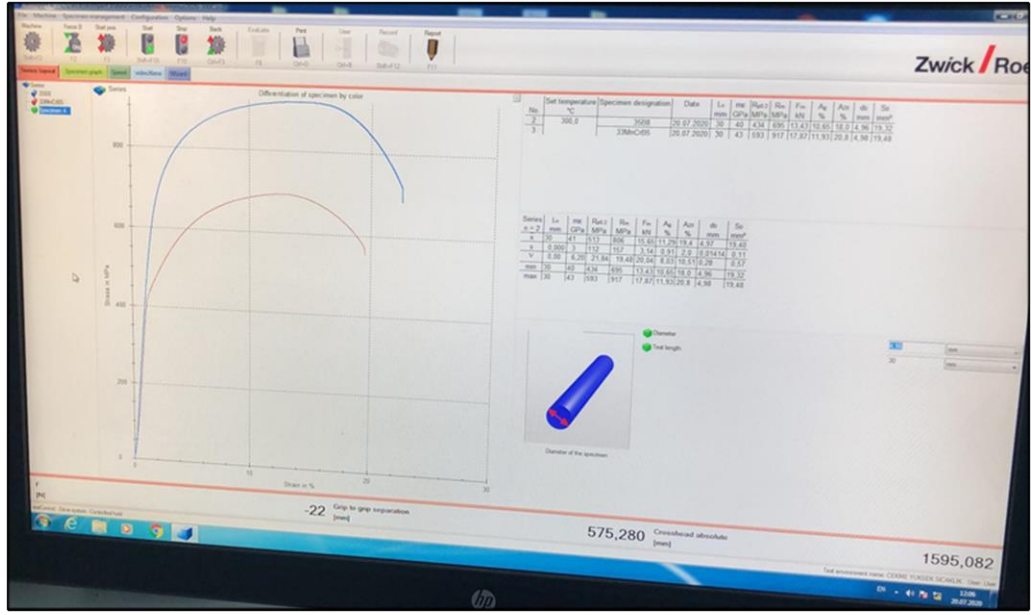
33MnCrB5 bor katkılı çelikten elde edilen numuneler oda sıcaklığında (24 °C) sırasıyla  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde yarı-statik çekme testlerine tâbi tutulmuştur. Çekme testini gerçekleştirmek için standartlarına uygun bir şekilde hazırlanan deney numuneleri Şekil 4.6'da verilen numune tutucuya bağlanmaktadır. Ardından çekme testi cihazı gövdesine bağlanan numune tutucu, iyice sıkıştırılarak sabitlenmekte ve sonrasında her bir numune sırasıyla (24 °C) sıcaklıkta,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde kopuncaya kadar çekilmektedir.



Şekil 4.6. Numune tutucu.

Çekme testi cihazları ile yapılan deneyler sonucunda, malzemenin sahip olduğu mekanik özellikler ve davranışları belirlenmektedir. Genellikle bilgisayar ile entegre çalışan test cihazı sayesinde uygulanan kuvvet ve malzemenin bu kuvvete karşı göstermiş olduğu uzama değerleri bir grafik olarak elde edilebilir. Zwick/Roell test cihazında testXpert II yazılımı kullanılarak 33MnCrB5 bor katkılı çelik için akma gerilmesi, çekme gerilmesi, uzama miktarı gibi sahip olduğu tüm değerler bulunmuştur. Şekil 4.7'de test cihazının entegre çalıştığı bilgisayar ekranından alınan görüntü verilmiştir.





Şekil 4.7. Zwick/Roell test cihazı bilgisayar ekran görüntüsü.

Şekil 4.8’de verilen görsel, oda sıcaklığında (24 °C) ve üstten alt kısma doğru sırasıyla  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde gerçekleştirilen çekme testi sonucu kopan numunelere aittir.



Şekil 4.8. Oda sıcaklığında (24 °C),  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız değerlerinde çekme testi uygulanan numuneler.



#### 4.4. YÜKSEK SICAKLIKLARDA ÇEKME TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

33MnCrB5 bor katkılı çeliğin yüksek sıcaklık altında sahip olduğu değerleri belirlemek üzere çekme testlerini gerçekleştirmek için Karabük Üniversitesi Demir-Çelik Enstitüsünde bulunan Zwick/Roell Z600 Universal çekme-basma test cihazı kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık çekme testlerini gerçekleştirmek için çevresi kapalı bir şekilde bulunan test cihazının iç kısmını ısıtmak gerekmektedir. 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de gerçekleştirilecek çekme testleri için kullanılan ısıtma fırını görseli Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Yüksek sıcaklık çekme testi için ısıtma fırını.

Yüksek sıcaklık çekme testleri için test cihazı ünitesine bağlanan numeneler 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklarında çekme testlerine tabii tutulmuştur. Çekme testleri sonucunda malzemenin her bir sıcaklık değeri için göstermiş olduğu akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve uzama değeri belirlenmiştir.

Şekil 4.10'da verilen görsel referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ve üstten alt kısma doğru sırasıyla 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıkları için çekme testi uygulandıktan sonra kopan numunelere aittir.

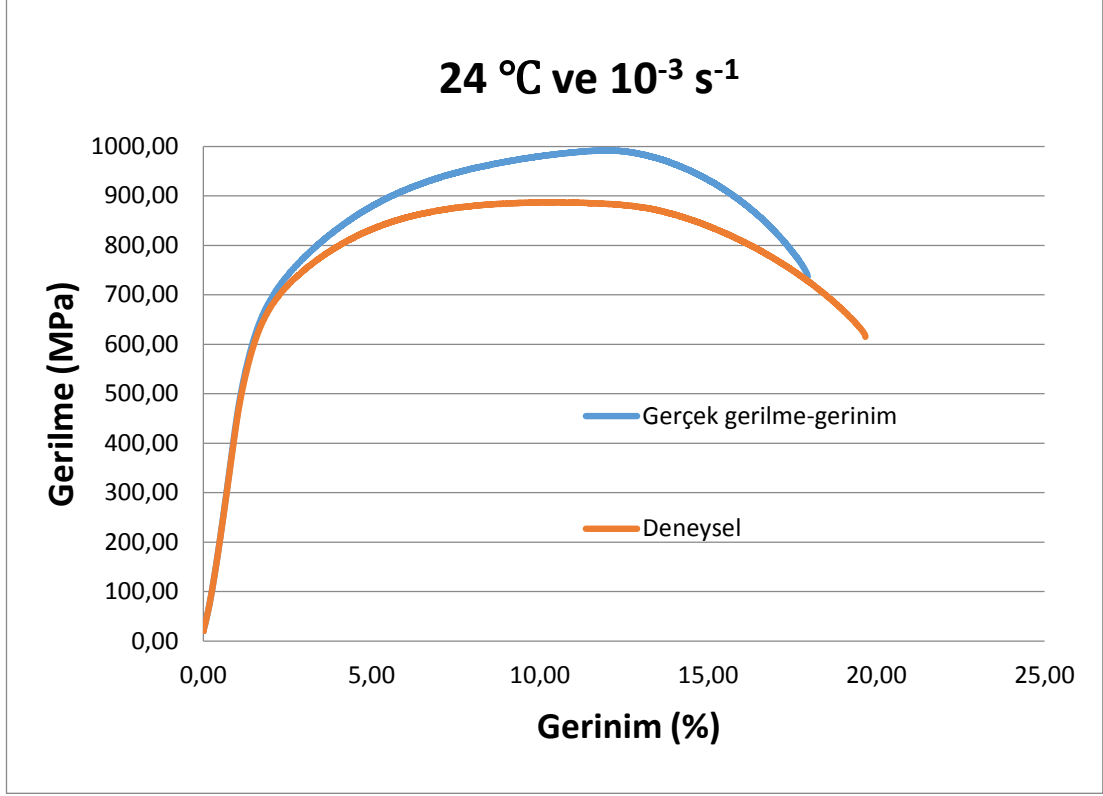


Şekil 4.10. Referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıkları için çekme testi uygulanan numuneler.

#### **4.5. 33MnCrB5 İÇİN JOHNSON-COOK MALZEME PARAMETRELERİNİN BULUNMASI**

##### **4.5.1. Johnson-Cook malzeme modeli için “A, B ve n” parametrelerinin belirlenmesi**

Yarı-statik çekme testleri, numunenin model parametrelerini oluşturmak adına, Johnson-Cook malzeme modelinde bulunan A, B ve n parametrelerini belirlemek için gerçekleştirilmektedir. Johnson-Cook malzeme modelinde bulunan A parametresi referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) akma gerilmesini vermektedir. Standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre oda sıcaklığı ve referans gerinim hız değeri (24 °C ve  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) için tespit edilen akma gerilmesi değeri, 627 MPa'dır. Akma gerilmesi değeri Şekil 4.11'deki grafik kullanılarak elde edilmiştir.



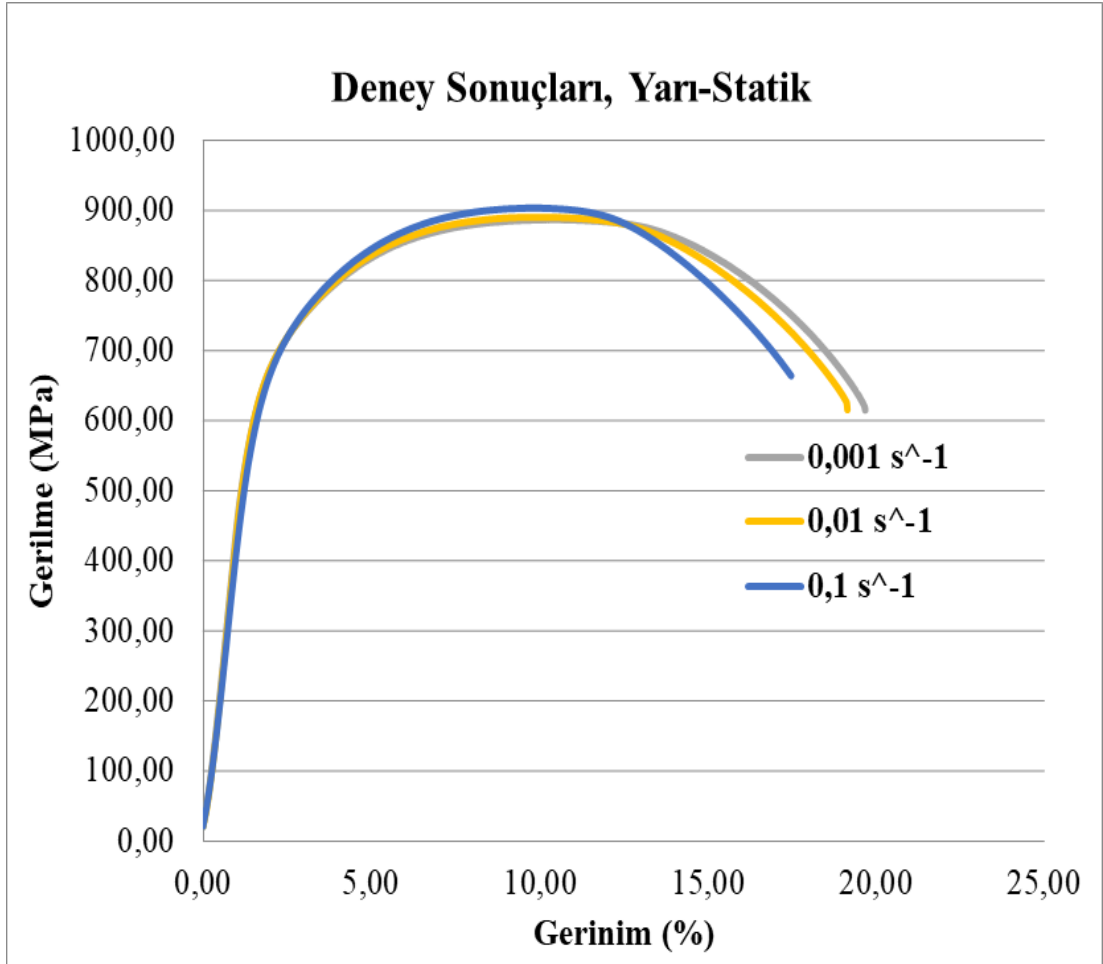
Şekil 4.11. Oda sıcaklığı ve referans gerinim hız değeri ( $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ) altında gerçekleştirilen çekme testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafiği.

B ve n parametrelerini bulmak için öncelikle referans gerinim hızında ( $10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ) gerçekleştirilen deneyde, akma gerilmesinin meydana geldiği kısım sıfır gerinim olarak kabul edilmektedir. Daha sonrasında B ve n sabitleri, uzama miktarında ve gerilme değerlerinde meydana gelen artışa bağlı olarak belirlenmektedir. Belirlenen değerler, kesin sonuçlar doğurmamakla birlikte akma gerilmesi ile maksimum gerilme arasında olmaktadır. Kesin sonuçların elde edilebilmesi için gerçek gerilme-gerinim eğrisi gerekmektedir. Gerçek gerilme-gerinim eğrisi eşitlik 3.6-3.11 kullanılarak bulunmuştur. Ayrıca mühendislik gerilme-gerinim eğrisi yarı-statik çekme testi sonucu elde edilmiştir. Mühendislik gerilme-gerinim eğrisi ile gerçek gerilme-gerinim eğrisinin sahip olduğu akma noktalarının aynı olduğu Şekil 4.11'de görülmektedir. Şekil 4.11'e göre %2.5, %5 %7.5 ve %10 gerinim değerlerinde, gerilme değerlerinin sırası ile 838, 927, 970 ve 991 MPa olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu ortalama gerilme-gerinim değerleri Eş. 4.1'de belirtilen denklemde uygun yerlerde kullanılarak B sabiti 916 MPa ve n sabiti 0,333 olarak bulunmuştur.

$$\sigma^0 = (A + B(\varepsilon^p)^n) \quad (4.1)$$

#### 4.5.2. Johnson-Cook malzeme modeli için "C" parametresinin belirlenmesi

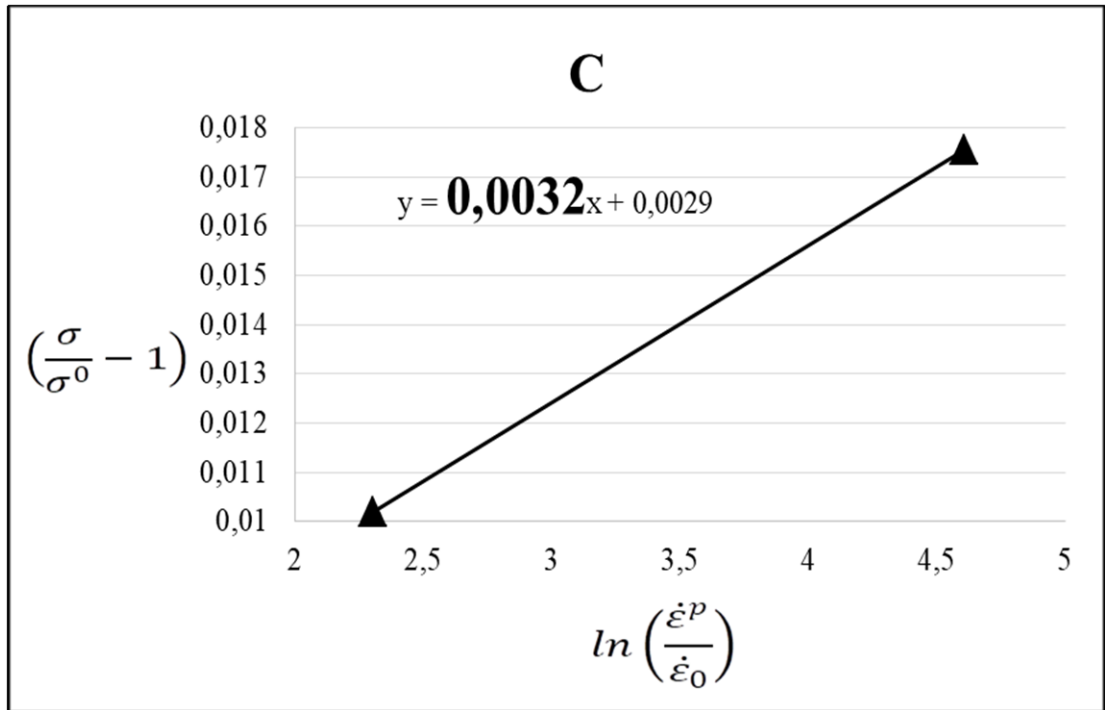
JC malzeme modeli oluşturmak için gerekli olan "C" parametresi, gerinim hız sabitini göstermektedir. Gerinim hızlarında oluşan artış ile gerilme değerlerinde meydana gelen değişimler, Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Johnson-Cook sıcaklık sabitinin "C" parametresinin belirlenmesi için sadece akma noktaları kriter olarak alınmaktadır. Bu nedenle sadece mühendislik gerilme-gerinim eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 4.12. Oda sıcaklığı (24 °C) değerinde 10<sup>-1</sup>, 10<sup>-2</sup> ve 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> gerinim hızlarında gerçekleştirilen çekme testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafiği.

Oda sıcaklığı (24 °C) değerinde  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızlarında gerçekleştirilen çekme testlerinde sırasıyla 627, 632 ve 638 MPa akma gerilmesi olduğu görülmüştür. Bu durum gerinim hızlarında oluşan artışın akma gerilmesi değerlerini de arttırdığını göstermektedir. Literatürde de aynı durum söz konusu olmaktadır [49–51]. Şekil 4.13’deki grafik Eş. 4.2’de belirtilen denklem kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen grafikten *C* sabiti 0,0032 olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sigma^0 \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (4.2)$$

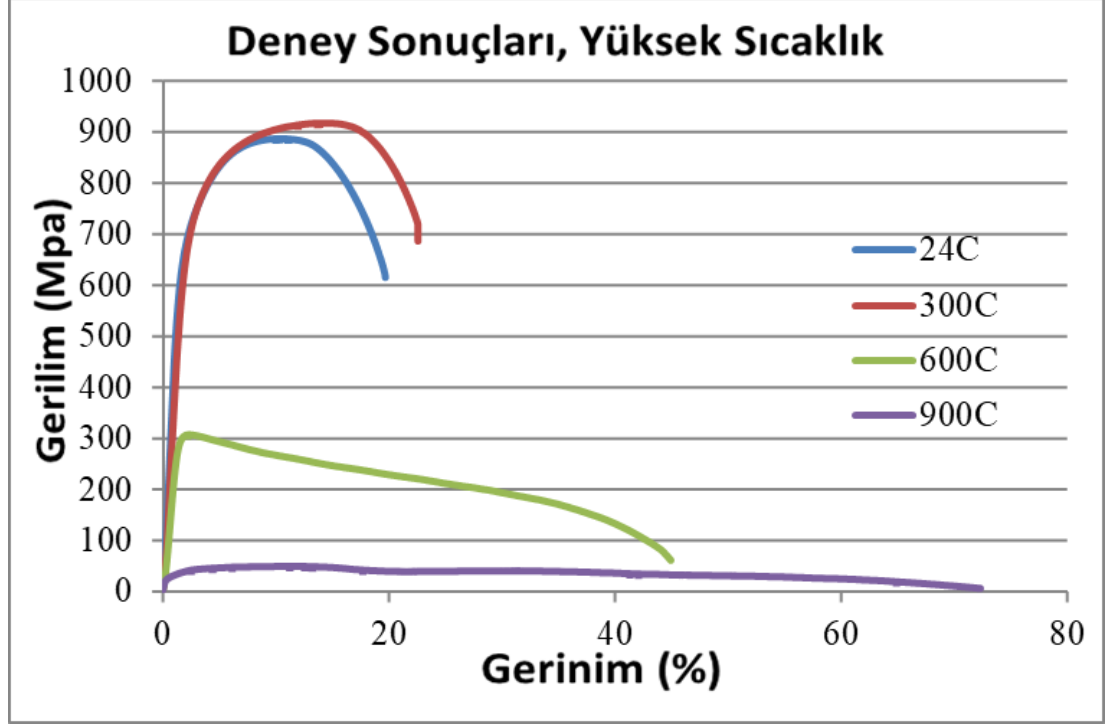


Şekil 4.13. ‘C’ parametresi belirlemek için logaritmik ilişki.

#### 4.5.3. Johnson-Cook malzeme modeli için ‘m’ parametresinin belirlenmesi

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen çekme testleri, dinamik bir uygulama olmasından dolayı dislokasyon yoğunluğunda devamlı olarak bir artış olmakta ve malzemenin yüksek sıcaklıktan etkilenmesi nedeni ile çekme dayanımı gözle görülür bir seviyede düşüş göstermektedir. JC malzeme modelinde ‘m’ parametresi sıcaklık sabitini ifade etmektedir. Johnson-Cook malzeme modelinde ‘m’ parametresinin belirlenmesi işleminde 900 °C ve daha az sıcaklıkların kullanılması uygun

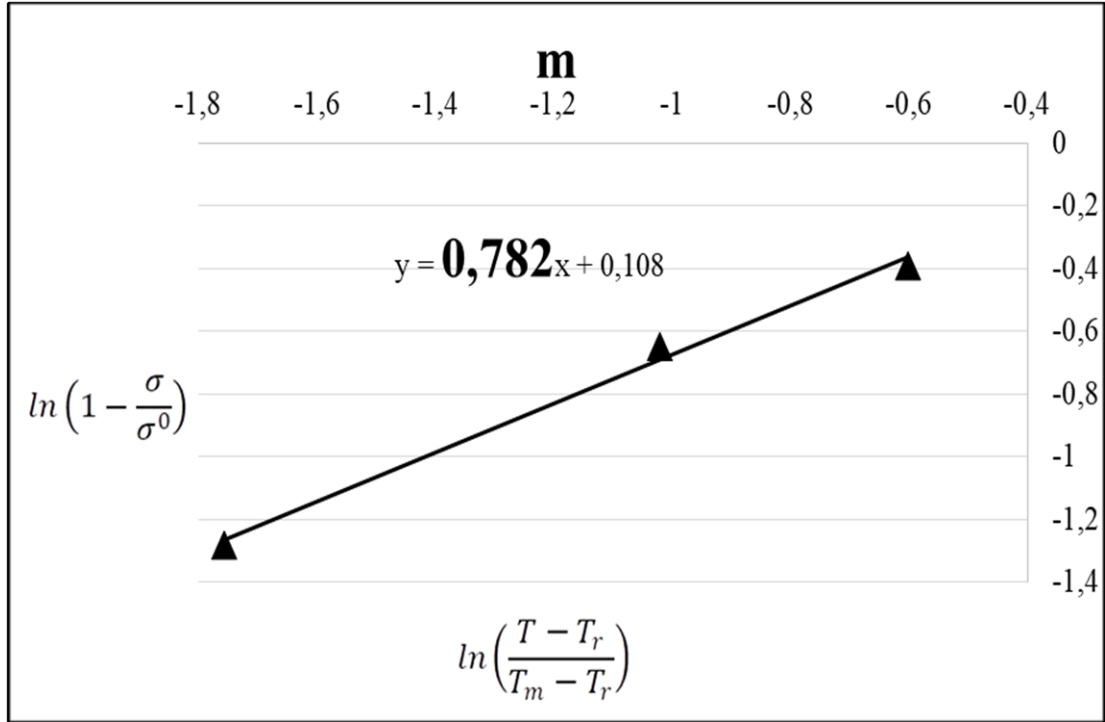
bulunmuştur. Şekil 4.14’de referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) gerçekleştirilen deneylerde, uygulanan dört farklı sıcaklık değeri (24 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C) için oluşan gerilme-gerinim grafiği verilmiştir. Johson-Cook malzeme modelinde ‘‘m’’ parametresinin belirlenmesi için sadece akma noktaları kriter olarak alınmaktadır. Bu nedenle sadece mühendislik gerilme-gerinim eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 4.14. Referans gerinim hız ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) değerinde, 24 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C değerlerine göre gerilme-gerinim grafiği.

Şekil 4.14’deki grafikten 24 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde malzemenin sahip olduğu akma gerilmeleri sırasıyla 627, 593, 287 ve 32 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 4.15’deki grafik, Eş. 4.3’de belirtilen denklem kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen grafikten  $m$  sabiti 0,782 olarak bulunmuştur.

$$\sigma = \sigma^0 \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (4.3)$$



Şekil 4.15. ‘ $m$ ’ parametresi belirlemek için logaritmik ilişki.

Testler sonrası 33MnCrB5 bor katkılı çelik için oluşturulan Johnson-Cook malzeme parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 33MnCrB5 çekme testi için JC parametreleri.

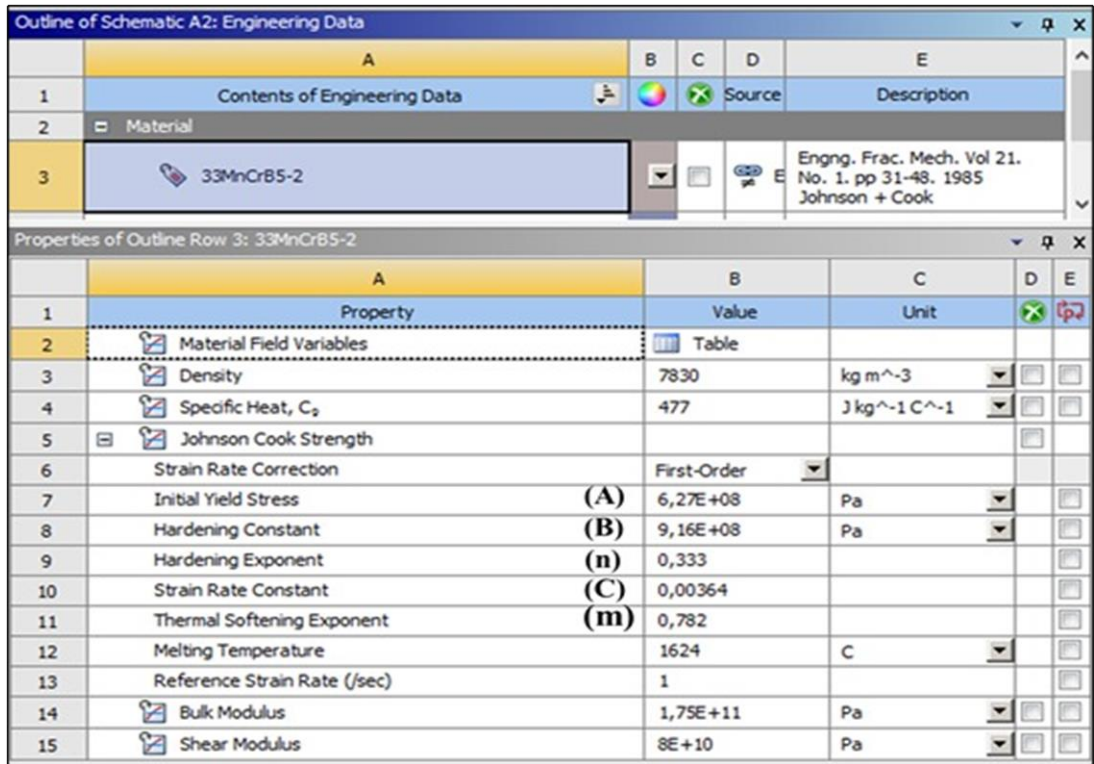
Malzeme	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$n$	$C$	$M$	$\dot{\epsilon}_0$ ( $s^{-1}$ )
33MnCrB5	627	916	0,333	0,0032	0,782	$10^{-3}$

#### 4.6. YARI-STATİK VE YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ ALTINDA ÇEKME TESTLERİ SİMÜLASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

33MnCrB5 bor katkılı çelik için gerçekleştirilen yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri sonucunda belirlenen Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri ile ansys malzeme kütüphanesinde oluşturulan malzemenin, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ansys analiz proramında çekme testi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çekme testi simülasyonları süreci boyunca yapılan işlemler aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

#### 4.6.1. Kütüphane Malzeme Oluşturma

Çekme testi sonuçlarına göre belirlenen Johnson-Cook model parametreleri ( $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  ve  $m$ ), ansys analiz programında bulunan malzeme kütüphanesine, çekme testi simülasyonlarının gerçekleştirileceği deney malzemesinin sahip olduğu özellikler olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.11-4.15 kullanılarak belirlenen Johnson-Cook model parametrelerinin, kütühaneye simülasyon malzemesi özellikleri olarak tanımlandığına dair görsel Şekil 4.16’da verilmiştir.



Outline of Schematic A2: Engineering Data				
A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	33MnCrB5-2		Engng. Frac. Mech. Vol 21. No. 1. pp 31-48. 1985 Johnson + Cook	

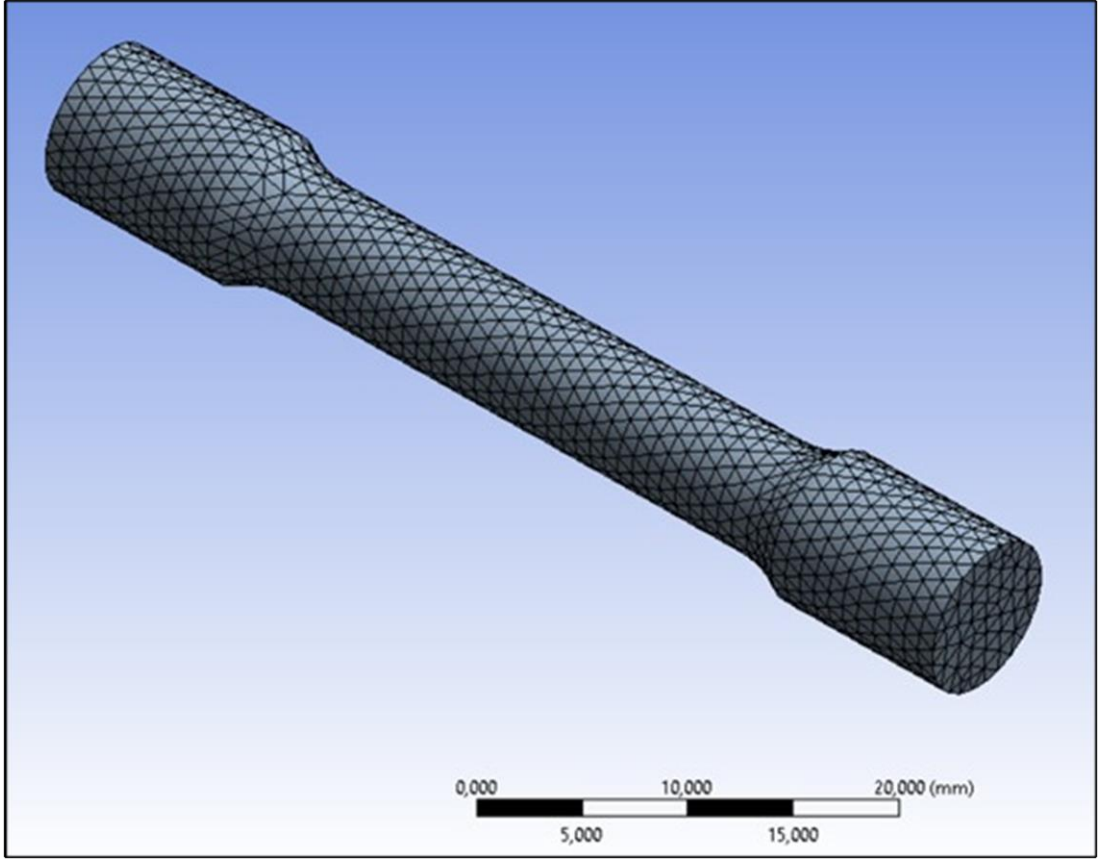
Properties of Outline Row 3: 33MnCrB5-2				
A	B	C	D	E
1	Property		Value	Unit
2	Material Field Variables		Table	
3	Density	7830	kg m <sup>-3</sup>	
4	Specific Heat, C <sub>p</sub>	477	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	
5	Johnson Cook Strength			
6	Strain Rate Correction		First-Order	
7	Initial Yield Stress (A)	6,27E+08	Pa	
8	Hardening Constant (B)	9,16E+08	Pa	
9	Hardening Exponent (n)	0,333		
10	Strain Rate Constant (C)	0,00364		
11	Thermal Softening Exponent (m)	0,782		
12	Melting Temperature	1624	C	
13	Reference Strain Rate (/sec)	1		
14	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa	
15	Shear Modulus	8E+10	Pa	

Şekil 4.16. 33MnCrB5 malzemesini kütüphanede tanımlama.

#### 4.6.2. Malzeme Geometrisi Hazırlama ve Mesh Örne

Çekme testi simülasyonu gerçekleştirilecek malzemenin geometrisini oluşturmak için Şekil 4.2’deki tasarım görsel, Solidworks 15.0 çizim programı kullanılarak elde edilmiş olup, ansys analiz programına aktarılmıştır. Sonrasında programa aktarılan model için belirli hücrelerden ve noktalardan oluşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Simülasyon işlemlerinin gerçekleşeceği şekilde küçük parçalara ayrılmış şekilde mesh örülen model için görsel Şekil 4.17’de verilmiştir.

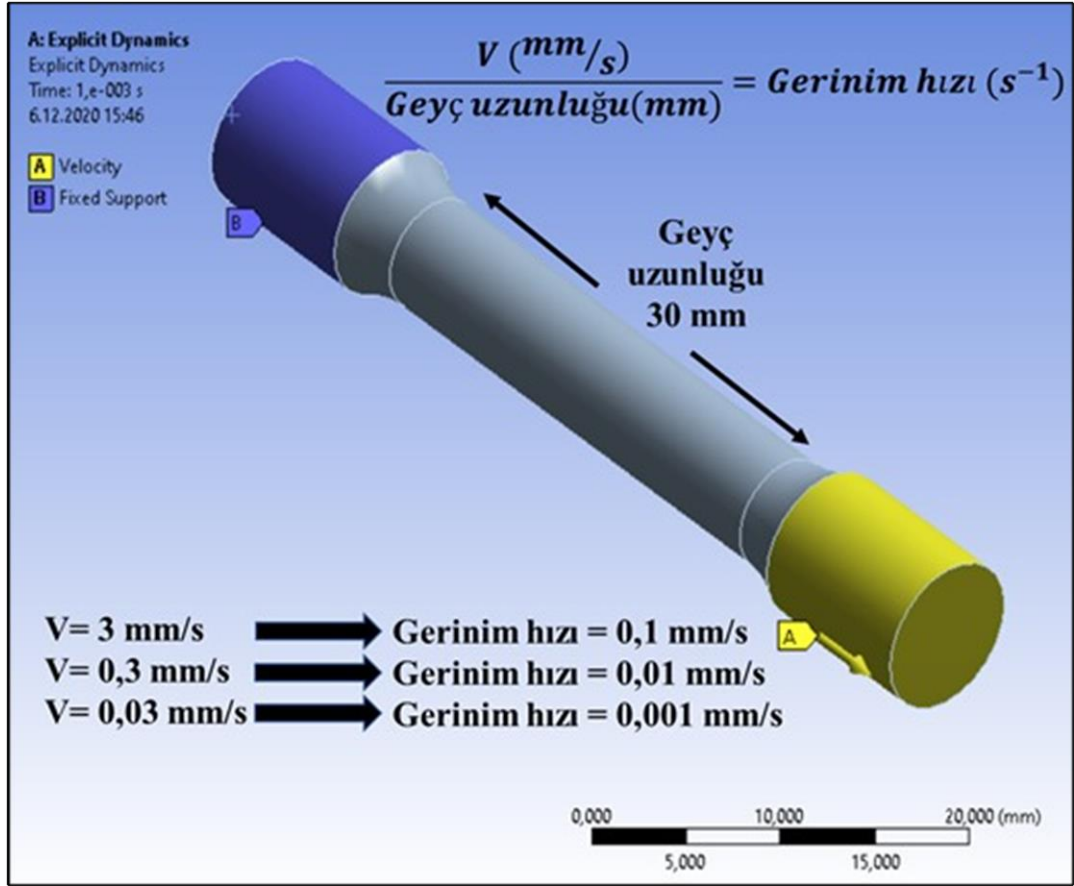




Şekil 4.17. Mesh örülen malzeme modeli.

#### 4.6.3. Malzeme Modelinin, Yük ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Malzeme oluşturma işlemi sonrasında kütüphanede tanımlı bir şekile bulunan 33MnCrB5 bor katkılı çeliğe ait özellikler, simülasyon programında, Şekil 4.2'deki ölçülerde geometisi hazırlanan malzeme için tanımlanmıştır. Ardından malzemenin çalışması istenen sıcaklık ve gerinim hız değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.18'de malzemenin çekme testi simülasyonu öncesi belirlenen yük ve sınır şartları verilmiştir.



Şekil 4.18. Yük ve sınır şartlarının belirlenmesi.

#### 4.6.4. Çözüm Bulma ve Raporlama

Sıcaklık ve gerinin hızı gibi sınır şartları belirlenen malzemenin, bu koşullar altında göstereceği tepkiyi tespit etmek için istenilen çözümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel yöntemler ile karşılaştırılmak üzere bir rapor haline getirilmiştir. Sonuçlar ilerideki konularda belirtilmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

#### 5.1. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

##### 5.1.1. Yarı-Statik Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Oda sıcaklığı (24 °C) değerinde  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızlarında gerçekleştirilen yarı-statik çekme testleri sonucunda malzemeye ait akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerleri elde edilmiştir. Çizelge 5.1’de çekme testi sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Yarı-statik çekme testi sonuçları.

Yarı-statik Deney Sonuçları (24 °C için)	AKMA GERİLMESİ	MAKSİMUM GERİLME	% UZAMA
$10^{-3}$ s <sup>-1</sup>	627 MPa	887 MPa	% 19.67
$10^{-2}$ s <sup>-1</sup>	632 MPa	890 MPa	% 19.14
$10^{-1}$ s <sup>-1</sup>	638 MPa	904 MPa	% 17.47

Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi gerinim hız değerinin  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>’den  $10^{-2}$  s<sup>-1</sup>’ye ve sonrasında  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> değerine çıkmasıyla birlikte malzemenin akma ve maksimum gerilme değerleri artış; uzama değeri ise bu değerlere paralel bir şekilde azalma göstermiştir. Soğuk işlemlerde deformasyon sırasında gerçekleşen deformasyon sertleşmesi, deformasyona engel olmakta ve malzemenin mukavemeti deformasyona paralel olarak artmaktadır. Gerçekleştirilen deneyde de artan deformasyon hızına bağlı olarak malzemenin deformasyon sertleşmesi ve mukavemeti artmıştır. Yani

akma ve maksimum gerilme değerlerinin artmasının nedeni, malzemenin artan gerinim hız değeri karşısında plastik şekil değişimine karşı gösterdiği direncin artmasıdır. Literatürde de belirtildiği gibi bir malzemenin plastik deformasyon karşısında gösterebileceği direnç, dislokasyonların hareket edebilme kabiliyetine bağlıdır. Dislokasyon hızının artması, plastik deformasyon hızının artması anlamına gelmektedir [52]. Dislokasyon hızı malzemeye uygulanan çekme gerilmesine bağlı olmaktadır. Başka bir deyişle, çekme hızının artması ile birlikte dislokasyon hızı ve mukavemet değerleri artmaktadır. Bu bağlamda, deney malzemesi için artan çekme hızına paralel olarak dislokasyon hızı ve mukavemet değerlerinin arttığı söylenebilmektedir.

### 5.1.2. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Referans gerinim hız ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) değerinde 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık çekme testleri sonucunda malzemeye ait akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerleri elde edilmiştir. Çizelge 5.2’de çekme testi sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Yüksek sıcaklık çekme testi sonuçları.

<b>Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları (<math>10^{-3} \text{ s}^{-1}</math> için)</b>	<b>AKMA GERİLMESİ</b>	<b>MAKSİMUM GERİLME</b>	<b>% UZAMA</b>
<b>300 °C</b>	593 MPa	917 MPa	% 22.57
<b>600 °C</b>	287 MPa	307 MPa	% 44.92
<b>900 °C</b>	32 MPa	50 MPa	% 72.32

Çizelge 5.2 incelendiğinde, referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) gerçekleştirilen çekme testinde sıcaklığın 300 °C’den 600 °C’ye ve sonrasında 900 °C’ye yükselmesine bağlı olarak malzemenin akma ve maksimum gerilme değerlerinde bariz bir şekilde düşüş olduğu görülmektedir. Literatürde pek çok uygulamada sıcaklığın yükselmesi ile birlikte akma gerilmesinde azalmaların olduğu gözlemlenmiştir [53]. Ayrıca

sıcaklığın 300 °Cden 900 °C sıcaklığa kadar artmasına bağlı olarak uzama değerleri gözle görülür bir artış sergilemiştir. Bu durum gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin yataylaşmasına ve sıcaklığın, çekme mukavemetine etmiş olduğu etkinin akma mukavemetine ettiğinden daha fazla olmasına neden olmuştur. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen 4.14'deki gerilme-gerinim grafiğinden sıcaklığın artışına bağlı olarak oluşan yataylaşma görülmektedir. Literatürde de belirtildiği üzere büyük oranda deformasyonlar ancak sıcak işleme mümkün olmaktadır [52]. Soğuk işlemlerde deformasyona bağlı olarak malzemenin mukavemeti artmakta, deformasyon sertleşmesi deformasyona belli bir süreye kadar engel olmaktadır. Fakat yüksek sıcaklığın kullanıldığı işlemlerde sıcaklık değerinin artması ile birlikte deformasyon sertleşmesi ve malzemenin mukavemeti azalmaktadır [52]. Burada da sıcaklığın artışına paralel biçimde malzemenin mukavemet değeri ve deformasyon sertleşmesi azalmıştır. Bu da deformasyon için gereken enerji miktarının soğuk deformasyondan çok daha az olmasını sağlamıştır [10].

## **5.2. ÇEKME TESTİ SİMÜLASYONLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

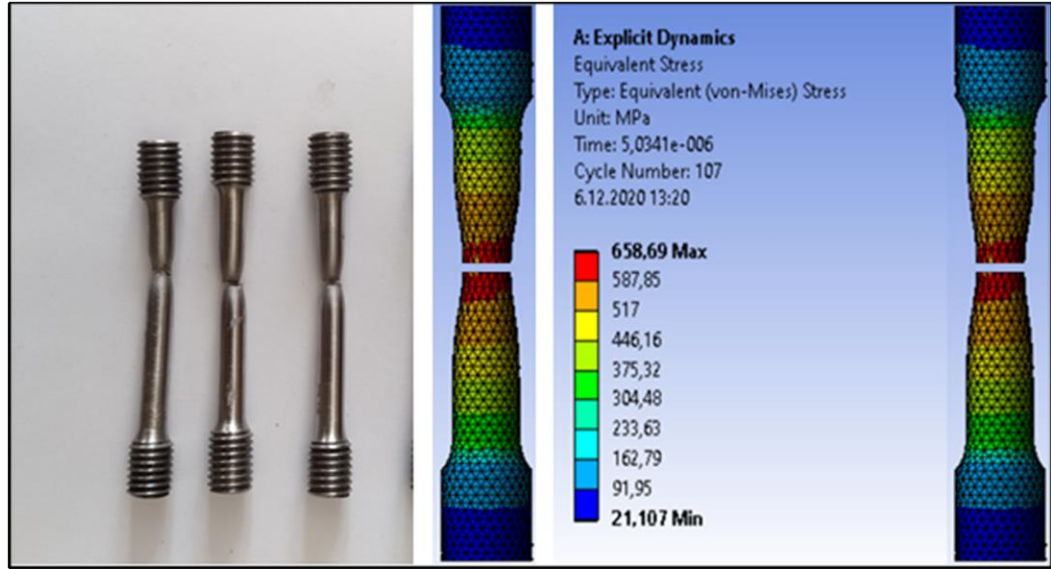
### **5.2.1. Yarı-Statik Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen J-C parametreleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ansys analiz programında tanımlanarak deney malzemesi oluşturulmuş olup,  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3} s^{-1}$  gerinim hızlarında ve her bir gerinim hız değeri için üç farklı yarı-statik çekme testi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çekme testi simülasyonları sonucunda üç farklı gerinim hızı için maksimum akma değerinde belirtildiği görseller oluşturulmuştur. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'de sırasıyla oda sıcaklığında (24 °C),  $10^{-3} s^{-1}$ ,  $10^{-2} s^{-1}$  ve  $10^{-1} s^{-1}$  gerinim hız değerleri için elde edilen görseller verilmiştir.



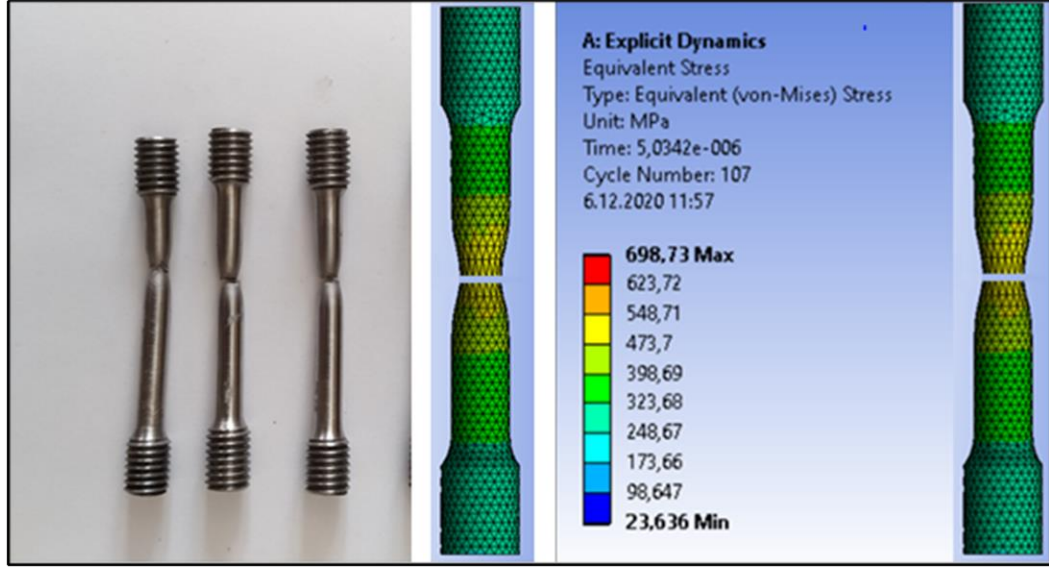
Şekil 5.1.  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.

Oda sıcaklığında ( $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ve  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında çekme testi simülasyonu uygulanan deney malzemesi için akma gerilmesi, 635 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.2.  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.

Oda sıcaklığında ( $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ve  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında çekme testi simülasyonu uygulanan deney malzemesi için akma gerilmesi, 659 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.3.  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.

Oda sıcaklığında ( $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ve  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında çekme testi simülasyonu uygulanan deney malzemesi için akma gerilmesi, 699 MPa olarak tespit edilmiştir.

Ansysis analiz yöntemi kullanılarak oda sıcaklığı ( $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) değerinde  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızlarında gerçekleştirilen yarı-statik çekme testi simülasyonları sonucunda malzemeye ait akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerleri elde edilmiştir. Çizelge 5.3’de yarı-statik çekme testi simülasyonu sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Yarı-statik çekme testi simülasyon sonuçları.

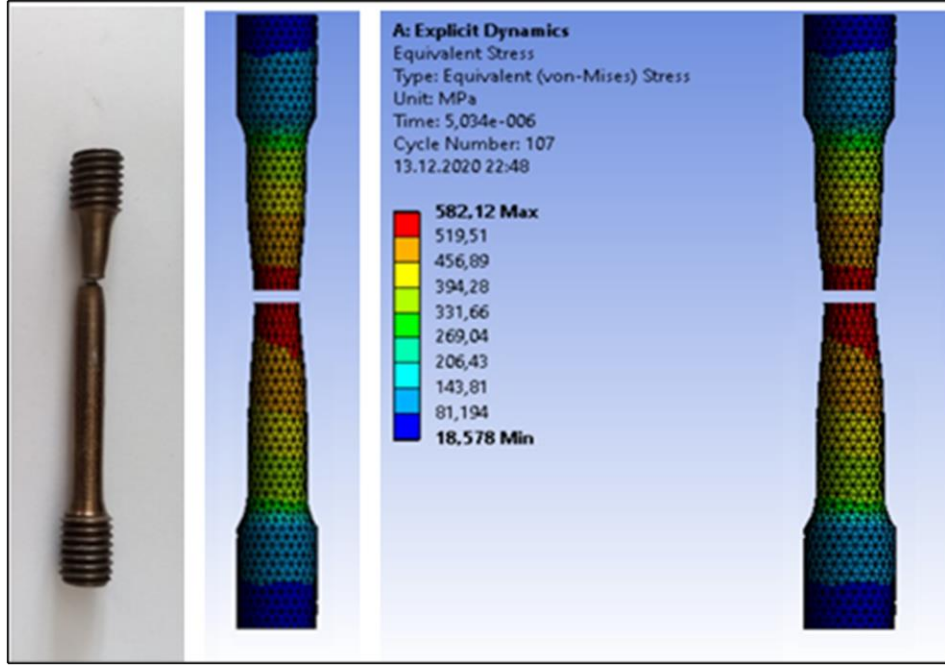
Yarı-statik Simülasyon Sonuçları ( $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ için)	AKMA GERİLMESİ	MAKSİMUM GERİLME	% UZAMA
$10^{-3} \text{ s}^{-1}$	635 MPa	913 MPa	% 20.29
$10^{-2} \text{ s}^{-1}$	659 MPa	934 MPa	% 20.27
$10^{-1} \text{ s}^{-1}$	699 MPa	984 MPa	% 18.87

Yarı-statik etki altında gerçekleştirilen çekme testi simülasyonu sonuçları doğrultusunda oluşturulan Çizelge 5.3’de, 33MnCrB5 malzemesi için belirlenen akma ve maksimum gerilme değerlerinde, artan gerinim hız değerlerine bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. Bunun yanında uzama değerleri ise paralel bir düşüş göstermiştir. Literatürde yapılan araştırmalara göre soğuk işlemlerde, malzeme üzerine uygulanan çekme kuvvetinin artışına paralel olarak malzemenin mukavemet değerleri ve dislokasyon hızı artmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına bakıldığında da aynı durum söz konusu olmaktadır. Bu bağlamda simülasyon sonuçlarında, artan çekme hızına bağlı olarak mukavemet değerlerinin artış gösterdiği söylenebilir.

### **5.2.2. Yüksek Sıcaklık Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

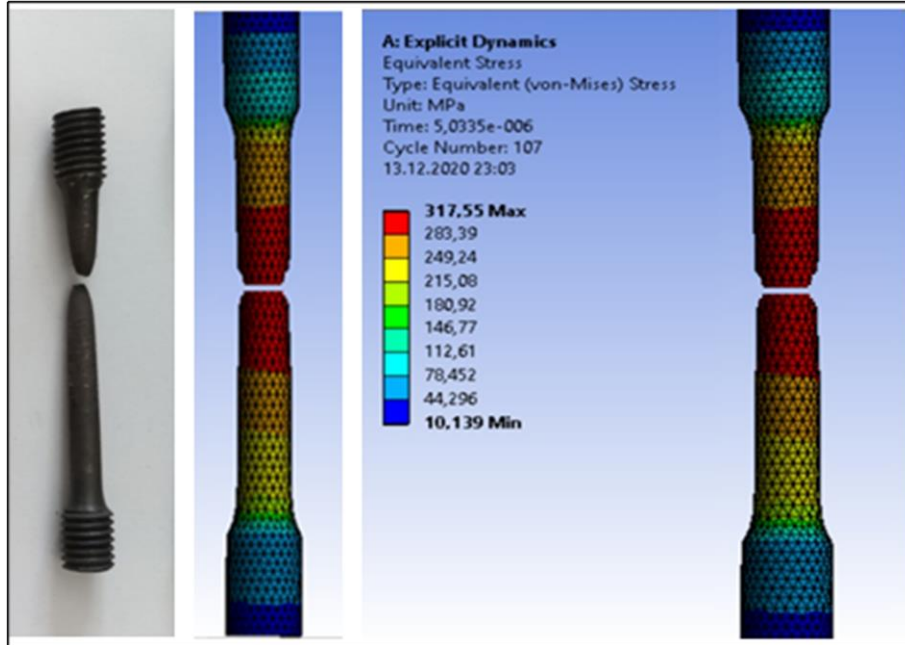
Deneysel çalışmalar sonucu belirlenen Johnson-Cook parametreleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ansys analiz programına deney malzemesi olan 33MnCrB5 bor katkılı çeliğin özellikleri olarak tanımlanmış olup; 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde yüksek sıcaklık çekme testi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çekme testi simülasyonları sonucunda üç farklı sıcaklık değeri için maksimum akma değerinin de belirtildiği görseller oluşturulmuştur. Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6’da sırasıyla oda sıcaklığında 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için elde edilen görseller verilmiştir.





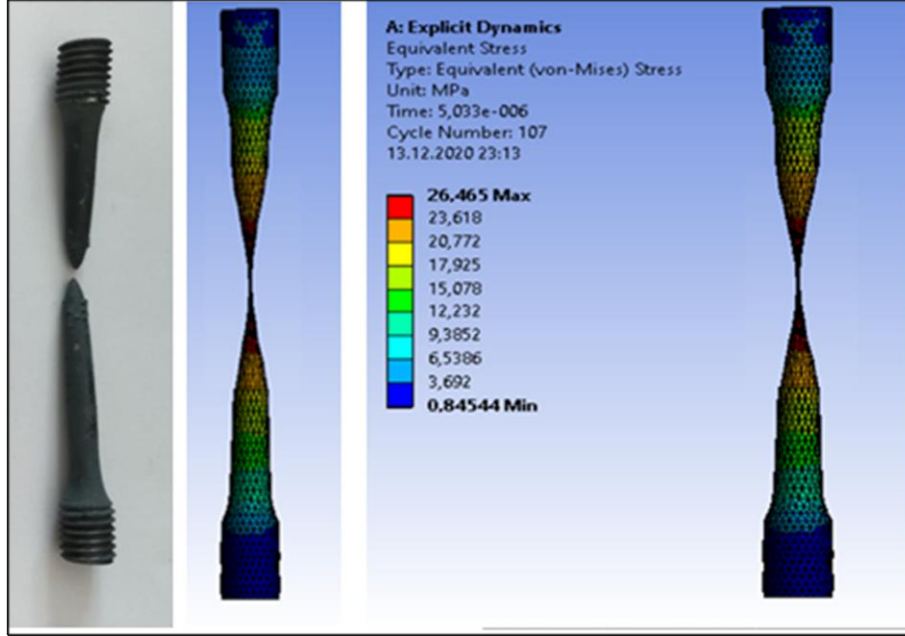
Şekil 5.4. 300 °C sıcaklık değeri için elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.

300 °C sıcaklık değerinde çekme testi simülasyonu gerçekleştirilen deney malzemesi için akma gerilmesi, 582 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. 600 °C sıcaklık değeri için elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.

600 °C sıcaklık değerinde çekme testi simülasyonu gerçekleştirilen deney malzemesi için akma gerilmesi, 318 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. 900 °C sıcaklık değeri için elde edilen deney ve simülasyon kırılmaları.

900 °C sıcaklık değerinde çekme testi simülasyonu gerçekleştirilen deney malzemesi için akma gerilmesi, 27 MPa olarak tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizine dayalı ansys analiz yöntemi kullanılarak 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık çekme testleri sonucunda deney malzemesine ait akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerleri elde edilmiştir. Çizelge 5.4'de, yüksek sıcaklık değerleri altında gerçekleştirilen çekme testi simülasyonları sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Yüksek sıcaklık çekme testi simülasyon sonuçları.

<b>Yüksek Sıcaklık Simülasyon Sonuçları</b>	<b>AKMA GERİLMESİ</b>	<b>MAKSİMUM GERİLME</b>	<b>% UZAMA</b>
<b>300 °C</b>	582 MPa	890 MPa	% 23,92
<b>600 °C</b>	318 MPa	367 MPa	% 47,40
<b>900 °C</b>	27 MPa	44 MPa	% 80,57

Yüksek sıcaklık etkisi altında gerçekleştirilen çekme testi simülasyonu sonuçları doğrultusunda oluşturulan Çizelge 5.4’de 33MnCrB5 malzemesine ait akma ve maksimum gerilme değerlerinin, artan deformasyon sıcaklığına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte uzama değerlerinde tam tersi yönde belirgin bir artış söz konusudur. Literatürde de belirtildiği üzere yüksek sıcaklığın kullanıldığı işlemlerde sıcaklık değerinin artmasına bağlı olarak malzemenin mukavemeti azalmaktadır [54–56]. Gerçekleştirilen simülasyon işlemlerinde de malzeme artan sıcaklığa karşı deformasyon sertleşmesi gösterememiş ve azalan bir mukavemet grafiği oluşmuştur. Ayrıca sıcaklığın 300°C’den 900 °C’ye kadar artmasına bağlı olarak akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerlerinde gerçekleşen azalma ve uzama değerinde gerçekleşen artış, gerilme-gerinim eğrisinin yataylaşmasına neden olmuştur.

### **5.3. DENEY VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

#### **5.3.1. Yarı-Statik Etki Altında Gerçekleştirilen Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması**

33MnCrB5 bor katkılı çelik için yarı-statik etki altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen akma gerilmeleri, maksimum gerilmeler ve uzama değerleri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen akma gerilmeleri, maksimum gerilmeler ve uzama değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Yarı-statik için deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

		<b>DENEY SONUÇLARI</b>	<b>SİMÜLASYON SONUÇLARI</b>	<b>% SAPMA</b>
<b>(10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Akma Gerilmesi</b>	627 MPa	635 MPa	1,28
	<b>Max. Gerilme</b>	887 MPa	913 MPa	2,93
	<b>% Uzama</b>	% 19.67	% 20.29	3,15
<b>(10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Akma Gerilmesi</b>	632 MPa	659 MPa	4,27
	<b>Max. Gerilme</b>	890 MPa	934 MPa	4,94
	<b>% Uzama</b>	% 19.14	% 20.27	5,90
<b>(10<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Akma Gerilmesi</b>	638 MPa	699 MPa	9,56
	<b>Max. Gerilme</b>	904 MPa	984 MPa	8,84
	<b>% Uzama</b>	% 17.47	% 18.87	8,01
<b>ORTALAMA SAPMA</b>			<b>Akma Gerilmesi</b>	<b>5,04</b>
			<b>Max. Gerilme</b>	<b>5,57</b>
			<b>% Uzama</b>	<b>5,68</b>

Çizelge 5.5’de verilen sonuçlar incelendiğinde, akma gerilmesi, deneysel çalışmalarda  $10^{-3} s^{-1}$ ,  $10^{-2} s^{-1}$  ve  $10^{-1} s^{-1}$  gerinim hızlarında sırasıyla 627 MPa, 632 MPa ve 638 MPa olarak elde edilirken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 1,28, % 4,27 ve % 9,56 artarak 635 MPa, 659 MPa ve 699 MPa olarak bulunmuştur. Maksimum gerilme, deneysel çalışmalarda  $10^{-3} s^{-1}$ ,  $10^{-2} s^{-1}$  ve  $10^{-1} s^{-1}$  gerinim hızlarında sırasıyla 887 MPa, 890 MPa ve 904 MPa ölçülürken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 2,93, % 4,94 ve % 8,84 artarak 913 MPa, 934 MPa ve 984 MPa olarak elde edilmiştir. Uzama değerleri ise deneysel çalışmalarda  $10^{-3} s^{-1}$ ,  $10^{-2} s^{-1}$  ve  $10^{-1} s^{-1}$  gerinim hızlarında sırasıyla % 19.67, % 19.14 ve % 17.47 olarak

ölçülürken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 3,15, % 5,90 ve % 8,01 artarak % 20,29, % 20,27 ve % 18,87 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.5’de elde edilen değerlerin tamamı değerlendirildiğinde sonlu elemanlar analizinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar arasında akma gerilmesi için % 5,04, maksimum gerilme için % 5,57, uzama değeri için ise % 5,68 sapma olduğu belirlenmiştir.

Johnson-Cook parametreleri kullanılarak geliştirilen simülasyon modelinin uygunluğunu göstermek için hata kontrol yöntemleri ile değerlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modeli ile gerçekleştirilen analiz işlemleri belirli hata değerleri ile yapılmasından dolayı, yapılan bu hata değerleri toplamının ortalamasının minimize seviyeye getirilmesi gerekmektedir. Minimize seviyeye getirilmesi istenen hata kareler ortalaması (*mean squared error, MSE*) değeri, model performansını da belirleyen önemli bir kriterdir. Geliştirilen sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçların, gerçek deney sonuçlarına uygulanması aşamasında; hata kareler ortalaması karekökü (*root-mean-squared, RMSE*), belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) ve ortalama mutlak yüzde hata (*mean absolute percentage error, MAPE*) kriter olarak alınmıştır. Bununla birlikte sonlu elemanlar analiz sonucu belirlenen tüm değerler için yüzde hata (*% Hata*) değerleri bulunmuştur:

$$MSE = \frac{1}{p} \sum_i e_i^2 = \frac{1}{p} \sum_i (t_i - o_i)^2 \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_i e_i^2} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_i (t_i - o_i)^2} \quad (5.2)$$

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_i (t_i - o_i)^2}{\sum_i o_i^2} \right) \quad (5.3)$$

$$\%Hata = \frac{|t_i - o_i|}{t_i} \times 100 \quad (5.4)$$

$$MAPE = \frac{1}{p} \sum_i \frac{|t_i - o_i|}{t_i} \times 100 \quad (5.5)$$

Eş. 5.1 – Eş. 5.5 arasındaki hata kontrol formüllerinde; örnek deney sayısı  $p$ , deney sonucundan elde edilen değer ile sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen değer arasındaki fark  $e_i$ , deney sonucunda elde edilen çıktı değişkeni değeri  $t_i$  ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen çıktı katmanı değeri  $o_i$  olarak belirtilmektedir. Eş. 5.2’te verilen RSME değeri 0 ile  $\infty$  arasında bir değer olup bu değer 0’a yakınlığı geliştirilen modelin başarı oranını göstermektedir. Eş. 5.3’da verilen  $R^2$  değeri gerçek deney sonuçları ile sonlu elemanlarda geliştirilen model sonuçları arasındaki uyumu göstermektedir.  $R^2$  değerinin %80 ve üzeri olması modelin gerçek deney sonuçları ile uyumlu ve kuvvetli bir ilişkiye sahip olduklarını göstermektedir [57,58]. Eş. 5.5’de belirtilen MAPE değeri % olarak ifade edilmekte olup düşük değerlerde olması modelin başarısını göstermektedir [59].

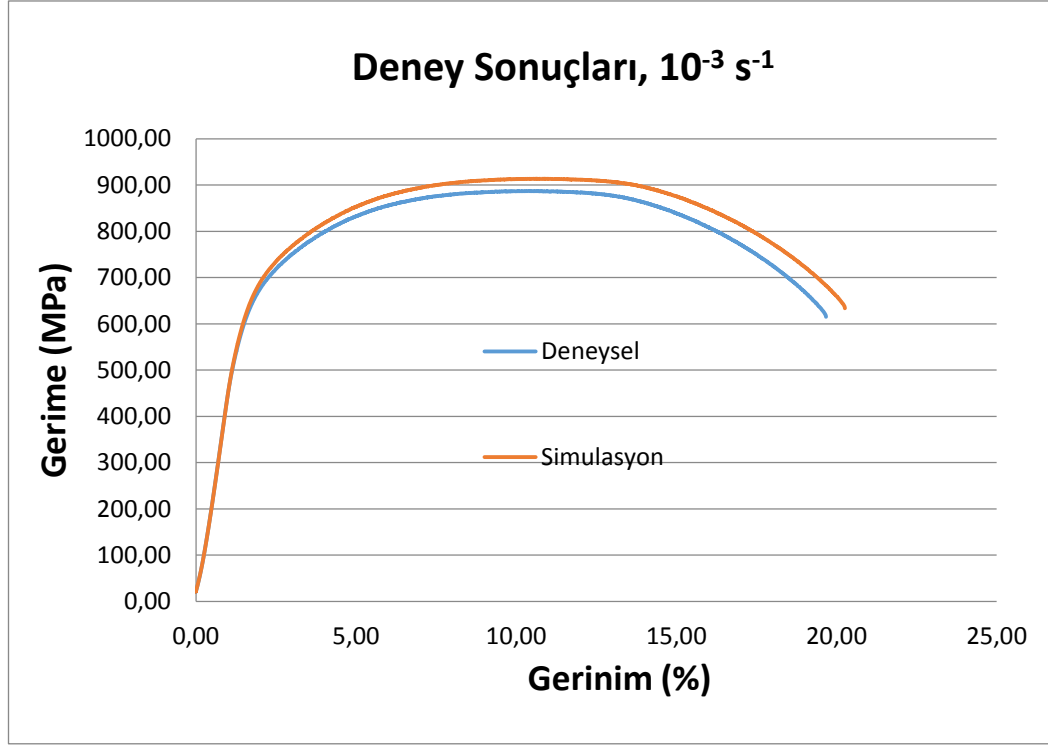
Çizelge 5.6’da, akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değeri için geliştirilen modelle hesaplanan gerilme ve uzama değerlerinin, gerçek sonuçlara uygunluğunda kullanılan hata kareler ortalaması karekökü ( $RMSE$ ), belirlilik katsayıları ( $R^2$ ), ve ortalama mutlak yüzde hata ( $\pm \% MAPE$ ) değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.6. Yarı-statik etki altında elde edilen gerilme ve uzama değerleri için sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.

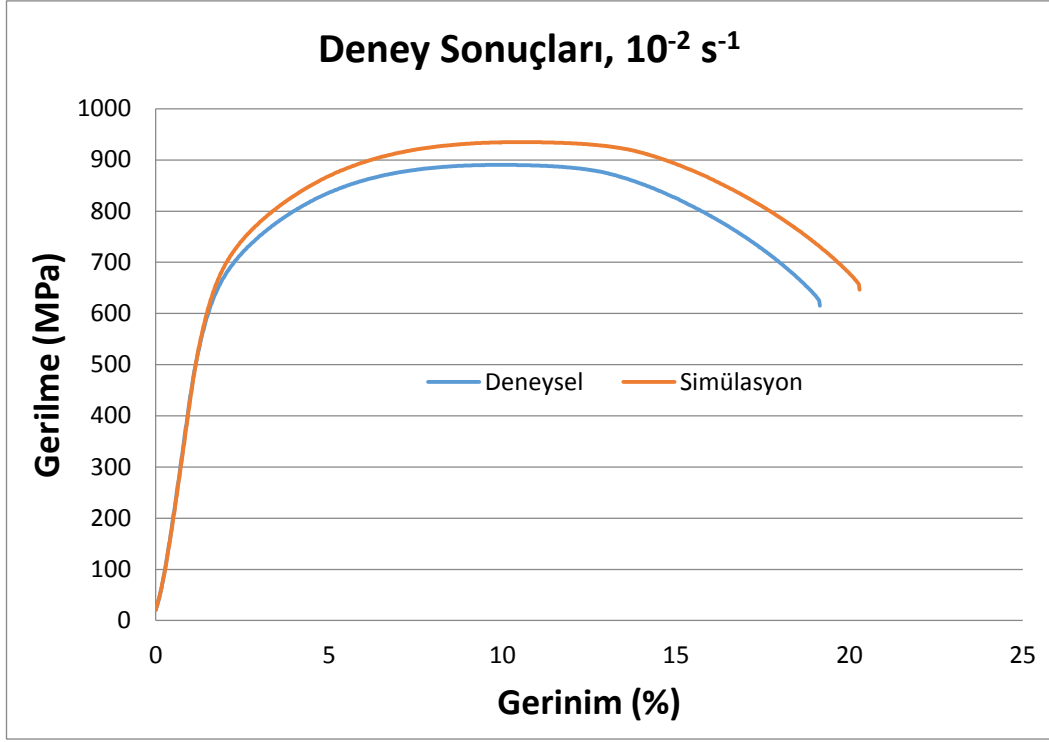
	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MAPE</b>
<b>Akma Gerilmesi</b>	38,790033	0,996596	5,036399
<b>Max. Gerilme</b>	54,808758	0,996629	5,574868
<b>% Uzama</b>	1,098681	0,996927	5,689870

Çizelge 5.6 incelendiğinde, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), akma gerilmesi için %5,04 bulunurken, maksimum gerilme için % 5,57 ve uzama değeri için % 5,68 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.6’da elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, özellikle  $R^2$  değerinin %99 olarak hesaplanması, sonlu elemanlar modelinin kullanılabilirliğinin uygunluğu tespit edilmiştir.

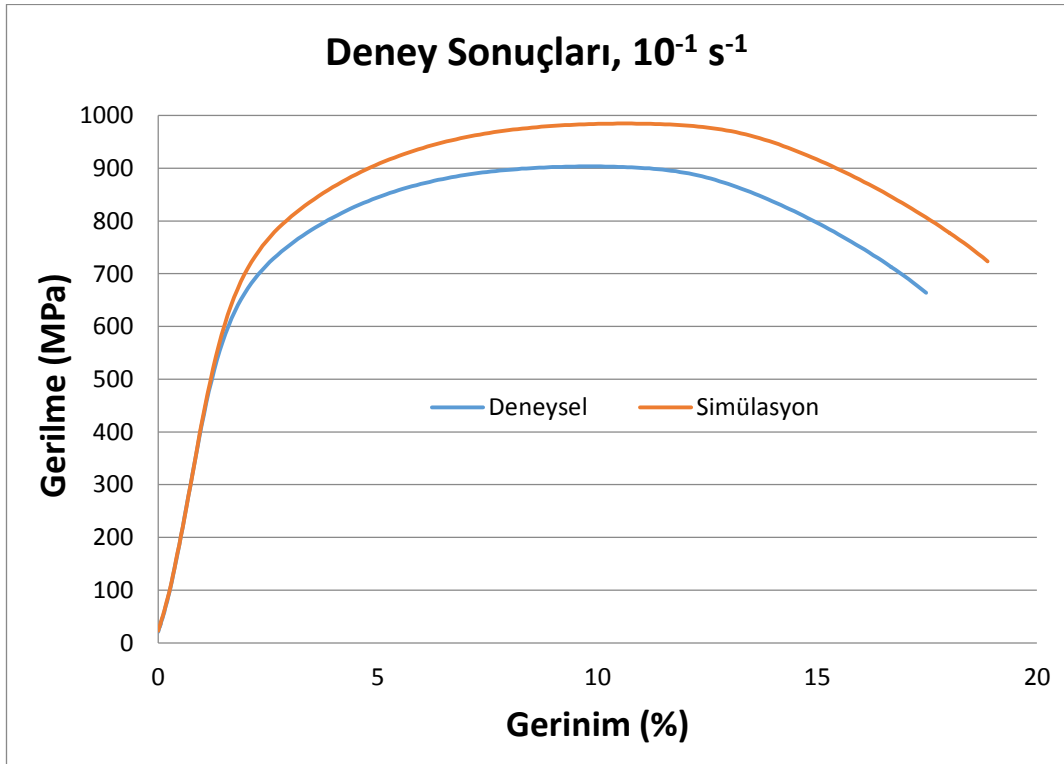
Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da 33MnCrB5 bor katkılı çelik için sırasıyla  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ve  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızlarında, deney sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim grafikleri ile simülasyon sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.7.  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.



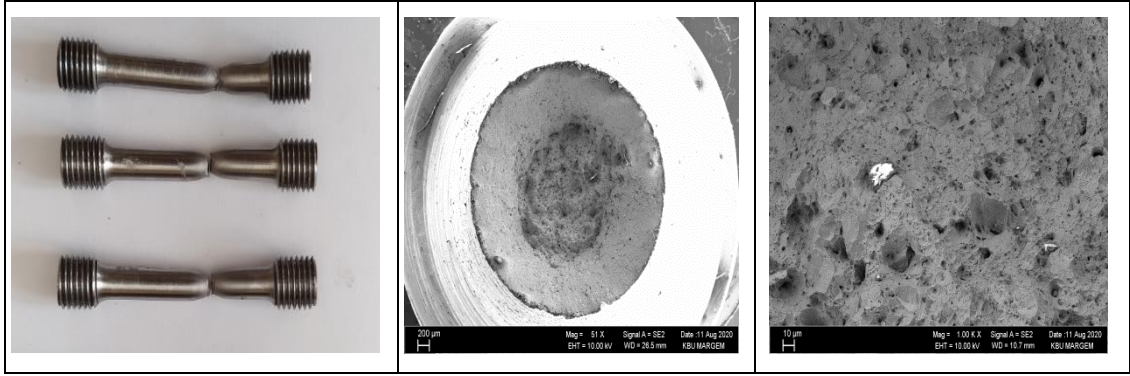
Şekil 5.8.  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.



Şekil 5.9.  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.



Elde edilen grafikler incelendiğinde, deney malzemesinin çekme noktasından sonra kopma noktasına kadar göstermiş olduğu kopma uzaması büyüklüğü, malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca malzeme üzerinde oluşan plastik deformasyonun büyük olması ve emilen enerji miktarının büyüklüğü malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğunu desteklemektedir. Bununla birlikte kırılan deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri ile sünelik veya kırılma durumları incelenmiştir. Şekil 5.10'de oda sıcaklığında ( $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ve  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$  gerinim hızı için gerçekleştirilen yarı-statik çekme testi işlemi ardından numune kırık yüzeyinde yapılan inceleme sonucu elde edilen SEM analizi mevcuttur.



Şekil 5.10.  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$  gerinim hızı için gerçekleştirilen SEM analizi.

Şekil 5.10'da  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$  için incelenen SEM analizi doğrultusunda numunenin, yarı-statik etki altında kırılmış sünek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar tanelerin, dislokasyon hareketlerinin engellenmemesine bağlı olarak uzama için belli bir zaman bulduğu ve yüksek toklukta olduğu anlamına gelmektedir. Böylece, malzeme yüksek derecede plastik deformasyona göstermektedir. Ayrıca, yarı-statik etki altında çekme testi gerçekleştirilen numunede sünek malzemeden beklendiği üzere çukurlar oluşmuştur.

Elde edilen değerler sonrası yarı-statik etki için gerçekleştirilen karşılaştırma işlemleri doğrultusunda, 33MnCrB5 bor katkılı çelik için tespit edilen Johnson-Cook parametrelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Gelecekte bu çelik ile ilgili plastik deformasyon analizi gerçekleştirileceği zaman, çalışma kapsamında elde edilen parametrelerin kullanılarak yapılabileceği anlaşılmıştır.

### 5.3.2. Yüksek Sıcaklıklarda Gerçekleştirilen Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

33MnCrB5 bor katkılı çelik için yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen akma gerilmeleri, maksimum gerilmeler ve uzama değerleri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen akma gerilmeleri, maksimum gerilmeler ve uzama değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Yüksek sıcaklık için deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

		<b>DENEY SONUÇLARI</b>	<b>SİMÜLASYON SONUÇLARI</b>	<b>% SAPMA</b>
<b>(300°C)</b>	<b>Akma Gerilmesi</b>	593 MPa	582 MPa	1,85
	<b>Max. Gerilme</b>	917 MPa	890 MPa	2,94
	<b>% Uzama</b>	% 22,57	% 23,92	5,98
<b>(600°C)</b>	<b>Akma Gerilmesi</b>	287 MPa	318 MPa	10,80
	<b>Max. Gerilme</b>	307 MPa	367 MPa	19,54
	<b>% Uzama</b>	% 44,92	% 47,40	5,52
<b>(900°C)</b>	<b>Akma Gerilmesi</b>	32 MPa	27 MPa	15,62
	<b>Max. Gerilme</b>	50 MPa	44 MPa	12
	<b>% Uzama</b>	% 72,32	% 80,57	11,40
<b>ORTALAMA SAPMA</b>			<b>Akma Gerilmesi</b>	<b>9,42</b>
			<b>Max. Gerilme</b>	<b>11,49</b>
			<b>% Uzama</b>	<b>7,63</b>

Çizelge 5.7’de verilen sonuçlar incelendiğinde, akma gerilmesi, yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla 593 MPa, 287 MPa ve 32 MPa olarak elde edilirken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 1,85, % 10,80 ve % 15,62 oranlarında sapma yaşamış ve 582 MPa, 318 MPa ve 27 MPa olarak bulunmuştur. Maksimum gerilmeler, deneysel çalışmalarda 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla 917 MPa, 307 MPa ve 50 MPa ölçülürken, sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar sırasıyla % 2,94, % 19,54 ve % 12 oranlarında sapma yaşamış olup 890 MPa, 367 MPa ve 44 MPa olarak tespit edilmiştir. Uzama değerleri ise deneysel çalışmalarda, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla % 22,57, % 44,92 ve % 72,32 olarak ölçülürken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 5,98, % 5,52 ve % 11,40 oranlarında sapma yaşamış olup sonuçlar % 23,92, % 47,40 ve % 80,57 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin tamamı değerlendirildiğinde, sonlu elemanlar analizinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar arasında akma gerilmesi için % 9,42, maksimum gerilme için % 11,49, uzama değeri için ise % 7,63 sapma olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.7’de verilen karşılaştırma tablosunda, 300 °C sıcaklık değeri için akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerlerinde gerçekleşen sapma değeri düşük olmasına rağmen, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için yüksek olduğu gözükmektedir. Fakat J-C parametrelerinden olan sıcaklık sabiti (m), deney sonuçlarından elde edilen akma gerilmeleri baz alınarak hesaplanmış olup akma noktaları uyumluluğu kontrol edilmiştir.

Johnson-Cook parametreleri kullanılarak geliştirilen simülasyon modelinin uygunluğunu göstermek için Eş. 5.1 – 5.5 arasında bulunan hata kontrol yöntemleri kullanılarak değerlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçların gerçek deney sonuçlarına uygulanması ile elde edilen, hata kareler ortalaması karekökü (*RMSE*), belirlilik katsayıları ( $R^2$ ), ve ortalama mutlak yüzde hata ( $\pm$  % *MAPE*) değerleri geliştirilen modelin uygunluğunu göstermektedir. *RMSE* ve % *MAPE* değerlerinin 0’a yakınlığı ve özellikle  $R^2$  değerinin 1’e yakın olması geliştirilen modelin uygunluğunun belirlenmesi için kriterlerdir.

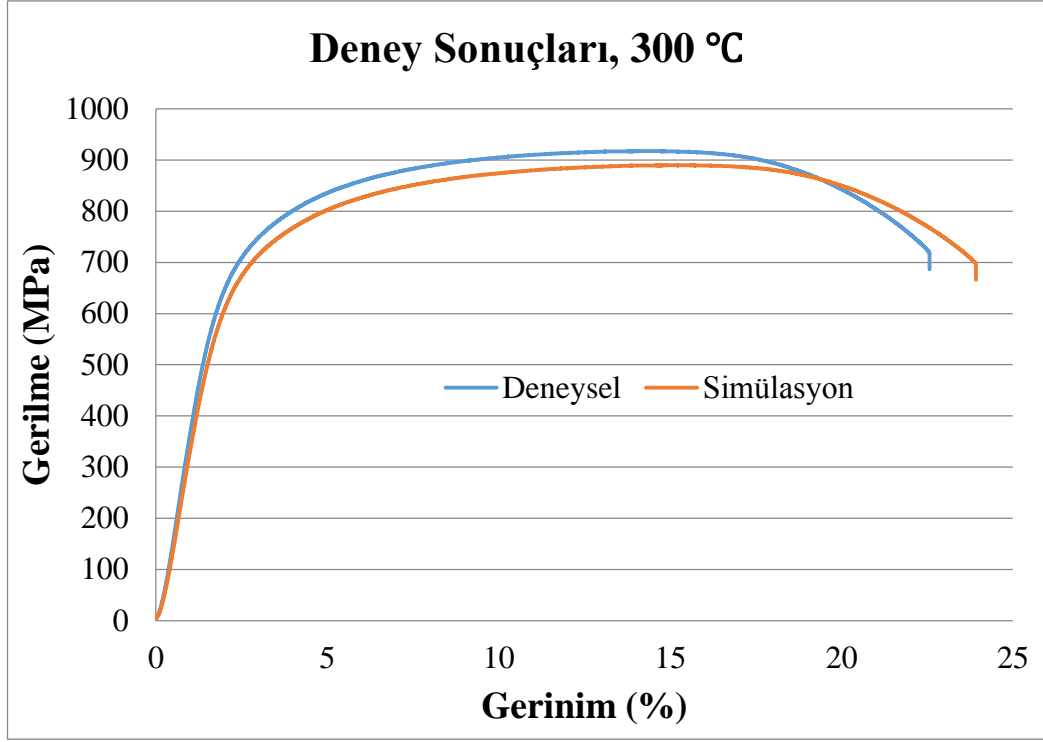
Çizelge 5.8’de, akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değeri için geliştirilen modelle hesaplanan kuvvet değerlerinin, gerçek sonuçlara uygunluğunda kullanılan hata kareler ortalaması karekökü (*RMSE*), belirlilik katsayıları ( $R^2$ ), ve ortalama mutlak yüzde hata ( $\pm$  % *MAPE*) değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.8. Yüksek sıcaklık etkisi altında elde edilen gerilme ve uzama değerleri için sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.

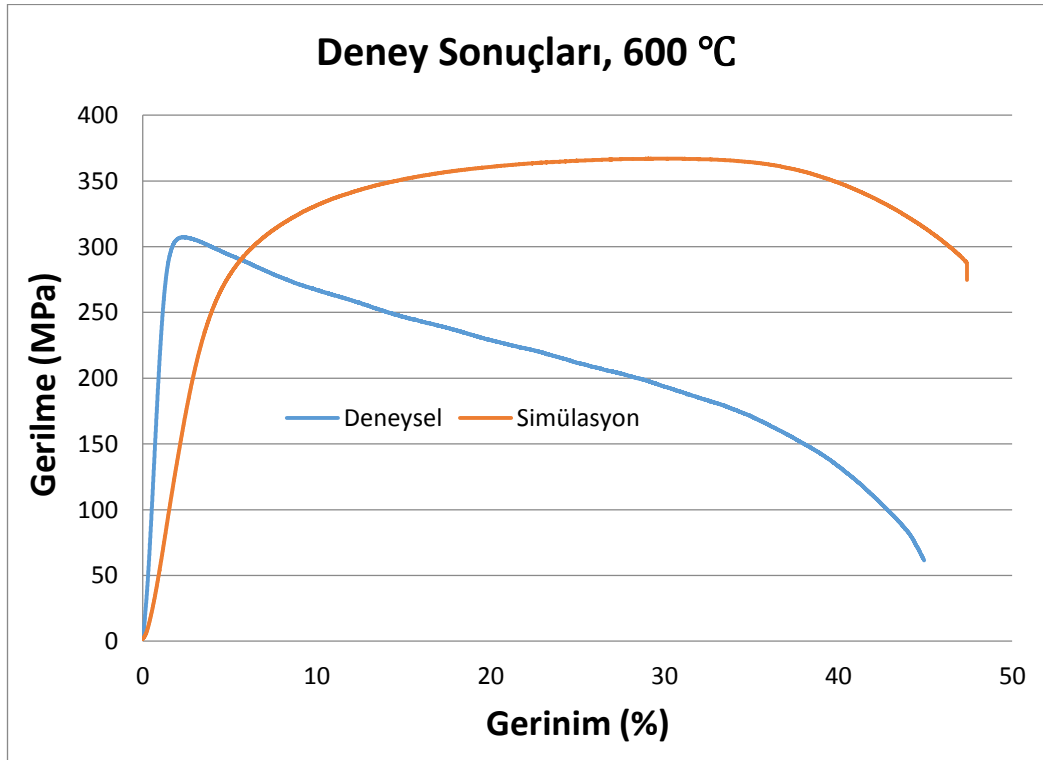
	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MAPE</b>
<b>Akma Gerilmesi</b>	19,208372	0,997487	9,427122
<b>Max. Gerilme</b>	38,144462	0,995300	11,496119
<b>% Uzama</b>	5,0343950	0,991833	7,636650

Çizelge 5.8 incelendiğinde, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), akma gerilmesi için %9,42 bulunurken, maksimum gerilme için % 11,49 ve uzama değeri için % 7,63 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.9’da verilen tablodan elde edilen sonuçlara bakıldığında, özellikle  $R^2$  değerinin %99 olarak hesaplanması, sonlu elemanlar modelinin uygunluğunu belirlemiştir.

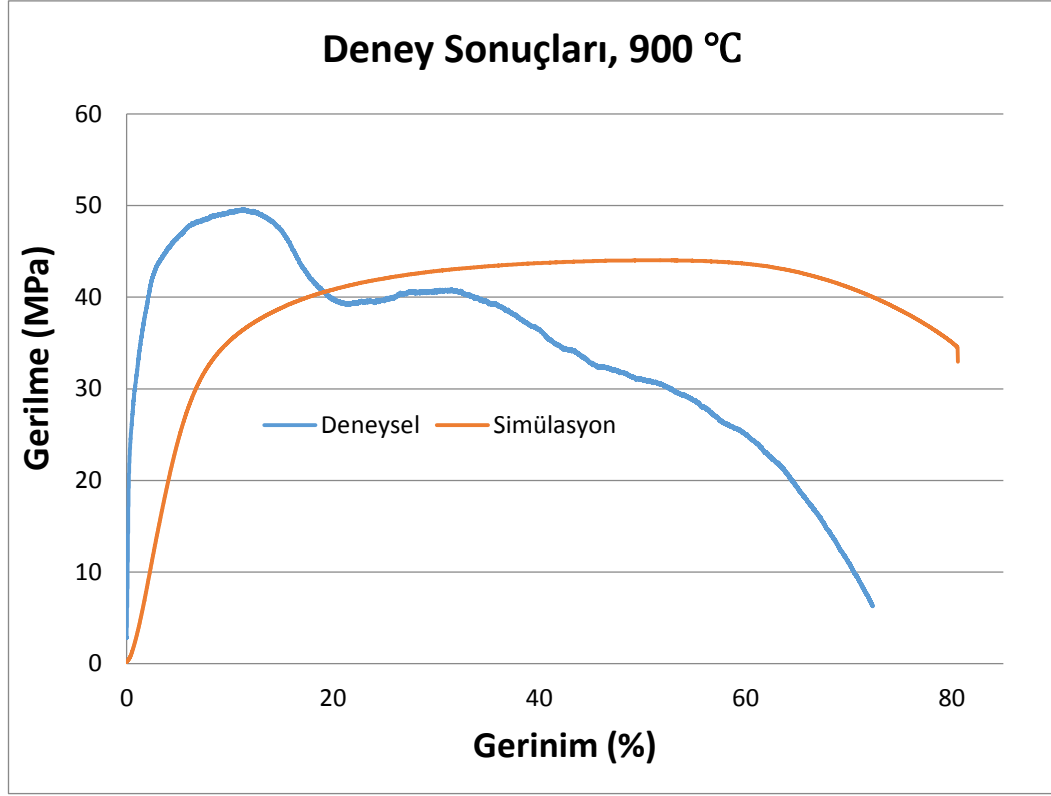
Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de 33MnCrB5 bor katkılı çelik için sırasıyla 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde, deney ve simülasyon sonuçları sonrası elde edilen gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.11. 300 °C için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.

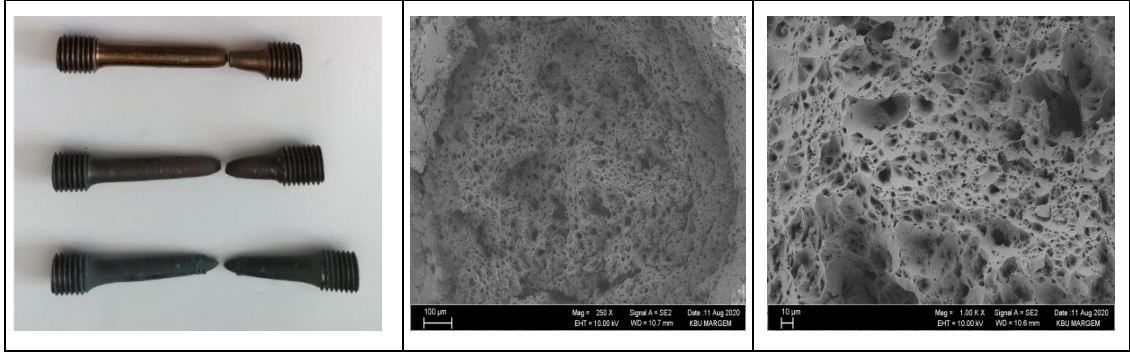


Şekil 5.12. 600 °C için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.



Şekil 5.13. 900 °C için deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.

Çekme noktası ile kopma noktasına arasında bulunan grafik eğrisi, kopma uzaması büyüklüğünü ve eğri altında kalan alan, emilen enerji miktarını göstermektedir. 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık için verilen karşılaştırma grafikleri incelendiğinde, çekme noktası sonrası deney malzemesine ait kopma uzamasının büyüklüğü ve buna bağlı olarak emilen enerji miktarının büyüklüğü görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlardan yola çıkarak malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca kırılan deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri ile sünelik veya kırılabilirlik durumları incelenmiş olup Şekil 5.14’de referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ve 600 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen çekme testi işlemi sonrası numune kırık yüzeyinde yapılan inceleme sonucu elde edilen SEM analizi verilmiştir.



Şekil 5.14. 600 °C sıcaklık değeri için gerçekleştirilen SEM analizi.

Yüksek sıcaklık değerleri sünekliğe yumuşaklık olarak etki etmektedir. Yapılan deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucunda numunelerin sıcaklık artışına bağlı olarak yumuşadığı ve bununla birlikte uzama değerlerinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte literatürde de belirtildiği üzere, sünek kırılmalar, çatlak boşlukların oluşması ve birleşmesi sonrası meydana gelmektedir [60]. Şekil 5.14’de 600 °C sıcaklık değeri için gerçekleştirilen SEM analizinde çatlak boşlukların oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklık deformasyonu nedeniyle numunelerin karmaşık bir yapıya sahip olarak kırıldıkları görülmektedir.

Elde edilen tüm sonuçlardan yola çıkarak yüksek sıcaklık etkisi altında, 33MnCrB5 bor katkılı çelik için tespit edilen Johnson-Cook parametrelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Gelecekte bu çelik ile ilgili yüksek sıcaklıklarda yapılacak plastik deformasyon analizinin gerçekleştirileceği zaman, çalışma kapsamında elde edilen parametrelerinin kullanılarak gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır.

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 6.1. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, 33MnCrB5 deney malzemesinden oluşturulan numuneler, malzemeye ait yapısal denklem parametrelerini (Johnson-Cook parametreleri) belirlemek için çekme testlerine tâbi tutulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı Ansys analiz programında deney malzemesi simülasyonlarını gerçekleştirmek için Johnson-Cook malzeme modeli gerekli olup, bu işlemler için numuneler üzerinde ilk olarak oda sıcaklığında (24 °C), düşük gerinim hızlarında ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>) yarı-statik çekme testleri ve referans gerinim hızında ( $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>) sırasıyla 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde yüksek sıcaklık çekme testleri uygulanmıştır. Yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda deney malzemesine ait Johnson-Cook parametreleri bulunmuştur. Johnson-Cook parametreleri belirlenen deney malzemesi için ikinci aşamada, Ansys analiz programı kullanılarak çekme testi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise deneyden elde edilen sonuçlar ile Ansys analiz sonuçları karşılaştırılmış olup, malzeme modelinin doğruluğu ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Referans gerinim hızında ( $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>) gerçekleştirilen yüksek sıcaklık çekme testlerinde, artan deney sıcaklığına bağlı olarak malzemenin akma ve maksimum gerilme değerlerinin literatür çalışmalarına benzer bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum gerilme-gerinim eğrisinin yataylaşmasına neden olmuştur.
- 33MnCrB5 malzemesine ait Johnson-Cook parametreleri olan *A*, *B*, *n*, *C* ve *m* değerleri sırasıyla 627 MPa, 916 MPa, 0.333, 0.00364, 0.782 olarak hesaplanmıştır.



- Oda sıcaklığında (24 °C) gerçekleştirilen yarı-statik çekme testlerinde 33MnCrB5 bor katkılı çelikten oluşturulan deney malzemesinin, akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerlerinin artan gerinim hız değerlerine paralel bir şekilde artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum literatürde de belirtildiği üzere, soğuk işlemlerde malzemenin üzerine uygulanan çekme hızının artışına bağlı olarak malzeme mukavemetinin ve dislokasyon hızının arttığını göstermiştir.
- Referans gerinim hızında ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) gerçekleştirilen yüksek sıcaklık çekme testlerinde, artan deney sıcaklığına bağlı olarak malzemede oluşan uzama miktarının devamlı olarak arttığı görülmüştür. Bu durum malzemenin yüksek sıcaklıklardan etkilendiğini ve yüksek sıcaklığa karşı deformasyon sertleşmesi sağlayamadığını göstermiştir.
- Gerçek gerilme-gerinim grafiği ve mühendislik gerilme-gerinim grafiğinden elde edilen sonuçlara göre bulunan akma noktası değerlerinin aynı olduğu tespit edilmiştir.
- Yarı-statik etki altında gerçekleştirilen deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) akma gerilmesi için %5,04 olurken, maksimum gerilme için %5,57 ve uzama değeri için %5,68 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, 33MnCrB5 bor katkılı çelik için geliştirilen sonlu elemanlar modelinin ve modelleme sırasında belirlenen sınır şartlarının yarı-statik çekme testleri için uygulanabilir olduğunu göstermektedir.
- Yüksek sıcaklık etkisi altında gerçekleştirilen deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında 300 °C sıcaklık için akma gerilmesi sapma değeri %1,85 bulunurken, maksimum gerilme için sapma değeri %2,94 ve uzama değeri için sapma değeri %5,98 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, 33MnCrB5 bor katkılı çelik için geliştirilen sonlu elemanlar modelinin 300 °C sıcaklık için çekme testi simülasyonlarının uygulanabilir olduğunu göstermiştir.
- 600 °C sıcaklık için akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama sapma değerleri sırasıyla %10,80, %19,5, %5,52 bulunurken, 900 °C için sırasıyla %15,62, %12, %11,40 olarak hesaplanmıştır. Johnson-Cook parametrelerinden olan sıcaklık sabitinin (m), deneysel sonuçlar sonrası elde edilen akma gerilmeleri baz alınarak hesaplanmasından dolayı, 600 °C ve 900 °C için gerçekleştirilen deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

işleminde akma noktaları uyumluluğu kontrol edilmiştir. Karşılaştırma sonrası hata oranının kabul edilebilir seviyede olmasından dolayı 600 °C ve 900 °C için çekme testi simülasyonlarının uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir.

## 6.2. ÖNERİLER

- 33MnCrB5 bor katkılı çeliğe ait malzeme model parametreleri, diğer malzeme modelleri (Zerill-Armstrong, modified JC, vb.) kullanımıyla belirlenerek, Johnson-Cook parametreleri ile kıyaslama yapılabilir.
- Elde edilen Johnson-Cook parametreleri sonlu elemanlar yöntemine dayalı farklı simülasyon programlarında çekme testlerine tâbi tutularak, Ansys analiz yöntemi ile mukayese edilebilir.
- J-C parametreleri, deney malzemesinin akma gerilmesine bağlı olarak hesaplanmasından dolayı, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklar için deney ve simülasyon sonuçları arasında akma noktaları baz alınmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Ganapathy, M., Li, N., Lin, J., ve Bhattacharjee, D., "A feasibility study on warm forming of an as-quenched 22MnB5 boron steel", *International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture*, 3 (3): 277–283 (2020).
2. Li, H., He, L., Zhao, G., ve Zhang, L., "Constitutive relationships of hot stamping boron steel B1500HS based on the modified Arrhenius and Johnson-Cook model", *Materials Science And Engineering A*, 580: 330–348 (2013).
3. Zhao, J., Zhu, H., Wang, W., Wang, L., ve Wang, W., "Investigation on the hot ductility of Q235 low-carbon steel with boron addition", *Results In Physics*, 15 (October): 102813 (2019).
4. Ren, X., Fu, H., Xing, J., ve Yi, Y., "Research on high-temperature dry sliding friction wear behavior of Ca–Ti modified high boron high speed steel", *Tribology International*, 132: 165–176 (2019).
5. Liu, Z., Wang, X., ve Dong, C., "Effect of boron on G115 martensitic heat resistant steel during aging at 650 °C", *Materials Science And Engineering A*, 787 (February): 139529 (2020).
6. Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M., ve Bleck, W., "Analysis of microstructure and mechanical properties of different boron and non-boron alloyed steels after being hot stamped", *Procedia Engineering*, 10: 460–465 (2011).
7. Namklang, P. ve Uthaisangsuk, V., "Description of microstructures and mechanical properties of boron alloy steel in hot stamping process", *Journal Of Manufacturing Processes*, 21: 87–100 (2016).
8. Banerjee, B., "The Mechanical Threshold Stress model for various tempers of AISI 4340 steel", *International Journal Of Solids And Structures*, 44 (3–4): 834–859 (2007).
9. Qian, X., Peng, X., Song, Y., Huang, J., Wei, Y., Liu, P., Mao, X., Zhang, J., ve Wang, L., "Dynamic constitutive relationship of CuCrZr alloy based on Johnson-Cook model", *Nuclear Materials And Energy*, 24 (February): 100768 (2020).
10. Korkmaz, M. E., Günay, M., ve Verleysen, P., "Investigation of tensile Johnson-Cook model parameters for Nimonic 80A superalloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 801: 542–549 (2019).

11. Niu, L., Cao, M., Liang, Z., Han, B., ve Zhang, Q., "A modified Johnson-Cook model considering strain softening of A356 alloy", *Materials Science And Engineering A*, 789: 139612 (2020).
12. Lin, Y. C., Chen, X. M., ve Liu, G., "A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel", *Materials Science And Engineering A*, 527 (26): 6980–6986 (2010).
13. Tan, J. Q., Zhan, M., Liu, S., Huang, T., Guo, J., ve Yang, H., "A modified Johnson-Cook model for tensile flow behaviors of 7050-T7451 aluminum alloy at high strain rates", *Materials Science And Engineering A*, 631: 214–219 (2015).
14. Yadav, S., Singhal, S., Jasra, Y., ve Saxena, R. K., "Determination of Johnson-Cook material model for weldment of mild steel", *Materials Today: Proceedings*, 28: 1801–1808 (2020).
15. Sahu, S., Pada Mondal, D., Dass Goel, M., ve Zahid Ansari, M., "Finite element analysis of AA1100 elasto-plastic behaviour using Johnson-Cook model", *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 5349–5353 (2018).
16. Vijayakumar, R., Ramesh, C., Boobesh, R., Ram Surya, R., ve Souder Rajesh, P., "Investigation on automobile wheel rim aluminium 6061 and 6066 Alloys using ANSYS WORKBENCH", *Materials Today: Proceedings*, (2020).
17. Sai Teja, P., Sudhakar, B., Dhass, A. D., Krishna, R., ve Sreenivasan, M., "Numerical and experimental analysis of hydroxyl-terminated poly-butadiene solid rocket motor by using ANSYS", *Materials Today: Proceedings*, 33: 308–314 (2019).
18. Taskaya, S., Kaya Gur, A., ve Ozay, C., "Joining of Ramor 500 Steel with SAW (Submerged Arc Welding) and its Evaluation of Thermomechanical Analysis in ANSYS Package Software", *Thermal Science And Engineering Progress*, 13 (August): 100396 (2019).
19. Avikal, S., Bisht, A., Sharma, D., Hindwan, H., Yadav, S., Nithin Kumar, K. C., ve Thakur, P., "Design and fatigue analysis of front axle beam of a heavy duty truck using ansys", *Materials Today: Proceedings*, 26: 3211–3215 (2019).
20. Tang, Z. ve Sun, J., "The contact analysis for deep groove ball bearing based on ANSYS", *Procedia Engineering*, 23: 423–428 (2011).
21. Rybdylova, O., Poulton, L., Al Qubeissi, M., Elwardany, A. E., Crua, C., Khan, T., ve Sazhin, S. S., "A model for multi-component droplet heating and evaporation and its implementation into ANSYS Fluent", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 90: 29–33 (2018).

22. Özakin, A. N. ve Kaya, F., "Effect on the exergy of the PVT system of fins added to an air-cooled channel: A study on temperature and air velocity with ANSYS Fluent", *Solar Energy*, 184 (February): 561–569 (2019).
23. İnternet: Megep, "Malzeme ve Isıl İşlemler (521MMI534)" [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Malzeme%20Ve%20Is%C4%B1%20%C4%B0%C5%9Flemler.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Malzeme%20Ve%20Is%C4%B1%20%C4%B0%C5%9Flemler.pdf), 7 (2011).
24. İnternet: "Çeliklerin Sınıflandırılması", <https://avesis.ktu.edu.tr/resume/downloadfile/kursaticin?key=c84a4408-c528-418a-af3f-1286beadaf81>, 634 (2021).
25. Aycan A., "Çelik malzemelerde hasar analizi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 151: 10–17 (2015).
26. Borisade, S. G., Ajibola, O. O., Adebayo, A. O., ve Oyetunji, A., "Development of mathematical models for the prediction of mechanical properties of low carbon steel (LCS)", *Materials Today: Proceedings*, (2020).
27. Yurtışık, K., Batıgün, C., ve Gürbüz, R., "Alaşımsız Düşük Karbonlu Çeliklerde Gerinim-Yaşlandırmanın Darbe Tokluğuna Etkileri", *Türk Mühendis Ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası*, 26–33 (2010).
28. Johnson, O. T., Ogunmuyiwa, E. N., Ude, A. U., Gwangwava, N., ve Addo-Tenkorang, R., "Mechanical properties of heat-treated medium carbon steel in renewable and biodegradable oil", *Procedia Manufacturing*, 35: 229–235 (2019).
29. Aytaç, A., Işık, M. S., Çanakçı, B., Özdemir, T., Aztekin, K., ve İpek, H., "AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi", *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17 (2): 139–165 (2018).
30. Gondo, S., Tanemura, R., Suzuki, S., Kajino, S., Asakawa, M., Takemoto, K., ve Tashima, K., "Microstructures and mechanical properties of fiber textures forming mesoscale structure of drawn fine high carbon steel wire", *Materials Science And Engineering A*, 747: 255–264 (2019).
31. Kara M. Köksel, "Sürekli tavlama yöntemi ile yeni kalite bir emaye çeliği üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (June): 1–2 (2014).
32. Osmanoğlu, T., "AISI 304 VE 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikroyapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7: 1-25 (2012)
33. Li, C., Qin, G., Tang, Y., Zhang, B., Lin, S., ve Geng, P., "Microstructures and

- mechanical properties of stainless steel clad plate joint with diverse filler metals", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (2): 2522–2534 (2020).
34. Albaraz, Z., "Isıl işlem parametrelerinin ve kimyasal kompozisyonun sıcak iş takım çeliklerinin mekanik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9 (1): 76–99 (2010).
  35. Korkmaz, M. E., "Nikel Esaslı Süper Alaşımın (Nimonic 80A) Malzeme Yapısal Denklem Parametrelerinin Belirlenmesi ve Uygulanabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2018).
  36. Yang, J., Zhao, M., Zhang, L., Wang, Z., ve Pan, W., "Pronounced enhancement of thermal expansion coefficients of rare-earth zirconate by cerium doping", *Scripta Materialia*, 153: 1–5 (2018).
  37. M. Jutras, "Improvement of The characterisation Method of The Johnson–Cook Model", Master of Science Thesis, *Faculte Des Sciences Et De Genie Université Laval Quebec*, Laval, (2008).
  38. Kariem, M. A., Beynon, J. H., ve Ruan, D., "Misalignment effect in the split Hopkinson pressure bar technique", *International Journal Of Impact Engineering*, 47: 60–70 (2012).
  39. Rosenberg, Z., Dawicke, D., ve Bless, S., "New Technique for Heating Specimens in Split Hopkinson Bar Experiments Using Induction Coil Heaters.", *Experimental Mechanics*, 543–551 (1986).
  40. Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Halim, Q., Merzuki, M. N. M., ve Darus, M. A. H., "Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method", *Materials Today: Proceedings*, 27 (xxxx): 757–763 (2020).
  41. He, Z., Zhang, K., Lin, Y., ve Yuan, S., "An accurate determination method for constitutive model of anisotropic tubular materials with DIC-based controlled biaxial tensile test", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 181: 105715 (2020).
  42. Bircan, A., "Makina parçalarının hasar analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2011).
  43. Asai, K., Kitamura, K., Yukawa, N., ve Hayashi, N., "Estimation of friction by using improved calibration curves of ring compression test for hot forging of steel", *Procedia Engineering*, 207: 2280–2285 (2017).
  44. Zhang, L., He, H., Li, S., Wu, X., ve Li, L., "Dynamic compression behavior of 6005 aluminum alloy aged at elevated temperatures", *Vacuum*, 155: 604–611 (2018).

45. Hu, Y., Yang, C. B., Teh, L. H., ve Yang, Y. Bin, "Reduction factors for stainless steel bolts at elevated temperatures", *Journal Of Constructional Steel Research*, 148: 198–205 (2018).
46. Xu, Q., Hu, K., Ma, X., Gao, T., ve Liu, X., "The response of room temperature and high temperature tensile properties to the microstructure variation of an AlN + Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al composite by heat treatment", *Materials Science And Engineering A*, 733: 211–219 (2018).
47. Thompson, M. K. ve Thompson, J. M., "Introduction to ANSYS and Finite Element Modeling", *ANSYS Mechanical APDL For Finite Element Analysis*, 1–9 (2017).
48. Kibar, H. ve Öztürk, T., "ANSYS Sonlu Eleman Yazılımının Tarımdaki Uygulamaları The Applications in Agriculture of ANSYS Finite Element Software", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Iğdır, 2 (2): 65–74 (2012).
49. Sun, X., Zhao, K., Li, Y., Huang, R., Ye, Z., Zhang, Y., ve Ma, J., "A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete", *Construction And Building Materials*, 158: 657–669 (2018).
50. Gong, D., Nadolski, S., Sun, C., Klein, B., ve Kou, J., "The effect of strain rate on particle breakage characteristics", *Powder Technology*, 339: 595–605 (2018).
51. Wang, W., Zhang, X., Chouw, N., Li, Z., ve Shi, Y., "Strain rate effect on the dynamic tensile behaviour of flax fibre reinforced polymer", *Composite Structures*, 200: 135–143 (2018).
52. Meriç C., Atik E. ve Özkaya E., "Deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının A1 99.0'un mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi" *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Denizli, 293–299 (1997).
53. Yegin M. Burak, "High strain rate characterization of engineering materials", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (June): (2013).
54. Li, Z., Zhao, J., Jia, F., Lu, Y., Liang, X., Yuan, X., Jiao, S., Zhou, C., ve Jiang, Z., "Hot deformation behaviour and interfacial characteristics of bimetal composite at elevated temperatures", *Intermetallics*, 125 (February): 106893 (2020).
55. Liu, P., Zhang, R., Yuan, Y., Cui, C., Zhou, Y., ve Sun, X., "Hot deformation behavior and workability of a Ni–Co based superalloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 831: 154618 (2020).

56. Samantaray, D., Mandal, S., ve Bhaduri, A. K., "A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr-1Mo steel", *Computational Materials Science*, 47 (2): 568–576 (2009).
57. Feito, N., Álvarez, J. D., Cantero, J. L., ve Miguélez, M. H., "Influence of Special Tool Geometry in Drilling Woven CFRPs Materials", *Procedia Engineering*, 132: 632–638 (2015).
58. Yağmur, S., Kurt, A., ve Şeker, U., "Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerinin Frezelenmesinde Meydana Gelen Yüzey Pürüzlüğünün Değerlendirilmesi ve Matematiksel Modellenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 6 (3): 705–715 (2018).
59. Kayaalp, F. ve Basarslan, M. S., "Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 5: 538-547 Düzce (2017).
60. İnternet: İstanbul Teknik Üniversitesi, PowerPoint Sunusu, "Kırılma", <https://web.itu.edu.tr/gulmezt/MekanikD/KIRILMA.pdf> (2015).



## **ÖZGEÇMİŞ**

Emre TEKER 1994 yılında Karabük'te doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp yaptığı iyi derece sayesinde 2015 yılında Makine Mühendisliği Çift Anadal Programını kazandı. 2018 yılında iki farklı mühendislik alanından iyi derece ile mezun oldu. 2019 yılında Kardemir A.Ş. Firması'nda Makine Bakım Mühendisi olarak göreve başlamış olup, halen bu görevi devam ettirmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK  
Tel : (542) 447 04 90  
E-posta : emreteker\_78@outlook.com