

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ YASSI ÇELİKLERİN
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DİJİTAL İMAJ
KORELASYONU YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**2018
DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

Murat AYDIN

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ YASSI ÇELİKLERİN
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DİJİTAL İMAJ KORELASYONU
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Murat AYDIN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Aralık 2018**

Murat AYDIN tarafından hazırlanan “YÜKSEK MUKAVEMETLİ YASSI ÇELİKLERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DİJİTAL İMAJ KORELASYONU YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

K. Çetinkaya

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 25/12/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa KURT (MÜ)

M. Kurt

Üye : Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA (KBÜ)

K. Çetinkaya

Üye : Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ (ÇAKÜ)

I. Çiftçi

Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)

H. Demir

Üye : Doç. Dr. Fuat KARA (DÜ)

F. Kara

...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.

F. Ersöz



“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.”

Murat AYDIN

ÖZET

Doktora Tezi

YÜKSEK MUKAVEMETLİ YASSI ÇELİKLERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DİJİTAL İMAJ KORELASYONU YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Murat AYDIN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

Aralık 2018, 113 sayfa

Dijital İmaj Korelasyon (DİK) yöntemi birçok endüstriyel alanda, bilimsel ve ticari amaçla kullanılan temassız, güçlü ve kullanışlı bir ölçüm tekniğidir. Son yıllarda, özellikle mekanik testler ile beraber, malzeme davranışlarının anlaşılabilmesi için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) DİK yönteminin sac malzemelerin mekanik testlerinde kullanılabilirliği ve geleneksel metotlara kıyasla avantajlarının ve dezavantajlarının ortaya konulması hedeflenmiştir. 2B DİK ölçüm yöntemi, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta yapılan tek eksen çekme testine uygulanmıştır. 3B DİK ölçüm yöntemi ise, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta yapılan Erichsen Kap Testi'nde kullanılmıştır. Tek eksen çekme testinde DP980 sac malzeme, Erichsen Kap Testi'nde ise Ck75 ve 22MnB5 sac malzemeler farklı kalınlıklar ve sıcaklıklarda şekillendirilmiştir. Yapılan her iki malzeme mekanik testinde de bütün şekillendirme deneyleri kamera ile kayıt altına alınmış ve kayıt edilen

deney videoları birbiri ardı sıralı görüntü dosyalarına bölünerek DİK yazılımında yer değiştirme, uzama ve kalınlık dağılımları ölçülmüştür. Aynı zamanda sac malzemelerin yırtılma anındaki maksimum kuvvetleri bilgisayar ortamına yük hücreleri kullanılarak kayıt edilmiştir. Sonuç olarak, tek eksen çekme testinde DP980 sac malzemenin sıcaklık artışına duyarlı olduğu, sıcaklığın artmasıyla çekme dayanımının azaldığı, ekstansometre ölçümü ile DİK ölçümü kıyaslandığında, tam alan uzama ve yer değiştirmenin DİK ile elde edildiği, ekstansometre ölçümünün ortalama değerler verdiği görülmüştür. Ayrıca, çekme numunesi üzerinden seçilen noktalardan, bölgesel uzamanın homojen deformasyondan çok daha fazla olduğu görülmüştür. Erichsen Kap Testi'nde ise sıcaklığın artmasıyla sac malzemenin şekillendirilmesiyle elde edilen kap yüksekliğinin ve Erichsen indeks sayısının arttığı belirlenmiştir. Diğer yandan, sıcaklık artışı ile yırtılma için gerekli olan maksimum kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir. Her iki mekanik test için DİK yönteminin kullanışlı, pratik ve hassas bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Dijital imaj korelasyon, Erichsen kap testi, gerdirerek şekillendirme, çekme testi, yüksek sıcaklık.

Bilim Kodu : 708.3.029

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

AN INVESTIGATION INTO THE FORMING OF HIGH STRENGTH SHEET STEELS THROUGH DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD

Murat AYDIN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Education

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

December 2018, 113 pages

Digital Image Correlation (DIC) technique is a non-contact, powerful, and useful measurement technique which can be applied to many industrial fields for both commercial and scientific purposes. Recently, this technique has been widely used to understand the behavior of materials in the mechanical testing of materials. In this study, it was aimed to clarify the advantages and disadvantages of the 2D and 3D DIC measurement techniques in the mechanical testing of materials over the traditional measurement methods. 2D DIC was implemented to perform an uni-axial tensile test at room temperature and under elevated temperature. 3D DIC was adopted to Erichsen Cupping Test at room temperature and under elevated temperature as well. While DP980 sheet material was chosen for uni-axial tensile test, Ck75 and 22MnB5 steel sheets with various thickness were used for Erichsen

Cupping Test. All the mechanical tests were recorded with high resolution digital cameras as video files and recorded video files were divided into the image sequences. Those image sequences were imported to the DIC software and processed in order to calculate displacement, strain, and thickness distributions. In addition, the maximum forces at fracture moment were recorded into the computer environment using load cell. As a result, it was observed that DP980 steel sheet was a temperature sensitivity material and the tensile strength of DP980 was decreased dramatically under the elevated temperature. When the DIC measurement was compared with the traditional extensometer measurement, it was seen that the whole field strain and displacement distributions were achieved with DIC technique and the extensometer measurement was given only average values. Besides, it was determined that local strains of the points that were selected near the fracture line were always higher than the homogenous deformation among to the points. In the Erichsen Cupping Test, it was observed that the cup height during the deformation of the sheet material and Erichsen index value were increased depends on the increasing of the temperature. Additionally, increment of the temperature was lead decreasing of the maximum forces at the fracture moment. Moreover, it was emphasized that DIC measurement technique is a useful, practical and high accuracy method for both material mechanical tests.

Key Word : Digital image correlation, Erichsen cupping test, stretch forming, tensile test, elevated temperature.

Science Code : 708.3.029

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında, desteğini, yardımlarını esirgmeden, bilgi ve birikimleri ile yol gsterici olan sayın Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA, Prof. Dr. Mustafa YAŐAR, Prof. Dr. Mustafa KURT, Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ, Prof. Dr. Halil DEMİR ve Doç. Dr. Fuat KARA'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tım kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
GENEL BİLGİLER	2
2.1. OTOMOTİV SACLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	2
2.1.1. Düşük Dayanımlı Çelikler	4
2.1.2. Yüksek Dayanımlı Çelikler	4
2.1.3. Ultra Yüksek Dayanımlı Çelikler	5
2.1.4. Günümüzdeki Uygulamalar.....	6
2.2. SICAK ŞEKİLLENDİRME	8
2.2.1. Doğrudan Sıcak Şekillendirme	9
2.2.2. Dolaylı Sıcak Şekillendirme	15
2.3. DİJİTAL İMAJ KORELASYON YÖNTEMİ	15
2.3.1. İmaj Çözünürlüğü ve Numune Ölçüleri	16
2.3.2. Odak Uzaklığı ve Kamera-Numune Arasındaki Mesafe İlişkisi	20
2.3.3. Bozulma (Distortion) Etkisi.....	21
2.3.4. Noktacık Deseni.....	21
2.3.5. Eşleştirme Metodu	25

	<u>Sayfa</u>
2.3.6. Fotometrik Haritalama.....	31
2.3.7. Yerdeğiştirme Haritalama.....	31
2.4. LİTERATÜR TARAMASI.....	34
BÖLÜM 3	43
MATERYAL VE METOT	43
3.1. MALZEME	43
3.2. METOT	48
3.2.1. Şekillendirme Sistemi.....	48
3.2.1.1. Tek Eksen Çekme Testi	48
3.2.1.2. Erichsen Kap Testi.....	62
BÖLÜM 4	75
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	75
4.1. TEK EKSEN ÇEKME TESTİ	75
4.1.1. Oda Sıcaklığı Tek Eksen Çekme Testi	75
4.1.2. Yüksek Sıcaklık Altında Tek Eksen Çekme Testi.....	78
4.1.2.1. DP980	78
4.2. ERICHSEN KAP TESTİ.....	81
4.2.1. Oda Sıcaklığı Erichsen Kap Testi.....	81
4.2.2. Yüksek Sıcaklıkta Erichsen Kap Testi	88
BÖLÜM 5	104
SONUÇLAR	104
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Farklı çelik türlerinin araçlarda kullanımı.....	3
Şekil 2.2. Otomotiv parçalarının üretiminde kullanılan çelik türlerinin akma dayanımlarına göre sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.3. Sıcak şekillendirilmiş araç şasi parçaları	7
Şekil 2.4. Sıcak şekillendirme ile üretilen araç şasi parçaları	8
Şekil 2.5. Doğrudan sıcak şekillendirme işleminin şematik diyagramı	10
Şekil 2.6. Doğrudan sıcak şekillendirme üretim hattı	10
Şekil 2.7. Fırında ısıtma işleminin şematik diyagramı	11
Şekil 2.8. Elektrikle ısıtma sisteminin şematik gösterimi	12
Şekil 2.9. İndüksiyon bobinleri ve oluşan manyetik alanın şematik gösterimi	14
Şekil 2.10. Çeşitli indüksiyon ısıtma uygulamaları.....	14
Şekil 2.11. Dolaylı sıcak şekillendirme işleminin şematik diyagramı	15
Şekil 2.12. DİK yöntemindeki değişkenler	16
Şekil 2.13. Görüntü dosyasındaki pikseller	16
Şekil 2.14. Görüntü oranları	18
Şekil 2.15. Farklı numune ölçüleri ve piksel olarak gösterimi.....	19
Şekil 2.16. Dikdörtgen bir numune için piksel sayısı.....	19
Şekil 2.17. Dijital kamerada odak uzaklığı	20
Şekil 2.18. Bozulma (Distortion) etkileri	21
Şekil 2.19. Noktacık deseni örneği.....	22
Şekil 2.20. Numune boyutu ve piksel sayıları.....	23
Şekil 2.21. Verilen bir noktanın zaman içindeki konumu	24
Şekil 2.22. Altküme piksel grubunun tanımlaması ve takip edilmesi	24
Şekil 2.23. Desen örnekleri	25
Şekil 2.24. Örnek bir referans imaj	26
Şekil 2.25. Dijital görüntünün ekrandaki ve hafızadaki matris formu	26
Şekil 2.26. Deformasyon sonrasındaki dijital imaj	27
Şekil 2.27. Deformasyon öncesi ve sonrası imaj renk değerleri	28
Şekil 2.28. Altküme piksel grubu 5x5 piksel için yerdeğiştirme 1x1 piksel olduğu durum	29

Sayfa

Şekil 2.29. Parazit içeren imajların renk değerleri	30
Şekil 2.30. Tam sayı olmayan yer değiştirme	31
Şekil 2.31. Altküme piksel grubunun geometrik değişimi	32
Şekil 2.32. Altküme piksel grubu şekil değişimi	32
Şekil 2.33. Kare altküme piksel grubunun şekil değişimi	33
Şekil 3.1. Çekme numunesi ölçüleri	43
Şekil 3.2. Ck75 sac malzemenin hadde yönüne göre mühendislik gerilme-gerinim eğrisi	45
Şekil 3.3. Ck75 sac malzemenin hadde yönüne göre gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	46
Şekil 3.4. 22MnB5 malzemenin hadde yönüne göre mühendislik gerilme-gerinim eğrisi	47
Şekil 3.5. 22MnB5 malzemenin hadde yönüne göre gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	47
Şekil 3.6. Tek eksen çekme testi düzeneği	49
Şekil 3.7. İndüksiyon güç kaynağı	50
Şekil 3.8. İndüktör tasarımı	51
Şekil 3.9. Flir T300 termal kamera	51
Şekil 3.10. Termal kamera ölçümü	52
Şekil 3.11. Kızılötesi tek nokta sıcaklık ölçüm sistemi	52
Şekil 3.12. 2B DİK yönteminin şematik resmi	53
Şekil 3.13. VHT marka Flameproof boya	54
Şekil 3.14. Boyanmış çekme numunesi örneği	54
Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık boyası	55
Şekil 3.16. Aremco PyroPaint uygulanmış 800 °C sıcaklıktaki numune	55
Şekil 3.17. Canon T3i kamera	56
Şekil 3.18. 2B DİK yöntemi için kalibrasyon uygulaması	57
Şekil 3.19. 100 Watt halojen aydınlatma	59
Şekil 3.20. Yüksek sıcaklık altındaki çekme numunesi	60
Şekil 3.21. Enerji ve dalgaboyu arasındaki ilişki	61
Şekil 3.22. Enerji ve sıcaklık arasındaki ilişki	61
Şekil 3.23. Mavi led ışıklandırma	62
Şekil 3.24. Erichsen Kap Testi kalıbı katı modeli	63
Şekil 3.25. Erichsen Kap Testi kalıbı şematik resmi	63
Şekil 3.26. 30 ton atölye tipi hidrolik pres	65

Sayfa

Şekil 3.27. Elektrik kaynağı trafo.....	66
Şekil 3.28. Elektrot sistemi ve Erichsen Kap Testi düzeneği.....	67
Şekil 3.29. PIC devresi.....	69
Şekil 3.30. Verth CA202L data logger.....	70
Şekil 3.31. Erichsen Kap Testi için oda sıcaklığı şekillendirme deneylerinde kullanılan numune boyutları.....	71
Şekil 3.32. Erichsen Kap Testi için yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneylerinde kullanılan örnek numune.....	72
Şekil 3.33. Nikon marka D90 model dijital kamera.....	72
Şekil 3.34. Kamera yerleşimi.....	74
Şekil 4.1. 2B DİK yöntemi ile ekstansometre ölçümünün karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.2. 2B DİK yöntemi sanal ekstansometre ölçümü ve seçilen noktaların gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	77
Şekil 4.3. DP980 malzemenin farklı sıcaklıklar altındaki gerilme gerinim eğrileri.....	78
Şekil 4.4. DP980 malzemenin 800 °C sıcaklıktaki bölgesel gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	80
Şekil 4.5. DP980 malzemenin 900 °C sıcaklıktaki bölgesel gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	80
Şekil 4.6. DP980 malzemenin 1000 °C sıcaklıktaki bölgesel gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	81
Şekil 4.7. Ck 75 sac malzemenin oda sıcaklığında yapılan deneylerine ait dijital mihengir kap yüksekliği ölçüm örnekleri.....	82
Şekil 4.8. Ck75 sac malzemenin 0,40 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylerden Numune No.1'e ait yırtılma anındaki kap yüksekliğinin 3B DİK ölçümü.....	84
Şekil 4.9. Ck75 sac malzemenin 0,50 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylerden Numune No.1'e ait yırtılma anındaki kap yüksekliğinin 3B DİK ölçümü.....	84
Şekil 4.10. Ck75 sac malzemenin 0,60 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylerden Numune No.1'e ait yırtılma anındaki kap yüksekliğinin 3B DİK ölçümü.....	84
Şekil 4.11. Ck75 sac malzemenin farklı kalınlıklar için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kuvvet eğrileri.....	86
Şekil 4.12. Ck75 sac malzemenin 0,40 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kalınlık dağılımı.....	87
Şekil 4.13. Ck75 sac malzemenin 0,50 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kalınlık dağılımı.....	87

Şekil 4.14. Ck75 sac malzemenin 0,60 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kalınlık dağılımı.....	87
Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 0,4 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri.....	89
Şekil 4.16. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 0,5 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri.....	89
Şekil 4.17. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 0,6 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri.....	89
Şekil 4.18. 0,4 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kap yükseklikleri	91
Şekil 4.19. 0,5 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kap yükseklikleri	91
Şekil 4.20. 0,6 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kap yükseklikleri	91
Şekil 4.21. Ck75 sac malzeme için farklı sıcaklıklar altında yapılan deneylere ait kuvvet-kap yüksekliği eğrileri.....	93
Şekil 4.22. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen Ck75 sac malzemeye ait kalınlık dağılımı.....	94
Şekil 4.23. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 22MnB5 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri	96
Şekil 4.24. 800 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzemenin 3B DİK yırtılma kap yüksekliği.....	98
Şekil 4.25. 900 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzemenin 3B DİK yırtılma kap yüksekliği.....	98
Şekil 4.26. 1000 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzemenin 3B DİK yırtılma kap yüksekliği.....	98
Şekil 4.27. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 22MnB5 sac malzemeye ait kuvvet-kap yüksekliği eğrileri.....	99
Şekil 4.28. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 22MnB5 sac malzemeye ait kalınlık dağılımı.....	100
Şekil 4.29. 800 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 malzemenin Numune No.1'e ait von Mises birim şekil değiştirme dağılımı.....	102
Şekil 4.30. 900 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 malzemenin Numune No.1'e ait von Mises birim şekil değiştirme dağılımı.....	102
Şekil 4.31. 1000 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 malzemenin Numune No.1'e ait von Mises birim şekil değiştirme dağılımı.....	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Çekme numunesi ölçü değerleri	44
Çizelge 3.2. DP980 sac malzemenin kimyasal bileşimi	44
Çizelge 3.3. Ck75 sac malzemenin kimyasal bileşimi.....	45
Çizelge 3.4. Ck75 sac malzemenin mekanik özellikleri.....	45
Çizelge 3.5. 22MnB5 sac malzemenin kimyasal bileşimi	46
Çizelge 3.6. Canon T3i dijital kameranın özellikleri.....	57
Çizelge 3.7. Erichsen Kap Testi kalıbı ölçüleri	64
Çizelge 3.8. Nikon D90 dijital kameranın özellikleri.....	73
Çizelge 4.1. Ck 75 sac malzemenin oda sıcaklığı şekillendirmelerinde yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği ölçümleri.	82
Çizelge 4.2. Yüksek sıcaklıkta şekillendirilen Ck75 sac malzeme için yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği.....	90
Çizelge 4.3. Ck75 için farklı kalınlıklar ve sıcaklıklar altındaki ortalama maksimum kuvvet değerleri.	94
Çizelge 4.4. Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklarda şekillendirilen numunelerine ait kalınlık değerleri.....	95
Çizelge 4.5. Yüksek sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzeme için yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği.....	96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: alüminyum
ρ	: yoğunluk
E	: elastisite modülü
$R_{p0.2}$: akma dayanımı
R_m	: çekme dayanımı
n	: pekleşme üsteli
C	: karbon
Si	: silisyum
Mn	: manganez
Mo	: molibden
B	: bor
Cr	: krom
Al_{top}	: toplam alüminyum
P	: fosfor
S	: kükürt
Cu	: bakır
Ni	: nikel
Ti	: titanyum
\emptyset	: çap
nm	: nanometre
I	: spektral enerji
λ	: dalga boyu
T	: sıcaklık
H	: Planck sabiti
c	: ışık hızı
k	: Boltzmann sabiti

e	: doğal logaritma
R	: direnç katsayısı
w	: genişlik
I _a	: akım
t	: kalınlık
τ	: süre
°C	: santigrat derece
M6	: metrik 6 diş
M90	: metrik 90 diş
kW	: kilowatt
mm/s	: milimetre/saniye
in/min	: inç/dakika
V	: volt
A	: amper
mm	: milimetre
N	: Newton
MPa	: mega paskal
GPa	: giga paskal
%	: yüzde
μm	: mikron
Mp/cm ²	: megapiksel/santimetre kare
°	: derece
2B	: iki boyutlu
3B	: üç boyutlu
f	: fokal uzaklık
r _m	: anizotropi

KISALTMALAR

- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- DİK : Dijital İmaj Korelasyon
- DIC : Digital Image Correlation (Dijital İmaj Korelasyon)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- TS : Türk Standardı
- IF : Interstitial Free (Arayer Atomsuz Çelik)
- TRIP : Transformation Induced Plasticity (Dönüşüm Kaynaklı Plastisite)
- BH : Bake Hardenable (Fırında Sertleşebilen)
- IS : Isotropic Steels (İzotropik Çelikler)
- HSLA : High Strength Low Alloy (Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli)
- SSD : Sum of Squared Differences (Kare Farklarının Toplamı)
- ZNCC : Zero-Mean Normalized Cross Correlation (Sıfır Ortalamalı Normalleştirilmiş Çapraz Korelasyon)
- ZNSSD : Zero-Mean Normalized Sum of Squared Difference (Sıfır Ortalamalı Normalleştirilmiş Kare Farkların Toplamı)
- PSSD_{ab} : Parametric Sum of Squared Difference (Parametrik Kare Farkların Toplamı)
- ILS : Iterative Least Squares (Tekrarlı En Küçük Kareler)
- DDÇ : Düşük Dayanımlı Çelik
- YDÇ : Yüksek Dayanımlı Çelik
- UYDÇ : Ultra Yüksek Dayanımlı Çelik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde otomotiv endüstrisinde yüksek dayanımlı çeliklerin (YDÇ) kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. YDÇ malzemelerin birçok avantajları olmasına rağmen şekillendirilebilirliği sınırlıdır. Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde araç gövde parçalarının üretilmesinde kullanılan yüksek mukavemetli yassı çeliklerin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki şekillendirilmesinin Dijital İmaj Korelasyonu (DİK) yöntemiyle incelenmesi üzerine çalışılmıştır.

Birinci bölümde, tez çalışmasının bölümleri, aşamaları ve içerdiği genel bilgiler açıklanmıştır.

İkinci bölümde, otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik saclar, düşük, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı sacların özellikleri, sıcak şekillendirme özellikleri ve uygulamaları, DİK yöntemi ve literatürde bu alanda yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

Üçüncü bölümde, materyal ve metot genel başlığı altında, şekillendirme deneylerinde kullanılan sistem ve ekipmanlar, ölçüm araçları, DİK yöntemi için kullanılan ekipmanlar, kullanılan numunelere ait özellikler açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki tek eksen çekme test sonuçları, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki Erichsen Kap Testi sonuçları, DİK yöntemine ait ölçüm sonuçları, yer değiştirme, uzama ve kalınlık dağılımı, kuvvet değerlerini içeren bilgilere yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, sonuçlar başlığı altında, deneysel verilerden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Günümüzde, otomotiv üreticilerinin temel hedefi, insan güvenliğinden taviz vermeden daha hafif ve gövde dayanımı daha yüksek araçlar üretip, yakıt sarfiyatını da düşürmektir. Bu amaçla, araç gövde sistemlerinin üretiminde çeşitli çelik ve alüminyum alaşımından oluşan sac malzemeler kullanılmakta ve yaygın olarak da YDÇ malzemeler tercih edilmektedir.

YDÇ malzemelerin tercih edilmelerinin diğer bir sebebi de düşük alaşımlı çeliklere kıyasla daha iyi şekillendirilebilme kabiliyetine sahip olmalarıdır. Ayrıca, bu çelikler, düşük alaşımlı çeliklerin ulaşamadığı mukavemet değerlerine sahip olabilmekte ve dayanımı daha yüksek araç şasislerinin üretimlerinde kullanılabilir [1].

2.1. OTOMOTİV SACLARININ SINIFLANDIRILMASI

Araç tasarımcıları, insanların hayat standartlarına göre yüksek güvenli araçlar tasarlarlarken aynı zamanda düşük yakıt sarfiyatı ve müşterilerin kişisel ihtiyaç ve taleplerini de göz önünde bulundurmaları zorundadırlar. Bu kriterlerin hepsinin birden optimum seviyede tutulması için üretimde kullanılan sac malzemelerin özellikleri önem kazanmaktadır. Kullanılan sac malzemelerin, doğru şekillenebilme, kaynak edilebilme, montajlanabilme ve de iyi mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [2].

Otomotiv sanayinde kullanılan çelikleri kendi içlerinde sınıflandırabilmek mümkündür. Bu sınıflandırma, metalürjik özelliklerine veya mekanik özelliklerine göre yapılmaktadır [2, 3].

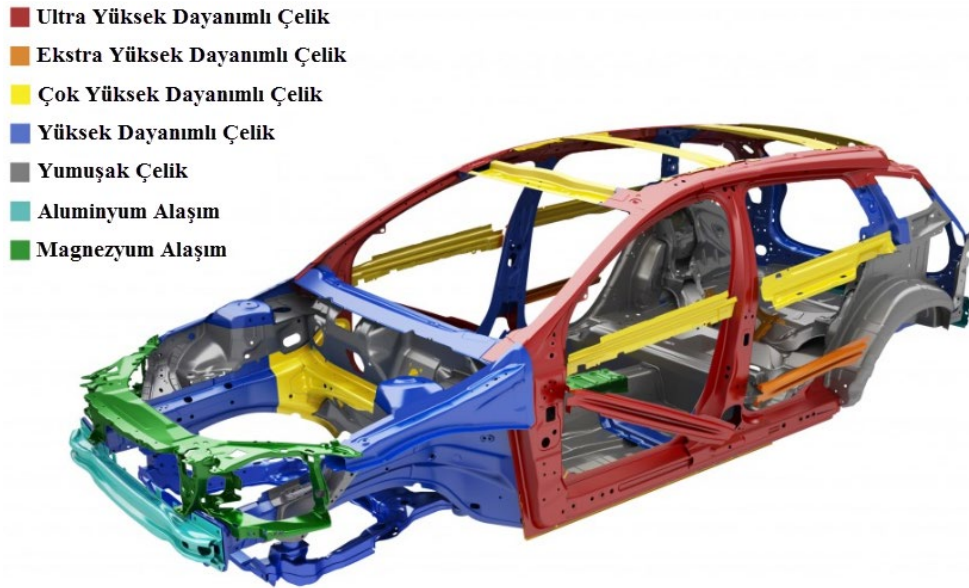
Metalürjik özelliklerine göre sınıflandırıldığında [2, 3];

- Düşük dayanımlı çelikler (DDÇ) : Arayer atomsuz yumuşak çelikler.
- Yüksek dayanımlı çelikler (YDÇ) : Karbon-Mangan çelikleri, sertleşebilen çelikler. IF çelikleri, düşük alaşımlı çelikler.
- Ultra yüksek dayanımlı çelikler (UYDÇ) : Çift fazlı çelikler, TRIP çelikleri, kompleks fazlı çelikler, martenzit yapılı çelikler.

Mekanik özelliklerine göre sınıflandırıldığında [2, 3];

- Düşük dayanımlı çelikler (DDÇ) : Çekme dayanımları 270 MPa altında olan çelikler.
- Yüksek dayanımlı çelikler (YDÇ) : Çekme dayanımları 270 MPa-700 MPa arasında olan çelikler.
- Ultra yüksek dayanımlı çelikler (UYDÇ) : Çekme dayanımları 700 MPa üzerinde olan çelikler.

Sınıflandırılan çelik türleri arasında, araç gövde sistemlerinde ağırlıklı olarak dayanımı yüksek olan çelikler tercih edilmektedir. Şekil 2.1’de örnek bir araç üzerinde kullanılan farklı çelik türleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Farklı çelik türlerinin araçlarda kullanımı [4].

2.1.1. Düşük Dayanımlı Çelikler

DDÇ malzemeler, çekme mukavemet aralığı yaklaşık 200-300 MPa arasında olan çeliklerdir. Bu çeliklere örnek olarak arayer atomsuz çelikler (IF çelikleri) ve yumuşak çelikler (MILD çelikleri) verilebilmektedir. Yumuşak çelikler (MILD çelikler) ferrit yapıdadırlar. Aynı zamanda bu çelikler, anizotropi değerleri (r_m) yüksek olduğu için derin çekme uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Bu çeliklerin, akma mukavemeti 100 MPa civarında olanları şekillendirilmesi çok zor olan parçalarda kullanılmaktadır. Diğer bir DDÇ tipi olan IF çelikleri, çok az miktarda arayer atomu içermeleri sebebiyle akma mukavemetleri düşük olup yüksek uzama davranışı sergilerler. Bu sayede aynı yumuşak çelikler gibi, iyi şekillenebilirlik kabiliyetlerinden dolayı derin çekme işlemlerine elverişlidir [1].

2.1.2. Yüksek Dayanımlı Çelikler

YDÇ malzemeler, çekme mukavemeti yaklaşık olarak 270-700 MPa arasında olan çeliklere verilen bir sınıflandırmadır. Bu tip çeliklere örnek olarak, fırında sertleşebilen çelikler (BH çelikleri), izotropik çelikler (IS çelikleri), yüksek dayanımlı arayer atomsuz çelikler (IF-HS çelikleri), yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA çelikleri) verilebilir. Fırında sertleşebilen çelikler (BH çelikleri) kolay şekillendirilebilen, şekillendirme işlemi sırasında görülen çalısma sertleşmesi ve ısıl işlem sırasında oluşan yaşlanmanın etkisiyle dayanımlarının önemli derecede arttığı çelik türüdür. İzotropik çelikler (IS çelikleri), ferrit yapıya sahip olup, gerdirerek ve çekilerek şekillendirme işlemlerine uygundur. Ayrıca, bu çelik türünün düzlemsel anizotropi değeri sıfır olduğu için, şekillendirme işleminde kulaklanmanın meydana gelme olasılığı çok düşüktür. Yüksek dayanımlı arayer atomsuz çelikler (IF-HS çelikleri), düşük akma mukavemetine sahip arayer atomsuz çeliklere (IF çelikleri) fosfor, silikon, mangan eklenerek dayanımlarının arttırıldığı çelik türüdür. Bu çeliklerin çekme ve akma dayanımları, arayer atomsuz çeliklere göre daha yüksek, şekillendirme kabiliyetleri ise daha düşüktür. Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (HSLA çelikleri), küçük taneli ferrit mikroyapıya sahip çeliklerdir. Bu çeliklerin sertleşme mekanizması, kimyasal bileşimlerine bulunan mikro alaşım elementlerinin (Ti, V, Nb gibi) karbon (C) ve/veya azot (N) ile oluşturduğu

çökeltilerdir. Bu sacların yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmesini sağlayan alaşım elementleri olduğu için, bu saclara aynı zamanda mikro alaşımlı saclar da denir [1].

2.1.3. Ultra Yüksek Dayanımlı Çelikler

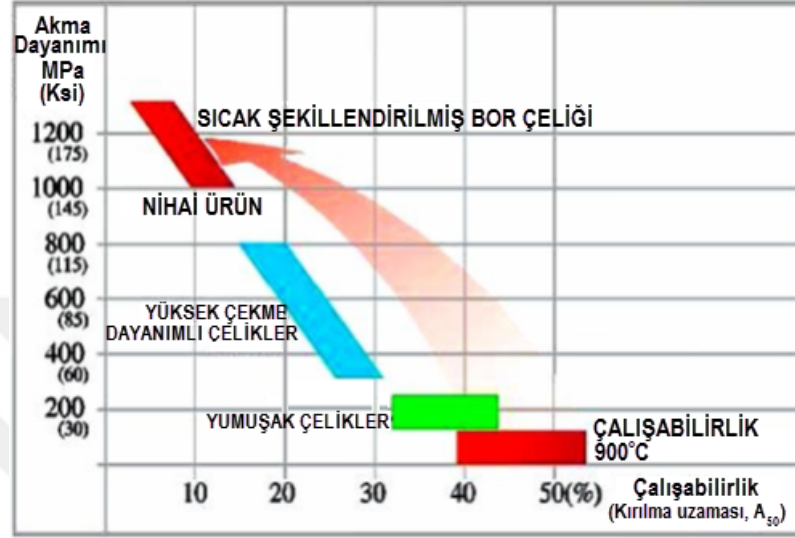
UYDÇ malzemelere ait genel bir ifade bulunmamakla birlikte, çoğunlukla akma dayanımları 560 MPa ve üzerinde olan çeliklere verilen isimdir. Bu çeliklere, orta karbonlu düşük alaşımlı çelikler, orta alaşımlı sertleşebilen takım veya kalıp çelikleri, yüksek alaşımlı sertleşebilen çelikler, yüksek nikel alaşımlı çelikler, yarı östenit çökeltme sertleşmesi çelikleri gibi örnekler verilebilir [3, 5, 6].

Günümüzde araç üreticileri, darbeye dayanıklı parçalar üretebilmek, araç ağırlığını azaltmak ve araç güvenliğini arttırmak için mükemmel şekillenme ve tokluk özellikleri olan UYDÇ sac malzemelere veya alüminyum malzemelere ihtiyaç duymaktadırlar. Eğer, araç gövde parçaları çok karmaşık şekillere sahip ise, alüminyum kullanımı ağırlık azaltılması ve kolay şekillenme özellikleri bakımından bir çözüm olarak sunulabilir. Ancak, hem dayanım açısından hem de yüksek maliyet nedeniyle alüminyum kullanımı olumsuz bir tercih olabilmektedir. Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerin kullanımı, ürün geometrisi çok karmaşık değilse uygun bir çözümdür. Bu çelikler, yüksek dayanım, kaynak edilebilme kabiliyeti ve darbe direnci özelliklerine sahiptirler [5].

Çelik sac malzemelerde, dayanımın artırılması, şekillenme kabiliyetinin azalmasına neden olur. Bu sebepten üretim esnasında iyi şekillenme ve ultra yüksek dayanım gibi istenilen özellikleri başlangıçta belirlemek ve buna uygun sac türlerini kullanmak gerekmektedir. Bu duruma verilebilecek bir örnek ise, karmaşık geometrili parçaların üretilmesine olanak sağlayan iyi şekillenme kabiliyeti olan bor alaşımlı çelik sacların kullanımınıdır. Çelik saclara eklenen bor, sertleştirme görevi görmektedir [5].

Düşük alaşımlı çeliklere, 10-20 ppm oranında bor ilave edilmesi ile östenit tane sınırları boyunca borun segregasyonu sağlanmakta ve böylece ferritin çekirdeklenmesi engellenerek malzemenin sertleşebilirliği arttırılmaktadır [3]. Diğer yandan, 30 ppm civarında bor ilavesinin, sertleştirmeye katkısı, %0,6 Mn veya %0,7 Cr veya %0,5 Mo

veya %1,5 Ni eklenmesine eş değerdir. Isıl işlem veya sıcak şekillendirme sonrası bu çelikler 1500 MPa'dan daha fazla çekme dayanımı ve 1100 MPa civarında akma dayanımı sergilemektedirler. Şekil 2.2'de otomotiv parçalarının üretiminde kullanılan çelik türlerinin akma dayanımlarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir [5].



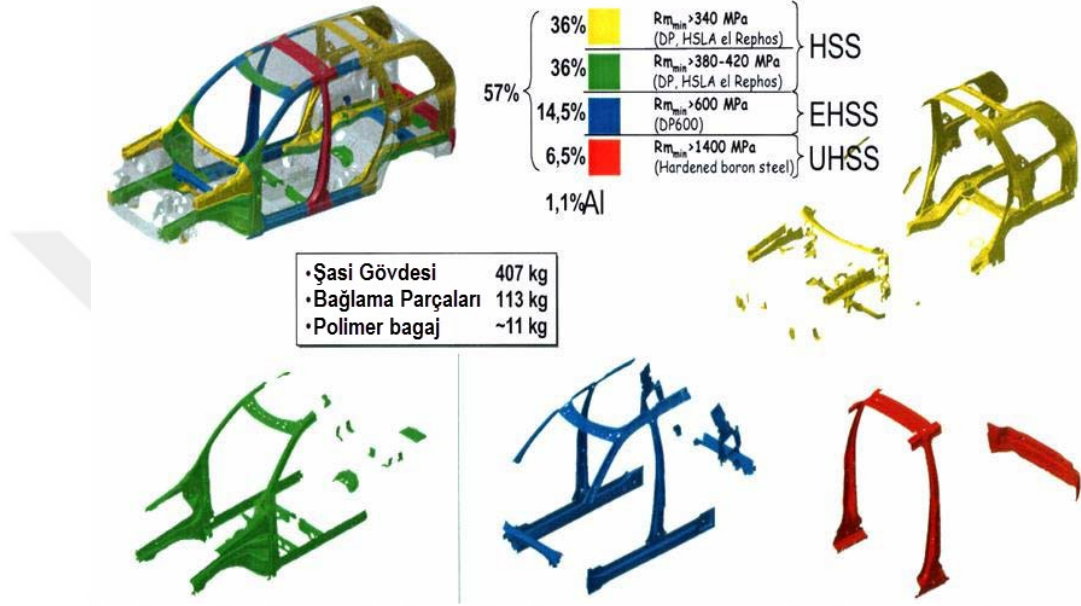
Şekil 2.2. Otomotiv parçalarının üretiminde kullanılan çelik türlerinin akma dayanımlarına göre sınıflandırılması [5].

2.1.4. Günümüzdeki Uygulamalar

Haddelenmiş bor çelikleri, ısıl işlem öncesindeki düşük mekanik özellikleri sayesinde iyi kesilme ve soğuk şekillendirme kabiliyetine sahiptirler. Isıl işleme tabi tutulduktan sonra yüksek sertlik değerlerine ulaşmaları sebebiyle özellikle, aşınmaya karşı direnç gerektiren uygulamalar için uygundur. Bu tip çelikler için esas uygulama alanları; tarım makineleri, diskler, saban demirleri ve pulluk gibi ısıl işlem görmüş ve aşınmaya karşı dirençli parçalardır. Bor alaşımlı çeliklerin bu karakteristik özelliği ile ilişkili olarak, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler ile karşılaştırıldığında yapı ve otomotiv elemanlarının üretiminde, %50'ye kadar daha fazla ağırlık azaltılmasına olanak sağlamaktadırlar [5].

Bor alaşımlı çelik sacların endüstrideki uygulamaları, özellikle eklemesiz otomotiv gövde parçalarında kullanımı, sıcak şekillendirme işleminin kullanılmasıyla daha da geliştirilmiştir. Günümüzde, birçok firma, kapı kirişleri, A ve B takviye sütunları, ön

ve arka tampon, yan darbe kirişleri ve birçok araç gövde parçalarını, sıcak şekillendirme yönteminde bor alaşımli çelikleri kullanarak üretmektedir. Şekil 2.3'te örnek bir araç üzerinde sıcak şekillendirilmiş UYDÇ uygulamaları gösterilmiştir. Şekil 2.3'te araç gövdesinin yaklaşık %6,5'inin bu tip ürünler ile üretildiği görülmektedir [5].



Şekil 2.3. Sıcak şekillendirilmiş araç şasi parçaları [5].

Sonuç olarak, sıcak şekillendirme işlemine tabi tutulmuş, sertleştirilebilir bor alaşımli çelikler birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar; şekillendirme işlemi süresince çok yüksek şekillenebilirlik, karmaşık geometrilerin kolay şekillendirilebilmesi, işlem sonrasında UYDÇ ürünlerin elde edilmesi, yüksek tokluk, yüksek uzama, malzeme özelliklerinden bağımsız şekillendirme derinliği, kabul edilebilir ölçüsel tolerans, iyi kaynak edilebilme ve çarpışma uygulamalarında elverişli olması olarak özetlenebilir [5].

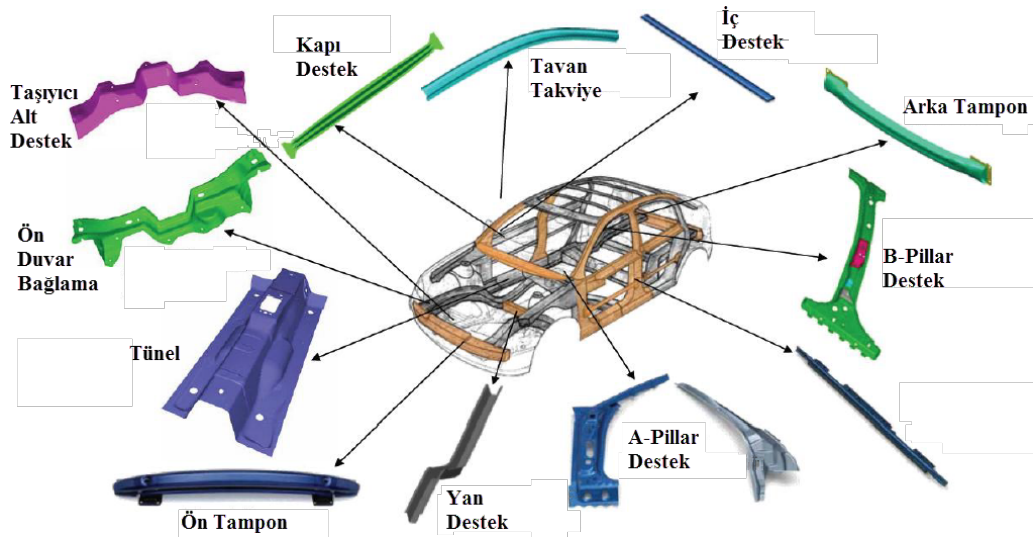
Sıralanan bu avantajlar sayesinde, araç üreticilerinin birçoğu araçlarında sıcak şekillendirilmiş parçaları tercih etmektedir. Bu yüzden, piyasada yeni sıcak şekillendirme yapan firmalar ortaya çıkmakta ve birçok yeni üretim hatları dünya çapında kurulmaktadır. Sıcak şekillendirme için yassı bor alaşımli çeliklerin toplam tüketimi tahmini olarak 2003 yılında Avrupa'da yılda 60,000-80,000 ton olarak tahmin

edilmiştir. 2008-2009 arasında bu tüketim Avrupa’da yılda 300,000 tona çıkmıştır. Aynı artış Japonya ve Kuzey Amerika’da da gözlemlenmiştir. 2003 yılında Avrupada 15 adet sıcak şekillendirme üretim hattı bulunurken, 2009 yılında bu rakam 42 adete yükselmiştir [5].

2.2. SICAK ŞEKİLLENDİRME

YDÇ malzemelerin sahip oldukları avantajlarının yanı sıra, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. YDÇ sac malzemelerin oda sıcaklığındaki şekillenebilirliği, düşük şekillenme kabiliyeti ve geri yaylanma faktörleri nedeniyle sınırlıdır. Bu sebeple, soğuk şekillendirilen YDÇ malzemelerin, nihai ürün olarak kullanımlarında şekillendirme işlemi sonrasında hata ve ölçü sapmaları meydana gelmektedir [7].

Yüksek dayanımlı çeliklerin bu sınırlılıklarına çözüm olarak, çeliklerin şekillendirilmesinde sıcaklık faktörünün kullanımı düşünülmüş ve sıcak şekillendirme işlemi bu soruna alternatif bir çözüm yöntemi olarak geliştirilmiştir. Sıcak şekillendirme; şekillendirme ve soğutmanın aynı kalıpta yapıldığı izotermal olmayan bir şekillendirme çeşididir [7]. Şekil 2.4’te sıcak şekillendirme yöntemiyle üretilen ve araç şasi sistemlerinde kullanılan elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Sıcak şekillendirme ile üretilen araç şasi parçaları [7].

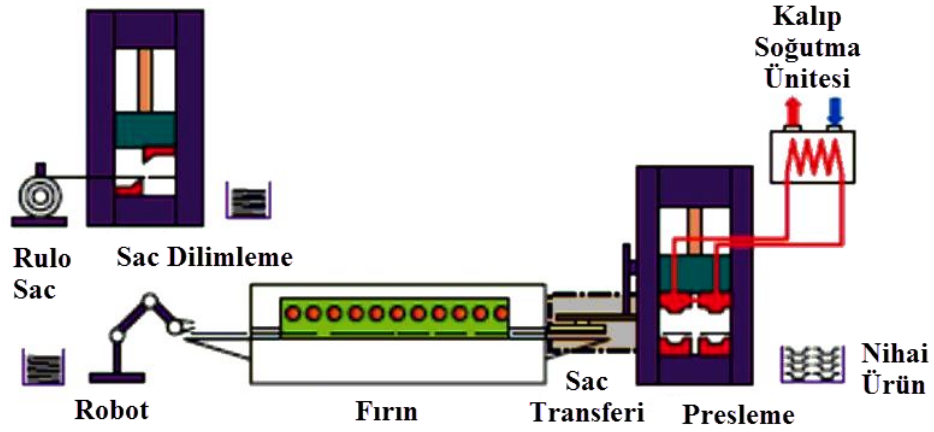
Sıcak şekillendirme işlemi ilk olarak İsveç firması olan Plannja tarafından, 1977 yılında geliştirilen ve patenti alınan, testere ağızları ve çim biçme makinelerinin hareketli bıçaklarının üretilmesinde kullanılan bir üretim yöntemidir. 1984 yılında ilk olarak araç üreticileri tarafından bor alaşımlı çeliklerin, araç gövdelerinde kullanılması için sıcak şekillendirme yönteminden faydalanılmıştır [8, 9].

Sıcak sac şekillendirme işleminde, kullanılan sac malzemeye şekillendirme işlemi öncesinde ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Isıtılan sac malzeme daha sonra kalıp içerisine taşınarak yüksek sıcaklık altında şekil verilmekte ve kapalı kalıp içerisinde soğutulmaktadır. Sıcak şekillendirme işleminin en önemli avantajları, mükemmel derecede hassas olarak kalıp geometrisinin sac malzemede elde edilmesi ve aynı zamanda yüksek dayanımlı parçaların üretilmesinde geri yaylanmanın görülmemesidir. Şekillendirme işleminde, östenit yapıdan martenzit yapıya dönüşüm sayesinde, geri yaylanma önlenmiş olur. Sıcak şekillendirme yöntemi, östenit yapının elde edilmesi için ısıtma işlemi, sac malzemenin kalıba transferi, sıcak olarak şekil verme, kesme ve ayırma, sac malzemenin soğuması gibi farklı adımların birleştirildiği bir işlemdir [5].

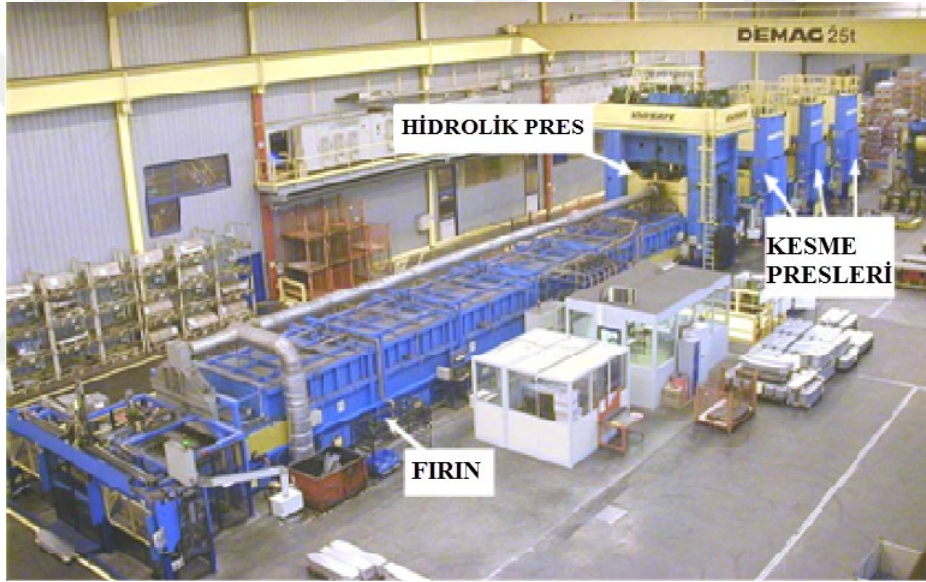
Sıcak şekillendirme işlemi için genel prosedür aynı olmasına rağmen, farklı üretim teknikleri ve ekonomik sebepler nedeniyle, sıcak şekillendirme mekanizmalarında farklılıklar görülebilmektedir. İşlem sırasına göre sıcak sac şekillendirme kendi arasında, doğrudan sıcak şekillendirme ve dolaylı sıcak şekillendirme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [5].

2.2.1. Doğrudan Sıcak Şekillendirme

Doğrudan sıcak şekillendirme işleminde, sac malzeme başlangıçta dilimlere ayrılarak, fırın içerisinde 900 °C-950 °C civarındaki sıcaklığa kadar ısıtılır. Daha sonra, özel transfer mekanizmaları veya robot sistemleri ile kalıp içerisine taşınarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilir. Şekillendirme işlemi tamamlandığında sac malzeme kalıp içerisinde tutularak sertleşmesine izin verilir [5]. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sırasıyla, şekillendirme işlemine ait şematik diyagram ve örnek bir üretim hattı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Doğrudan sıcak şekillendirme işleminin şematik diyagramı [5].

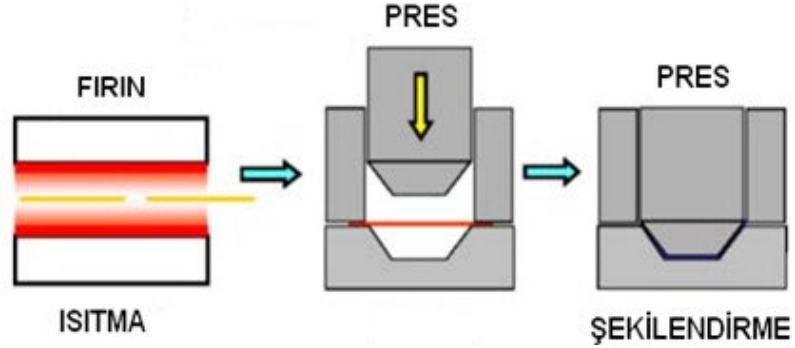


Şekil 2.6. Doğrudan sıcak şekillendirme üretim hattı [3].

Doğrudan sıcak sac şekillendirme işleminde sac malzemenin ısıtılması için farklı yöntemler kullanılmaktadır.

Fırında ısıtma işlemi, en yaygın olarak kullanılan sıcak şekillendirme yöntemlerden biridir. Fırında ısıtma işleminde sac malzeme, fırın içerisinde östenit sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Fırın içerisinde ısınan malzeme özel transfer sistemleri veya robot sistemleri ile taşınır ve kalıp içerisinde ısıtılan malzemeye istenilen form verilerek şekillendirilir. Daha sonra şekillendirilen malzeme kapalı

kalıp içerisinde tutularak uygun soğuma hızıyla soğutulur [3]. Şekil 2.7’de fırında ısıtma sistemine ait şematik diyagram gösterilmiştir.



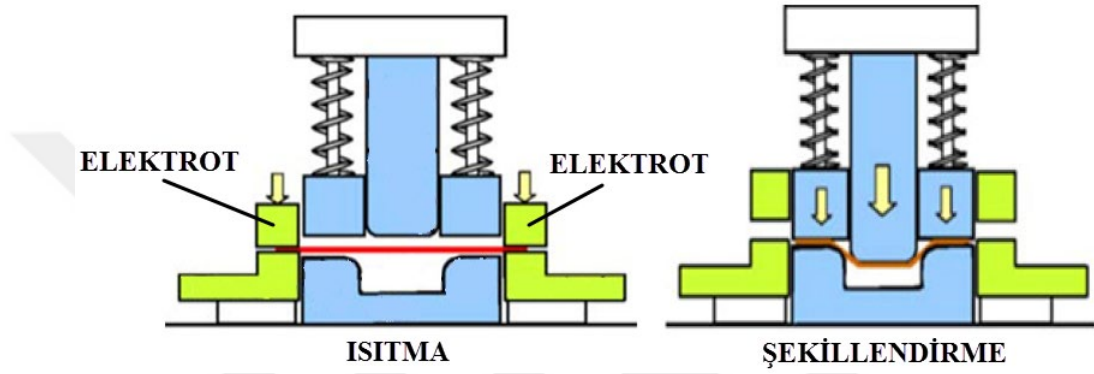
Şekil 2.7. Fırında ısıtma işleminin şematik diyagramı [3].

Fırında ısıtma işleminde homojen ısı dağılımının sağlanabilmesine rağmen, fırın içerisindeki ısınan sac malzemenin şekillendirme kalıbına taşınması için özel transfer sistemleri veya robot sistemleri kullanıldığından maliyeti arttırmaktadır. Ayrıca, ısıtılan malzemenin taşınması sırasında hızlı bir biçimde yaklaşık 100 °C’lik ısı kaybı meydana gelmesiyle üretim kalitesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Fırında ısıtma işleminin, bir diğer dezavantajı ise sac malzemenin ısıtılması için yüksek enerji gereksinimidir. Bu yöntemde, şekil verilecek sacın boyutuna bağlı olarak büyük ebatlı fırınlar kullanılmaktadır. Kullanılan sistemin maliyetinin yüksek olması, fazla enerji harcanması ve büyük ebatlarda olması fırında ısıtma işleminin dezavantajları arasında sayılmaktadır [3].

Sıcak şekillendirme işleminde, sac malzemelerin ısıtılmasında atmosfer kontrollü fırınlar yaygın olarak kullanılmasına rağmen, sac malzemenin kalıp içerisine taşınması ve taşıma esnasında sıcaklık kaybı üretim kalitesini azaltmakta, robot sistemlerine olan gereksinim ise maliyeti arttırmaktadır. Bu yüzden, sıcak şekillendirme işleminde son dönemde, sac malzemenin kalıp içerisine konarak elektrik direnci yardımıyla ısıtılması yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [10].

Fırında ısıtma işleminin dezavantajları göz önüne alındığında, daha pratik ve hızlı bir yöntem olarak kabul edilen elektrikle ısıtma yöntemi geliştirilmiştir. Elektrikle ısıtma, metalik malzemelerin elektrik iletkenliğinden ve malzemenin kendi öz direnciden

faýdalanılarak sıcaklığının arttırıldığı ısıtma yöntemidir. Elektrikle ısıtma yönteminde, metalik sac malzeme iki elektrot arasına sıkıştırılmakta ve elektrik akımının artı ve eksi kutupları bu elektrotlara bağlanmaktadır. Elektrotlardan geçen elektrik akımı, sac malzeme üzerinden iletilerek, sac malzemenin öz direnci sayesinde sıcaklığı artmaktadır. Elektrotlar açıldığında ısıtılmış malzeme, transfer işlemine gerek kalmadan, kalıp içerisinde şekillendirilip, yine aynı kalıpta soğumaya bırakılmaktadır [3]. Şekil 2.8’de elektrikle ısıtma sisteminin şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Elektrikle ısıtma sisteminin şematik gösterimi [3].

Metalik sac malzemelerin elektrikle ısıtılması, fırında ısıtmaya göre ısıtma süresinin kısa olması, daha ekonomik olması, enerji tüketiminin az olması, daha küçük alanlarda çalışabilmesi ve tekrarlanabilirlik gibi avantajlara sahiptir. Elektrikle ısıtma sisteminin avantajlarının yanı sıra, karmaşık geometrili parçaların homojen olarak ısıtılmasının zor olması ve elektrotlar ile sac arasındaki temasın düzensiz olması nedeniyle, sac üzerinde homojen olmayan sıcaklık dağılımının gözlenmesi gibi problemler ile karşılaşılabilir [3].

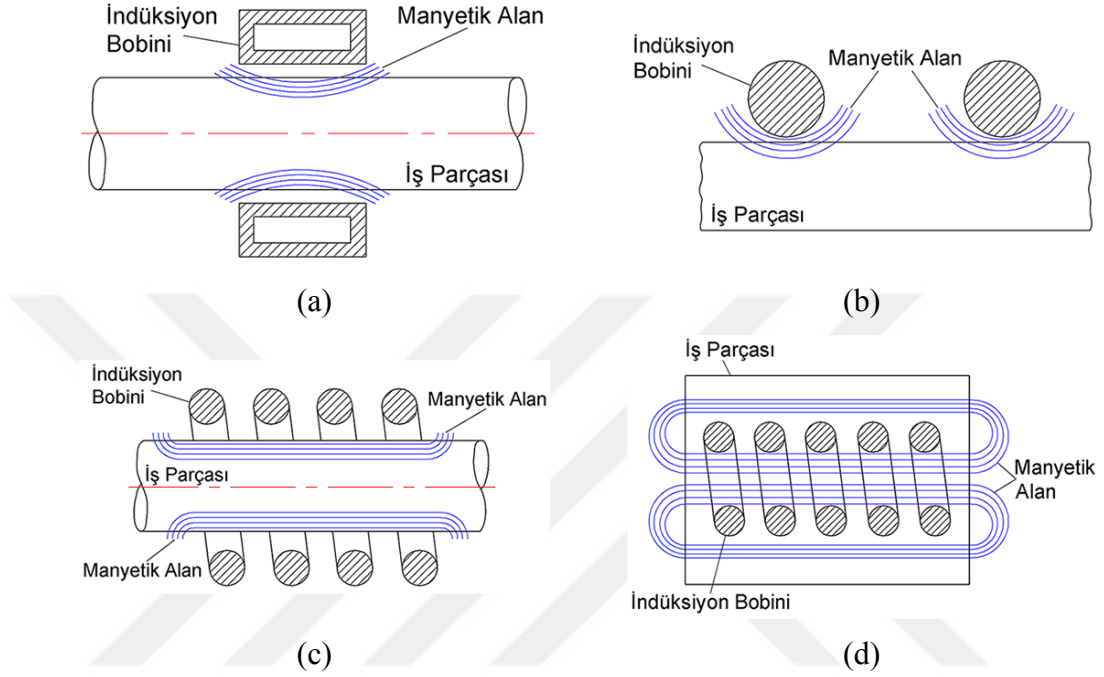
Bu işlemde, sac malzemenin kalıp içerisinde doğrudan ısıtılması sayesinde transfer işlemi ortadan kaldırılmış olup, transferden kaynaklı sıcaklık düşüşü önlenmiştir. Metalik sac malzeme, iletkenlik özelliğinden yararlanılarak, elektrik direnci sayesinde istenilen sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Elektrikle ısıtma işlemi, kullanılan pres, otomasyon sistemleri ile entegre olabilecek kadar hızlı ve yüksek enerji verimliliği söz konusudur. Farklı ısıtma sistemlerine kıyasla ise daha kompakt ekipmanlara sahiptir [5].

Ayrıca, sac malzemenin şekillendirilmesi için kalıba taşınma işlemi ortadan kaldırıldığı için, malzemede oluşabilen oksitlenme problemi de giderilmiş olmaktadır. Fakat, elektrikle ısıtma işleminde de, hızlı ısınmadan dolayı, sıcaklık kontrolü zorlaşmaktadır [5].

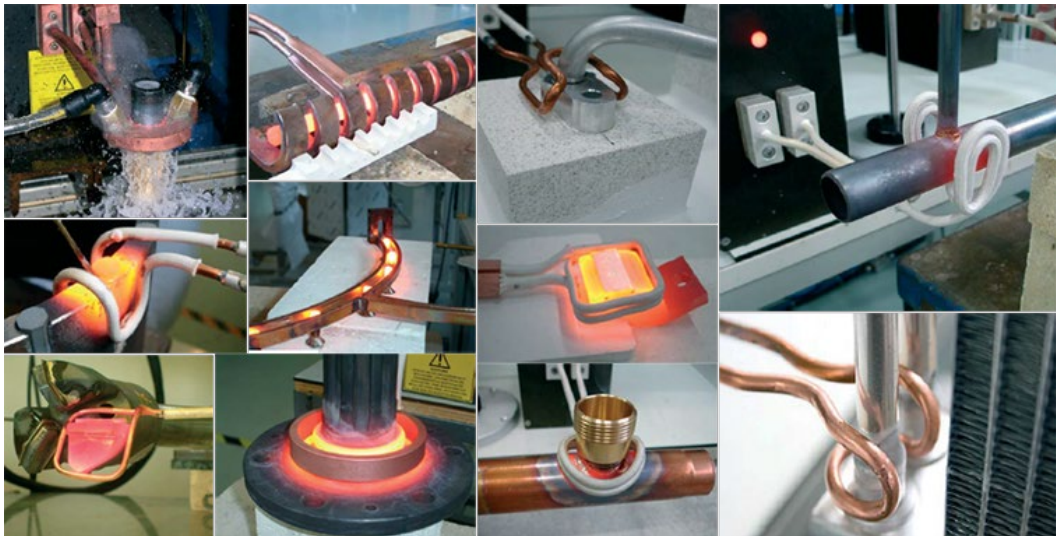
İletimle ısıtma metotlarına benzer olarak, elektrik akımının kullanıldığı indüksiyon ile ısıtma yöntemi de sıcak şekillendirme uygulamalarında kullanılan bir diğer ısıtma yöntemidir [7]. Bu yöntem, hızlı, verimli, hassas, tekrarlanabilir, temassız bir ısıtma yöntemi olduğu için tercih edilmektedir. İmalat endüstrisinde, ergitme, ısıl işlem, kaynak öncesi ön ısıtma, lehimleme, pirinç kaynağı, kürleme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

İndüksiyon ile ısıtma sistemlerinde, yüksek frekanslı güç kaynağı ve indüksiyon bobini (indüktör) kullanılarak iletken veya yarı iletken malzemelerin sıcaklığı elektromanyetik alandan yararlanılarak artırılmaktadır. Güç kaynağı, indüksiyon bobinine alternatif elektrik akımını iletmekte ve indüksiyon bobini iletken parçanın ısıtılması için elektrik akımını indükte etmektedir. İndüksiyon bobini ve iş parçası arasında herhangi bir temasa gerek kalmadan, sıcaklık artışı iletken parçanın indüksiyon bobinine yakın bölgelerde meydana gelmektedir. Sıcaklık artışı, indüksiyon bobininde bulunan alternatif elektrik akımının görünmeyen bir elektro manyetik kuvvet alanı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. İndüksiyon bobini iş parçasına yakın veya çevresine konulduğunda, bobin ve iş parçası arasındaki hava boşluğunda kuvvet çizgileri yoğunlaşmaktadır. İndüksiyon bobinini saran kuvvet alanı iş parçasın içerisinde eşit ve ters yönde elektrik akımını indükte etmektedir. İndükte olan elektrik akımının akışına direnç gösteren iş parçasında ısı oluşmaya başlamaktadır. İş parçasında oluşan ısının oranı indükte olan akımın frekansına, indükte olan akımın gerilimine, iş parçası malzemesinin özgül ısısına, iş parçası malzemesinin manyetik geçirgenliğine, elektrik akımının akışına karşı malzemenin göstermiş olduğu dirence bağlıdır [12]. İndüksiyon bobini veya indüktörler ise değişken elektromanyetik alanı kullanarak enerjinin iş parçasına transferini sağlayan elemanlardır. Aynı zamanda, indüktör, iş parçasının en yüksek verimle ve etkili bir şekilde ısıtılmasını belirleyen elemandır. Kullanılan indüktörler veya indüksiyon bobinleri, basit helis şeklinde tek turlu yada çok turlu olabileceği gibi iş parçasının

geometrisine veya ısıtılacak bölgeye göre farklı şekil ve geometrilerde (kapalı veya açık formlarda) olabilmektedir [11]. Şekil 2.9’da farklı geometrilerdeki indüksiyon bobinleri ve oluşan manyetik alanın şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.10’da endüstride kullanılan farklı tiplerdeki indüksiyon ısıtma uygulamaları gösterilmiştir.



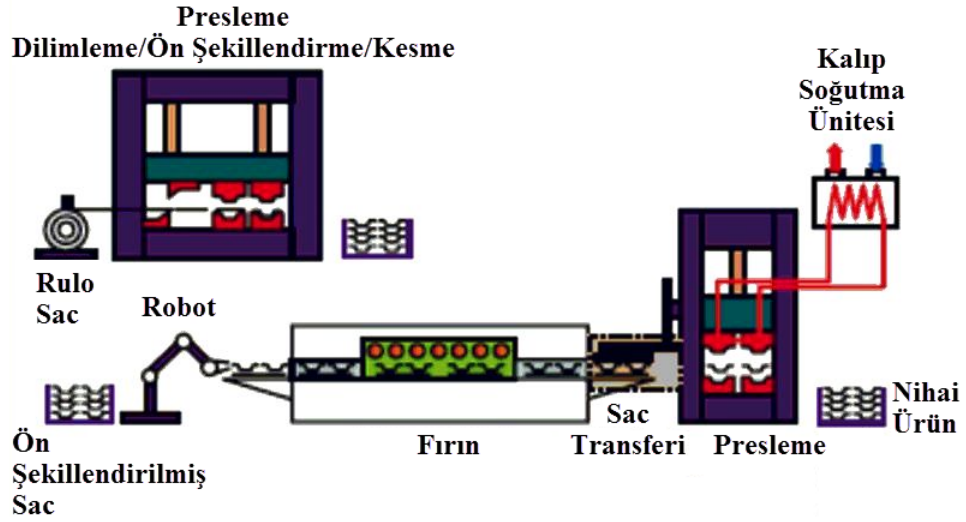
Şekil 2.9. İndüksiyon bobinleri ve oluşan manyetik alanın şematik gösterimi. a) tek tur bobin ile dış çap ısıtma, b) tek tur bobin ile yüzey ısıtma, c) çok turlu bobin ile dış çap ısıtma, d) çok turlu bobin ile iç çap ısıtma [12].



Şekil 2.10. Çeşitli indüksiyon ısıtma uygulamaları [13].

2.2.2. Dolaylı Sıcak Şekillendirme

Dolaylı sıcak şekillendirme işleminde, sac malzeme %90-95 oranında soğuk olarak ön şekillendirilir. Daha sonra soğuk olarak ön şekillendirmeye tabi tutulmuş malzeme fırın içerisinde ısıtılır ve ısıtılan malzeme kalıp içerisine taşınarak, kalıpta son şekli verilir. Kalıp içerisinde şekillendirilen malzemenin soğumasıyla sertleşmesi sağlanır. Dolaylı sıcak şekillendirmede amaç, kalıp yüzeyinin daha az aşınmaya maruz kalarak son ürün geometrisinin toleranslar içerisinde kalmasını sağlamaktır. Sıcak şekillendirme işleminde, sac malzeme ve kalıp yüzeylerinin şekillendirme boyunca uzun süreli temas etmesi kalıp yüzeyinde yüksek miktarda aşınmaya neden olmaktadır. Ön şekillendirmeye tabi tutulmuş parçaların kullanılmasıyla, kalıp ve sac yüzeylerinin uzun süreli teması azaltılmakta ve aşınma en aza indirgenmektedir [5]. Şekil 2.11’de dolaylı sıcak şekillendirme işleminin şematik diyagramı gösterilmiştir.

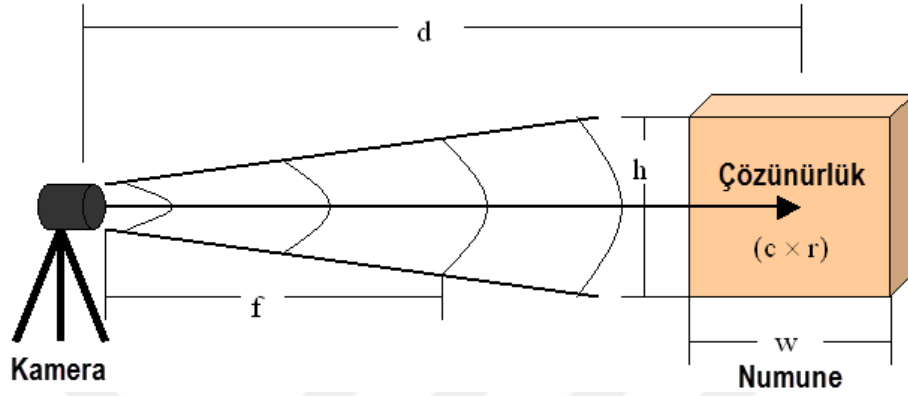


Şekil 2.11. Dolaylı sıcak şekillendirme işleminin şematik diyagramı [5].

2.3. DİJİTAL İMAJ KORELASYON YÖNTEMİ

Dijital İmaj Korelasyon (DİK) yöntemi bilgisayar yazılımı ve dijital kameraların kullanıldığı temassız ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde, doğru ve hassas ölçümlerin elde edilebilmesi için bazı değişkenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu değişkenler, piksel sütunları (c), piksel satırları (r), numunenin genişliği (w) ve yüksekliği (h), kamera ve numune arasındaki uzaklık (d), lensin fokal uzaklığı (f) ve

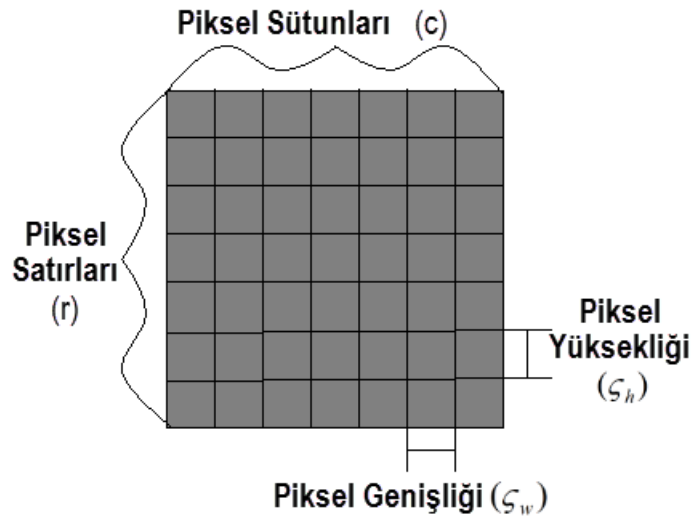
uygulanan noktacık desenleri olarak sıralanabilir ve ölçüm sonuçları bu değişkenlere bağlıdır [14]. Şekil 2.12’de ölçüm sonuçlarını belirleyen değişkenler, DİK ekipmanları üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.12. DİK yöntemindeki değişkenler [14].

2.3.1. İmaj Çözünürlüğü ve Numune Ölçüleri

Çözünürlük terimi ile bir görüntü dosyasındaki (imaj dosyası) piksellerin sayısı ve bu dosyada ne kadar detayın yer aldığı tarif edilir. İmaj çözünürlüğü ve numune yüzey alanı, her pikselin numunenin görüntü dosyasında temsil ettiği boşlukların miktarlarının belirlenmesi ile ilişkilidir [14]. Şekil 2.13’te bir görüntü dosyasındaki pikseller gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Görüntü dosyasındaki pikseller [14].

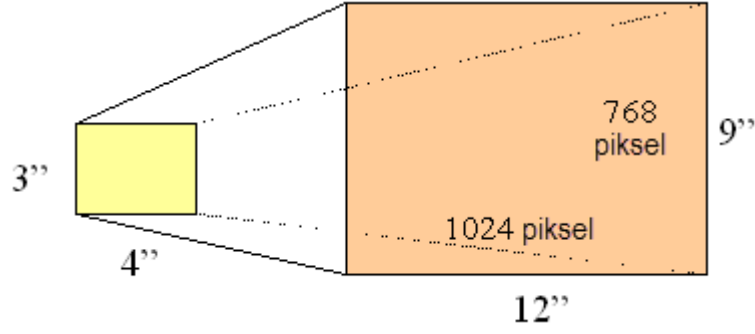
Numune görüntü dosyasındaki bir piksel tarafından temsil edilen boşluk miktarını belirlemek için numune ölçülerini (genişlik ve yükseklik) kameranın çözünürlük ölçülerine (piksel sütunları ve piksel satırları) bölmek gerekmektedir. Bir görüntü dosyasındaki piksel boşluğunun hesaplanması için iki farklı denklem kullanılabilir [14].

$$\zeta_w = \frac{w}{c} \quad (2.1)$$

$$\zeta_h = \frac{h}{r} \quad (2.2)$$

Denklem 2.1 kullanılarak, numune imaj dosyasında temsil edilen bir pikselin genişliği hesaplanabilir. Denklem 2.1’de, ζ_w piksel genişliğini, w numune genişliğini ve c imaj dosyasındaki piksel sütunlarının sayısını ifade etmektedir. Denklem 2.2 kullanılarak, numune imaj dosyasında temsil edilen bir pikselin yüksekliği hesaplanabilir. Denklem 2.2’de ζ_h piksel yüksekliğini, h numune yüksekliğini ve r imaj dosyasındaki piksel satırlarının sayısını göstermektedir. Bu denkleme göre, çözünürlük artarsa, ζ değişkeni azalacaktır. Diğer yandan, numune ölçüleri artar ise ζ değişkeni artacaktır. Numunenin ölçülerinden bağımsız olarak, ζ_w ve ζ_h değişkenleri belirli numuneler için eşittir [14].

Bütün dijital kamera çözünürlükleri 4:3 veya 3:2 görüntü oranına sahiptir. Genelde ve en yaygın olarak kameralar 4:3 görüntü oranlı çözünürlükleri (800x600, 1024x768, 1280x960 gibi) kullanmaktadır. Çözünürlük ve numune ölçüleri arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek için 4:3 görüntü oranının sabit kullanıldığını varsayalım. Bu noktada, kullanılan piksellerin miktarının maksimize edilmesi için imaj dosyasında ki mümkün olan boşlukların tamamının örnekler tarafından işlenmesi gerekmektedir. İmaj dosyasındaki bütün pikselleri kullanabilmek için, numunedeki 4:3 görüntü oranı çözünürlüğündeki ideal yüzey alanı 4:3 görüntü oranına sahip bir dikdörtgendir (4’’x3’’, 8’’x6’’, 12’’x9’’ gibi). Bu durumda, Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 piksel boyutlarının belirlenmesi için kullanılabilir [14]. Şekil 2.14’te numune ölçülerine bağlı olarak görüntü oranları gösterilmiştir.



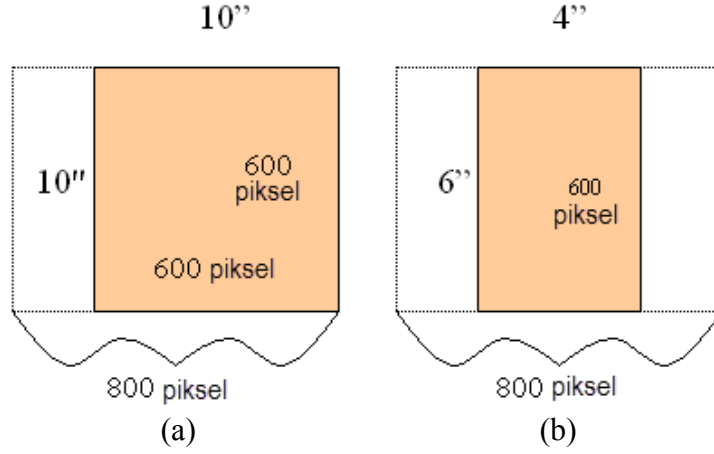
Şekil 2.14. Görüntü oranları [14].

Şekil 2.14'te, 12"x9" ölçülerindeki dikdörtgen numunenin çözünürlüğü 1024x768 piksel olarak görülmektedir. Hem numune ölçüleri hem de imaj çözünürlüğü 4:3 görüntü oranına sahiptir. Numune imaj dosyası üzerinde tüm piksel sütunları ve satırları görülmektedir. Bu noktada Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 piksel genişliğini ve yüksekliğini hesaplamak için kullanılabilir ve bu değerlerin eşit olduğu görülür [14].

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere, numune yüzey alanı görüntü oran 4:3 ve kamera çözünürlüğü 1024x768 piksel olarak yine 4:3'tür. Bu noktada, Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 kullanıldığında, ζ_w değeri 0,012 inç/piksel ve ζ_h değeri 0,012 inç/piksel olarak hesaplanır [14].

Eğer numune yüzey alanı kare veya genişliğin yükseklikten 1,33 kez daha az olduğu dikdörtgen ise, sadece Denklem 2.2 kullanılır. Bu durumda, Denklem 2.1 göz önünde bulundurulmaz. Çünkü imaj dosyası içerisindeki tüm piksel sütunları numuneyi temsil etmek için kullanılmayacaktır. Bu nedenle, kare numunelerde piksel sütun ve satırları numuneyi imaj dosyası içerisinde temsil etmek için aynı değerde kullanılacaktır. Ancak, dikdörtgen numunelerde bunu belirleyebilmek çok kolay değildir [14].

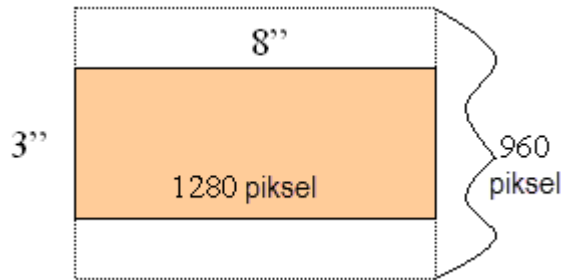
Dikdörtgen numunelerde, imaj dosyasında numuneyi temsil eden piksel sütunlarının miktarı geometrik hesaplamalar kullanılarak belirlenebilir. Bu durumda, Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 her zaman eşit çıkacaktır. Piksel satırları ve numune yüksekliğinin bilinmesi yeterli olacaktır. Şekil 2.15'de farklı numune ölçülerine ait farklı piksel sayıları gösterilmiştir [14].



Şekil 2.15. Farklı numune ölçüleri ve piksel olarak gösterimi. a) kare numune, (b) dikdörtgen numune [14].

Şekil 2.15 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere, numune ölçüleri 10''x10'' ve 4''x6'' olmak üzere iki farklı ölçüde olmalarına rağmen çözünürlükleri 800x600 piksel olarak aynıdır. Diğer yandan, piksel satırlarının sadece bir kısmı görülebilmektedir. Bu nedenle, sadece Denklem 2.2 kullanılarak, 10''x10'' boyutlarındaki numune için ζ_h değeri 0,017 inç/piksel ve 4''x6'' boyutlarındaki numune için ζ_h değeri 0,010 inç/piksel olarak hesaplanır [14].

Eğer numune genişliği yüksekliğinin 1,33 katı olacak şekilde bir dikdörtgen boyutta ise, sadece Denklem 2.1'in kullanılması yeterlidir. Bu durumda Denklem 2.1 göz önünde bulundurulmaz. Çünkü tüm piksel satırları imaj dosyası içinde numuneyi temsil etmek için kullanılmayacaktır. Yine aynı şekilde, numuneyi temsil edecek piksel satırlarının sayısı geometrik hesaplamalar kullanılarak belirlenebilir. Fakat buna gerek kalmadan, piksel sütunları ve numune genişliğinin bilinmesi yeterlidir. Şekil 2.16'da dikdörtgen boyutlu bir numuneye ait piksel sayısı gösterilmiştir [14].

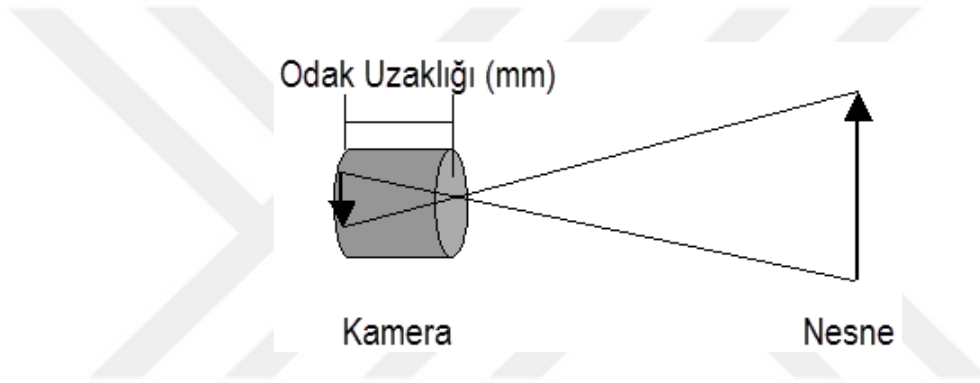


Şekil 2.16. Dikdörtgen bir numune için piksel sayısı [14].

Şekil 2.16’da 8”x3” boyutlarındaki bir numune imaj dosyasında 1280x960 piksel olarak görülmektedir. Buradan, sadece bazı piksel satırlarının numuneyi imaj dosyasında görüntülemek için kullanıldığı açıkça görülmektedir. Bu durumda, sadece Denklem 2.1 kullanılarak, ζ_w değeri 0,006 inç/piksel olarak hesaplanır [14].

2.3.2. Odak Uzaklığı ve Kamera-Numune Arasındaki Mesafe İlişkisi

Odak uzaklığı, lensin optik merkezi ile nesnenin odak alanı içerisinde olduğu zaman, kamera sensörünün yüzeyindeki odak noktası ile arasındaki mesafenin milimetre biriminde değeridir. Şekil 2.17’de dijital kameradaki odak uzaklığı gösterilmiştir [14].



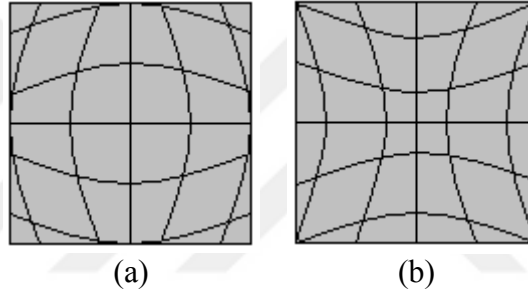
Şekil 2.17. Dijital kamerada odak uzaklığı [14].

Odak uzaklığı üç farklı kategoride incelenir. Bu kategoriler, odak uzaklığının 35 mm’den küçük olduğu geniş açı lensleri, odak uzaklığının 35 mm -55 mm arasında olduğu normal lensler ve oda uzaklığının 55 mm’den büyük olduğu telefoto lenslerdir. Odak uzaklığının yüksek olması, görüntünün dijital kamera içerisine daha yakın bir şekilde kayıt edilmesini sağlamaktadır [14].

Farklı ebatlardaki numuneler için odak uzaklığının veya kesin mesafenin bilinmesi gerekli değildir. Çünkü numunelere kamera aracılığı ile odaklanabilmek için farklı yollar kullanılabilir. Örneğin, kamerayı numuneden çok uzağa yerleştirmek gerekiyorsa, dijital görüntü uzun odak uzaklığı ile odaklanabilir veya bunun tam tersi durumda geçerlidir. Kamera ile numune arasındaki mesafe de numunenin ölçülerine bağlıdır. Büyük numune ölçülerinde, kamera ve numune arasında büyük mesafelere ihtiyaç duyulmaktadır [14].

2.3.3. Bozulma (Distortion) Etkisi

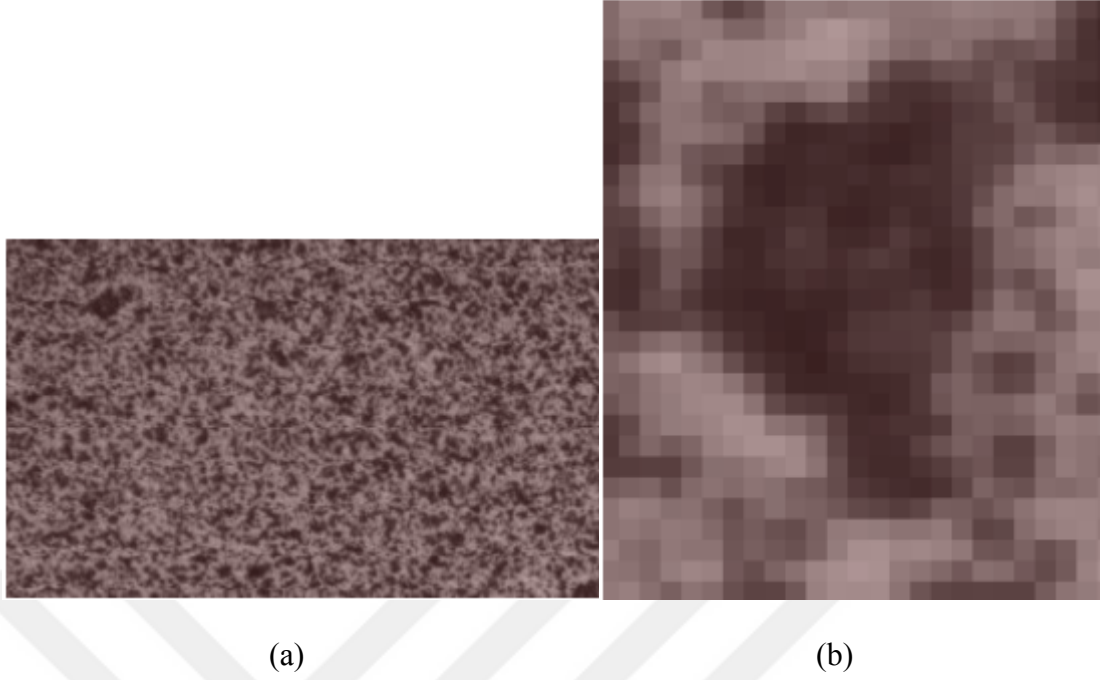
Bozulma (Distortion) etkisi günümüzdeki bütün dijital kameraları etkileyen bir sorun olarak yer almaktadır. Bozulma etkisi kullanılan lensin ürettiği dijital görüntünün bozulması olarak tanımlanabilir. Bu etki lens ile yaklaşmanın yapıldığı durumlarda görülmektedir. Yakınlaştırma lensleri kendi maksimum değerlerinde, geniş açı için 28 mm ve telefoto lensler için 80 mm'den büyük durumlarda dış bükey (Barrel etkisi) veya iç bükey (Pincushion etkisi) olarak meydana gelmektedir. Şekil 2.18'te dış bükey ve iç bükey bozulma etkisi gösterilmiştir. Bu bozulmalardan kaçınmak için, dijital görüntünün ve nesnenin her zaman bir merkez noktası üzerinde çalışmak gerekmektedir [14].



Şekil 2.18. Bozulma (Distortion) etkileri. a) dış bükey, b) iç bükey [14].

2.3.4. Noktacık Deseni

Çalışılacak numunenin yüzeyinin DİK yönteminin uygulanması için rastgele noktalardan oluşan desene sahip olması gerekir. Bu noktacık deseni, kullanılan yazılımın yüksek hassasiyet ve doğruluk ile yer değiştirme değerlerini ölçebilmesini sağlayan bir faktördür. DİK ölçümlerinde hassas sonuçlar elde edebilmek için uygun noktacık deseninin yapılması önemlidir. Uygun noktacık deseni, büyük oranda farklı şekil ve boyutlara sahip siyah noktacıkların miktarına bağlıdır. (Şekil 2.19 (a)). Noktacık deseninin verimliliği her siyah nokta başına düşen piksel miktarı ile belirlenebilir. İyi bir noktacık deseni küçük ebatta siyah noktalar (10 piksel), orta ebatta siyah noktaları (20 piksel) ve geniş ebatta siyah noktalar (30 piksel) içerir. Şekil 2.19'da uygun bir desen örneği ve siyah nokta boyutunun yaklaşık olarak piksel miktarı gösterilmiştir [14].



Şekil 2.19. Noktacık deseni örneği. a) ideal bir desen örneği, b) orta boyutta bir siyah noktanın büyütülmüş hali [14].

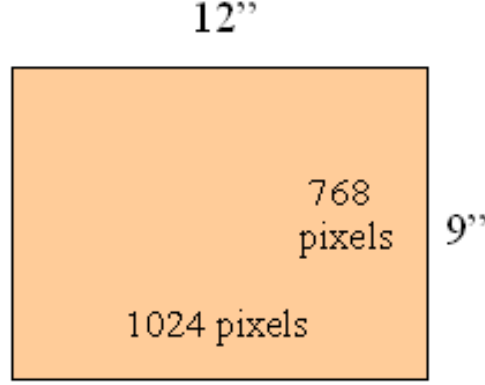
Numune üzerindeki her siyah noktanın ideal boyutunu belirlemek için, istenilen siyah nokta boyutu (küçük, orta veya geniş) ve numune dijital görüntüsündeki piksellerle temsil edilen boşluk miktarı (ζ_w ve ζ_h) arasındaki ilişki incelenebilir. Herhangi bir siyah noktacığın sahip olduğu piksel miktarı ve numune dijital görüntüsündeki piksel ebatının bilinmesiyle, numunedeki siyah noktacıkların uygun ölçülerinin hesaplanması mümkündür. Bunun için Denklem 2.3'ün kullanılması gerekir [14].

$$\zeta = p \times \zeta \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'ün kullanılması ile numunedeki siyah noktacıkların ölçülerinin hesaplanması mümkündür. Burada, ζ numunedeki siyah noktanın uzunluğunu, p istenilen siyah nokta ebatı için gerekli olan piksel miktarını ve ζ numune dijital görüntüsünü (ζ_w veya ζ_h) temsil eden piksel boyutunu tanımlamaktadır (Şekil 2.20) [14].

Burada önemli olan, ζ sonucunun bir yaklaşım değeri olduğu ve siyah noktaların uzunluğunun numune üzerinde nasıl olması gerektiğine dair bir fikir vermesidir. Aynı

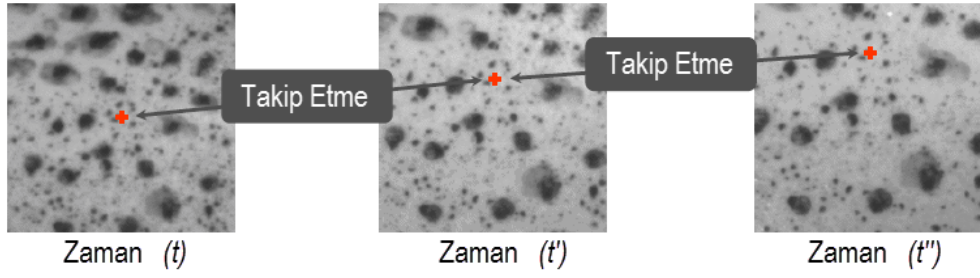
zamanda, hassas sonuçlar elde edebilmek için, siyah noktaların büyük olmasından kaçınılmalı ve geniş ölçüde olmalarına özen gösterilmelidir [14].



Şekil 2.20. Numune boyutu ve piksel sayıları [14].

Şekil 2.20’de 12’’x9’’ boyutlarındaki bir numunenin, dijital görüntü olarak 1024x768 çözünürlükte olduğu gösterilmektedir. Denklem 2.1 ve 2.2 kullanılarak, ζ_w değeri 0,012 inç/piksel ve ζ_h değeri 0,012 inç/piksel olarak hesaplanmaktadır. Denklem 2.3 kullanılarak, küçük siyah nokta boyutu için ζ değeri 0,12 inç, orta siyah nokta boyutu için ζ değeri 0,24 inç ve büyük siyah nokta değeri 0,36 inç olarak ideal bir noktacık deseni sağlanabilmesi için hesaplanmaktadır [14].

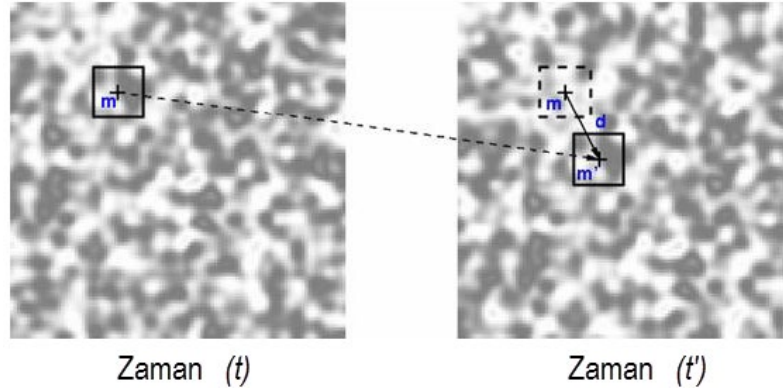
DİK yönteminin temeli, seçilen bir noktanın tarama/takip etme metodu ile, şekil değişimi süresince pozisyonun belirlenebilmesine dayanmaktadır. Seçilen bir noktanın şekil değişiminin olmadığı (referans) dijital imaj dosyasındaki konumu ile şekil değişiminin meydana geldiği dijital imaj dosyalarında aynı noktanın tarama/takip etme yöntemiyle yer değiştirme değeri ölçülmektedir. Kullanılan bu nokta için, noktanın işaret benzerlik fonksiyonları maksimize edilmektedir. Şekil 2.21’de verilen bir noktanın başlangıç t zamanındaki yeri ve şekil değişimi boyunca t' ve t'' zamanlarındaki konumu gösterilmiştir [15].



Şekil 2.21. Verilen bir noktanın zaman içindeki konumu [15].

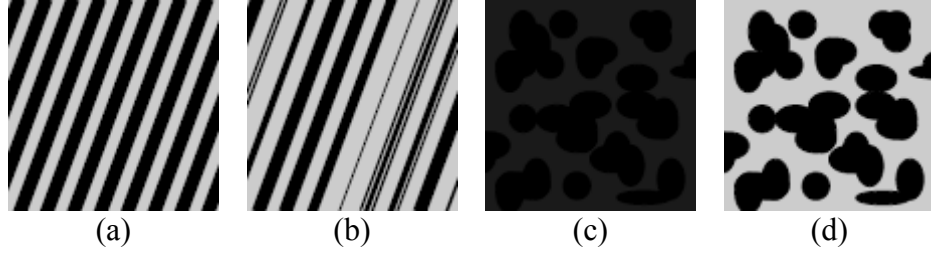
İmaj dosyasında seçilen tek bir noktanın herhangi bir benzer işareti yoktur. Fakat bir noktanın benzersiz izi, etrafındaki komşu pikseller kullanıldığında, birbirine benzemeyen bir alan oluşturmaktadır. Bu şekilde verilen bir noktanın etrafındaki piksel değerlerinin kullanımıyla meydana getirilen grup ile bir alan oluşturulmasına altküme piksel grubu (Subset) adı verilir [15].

Şekil 2.22’de verilen bir noktanın t başlangıç zamanında, etrafındaki pikseller kullanılarak tanımlanmış altküme alanı ve t' zamanındaki d mesafesi kadar yaptığı yer değiştirme gösterilmiştir [15].



Şekil 2.22. Altküme piksel grubunun tanımlanması ve takip edilmesi [15].

Seçilen bir nokta ve bu noktaya ait komşu piksellerin kullanılması ile elde edilen piksel altkümesinin benzersiz olması korelasyon sonuçlarının yüksek hassasiyetli ve doğrulukta olmasını sağlamaktadır. Kullanılan her noktanın izinin benzersiz olması, numune üzerindeki desen takımının birbirini tekrarlamayan, izotropik, yüksek kontrastlı olmasına bağlıdır. Şekil 2.23’de farklı desen örnekleri gösterilmiştir [15].

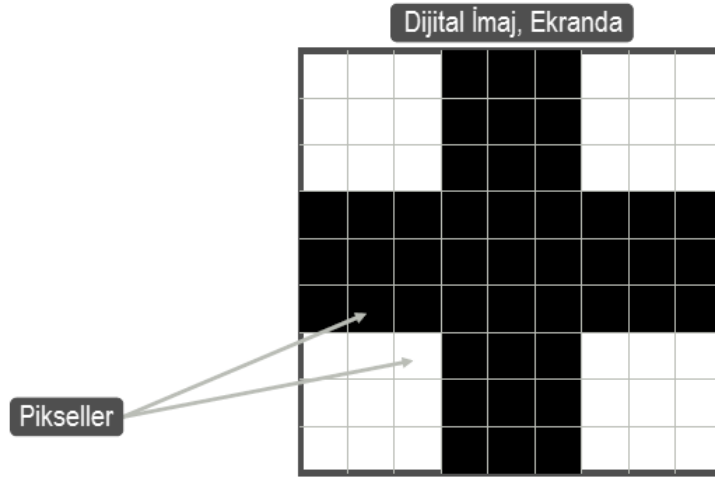


Şekil 2.23. Desen örnekleri [15].

Şekil 2.23’de gösterilen desen örneklerinde, Şekil 2.23 (a) yüksek kontrasta sahip olmasına rağmen, tekrarlı ve anizotropik bir desen örneğidir. Şekil 2.23 (b)’de gösterilen desen, tekrarsız ve yüksek kontrastlı olmasına rağmen anizotropik bir desendir. Şekil 2.23 (c)’de ise tekrar etmeyen, izotropik bir desen olmasına rağmen kontrast değeri çok düşüktür. Şekil 2.23 (d) ile gösterilen desen ise tekrarsız, izotropik ve yüksek kontrasta sahip bir örnektir. Bu desen örneği, DİK yönteminde kullanılması uygun olan ve tavsiye edilen bir örnektir [15].

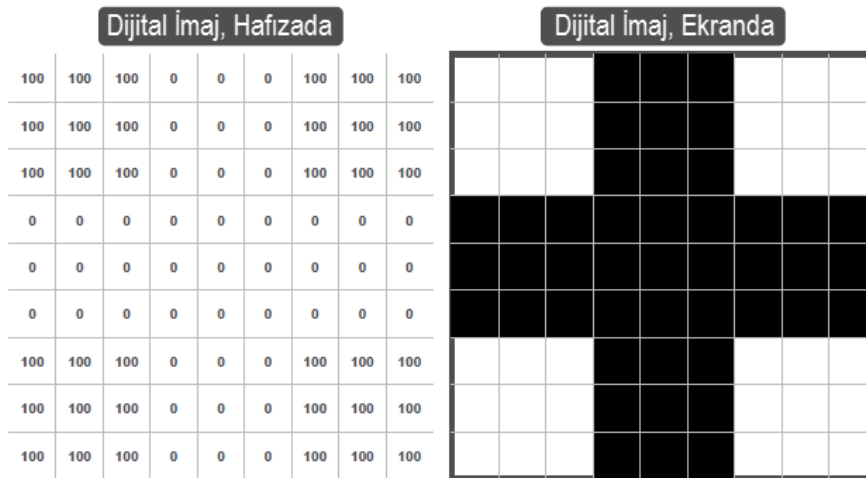
2.3.5. Eşleştirme Metodu

DİK yönteminde, referans imaj dosyasında altküme piksellerin tanımlanmasından sonra, bu piksellerin şekil değişimini içeren imaj dosyalarındaki pozisyonunun belirlenmesi için eşleştirme metodu kullanılmaktadır. Şekil 2.24’te görüldüğü üzere, örnek bir numunenin şekil değişimi öncesindeki görüntüsü, dijital kamera ile 9x9 piksellerden oluşan bir dijital imaj olarak kayıt edilmektedir. Numunenin şekil değişimi sonrasındaki deformasyon ve yer değiştirmelerinin ölçülmesi için şekilde görüldüğü gibi artı şeklinde bir alan işaretlenmiştir [15].



Şekil 2.24. Örnek bir referans imaj [15].

Dijital bir görüntü bilgisayar ortamına aktarıldığında, renk değerleri, kullanılan dijital imaj formatına göre (RGB, CMYK, Gritonları, Siyah-Beyaz gibi) bir matris olarak ifade edilir. Dijital imajın çözünürlük değerleri ise matris boyutlarını göstermektedir. Şekil 2.24'te görülen 9x9 çözünürlükteki bir dijital imaj, bilgisayar ortamında 9x9 boyutlarına sahip bir matris olarak temsil edilir. Şekil 2.24'teki dijital görüntüde, işaretli alan (pikseller) siyah renkte ve geri kalan alanlar (pikseller) ise beyaz renktedir. Bu dijital görüntüye ait matriste ise, beyaz renke ait pikseller gri tonlardaki değeri 100, siyah renke ait piksellerin gri tonlardaki değeri ise 0'dır. Bu doğal tam sayı değerlerinin kullanıldığı matris ise dijital görüntüyü oluşturmaktadır. Şekil 2.25'te dijital görüntünün ekranda ve bilgisayar hafızasındaki matris formu gösterilmiştir [15].



Şekil 2.25. Dijital görüntünün ekrandaki ve hafızadaki matris formu [15].

Deformasyon başlangıcındaki bir numunenin referans görüntüsü Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Şekil değişiminin gerçekleştiği ve deformasyona uğramış numunenin dijital görüntüsünün matris formundaki değişimi Şekil 2.26'da verilmiştir. Başlangıçta artı olarak işaretlenmiş alan, şekil değişimi sonrasında 1 piksel sağ, 1 piksel üst yönde hareket etmiş ve bu hareket matris formunda da değişikliğe sebep olmuştur.

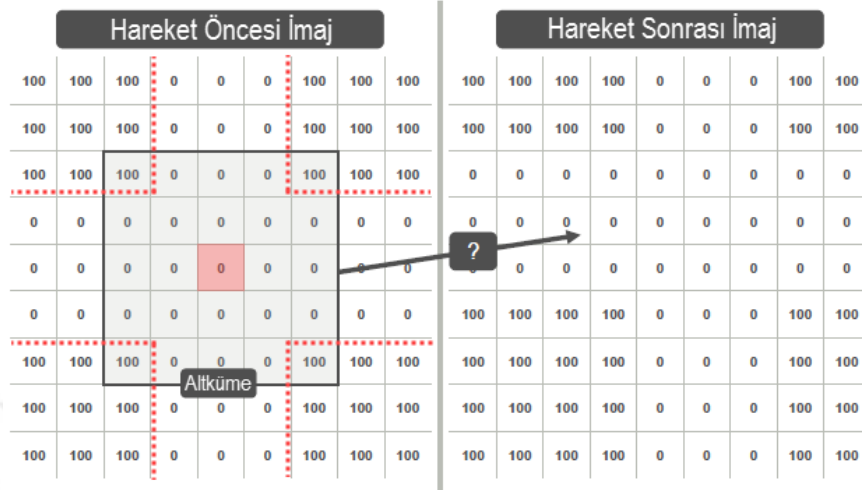


Şekil 2.26. Deformasyon sonrasındaki dijital imaj [15].

Şekil 2.27'de deformasyon öncesi (referans imaj) ve sonrası imaj görüntüleri gösterilmiştir. Nokta olarak gösterilen çizgi, deformasyon öncesinde numune üzerinde belirlenmiş artı şeklindeki alanı göstermektedir. Bu artı işaretinin takip edilebilmesi için altküme piksel grubunun seçilmesi gerekmektedir. Şekil 2.27'de görüldüğü gibi, tek bir piksel seçilmesi halinde takip etmek imkansızdır. Çünkü dijital imaj dosyasında aynı renk değerinde birden fazla piksel bulunmaktadır. Bu nedenle, tek bir piksel tanımlamak yerine, komşu piksellerinde kullandığı altküme piksel takımının tanımlanması daha doğrudur. Şekil 2.27'de merkez noktası 0 renk değerine sahip, bir altküme piksel takımı belirlenmiştir. Bu noktadan sonra önemli olan, bu piksel grubu için deformasyona uğramış numunenin imaj görüntüsünü takip etme ve eşleştirme işlemidir. Bu altküme piksel grubunun nereye hareket ettiği, yer değiştirme değerinin ölçülmesi için temel oluşturmaktadır [15].

Deformasyon öncesindeki referans imaj üzerinde tanımlanan bir altküme piksel grubunun deformasyon sonrasındaki imaj üzerinde takip edilmesi gerekmektedir. Bu

altküme piksel grubunun, eşsiz piksel değerleri kümesi yada altgrubu olması gerekmektedir [15].



Şekil 2.27. Deformasyon öncesi ve sonrası imaj renk değerleri [15].

Şekil 2.27’de belirlenen altküme piksel grubunun nereye hareket ettiğinin belirlenmesi problemin çözümü için, birçok noktada mümkün eşleştirmenin kontrol edilmesi ve bu noktaları derecelendirirken benzerlik değerinin kullanılması gerekmektedir. Bunun için en yaygın kullanılan yöntem klasik korelasyon fonksiyonu olan SSD’nin kullanılmasıdır. Bu yöntem, elde edilen en küçük değerın daha iyi benzerlik gösterdiği bir yöntemdir [15].

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i, j=-n/2}^{n/2} (I(x+i, y+j) - I^*(x+u+i, y+v+j))^2 \quad (2.4)$$

Denklem 2.4’de C korelasyon fonksiyonunu, x, y referans imaj üzerindeki piksel koordinatı, u, v yerdeğiştirme değeri, n alt küme boyutu, I deformasyon öncesindeki imaj, $x+i, y+j$ piksel değerleri, I^* deformasyon sonrasındaki imaj, $x+u+i, y+v+j$ piksel değerlerini göstermektedir [15].

Örnek olarak Şekil 2.27’de deformasyon öncesi ve sonrasındaki dijital imajlara ait yer değiştirme gösterilmiştir. Şekil 2.27’de hareket öncesinde 5x5 piksel boyutlarında bir altküme piksel grubu tanımlanmıştır. Deformasyon sonrasında altküme piksel grubu,

x koordinat ekseninde 2 birim ve y koordinat ekseninde 2 birim hareket ettiği düşünülürse, $(u;v)=(-2;-2)$ yerdeğiştirme değerleri elde edilir [15]. SSD klasik korelasyon fonksiyonu olan Denklem 2.4'te bu değerler yerine yazılırsa;

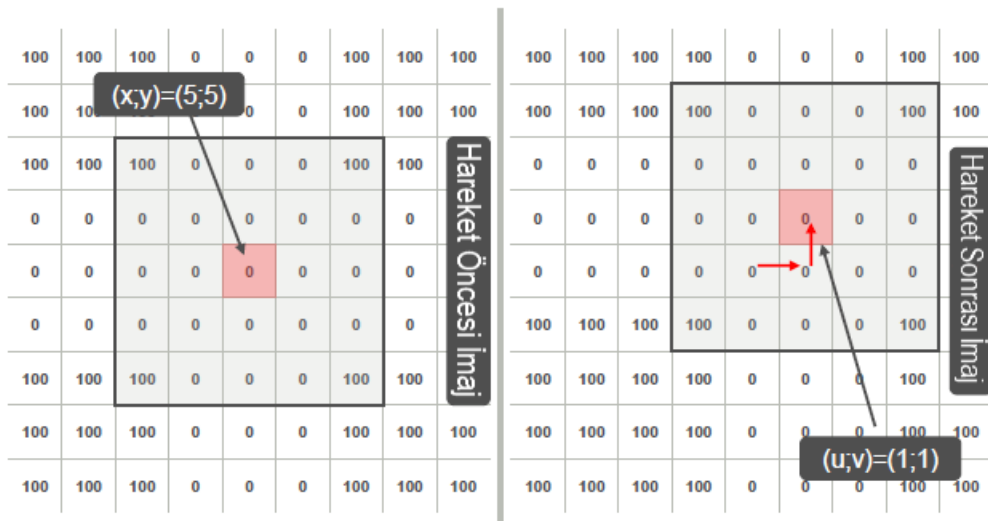
$$C(5,5,-2,-2) = \sum_{i,j=2}^2 (I(5+i,6+j) - I^*(5-2+i,5-2+j))^2$$

elde edilir. Denklem üzerinde piksel değerleri yerlerine yazılıp, düzenlenirse;

$$\begin{aligned} &(100-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (100-0)^2 + \\ &(0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-0)^2 + \\ &(0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-0)^2 + \\ &(0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-0)^2 + \\ &(100-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (0-100)^2 + (100-0)^2 = 18,000 \end{aligned}$$

değeri hesaplanır [15].

Şekil 2.27'deki örnek altküme piksel grubu boyutları olan 5x5 piksel için yerdeğiştirme değerleri 1x1 piksel olduğundaki durum Şekil 2.28'de gösterilmiştir [15].



Şekil 2.28. Altküme piksel grubu 5x5 piksel için yerdeğiştirme 1x1 piksel olduğu durum [15].

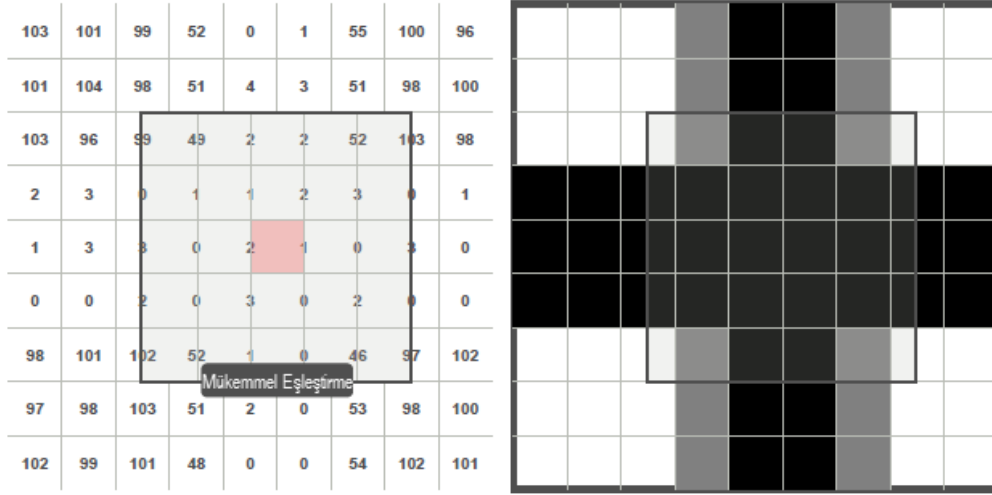
Şekil 2.28’de gösterilen durum, Denklem 2.4 kullanılarak yerine yazıldığında, $(u,v)=(1;1)$ yer değiştirme değerleri için $C(5,5,1,1)=0$ değeri elde edilir. $(u,v)=(-2;-2)$ yer değiştirme için $C=18$ olarak hesaplanırken, $(u,v)=(1;1)$ için bu değer $C=0$ ’dır. Klasik SSD korelasyon fonksiyonuna göre korelasyon değerinin küçük olduğu durum, daha yüksek benzerlik oranını göstermektedir. Böylece, karşılıklı karşılaştırma yaparak eşleştirme algoritması çalışmaktadır [15].

Gerçek koşullarda, dijital kameraların kaydettiği dijital görüntüler üzerinde birtakım bozulmalar ve parazitler bulunmaktadır. Bu nedenle, SSD fonksiyonu hiçbir zaman, mükemmel eşleştirme için 0 değerini almamaktadır. Şekil 2.29’da parazitli görüntülerin matris formu gösterilmiştir [15].

Hareket Öncesi İmaj									Hareket Sonrası İmaj								
103	101	99	2	0	1	105	100	96	99	100	101	102	3	0	2	100	102
101	104	98	1	4	3	101	98	100	101	97	98	101	1	2	0	96	102
103	96	99	0	2	2	102	103	98	0	1	3	3	2	0	1	2	0
2	3	0	1	1	2	3	0	1	1	0	3	0	2	1	1	0	3
1	3	3	0	2	1	0	3	0	1	3	2	0	1	1	2	2	0
0	0	2	0	3	0	2	0	0	101	100	100	103	0	2	1	102	101
98	101	102	0	1	0	96	97	102	97	99	100	101	3	2	0	97	101
97	98	103	0	2	0	103	98	100	101	103	98	101	0	1	1	99	96
102	99	101	2	0	0	104	102	101	102	99	96	103	2	3	3	102	100

Şekil 2.29. Parazit içeren imajların renk değerleri [15].

Şekil 2.30’da görüldüğü gibi numune üzerinde işaretlenmiş alan 0,5 piksel oranında sağ yönde hareket ettiği düşünülebilir. Bu noktada, daha önce kullanılan tamsayılar yerine, tamsayı olmayan bir değer yer değiştirme olarak gerçekleşmiştir. Bu yüzden, SSD fonksiyonunun tamsayı olmayan bölgelerde interpolasyon yapılması gerekmektedir [15].



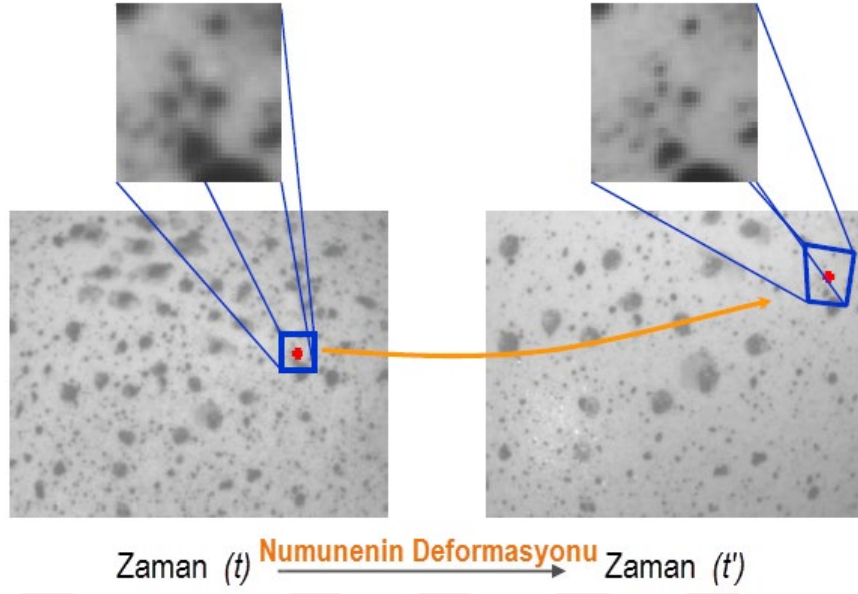
Şekil 2.30. Tam sayı olmayan yer değiştirme [15].

2.3.6. Fotometrik Haritalama

Dijital görüntünün kaydedilmesi sırasında, ışık kaynaklarında meydana gelebilecek değişimler, sensör-zaman entegrasyonun ayarlanması, numune üzerindeki desenlerde genişleme ve daralma sonrasında daha açık veya koyu hale gelmesi gibi etkenler fotometrik haritalama için birer etken teşkil etmektedir. DİK algoritmasının, hatalı eşleştirmeler yapması sebebiyle, fotometrik haritalama tam olarak kesin bir yöntem değildir. Bu sorunun çözümü için, fotometrik transformasyon modellenmeli ve sağlam korelasyon fonksiyon tasarımı kullanılmalıdır [15].

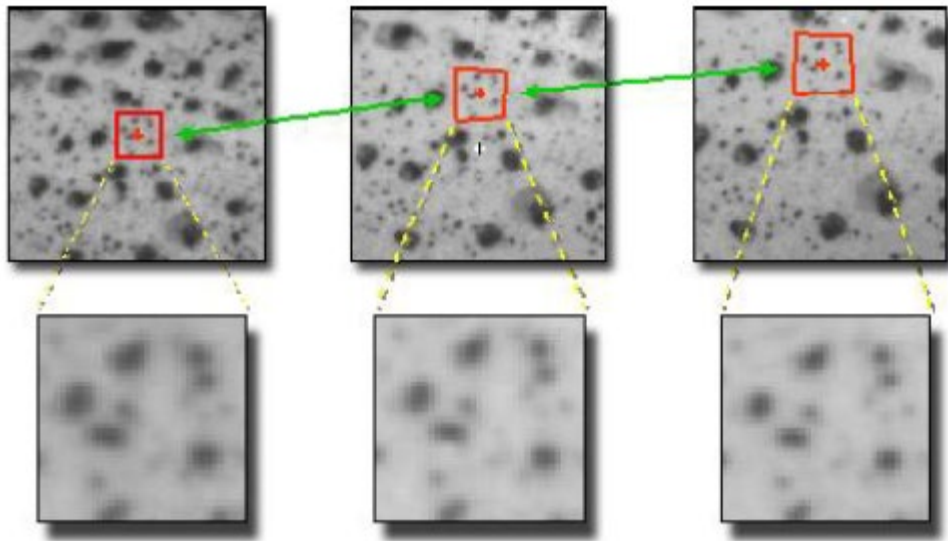
2.3.7. Yerdeğiştirme Haritalama

DİK yönteminde, başlangıçtaki referans imajda belirlenen altküme piksel grubunun boyutlarının piksel olarak kare geometriye sahip olduğu varsayılmaktadır (Örneğin, 5x5 piksel, 9x9 piksel). Fakat, numunenin şekil değişimi boyunca kare geometriye sahip altküme piksel grubu şekil değişimine uğramakta ve deforme olmuş kare olmayan bir geometriye dönüşmektedir. Şekil 2.31’de örnek olarak başlangıçta tanımlanan altküme piksel grubu ve numunenin deformasyonu sonucunda şekil değişimine uğramış altküme piksel grubu gösterilmiştir [15].



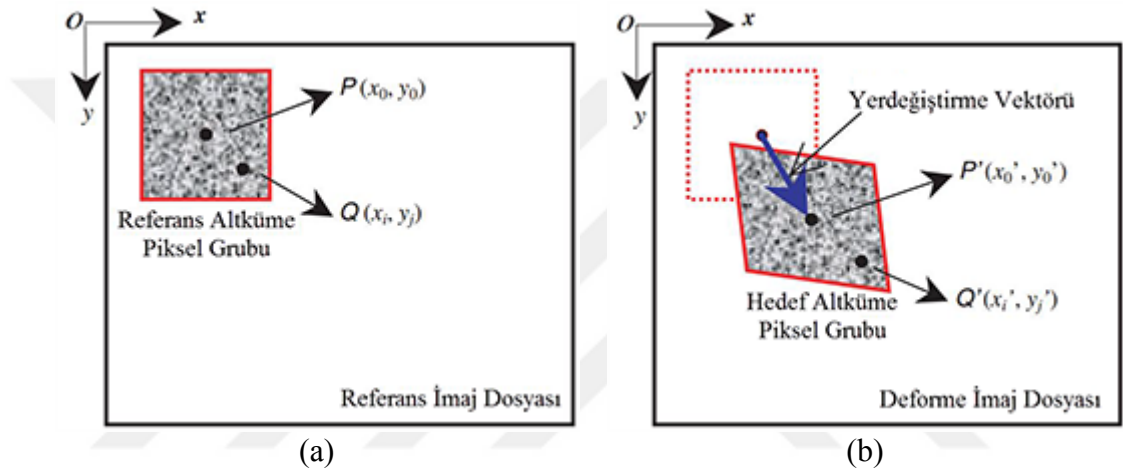
Şekil 2.31. Altküme piksel grubunun geometrik değişimi [15].

Tanımlanan altküme piksel grubunun, deformasyon boyunca geometrisinde meydana gelen değişim probleminin çözümü için Altküme Şekil Fonksiyonu (Subset Shape Function) kullanılarak, yerdeğiştirme dönüşümünün modellenmesi ve deforme olmuş altküme piksel grubunun tanımlanması için bu modelin kullanılması gerekmektedir. Şekil 2.32’de deformasyon boyunca altküme geometrisinde meydana gelen değişim gösterilmiştir [15].



Şekil 2.32. Altküme piksel grubu şekil değişimi [15].

Altküme piksel grubunun şekil değişimine uğramış numuneye ait imaj dosyalarında yapılan eşleştirme işlemi boyunca basit düzlem yerdeğiştirmeye birlikte bazı ek serbestlik dereceleri de ilişkilendirilir. Referans imaj dosyasında kare olarak tanımlanan altküme piksel grubu, numunenin deformasyonu boyunca kare şeklini koruyamamakta ve kullanılan şekil değişimi fonksiyonu veya yer değiştirme haritalama fonksiyonuna göre orijinal alan şekil değişimine uğramaktadır [16]. Şekil 2.33'te referans kare altküme piksel grubu ve şekil değişimi sonrasındaki altküme piksel grubunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.33. Kare altküme piksel grubunun şekil değişimi. a) referans imaj dosyası, b) şekil değişimi sonrası imaj dosyası [16].

Şekil 2.33'den görüldüğü üzere, altküme şekil fonksiyonu tarafından belirlenen altküme piksel grubu deformasyonu Denklem 2.5 ve 2.6 kullanılarak tanımlanabilir [16].

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_j) \quad (2.5)$$

$$y'_j = y_j + \eta(x_i, y_j) \quad (2.6)$$

Şekil 2.33 (a)'da P altküme piksel grubunun merkez noktasını, Q altküme piksel grubunun merkezi etrafında bulunan herhangi bir noktayı, (x_0, y_0) P noktasının referans imaj dosyasındaki koordinatlarını göstermektedir. Denklem 2.5 ve 2.6'da (x_i, y_j) Q

noktasının referans imaj dosyasındaki koordinatlarını tanımlamaktadır. Numune üzerinde deformasyon oluşmaya başladığı zaman, referans imaj dosyasında tanımlanan altküme piksel grubu da şekil değişimine uğrayarak, referans imajdaki P ve Q noktaları P' ve Q' konumlarına gelecektir. (x'_0, y'_0) , P' noktasının şekil değişimine uğramış imaj üzerindeki koordinatını, (x'_i, y'_j) , Q' noktasının şekil değişimine uğramış imaj üzerindeki koordinatını, ξ ve η haritalama fonksiyonunun analitik formülasyonunu tanımlamaktadır. İkinci dereceden polinomal olarak şekil fonksiyonu düzenlendiğinde Denklem 2.7 ve 2.8 elde edilir [16].

$$\xi(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \quad (2.7)$$

$$\eta(x_i, y_i) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y \quad (2.8)$$

Denklem 2.7 ve 2.8'de, u , referans imaj dosyasındaki altküme piksel grubunun merkezinin x yönündeki yer değiştirme bileşenini, v , referans imaj dosyasındaki altküme piksel grubunun merkezinin y yönündeki yer değiştirme bileşenini tanımlamaktadır. Buradan, u_x, u_y, v_x, v_y , birinci dereceden yer değiştirme gradyanını, $u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}$, ikinci dereceden yer değiştirme gradyanını göstermektedir [16].

2.4. LİTERATÜR TARAMASI

DİK yöntemi, optik aygıtların kullanıldığı, çeşitli yükleme durumlarına maruz kalan herhangi bir nesnenin yüzeyinde tam alan yer değiştirme ölçümlerinin belirlenmesi amacıyla, şekil değiştirmiş ve şekil değiştirmemiş dijital görüntülerin karşılaştırılması temeline dayanan, temassız, optik bir ölçme tekniğidir [17-19]. Görüntü işleme üzerine birçok çalışma yapılmış ve özellikle günümüzdeki çalışmalarda, malzeme davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için DİK tekniğinin tahribatlı malzeme muayene testlerinde kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır.

Peters and Ranson [20] DİK yönteminin kullanılmasına yönelik ilk çalışmaları yapmışlardır. Çalışmalarında, ultra-sonik dalgaların yansımalarını kayıt etmişlerdir.

Elde ettikleri kayıtları kullanarak, şekil değiştirmiş ve şekil değiştirmemiş bölgeleri karşılaştırmışlar ve böylece bu bölgelerin yük altındaki pozisyonlarının belirlenmesine yönelik bir teknik geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri teknik ile tek eksen çekme testinde kuvvetin uygulandığı yönde 0,0023 inç yer değiştirme olduğunu ve elde ettikleri değerin matematiksel çözüm ile aynı olduğunu vurgulamışlardır.

Sutton vd. [21] nümerik temellere dayanan algoritma geliştirerek, başlangıç deneylerinde optik araçlar kullanarak kaydettikleri görüntülerin karşılaştırılması ile 2B DİK yönteminin uygun ve başarılı sonuç veren bir yöntem olduğunu göstermişlerdir.

Pan vd. [22] düzlem yer değiştirme ve uzama ölçümleri için 2B DİK yönteminin kullanımı üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, DİK tekniğinin tam alan yer değiştirme ve uzama ölçümleri için kullanımını, deney koşullarının ve ölçüm algoritmalarının, ölçüm doğruluğu ve hassasiyeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 2B DİK yönteminin yassı ve düz nesnelerin düzlem şekil değişimleri için kullanılabilir olduğunu saptamışlardır. Ayrıca, 2B DİK yönteminin, malzemelerin çeşitli mekanik özelliklerinin belirlenmesinde (Elastisite modülü, Poisson oranı vb.) kullanılabilir olduğunu ve malzemelerin şekil değişim mekanizmalarını karakterize edebildiğini göstermişlerdir. Karmaşık ve eğri geometriye sahip endüstriyel ürünler ve parçalar için 3B DİK yönteminin kullanılmasını, küçültülmüş ebatlardaki mikro ölçekli ölçümler için yüksek çözünürlüklü 3B görüntüleme cihazlarının 2B DİK yöntemi ile birleştirilmesini önermişlerdir.

Pan [23] günümüzde DİK yönteminin kullanımına ilişkin gelişmeler üzerine çalışmıştır. Çalışmasında, noktacık deseninin kalitesinin belirlenmesi için ortalama renk yoğunluğu yaklaşımını sunmuş, altküme piksel grubunun şekil değişiminin belirlenmesi için çeşitli korelasyon kriterlerini önermiş ve alt piksel ölçekte hareketin hassas bir biçimde belirlenmesi için tekrarlı en küçük kareler algoritmasını (ILS) önermiştir. DİK yöntemi için gerekli olan noktacık deseninin kalitesinin belirlenmesinde ortalama renk yoğunluğu değerinin yüksek olmasının gerektiğini ve böylece sistematik hata ve standart sapmanın düşük olduğunu göstermiştir. DİK yönteminde kullanılan korelasyon kriterlerinin (ZNCC, ZNSSD ve PSSD_{ab}) birbirlerine eşit olduğunu belirtmiş, desen eşleştirmesi için kullanıldıklarında aynı

sonucu verdiğini belirtmiştir. ILS algoritmasının verimli bir teknik olduğunu ve Newton-Raphson yaklaşımı yerine kullanılabileceğini sunmuştur. Ayrıca, deneysel uygulamalarda ILS yaklaşımının, Newton-Raphson'dan çok daha basit ve anlaşılır olduğunu kanıtlamıştır.

Chen vd. [24] büyükbaş hayvan kemiklerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için 3B DİK yöntemini üç nokta eğme testinde kullanmışlardır. Deneysel olarak kemik üzerinde bölgesel uzama ve hasar oluşumunu gerçek zamanlı olarak kayıt etmişlerdir. Eğme testinde maksimum kuvvet değerlerini 14 kN ile 16 kN arasında olduğunu göstermişler ve sehim-kuvvet ilişkisinin maksimum dayanım öncesine kadar neredeyse doğrusal olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, kemik üzerinde bölgesel uzama dağılımının 3B DİK yöntemi ile elde edilmesiyle, uzama dağılımının sadece kuvvetin yönü ile ilişkili olmadığını aynı zamanda kemiğin geometrisinin de etkili olduğunu belirtmişlerdir. Kemik geometrisinin üst bölgesinin sehim-kuvvet ilişkisinin doğrusal olduğu bölgede basma gerilmesine maruz kaldığını, doğrusal bölgeden sonraki kısımda çekme gerilmesinin görüldüğünü belirtmişlerdir. Üç noktalı eğme testi boyunca hasar oluşumu için ana etkenin çekme kuvveti olduğunu vurgulamışlardır.

Bai vd. [25] geniş formatlı lensler ve görüntü sensörleri kullanarak düzlem yüzeyler üzerindeki bölgesel uzamaların tahmin edilmesi için optik ekstansometre ve sanal uzamaların elimine edilmesi için doğrulama kağıdı yaklaşımını geliştirmişlerdir. DİK sonuçlarını doğrulamak için tek eksen çekme testi uygulamışlardır. Geliştirdikleri optik ekstansometre ve doğrulama kağıdı yaklaşımının, numunenin düzlem dışı hareketi, görüntü sensörlerinin kameranın ısınmasından kaynaklanan düzlem dışı hareketi ve lens bozulması gibi 2B DİK yönteminde görülen potansiyel hata kaynaklarının elimine edilmesi veya en aza indirilmesi için uygun bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, optik ekstansometrede $2-3\mu\epsilon$ 'e kadar yüksek çözünürlük elde edebilmişlerdir.

Gencturk vd. [26] ön gerilmeye tabi tutulmuş gerçek ölçekteki I profilli kirişlerde, 3B tam alan yer değiştirme ve uzama bölgelerini hesaplamak için kritik yük testi uygulamışlar ve geleneksel ölçme sonuçları ile yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılarak elde edilen DİK sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Beton malzemenin

çatlamaında görülen uzama değerinin yaklaşık 8×10^{-5} olduğu çok küçük uzama seviyelerinde bile kuvvet ve çatlak hattının DİK yöntemi ile açıkça belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, DİK tekniğinin, ölçüm sonuçlarında çok hassas ve detaylı bilgiler verdiğini ortaya koymuşlar ve hesapladıkları yer değıştirmelerin geleneksel ölçme yöntemleri ile belirlenemeyeceğini göstermişlerdir.

Wang vd. [27] genel steryo sonlu elemanlar modeli ve DİK yöntemini birleştirmiş ve Erichsen Kap Testi'ne geliştirdikleri yaklaşımı uygulayarak DC06 serisi sac malzemelerin plastik anizotropisini belirlemişlerdir. Zımba ve sac malzeme arasındaki bilinmeyen sürtünme katsayısının eş zamanlı olarak tanımlanabilir olduğunu ve tanımlanan parametrelerin güvenilirliğini göstermişlerdir.

Li vd. [28] deneysel ve nümerik olarak kenar kaynağı ile birleştirilmiş sac malzemelerin şekillenebilirliği üzerine çalışmışlardır. Lazer kenar kaynağı ile birleştirilmiş sac malzemelerin temel mekanik özelliklerini belirlemek için DİK yöntemini tek eksen çekme testinde kullanmışlardır. Elde ettikleri mekanik özelliklere dayanarak, lazer kaynaklı yekpare parçaları Erichsen Kap Testi'ne tabi tutmuşlardır. Lazer kaynak dikiş boyu bölgesinin yüksek akma dayanımı, yüksek sertlik ve düşük çalışma sertleşmesi özelliklerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, uzama hattının kaynak dikiş boyuna yakın bölgeye yaklaştıkça, düzlem uzama durumunu sergilediğini göstermişler ve deneysel ve nümerik sonuçların birbirleri ile uyumlu sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Ashwini vd. [29] sac malzemelerin kalite testi için DİK yöntemini kullanarak bütünleşik desen eşleştirme metodu üzerine çalışmışlardır. Geliştirdikleri sistem ile unsur belirleme işlemleri için yüksek miktarda görüntü dosyalarının kenar haritalama işlemleri için bilgisayar görüntüleme uygulamalarında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, geliştirdikleri yöntemin görüntüleri taramak için uygun ışıklandırma koşullarına ihtiyaç duyduğunu ve ışıklandırma koşullarının değışkenlik gösterdiğini vurgulamışlardır. Önerdikleri yöntem ile makul derecede kararlı ve uyumlu sonuçlar elde ettiklerini ve çeşitli gerçek yaşam görüntüleri üzerinde elde edilen çıktılarının kabul edilebilir düzeyde tutarlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Poozesh vd. [30] rezonans frekansını ve kolonlarla desteklenmiş yapıya yerleştirilen 2-3 m uzunluğunda tekil rüzgar türbini kanatlarının uygun çalışma geometrisini belirlemek amacıyla, çok kameralı 3B DİK ölçme sistemi üzerine çalışmışlardır. Birbiri ile eş zamanlı olarak çalışan ve türbin kanatlarının belirli bölgelerindeki şekil değişimini belirleyen iki çift kamera kullanarak stereo görüntüleme sistemi geliştirmişlerdir. Her kamera çifti ile türbin geometrisi ve yer değiştirme değerlerini evrensel koordinat sistemine taşıyarak haritalama işlemi yapmışlar ve çalışma mod analizi uygulamışlardır. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar modeli sonuçlarını karşılaştırarak, rüzgâr türbin kanatlarının bütün dinamik davranışını belirlemede, çok kameralı 3B DİK yönteminin kapasitesinin kullanışlı ve potansiyeli olan bir yöntem olduğunu göstermişlerdir.

Wang vd. [31] Erichsen Kap Testi'ne tabi tutulan metal numunelerin üzerinde tam alan yer değiştirme ve uzama alanlarının belirlenmesi için çok kameralı steryo DİK sistemini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sistemde, numunenin şekil değişimi boyunca takip eden ikili kamera sistemini kullanmışlardır. Her kameranın kayıt ettiği yer değiştirme ve geometrik şekil ölçümlerini birleştirerek global görünüm oluşturmuşlardır. Deforme edilen numunenin geometrisinin ve yer değiştirme alanlarının birbirleri ile bağlantılı olduğunu ve düzgün uzama alanlarının elde edildiğini belirlemişlerdir. Kameraların kayıtları ile elde edilen ölçümler ile global görünüm kıyaslandığında, global görünümün daha güvenilir olduğunu göstermişlerdir.

Geleneksel ölçüm aletleri, tahribatlı malzeme muayene testlerinde sadece ortalama değerler vermekte ve bu ortalama değerler malzemelerin mekanik davranışlarının anlaşılmasında yetersiz kalmaktadır. Ancak, DİK yöntemi tam alan yer değiştirme ve uzama dağılımlarını hesaplayabilmesinin yanında metal ve metal olmayan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilen esnek bir yöntemdir.

Zhou vd. [32] DİK yöntemini tek eksen çekme testinde kullanarak, esnek paketleme malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Ayrıca, paketleme malzemelerinin düşük frekanslı titreşim testini simüle etmişler ve titreşim frekanslarını da DİK yöntemini kullanarak ölçmüşlerdir. Polipropilen için gerilme-

uzama eğrisi ile geleneksel metotla ölçüm arasında %10 değişim olduğunu ve polipropilen için çekme dayanımının yaklaşık 800 MPa olduğunu göstermişlerdir. Titreşim testinde frekans ölçümleri için DİK yönteminin ölçümlerinin %1 hata gösterdiğini vurgulamışlardır. DİK yönteminin avantajlarını, temassız, yüksek hassasiyetli, tam alan ölçümü yapabilen, geniş ölçüm aralıklı ve uygun ölçme kararlılığı olarak sıralamışlardır.

Grytten vd. [33] dikdörtgen kesitli talk ve elastomer polipropilen bileşiklerinin çekme testinde 3B DİK yöntemini kullanarak, uzama ve yer değiştirme dağılımlarının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çekme numunelerinin genişlik ve kalınlık bölgelerini iki farklı kamera ile kayıt etmişlerdir. Her iki yüzeyden aldıkları DİK ölçümleri arasında %6 fark olduğunu vurgulamışlardır. Aynı zamanda, şekil değişim hızının artmasıyla malzemenin akma eğrisinin %15 oranında arttığını göstermişlerdir. Her iki yüzey için gerilme değerleri arasında %40'a kadar bir fark olduğunu ve bu farkın yer değiştirme temelli hesaplamalarda meydana geldiğini belirtmişlerdir. Diğer yandan, izokorik varsayımın geçersiz olduğunu, bu nedenle 3B DİK yöntemi kullanılarak gerçek gerilme-uzama eğrisinin belirlenmesi için enine daralmanın ölçülmesinin gerektiğini vurgulamışlardır.

Qoubaa [34] ve Othman polietereterketon malzemenin oda sıcaklığında yapılan çekme testinde farklı şekil değiştirme hızlarında (0,001/s-1000/s) DİK yöntemini kullanarak, mekanik özelliklerinin ve makroskobik hacim değişiminin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Deney sonuçlarından, logaritmik aksel uzama %40 olduğunda, makroskobik hacim değişiminin %16'ya ulaştığını belirtmişlerdir. Ölçülen hacim değişimine dayanarak, gerilme-uzama davranışının benzerlik gösterdiğini, akma gerilmesinin şekil değişim hızına önemli derece duyarlı olduğunu, şekil değişim hızının artmasıyla akma gerilmesinin artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Heinz [35] çalışmasında, camsı polimer malzemelerin basma modülünü, Poisson oranını ve akma dayanımını, 3B DİK yöntemini kullanarak hesaplamaya çalışmışlardır. Çalışmalarında camsı polimer malzemelerin basma modülünün belirlenmesinde, DİK yöntemi ve test cihazı tarafından belirlenen basma modülü değerleri arasında 1087 MPa fark olduğunu belirlemişler ve bu farkın DİK yönteminin

makine ve bağlama ekipmanlarından bağımsız olarak sadece gerçek birim şekil değiştirmeyi ölçmesinden kaynaklı olduğunu vurgulamışlardır. Diğer yandan, akma noktasına kadar uzama değerini, DİK yöntemi ile %11,61, test cihazı ile bu değeri %12,42 olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca, camsı polimer malzemelerin Poisson's oranını, DİK yöntemi ile %0,25 eksenel uzama yönünde 0,36 olarak belirlemişlerdir. Böylece çoklu ekstansometre kullanımı gibi pahalı ekipmanlara gerek kalmada, DİK yönteminin akma öncesinde, homojen olmayan uzama dağılımının anlaşılması için pratik ve kullanışlı bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır.

Dudescu vd. [36] polivinilklorür (PVC) malzemenin, çekme testinde farklı çekme hızları kullanarak (1, 5, and 25 mm/dk), akma noktasının öncesinde ve sonrasındaki bölgelerde şekil değiştirme hızının deformasyon üzerindeki etkisini belirlemek için DİK yöntemini kullanmışlardır. 5 mm/dk çekme hızında gerçek uzama değerini DİK ölçümü ve geleneksel ölçüm yöntemi için yaklaşık 1,6 olarak belirlemişler, çekme hızının 25 mm/dk'ya çıkması ile bu değeri yaklaşık 2,2 olarak ölçmüşlerdir. Yaptıkları deneylerde, küçük şekil değiştirme hızlarının deformasyon üzerinde etkisinin önemsiz olduğunu, ancak yüksek şekil değiştirme hızlarında etkinin arttığını bulmuşlar ve ayrıca DİK yöntemi ile geleneksel ölçüm yöntemi arasındaki uyumuda göstermişlerdir.

He vd. [37] kısa kiriş kayma testinde fiber takviyeli kompozitlerin tam alan yüzey uzamalarını ölçebilmek için DİK tekniğini kullanmışlardır. Elde ettikleri DİK sonuçları ile sonlu elemanlar modelinden hesapladıkları gerilme değerlerini birleştirerek temel bir model geliştirmişlerdir.

Hwang vd. [38] alüminyum, saf polipropilen, cam elyaf ile takviyelendirilmiş polipropilen, boyasız polidimetilsiloksan ve boyalı polidimetilsiloksan numuneler için yerdeğiştirme ve uzama dağılımının ölçülmesinde, değiştirilmiş kaba-hassas tekrarlı DİK tekniğini kullanmışlardır. Alüminyum malzeme ile yaptıkları ön deneylerden, DİK yöntemi ile uzama ölçümünün, geleneksel ölçüme kıyasla 0,001 hata payı olduğunu göstermişlerdir. Polimer malzemeleri tek eksen çekme testine tabi tutarak, saf polipropilen için elastikiyet modülünü 0,76-0,91 GPa ve kırılma anındaki uzamayı 0,14-0,19 arasında belirlemişlerdir. Cam elyaf ile takviyelendirilmiş polipropilen için,

elastikiyet modülünü 8,58-8,98 GPa ve kırılma anındaki uzamayı 0,01-0,015 arasında ölçmüşlerdir. Elastikiyet modülü değerini, boyasız polidimetilsiloksan için 1,87 GPa ve boyalı polidimetilsiloksan için ise 1,28 GPa olarak elde etmişlerdir. Deney sonuçlarından, cam elyaf katkısının malzemenin elastikiyet modülünü arttırırken, kırılma anındaki uzamayı azalttığını belirlemişlerdir. Diğer yandan, polidimetilsiloksana boya eklenmesi ile elastikiyet modülünün hissedilir derecede azaldığını göstermişlerdir. Aynı zamanda, yüksek uzama altında, kullanılan numunelerin tam alan uzama dağılımının geliştirilen teknik ile belirlenebileceğini ortaya koymuşlardır.

Hung [39] ve Voloshin düz nesnelerin yüzey şekil değişimlerini ölçmek amacıyla alt-piksel seviyesi için yüzey uydurma ve piksel seviyesi çözünürlükte hassas tarama tekniklerini kullanan bir algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmanın deneysel doğrulamasını yapmak için tek eksen çekme cihazı kullanmışlardır. Geliştirdikleri algoritmanın hata payının yaklaşık 0,005 pikselin altında olduğunu ve çekme testinde ortalama hata payının %5,8 olduğunu göstermişlerdir. Geliştirdikleri algoritmanın, diğer tekniklere kıyasla daha hızlı olduğunu ve tek eksenli çekme testinde yer değiştirme ve uzama dağılımının ölçülmesi için kabul edilir doğrulukta olduğunu vurgulamışlardır.

Shih vd. [40] depremler veya tsunami gibi doğa olaylarından meydana gelen yapısal hasarların, geliştirilmiş DİK tekniğini kullanarak belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Eğim kontrollü ankastre test numuneleri kullanarak belirlenen sürekli parametreleri DİK ile birlikte kullanmışlar ve geliştirdikleri teknik ile yapıların titreşim hesaplamalarını gerçekleştirerek ve hasarlı bölgeleri tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, yaptıkları serbest titreşim deneylerinden elde ettikleri yer değiştirme eğrilerini normalleştirerek, bu eğrilerin birbirleri ile bağlantılı olduklarını ve ivme ölçer ile kayıt edilen ve DİK yöntemi ile elde edilen normalleştirilmiş eğrilerin birbirleri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, DİK yönteminin geliştirilmesinde sürekli parametrelerin kullanımı ile yapısal hasarlarda dinamik tepkinin belirlenebildiğini ve sürekli parametre yaklaşımının kullanılmasının sadece zamana bağlı yer değiştirme eğrilerinin elde edilmesinde değil, aynı zamanda uygun titreşim modülünün belirlenmesinde de başarılı olduğunu göstermişlerdir. Sundukları metot ile hem test

numuneleri üzerinde gerçek hasar bölgesinin tespitini hem de yapısal hasarın derecesinin de belirlenebildiğinin altını çizmişlerdir.

Literatürdeki çalışmalar detaylı olarak incelendiğinde, DİK yönteminin genel olarak, oda sıcaklığında yapılan tek eksen şekil değişimini (çekme veya basma testi) içeren malzeme mekanik testlerinde kullanıldığı, sac malzemelerin iki eksenli ve yüksek sıcaklıktaki şekil değişimlerini içeren çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Yukarıdaki bilgiler ışığında bu çalışmanın amacı, otomotiv endüstrisinde kullanılan yassı çelik malzemelerin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki şekillendirilmesinde DİK yönteminin, iki eksenli gerdirme testi olan Erichsen Kap Testi'ne uygulanması, DİK yönteminin kapasitesinin ve avantajlarının belirlenmesi olarak hedeflenmiştir. Çalışmada, farklı yassı sac malzemeler farklı kalınlıklarda seçilerek, Erichsen Kap Testi'nde oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneyleri gerçekleştirilecektir. DİK yöntemi ile, Erichsen indeks sayısının belirlenmesi, sac malzeme özelliklerinin indeks sayısına olan etkileri, şekillendirme işlemi boyunca yer değiştirme, uzama, kalınlık dağılımı, kuvvet değerlerinin elde edilmesine çalışılacaktır.

BÖLÜM 3

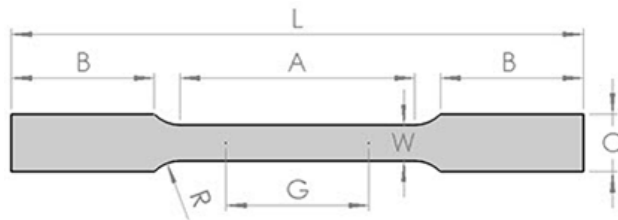
MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta yapılan şekillendirme deneylerinde kullanılan malzemeler, ekipmanlar, şekillendirme takımları, ölçüm yöntemlerinde kullanılan enstrümanlar, analiz metotları detaylı olarak anlatılmıştır.

2B DİK yönteminin kullanılabilirliği ve ölçüm hassasiyetinin belirlenmesi için oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta tek eksen çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 2B DİK yönteminde kullanılan ekipmanların uygunluğu, kalibrasyon ve ölçüm yönteminin işleyişi belirlendikten sonra 3B DİK yöntemi Erichsen Kap Testi'nde oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneylerinde kullanılmıştır.

3.1. MALZEME

Yapılan tez çalışmasında, DP980, Ck75 (Avrupa standardı C75S ve Amerikan standardı SAE1074 [41]) ve 22MnB5 yassı sac malzemeler oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneylerinde kullanılmıştır. DP980 sac malzeme için 1,3 mm kalınlık, Ck75 sac malzeme için 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm kalınlıklar ve 22MnB5 malzeme için 1,25 mm kalınlık kullanılmıştır. Tek eksen çekme testleri için numuneler ASTM E8 [42] standartına uygun olarak üretilmiştir. Şekil 3.1'de çekme testi numunelerinin standart ölçüleri, Çizelge 3.1'de standart ölçülerin değerleri gösterilmiştir. DP980 malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çekme numunesi ölçüleri [42].

Çizelge 3.1. Çekme numunesi ölçü değerleri [42].

Ölçüm Uzunluğu (G)	50,8±0,1 mm	Yarıçap (R)	12,5 mm
Gövde Uzunluğu (A)	57 mm	Çene Genişliği (C)	20 mm
Ölçüm Genişliği (W)	12,5±0,2 mm	Çene Genişliği (B)	50 mm
Toplam Uzunluk (L)	200 mm	Kalınlık (T)	1,3 mm

Çizelge 3.2. DP980 sac malzemenin kimyasal bileşimi [43].

C	Si	Mn	Mo	B	Cr	Al_{tot}
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0,135	0,05	2,1	0,35	0,007	0,15	0,45

2B DİK yönteminin uygulandığı tek eksen çekme testlerinden sonra, 3B DİK yönteminin uygulandığı, Ck75 ve 22MnB5 sac malzemelerin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesini içeren Erichsen Kap Testi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Erichsen Kap Testi deneylerinde, Ck75 sac malzeme ön şekillendirme deneyleri olan oda sıcaklığı ve sıcak şekillendirme işlemlerinde, deney düzeneğinin işleyişinin kontrolü ve kalibrasyonu için kullanılmıştır. Sonraki aşamada, 22MnB5 bor alaşımli çelik malzemeyle sadece Erichsen Kap Testi'nde sıcak şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Ck75 sac malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri, sac malzeme tedarikçisi Waelzholz firmasından temin edilmiştir. Çizelge 3.3'te Waelzholz firmasından temin edilen Ck75 malzemenin kimyasal bileşimi, Çizelge 3.4'te ise mekanik özellikleri verilmiştir. Ck75'e ait çekme testleri, ASTM E8 standardında, firma tarafından hadde yönüne 0°, 45° ve 90° yönlerde, her bir hadde yönü için üçer adet numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de Ck75 malzemenin farklı hadde yönleri için mühendislik gerilme-gerinim eğrisi, Şekil 3.3'te ise gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi gösterilmiştir.

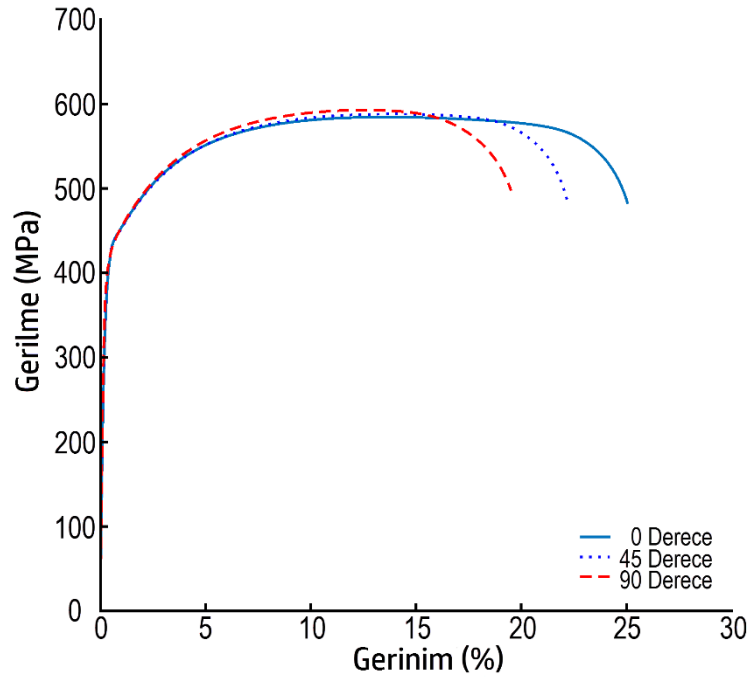
Çizelge 3.3. Ck75 sac malzemenin kimyasal bileşimi [44].

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Cu	Ni
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0,761	0,241	0,608	0,009	0,001	0,033	0,161	0,004	0,034	0,042

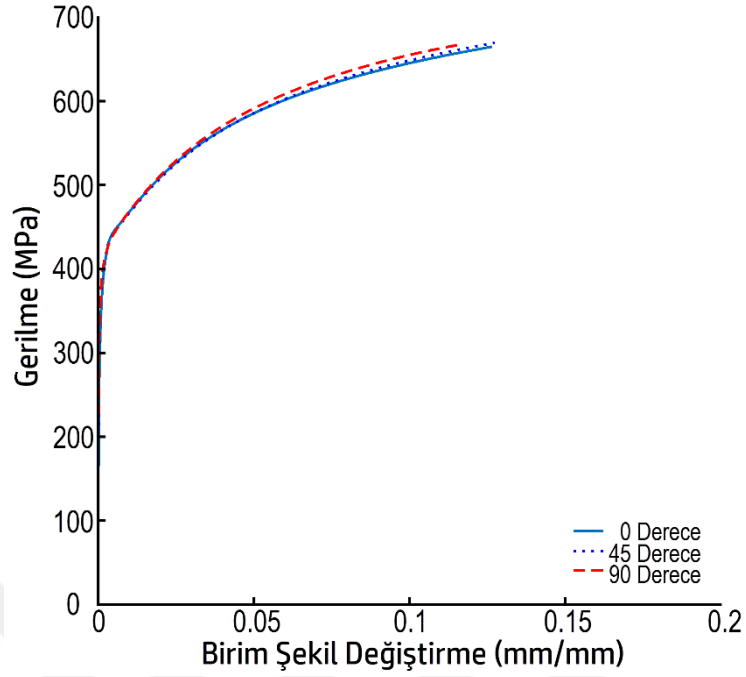
Çizelge 3.4. Ck75 sac malzemenin mekanik özellikleri [44].

Numune Yönü	ρ	E	$R_{p0.2}$	R_m	n
	(kg/m^3)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(-)
Hadde Yönüne 0°	7,85	205	399	576	0,149
Hadde Yönüne 45°	7,85	205	413	590	0,150
Hadde Yönüne 90°	7,85	205	409	593	0,156

Çizelge 3.4'te verilen Ck75 sac malzemeye ait mekanik özelliklerde, ρ malzemenin yoğunluğunu, E elastisite modülünü, $R_{p0.2}$ akma dayanımını, R_m çekme dayanımını, n çalışma sertleşmesini ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Ck75 sac malzemenin hadde yönüne göre mühendislik gerilme-gerinim eğrisi [44].



Şekil 3.3. Ck75 sac malzemenin hadde yönüne göre gerçek gerilme-birim şekil değişirme eğrisi [44].

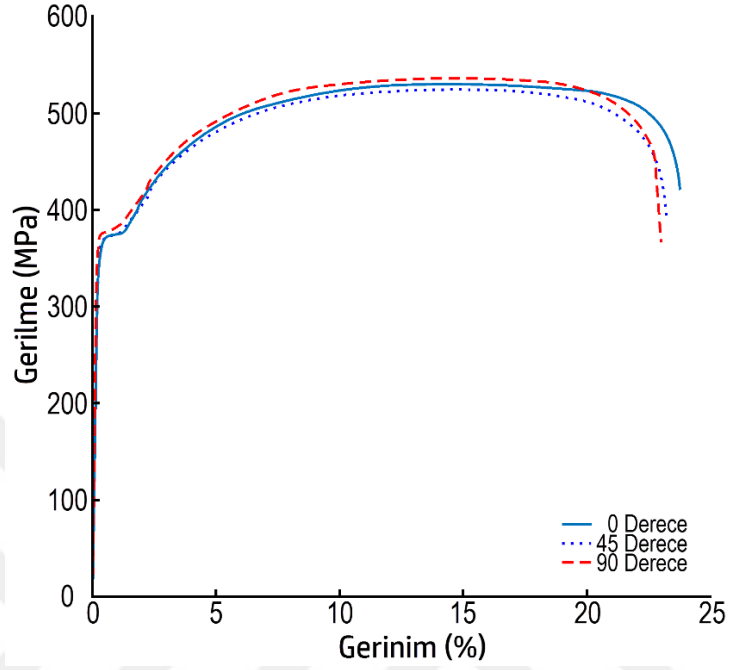
Düşük alaşıma sahip ve yüksek dayanımlı çelik tiplerinden otomotiv endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan 22MnB5 sac malzemelerdir. Bu sac malzemeler, ısıl işlem veya sertleştirme sonrası mangan ve bor elementlerin etkisi ile, 1500 MPa'ın üzerinde çekme dayanımı, 1100 MPa'ın üzerinde de akma dayanımına sahip olabilmektedir [3]. 22MnB5 malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri, sac malzeme tedarikçisi Salzgitter Flachstahl firmasından temin edilmiştir. Çizelge 3.5'te Salzgitter Flachstahl firmasından temin edilen 22MnB5 malzemenin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 3.5. 22MnB5 sac malzemenin kimyasal bileşimi [45].

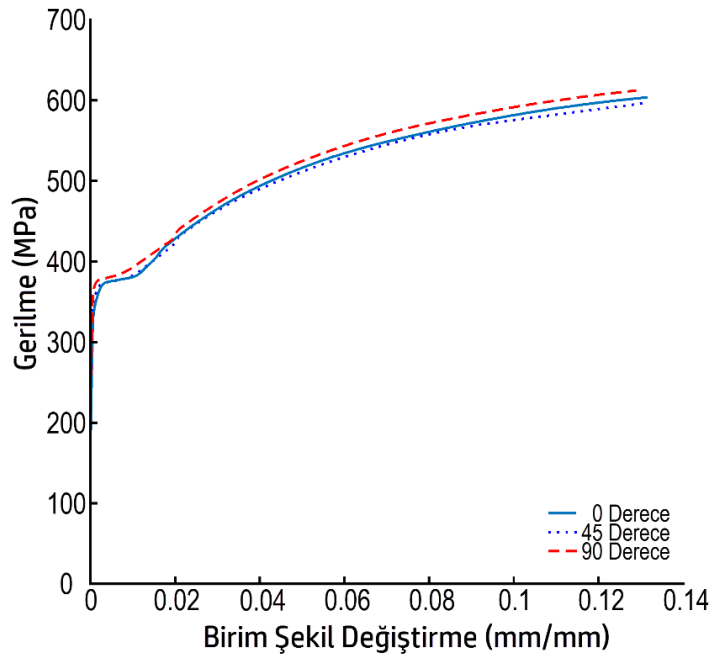
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al_{top}	Ti	B
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Min.	0,220	0,200	1,200	0,110	-	0,020	0,020	0,0020
Maks.	0,250	0,300	1,400	0,200	0,100	0,050	0,050	0,0035

22MnB5'e ait çekme testleri, ASTM E8 standardında, firma tarafından hadde yönüne 0°, 45° ve 90° yönlerde, her bir hadde yönü için üçer adet numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te 22MnB5 sac malzemenin farklı hadde yönleri için

mühendislik gerilme-gerinim eğrisi, Şekil 3.5'te ise gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. 22MnB5 malzemenin hadde yönüne göre mühendislik gerilme-gerinim eğrisi [45].



Şekil 3.5. 22MnB5 malzemenin hadde yönüne göre gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [45].

3.2. METOT

Yapılan çalışmada, tek eksen çekme testi ve Erichsen Kap Testi deneyleri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneylerinde 2B ve 3B DİK yöntemi uygulanarak, malzeme üzerindeki deformasyon, yer değiştirme ve uzama değerleri belirlenmiştir. DP980 malzeme için tek eksen çekme deneyleri Amerika Birleşik Devletleri Wayne State Üniversitesi'nde Dr. Xin WU danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Erichsen Kap Testi için kullanılan düzenek, Karabük Üniversitesi bünyesinde hazırlanmıştır.

Oda sıcaklığı tek eksen çekme testinde, çekme cihazı, ekstansometre, DİK yöntemi için kamera ve beyaz ışık ekipmanları kullanılmıştır. Sıcak çekme testlerinde ise, oda sıcaklığı testlerinde kullanılan ekipmanlara ek olarak, indüksiyon ile ısıtma, sıcaklık için termal kamera ve led ışıklandırma ekipmanları kullanılmıştır.

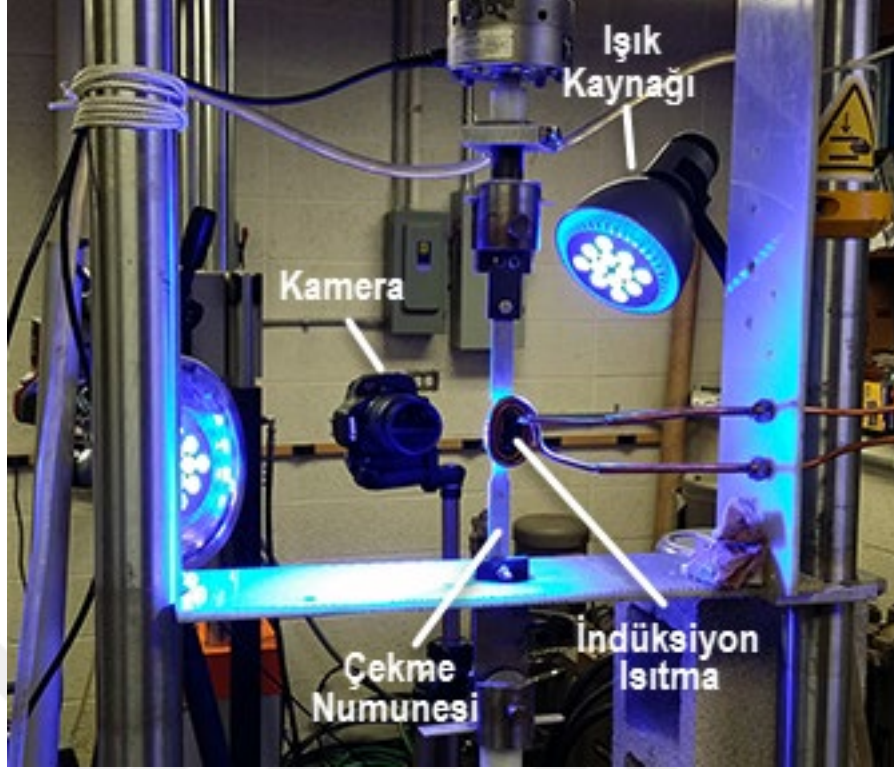
Oda sıcaklığı Erichsen Kap Testi için hidrolik pres, Erichsen kalıbı, yüksek çözünürlüklü kameralar ve beyaz aydınlatma ekipmanları kullanılmıştır. Sıcak Erichsen Kap Testi'nde, oda sıcaklığı testlerinde kullanılan ekipmanlara ek olarak, elektrikle ısıtma sistemi, termokupl ve led ışıklandırma ekipmanları kullanılmıştır.

3.2.1. Şekillendirme Sistemi

Şekillendirme sistemi 2B DİK yönteminin uygulandığı tek eksen çekme testini ve 3B DİK yönteminin uygulandığı Erichsen Kap Testi'ni içermektedir.

3.2.1.1. Tek Eksen Çekme Testi

Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında yapılan tek eksen çekme testlerinde 2B DİK yönteminin kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla Şekil 3.6'da gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Kurulan deney düzeneğinde, hem oda sıcaklığındaki tek eksen çekme testleri, hem de sıcak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Kurulan sistem, çekme cihazı, yüksek çözünürlüklü DSLR kamera, indüksiyon ısıtma sistemi, ışık kaynağı ve termal kameradan oluşmaktadır.



Şekil 3.6. Tek eksen çekme testi düzeneği [46].

Oda sıcaklığı ve sıcak tek eksen çekme testlerinde Instron 8801 model hidrolik çeneli çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme cihazı üst çenesine yine Instron marka yük hücresi bağlanarak, deney boyunca kuvvet değerleri ölçülüp, bilgisayar ortamına kayıt edilmiştir.

İndüksiyonla Isıtma

Tek eksen çekme testinde, malzemenin sıcaklığının artırılması için uygulanabilecek elektrikle ısıtma, fırında ısıtma ve indüksiyon gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Çekme numunesinin elektrikle ısıtılmasında, çekme test cihazının çeneleri elektrik akımından dolayı zarar görebilmektedir. Ayrıca, fırında ısıtma yönteminde ise çekme numunesinin taşınması ve malzemenin çekme çenelerine bağlanması zaman kaybına ve numunenin sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Laboratuvar koşullarında, en uygun ve pratik kullanım yöntemi olan indüksiyon ısıtma sistemi tek eksen çekme testleri için tercih edilmiştir.

Sıcak çekme testlerinde kullanılan indüksiyonla ısıtma sisteminde Şekil 3.7’de görülen Tocotron marka güç kaynağı kullanılmıştır. Kullanılan güç kaynağı, frekans ve gerilim ayarlı olup, maksimum kapasitesi 27,19 kW güç, 460 V gerilim ve 39 Amper’dir.



Şekil 3.7. Indüksiyon güç kaynağı.

Güç kaynağından alınan elektrik akımının indüksiyon bobinine en az kayıp ve en yüksek verim ile iletilmesi için bakır borular kullanılmıştır. Elektrik akımının iletimi sırasında, manyetik alandan dolayı bakır boruların ısınmasını önlemek için boruların içerisinden su geçirilerek soğutma sağlanmış ve indüksiyon ısıtma sisteminin uzun süreli çalışması gerçekleştirilmiştir.

Tek eksen çekme testleri numuneleri yassı ve düzlem parçalar olduğu için sıcak tek eksen çekme testinde yassı tip (Pancake) spiral olarak dıştan içe doğru sarılmış indüktör seçilmiştir. Şekil 3.8’de indüksiyon ısıtma sisteminde kullanılan yassı tip spiral indüktör gösterilmiştir. Yassı tip spiral indüktör için Ø8 mm ve Ø5 mm çaplarında bakır borular kullanılmıştır. Spiral olarak dıştan içe doğru sarılmış indüktörde, sarımların birbirlerine değerek kısa devre olmasını önlemek amacıyla, sarımlar arasında boşluklar bırakılmıştır. Ayrıca spiral tip indüktör, dıştan içe doğru çok turlu sarımlardan oluştuğu için merkez noktasında boşluk oluşmaktadır. Sarılar arası ve merkez noktasındaki boşluklar, iletken malzemenin homojen şekilde ısınmasını engellemektedir. Bu nedenle, homojen ısınmayı sağlamak için sarımlar arasına mıknatis tozları yerleştirilmiş ve merkez noktasında bulunan boşluğa da mıknatis koyularak manyetik alanın devamlılığı ve numunenin homojen ısınması

sağlanmıştır. Mıknatis tozları ve mıknatis sert mika üzerine yapıştırılarak, bütün indüktör tasarımının sabitlenmesi elde edilmiştir.



Şekil 3.8. İndüktör tasarımı. a) indüktör üst görünüş, b) alt görünüş.

Sıcaklık Ölçümü

Sıcak tek eksen çekme testlerinde, malzemenin indüksiyonla ısıtılmasıyla elde edilen sıcaklık dağılımının ölçülebilmesi ve takip edilebilmesi için FLIR marka T300 model temassız kızılötesi termal kamera kullanılmıştır. Şekil 3.9'da kullanılan termal kamera, Şekil 3.10'da termal kamera ölçümünün örnek bir numune üzerinde (a) oda sıcaklığında ve (b) yüksek sıcaklık altındaki görüntüsü gösterilmiştir. Termal kamera 320x420 piksel çözünürlükte olup, ölçüm aralığı ise -20 °C ile 1200 °C arasındadır.

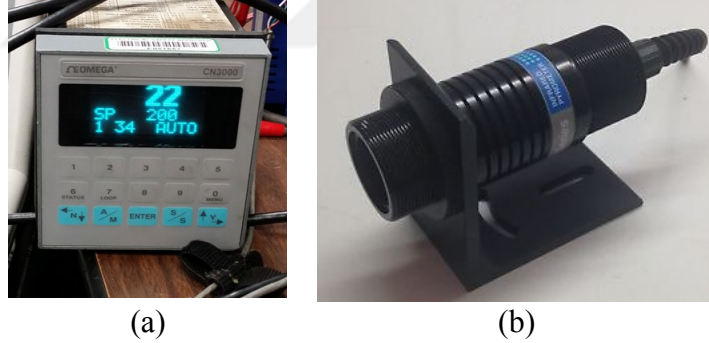


Şekil 3.9. Flir T300 termal kamera [47].



Şekil 3.10. Termal kamera ölçümü. a) oda sıcaklığında, b) yüksek sıcaklıkta.

Termal kameranın kalibrasyonu ve ölçüm hassasiyetini belirlemek için Omega marka OS550 model kızılötesi payrometre ve Omega marka CN3000 model sıcaklık kontrol modülü kullanılmıştır. Payrometre ve sıcaklık kontrol modülü ile çekme numunesinin çene aralığı üzerinde tek noktadan sıcaklık değeri ölçülmüş ve termal kameranın ölçümü ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.11’de kullanılan kullanılan sıcaklık kontrol modülü ve payrometre gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kızılötesi tek nokta sıcaklık ölçüm sistemi. a) Omega CN3000 sıcaklık kontrol modülü, b) Omega OS550 payrometre.

2B Dijital İmaj Korelasyon Sistemi

Tek eksen çekme testi gibi, uzaysal koordinat sisteminin sadece bir ekseninde kuvvetin uygulandığı ve şekil değişiminin meydana geldiği uygulamalar için 2B DİK yöntemi kullanılmaktadır. 2B DİK yönteminin uygulanmasında, çekme numunesine 90 derece açı ile yerleştirilen tek bir kamera, bir kalibrasyon enstrümanı ve doğal ışıklandırma ekipmanlarının kullanılması yeterli olmaktadır. Tez çalışmasında, oda sıcaklığı ve

yüksek sıcaklıkta tek eksen çekme deneyleri için 2B DİK yöntemi uygulanmıştır. Şekil 3.12’de kullanılan 2B DİK yönteminin şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 3.12. 2B DİK yönteminin şematik resmi.

2B DİK yöntemi için kullanılan donanım ekipmanları maliyet ve pratiklik göz önünde tutularak seçilmiştir. 2B DİK ölçüm sistemi yüksek çözünürlüklü kamera, lens, kamera tutucu, kayıt sistemi, ışıklandırma ekipmanlarını içermektedir. Özellikle yüksek çözünürlüklü kameranın seçiminde son kullanıcıya yönelik DSLR profesyonel kamera ve lens tercih edilmiştir.

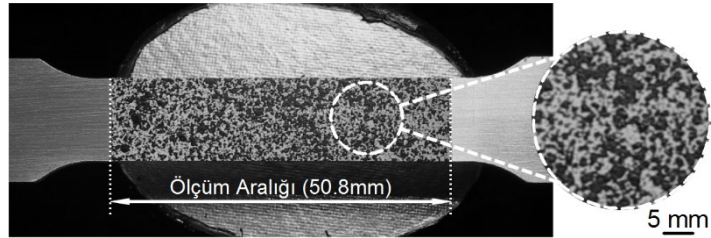
Numunelerin Hazırlanması

Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki tek eksen çekme testleri için numunelerin hazırlanmasında ilk olarak numunelerin yüzeyleri zımparalama işlemine tabi tutulmuş, kir, yağ, pas gibi boyanın yapışmasını engelleyecek faktörler ortadan kaldırılmıştır. Daha sonra zımparalanan bu yüzeyler aseton ile temizlenmiş, boyanın yapışabilmesi için uygun bir yüzey haline getirilmiştir. Temizlik işleminin ardından, numunelerin boyama işlemine geçilmiştir. Boyama işlemi öncesinde hem DİK yönteminin kalibrasyonu hem de ekstansometrenin çene aralığı ile eşit uzunlukta bir alan oluşturarak karşılaştırma yapmak için, çekme numunesi üzerindeki çene aralığı bölgesi belirlenmiş ve bu alan dışında ki bölge bant ile kaplanmıştır. Bu sayede, boya işlemi sırasında bantın olduğu yerler boyanmamış ve çene aralığına eşit uzunlukta bir alan oluşturularak bilinen bir uzunluk elde edilmiştir. Bu amaçla, çekme numunesinin

ölçüm bölgesinde, ekstansometrenin çene aralığı olan 50,8 mm uzunluktaki bir alan boyanmıştır. Boyama işleminde, oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıklarda performansı yeterli olan VHT marka Flameproof silikon seramik bazlı boya kullanılmıştır. İlk olarak VHT Flameproof mat beyaz spreyci boya ile bir arka plan oluşturulmuştur. Bu arka plan üzerine, VHT Flameproof mat siyah boya ile noktacıklar serpiştirilmiştir. Şekil 3.13'te kullanılan VHT Flameproof boya ve Şekil 3.14'te VHT Flameproof ile boyanan örnek bir çekme numunesi ve ölçüm aralığı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. VHT marka Flameproof boya. a) mat beyaz, b) mat siyah.



Şekil 3.14. Boyanmış çekme numunesi örneği.

Sıcak tek eksen çekme testleri için farklı yüksek sıcaklık boyaları şekillendirme deneylerinde kullanılmıştır. Oda sıcaklığındaki çekme deneylerinde kullanılan VHT Flameproof'ın üretici firma tarafından 1093 °C sıcaklıklara kadar dayanabildiği belirtilmektedir. Bu boya yüksek sıcaklık altında malzeme yüzeyinde kalabilmekte ancak deformasyon ve şekil değişimi olduğunda, çekme numunesi ile birlikte deforme olmamakta ve çekme numunesinin yüzeyinden kalkmaktadır. Hem sıcaklığın hem de deformasyonun etkisiyle kullanılan birçok boya numune yüzeyinden kalkmış veya boyaların kontrastı azalmıştır. Kullanılan farklı boyalar içinde en iyi sonuç, zirkonyum

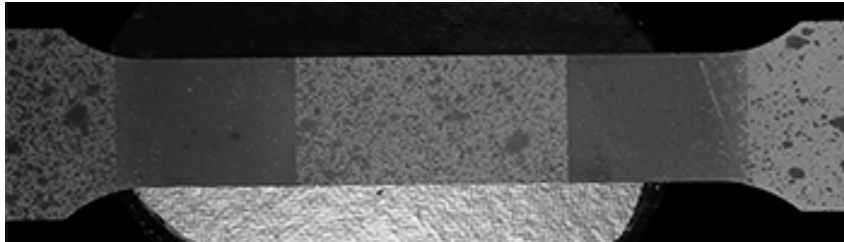
oksitli su bazlı kaplama boyası olan Aremco marka PyroPaint 634-ZO ile elde edilmiştir. Bu boyanın numune üzerine uygulanmasında, ince bir kimyasal kaplama tabakası oluşmakta ve 1800 °C sıcaklıklara kadar malzeme üzerinde tutunabilmesi sağlanmaktadır [48]. Sıcak çekme numunelerinin boyama işlemi, oda sıcaklığı numunelerinde olduğu gibi ilk olarak beyaz mat boya ile bir arka plan oluşturularak, bu arka plan üzerine siyah noktacıkların dağıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'te kullanılan yüksek sıcaklık kaplama boyası gösterilmiştir. Şekil 3.16'da ise kullanılan yüksek sıcaklık kaplama boyasının 800 °C sıcaklıktaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık boyası [48].



(a)



(b)

Şekil 3.16. Aremco PyroPaint uygulanmış 800 °C sıcaklıktaki numune. a) RGB renk formatında görüntüsü, b) gritonları renk formatında görüntüsü.

Kamera

Dijital kamera endüstrisinde, CCD (Charge-Coupled Device) sensör ve CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) sensör teknolojileri birçok görüntüleme sistemlerinde ve kayıt etme teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. CMOS sensörlerin düşük ışık hassasiyeti ve kumlama dezavantajları, CCD sensörlerin yüksek hızlı görüntüleme kabiliyetleri nedeniyle geçen yıllar boyunca tercih edilmelerine sebep olmuştur. Ancak, günümüzde optik teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, CMOS sensörlerinin kumlama problemi çözülmüş ve birçok dijital kameralarda CMOS sensörleri, düşük güç tüketimi, parlamama ve düşük maliyetlerinden dolayı tercih edilmektedir. CMOS kameraların 2B ve 3B DİK ölçümlerinde kullanılmasıyla kabul edilebilir sonuçlar elde edildiği görülmektedir [49-52].

Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında yapılan tek eksen çekme testlerinde, Canon marka T3i model DSLR yüksek çözünürlüklü kamera kullanılmış olup, kamera çözünürlüğü 1920x1080 ve saniyedeki görüntü sayısı 30'dur. Şekil 3.17'de kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera gösterilmiş ve Çizelge 3.6'da kameraya ait teknik özellikler verilmiştir. Dijital kamera ile birlikte 18-55 mm (f/3.5-5.6) makro lens kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Canon T3i kamera [53].

Çizelge 3.6. Canon T3i dijital kameranın özellikleri [53, 54].

Özellik		Değer
Etkili Megapiksel	(Megapiksel)	18
Sensör Çözünürlüğü	(Piksel)	5184x3456
Sensör Boyutu	(mm)	22,3x14,9
Sensör Görüntü Oranı	-	3:2
Piksel Adımı	(μm)	4,29
Piksel Yoğunluğu	(MP/cm ²)	5,43

Kalibrasyon

2B DİK yönteminde, uzaysal koordinat sisteminde kameranın konumu nesneye 90° açı ile dik konumda ve deformasyon ekseninde kamera eksenine dik doğrultuda olduğu için, piksel cinsinden kaydedilen görüntülerin bilinen uzunluk değerlerine çevrilmesinde, uzunluğu bilinen bir nesne yeterli olmaktadır. Bu nedenle, tek eksen çekme testindeki 2B DİK ölçümlerinde, numune ile birlikte metre yerleştirilmiş ve tüm piksel cinsinden olan değerlerin bilinen uzunluk değerine (mm) dönüştürülmesi sağlanmıştır. Şekil 3.18’de örnek bir tek eksen çekme testinde, çekme numunesinin bağlanması ve kalibrasyon için kullanılan metre gösterilmiştir.



Şekil 3.18. 2B DİK yöntemi için kalibrasyon uygulaması [55].

Şekil 3.18’de, tek eksen çekme testinin başlangıcında referans görüntü olarak kayıt edilen resim gösterilmiştir. Burada kullanılan resim, 149 x 271 piksel çözünürlüktedir. Kırmızı kesikli çizgi ile belirtilmiş alan, ekstansometre çene aralığı ve aynı zamanda ölçüm yapılacak alan olup, 50,8 mm uzunluğa sahiptir. Diğer yandan resimde sol tarafta görülen metre hem inç cinsinden hem de milimetre cinsinden gerçek uzunluğu göstermektedir. Buradan, gerçek uzunluk ölçüsü kullanılarak ölçekleme yapıldığında bir pikselin yaklaşık 0,227837 mm olduğu belirlenmekte ve 2B DİK için kalibrasyon işlemi tamamlanmaktadır.

Yazılım

DİK yönteminin uygulanmasında, optik araçların yanında özel bilgisayar yazılımları veya yazılım kodlarının kullanılması gerekmektedir. Dijital kamera ile numunenin test boyunca şekil değişimi video dosyası olarak (Avi, mov, mpeg gibi dosya uzantılarıyla) kaydedilmektedir. Kayıt edilen video dosyası, saniyedeki kare sayısına bağlı kalarak, birbiri ardına sıralı bir şekilde imaj dosyalarına (jpeg, tif, png, bmp gibi) bölünmektedir. Bu işlem için piyasada ücretli ve ücretsiz birçok düzenleme programı veya yazılım kodları bulunmakta olup, tez çalışmasında, video dosyasının imajlara bölünmesi için Adobe After Effect yazılımı kolay kullanımı ve basit olması bakımından tercih edilmiştir. Deneylerin video dosyaları, Adobe After Effect programı kullanılarak TIFF uzantılı birbiri ardına sıralı imaj dosyalarına bölünmüştür.

İmaj dosyalarının işlenmesi için ikinci aşama, elde edilen dosyaların RGB renk formatından, gri tonları (greyscale) renk formatına dönüştürülmesidir. Saniyede 30 kare değeri olan, 60 saniyelik bir video dosyasından, 2400 adet imaj dosyası elde edilmektedir. Bu dosyaların tek bir biçimde gri tonlarına dönüştürülmesi zor bir işlem olduğundan, bunu toplu şekilde yapan ve ücretsiz bir programı olan FastStone Image Viewer yazılımı kullanılmıştır.

Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında yapılan tek eksen çekme testi için 2B DİK ölçümlerinde, Vic2D yazılımı kullanılmıştır. Vic2D ile yapılan 2B DİK ölçümlerinde, deformasyona uğrayan numunenin düzlemsel olması, kamera sensör düzlemine paralel olması ve test boyunca kamera görüş alanı içerisinde olması yeterlidir. 2B DİK

ölçümlerinin tek bir kamera ile yapılmasından dolayı, kullanılan Vic2D yazılımı çekme numunesinin görüntülerde düzlem hareket yaptığını varsaymakta ve bütün resimlerde tamamen düzlemsel deformasyona göre görüntüleri işlemektedir [15].

Aydınlatma

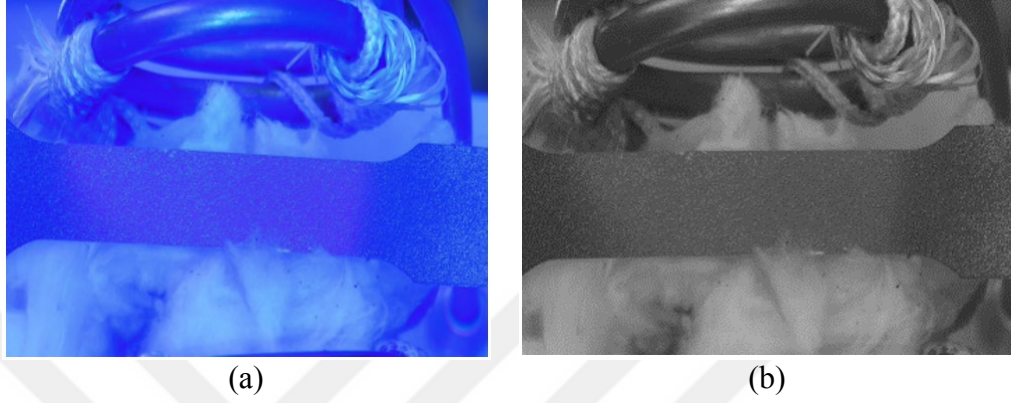
Oda sıcaklığında yapılan deneylere DİK yönteminin uygulanmasında, laboratuvar ve atölye şartlarının güneş ışığı ile aydınlatıldığı durumlarda günlük kullanılan aydınlatma ekipmanları yeterli olmaktadır [56]. Oda sıcaklığındaki tek eksen çekme testlerinde, malzeme üzerinde herhangi bir gölgelenme veya kameranın görüş açısında karanlık bölgelerin oluşmaması için numune üzerine, 100 Watt doğal beyaz ışık veren halojen lambaların yönlendirilmesi ile net, parlak ve temiz bir görüş alanı sağlanmıştır. Şekil 3.19’da kullanılan ışık kaynağı gösterilmiştir.



Şekil 3.19. 100 Watt halojen aydınlatma.

Metalik malzemelerin yüksek sıcaklık altındaki termal ışınımından dolayı meydana gelen renk değişimleri, sıcaklığın 550 °C'nin üzerinde olduğu durumlarda, lokal bölgelerin renklerinin griye dönüşmesi ve görünürdeki renk doygunluğunun azalması olarak görülmektedir. Ayrıca, 600 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda, termal ışınımın şiddeti büyük ölçüde yoğunlaşmakta ve aydınlatma için kullanılan ışıklandırma dalgalarını etkisiz hale getirmektedir. Bu yüzden, görüntünün parlaklığını doygunlaştırma eğilimi görülmekte ve yine görüntünün kontrastı büyük ölçüde azalmaktadır. Bu durum, şekil değiştirmiş ve şekil değiştirmemiş numunelerin dijital görüntülerinin karşılaştırılmasında ciddi ölçüde kötü korelasyon sonuçlarına sebep

olmaktadır. Termal ışınım nedeniyle meydana gelen kötü korelasyon sonuçları, DİK algoritmaları ile aşılamamaktadır [46, 57]. Şekil 3.20’de örnek olarak sıcak çekme testindeki numunenin renk değişimi ve gri tonlarına çevrildiğindeki kontrast kaybı gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Yüksek sıcaklık altındaki çekme numunesi. a) RGB tonlarındaki görüntü, b) gritonlarına çevrilmiş görüntü [46].

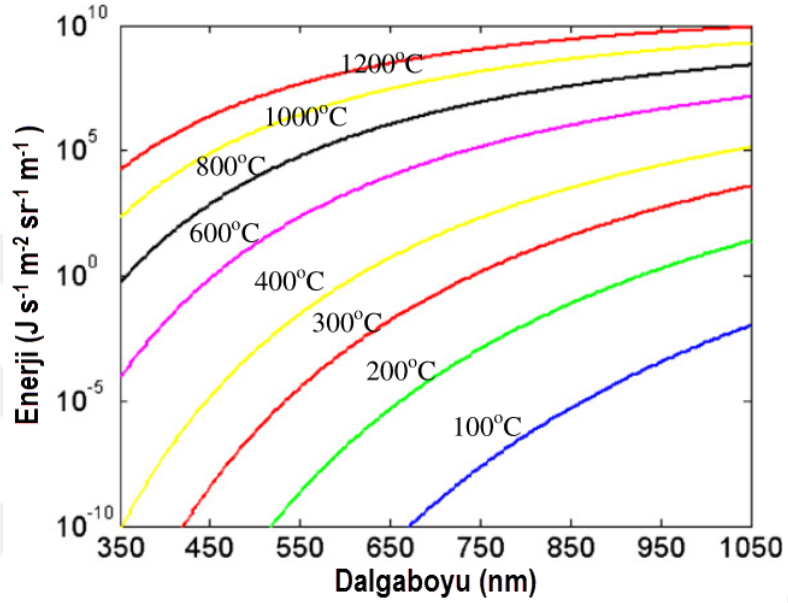
Bu noktada, yüksek sıcaklıktan kaynaklı termal ışınımın giderilerek, yüksek kalitedeki görüntülerin kayıt edilmesi deformasyon ölçümlerinde kritik bir noktadır. Yüksek sıcaklığa sahip nesnelerin termal ışınımının, sıradan ekipmanlar tarafından kaydedilen görüntülerin yoğunluğu üzerindeki etkisi termal ışınım enerjisi ve sıcaklık arasındaki ilişki ile açıklanmaktadır. Bütün dalga boylarında herhangi bir T sıcaklığındaki siyah bir kütle tarafından emilen spektral enerji, Planck ışınım kanunu ile tanımlanmaktadır [57].

$$I(\lambda, T) = \left(\frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad (3.1)$$

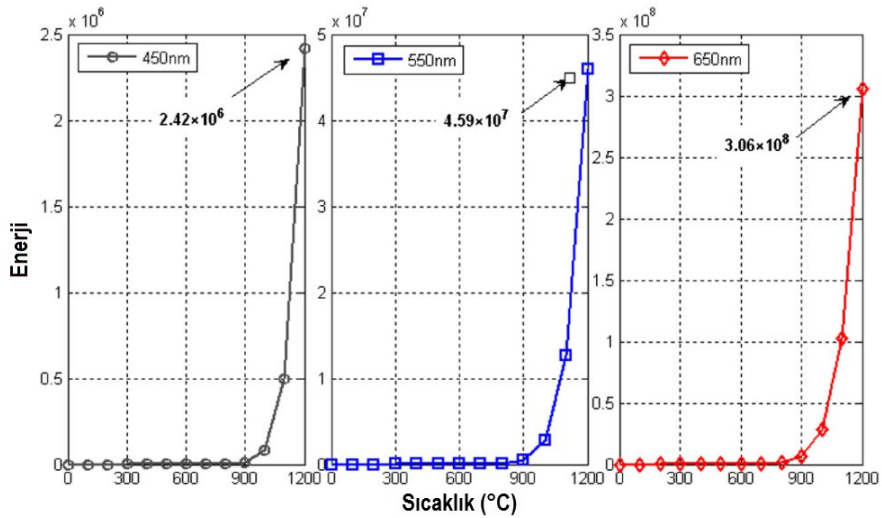
Denklem 3.1’de, $I(\lambda, T)$ spektral enerji, dalga boyu λ ve sıcaklık T ’nin fonksiyonu olarak verilmiştir. Ayrıca Denklem 3.1’de, h Planck sabiti, c ışık hızı, k ise Boltzmann sabiti ve e doğal logaritmayı ifade etmektedir.

Şekil 3.21’de farklı sıcaklıklar için ışınım enerjisi, dalga boyunun fonksiyonu olarak 100 °C ve 1200 °C arasındaki sıcaklıklar için Planck denkleminde göre gösterilmiştir.

Şekil 3.21 incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla emilen termal ışınım dalga boyunun gittikçe azaldığı ve toplam ışınım miktarının çok hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Diğer yandan, Şekil 3.22’de ışınım enerjisinin, 450 nm, 550 nm ve 650 nm dalga boyları için sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 3.22 incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla ışınım enerjisinin önemli derecede arttığı görülmektedir.

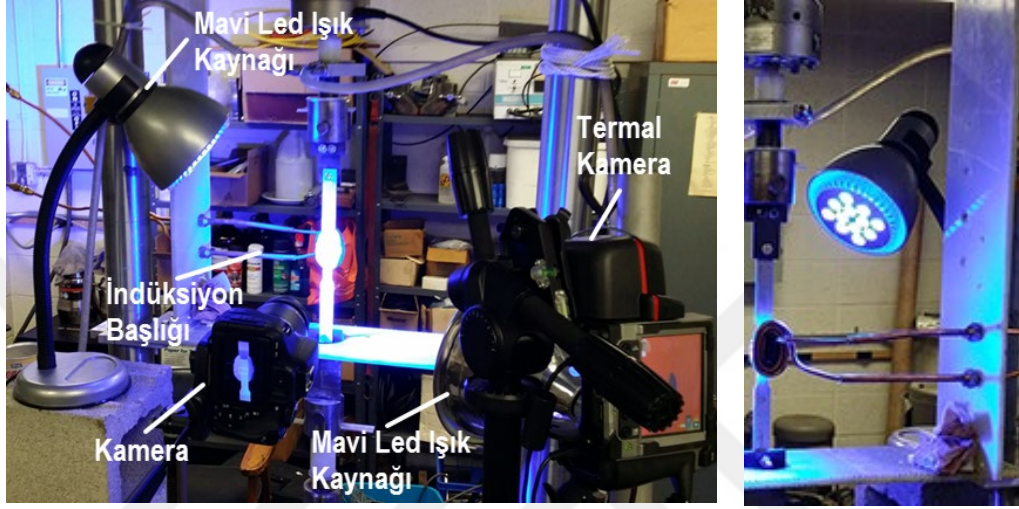


Şekil 3.21. Enerji ve dalga boyu arasındaki ilişki [46, 57].



Şekil 3.22. Enerji ve sıcaklık arasındaki ilişki [57].

Termal ışımm, dalga boyu ve sıcaklık arasındaki ilişkiler incelendiğinde, sıcak tek eksen çekme testleri için 450 nm dalga boyundaki ışık kaynağının termal ışımm enerjisini emebildiği, mavi filtreli lens ile yeterli ışık yoğunluğunu ve renk kontrastını sağladığı belirlenmiştir. Şekil 3.23'te sıcak tek eksen çekme testlerinde kullanılan mavi led ışıkkandırma gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Mavi led ışıkkandırma.

3.2.1.2. Erichsen Kap Testi

Metalik sacların, şekillendirme limitlerinin belirlenmesinde, çekme, basma, çift yönlü gerdirme gibi birçok test yöntemi endüstride akademik çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, kullanılabilirliği kolay, basit, en eski ve yaygın olarak kullanılan Erichsen Kap Testi'dir.

Erichsen Kap Testi'nde, yuvarlak veya kare düz sac malzeme kalıp yarımları arasında tamamen sabitlenmekte ve hareketsiz olması sağlanmaktadır. Yarı küresel zımba ile kalıp içerisine doğru sac malzeme, belirli bir hızda, iki eksen deforme olmaktadır. Zımbanın hareketi boyunca sac malzeme, yarı küresel şekli almaya zorlanmakta ve malzemenin şekillendirme sınırları aşıldığında sac malzemedeyırılma, boyun verme veya kuvvette düşme meydana gelerek, test sonlandırılmaktadır. Böylece, şekillendirme sonunda kap derinliği ölçülerek malzemenin sünekliği belirlenmektedir [58].

Çizelge 3.7. Erichsen Kap Testi kalıbı ölçüleri [58].

Sembol	Açıklama	Ölçü	
		(inch)	(mm)
T_s	Numune Kalınlığı	Malzeme Kalınlığı	
D_p	Yarı Küresel Zimba Çapı	0,875±0,002	20±0,05
A	Üst Kalıp Delik Çapı	1±0,004	25,4±0,1
B	Alt Kalıp Delik Çapı	1±0,004	25,4±0,1
D_t	Üst Kalıp Dış Çapı	3,54	90±0,1
D_b	Alt Kalıp Dış Çapı	3,54	90±0,1
D_s	Numune Genişliği/Çapı	3,5	89
R_i	Alt Kalıp İç Delik Yarıçapı	0,032±0,002	0,81±0,05
R_e	Alt Kalıp Dış Yarıçapı	0,032±0,002	0,81±0,05
R_t	Üst Kalıp Dış Yarıçapı	0,032±0,002	0,81±0,05
H_b	Alt Kalıp Kalınlığı	0,78	20
H_t	Üst Kalıp Kalınlığı	0,78	20

Tasarlanan Erichsen Kap Testi düzeneği, alt kalıp, alt kalıp tutucu, üst kalıp, üst kalıp tutucu ve zimba parçalarından oluşmaktadır. Alt kalıp, alt kalıp tutucu içerisine sıkı geçerek bağlanmakta ve alt kalıp tutucu, pres tablasına bağlama pabuçları kullanılarak sabitlenmektedir. Üst kalıp tutucu, alt kalıp tutucu üzerine, M6x120 mm silindir başlı civatalar ile sabitlenmiştir. Üst kalıp dışına ve üst kalıp tutucu içerisine M90x2 mm boyutlarında dış açılarak, üst kalıbın, üst kalıp tutucu içerisinde döner hareketi sağlanmıştır. Üst kalıp dönme hareketi boyunca ilerlemekte ve alt kalıp üzerine yerleştirilen sac malzemeyi sıkıştırarak, alt kalıp üzerine deney numunesini sabitlemektedir. Bu sayede, şekillendirme işlemi boyunca, sac malzemenin sabitlenmesi sağlanmış ve hareket etmesi önlenmiştir. Pres başlığına, çift yönlü dış açılmış bağlama aparatı kullanılarak yük hücresi bağlanmış ve yük hücresine yine dış açılmış aparat kullanılarak zimba sabitlenmiştir. Zımbanın aşağı doğru hareketi ile sabitlenen sac malzemeyi, alt kalıp içerisine doğru gerdirerek yırtılma meydana gelmektedir.

Hidrolik Pres

Erichsen Kap Testi'nde, şekillendirme deneyleri için elle kontrol, kumandalı, Hidroliksan marka, silindir kuvveti 30 ton olan atölye tipi hidrolik pres kullanılmıştır. Hidrolik presin kurs boyu 380 mm olup, 3 kW gücünde elektrik motoru kullanılmıştır. Presin maksimum çalışma basıncı 400 bar'dır.

Erichsen Kap Testi için ASTM E643-15 standardında, şekillendirme deneyleri için 0,08 mm/s (0,2 in/min) ile 0,42 mm/s (1 in/min) arasındaki zımba hızlarının kullanılması önerilmektedir[58]. Kullanılan hidrolik presin bu hız aralığında çalışması için, pres silindiri emiş hattı girişinde elle kumandalı akış kontrol valfi kullanılmıştır. Akış kontrol valfi kullanılarak şekillendirme deneylerindeki zımba hızı 0,1 mm/s olarak sabit tutulmuş ve bütün şekillendirme deneyleri sabit bu hızda gerçekleştirilmiştir.

Atölye tipi hidrolik pres üzerinde pres tablası bulunmadığı için, 500 mm x 500 mm x 100 mm ebatlarında pres tablası üretilmiştir. Üretilen pres tablasında, alt kalıp tutucunun bağlanması için 11 mm genişliğinde ve 110 mm uzunluğunda slot kanalları yer almaktadır. Kalıp ekipmanları ve ısıtıcı elektrot sistemi üretilen plaka üzerine, slot kanallarından, bağlama pabuçlarının kullanılmasıyla sabitlenmiştir. Aynı zamanda, kamera ile görüntü alabilmek için üretilen pres tablasının ortasına 150 mm genişliğinde delik açılmış ve bütün görüntü alma işlemleri pres tablasının altından gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.26'da deneylerde kullanılan hidrolik pres gösterilmiştir.



Şekil 3.26. 30 ton atölye tipi hidrolik pres.

Elektrikle Isıtma Sistemi

Erichsen Kap Testi deneylerinde, sac malzemelerin şekillendirme öncesinde ısıtılması için elektrik ısıtma yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan elektrikle ısıtma sistemi, yüksek akımın elde edildiği elektrik kaynağı ve elde edilen akımın sac malzeme üzerinden iletimini sağlayan elektrot sistemi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır.

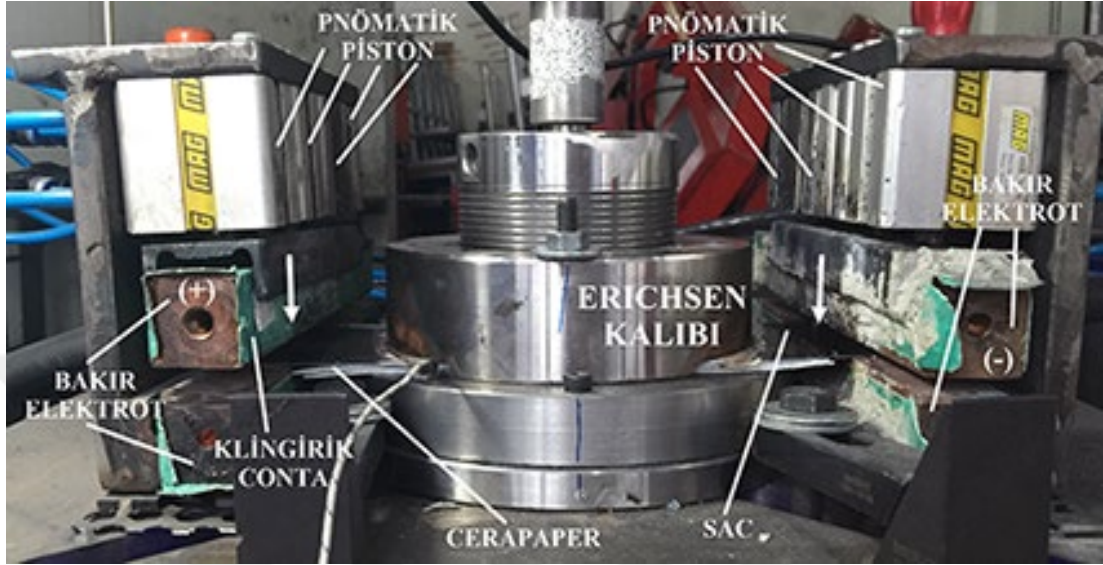
Şekillendirme deneylerinde elektrik kaynağı olarak, 380 V giriş gerilimi, 30 V çıkış gerilimi ve maksimum 3000 A çıkış akım değerine sahip elektrik trafosu kullanılmıştır. Kullanılan trafo, manual kontrollü olup, üzerinde gerilim ve akım değerlerinin ayarlandığı kademe butonları yer almaktadır. Gerilim ve akım değerleri 5 kademe ayarlanabilmektedir. Elektrik trafosunun soğutulması yağ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrik akımının trafonun artı (+) ve eksi (-) uçlarından bağlanan çok damarlı bakır kablolar ile elektrot sistemine iletimi sağlanmıştır. Şekil 3.27’de kullanılan elektrik trafosu gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Elektrik kaynağı trafo.

Elektrik ile ısıtma sisteminin ikinci aşaması, elde edilen elektrik akımının sac malzeme üzerinden homojen bir şekilde iletilmesi ve Erichsen Kap Testi düzeneğinin alt kalıbı üzerinde sac malzemenin sabit tutulmasıdır. Bu amaçla, Behrens ve Hübner [59]

tarafından tasarlanmış sistem referans alınarak, elektrot sisteminin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.28’de tasarlanıp üretimi yapılan elektrot sistemi ve elektrot sisteminin Erichsen Kap Testi düzeneğine adapte edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Elektrot sistemi ve Erichsen Kap Testi düzeneği.

Elektrot sistemi için, L profil ve lama demirlerden oluşan gövde tasarlanmıştır. Kullanılan lama ve profiller 5 mm kalınlıkta olup, St37 malzemeden üretilmiştir. Gövdeyi oluşturan parçalar kaynaklı ve sökülebilir bağlantılar ile birbirlerine sabitlenmiştir.

Elektrot sistemi, elektrikle ısıtma sisteminin önemli elemanlarından biridir. Elde edilen elektrik akımının, sac malzemeye en az kayıp ile iletilmesi ve sac malzeme üzerinde homojen bir akım dağılımının elde edilmesi gerekmektedir [3]. Bu nedenle, elektrot tutucu sistemde alt ve üst olarak çalışan (A-B çifti ve C-D çifti), 30 mm x 30 mm x 200 mm boyutlarında, içi dolu bakır elektrotlar kullanılmıştır. Bakır elektrotlardan, A ve C hareketli olup, aşağı yönde çalışmakta ve sac malzemeyi B ve D elektrotlarının üzerinde sıkıştırmaktadır. Trafodan gelen artı (+) kutup A elektrotuna, eksi (-) kutup C elektrotuna çok damarlı bakır kablolar ile bağlanmıştır.

Elektrot sisteminde, sac malzemenin, alt ve üst bakır elektrotlar arasında homojen bir baskı kuvveti ile sıkıştırılması gerekmektedir. Baskı kuvvetinin homojen olmadığı

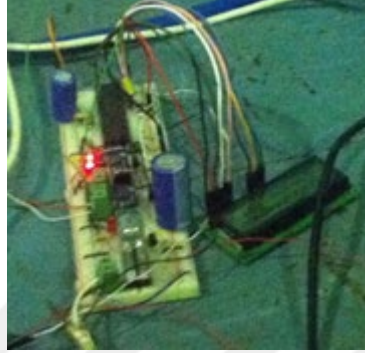
durumlarda sac üzerindeki sıcaklık dağılımı, homojen olmayan akım geçişinden kaynaklı bölgesel farklılıklar göstererek, sac malzemenin genişliğinin artmasıyla homojen sıcaklık dağılımının elde edilmesi daha da zorlaşacaktır [3, 10]. Bu nedenle, elektrot sistemi, tek noktalı baskı kuvveti kullanılan tasarımlar [60] yerine çok noktalı baskı yapabilen pnömatik silindirler kullanılarak tasarlanmıştır. Elektrot sisteminde, her iki tarafa 4 adet MAG marka ANS32x10 model pnömatik silindirler yerleştirilmiştir. Kullanılan pnömatik silindirler çift etkili olup, piston çapları 32 mm ve kurs boyları 10 mm'dir. Pnömatik silindirlerin emiş hatları ve dönüş hatları kendi arasında paralel bağlanarak, silindirlerin aynı anda açılması ve kapanması sağlanmıştır. Kompresörden gelen hava, emiş ve dönüş hatlarında T rakorlar kullanarak paylaştırılmıştır. Pnömatik silindirlerin uç kısımları, lama demirlerden oluşturulan U kanala vida ile bağlanmış ve bakır elektrotlar U kanalının içerisine sabitlenmiştir.

Pnömatik silindirler için gerekli olan basınçlı hava, çift pistonlu, maksimum 8 bar basınca sahip, 200 litrelik kompresör kullanılarak elde edilmiştir. Kompresörden elde edilen basınçlı hava, şartlandırıcı kullanılarak temizliği sağlanmış ve pnömatik silindirlere iletilmiştir.

Pnömatik silindirlerin aynı anda açılıp kapanması ve kompresörden gelen basınçlı havanın silindirlerin emiş ve dönüş hatlarına paylaştırılması için elektrot sisteminin sağ ve sol tarafı için birer tane olmak üzere toplam 2 adet selenoid 5/2 yön kontrol valfi kullanılmıştır. Yön kontrol valfi selenoid uyarılı olduğu için elektrik sinyali ile anlık olarak açılıp kapanmaktadır. Selenoid valflerin giriş kısmında, pnömatik silindirlerin çalışma basıncını ayarlamak için gliserinli manometre kullanılmış ve pnömatik silindirlerin 2 bar basınçlı hava ile çalışması sağlanmıştır.

Elektrot sistemindeki pistonların eş zamanlı hareketi, elektrot sisteminin sacı kilitlemesinden sonra ısıtma işleminin başlaması ve ısıtma süresinin ayarlanması için PIC devresi kullanılmıştır. PIC devresinde, elektrot sisteminin pnömatik pistonlarının hareketi, trafoda hazır bulunan akımın serbest bırakılması, ısıtma süresini belirleme işlemleri ayarlanabilmektedir. İlk adımda, PIC devresinden selenoid valflere sinyal gönderilmekte ve pistonların aşağı hareketi ile sac malzeme bakır elektrotlar arasına

sıkıştırılmaktadır. İkinci adımda, elektrik trafosunun bağlı olduğu röleden sinyal gönderilmekte ve trafodan gelen akımla sac malzemenin sıcaklığı zamanla artış göstermekte ve istenilen sıcaklığa sac malzemenin ulaşmasından sonra şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Şekil 3.29’da kullanılan PIC devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.29. PIC devresi.

Isıtma işleminde kullanılan elektrik kaynağı maksimum 3000 A elektrik akımı üretebilmektedir. Metal sacların elektrik akımı ile ısıtılmasında süre ve akım parametreleri önemlidir. Denklem 3.2’de sac malzeme boyutları ve sıcaklık arasındaki ilişki gösterilmiştir.

$$T = R \left(\frac{I_a}{wt} \right)^2 \frac{\tau}{c_a \rho} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de, T malzeme sıcaklığını, R malzemenin direncini, I_a istenilen sıcaklığa ulaşmak için gerekli olan akımı, w malzeme genişliğini, t malzeme kalınlığını, τ istenilen sıcaklık için gerekli olan süreyi, c_a malzemenin özgül ısısını, ρ ise malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem 3.2’den anlaşılacağı üzere, sıcaklık parametresi, malzemenin genişliği ve kalınlığı ile ters orantılıdır. Isıtılacak malzemenin geometrik boyutlarının arttırılmasıyla, istenilen sıcaklığa ulaşabilmek için daha fazla süre veya akım kullanmak gerekmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan elektrik kaynağı maksimum 3000 A elektrik akımı üretebilmektedir. Daha yüksek akım değerlerine ulaşamadığı için, istenilen sıcaklıklara ulaşmak için elektrik akımı verme süresi uzun tutulmuştur.

Sıcaklık Ölçümü

Deney malzemesinin, elektrik akımı ile ısıtılması işleminde, istenilen sıcaklık değerinin kontrolü için bilgisayar bağlantılı çift kanallı Verth marka CA202L model veri toplama kartı kullanılmıştır. Kullanılan data logger da çift kanal girişi olup, bu kanallara K tipi termokupl bağlanmıştır. Veri toplama kartının sıcaklık çözünürlüğü 0,1 °C ve sıcaklık ölçüm aralığı -200 °C-1372 °C'dir. Bilgisayar bağlantısı olan data logger ile anlık olarak sıcaklık değişimleri gözlemlenmiş ve bilgisayar ortamına bu sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Zımbanın sac malzemeye temasına engel olmaması için, termokupl uçları mümkün olduğunca numunenin merkezine yakın noktalara yerleştirilmiştir. Böylece, malzeme üzerinde taşınımından dolayı ısınan en son nokta olan merkez bölgenin istenilen sıcaklık değerine ulaşip ulaşmadığı kontrol edilebilmiştir. Şekil 3.30'da kullanılan data logger gösterilmiştir.

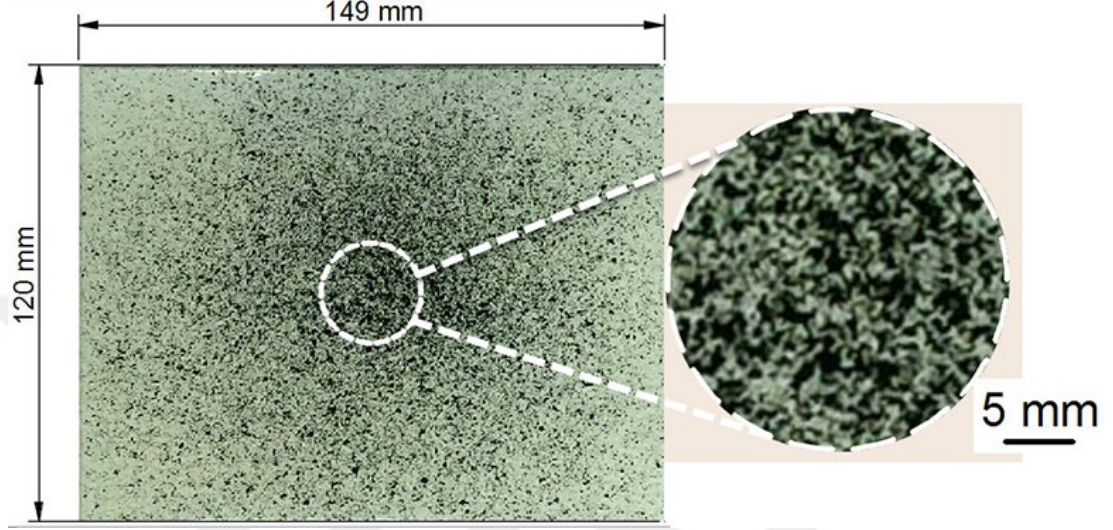


Şekil 3.30. Verth CA202L data logger.

Numunelerin Hazırlanması

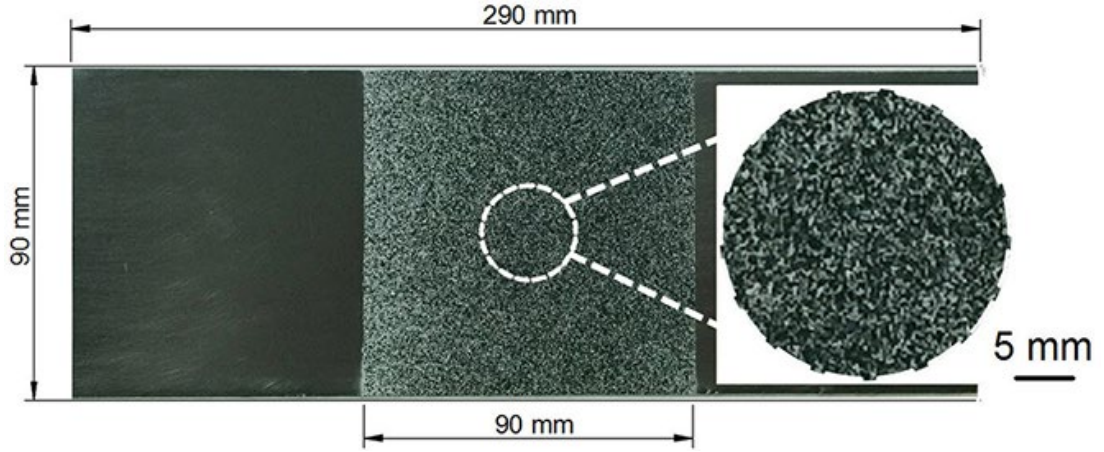
Tasarlanan ve üretimi yapılan Erichsen Kap Test sisteminde oda sıcaklığında şekillendirme ve yüksek sıcaklıkta şekillendirme olmak üzere iki farklı şekillendirme deneyleri yapılabilmektedir. Oda sıcaklığındaki şekillendirme deneyleri, Ck75 sac

malzeme için 0,4 mm, 0,5 mm ve 0,6 mm kalınlıklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığı şekillendirme deneylerinde 149 mm x 120 mm ebatlarında numuneler kullanılmıştır. Şekil 3.31’de oda sıcaklığında yapılan şekillendirme deneyleri için kullanılan numune boyutları gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Erichsen Kap Testi için oda sıcaklığı şekillendirme deneylerinde kullanılan numune boyutları.

Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneyleri Ck75 malzeme için 0,4 mm, 0,5 mm ve 0,6 mm kalınlıklarda ve 22MnB5 malzeme için 1,25 mm kalınlık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık şekillendirme deneylerindeki numuneler 90 mm x 290 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Sac malzemelerin elektrot tutuculara sabitlenerek ısıtılabilmesi için boyları uzun tutulmuştur. Ayrıca, sadece zımbanın deforme edeceği orta noktadan ölçüm yapılacağı için numune üzerinde 90 mm x90 mm ebatlarında kare bir alan oluşturulmuş ve sadece bu alana boya işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.32’de yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneyleri için kullanılan numune boyutları gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Erichsen Kap Testi için yüksek sıcaklıktaki şekillendirme deneylerinde kullanılan örnek numune.

Kamera

DİK yöntemi ile ölçülen yer değiştirme sonuçlarının doğruluğuna ölçme sisteminin, ışıklandırmanın ve noktacık deseninin etkisi vardır. Ölçümleme sisteminin doğruluğunu belirleyen üç ana ayırt edici özellik bulunmaktadır: Lens, kamera ve korelasyon yazılımıdır [19]. Erichsen Kap Testleri için son kullanıcının kolaylıkla bulabildiği, kullanımı kolay iki adet Nikon marka D90 model yüksek çözünürlüklü DSLR kamera kullanılmıştır. Kullanılan kameranın çözünürlüğü 1920x1080 ve saniyedeki görüntü sayısı 30'dur. Nikon D90 kamera Şekil 3.33'te, kameraya ait teknik özellikler ise Çizelge 3.8'de gösterilmiştir. Kamera ile beraber 18-105 mm (f/3,5-5,6) makro lens kullanılmıştır.



Şekil 3.33. Nikon marka D90 model dijital kamera [61].

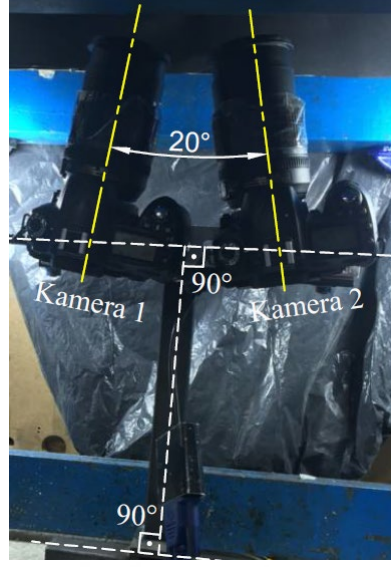
Çizelge 3.8. Nikon D90 dijital kameranın özellikleri [61-63].

Özellik		Değer
Etkili Megapiksel	(Megapiksel)	12.30
Sensör Çözünürlüğü	(Piksel)	4281x2873
Sensör Boyutu	(mm)	23,6x15,8
Sensör Görüntü Oranı	-	3:2
Piksel Adımı	(μ m)	5,51
Piksel Yoğunluğu	(MP/cm ²)	3,29

Kullanılan hidrolik pres, aşağı yönlü çalıştığı için, pres tablasına kameraların görüş açısını bozmayacak çapta delik açılmış ve net bir görüntünün elde edilmesi sağlanmıştır. Kullanılan kameralar, 35 mm x 35 mm x 300 mm ve 30 mm x 30 mm x 200 mm boylarında sigma profillerden ve köşe bağlantı aparatlarından oluşturulan kamera taşıyıcı üzerine sökülebilir bağlantı elemanları ile sabitlenmiştir. Kameraların görüş alanı, pres tablasının altından, Erichsen Kap Testi kalıbının alt tablasındaki delikten test numunesini görecektir şekilde konumlandırılmıştır.

DİK yönteminde kameraların konumlanma açıları önemli bir noktadır. Kameralar birbirine ve test numunesine simetrik konumda yer almalı ve kameraların görüş açısı, numune üzerinden ölçüm yapılacak bölgeyi tam olarak kapsamalıdır. Bu sayede, kamera lensi ile yakınlaştırma yapıldığında, netleme, odak noktası ve yakınlaştırma seviyesi sabit kalacaktır. Kameralar arasındaki konum açısı çok kritik olmamakla birlikte, 8 mm ve 12 mm kısa lensler için en az 25°, 35 mm orta lensler için en az 20° ve 70 mm gibi uzun lensler için 15° olmalıdır. Genel olarak bu açı, toplamda yaklaşık 60°nin altında tutulmalıdır [64].

Kullanılan kameralar, Erichsen Kap Testi düzeneğinin altında yer alan, malzemenin iki ekseninde gerdirilerek yırtılmanın gerçekleşeceği D_s çapının olduğu noktaya odaklanmıştır. Kameralar arasındaki açı 20° olarak sabitlenmiştir. Şekil 3.34'te kameraların konumlandırılmış hali ve aralarındaki açı gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Kamera yerleşimi.

Chapter (Next) Section 1

ion (Ne

BÖLÜM 4

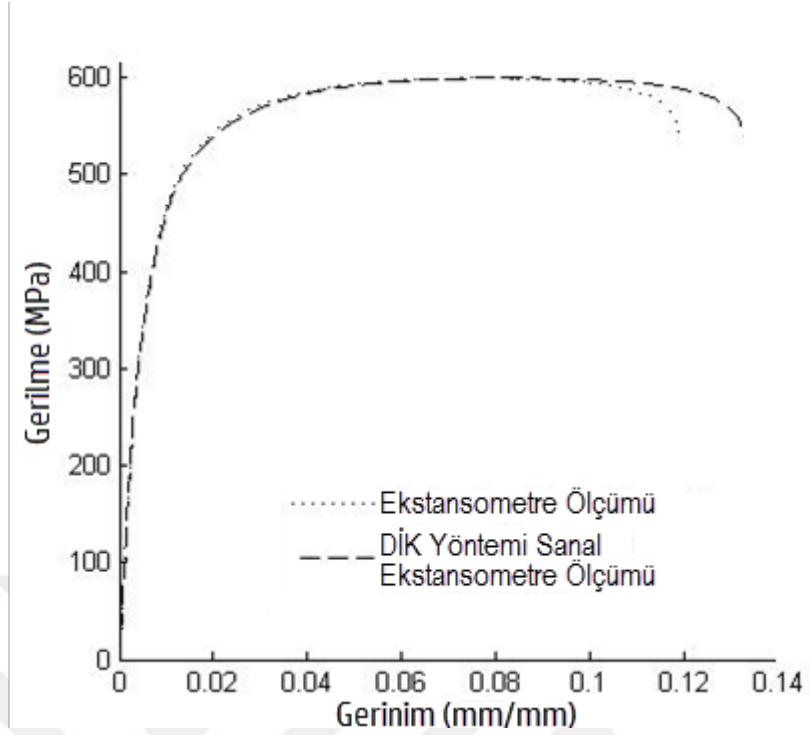
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, 2B DİK yönteminin uygulandığı oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki tek eksen çekme testi, 3B DİK yönteminin uygulandığı oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki Erichsen Kap Testi ile yapılan şekillendirme deneylerinin sonuçları verilmiştir. Kullanılan farklı sac malzemeler, kalınlıklar ve farklı sıcaklıklar altında yapılan şekillendirme deneyleri sonuçları kendi aralarında ilişkilendirilerek irdelenmiştir.

4.1. TEK EKSEN ÇEKME TESTİ

4.1.1. Oda Sıcaklığı Tek Eksen Çekme Testi

Tek eksen çekme testlerinde, kurulan 2B DİK sisteminin doğruluk ve güvenilirliğini tespit etmek amacıyla, malzemenin kalitesi ve türüne bakılmaksızın orta karbonlu çelik sac malzeme kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde çekme numunesi üzerine ekstansometre bağlanarak 2B DİK yöntemi ve fiziksel ölçüm aleti karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1’de oda sıcaklığında yapılan tek eksen çekme testinde ekstansometre ve 2B DİK yöntemi ile elde edilen mühendislik gerilme-gerinim eğrileri gösterilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan tek eksen çekme testlerinin 2B DİK ölçümlerinde 29x29 piksel altküme piksel grubu tanımlanmış ve 5x5 piksel adım kullanılmıştır.

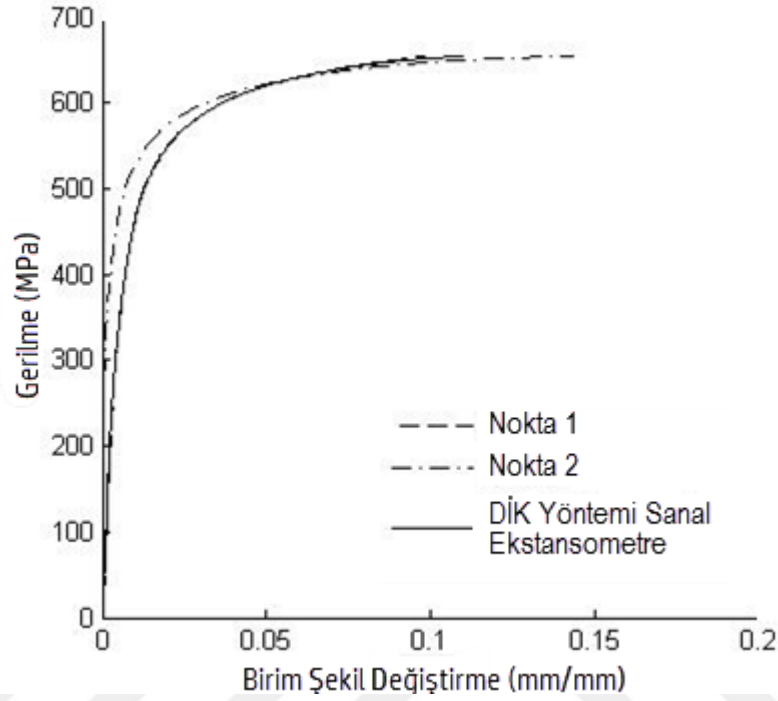


Şekil 4.1. 2B DİK yöntemi ile ekstansometre ölçümünün karşılaştırılması.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, deney malzemesine ait çekme dayanımı 590 MPa olarak belirlenmiştir. Deney malzemesinin koptuğu anda maksimum gerinim, ekstansometre ölçümüyle kullanılarak ölçüldüğünde 0,120 olarak belirlenmiştir. 2B DİK yöntemi ile sanal ekstansometre tanımlandığında aynı numunenin koptuğu andaki maksimum gerinimi 0,135 olarak ölçülmüştür. İki yönteme ait gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırıldığında maksimum gerinim değerleri arasında 0,015 fark olduğu görülmektedir. İki ölçüm yöntemi arasındaki bu fark, 2B DİK yönteminin malzemenin boyun verme noktasından sonraki alanda daha fazla uzama olduğunu belirleyebilmesi, ekstansometrenin ise çekme testinde ortalama değerler vermesinden kaynaklanmaktadır. 2B DİK yöntemini, ekstansometre ölçüm yöntemi ile karşılaştırılmasında uyumlu ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Oda sıcaklığında yapılan tek eksen çekme testinde homojen şekil değişimi ve lokal şekil değişiminin karşılaştırılması için, malzemenin kırılma bölgesi üzerinde iki nokta seçilmiş ve seçilen bu noktaların boyun verme noktasına kadar olan gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri, sanal ekstansometre ile elde edilen gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2’de seçilen noktaların ve

2B DİK sanal ekstansometre ile ölçülen gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. 2B DİK yöntemi sanal ekstansometre ölçümü ve seçilen noktaların gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

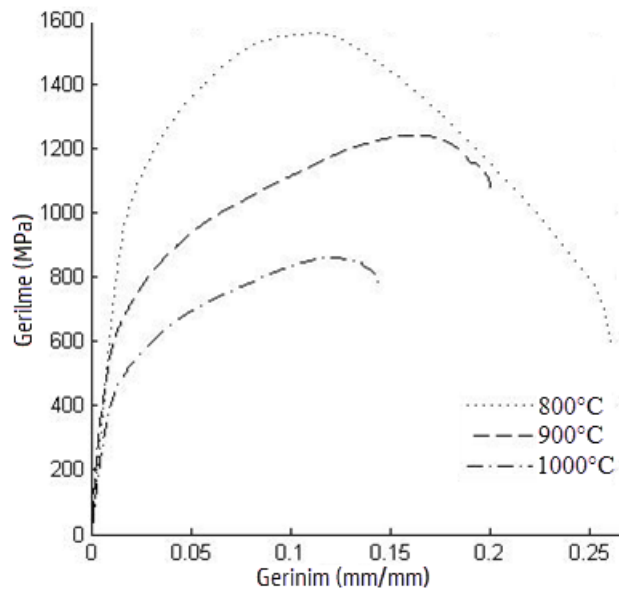
Şekil 4.2 incelendiğinde, ekstansometre ile ölçülen gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde maksimum birim şekil değiştirmenin yaklaşık 0,11 olduğu görülmektedir. Diğer yandan, seçilen noktalara bakıldığında Nokta 2'nin gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisindeki maksimum birim şekil değişimi 0,14375 olarak belirlenmiştir. Buradan ekstansometre ölçümünün daha düşük değer vermesinden dolayı, malzeme davranışı üzerinde ortalama bir değer verdiği görülmektedir. Ancak malzemenin koptuğu hat üzerindeki noktalar incelendiğinde, merkez noktaya daha yakın olan Nokta 2'nin, gerçek birim şekil değişiminin daha fazla olduğu, lokal deformasyonun, toplam deformasyondan daha yüksek olduğu görülmektedir.

4.1.2. Yüksek Sıcaklık Altında Tek Eksen Çekme Testi

Oda sıcaklığında yapılan tek eksen çekme testinde, 2B DİK yöntemi ve fiziksel ekstansometre ölçümlerinin uyumlu sonuçlar verdiği görüldüğü için, yüksek sıcaklıktaki tek eksen çekme deneylerinde sadece 2B DİK yöntemi uygulanmış, fiziksel ölçüm aracı laboratuvar olanakları nedeniyle kullanılmamıştır. Yüksek sıcaklık altındaki tek eksen çekme testlerinde 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda, sabit 0,2 mm/s çekme hızı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve oda sıcaklığı deneylerinde olduğu gibi sanal ekstansometre kullanılmıştır. Oda sıcaklığı testlerinde olduğu gibi çözünürlük ve saniyedeki kare sayısı değeri aynı kullanılmıştır. Sıcaklık ve deformasyon faktörü aynı anda gerçekleştiğinden boyaların kontrastındaki azalma, daha büyük altküme piksel grubunun kullanımı gerekmektedir. Bu durumda, yüksek sıcaklık altındaki tek eksen çekme testlerinde, 41x41 piksel altküme piksel grubu ve 5x5 piksel adım kullanılmıştır.

4.1.2.1. DP980

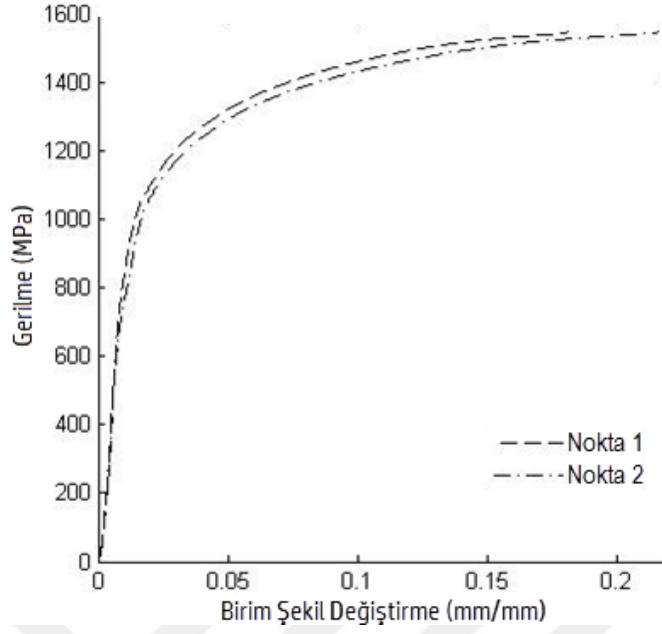
DP980 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki gerilme-gerinim eğrilerinin 2B DİK yöntemi ile ölçümleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



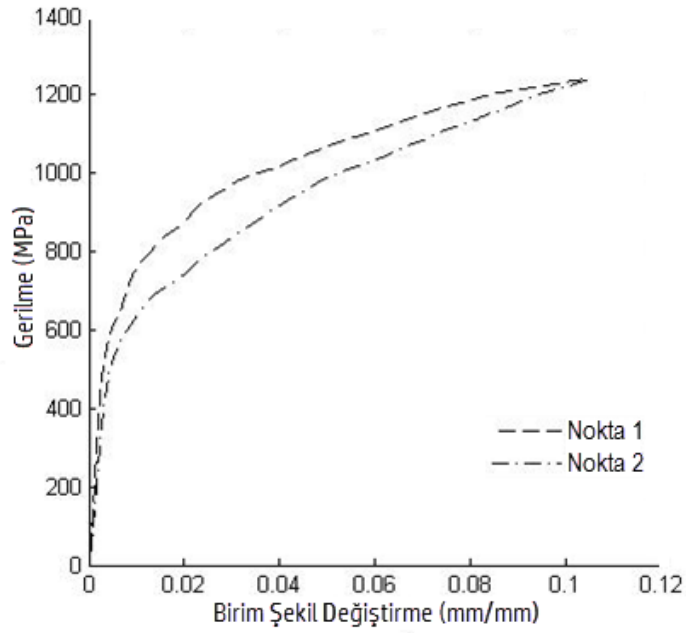
Şekil 4.3. DP980 malzemenin farklı sıcaklıklar altındaki gerilme gerinim eğrileri.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, DP980 sac malzemenin yüksek sıcaklıktaki tek eksen çekme testinde çekme dayanımları sırasıyla, 800 °C sıcaklık için 1560 MPa, 900 °C sıcaklık için 1240 MPa ve 1000 °C sıcaklık için 860 MPa olarak ölçülmüştür. Diğer yandan, gerinim değerleri sırasıyla, 800 °C sıcaklık için 0,26, 900 °C sıcaklık için 0,20 ve 1000 °C sıcaklık için 0,14 olarak belirlenmiştir. Bu değerler incelendiğinde, tek eksen çekme testinde sıcaklık artışı ile maksimum kuvvet değerinin azaldığı, çekme dayanımının da paralel olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca, gerinim değerleri incelendiğinde, DP980 sac malzemenin sıcaklık artışına karşı duyarlı olduğu görülmektedir. 800 °C sıcaklıkta malzemenin mikro yapısında dinamik toparlanmanın meydana geldiği ve sıcaklığın 1000 °C sıcaklığa arttırılmasıyla dinamik toparlanma meydana gelemeden koptuğu anlaşılmaktadır. Diğer yandan, tek eksen çekme testindeki sıcaklık artışı ile gerinim değerinin azalmasında mikro yapı kusurları ve alaşım elementlerinin etkisinde bulunmaktadır.

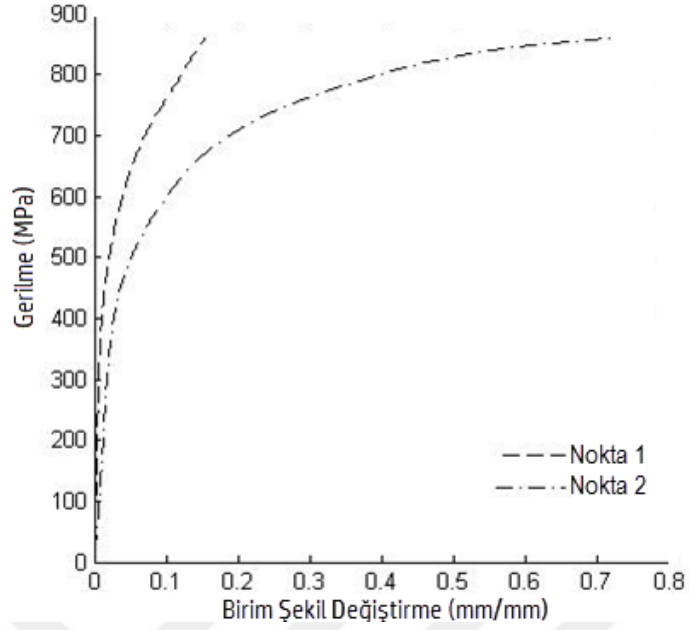
Oda sıcaklığı testlerinde olduğu gibi, malzemenin kırılma noktası üzerinde iki farklı nokta seçilerek bölgesel şekil değişimi bütün sıcaklıklar için belirlenmiştir. Sıcak çekme testlerinde, numunenin koptuğu alan üzerinde çok fazla renk değişimi ve bozulma olduğu için tam olarak kırılma hattı üzerinden noktalar seçilememiştir ve kırılmaya en yakın, renk değişimi sabit kalan bölgeden noktalar seçilmiştir. Bütün sıcaklıklar için Nokta 2 numunenin orta noktasındaki kırılma hattına en yakın nokta olarak seçilmiştir. Şekil 4.4'te DP980 malzemenin 800 °C sıcaklıktaki, Şekil 4.5'te 900 °C sıcaklıktaki ve Şekil 4.6'da 1000 °C sıcaklıktaki seçilen noktaların gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. DP980 malzemenin 800 °C sıcaklıktaki bölgesel gerçek gerilme-birim şekil değişirme eğrileri.



Şekil 4.5. DP980 malzemenin 900 °C sıcaklıktaki bölgesel gerçek gerilme-birim şekil değişirme eğrileri.



Şekil 4.6. DP980 malzemenin 1000 °C sıcaklıktaki bölgesel gerçek gerilme-birim şekil değişirme eğrileri.

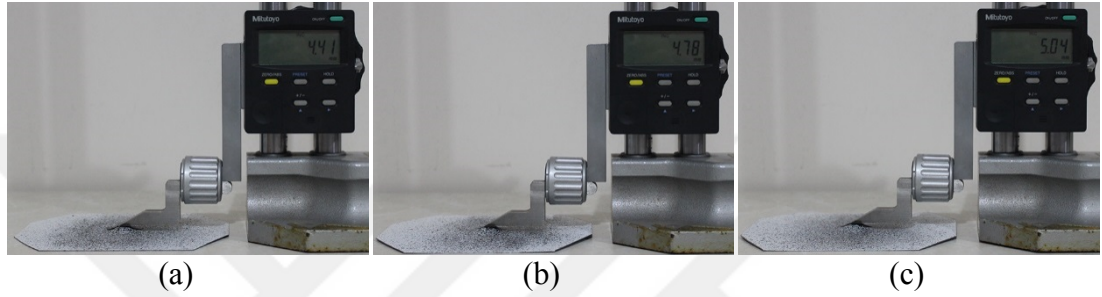
Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde, kırılma hattına yakın nokta olan Nokta 2'nin birim şekil değişirme değerinin 800 °C sıcaklıkta 0,25 iken 1000 °C sıcaklıkta 0,75 arttığı görülmüştür. Buradan, sac malzemenin östenit sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa çıkması durumunda, bölgesel birim şekil değişirme değerinin önemli derece arttığı görülmektedir. Ayrıca, kırılma hattına ve numunenin merkez noktasına yakın olan Nokta 2'nin gerilme değeri, her zaman merkez dışındaki değerlere göre homojen olmayan deformasyondan dolayı daha düşüktür.

4.2. ERICHSEN KAP TESTİ

4.2.1. Oda Sıcaklığı Erichsen Kap Testi

Tasarımı yapılan ve kurulan 3B DİK ölçüm sisteminin doğruluğunu test etmek ve sistemin çalışabilirliğini belirlemek için 0,40 mm, 0,50 mm ve 0,60 mm kalınlıklarda Ck75 sac malzeme kullanılarak oda sıcaklığında şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Oda sıcaklığındaki şekillendirme deneylerinde, yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği 3B DİK yöntemi ve 0,01 mm hassasiyetli dijital mihengir ile ölçülmüştür. Maksimum kuvvet değerleri de yük hücresi ile ölçülerek kaydedilmiştir. Oda sıcaklığı şekillendirme deneyleri, bütün kalınlıklar için üçer defa tekrarlanmıştır. Şekil 4.7 (a), (b) ve (c)'de farklı kalınlıklardaki Ck75 sac malzemenin yırtılma sonrasındaki yükseklik ölçümü yapılan örnek numuneler gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de ise 3B DİK yöntemi ve dijital mihengir ile ölçülen kap yüksekliği ölçümleri verilmiştir.



Şekil 4.7. Ck 75 sac malzemenin oda sıcaklığında yapılan deneylerine ait dijital mihengir kap yüksekliği ölçüm örnekleri. a) 0,40 mm kalınlık Numune No.1, b) 0,50 mm kalınlık Numune No.2, c) 0,60 mm kalınlık Numune No.3

Çizelge 4.1. Ck 75 sac malzemenin oda sıcaklığı şekillendirmelerinde yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği ölçümleri.

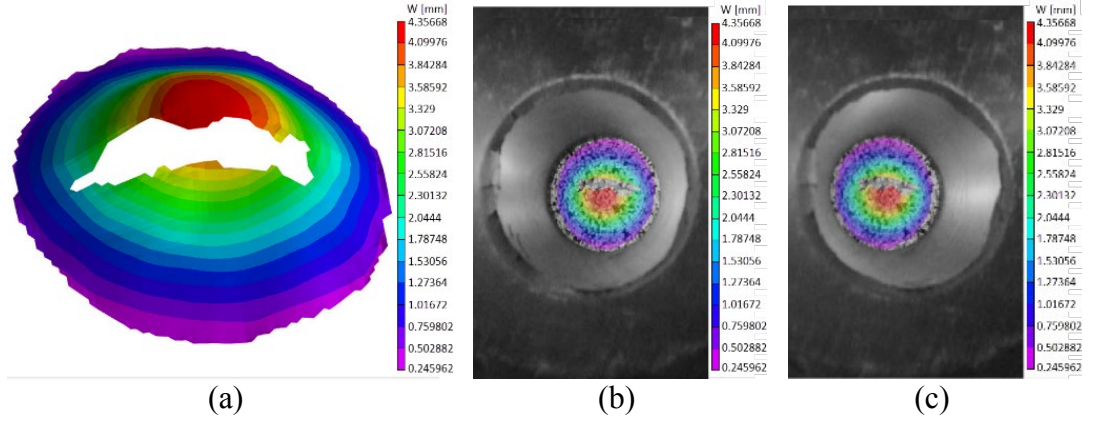
Kalınlık (mm)	Numune	Mihengir Ölçümü (mm)	DİK Yükseklik Ölçümü (mm)	DİK Ortalama Yükseklik (mm)
0,40	No.1	4,41	4,35668	4,35491
	No.2	4,41	4,35303	
	No.3	4,41	4,35503	
0,50	No.1	4,78	4,72719	4,72607
	No.2	4,78	4,72406	
	No.3	4,78	4,72697	
0,60	No.1	5,04	4,98543	4,98618
	No.2	5,04	4,98808	
	No.3	5,04	4,98503	

Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği dijital mihengir ile sırasıyla 0,4 mm kalınlık için 4,41 mm, 0,5 mm kalınlık için 4,78 mm ve 0,6 mm

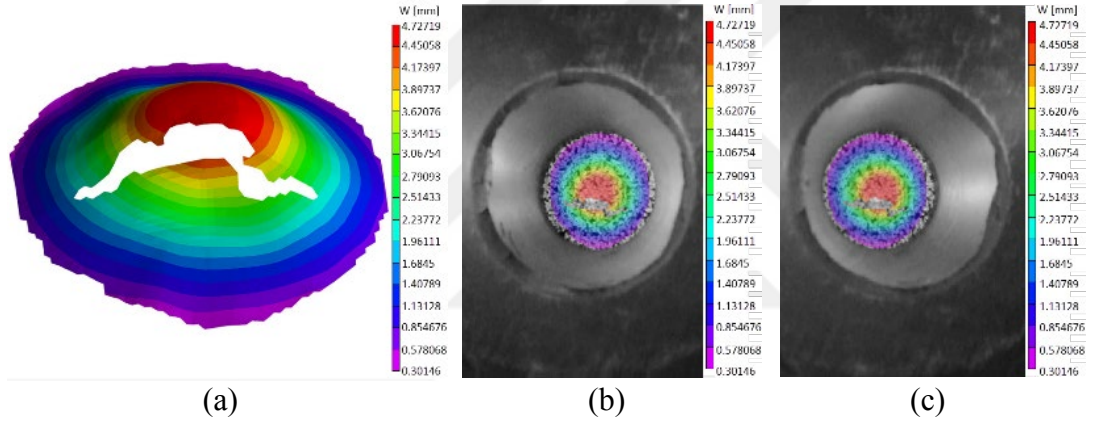
kalınlık için 5,04 mm olarak ölçülmüştür. 3B DİK yöntemi ile ölçülen kap yüksekliği 0,4 mm kalınlık için 4,353 mm ile 4,356 mm arasında değişirken, 0,5 mm kalınlık için kap yüksekliği 4,724 mm ile 4,727 mm arasında, 0,6 mm kalınlık için ise 4,985 mm ile 4,988 mm arasında değişmektedir. Sac malzemelerin Erichsen Kap Testi kullanılarak belirlenen indeks sayısı, tekrarlı yapılan deneylerden kap yüksekliklerinin ölçümü ve bu değerlerin ortalaması alınarak belirlenmektedir. Buna bağlı olarak, ortalama kap yüksekliği (Erichsen indeks sayısı), 3B DİK yöntemi ile yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak, 0,4 mm kalınlık için 4,35491 mm, 0,5 mm kalınlık için 4,72607 mm ve 0,6 mm kalınlık için 4,98618 mm olarak hesaplanmıştır. 3B DİK yöntemi ve dijital mihengir ile ölçülen değerler incelendiğinde, yırtılma sonrasındaki kap yükseklik değerlerinin (Erichsen indeks sayısı) sac malzemenin kalınlığının artmasıyla artış gösterdiği görülmektedir. 3B DİK yöntemi ve dijital mihengir ölçümleri karşılaştırıldığında ikisi arasındaki ölçüm farklılığının 0,05192 mm ile 0,05697 mm arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

Farklı sac malzeme kalınlıkları için 3B DİK yöntemi ile elde edilen ölçüm sonuçları, her iki kamera görüntüsünde, kap yüksekliğinin 3B modeli ve kameralardan alınan gerçek görüntüleri Şekil 4.8-4.10 arasında gösterilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi her numuneye ait resimde 3B kap yüksekliği, sacın yırtılma anındaki kap yüksekliğinin birinci ve ikinci kameradaki görüntülerini içermektedir. Resimlerin sağ tarafında verilen renk paleti ise, yırtılma anındaki kap yüksekliği değerinin (W) mm cinsinden ölçeklemesini içermektedir.

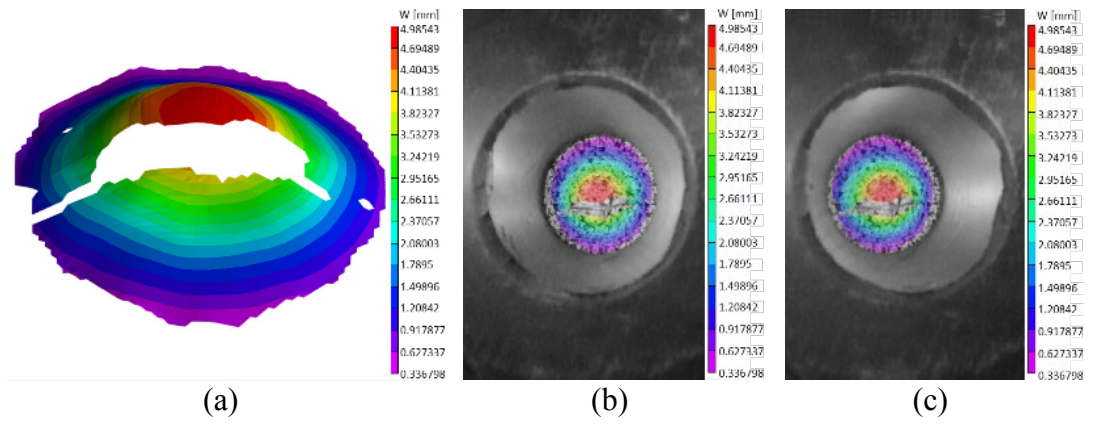
Şekil 4.8'de görüldüğü gibi 0,40 mm kalınlık için yırtılma anındaki kap yüksekliği 4,35668 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.8 (a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi en yüksek kap yüksekliği değeri, zımba ucunun tepe noktası olan kırmızı bölgede yer almaktadır. Sac malzemedede en düşük yer değiştirme değeri ise 0,245962 mm olarak, alt kalıp temas bölgesinde meydana gelmekte ve bu bölge mor renk ile gösterilmektedir. Sac malzemenin şekillendirme limiti aşıldığında yırtılma meydana geldiği için altküme piksel grubunun kontrastı kaybolmakta ve kontrastı kaybolan kötü korelasyonlu bölgeler, yırtılma hattı üzerinden kaldırılmaktadır. Bu alanlar, 3B kap yüksekliğinde renksiz bölge, birinci ve ikinci kamera görüntülerinde ise gri alanlar olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Ck75 sac malzemenin 0,40 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylerden Numune No.1'e ait yırtılma anındaki kap yüksekliğinin 3B DİK ölçümü. a) 3B kap yüksekliği, b) kamera 1, c) kamera 2.



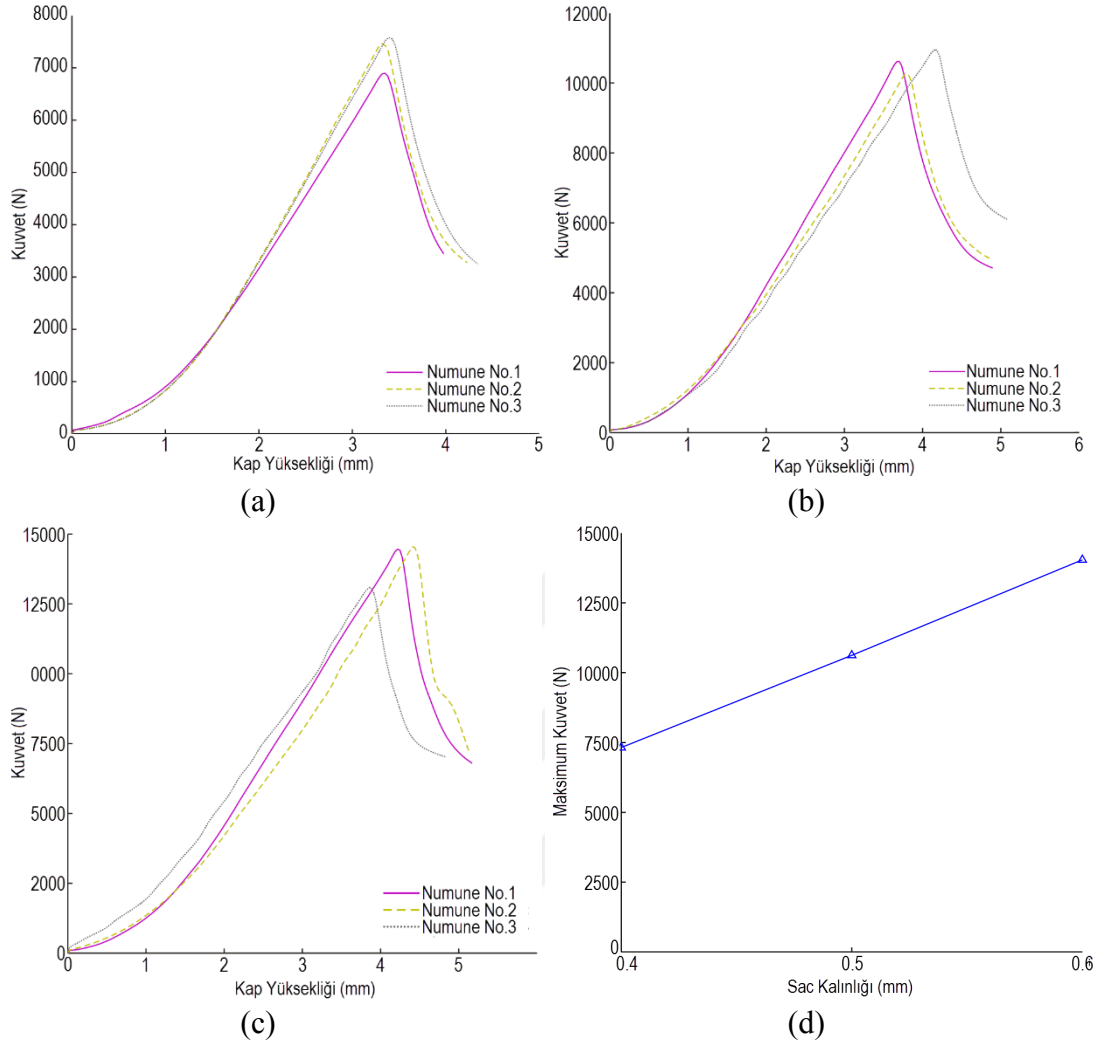
Şekil 4.9. Ck75 sac malzemenin 0,50 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylerden Numune No.1'e ait yırtılma anındaki kap yüksekliğinin 3B DİK ölçümü. a) 3B kap yüksekliği, b) kamera 1, c) kamera 2.



Şekil 4.10. Ck75 sac malzemenin 0,60 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylerden Numune No.1'e ait yırtılma anındaki kap yüksekliğinin 3B DİK ölçümü. a) 3B kap yüksekliği, b) kamera 1, c) kamera 2.

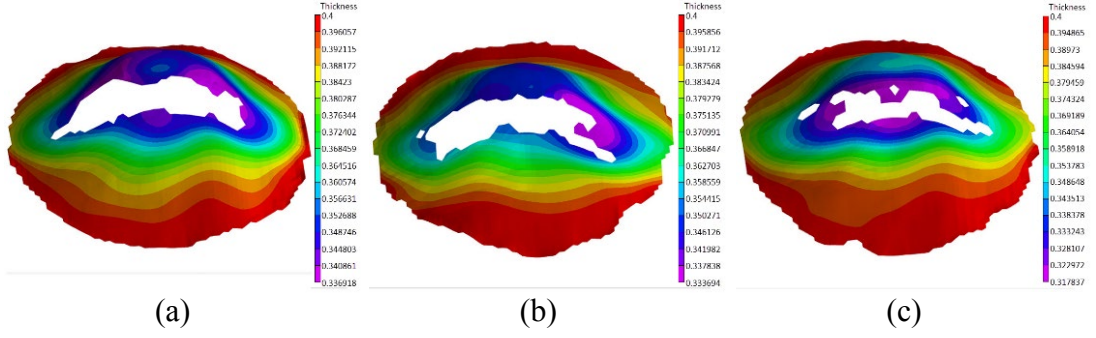
Sac malzeme kalınlığı 0,50 mm'ye arttırıldığında, yırtılma anındaki kap yüksekliği 4,72719 mm olarak ölçülmüş ve en düşük yer değiştirme 0,30146 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.9). Diğer yandan, sac kalınlığı 0,6 mm için, yırtılma anındaki kap yüksekliği 4,98543 mm olarak bütün şekillendirme deneylerinde en yüksek değer olarak belirlenmiş, en düşük yer değiştirme ise 0,336798 mm olarak alt kalıp temas noktası olarak bulunmuştur (Şekil 4.10). Elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde, yırtılma anındaki kap yüksekliğinin ve buna bağlı olarak şekillenme limitinin, sac malzeme kalınlığının 0,4 mm'den 0,6 mm'ye arttırılmasıyla arttığı görülmüştür.

Yük hücresi ile kayıt edilen kuvvet değerleri Şekil 4.11 (a)-(c)'de kap yüksekliğine bağlı olarak bütün kalınlıklardaki (0,40 mm, 0,50 mm, 0,60 mm) bütün numuneler (No.1, No.2, No.3) için gösterilmiştir. Şekil 4.11 (a) incelendiğinde, en yüksek kuvvet değerleri 0,40 mm sac kalınlığı Numune No.1 için 6914,9 N, Numune No.2 için 7466,2 N ve Numune No.3 için 7578,3 N olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığı 0,50 mm'ye arttırıldığında, en yüksek kuvvet değerleri, Numune No.1 için 10633,0 N, Numune No.2 için 10272,0 N ve Numune No.3 için 10966,0 N olarak belirlenmiştir (Şekil 4.11 (b)). En yüksek sac kalınlığı olan 0,60 mm için en yüksek kuvvet değerleri, Numune No.1 için 14459,0 N, Numune No.2 için 14566,0 N ve Numune No.3 için 13100,0 N olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.11 (c)). Kuvvet değerleri incelendiğinde, yırtılma anındaki kap yüksekliği ve en yüksek kuvvet değerlerinin, sac kalınlığının artmasıyla arttığı görülmüştür (Şekil 4.11 (d)).

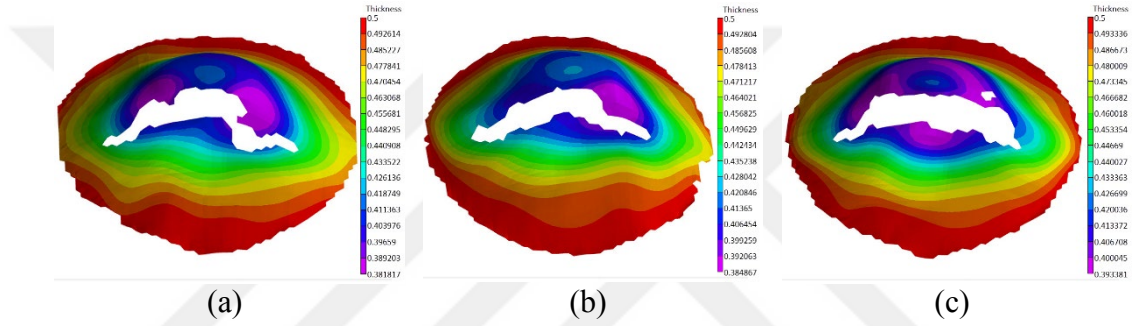


Şekil 4.11. Ck75 sac malzemenin farklı kalınlıklar için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kuvvet eğrileri. a) 0,40 mm kalınlık için, b) 0,50 mm kalınlık için, c) 0,60 mm kalınlık için, d) ortalama maksimum kuvvet-sac kalınlığı eğrisi

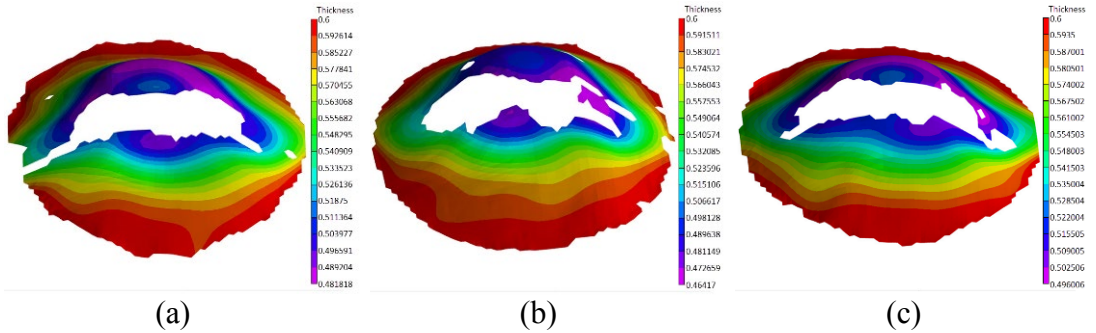
3B DİK yöntemi ile yer değiştirme değerlerinin ölçümleri ile beraber sac malzemenin kalınlık dağılımının ölçülmesi de mümkündür. Şekil 4.12-4.14 arasında sac malzemelerin yırtılma sonrasındaki kalınlık dağılımları bütün kalınlıklardaki bütün numuneler için gösterilmiştir. Kalınlık dağılımlarında kırmızı renk ile gösterilen bölgeler, sac malzemenin başlangıçtaki kalınlık değerini göstermektedir. Şekillendirme işlemi boyunca, zımbanın sac malzemeyi gerdirmesinden dolayı kalınlık değeri azalmakta ve kalınlığın en küçük olduğu bölgeler şekiller üzerinde mor ile gösterilen bölgelerdir.



Şekil 4.12. Ck75 sac malzemenin 0,40 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kalınlık dağılımı. a) Numune No.1, b) Numune No.2, c) Numune No.3



Şekil 4.13. Ck75 sac malzemenin 0,50 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kalınlık dağılımı. a) Numune No.1, b) Numune No.2, c) Numune No.3.



Şekil 4.14. Ck75 sac malzemenin 0,60 mm kalınlığı için oda sıcaklığında yapılan deneylere ait kalınlık dağılımı. a) Numune No.1, b) Numune No.2, c) Numune No.3.

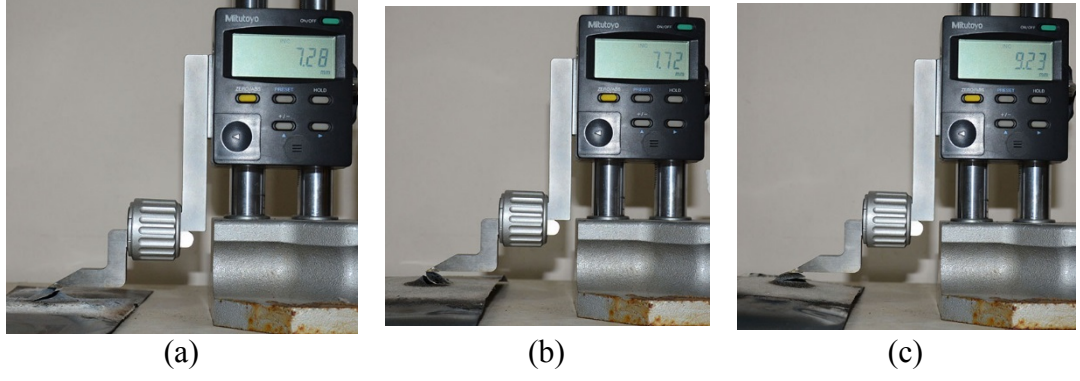
Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, kalınlıktaki en fazla incelme zımba ucunda, yırtılmanın meydana geldiği mor bölgede görülmektedir. Şekil 4.12'de 0,40 mm sac kalınlığı için Numune No.1 için en düşük kalınlık 0,336918 mm, No.2

için 0,333694 mm ve Numune No.3 için 0,317837 mm olarak ölçülmüştür. Diğer yandan 0,50 mm sac kalınlığı incelediğinde, Numune No.1 için 0,381817 mm, Numune No.2 için 0,384867 mm ve Numune No.3 için 0,393380 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.13). Bu ölçümlere ek olarak, 0,60 mm sac malzeme kalınlığındaki Numune No.1 için 0,481818 mm, Numune No.2 için 0,46417 mm ve Numune No.3 için 0,496006 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.14). Sonuç olarak, yırtılma sonrasındaki en düşük kalınlık değerinin sac malzemenin kalınlığının artmasıyla arttığı görülmüş ve bütün numunelerde en düşük incelleme yırtılma hattının üzerinde meydana gelmiştir.

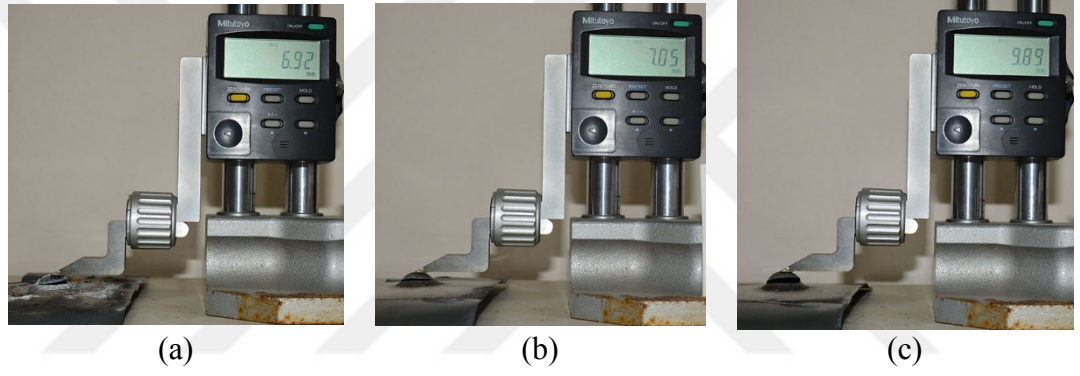
4.2.2. Yüksek Sıcaklıkta Erichsen Kap Testi

Oda sıcaklığı testlerinin ardından, yüksek sıcaklıkta Erichsen Kap Testi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık deneyleri Ck75 ve 22MnB5 sac malzeme için 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklar altında, sac malzemelerde ilk yırtılma meydana gelene kadar uygulanmıştır. Sac malzemelerin kap yüksekliği 3B DİK yöntemi ve deney numuneleri üzerinden 0,01 mm hassasiyetli dijital mihengir ile ölçülmüş, maksimum kuvvet değerleri yük hücresi ile kayıt edilmiştir. Kullanılan bütün sac malzemeler ve her sıcaklık değeri için Erichsen Kap Testi üçer defa tekrar edilmiştir.

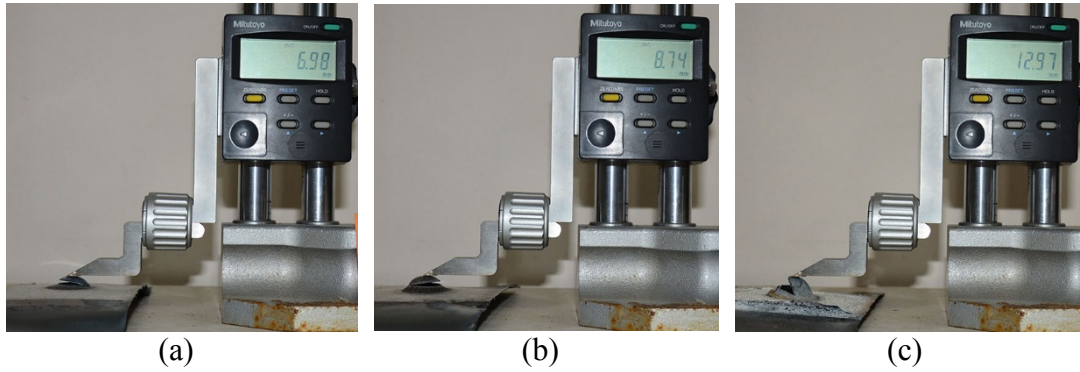
Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de, sırasıyla 0,4 mm, 0,5 mm ve 0,6 mm kalınlıklardaki Ck75 sac malzeme için 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda yapılan şekillendirme deneylerine ait örnek numuneler gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de ise 3B DİK yöntemi kullanılarak ölçülen kap yüksekliği ve dijital mihengir ile ölçülen kap yüksekliği ölçümleri verilmiştir. Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de sırasıyla 0,4 mm, 0,5 mm ve 0,6 mm kalınlıklardaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklarda yapılan şekillendirme deneylerine ait 3B DİK ölçümleri verilmiştir. Şekillerde ölçüm sonuçları kap yüksekliğinin 3B modeli verilerek gösterilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü üzere, resimlerin sağ tarafında verilen renk paleti ise, yırtılma anındaki kap yüksekliği değerinin (W) mm cinsinden ölçeklemesini içermektedir.



Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 0,4 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri. a) 800 °C, b) 900 °C, c) 1000 °C.



Şekil 4.16. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 0,5 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri. a) 800 °C, b) 900 °C, c) 1000 °C.



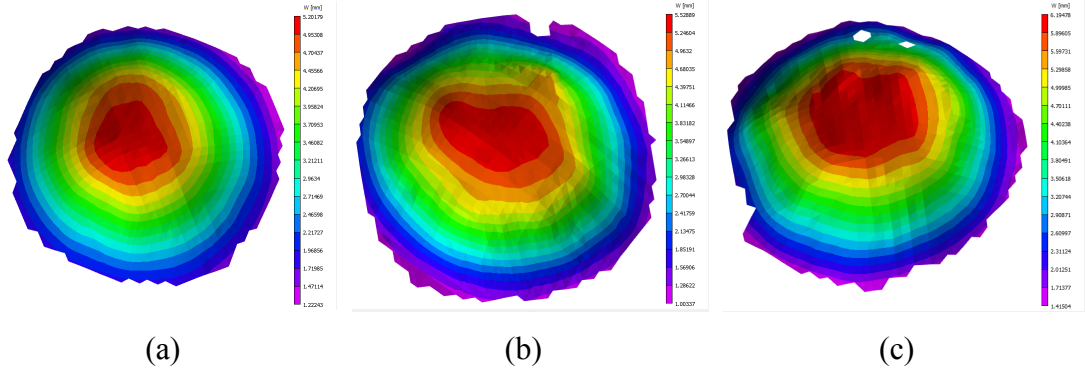
Şekil 4.17. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 0,6 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri. a) 800 °C, b) 900 °C, c) 1000 °C.

Çizelge 4.2. Yüksek sıcaklıkta şekillendirilen Ck75 sac malzeme için yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği.

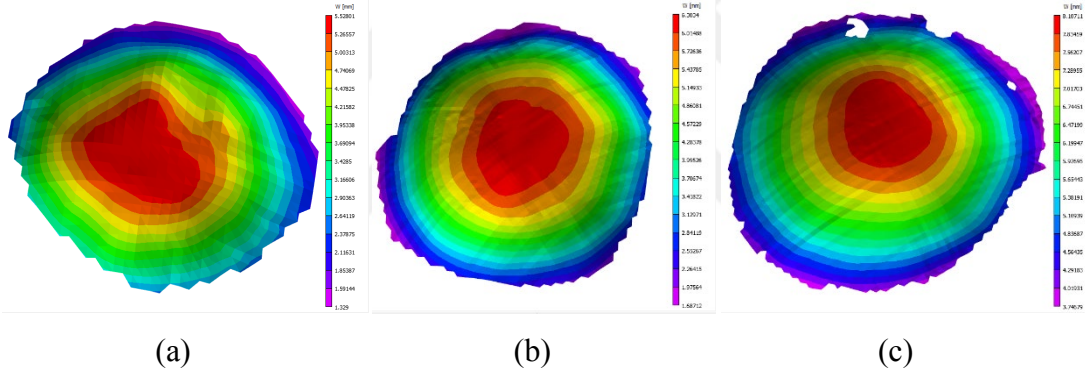
Kalınlık (mm)	Sıcaklık (°C)	Numune	Mihengir Ölçümü (mm)	DİK Yükseklik Ölçümü (mm)	DİK Ortalama Yükseklik (mm)
0,4	800	No.1	7,28	5,20179	5,20432
		No.2	6,62	5,16035	
		No.3	6,81	5,25082	
	900	No.1	7,72	5,52889	5,54181
		No.2	7,89	5,49513	
		No.3	7,65	5,60142	
	1000	No.1	9,23	6,19478	6,13168
		No.2	8,37	6,08696	
		No.3	7,96	6,11332	
0,5	800	No.1	6,92	5,52801	5,40450
		No.2	6,14	5,21201	
		No.3	6,89	5,47349	
	900	No.1	7,05	6,30340	6,49169
		No.2	7,73	6,62336	
		No.3	7,53	6,54832	
	1000	No.1	9,75	8,10711	8,25641
		No.2	9,69	8,10546	
		No.3	9,89	8,55666	
0,6	800	No.1	6,98	5,90417	6,02048
		No.2	7,66	6,16015	
		No.3	7,26	5,99714	
	900	No.1	8,74	6,69335	6,96634
		No.2	8,38	7,14138	
		No.3	8,24	7,06430	
	1000	No.1	12,97	8,45851	8,50456
		No.2	13,02	8,66466	
		No.3	11,13	8,39051	

Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere, 0,4 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkta dijital mihengir ölçümleri 6,62 mm ile 7,28 mm arasında, 900 °C sıcaklık için ise 7,65 mm ile 7,89 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için ise 7,96 mm ile 9,23 mm arasında değişmektedir. Diğer yandan 0,5 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkta dijital mihengir ölçümleri 6,14 mm ile 6,92 mm arasında, 900 °C sıcaklık için ise 7,05 mm ile 7,73 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için ise 7,75 mm ile 9,89 mm arasında ölçülmüştür. Ayrıca 0,6 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkta dijital mihengir ölçümleri 6,98 mm ile

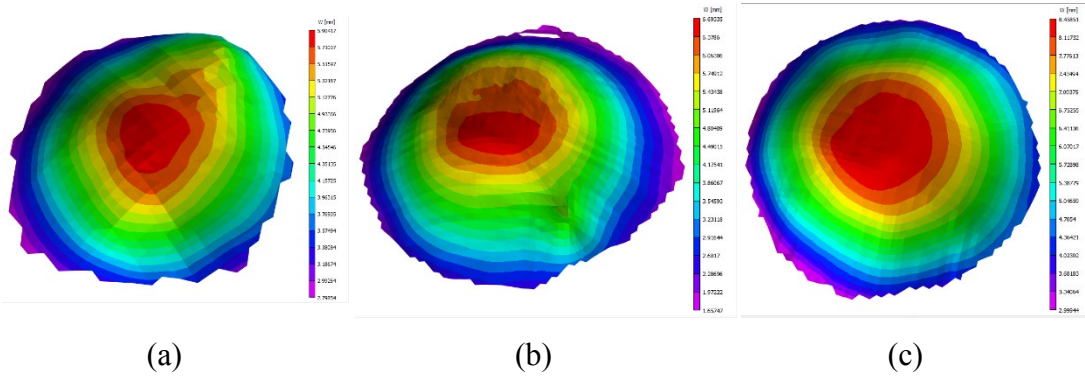
7,66 mm arasında, 900 °C sıcaklık için ise 8,24 mm ile 8,74 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için ise 11,13 mm ile 13,02 mm arasında yer almaktadır.



Şekil 4.18. 0,4 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kap yükseklikleri. a) 800 °C, b) 900 °C ve c) 1000 °C.



Şekil 4.19. 0,5 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kap yükseklikleri. a) 800 °C, b) 900 °C ve c) 1000 °C.

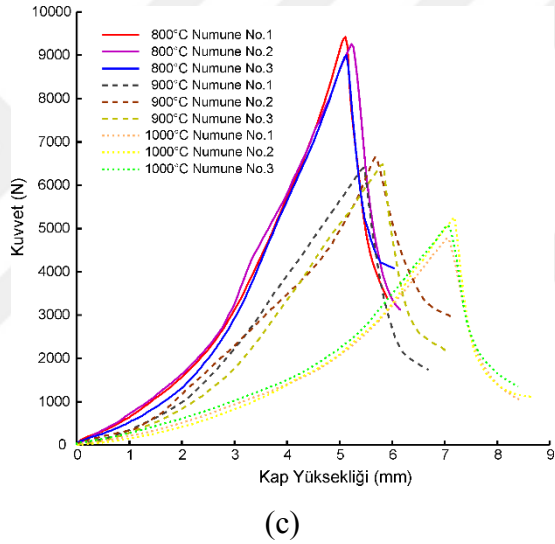
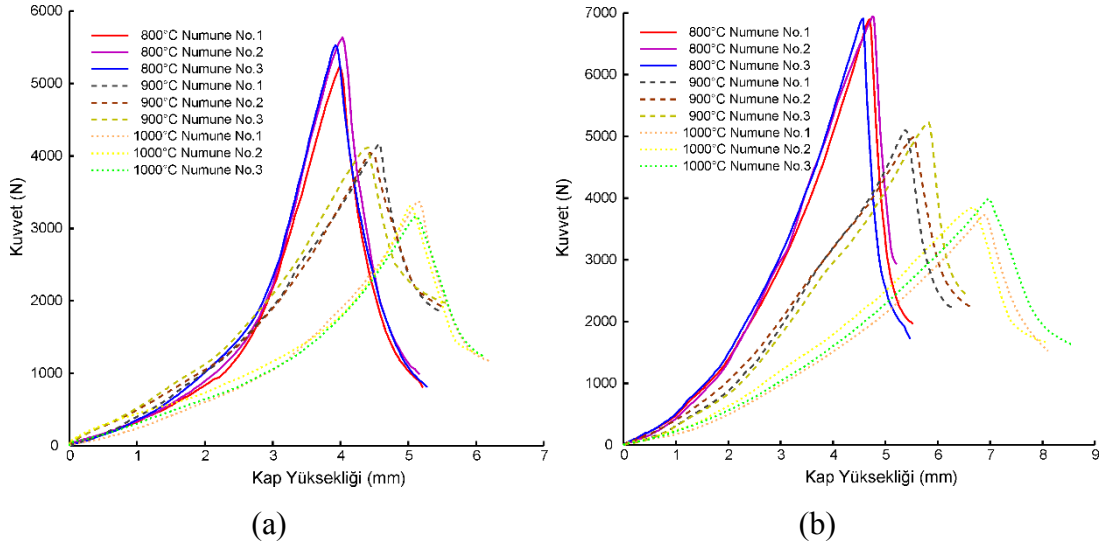


Şekil 4.20. 0,6 mm kalınlıktaki Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kap yükseklikleri. a) 800 °C, b) 900 °C ve c) 1000 °C.

3B DİK ölçümleri incelendiğinde 0,4 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkta 5,16035 mm ile 5,25082 mm arasında, 900 °C sıcaklık için 5,49513 mm ile 5,60142 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için 6,08696 mm ile 6,19478 mm arasında değişmektedir. 0,5 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkta 5,21201 mm ile 5,52801 mm arasında, 900 °C sıcaklık için 6,30340 mm ile 6,62336 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için 8,10546 mm ile 8,55666 mm arasında ölçülmüştür. 0,6 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkta 5,90417 mm ile 6,16015 mm arasında, 900 °C sıcaklık için 6,69335 mm ile 7,14138 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için 8,39051 mm ile 8,66466 mm arasında değişim göstermiştir.

Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere, dijital mihengir ölçümleri ile 3B DİK ölçümleri arasında fark olduğu ve bu farkın kullanılan manuel hidrolik presin tam yırtılma anında durmaması ve harici monitörlerden yırtılma anının görülmesinden sonra bir miktar kadar pres kursunun devam etmesinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Diğer yandan, DİK ölçümlerinden elde edilen kap yükseklikleri incelendiğinde, sıcaklık artışı ile kap yüksekliğinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.18'de 0,4 mm kalınlıktaki malzeme için, Şekil 4.19'da 0,5 mm kalınlıktaki malzeme için ve Şekil 4.20'de 0,6 mm kalınlıktaki malzeme için yüksek sıcaklıktaki kap yüksekliklerinin karşılaştırılmasında, sıcaklık artışının malzemenin şekil alma kabiliyetini olumlu yönde arttırdığı görülmektedir. Çizelge 4.1'de verilen oda sıcaklığı testi ile Çizelge 4.2'de verilen yüksek sıcaklıktaki kap yükseklikleri kıyaslandığında, sıcaklığın artmasıyla malzemenin kap yüksekliğinin arttığıda görülmektedir.

Şekil 4.21 (a)-(c)'de kap yüksekliğine bağlı olarak bütün kalınlıklardaki (0,40 mm, 0,50 mm, 0,60 mm) bütün numuneler (No.1, No.2, No.3) için farklı sıcaklıklar kullanılarak (800 °C, 900 °C, 1000 °C) yapılan şekillendirme deneylerine ait kuvvet-kap yüksekliği grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4.21 (a) incelendiğinde, 0,4 mm kalınlık için 800 °C sıcaklıkla ortalama maksimum kuvvet 5526,5 N, 900 °C sıcaklık için 4116,5 N ve 1000 °C sıcaklık için 3311,1 N olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığı 0,5 mm arttırıldığında, ortalama maksimum kuvvet 800 °C için 6898,1 N, 900 °C için 5101,1 N ve 1000 °C için 3849,5 N olarak belirlenmiştir (Şekil 4.21 (b)). En yüksek kalınlık olan 0,6 mm için ise, 800 °C sıcaklık için ortalama maksimum kuvvet 9259,8 N, 900 °C sıcaklık için 6479,6 N ve 1000 °C için ise 5074,0 N olarak kayıt edilmiştir (Şekil 4.21 (c)).



Şekil 4.21. Ck75 sac malzeme için farklı sıcaklıklar altında yapılan deneylere ait kuvvet-kap yüksekliği eğrileri. a) 0,4 mm kalınlık, b) 0,5 mm kalınlık, c) 0,6 mm kalınlık.

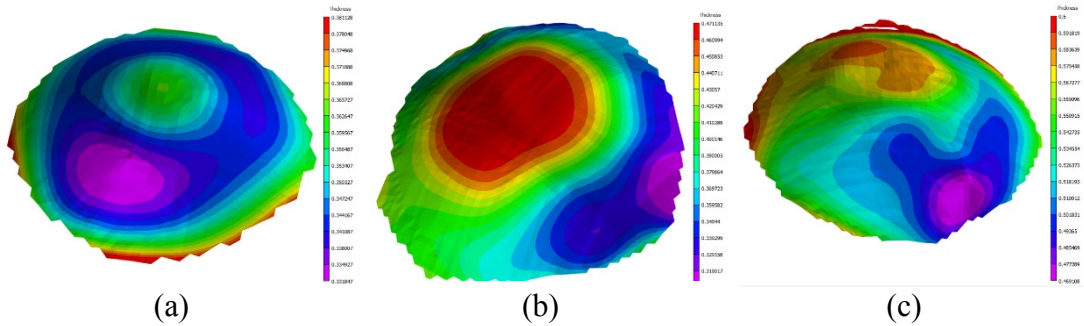
Çizelge 4.3'te farklı kalınlıklarda kullanılan Ck75 sac malzemeye ait oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklar altındaki şekillendirme deneylerine ait ortalama en yüksek kuvvet değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Ck75 için farklı kalınlıklar ve sıcaklıklar altındaki ortalama maksimum kuvvet değerleri.

		Kalınlık(mm)		
		0,4	0,5	0,6
Sıcaklık (°C)	24	7319N	10623N	14041N
	800	5526,5N	6898,1N	9259,8N
	900	4116,5N	5101,1N	6479,6N
	1000	3311,1N	3849,5N	5074N

Şekil 4.21 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, bütün kalınlıklar için sıcaklık değerinin artmasıyla, şekillendirme sırasında elde edilen ortalama maksimum kuvvet değerinin azaldığı ve buna bağlı olarak sıcaklık artışı ile kap yüksekliğinin arttığı açıkça görülmektedir.

3B DİK yöntemi kullanılarak yapılan ölçümlerden sac malzeme kalınlık dağılımının elde edilmesi mümkündür. Şekil 4.22’de farklı kalınlıklarda kullanılan Ck75 sac malzemenin yüksek sıcaklıkta yapılan şekillendirme deneylerinin örnek numunelerine ait kalınlık dağılımı gösterilmiştir. Ck75 malzemeye ait diğer şekillendirilmiş numunelerin en düşük kalınlık değerleri Çizelge 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.22. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen Ck75 sac malzemeye ait kalınlık dağılımı. a) 0,4 mm kalınlık 800 °C, b) 0,5 mm kalınlık 900 °C, c) 0,6 mm kalınlık 1000 °C.

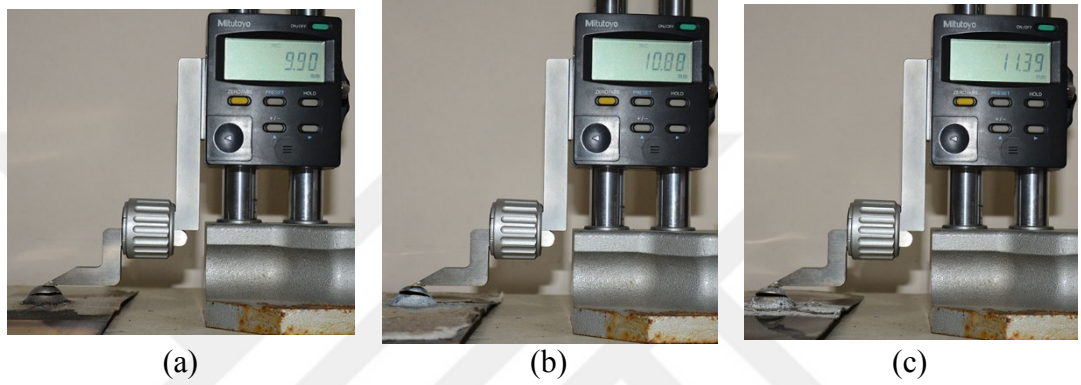
Çizelge 4.4. Ck75 sac malzemenin farklı sıcaklıklarda şekillendirilen numunelerine ait kalınlık değerleri.

Kalınlık (mm)	Sıcaklık (°C)	Numune	DİK Kalınlık Ölçümü (mm)
0,4	800	No.1	0,331847
		No.2	0,337841
		No.3	0,327040
	900	No.1	0,303394
		No.2	0,302206
		No.3	0,310230
	1000	No.1	0,265000
		No.2	0,302770
		No.3	0,270225
0,5	800	No.1	0,374803
		No.2	0,414927
		No.3	0,373478
	900	No.1	0,308876
		No.2	0,359907
		No.3	0,304000
	1000	No.1	0,396156
		No.2	0,308538
		No.3	0,343332
0,6	800	No.1	0,486000
		No.2	0,480000
		No.3	0,492835
	900	No.1	0,420108
		No.2	0,406000
		No.3	0,416405
	1000	No.1	0,469108
		No.2	0,414660
		No.3	0,409931

Şekil 4.22 (a), (b), (c)'deki resimlerde, yırtılma öncesinde şekillendirilmiş numuneler üzerindeki kalınlık dağılımı görülmektedir. Burada, şekillendirilmiş numuneler 3 boyutlu modeli gösterilerek, model üzerinde kalınlık dağılımı renk dağılımı ile ifade edilmektedir. Resimlerin sağ tarafında verilen renk paleti ise, en yüksek kalınlık değerinden en düşük kalınlığa kadar olan değerleri renk paleti ile milimetre cinsinden ölçeklenmesini içermektedir. Model üzerinde mor renk ile gösterilen alan yırtılmanın hemen öncesindeki kalınlık değerini göstermektedir. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi en düşük kalınlık değeri, 0,4 mm kalınlıktaki numunenin 800 °C sıcaklıkta

şekillendirilmesinde 0,331847 mm, 0,5 mm kalınlıktaki numunenin 900 °C sıcaklıkta şekillendirilmesinde 0,308876 mm ve 0,6 mm kalınlıktaki numunenin 1000 °C sıcaklıkta şekillendirilmesinde 0,469108 mm olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.23'te, 22MnB5 bor malzemeye ait yırtılma sonrası yükseklik ölçümü 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklar için örnek birer numune gösterilmiştir. Çizelge 4.5'te 3B DİK yöntemi ve dijital mihengir ile ölçülen kap yüksekliği ölçümleri verilmiştir.



Şekil 4.23. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 22MnB5 sac malzeme için dijital mihengir yükseklik ölçüm örnekleri. a) 800 °C Numune No.1, b) 900 °C Numune No.1, c) 1000 °C Numune No.1.

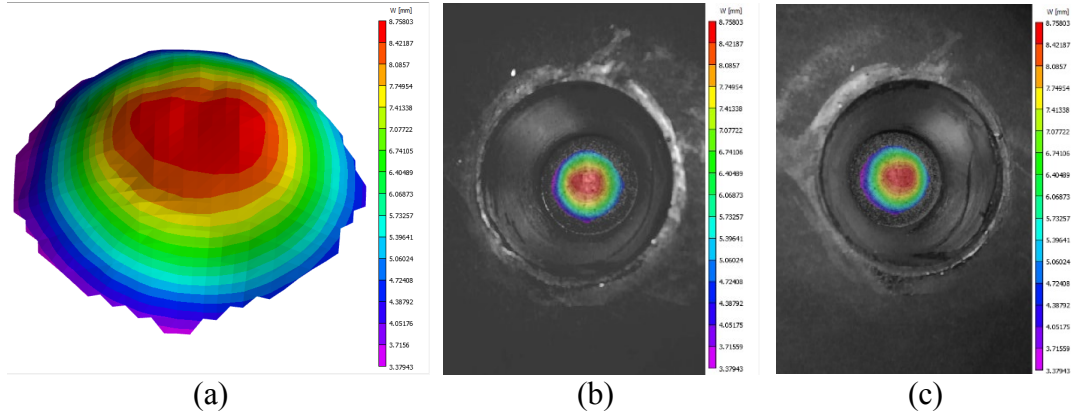
Çizelge 4.5. Yüksek sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzeme için yırtılma sonrasındaki kap yüksekliği.

Kalınlık (mm)	Sıcaklık (°C)	Numune	Mihengir Ölçümü (mm)	DİK Yükseklik Ölçümü (mm)	DİK Ortalama Yükseklik (mm)
1,25	800	No.1	9,90	8,75803	8,475896
		No.2	9,56	8,31756	
		No.3	9,74	8,35210	
	900	No.1	10,88	9,56090	9,499876
		No.2	10,59	9,58110	
		No.3	11,28	9,35763	
	1000	No.1	11,39	10,2292	10,37166
		No.2	11,35	10,3627	
		No.3	12,76	10,5231	

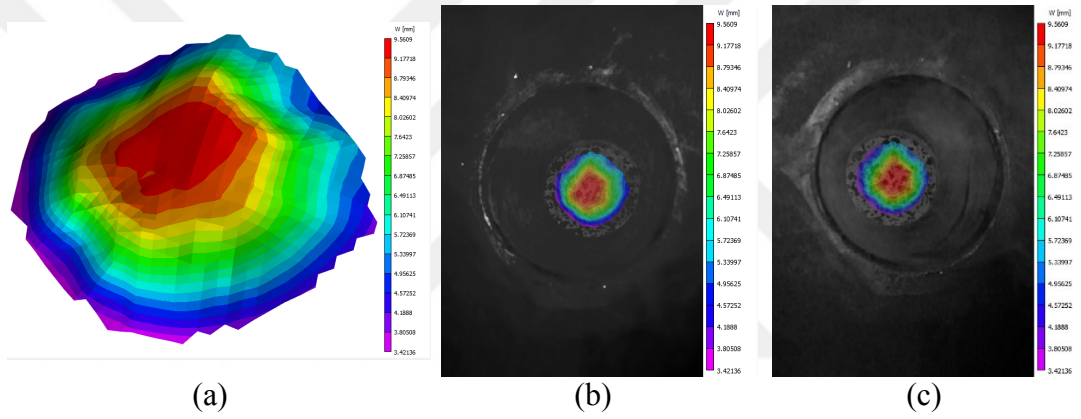
Çizelge 4.5'ten görüldüğü üzere, 800 °C sıcaklık için dijital mihengir ölçümleri 9,56 mm ile 9,90 mm arasında, 900 °C sıcaklık için ise 10,59 mm ile 11,28 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için ise 11,35 mm ile 12,76 mm arasında değişmektedir. DİK ölçümleri ise 800 °C sıcaklık için 8,31756 mm ile 8,75803 mm arasında, 900 °C sıcaklık için 9,35763 mm ile 9,58110 mm arasında ve 1000 °C sıcaklık için 10,2292 mm ile 10,52231 mm arasında değişim göstermiştir. Dijital mihengir ölçümleri ile 3B DİK ölçümleri arasındaki fark, kullanılan manuel hidrolik presin tam yırtılma anında durmaması ve harici monitörlerden yırtılma anının görülmesinden sonra bir miktar kadar pres kursunun devam etmesidir. Diğer yandan, 3B DİK ölçümlerinde yırtılmanın ilk görüldüğü an baz alınarak ölçülmüştür. Ayrıca, ortalama DİK kap yüksekliğine bakıldığında, 800 °C sıcaklıktaki kap yüksekliği 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda arttığı görülmektedir. Şekillendirme sıcaklığının artışıyla malzemede yırtılma görülen kap yüksekliği artış göstermiştir.

Çizelge 4.5'te verilen DİK ölçümlerine ait kamera görüntüleri Şekil 4.24–Şekil 4.26 arasında 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklar için birer örnek numune üzerinde sacın yırtılma anındaki görüntüsü kullanılarak 3B kap yüksekliği, kamera 1 ve kamera 2'deki görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilen resimlerin sağ tarafında verilen renk paleti ise, yırtılma anındaki kap yüksekliği değerinin (W) mm cinsinden ölçeklemesini içermektedir.

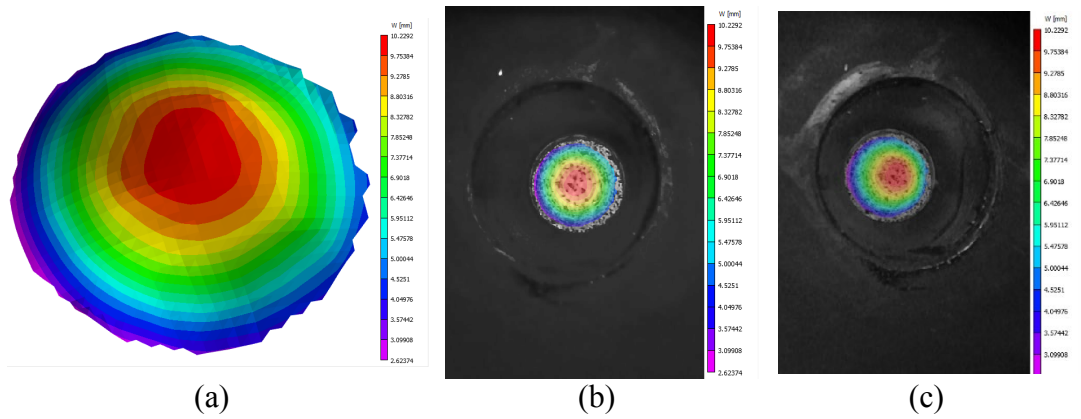
Şekil 4.24'te görüldüğü gibi 800 °C sıcaklıkta yırtılma anındaki yükseklik 8,75803 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.24 (a), (b), (c)'de görüldüğü gibi en yüksek kap yükseklik değeri zımba ucunun tepe noktası olan kırmızı bölgede gözlenmekte ve sacın en az yer değiştirme değeri ise alt kalıp temas bölgesinde mor renkteki bölge olarak 3,37943 mm olarak belirlenmiştir. Sac malzemenin şekillendirme limiti aşıldığında yırtılmanın meydana gelmesi sebebiyle, altküne piksel grubunun kontrastı kaybolduğunda ve kötü korelasyon olan bölgeler yırtılma hattı üzerindeki bölgeler kaldırılmıştır. Bu alanlar, 3B kap yüksekliğinde renksiz bölge, kamera 1 ve kamera 2 görüntülerinde ise gri alanlar olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda deformasyon ve sıcaklık etkisi ile malzeme üzerindeki boyaların yüzeyden kalktığı ve kontrast kaybı olan bölgeler yine gri alanlar görülmektedir.



Şekil 4.24. 800 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzemenin 3B DİK yırtılma kap yüksekliği. a) 3B kap yüksekliği, b) kamera 1, c) kamera 2.

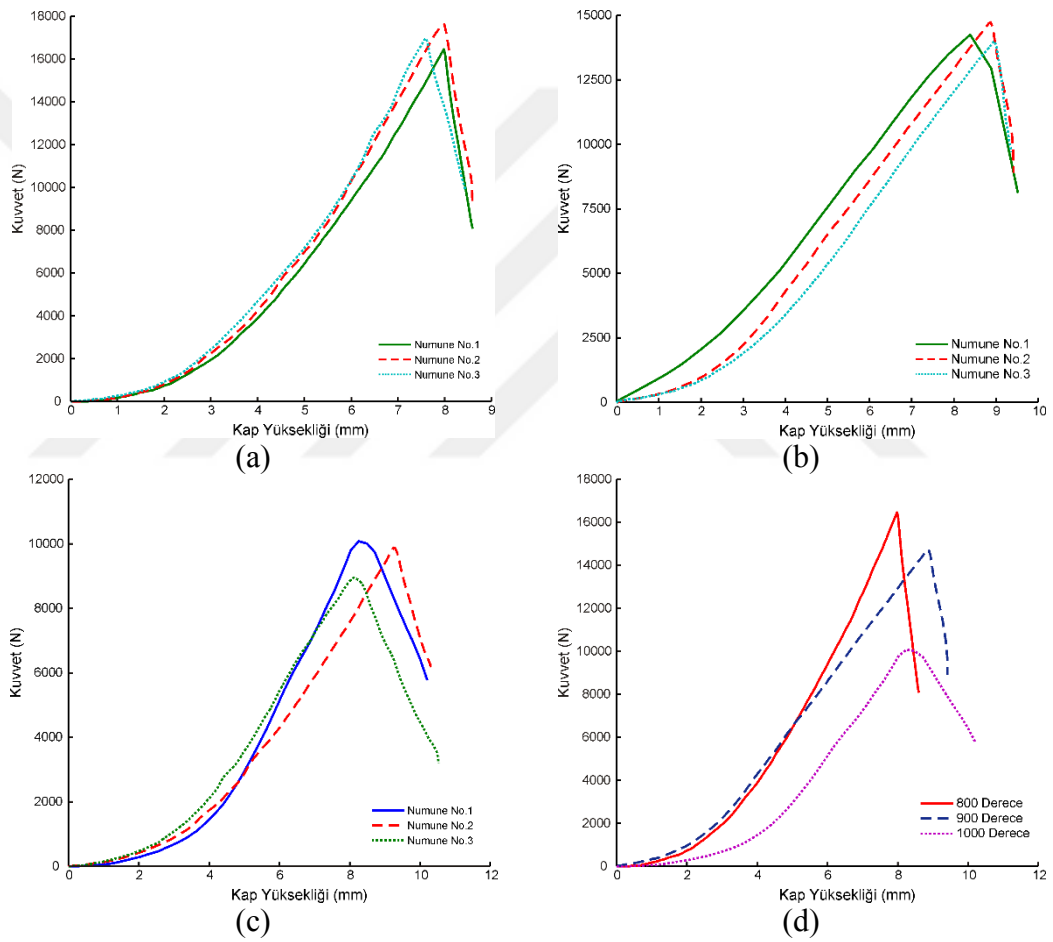


Şekil 4.25. 900 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzemenin 3B DİK yırtılma kap yüksekliği. a) 3B kap yüksekliği, b) kamera 1, c) kamera 2.



Şekil 4.26. 1000 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 sac malzemenin 3B DİK yırtılma kap yüksekliği. a) 3B kap yüksekliği, b) kamera 1, c) kamera 2.

Şekillendirme sıcaklığı 900 °C'ye artırıldığında, yırtılma anındaki kap yüksekliği 9,5609 mm olarak ölçülmüş ve en düşük yer değıştirme 3,42136 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.25). Diğer yandan, sıcaklık en yüksek değeri olan 1000 °C'ye çıkartıldığında, yırtılma anındaki kap yüksekliği 10,2292 mm olarak bütün şekillendirme deneylerinde en yüksek değeri olarak belirlenmiş, en düşük yer değıştirme ise 2,62374 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.26). Elde edilen bu sonuçlar değeriendirildiğinde, yırtılma anındaki kap yüksekliğinin ve buna bağılı olarak şekillenme limitinin sıcaklık ile beraber arttığı belirlenmiştir.

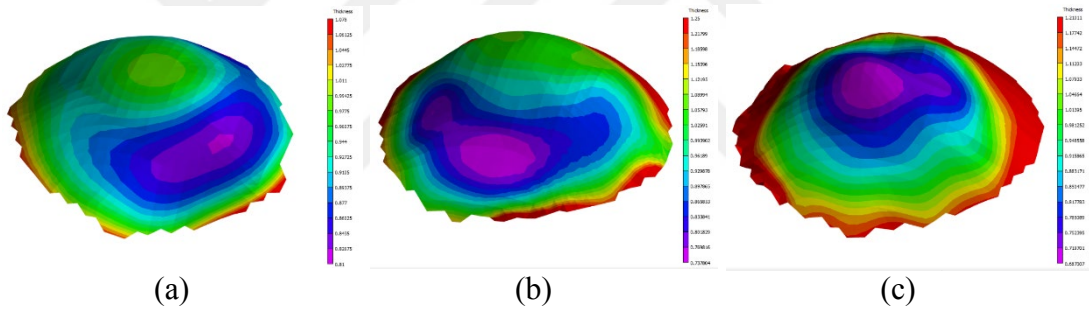


Şekil 4.27. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 22MnB5 sac malzemeye ait kuvvet-kap yüksekliği eğrileri. a) 800 °C, b) 900 °C, c) 1000 °C, d) sıcaklıkların karşılaştırılması.

Yük hücresi ile farklı sıcaklıklar altında kayıt edilen kuvvet değeri Şekil 4.27 (a)-(c)'de kap yüksekliğine bağılı olarak bütün numuneler (No.1, No.2, No.3) için gösterilmiştir. Şekil 4.27 (a) incelendiğinde, 800 °C sıcaklık için en yüksek kuvvet

değerleri Numune No.1 için 16460 N, Numune No.2 için 17630 N ve Numune No.3 için 16970 N olarak ölçülmüştür. Sıcaklık 900 °C'ye arttırıldığında, en yüksek kuvvet değerleri, Numune No.1 için 14250 N, Numune No.2 için 14740 N ve Numune No.3 için 14000 N olarak belirlenmiştir (Şekil 4.27 (b)). En yüksek sıcaklık değeri olan 1000 °C için en yüksek kuvvet değerleri, Numune No.1 için 10080 N, Numune No.2 için 9882 N ve Numune No.3 için 8952 N olarak kayıt edilmiştir (Şekil 4.27 (c)). Kuvvet değerleri incelendiğinde, yırtılma anındaki kap yüksekliğinin sıcaklık artışı ile beraber arttığı, buna bağlı olarak maksimum kuvvetin sıcaklık artışı ile azaldığı görülmektedir (Şekil 4.27 (d)).

22MnB5 bor alaşımlı sac malzemeye ait 3B DİK yöntemi ile ölçülen kalınlık dağılımının 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklar için örnek numunler Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen 22MnB5 sac malzemeye ait kalınlık dağılımı. a) 800 °C, b) 900 °C, c) 1000 °C.

22MnB5 için kalınlık dağılımı değerleri 800 °C sıcaklık için sırasıyla Numune No.1 için 0,81 mm, Numune No.2 için 0,833658 mm ve Numune No.3 için ise 0,82458 mm olarak ölçülmüştür. Sıcaklık 900 °C arttırıldığında, Numune No.1 için 0,737804 mm, Numune No.2 için 0,731755 mm ve Numune No.3 için 0,75 mm olarak belirlenmiştir. En yüksek sıcaklık olan 1000 °C'de yapılan deneylerde kalınlık dağılımı, Numune No.1 için 0,687007 mm, Numune No.2 için 0,676951 mm ve Numune No.3 için 0,638 mm elde edilmiştir.

DİK yönteminin en büyük özelliklerinden biri yer değiştirmenin yanı sıra tam alan birim şekil değiştirme dağılımının elde edilmesidir. DİK yönteminden elde edilen

birim şekil değiştirme değerlerinin diğer analitik yöntemler veya ölçüm metotları (strain gauge gibi) ile karşılaştırılmasında, beklenen sonuçlara uygun olarak, uygun uzama tensörünün seçilmesi gereklidir. DİK ölçümlerinde tam alan birim şekil değiştirme dağılımını elde edebilmek için yüksek mertebeden yerdeğiştirme terimlerini içeren Lagrangian tensörü seçilmiştir. Lagrangian tensörü elastomer malzemelerde olduğu gibi büyük birim şekil değiştirme değerlerinin görüldüğü durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Lagrangian tensörü;

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}{2} \quad (4.1)$$

$$e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}{2} \quad (4.2)$$

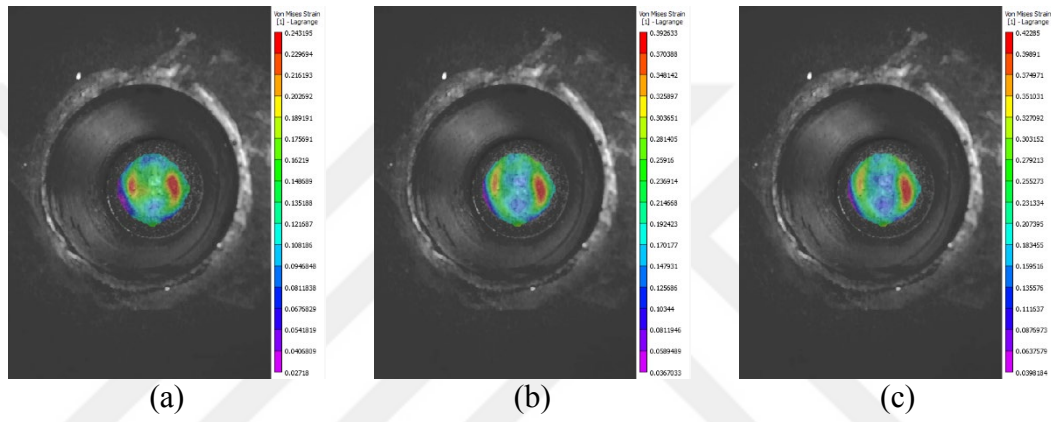
$$e_{xy} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y}}{2} \quad (4.3)$$

Burada, e_{xx} , x eksenini boyunca birim şekil değiştirmesi, e_{yy} , y eksenini boyunca birim şekil değiştirmesi ve e_{xy} kayma birim şekil değiştirmesi tensörü olarak tanımlanmaktadır. DİK yöntemi ile 3B ölçümlerde sadece yüzey şekil değiştirmesi hesaplamasından dolayı asal düzlem birim şekil değiştirmesi formülasyonu olan von Mises birim şekil değiştirme hesaplaması kullanılmaktadır. von Mises

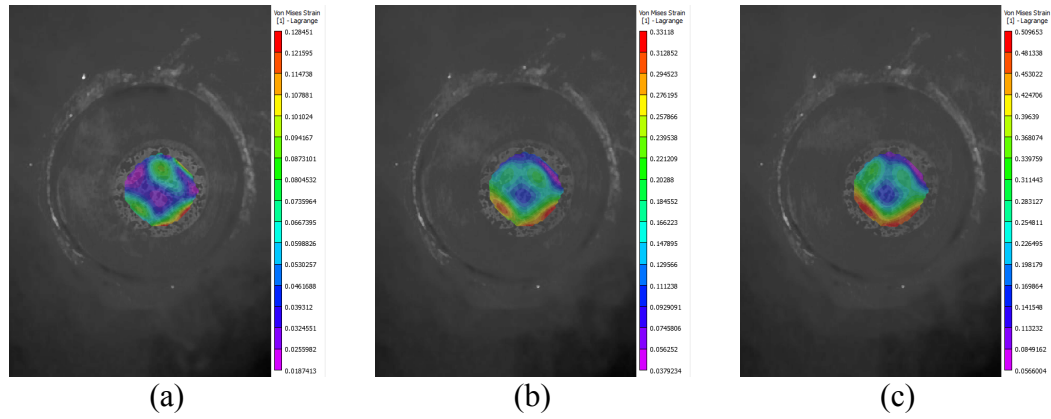
$$\varepsilon_v = \sqrt{\varepsilon_1^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2} \quad (4.4)$$

denklemini kullanılarak hesaplanmaktadır. Sac malzemelerin ince cidarlı olması sebebiyle kalınlık yönündeki uzamanın ihmal edilmesi ve diğer formülasyon yöntemlerinin malzemenin kalınlık yönündeki davranışı için varsayımlar içermesi sebebiyle, daha basit bir kriter olan von Mises tercih edilmektedir [15].

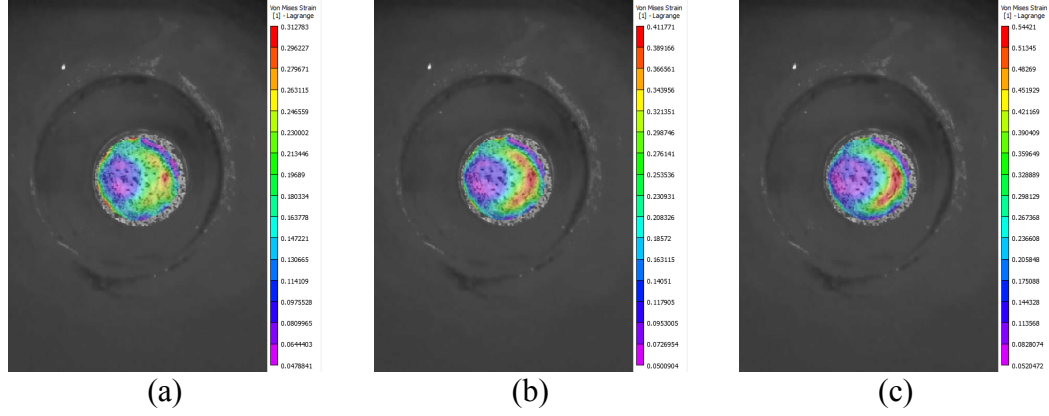
3B DİK yöntemi ile yapılan ölçümlerden farklı sıcaklıklar altında malzemenin yüzey bölgesinde meydana gelen von Mises birim şekil değiştirme dağılımı 800 °C sıcaklık için Şekil 4.29’da 900 °C sıcaklık için Şekil 4.30’da ve 1000 °C için Şekil 4.31’de örnek numune olan Numune No.1 için kamera 1 görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 4.29-Şekil 4.31’de malzemenin yüzeyinde deformasyon süresince meydana gelen von Mises birim şekil değiştirme dağılımı, resimlerin sağında görülen renk ölçeğine göre verilmiştir. Burada kırmızı bölgeler birim şekil değişiminin en fazla olduğu bölgeleri göstermektedir.



Şekil 4.29. 800 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 malzemenin Numune No.1’e ait von Mises birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 4.30. 900 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 malzemenin Numune No.1’e ait von Mises birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 4.31. 1000 °C sıcaklıkta şekillendirilen 22MnB5 malzemenin Numune No.1'e ait von Mises birim şekil değiştirme dağılımı.

Şekil 4.29 (c), Şekil 4.30 (c) ve Şekil 4.31 (c) şekillendirme sonunda yırtılmanın meydana geldiği anın öncesindeki görüntü gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.29 (a), Şekil 4.30 (a) ve Şekil 4.31 (a) şekillendirme deneyinin başlangıç-orta aralığından rastgele seçilmiş görüntüleri ve Şekil 4.29 (b), Şekil 4.30 (b) ve Şekil 4.31 (b) ise şekillendirme deneyinin orta-son aralığından rastgele seçilmiş görüntüleri göstermektedir. Buradan Şekil 4.29 incelendiğinde, başlangıç-orta aralığında 0,243195 von Mises birim şekil değiştirme değeri, şekil değişimi boyunca 0,392633'e yükselmiş ve yırtılma anının hemen öncesinde maksimum değeri olan 0,42285'e ulaşmıştır. Sıcaklık değeri 900 °C'ye arttırıldığında, von Mises birim şekil değiştirme değeri 0,128451 olarak görülmüş ve deformasyon süresince 0,33118'e çıkarak, yırtılma anında 0,509653 değerine ulaşmıştır (Şekil 4.30). En yüksek sıcaklık değeri olan 1000 °C'de von Mises birim şekil değiştirme değeri şekillendirme işlemi boyunca 0,312783, 0,411771 ve 0,54421 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.31). Buradan, şekillendirme sırasında kullanılan sıcaklığın artmasıyla malzemenin yüzeyinde meydana gelen von Mises birim şekil değiştirme miktarı artış göstermektedir. Ayrıca deney numunelerinin yırtıldığı bölgede von Mises birim şekil değiştirme değerinin yoğunlaşarak, diğer bölgelerden daha yüksek olduğu kırmızı bölgeler ile görülmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışma, 2B VE 3B DİK tekniğinin deneysel olarak tahribatlı malzeme muayene testlerinden olan tek eksen çekme testi ve Erichsen Kap Testi'ne adaptasyonu, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında şekillendirme deneylerinde DİK yönteminin kullanılması, Erichsen indeks sayısının belirlenmesini sunmaktadır. İlk aşamada DP980 sac malzeme oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında tek eksen çekme testine tabi tutulmuş ve tek eksen çekme testine 2B DİK yöntemi uygulanmıştır. İkinci aşamada, Ck75 ve 22MnB5 düz sac malzemeler farklı kalınlıklar kullanılarak oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta Erichsen Kap Testi'nde kalıp içerisine sabitlenmiş, sabit pres hızı kullanılarak yırtılma oluşuncaya kadar iki eksenli gerdirme işlemine tabi tutulmuş, 3B DİK yöntemi uygulanmıştır. Deney öncesinde deforme olmamış numune görüntüsü ile deforme olmuş görüntüler Vic2D ve Vic3D yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Sonuç olarak;

- DİK tekniği ile elde edilen ölçümlerin kabul edilebilir ve doğruluğu yüksek sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, geleneksel CMOS kameraların atölye şartlarında kap yüksekliği ölçümlerinde kullanılabilirliği gösterilmiştir.
- DP980 sac malzemenin yüksek sıcaklıktaki tek eksen çekme testinde, malzemenin sıcaklığa karşı duyarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, sıcaklık artışı ile sac malzemenin çekme dayanımının önemli derecede düştüğü görülmüştür. Bölgesel şekil değişimi açısından bakıldığında, kırılma hattına en yakın noktanın her zaman birim şekil değiştirme değerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.

- Ck75 sac malzemenin oda sıcaklığındaki şekillendirilmesinde ölçülen kap yükseklikleri sac kalınlığı ile orantılı olarak artış göstermiştir (Çizelge 4.1). Sac kalınlığı 0,40 mm'den 0,50 mm'ye arttırıldığında, yırtılma anındaki ortalama kap yüksekliği 0,37116 mm olarak artmıştır. Ancak, 0,60 mm sac kalınlığı için ortalama kap yüksekliği, 0,50 mm ile karşılaştırıldığında daha düşük bir artış göstererek 0,26011 mm olarak belirlenmiştir.
- Ck75 sac malzemenin oda sıcaklığındaki şekillendirilmesinin kuvvet ölçümleri incelendiğinde, her numune için en büyük kuvvet değeri ve ortalama kuvvet sac kalınlığı ve kap yüksekliği ile doğru orantılı olarak artış göstermiştir (Şekil 4.12). Ortalama maksimum kuvvet 0,40 mm kalınlık için 7319,8 N, 0,50 mm kalınlık için 10623,67 N ve 0,60 mm kalınlık için 14041,67 N olarak ölçülmüştür. Ck75 sac malzemenin oda sıcaklığındaki şekillendirilmesinde, ortalama en düşük kalınlık değerinin 0,40 mm için 0,329483 mm, 0,50 mm için 0,386688 mm ve 0,60 mm için 0,480665 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan, ortalama en düşük kalınlık değerinin sac kalınlığı ve kap yüksekliğine bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Ck75 sac malzemenin yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesinde ölçülen kap yükseklikleri sac kalınlığı ve sıcaklık ile orantılı olarak artış göstermiştir (Çizelge 4.2). Sac kalınlığı 0,40 mm için ortalama kap yüksekliği 800 °C için 5,20432 mm, 900 °C sıcaklık için 5,54181 mm ve 1000 °C sıcaklık için 6,13168 mm olarak artmıştır. Sac kalınlığı 0,5 mm için ortalama kap yüksekliği 800 °C için 5,40450 mm, 900 °C sıcaklık için 6,49169 mm ve 1000 °C sıcaklık için 8,25641 mm olarak ölçülmüştür. En yüksek kalınlık olan 0,6 mm için ortalama kap yüksekliği 800 °C için 6,02048 mm, 900 °C sıcaklık için 6,96634 mm ve 1000 °C sıcaklık için 8,50456 mm olarak belirlenmiştir.
- Ck75 sac malzemenin yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesinde kuvvet ölçümleri incelendiğinde, sıcaklık artışı ile ölçülen maksimum kuvvetin azaldığı, buna paralel olarak sıcaklık artışı ile kap yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Ortalama maksimum kuvvet 0,40 mm kalınlık için oda sıcaklığında 7319,8 N, 800 °C'de 5526,5 N, 900 °C 4116,5 N ve 1000 °C'de 3311,1 N olarak belirlenmiştir. Sac

kalınlığı 0,50 mm'ye arttırıldığında sırasıyla aynı sıcaklık değerleri için 10623 N, 6898,1 N, 5101,1 N ve 3849,5 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kalınlık olan 0,6 mm için oda sıcaklığı, 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda ortalama maksimum kuvvet sırasıyla 14041 N, 9259,8 N, 6479,6 N, 5074 N olarak elde edilmiştir.

- 22MnB5 bor alaşımlı sac malzemenin sıcak şekillendirilmesinde, sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak, ölçülen kap yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Sırasıyla 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklar için ortalama kap yüksekliği 8,475896 mm, 9,499876 mm ve 10,37166 mm olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.5).
- 22MnB5 bor alaşımlı sac malzemenin sıcak şekillendirilmesinde, sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak ortalama maksimum kuvvet değerinin azaldığı görülmüştür. Ortalama maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 800 °C sıcaklık için 17020 N, 900 °C sıcaklık için 14330 N ve 1000 °C sıcaklık için 9638 N olarak ölçülmüştür.
- 22MnB5 bor alaşımlı sac malzemenin sıcak şekillendirilmesinde, sıcaklık artışı ile von Mises birim şekil değiştirme değerinin arttığı ve şekillendirme sonunda malzemede meydana gelen yırtılmanın birim şekil değiştirmenin yoğunlaştığı bölgede meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Kurulan DİK ölçüm ekipmanlarının, temassız olması ve kurulum kolaylığından dolayı Erichsen Kap Testi ve çeşitli şekil değişimi ölçümlerinde kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Uysal, G., “Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli sacların şekillendirilebilme özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 12-17 (2006).
2. Sutar, V., Dharankar, C. S. and Thirupathi, B. R., “High strength steel for automotive applications”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3 (5): 966-968 (2016).
3. Kurumahmut, O., “22MnB5 çelik sacların elektrikle ısıtma ile sıcak şekillendirilmesinin deneysel analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13-30 (2009).
4. İnternet: Volvo, “2010 Volvo V60 Body Structure Safety Cage”, <http://www.boronextrication.com/2010/05/29/2010-volvo-v60-body-structure-safety-cage/> (2010).
5. Naderi, M., “Hot stamping of ultra high strength steels”, Yüksek Lisans Tezi, *Rwth Aachen University Faculty of Georesources and Materials Engineering*, Almanya, 2-10 (2007).
6. Philip, T. V., “Ultra high strength steels”, Metals Handbook 10th ed., *ASM International*, Amerika Birleşik Devletleri, 2-30 (1991).
7. Naganathan, A., “Hot stamping of manganese boron steel (Technology review and preliminary finite element simulations), Yüksek Lisans Tezi, *Ohio State Üniversitesi Makine Mühendisliği*, Ohio, 1-5 (2010).
8. Berglund, G., “The history of hardening of boron steel in northern Sweden”, *1st International Conference On Hot Sheet Metal Forming Of High Performance Steel*, Kassel, Almanya, 175-177 (2008).
9. Aspacher, J., “Forming hardening concepts”, *1st International Conference On Hot Sheet Metal Forming Of High Performance Steel*, Kassel, Almanya, 77-81 (2008).
10. Mori, K., Maki, S. and Tanak, Y., “Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54 (1): 209-212, (2005).
11. İnternet: Ambrell, “About Induction Heating”, https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0169-10.pdf?t=1538486989667 (2010).

12. Haimbaugh, R. E., "Practical induction heat treating", *ASM International*, Amerika Birleşik Devletleri, 5-7, 43-44 (2001).
13. İnternet: Ceia Power, "Induction Heating Principles", http://www.sa-japan.com/sa-japan/catalog/CEIA_InductionHeatingPrinciples_FC040K0068v1uk.pdf (2018).
14. Cintrón, R., "Strain measurements with the digital image correlation system Vic-2D", *Colorado Üniversitesi Makine Mühendisliği*, Amerika Birleşik Devletleri (2008).
15. İnternet: Correlated Solutions, "Digital Image Correlation", <http://correlatedsolutions.com> (2016).
16. Mazzoleni, P., "Uncertainty estimation and reduction in digital image correlation measurements", Doktora Tezi, *Politecnico Di Milano Üniversitesi Makine Mühendisliği*, Milano, 12-19 (2013).
17. Chu, T. C., Ranson, W. F. and Sutton, M. A., "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics", *Experimental Mechanics*, 25 (3): 232-244 (1985).
18. Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A. and Peters III, W. H., "Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction", *Experimental Mechanics*, 29 (3): 261-267 (1989).
19. Lecompte, D., Sven Bossuyt, A. S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D. and Habraken, A. M., "Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation", *Optics and Lasers in Engineering*, 44 (11): 1132-1145 (2006).
20. Peters, W. H. and Ranson, W. F., "Digital imaging techniques in experimental stress analysis", *Optical Engineering*, 21(3): 427-431 (1982).
21. Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F. and McNeill, S. R., "Determination of displacements using an improved digital correlation method", *Image and Vision Computing*, 1 (3): 133-139 (1983).
22. Pan B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A., "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review", *Measurement Science and Technology*, 20 (6): 1-17 (2009).
23. Pan, B., "Recent progress in digital image correlation", *Experimental Mechanics*, 51 (1): 1-13, (2011).
24. Chen, Y., Yang, D., Ma, Y., Tan, X., Shi, Z., Li, T. and Si, H., "Experimental investigation on the mechanical behavior of bovine bone using digital image correlation technique", *Applied Bionics and Biomechanics*, 2015 (1): 1-6 (2015).

25. Bai, P., Zhu, F. and He, X., “Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions”, *Optics and Lasers in Engineering*, 65 (1): 28-37 (2015).
26. Gençtürk, B., Hossain, K., Kapadia, A., Labib, E. and Mo, Y. L., “Use of digital image correlation technique in full-scale testing of prestressed concrete structures”, *Measurement*, 47 (1): 505-515 (2014).
27. Wang, Y., Coppieters, S., Lava, P. and Debruyne, D., “Anisotropic yield surface identification of sheet metal through stereo finite element model updating”, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51 (8): 598-611 (2016).
28. Li, Y., Lin, J. and Guo, R., “Numerical and experimental analysis on the formability of tailor welded blanks based on digital image correlation”, *AIP Conference Proceedings*, 1567(1): 772-775 (2013).
29. Ashwini, P., Pooja, A., Pallavi, P. and Prashant, K., “Integrated pattern matching algorithm for quality testing of sheet-metal using digital image processing”, *A Conference on Wireless Communication and Android Apps (WiCAA-15)*, Nashik, 12-17 (2015).
30. Poozesh, P., Baqersad, J., Niezrecki, C. and Avitabile, P., “A multi-camera stereo DIC system for extracting operating mode shapes of large scale structures”, *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 3 (1): 225-238 (2016).
31. Wang, Y., Lava, P., Coppieters, S., Houtte, P. V. and Debruyne, D., “Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an Erichsen Test: Methodology and validation”, *Strain-An International Journal for Experimental Mechanics*, 49 (2): 190-198 (2013).
32. Zhou, J. W., Liu, D. H., Shao, D.-H.L., Shao, L. Y. and Wang, Z. L., “Application of digital image correlation to measurement of packaging material mechanical properties”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013 (1): 1-8 (2013).
33. Grytten, F., Daiyan, H., Polanco-Loria, M. and Dumoulin, S., “Use of digital image correlation to measure large-strain tensile properties of ductile thermoplastics”, *Polymer Testing*, 28 (6): 653-660 (2009).
34. Othman, R. and El-Qoubaa, Z., “Tensile behavior of polyetheretherketone over a wide range of strain rates”, *International Journal of Polymer Science*, 2015 (1): 1-9 (2015).
35. Heinz, S. R. and Wiggins, J. S., “Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation”, *Polymer Testing*, 29 (8): 925-932 (2010).
36. Dudescu, C. M., Adrian, B., Hărdău, M. and Bal, N., “Measurement of thermoplastics tensile proprieties using digital image correlation”, *Key Engineering Materials*, 601 (1): 33-36 (2014).

37. He, T., Liu, L., Makeev, A. and Shonkwiler, B., “Characterization of stress–strain behavior of composites using digital image correlation and finite element analysis”, *Composite Structures*, 140 (1): 84-93 (2016).
38. Hwang, S. F., Shen, M. C. and Hsu, B. B., “Strain measurement of polymer materials by digital image correlation combined with finite-element analysis”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29 (10): 4189-4195 (2015).
39. Voloshin, A. S. and Hung, P. C., “In-plane strain measurement by digital image correlation”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 25 (3): 215-221 (2003).
40. Sung, W. P. and Shih, M. H. “Developing dynamic digital image techniques with continuous parameters to detect structural damage”, *The Scientific World Journal*, 2013 (1): 1-7 (2013).
41. İnternet: Steel Strip Resources, “International Equivalents”, <http://steelstrip.co.uk/international-equivalents> (2018).
42. İnternet: ASTM International, “ASTM E8-Standard test methods for tension testing of metallic materials”, <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E8E8M-13.htm> (2017).
43. Sreenivasan, N., Xia, M., Lawson, S. and Zhou, Y., “Effect of laser welding on formability of DP980 steel”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 130 (1): 1-9 (2008).
44. İnternet: Waelzholz, “Specifications of C75s”, <https://www.waelzholz.com/en.html> (2018).
45. İnternet: Salzgitter Flachstahl, “22MnB5 material data sheet”, <https://www.salzgitter-flachstahl.de/en/index.html> (2005).
46. Aydın, M., Cisneros, J., Wu, X. and Çetinkaya, K., “Investigation practicability of digital image correlation technique to high temperature tensile test”, *The First International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE14)*, Karabük, 142-146 (2014).
47. İnternet: Transcat, “FLIR T300”, <http://www.transcat.com/media/pdf/FLIRT300data.pdf> (2018).
48. İnternet: Aremco, “Pyro-Paint™ 634-ZO coats induction heating coils”, <https://www.aremco.com/news-item/pyro-paint-634-zo-coats-induction-heating-coils> (2018).
49. Guo, X., Liang, J., Xiao, Z. and Cao, B., “Digital image correlation for large deformation applied in Ti alloy compression and tension test”, *Optik*, 125 (18): 5316-5322 (2014).

50. Pan, B., Wu, D. and Xia, Y., “An active imaging digital image correlation method for deformation measurement insensitive to ambient light”, *Optics & Laser Technology*, 44 (1): 204-209 (2012).
51. Wang, W., Mottershead, J. E., Siebert, T. and Pipino, A., “Frequency response functions of shape features from full-field vibration measurements using digital image correlation”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28 (1): 333-347 (2012).
52. Pan, B., Wu, D. and Xia, Y., “High-temperature deformation field measurement by combining transient aerodynamic heating simulation system and reliability-guided digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering*, 48 (9): 841-848 (2010).
53. İnternet: Canon, “EOS Rebel T3i EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II Lens Kit”, <https://shop.usa.canon.com/shop/en/catalog/eos-rebel-t3i-ef-s-18-55mm-is-ii-lens-kit> (2018).
54. İnternet: Digital Camera Database, “Canon T3i”, https://www.digicamdb.com/specs/canon_eos-rebel-t3i (2018).
55. Aydın, M. and Öz, Ö., “Sıcak çekme testinde alüminyum malzemelerin mekanik özelliklerinin imaj korelasyon yöntemi ile belirlenmesi”, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2017)*, Düzcce, 23-28 (2017).
56. Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H., “Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements”, *Springer*, Amerika Birleşik Devletleri, 1-3, 27-33, 65-67, 81-90, (2009).
57. Pan, B., Wu, D., Wang, Z. and Xia, Y., “High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200 °C”, *Measurement Science and Technology*, 22 (1): 1-12, (2011).
58. İnternet: ASTM International, “ASTM E643-15-Standard test method for ball punch deformation of metallic sheet material”, <https://www.astm.org/Standards/E643.htm> (2015).
59. Behrens, B., Hübner, S., Schaffner, C., Olle, P. and Schafer, F., “Conductive heating system for hot sheet metal forming”, *The 1st International Conference in Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, Kassel, Almanya, 49-52 (2008).
60. Terziakin, M., “Instant heating process with electric current application to the workpiece for high strength metal forming”, *USA Patent*, US6463779B1 (2002).
61. İnternet: Nikon, “D90 Specifications”, <https://www.nikon.com/index.htm> (2018).

62. İnternet: Imaging Resource, “Nikon D90 specifications”, <https://www.imaging-resource.com/PRODS/D90/D90DAT.HTM> (2018).
63. İnternet: Digicam Database, “Nikon D90”, https://www.digicamdb.com/specs/nikon_d90 (2018).
64. İnternet: Correlated Solutions, “Digital image correlation: overview of principles and software”, <http://www.correlatedsolutions.com> (2015).



ÖZGEÇMİŞ

Murat AYDIN 1982 yılında İzmir’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini İzmir’de tamamladı. İzmir Bornova Mimar Sinan Anadolu Teknik Lisesi Bilgisayar Yazılım Bölümü’nden mezun oldu. 2003 yılında Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Meslek Yüksek Okulu Bilgisayar Destekli Tasarım Bölümü’nü tamamlayıp, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği Bölümü’nü kazandı. 2006 yılında lisans eğitimini tamamlayarak, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü’nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2009 yılında Yüksek Lisans Derecesini alarak, aynı bölümde Doktora eğitimine başladı. 2008-2009 yılları arasında Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. 2009 yılında Karabük Üniversitesi bünyesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen görevine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK
Tel : (506) 406 4278
E-posta : murataydin@karabuk.edu.tr