

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK ÇEKME ELEMANLARININ EKLERİNDE
OLUŞAN DOĞRUSAL YER DEĞİŞTİRMELERİN
GÖRÜNTÜ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

İnş.Y.Müh. Şahin SÖZEN

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 22.09.2008

Tez Danışmanı : Prof. A. Zafer ÖZTÜRK (YTÜ)

İkinci Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr Murat GÜLER (ODTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Cavidan YORGUN (İTÜ)

Prof.Dr. Namık Kemal ÖZTORUN (İÜ)

Prof. İbrahim EKİZ (YTÜ)

Doç.Dr. Mustafa ZORBOZAN (YTÜ)

İSTANBUL,2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Özet	1
1.2 Tezin Önemi	2
1.3 Tezin Amacı	3
1.4 Tez Hipotezi	4
1.5 Materyal ve Yöntem	5
2. GÖRÜNTÜ YÖNTEMİYLE ANALİZ	8
2.1 Görüntü İşleme Yöntemleri	8
2.1.1 Görüntü İşleme	8
2.1.2 Nitelik Geliştirme	8
2.1.3 Restorasyon	9
2.1.4 Boyutsal Geliştirme	9
2.1.5 Kontrast İyileştirmesi	10
2.1.6 Görüntü Histogramları	10
2.1.7 Histogram Eşitleme	11
2.2 Görüntü Alma	12
2.3 Görüntü Analizi	14
2.3.1 Tanım	14
2.3.2 Bölümleme Yöntemleri	15
2.3.2.1 Treshold Tekniği	15
2.3.2.2 Kenar Belirleme Yöntemi	16
2.3.2.3 Alansal Bölümleme Yöntemi	16
2.4 Yapısal Bilgilerin Çıkarılması	17
2.4.1 Yapısal Özellik Çıkarma	17
2.5 Görüntü Tanımlama ve Eşleme	17
2.5.1 Tanım	17
2.5.2 Karar-Teorik Yöntemleri	18

2.5.3	Optik Akış Yöntemleri	18
2.5.4	Yapay Zekâ Yöntemleri.....	18
2.6	Görüntü Yöntemlerinin Çelik Yapı Elemanlarına Uygulanması.....	19
2.6.1	Çelik T-Stub Birleşimlerde Şekil Değiştirme Ölçümleri (Spyrou vd., 2001)	19
2.6.1.1	Özet.....	19
2.6.1.2	Sonuç	20
2.6.2	Modüler Bağlantı Sisteminin Dijital Görüntü Korelasyonu ile Deformasyon Analizi (De Roover vd., 2002)	21
2.6.2.1	Özet.....	21
2.6.2.2	Sonuç	22
3.	BLOK EŞLEME METODU.....	23
3.1	Tanım.....	23
3.2	Eşleme Kriteri.....	24
3.3	Arama Yöntemi	25
3.4	Üç Adım Arama.....	26
3.5	Çapraz Arama	27
4.	STANDART ÖRNEKLER İÇİN ÇEKME DENEYLERİ.....	29
4.1	Standart Örneklerin Hazırlanması	29
4.2	Çekme Deney Düzenegi ve Deney Parametreleri	32
4.2.1	Çekme Cihazı	33
4.2.2	Dijital Kameralar	34
4.2.3	Yer Değiştirme Sensörü (LVDT)	35
4.2.4	Işık Kaynakları	35
4.2.5	Birim Şekil Değiştirme Ölçer (Strain Gage)	36
4.2.6	Ekstensometre.....	36
4.3	Veri Toplama Sistemi.....	37
4.4	Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi	38
4.4.1	NS1, NS2 ve NS3 Örneklerine Ait Deneyler	38
4.4.2	SG1, SG2 ve SG3 Örneklerine Ait Deneyler	39
4.4.3	EXT1, EXT2 ve EXT3 Örneklerine Ait Deneyler	42
4.5	Görüntü Analizlerinden ve Birim Şekil Değiştirme Sensörlerinden Elde Edilen Birim Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması	43
4.5.1	Ardışık Karşılaştırma Yöntemine Kısa Bir Bakış	43
4.5.2	Birim Şekil Değiştirme Analizi İçin Gerekli Görüntü Sayısının Belirlenmesi	46
4.5.3	Dijital Görüntülerden Birim Şekil Değiştirmelerin Hesaplanması.....	47
4.5.4	Birim Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması	48
4.5.4.1	SG1 Örneği Birim Şekil Değiştirme Analizi.....	49
4.5.4.2	SG2 Örneği Birim Şekil Değiştirme Analizi.....	50
4.5.4.3	SG3 Örneği Deformasyon Analizleri	51
4.5.5	Standart Örnek Deneyleri için Sonuç ve Değerlendirme	52
5.	ÇELİK ÇEKME ELEMANLARININ EKLERİNİN HAZIRLANMASI VE TEST EDİLMESİ.....	53
5.1	Birleşimlerin Tasarlanması ve Örneklerin Hazırlanması	53
5.1.1	Kaynaklı Birleşimler.....	59
5.1.2	Bulonlu (Cıvatalı) Birleşimler	62
5.2	Deney Düzenegi ve Deney Parametreleri.....	65

5.3	Çekme Deneylerinin Yapılması ve Görüntülerin Kaydedilmesi.....	67
5.3.1	Şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış kaynaklı birleşimler	68
5.3.2	Kaynaklı Birleşim Deneylerine Ait Değerlendirmeler	72
5.3.3	Bulonlu (Cıvatalı) Birleşim Deneyleri	73
5.4	Doğrusal Deformasyon Haritalarının Oluşturulması.....	74
5.4.1	Matlab® Program Kodları	74
5.4.2	Birleşimlerin şekil değiştirme haritalarının oluşturulması	76
5.4.3	Kaynaklı birleşimler	78
5.4.3.1	Dar ek levhali kaynaklı birleşim.....	78
5.4.3.2	Geniş ek levhali kaynaklı birleşim	81
5.4.4	Bulonlu birleşimler	83
5.4.4.1	Dar ek levhali bulonlu birleşim	83
5.4.4.2	Geniş ek levhali bulonlu birleşim.....	85
6.	SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE BİRLEŞİMLERİN MODELLEMESİ ve ŞEKİL DEĞİŞTİRMELERİN KARŞILAŞTIRILMASI	87
6.1	Birleşimlerin Sonlu Elemanlar Modeli	87
6.1.1	Sonlu Elemanlar Modeli Sınır Şartları	88
6.1.2	Yükleme Durumu	90
6.1.3	Kaynaklı Birleşimler.....	90
6.1.3.1	Dar ek levhali kaynaklı birleşim.....	90
6.1.3.2	Geniş ek levhali kayaklı birleşim	94
6.1.4	Bulonlu Birleşimler	96
6.1.4.1	Dar ek levhali bulonlu birleşim	96
6.1.4.2	Geniş ek levhali bulonlu birleşim.....	99
7.	SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	103
8.	GELECEKTE ARAŞTIRILMASI ÖNERİLEN KONULAR.....	107
	KAYNAKLAR.....	108
	EKLER	111
	Ek 1 Yer değiştirme vektörlerinin hesaplanmasında kullanılan Matlab® algoritması.	112
	Ek 2 Şekil değiştirme haritalarının oluşturulmasında kullanılan Matlab® algoritması.	117
	Ek 3 Görüntülerin düzenlenmesinde kullanılan Matlab® algoritması.	119
	Ek 4 Birleşimlere ait	120
	ÖZGEÇMİŞ.....	124

SİMGE LİSTESİ

σ_a	Akma gerilmesi
σ_u	Kopma gerilmesi
ε	Birim şekil değiştirme
E	Elastisite Modülü
ν	Poisson oranı
U_f	Kaynak için kopma birim şekil değiştirmesi

KISALTMA LİSTESİ

BMP	Bitmap resim dosyası biçimi
CBD	Dar ek levhalı bulonlu birleşim
CBG	Geniş ek levhalı bulonlu birleşim
COV	Varyans katsayısı
EXT	Üzerine ekstensometre bağlanmış standart örnek
KBD	Dar ek levhalı kaynaklı birleşim
KBG	Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim
KBSG	Deformasyon ölçerli kaynaklı birleşim
LVDT	Deformasyon ölçer
MAD	Minimum ortalama mutlak fark
MPC	Maksimum eşlenen piksel sayısı
MSE	Minimum kare hatası
NS	Üzerinde deformasyon ölçer bulunmayan standart örnek
RGB	Red, Green, Blue
SG	Üzerinde deformasyon ölçer bulunan standart örnek
TXT	Metin dosyası biçimi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çelik çekme deneylerinde kullanılacak standart örnek.....	5
Şekil 1.2 Çelik çekme deneylerinde kullanılacak standart ve birleşim örnekleri test şeması.	6
Şekil 1.3 Çelik çekme deneylerine ait genel test şeması.	7
Şekil 2.1 Görüntü işleme uygulamasının tipik aşamaları.	9
Şekil 2.2 Bir Histogram Örneği.....	11
Şekil 2.3 (a) Agregta görüntüsünde seçilmiş bölgeye uygulanan histogram eşitleme işleminin sonucu, (b) seçilmiş bölgeye ait eşitlenmiş histogram, (c) seçilmiş bölgeye ait eşitlenmemiş histogram (Tekalp, 1995).....	13
Şekil 2.4 Tipik bir görüntü alma cihazındaki işlem sırası.	14
Şekil 2.5 Deneyde kullanılan tipik birleşim (Spyrou vd., 2001).	20
Şekil 2.6 Modüler elemanlardan oluşan köprü yapısı (De Roover vd., 2002).	22
Şekil 3.1 Blok Eşleme	23
Şekil 3.2 Üç adım arama stratejisi	26
Şekil 3.3 Çapraz arama stratejisi	27
Şekil 4.1 Standart Örnek.....	29
Şekil 4.2 Örneklerin spreyl boya ile beyaza boyanması.....	31
Şekil 4.3 Temizlenmiş ve boyanmış örnekler.	31
Şekil 4.4 Boyanmış örnekler üzerine siyah ahşap boyası ile desen oluşturulması.....	32
Şekil 4.5 Siyah ahşap boyası ile üzerine desen oluşturulmuş örnekler.	32
Şekil 4.6 Çekme cihazı.	33
Şekil 4.7 Dijital kamera ve sehpa.	34
Şekil 4.8 Fire Wire iletişim portu ve kartı.	35
Şekil 4.9 Işık kaynakları.	36
Şekil 4.10 Örnek üzerine bağlı ekstensometre.	37
Şekil 4.11 NS1 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	38
Şekil 4.12 NS2 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	39
Şekil 4.13 NS3 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	39
Şekil 4.14 Üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış standart örnek.	40
Şekil 4.15 SG1 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	40
Şekil 4.16 SG2 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	41
Şekil 4.17 SG3 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	41

Şekil 4.18 Peppers ve Onion isimli fotoğraflar (The MathWorks User's Guide, (2004)).	43
Şekil 4.19 Eşleştirilme grafiği (The MathWorks User's Guide, (2004)).	44
Şekil 4.20 Çakıştırılan iki resim (The MathWorks User's Guide, (2004)).	45
Şekil 4.21 SG1 örneği birim şekil değiştirme-zaman grafiği.	46
Şekil 4.22 SG1 örneği yer değiştirme grafiği.	47
Şekil 4.23 Şekil değiştirme ölçer bölgesi.	48
Şekil 4.24 Görüntü analizinden ve şekil değiştirme ölçerden elde edilen birim şekil değiştirmelerin karşılaştırılması.	49
Şekil 4.25 SG1 örneği için görüntü yöntemi ile birim şekil değiştirme analizi.	50
Şekil 4.26 SG2 örneği için görüntü yöntemi ile birim şekil değiştirme analizi.	51
Şekil 4.27 SG3 örneği için görüntü yöntemi ile birim şekil değiştirme analizi.	52
Şekil 5.1 Birleştirilecek parçalara ait detay.	53
Şekil 5.2 Dar çeneler kullanılarak yapılan yüklemede gerilme dağılımı.	54
Şekil 5.3 Ek mesnet detayı ile birleştirilmiş deney örneğinde gerilme dağılımı.	55
Şekil 5.4 Çekme cihazı çene bağlantısı detayı.	56
Şekil 5.5 Çene bağlantı detaylarıyla tipik birleşim örneği.	56
Şekil 5.6 KBSG1 örneği fotoğrafı.	58
Şekil 5.7 Üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış kaynaklı birleşim örneği (KBSG1).	59
Şekil 5.8 Çekme cihazına bağlanmış KBSG1 örneğinin deney öncesi görüntüsü.	59
Şekil 5.9 Geniş ek levhali kaynaklı birleşim örneği detayı.	60
Şekil 5.10 Geniş ek levhali kaynaklı birleşim örnekleri.	61
Şekil 5.11 Dar ek levhali kaynaklı birleşim örneği detayı.	61
Şekil 5.12 Dar ek levhali kaynaklı birleşim örnekleri.	62
Şekil 5.13 Geniş ek levhali bulonlu (cıvatalı) birleşim örneği detayı.	63
Şekil 5.14 Geniş ek levhali bulonlu (cıvatalı) birleşim örnekleri.	63
Şekil 5.15 Dar ek levhali bulonlu (cıvatalı) birleşim örneği detayı.	64
Şekil 5.16 Dar ek levhali bulonlu (cıvatalı) birleşim örnekleri.	64
Şekil 5.17 Aynı anda görüntü alan kameralar ve ışık kaynakları.	66
Şekil 5.18 Aynı anda görüntü alan kameralar ve deney örneği.	66
Şekil 5.19 Deney düzeneği testine ait görüntü.	67
Şekil 5.20 KBSG1 örneği kuvvet-zaman grafiği.	68
Şekil 5.21 KBSG1 örneği birim şekil değiştirme-zaman grafiği.	69
Şekil 5.22 KBSG1 örnek görüntüsü ve üzerindeki şekil değiştirme ölçer bölgesi.	70
Şekil 5.23 KBSG1 örneği şekil değiştirme dağılımı.	71

Şekil 5.24 KBSG1 ve KBSG2 örnekleri birim şekil değiştirme karşılaştırması	72
Şekil 5.25 Kaynaklı birleşimlerin deney sonrası görüntüleri.	72
Şekil 5.26 KBD1 ve KBG1 örnekleri kuvvet-şekil değiştirme grafikleri.	73
Şekil 5.27 Bulonlu (civatalı) birleşimlerin deney sonrası görüntüleri.....	74
Şekil 5.28 CBD1 ve CBG1 örneklerine ait kuvvet-şekil değiştirme grafiği.	74
Şekil 5.29 Kırılmadan önceki örnek görüntüsü	75
Şekil 5.30 KBD1 örneği yer değiştirme vektör grafiği.	79
Şekil 5.31 KBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.	80
Şekil 5.32 KBD1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme haritası.....	81
Şekil 5.33 KBG1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.....	82
Şekil 5.34 CBD1 örneği yer değiştirme vektör grafiği.....	83
Şekil 5.35 CBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.	84
Şekil 5.36 CBD1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme haritası.....	85
Şekil 5.37 CBG1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.	86
Şekil 5.38 CBG1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme haritası.....	86
Şekil 6.1 Birleşim çeliği malzeme modeli.....	87
Şekil 6.2 Birleşimlerde kullanılan kaynağa ait malzeme modeli.	88
Şekil 6.3 Birleşim örneği 3D resmi.	89
Şekil 6.4 Birleşimin y-z düzlemindeki simetrik yapısıyla modellenen yarısı.	89
Şekil 6.5 Birleşimin x-y düzlemindeki simetrik yapısıyla modellenen yarısı.....	89
Şekil 6.6 KBD1 örneğine ait Ansys® modeli.	91
Şekil 6.7 Solid95 eleman geometrisi (Ansys, Inc. Theory Reference).....	91
Şekil 6.8 KBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme dağılımı.	92
Şekil 6.9 KBD1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme dağılımı.	93
Şekil 6.10 KBG1 örneğine ait Ansys® modeli.....	94
Şekil 6.11 KBG1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme dağılımı.	95
Şekil 6.12 Solid92 eleman geometrisi (Ansys, Inc. Theory Reference).	96
Şekil 6.13 Conta174 eleman geometrisi (Ansys, Inc. Theory Reference).	97
Şekil 6.14 CBD1 örneği Ansys® modeli.	98
Şekil 6.15 CBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme dağılımı.....	99
Şekil 6.16 CBG1 örneği Ansys® modeli.....	100
Şekil 6.17 CBG1 örneği şekil değiştirme dağılımı.....	101
Şekil Ek 4.1 CBD2 örneği şekil değiştirme dağılımı.	120
Şekil Ek 4.2 CBD3 örneği şekil değiştirme dağılımı.	120

Şekil Ek 4.3 CBG2 örneği şekil değiştirme dağılımı.	121
Şekil Ek 4.4 CBG3 örneği şekil değiştirme dağılımı.	121
Şekil Ek 4.5 KBD2 örneği şekil değiştirme dağılımı.	122
Şekil Ek 4.6 KBD3 örneği şekil değiştirme dağılımı.	122
Şekil Ek 4.7 KBG2 örneği şekil değiştirme dağılımı.	123
Şekil Ek 4.8 KBG3 örneği şekil değiştirme dağılımı.	123

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1 Standart örneklere ait mekanik veriler.	42
Tablo 4.2 SG1, SG2 ve SG3 örnekleri birim şekil değiştirme değerleri.	48
Tablo 5.1 KBSG1 ve KBSG2 örneklerine ait birim şekil değiştirmeler.	72

ÖNSÖZ

Doktora çalışması tamamlanması zor bir süreci içerisinde barındıran çalışmalardandır. Bir doktora öğrencisinin bu çalışmayı yardım almadan bitirebilmesi ise, neredeyse imkânsızdır. Ben de diğer tüm doktora öğrencileri gibi tez çalışmam için, teşekkürden çok fazlasını hak eden, yakınımnda veya uzakta bulunan birçok kişiden yardım aldım.

Öncelikle bilgi ve tecrübesiyle sürekli desteğini benden esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. A. Zafer ÖZTÜRK bey'e, bütün bir doktora sürecinde bana göstermiş olduğu anlayış, sabır ve hoşgörü için sonsuz teşekkür ederim. Tez aşamasında, konunun belirlenmesinden başlayıp, tez çalışmasının sonuçlandırılmasına kadar geçen sürede bana tanıdığı geniş inisiyatif sayesinde çalışmamı tamamlayabildim.

Çalışmamın tez öneri safhasında devreye giren ve O olmadan asla tamamlayamayacağım orijinal bir tez konusunu bana öneren, sonraki aşamada da ikinci danışmanım olarak bana yol gösteren, sürekli yardımlarını hiç esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat GÜLER bey'e teşekkür ederim. Çalışmamın deneysel bölümlerini, sorumlusu bulunduğu Orta Doğu Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında gerçekleştirdim. Bu anlamda, bütün laboratuvar imkânlarını benim çalışmam için seferber edip, zaman mefhumu gözetmeksizin, enstrümantasyonu çok yüksek olan deneysel çalışmamın başından sonuna kadar, istisnasız bütün deneylerde hem bilgisi ve tecrübesiyle hem de bizzat deneylere katılarak deneyleri kontrol etmiş ve yönetmiştir. Göstermiş olduğu yakınlığa, sabır ve anlayışa teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında benim için nefes alma noktaları olan ve yapa geldiklerimi her altı ayda bir kendilerinin kontrolüne ve eleştirilerine sunduğum, her sunumda bana verdikleri öneri ve yapıcı eleştirilerle çalışmamın adeta yol haritasını çizen, tez izleme komitesindeki hocalarım, Sayın Prof. Dr. Cavidan YORGUN hanımefendi'ye ve Sayın Doç. Dr. Mustafa ZORBOZAN bey'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamın uygulama bölümü oldukça pahalı bilgisayar donanımı gerektiren deneylerden oluşmuştur. Kişisel olarak altından kalkamayacağım boyuttaki maddi harcamalar için **“Görüntü Yöntemlerinin Beton Mikro Yapısında ve Çelik Birleşimlerin Deformasyon Davranışlarında Kullanılması”** isimli **105M085** numaralı projeyle çalışmamıza mali destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Çalışmamın bilgisayar programlama ve Matlab uygulamaları konularında sürekli yardımlarına başvurduğum, bütün tez süresince bana destek olan arkadaşlarım, Bilgisayar Yüksek Mühendisi Sayın Umut ORHAN ve İnşaat Yüksek Mühendisi Sayın Yrd.Doç.Dr. Naci AĞAOĞLU bey'e teşekkür ederim.

Son olarak böyle zorlu bir çalışma içerisinde bana sığınacak bir liman olan, huzur ve güven veren, beni cesaretlendiren, destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim. Yaşama sevincime kaynak olan eşime, çocuklarım Zeynep ve A.Emirhan'a ve ablama.

ÖZET

Bu tez çalışmasında çelik yapılarda kullanılan tipik kaynaklı ve bulonlu çekme elemanlarının yük altındaki şekil değiştirme dağılımlarının görüntü yöntemleriyle belirlenebilmesi konusu araştırılmıştır. Bilindiği gibi, yapı birleşim bölgesinde kullanılan malzeme cinsi, birleşim kalitesi ve imalat yöntemleri, çelik birleşimlerin davranışını ve böylece bütün yapı davranışını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdendir. İmal edilen birleşimlerin yük altındaki gerçek performansları ile bilgisayar modelleri yardımıyla hesaplanan performansları arasında doğabilecek farklılıklar, yapının hizmet ömrü açısından önemli bir problem oluşturmaktadır. Hizmet ömrü esnasındaki yapı davranışının doğru bir şekilde elde edilebilmesi ancak, kullanılan malzeme özelliklerinin ve yapı birleşim detaylarının tasarıma doğru bir şekilde yansıtılması ile sağlanabilir.

Birleşim noktalarında oluşan şekil değiştirmeler ve gerilmeler, günümüzde sadece kabul edilen malzeme parametreleri ve modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmekte, birleşimler laboratuvar şartlarında yalnızca mukavemet testleri ve şekil değiştirme karakterlerine göre değerlendirilmektedir. Birleşim detaylarına ait şekil değiştirme ve gerilme dağılımlarını, yerel şekil değiştirme bölgelerini, imalat hatalarından kaynaklanan yerel gerilme ve şekil değiştirme kaynaklarını ölçebilecek kullanılabilir bir yöntem bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu parametreler tasarım aşamasında göz ardı edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan deformasyon sensörleri ise deformasyon bilgisini yalnızca bir noktada ve doğrultuda, sadece belirli bir süre için sağladığından, deneyler sırasında gerilme şekil değiştirme dağılımını bütün ayrıntılarıyla belirlemek mümkün olamamaktadır.

Bu tez çalışmasında, yukarıdaki bilgiler ışığında çelik çekme elemanlarının çekme yükü altında ortaya koydukları şekil değiştirme davranışlarının bütün ayrıntılarıyla belirlenebilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, deneyler sırasında birleşimlerden periyodik olarak alınan dijital görüntülerinin analiz edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem yardımıyla yapılan şekil değiştirme analizlerinde, birleşim bölgesinin bütününe ait şekil değiştirme hareketi istenilen ve kabul edilebilir hassasiyet sınırlarında belirlenebilmiştir.

Birleşim bölgesinin tümüne ait şekil değiştirme hareketinin bütün ayrıntılarıyla belirlenebilmesinin, birleşimlerin performansı ve deformasyonlara ait mühendislik değerlendirmeleri açısından önemli bir veri olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında diğer deformasyon ölçüm yöntemlerine kıyasla çok önemli üstünlüklere sahip olan ve dijital görüntüler kullanılarak yapılan şekil değiştirme ölçümünün, çelik yapılarda kullanılan tipik çekme elemanları için oldukça hassas sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik Konstrüksiyon, Çelik Birleşim, Görüntü Yöntemleri, Görüntü İşleme, Görüntü Analizi.

DETERMINATION OF LINEAR DEFORMATIONS IN JOINTS OF STEEL TENSION ELEMENTS USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

ABSTRACT

In this thesis, determination of deformation distribution in welded and bolted tension elements typically used in steel structures is studied by using digital image processing methods. It is known that material properties, connection quality and manufacturing methods are of primary importance for the connections affecting the behavior of steel structures. The possible difference in performance between a fabricated connection and its computer model under a defined load may pose important problems for structures during their service life. If the material properties and loading conditions applied to the connection could be modeled correctly, the behavior of the structure during its service life can be estimated accurately.

Conventionally, the stress and strain distribution in connections is calculated using the finite elements method with assumed material properties and constitutive models. And connections are evaluated according to the deformation characteristics obtained from laboratory strength tests. However, there is no available method to measure the stress and strain distribution in connection components, local deformation zones and the stress-strain localizations caused by various manufacturing faults. The lack of such methods results in neglecting these important aspects during the design procedure. Because widely used conventional strain gages allow the measurement of deformation only at one point and direction for a specific time duration, it is not possible to determine a general characteristics of stress-strain distributions in connections after the laboratory performance tests.

In this thesis, a new method is developed to measure deformation distribution of steel tension elements under tension tests. The method is based on analyzing digital images of connection specimens taken periodically during the laboratory tension test. By using this method, deformation distribution of steel connections can be calculated with an acceptable precision for the tested connections.

It is believed that accurately determining the deformation behavior of steel connections and its components is very important for the evaluation of connection performance and deformation behavior in the engineering design problems.

In this thesis, it is concluded that in comparison with the conventional deformation measurement methods, the digital image processing method which has obvious advantages against the conventional methods provides acceptable results for the deformation distribution of typical welded and bolted tension elements subjected to the tension test.

Key Words: Steel structures, Steel connections, Image processing, Image acquisition, Image analysis.

1. GİRİŞ

1.1 Özet

Bu tez çalışmasında çelik yapılarda kullanılan çekme elemanlarının yük altındaki yer ve şekil değiştirme dağılımlarının görüntü yöntemleriyle belirlenebilmesi konusu araştırılmıştır. Bilindiği gibi, yapıların birleşim bölgesinde kullanılan malzeme cinsi, birleşim kalitesi ve imalat yöntemleri, çelik birleşimlerin davranışını ve böylece bütün yapı davranışını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdendir (Chen ve Sohal, 1995). İmal edilen birleşimlerin, yük altındaki gerçek performansları ile bilgisayar modelleri yardımıyla hesaplanan performansları arasında doğabilecek farklılıklar, yapının hizmet ömrü açısından önemli bir problem oluşturmaktadır. Hizmet ömrü esnasındaki yapı davranışının doğru bir şekilde elde edilebilmesi ancak, kullanılan malzeme özelliklerinin ve yapıların birleşim detaylarının tasarıma doğru bir şekilde yansıtılması ile sağlanabilir.

Birleşim noktalarında oluşan şekil değiştirmeler ve gerilmeler, günümüzde sadece kabul edilen malzeme parametreleri ve modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmekte, birleşimler laboratuvar şartlarında yalnızca mukavemet testleri ve deformasyon karakterlerine göre değerlendirilmektedir. Birleşimin bütün unsurlarına ait şekil değiştirme ve gerilme dağılımlarını hesaplayabilecek, yerel şekil değiştirme bölgelerini bütün içerisinde görebilecek, imalat hatalarından kaynaklanan yerel gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçebilecek kullanılabilir bir yöntem olmadığından, bu parametreler tasarım aşamasında göz ardı edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan deformasyon sensörleri (strain gage, ekstensometre vb.) ise, deformasyon bilgisini yalnızca bir noktada ve doğrultuda, sadece belirli bir süre için verdiği için, deneyler sırasında gerilme deformasyon dağılımını bütün ayrıntılarıyla belirlemek mümkün olamamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, tipik çelik çekme elemanlarında deney anında ortaya çıkan yer ve şekil değiştirme dağılımını bir bütün olarak belirleyebilecek kullanılabilir bir yöntem sunulmuştur. Tez çalışması aynı zamanda, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen **“Görüntü Yöntemlerinin Beton Mikro Yapısında ve Çelik Birleşimlerin Deformasyon Davranışlarında Kullanılması”** projesinin bir ayağını oluşturmuştur.

Tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tezin önemi, amacı, tez hipotezi, materyal ve yöntem ayrıntılarıyla ele alınmıştır.

İkinci bölümde, görüntü işleme konusunun teorik alt yapısı içerisinde, görüntü işleme yöntemleri, görüntü alma, görüntü analizi, yapısal bilgilerin çıkarılması, görüntü tanımlama ve eşleme ve görüntü yöntemlerinin çelik yapılara uygulanması konularında bilgiler verilmiştir. Yine bu bölümde görüntü işleme konusunda daha önce yapılmış çalışmalar değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde görüntü analizlerinde kullanılan blok eşleme metodunun teorisi ele alınarak örneklerle ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Tez çalışmasının omurgasını, üçüncü bölümü takip eden diğer dört bölüm oluşturmaktadır: Dördüncü bölüm, birleşim imalatlarında kullanılacak çelik malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve görüntü yöntemlerinin deformasyon sensörleriyle karşılaştırılmasının yapılacağı standart örnek testlerinden oluşmaktadır.

Beşinci bölümde, önceki bölümde malzeme parametreleri belirlenen çelik kullanılarak imal edilen basit, kaynaklı ve bulonlu (cıvatalı) çekme elemanlarının, çekme yükleri altında testleri yapılmış ve örneklerin dijital görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler analiz edilerek birleşimlerin şekil değiştirme dağılımları ve birim şekil değiştirmeleri hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde, beşinci bölümde deneyleri gerçekleştirilen çekme elemanlarının sonlu elemanlar modelleri, standart testlerden elde edilen malzeme model parametreleri kullanılarak hazırlanıp analiz edilmiş, analizlerden elde edilen şekil değiştirme dağılımları beşinci bölümde görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme dağılımlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölüm sonuç ve değerlendirmelerden oluşmaktadır.

Son bölüm olan sekizinci bölümde ise konuyla ilgili gelecekte yapılması önerilen çalışmalara yer verilmiştir.

1.2 Tezin Önemi

Bu tez çalışmasının özünü oluşturan görüntü yöntemlerini kullanarak yer ve şekil değiştirme hesabı yöntemi, hali hazırda kullanılmakta olan deformasyon ölçme yöntemleriyle kıyaslandığında önemli birçok avantaj sunmaktadır. Özellikle kaynaklı birleşimlerin sonlu elemanlar veya sayısal yöntemlerle modellenmesinde, kaynak performansı ve yük altındaki davranışı gerçeğe yakın olarak modele alınamamakta, imalat hatasından kaynaklanan etkilerin analizlere yansıtılması mümkün olmamaktadır. Birleşimlerin yük altındaki davranışları ve performansları ancak laboratuvar testleri sonuçlarından, birleşimin toplam mukavemeti veya

belirli bölgedeki yüksek şekil değiştirmeler olarak algılanmaktadır. Sayısal modellerde birleşim bir bütün veya rijit kabul edilmektedir. Oysa birleşimin imalatı esnasında oluşan ve bir ölçüde kaçınılmaz olan imalat hataları, birleşimden beklenen davranışının dışında bir performans sergilemesine neden olabilmektedir.

Yine bulonlu (cıvatalı) veya perçinli birleşimlerde de aynı şekilde, malzeme kalitesi ve birleşimin imalat yöntemine bağlı olan gerçek davranışı ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen davranışı birbirinden benzer nedenlerden dolayı farklı olabilmektedir.

Birleşim bölgelerinde görüntü yöntemlerinin kullanılmasıyla ölçülebilen yer ve şekil değiştirmeleri ve dolayısıyla elastik bölgedeki gerilme değerleri ve dağılımlarını, deformasyon ölçme sensörlerinde olduğu gibi tek bir noktada ve bir doğrultuda değil, birleşimin görüntülenen bütün kısmı için elde etmek mümkündür. Bu yöntem birleşim bölgesinde ortaya çıkan şekil değiştirmelerin veya yük altındaki deney örneğinin davranışının açıkça gözlenmesine imkân sağlamaktadır.

Görüntü yöntemleri kullanılarak şekil değiştirme ve sınırlı olarak gerilme ölçme yöntemi, aynı zamanda laboratuvar testlerinin ekonomikliği açısından da birçok avantaja sahiptir. Deformasyon sensörlerinin örneğe bağlanması zaman alıcı bir işlemdir. Ayrıca ölçümler ancak her bir örnek için bir noktada yapılabilmekte ve sensör, sadece bir defa kullanılabilir. Buna karşın görüntü yönteminde şekil değiştirmeler sadece dijital resimlerin analizi yapılarak farklı parametreler için kolayca ve defalarca hesaplanabilmektedir. Ayrıca deney düzeneğinin kurulması deformasyon sensörlerinin kullanıldığı deney düzenekleri ile kıyaslandığında oldukça kolaydır. Görüntü yöntemleri ile deformasyon analizleri aynı zamanda inşaat mühendisliğinin diğer birçok dalında da benzer amaçlar için başarıyla kullanılmaktadır (Güler vd., 1999; Aydilek vd., 2004; Frost vd., 1996; Hryciw vd., 1996a; 1996b; Macari vd., 1996; MCenteggrat vd., 1995 ve Donohoe vd., 1991).

1.3 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, çelik yapılarda kullanılan tipik kaynaklı ve bulonlu birleşimlerde çekme yükleri altında oluşan şekil değiştirmelerinin ve bağlantı noktası civarındaki dağılımlarının dijital görüntü yöntemleri kullanarak ölçülmesi araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında standart örnekler kullanılarak şekil değiştirmeler, hem deformasyon sensörleri, hem de dijital görüntüler yardımıyla ölçülmüş/hesaplanmış ve karşılaştırması yapılmıştır. İkinci aşamada kaynaklı ve bulonlu çekme elemanları çekme yükleri altında test edilerek dijital görüntüleri kaydedilmiş ve şekil değiştirmeler için analizleri yapılmıştır. Sonraki aşamada ise birleşim

detaylarının sonlu elemanlar modeli hazırlanarak yapılan çözümle aynı yüklemeler altında şekil değiştirme ve gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Test edilen bağlantılar için ölçülen/hesaplanan şekil değiştirme sonuçlarının hem sonlu elemanlar hem de görüntü yönteminden elde edilen sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Çelik yapı elemanlarının oluşturulmasında kullanılan birleşim detayları, yapının tasarlanan kullanım amacına ve dış etkilerden oluşacak yüklerin yapı üzerindeki etkilerine göre oldukça çeşitlilik göstermektedir. Çelik yapıların mühendislik tasarımı ve yüklemeler altındaki davranışlarının doğru bir şekilde analizinin yapılabilmesi, birleşim noktalarının yüklemeler altında oluşacak deformasyon davranışlarının imalattan önce ve gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesine bağlıdır. Yapı davranışının gerçekçi bir şekilde modellenmesi, özellikle çelik yüksek yapıların analizinde kullanılan sonlu elemanlar programlarında, çelik yapı malzemesi davranışını en iyi şekilde temsil edecek modellerin kullanılmasıyla mümkün olabilir. Başka bir deyimle doğru modelleme, kullanılan malzeme model parametrelerinin doğru bir şekilde kalibrasyonunun yapılmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu yönüyle bu tez çalışmasında önerilen şekil değiştirme ölçüm yöntemi, tipik birleşimlerde oluşan şekil değiştirmelerin laboratuvar şartlarında ölçülüp sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme modellerinin ve parametrelerinin değerlendirilmesi ve kalibrasyonunu amaçlanmaktadır.

1.4 Tez Hipotezi

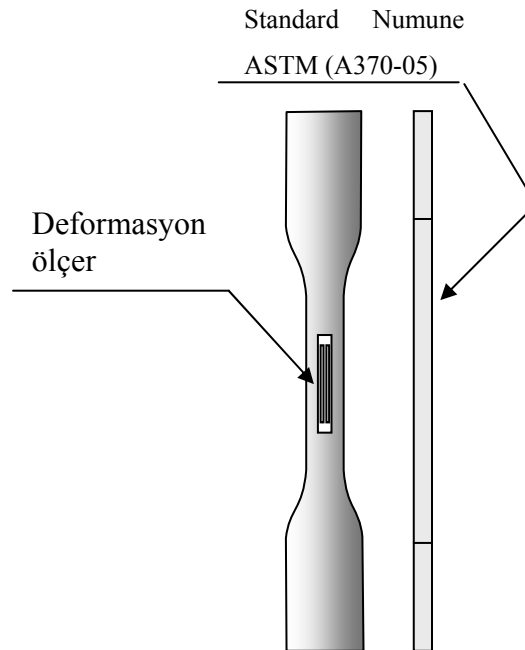
Yukarıda da belirtildiği gibi, bu tez çalışması görüntü yöntemlerinin kullanılmasında iki temel prensip üzerine dayanmaktadır. Bunlar; görüntü yöntemlerinin klasik deformasyon ölçme yöntemleriyle kıyaslandığında, kabul edilebilir oranda şekil değiştirme ölçümlerinde kullanılabilmesi ve yük altındaki deformasyon davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile yine kabul edilebilir oranda benzerlik göstermesidir. Bu varsayımlar ışığında tez hipotezleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Görüntü yöntemleriyle elde edilen şekil değiştirmeler, klasik deformasyon sensörleriyle ölçülen şekil değiştirme değerlerine kabul edilebilir derecede yakındır.
- Çelik birleşimlerin görüntü yöntemleriyle belirlenen şekil değiştirme davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan şekil değiştirme davranışlarına kabul edilebilir oranda yakındır.

1.5 Materyal ve Yöntem

Bu tezde, kaynaklı ve bulonlu çekme elemanlarının laboratuvarında çekme yüklemesine maruz bırakılmasıyla, birleşim noktalarında oluşan şekil değiştirme dağılımlarının ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hazırlanan birleşimlerde kullanılacak çelik malzemelerin seçimi ve birleşimlerin imalatı, mevcut şartnamelere göre yapılmıştır. Çelik malzemelerin seçimi ve malzeme parametrelerinin belirlenmesi için yapılan çelik çekme deneyleri, A370-05 (Çelik Malzemeler İçin Standard Deney Yöntemleri ve Kavramlar) şartnamesine göre yapılmıştır. Kaynaklı birleşimler için AISI (American Iron and Steel Institute)'da belirlenen şartlar dikkate alınmıştır.

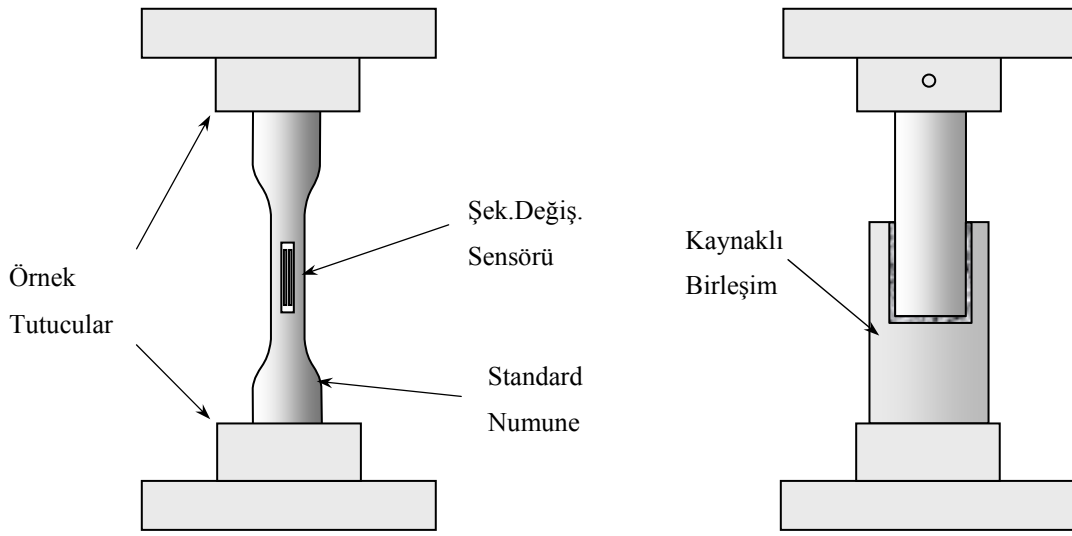
Birleşim detaylarının görüntü yöntemleriyle analizinden önce, yöntemin standart çelik çekme deneyinde geçerliliğinin ispatlanması gerekmektedir. Bu amaçla A370-05 şartnamesine göre, çelik kaynaklı ve bulonlu (cıvatalı) çekme elemanlarında kullanılacak çelik malzemeden hazırlanan örnekler test edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan standart örnek Şekil 1.1'de görülmektedir. Standart örnekler ve birleşimlere ait ayrıntılı bilgiler sonraki bölümlerde verilmiştir.



Şekil 1.1 Çelik çekme deneylerinde kullanılacak standart örnek.

Çekme deneyinde kullanılacak örnekler üzerine deneylerden önce deformasyon sensörleri yerleştirilmiştir. Deney anında uygulanan çekme kuvveti, gerilme değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiş, aynı zamanda deformasyon sensörlerinin alanından dijital görüntüler

kaydedilmiştir (Şekil 1.2). Deneyler sonrasında, sensörler yardımıyla ölçülen şekil değiştirmeler ve dijital görüntülerden hesaplanan şekil değiştirmeler karşılaştırılarak, tezin birinci hipotezinin doğruluğu araştırılmıştır. Bu deney ayrıca, altıncı bölümde gerçekleştirilen birleşimlerin sonlu elemanlar modellerinde kullanılan malzeme parametrelerinin [Elastisite Modülü (E), Akma Gerilmesi (σ_y) ve Kopma Gerilmesi (σ_u)] belirlenmesi için gereklidir. Bu parametreler yapılacak olan çekme deneylerinden sonra hesaplanarak verilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan deformasyon sensörlerinden elde edilecek şekil değiştirme değerlerinin görüntü yöntemlerinden elde edilen şekil değiştirmelerle kıyaslaması yapılmış, bu şekil değiştirmeler değerlendirilmiş ve kontrol edilmiştir.



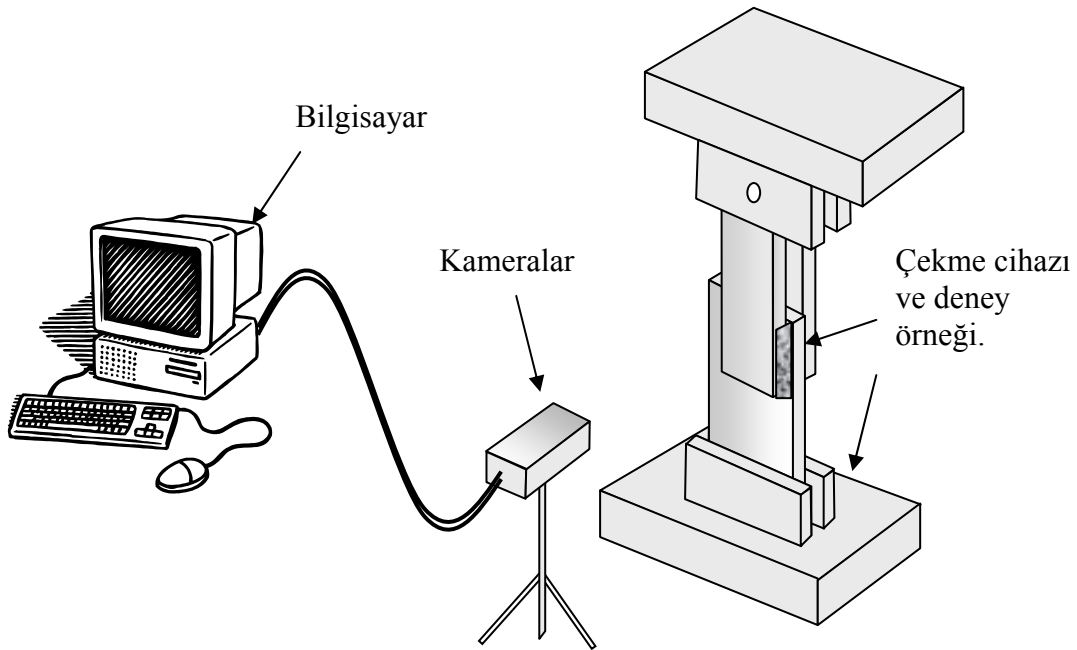
Şekil 1.2 Çelik çekme deneylerinde kullanılacak standart ve birleşim örnekleri test şeması.

Tez çalışmasının üçüncü aşamasında tipik kaynaklı ve bulonlu çekme elemanları imal edilerek yine çekme testlerine tabi tutulmuşlardır (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3). Çekme deneyleri sabit deformasyon hızında gerçekleştirilmiş, deney anında yük ve deformasyon verileri kaydedilmiştir. Dijital görüntüler örnek üzerinden endüstriyel tip FireWire kameralar vasıtasıyla eşit zaman aralıklarında alınarak bilgisayara kaydedilmiş, görüntüler daha sonra dijital görüntü eşleme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Blok eşleme metodu yardımıyla her iki görüntü arasındaki toplam şekil değiştirme, birleşim bölgesinde şekil değiştirme vektörlerine dönüştürüldükten sonra şekil değiştirme dağılımları hesaplanmıştır. Elastik bölge sınırlarında malzemelerin gerilme değerleri ile birim şekil değiştirme değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğundan, deformasyon dağılımları aynı zamanda elastik bölgede gerilme dağılımlarını da temsil etmiş olacaktır. Bu öngörüler ancak şekil değiştirmelerin hassas bir şekilde hesaplanmasına bağlıdır. Ölçülecek en büyük ve en küçük

şekil değiştirme değerleri ve birleşim bölgesindeki dağılımı, birleşim cinsine ve performansına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmayla, bu deformasyon değişimlerini elde ederek, çeşitli birleşimlerin yük altındaki davranışlarının imalat kalitesi ve performansları bakımından kıyaslamasını yapmak mümkün olmaktadır.

Tez çalışmasının son aşamasında ise, test edilen çekme elemanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile elastik-plastik malzeme modelleri kullanarak birleşim bölgesindeki şekil değiştirme ve gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Çözümlerden hesaplanan şekil değiştirmeler görüntü yöntemiyle elde edilen değerlerle karşılaştırılarak, hem kullanılan malzeme modelinin birleşimi ne kadar iyi temsil ettiği, hem de model parametrelerinin (Elastisite Modülü, Poisson Oranı, Akma Gerilmesi ve Kopma Gerilmesi, vb.) geçerliliği araştırılmıştır. Bu bölümde birleşimlerin üç boyutlu sonlu elemanlar modellenmesi Ansys® programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışma sonunda, sonlu elemanlar çözümünde değişik birleşimlerin yük altındaki performansını en iyi şekilde temsil edecek malzeme modelleri ve parametreleri hakkında öneriler getirilmiş olacaktır.

Böylece bu tez çalışmasıyla, klasik yöntemlerle tek noktada ve doğrultuda ölçülebilen şekil değiştirme değerlerinin, dijital görüntü yöntemi ile bütün birleşim bölgesi için daha kısa zamanda ve etkin bir şekilde ölçülmesi için bir yöntem geliştirilmiş olmaktadır.



Şekil 1.3 Çelik çekme deneylerine ait genel test şeması.

2. GÖRÜNTÜ YÖNTEMİYLE ANALİZ

2.1 Görüntü İşleme Yöntemleri

2.1.1 Görüntü İşleme

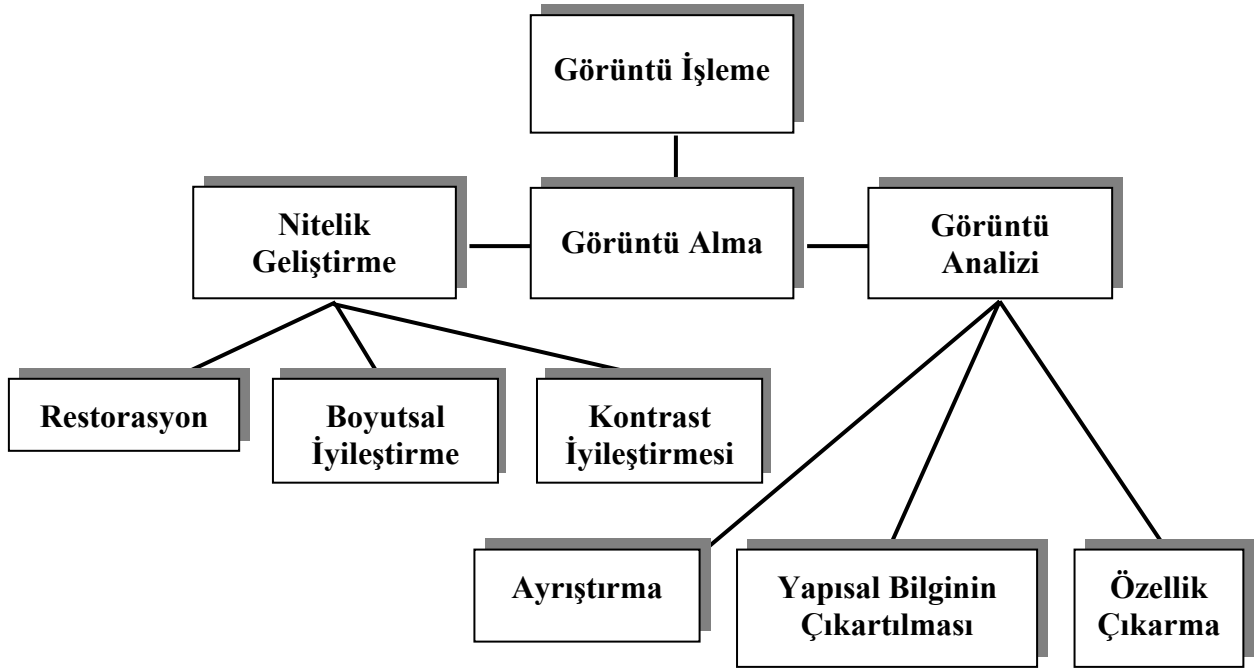
Görüntü işleme genel olarak, bir uygulamadan özel, ilave bilgileri elde etmek için alınan görüntülerin analizi ve düzeltilmesini ifade etmektedir (Gonzalez vd., 1993). Görüntü işlemenin düzeltme kısmı görselliğin arttırılabilmesi işlemlerini içerirken analiz kısmı, elde edilen bilgilerin değerlendirilebilmesi için istatistik metotlarını kullanmaktadır. Dijital görüntü işleme resimle ilgili olmaktan ziyade, uygulamadan elde edilmiş ve uygulamanın çeşidine göre değişen dijital bilgilerin analizi esasına dayanır. Dijital formdaki her bir resim elemanının (piksel) yoğunluk seviyesi istenilen bilginin elde edilmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Tipik bir görüntü işleme 3 aşamalı bir işlemdir. Bu işlemler Şekil 2,1’de gösterilen asıl uygulamalar için alt işlem basamaklarını da kapsamaktadır. Bu işlemler, nitelik geliştirme, görüntü toplama ve görüntü işleme olarak sıralanabilir.

2.1.2 Nitelik Geliştirme

Bu işlem resimlerin görselliğinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan sanal veya nesnel düzeltmelerdir. Sanal düzeltmeler, bir görüntüyü daha güzel görünümlü hale getirmek için uygulanabilir ve özel olmayan görüntü geliştirme işlemlerini içerir. Diğer taraftan nesnel görüntü geliştirme teknikleri görüntünün kesin detaylarını açığa çıkarmak için yürütülen özel işlemlerdir. Örneğin; bazı özel detayları elde edebilmek amacıyla görüntünün bir bölümünün keskinleştirilmesi, görüntüdeki bir takım hataların giderilmesi için bir bölümünün bulanıklaştırılması, bu uygulamalar için örnek verilebilir. Bu teknikler özel olmayan geliştirme uygulamalarıyla kıyaslandığında genel olarak daha belirli geliştirme tekniklerini içermektedir.

Kalite geliştirme teknikleri içerisinde görüntü bilgilerinin kullanıldığı bir uygulamanın amacına bağlı olmak üzere üç ana kategoriye bölünebilir. Bunlar, restorasyon, boyutsal geliştirme ve kontrast iyileştirmeleridir. Restorasyon sorgulanan resme ait ayrışma örneklerinin matematik modelini kullanan bir düzeltme biçimidir. Kontrast geliştirme bir görüntünün parlaklığının ayarlanmasını içeren bir iyileştirmedir. Boyutsal geliştirme ise özel bazı detayların değişikliği ile ilgilenmektedir. Örnek olarak keskinleştirme filtreleri

kullanarak kenar hatların iyileştirilmesi veya parlak bölümdeki keskin geçişlerin eşitlenmesi için bulanıklık filtresi kullanımı verilebilir (Baxes, 1984).



Şekil 2.1 Görüntü işleme uygulamasının tipik aşamaları.

2.1.3 Restorasyon

Restorasyon teknikleri ayrışma-bozulma sebeplerinin matematiksel olarak belirlenebildiği durumlarda kullanılır. Muhtemel bozulmalar, görüntü alanında bulunan cihazlardan, piksellerin parlaklık seviyelerindeki lineer olmayan dağılımdan, hava türbülansı ve görüntüsü alınan objenin hareket etmesi veya yakında oluşan bir gürültü nedeniyle ortaya çıkabilir. Genel olarak kullanılacak model, normalde bozulmanın analitik veya ampirik ifadesi olacaktır. Yine de, her iki durumda da modellemede çok önemli olan parametrelerin doğru ölçülmesi en iyi restorasyon teknikleri için gereklidir (Lewis, 1990).

2.1.4 Boyutsal Geliştirme

Bu yöntem, sıklıkla iki boyutlu görüntünün geliştirilmesine karşılık gelen boyutsal ve düzlemsel karakteristiklerin değişimiyle ilgilenir. Boyutsal bozulma düzeltilmesi tekniklerinde obje yapısını daha görülebilir kılmak için, genellikle kenar iyileştirme filtreleri kullanılmaktadır. Komşu cihazlarının neden olduğu bozulmalar veya görüntü alan cihazın lineer olmamasından kaynaklanan gürültü iyileştirmeleri de mevcuttur. Kullanılan teknik ne olursa olsun nihai görüntüler kalite olarak bozulmuş olanlardan çok daha iyidir (Baxes, 1984).

2.1.5 Kontrast İyileştirmesi

Kontrast iyileştirmesi görüntü içerisindeki parlaklık dağılımı üzerine odaklanır. Siyah beyaz bir görüntüde tüm gri tonlar kullanılmıyorsa, görüntüde daha az detay yakalanabilir ki bu tarz bir görüntü için zayıf kontrastlı görüntü ifadesi kullanılabilir. Kontrastı geliştirilmiş görüntüler, tamamen siyahtan beyaza değişen dengeli bir parlaklık dağılımı sunarlar. Düşük kontrastlı görüntüler soluk olarak algılanır. Kontrast iyileştirmesinin hedefi görüntünün asıl ve değişmeyen özelliklerini ortaya koymaktır (Lewis, 1990).

2.1.6 Görüntü Histogramları

Histogramlar çalışılan alandaki gri tonların dağılımının grafik olarak gösterilmesidir. Histogramlar, özellikle görüntü alma sırasında uygulanan sayısallaştırma işleminde bütün gri tonların kullanımında olup olmadığının araştırılmasında önem kazanmaktadır. Bir 8 bit renksiz görüntü, sayısal olarak aktif $256 (=2^8)$ adet gri tonlamaya sahiptir. Histogramdaki pik noktalar, görüntü alma esnasındaki sayısallaştırma ve aydınlatmadaki başarı vasıtasıyla bazı önemli ve faydalı bilgiler verebilir. Aydınlatmada veya veri alırken ortaya çıkan herhangi bir değişiklik histogramdan anlaşılabilir ve görüntü kalitesinin artması için gerekli ayarlamalar yapılabilir. Genel olarak birbirine yakın gri tonlara sahip pikselleri olan bir görüntü, histogramda pik noktalar ortaya koyarken, düz bölümler görüntüde çok sayıda farklı gri tonlu piksellerin varlığına işaret eder. Histogramlar her görüntü için eşsiz bir gri ton dağılımı sunar. Aynı alanı temsil eden aynı mesafeden alınmış eşit boyutlu görüntülere ait histogramlar gri tonlardaki dağılımı gösterebilir. Gri ton dağılımındaki bu eşitsizlik aydınlatma sistemi ve dijitalasyon işlemlerinin sonucudur (Russ, 1992).

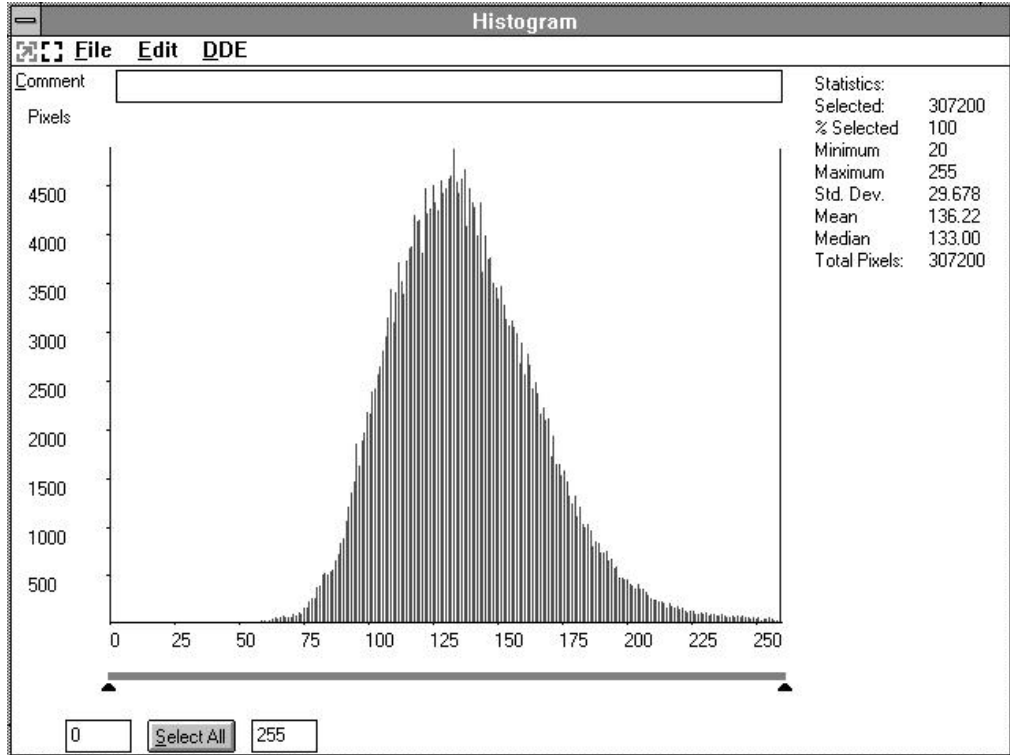
Histogramlar gri ton dağılımını belirli bir gri ton değerindeki piksel sayısının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Görüntü işleme uygulamalarında kullanılan histogramların birçok çeşidi vardır. Artan trende sahip histogramlarda, yatay eksen sahip olunan piksel değerini, dikey eksen piksel değerinin ihtimalinin bir fonksiyonunu ifade eder. Bu histogram üzerinde çalışılan alan içerisinde kalan tüm pikseller için çizilir. Yine histogramları gri ton değerlerinin bir fonksiyonu olarak çizmek de mümkündür. Yine de her iki yöntemden olasılık dağılımı daha makul sonuçlar üretmektedir. Şekil 2.2’de böyle bir histogram örnek olarak gösterilmektedir. Kümülatif histogramlar da bu histogramlarla benzer olmakla beraber, aynı zamanda gri ton değerlerinin dağılımının ihtimalini de gösterilmektedir. Bu tip histogramlardaki tek fark, bir gri ton değerine eşit veya ondan daha küçük olma ihtimali dikey eksen üzerinde gösterilmektedir. Yatay eksen üzerinde piksel değerleri gösterilmektedir. Her

iki gösterim de görüntülerin kalitelerinin ifadelerinde ve kullanımında olan gri ton aralığının büyüklüğünü görmek için görüntü alma işleminin etkinliğini göstermede faydalıdır.

2.1.7 Histogram Eşitleme

Histogram eşitlemenin amacı, bütün görüntü alanıyla karşılaştırıldığında piksel ağırlığının rölatif olarak daha büyük olduğu yerel kısımlarda piksel sayısının yeniden ayarlanarak bir görüntünün görselliğinin iyileştirilmesidir. Bu amaçla kullanılan genel yöntem, çalışılan alan üzerindeki her gri seviye için kümülâtif ihtimali hesaplamak ve onları verilen eşik aralık için yeri gri değerlere çevirmektir. Bunun için (2.1) eşitliği kullanılır.

$$W = C \cdot P_r(v) \cdot (W_{\max} - W_{\min}) + W_{\min} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2 Bir Histogram Örneği.

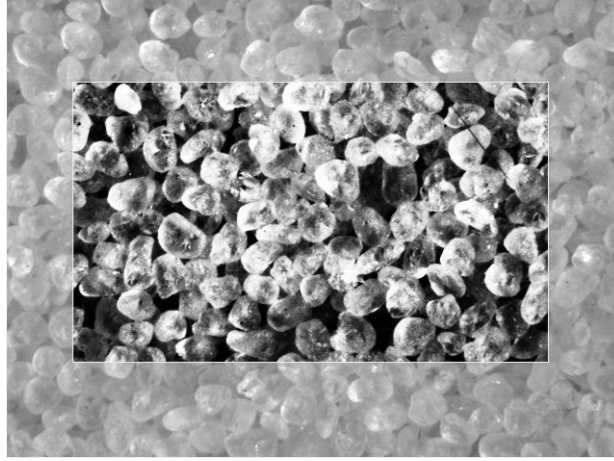
(2.1) eşitliğinde $C \cdot P_r$ gri seviyesinin kümülâtif ihtimali, $v, W_{\max}, W_{\min}$ gri ton değerlerinin maksimum ve minimum değerleri, W eşitleme için v 'nin düzeltilmiş gri ton değerini göstermektedir. Nihai W değeri, bir piksel değerini bir tam sayının temsil etmesi için tam sayıya yuvarlanır.

Bu yöntemle eşitlenen histogramlar kendi mahallerinde toplanmış piksel değerlerini gösteren yerel bölgelerdeki piksellerin görüntü alanı içerisindeki özelliklerini değiştirmemektedir. Yine de bu bölgelerdeki gri ton değerleri tüm görüntüde bir kontrast iyileştirmesi elde etmek için Şekil 2.3’de verilen örnekte gösterildiği gibi artırılabilir veya azaltılabilir (Lewis, 1990).

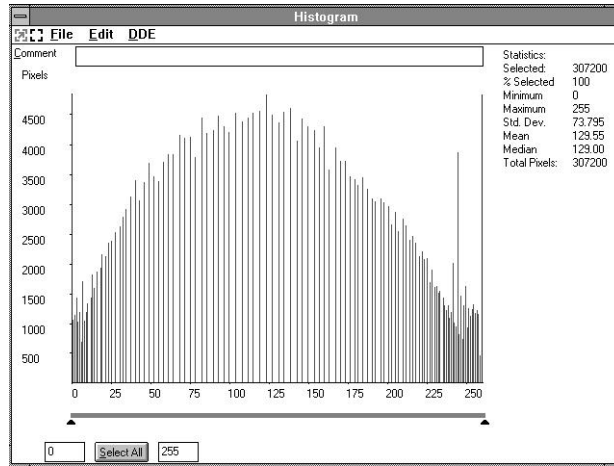
2.2 Görüntü Alma

Bu işlem, içerisinde yalnız farklı örneklerin işlenebildiği dijital formdaki resimsel bilgilerin örneklenmesidir. Sayısallaştırma işleminde piksel olarak bilinen her bir resim elamanı, referans parlaklık seviyesine izafe edilerek kesin bir değere atanır. Buna ilave olarak bu resim içerisinde konumlandırabilmek için her piksele bir koordinat değeri verilir. Bir görüntünün yatay ve düşey eksenindeki piksel sayısı onun boyutsal çözünürlüğünü tanımlar. Bir dijital görüntüde daha fazla sayıda piksel demek, daha fazla çözünürlük demek ve dolayısıyla daha kaliteli ve detaylı görüntü demektir. Çözünürlük, görüntü alma esnasında kullanılan donanıma bağlı bir olgu olarak değişebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan cihazların çoğu 640x480 çözünürlüğü desteklemektedir. Bazı medikal uygulamalarda daha doğru ve kesin analizler yapabilmek amacıyla 1024x768 veya 1280x1024 çözünürlük değerleri kullanılabilir.

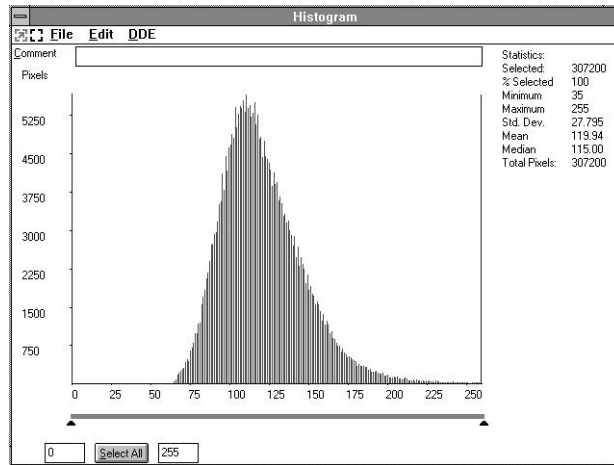
Diğer bir çözünürlük tipi, parlaklık çözünürlüğü olarak bilinen orijinal parlaklığın örneklenmesidir. Bu çözünürlükte, piksel parlaklığının orijinal örnek parlaklığını ne kadar doğrulukla dikkate aldığı önemlidir. Parlaklık çözünürlüğü, orijinal sahneyi olabildiğince gerçekçi olarak ifade edebilen sürekli fondaki bir form ile renk tonları arasındaki geçişin derecesi olarak resim kalitesini belirler. Resim elemanlarında olduğu gibi orijinal sahnenin parlaklığı, belirli bir aralıkta sayısallaştırma işlemleriyle örneklenir. Sayısallaştırma işleminde analog örnek parlaklıkları, her piksel noktasında Analog/Dijital (A/D) dönüştürücü yardımıyla bir tam sayıya dönüştürülür. Bu işlem miktar ölçme olarak adlandırılır. Bu miktar ölçmenin doğruluğu yine donanıma bağlı bir olgudur. Örneğin orijinal parlaklığını gösterecek üç bit’lik bir renksiz görüntüde 8 farklı gri ton bulunur ($8 = 2^3$). Eğer miktar ölçme bir bayt’lık doğrulukla yapılırsa bu aralık 0-255 piksel aralığını tanımlayan 256 gri tona yükselmiş olur (Baxes, 1984).



(a)



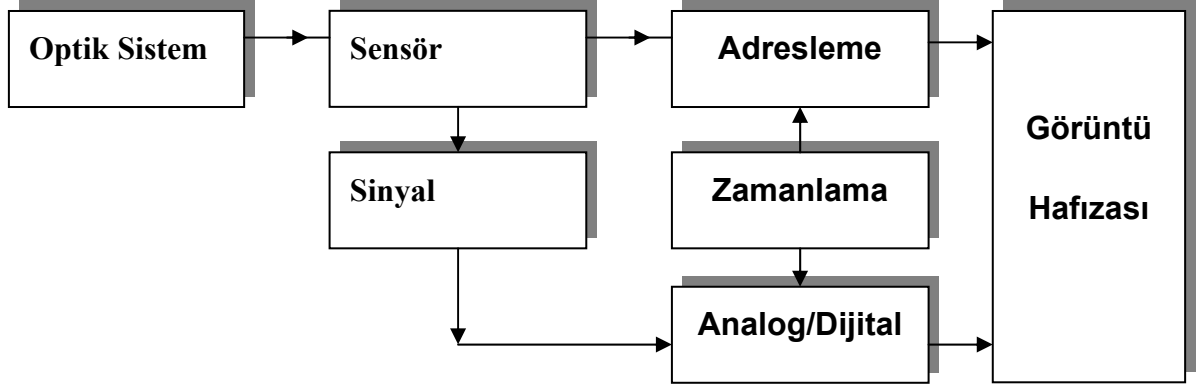
(b)



(c)

Şekil 2.3 (a) Agrega görüntüsünde seçilmiş bölgeye uygulanan histogram eşitleme işleminin sonucu, (b) seçilmiş bölgeye ait eşitlenmiş histogram, (c) seçilmiş bölgeye ait eşitlenmemiş histogram (Tekalp, 1995).

Görüntü alma yöntemi, kullanılan kamera donanımının tipi ve kabiliyetine bağlı olarak birkaç farklı yolla yapılabilir. Görsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir metot analog/dijital dönüşümünü aynı anda gerçekleştiren kameraya bağlı bir sensör yardımıyla doğrudan sayısallaştırmadır. Aşağıda tanımlandığı gibi bu cihazlardaki sayısallaştırma işlemi Şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4 Tipik bir görüntü alma cihazındaki işlem sırası.

Görüntü toplama sistemine görüntülerin girişi, toplamanın gerçekleştirildiği cihaza bağlı bir optik sistem tarafından sağlanmaktadır. Çalışılan alanın görüntüsü küçük bir voltaj veya optik sistem tarafından toplanan ışık yoğunluğu ile orantılı bir akım üretmektedir. Gelen voltaj bir sinyal ayırıcı tarafından bir dizi referans voltaj ile karşılaştırılmaktadır. Tasnif edilen voltaj bilgileri bir dijital/analog dönüştürücü yardımıyla sinyale dönüştürülerek referans voltajından büyük mü yoksa küçük mü olduğu karşılaştırılmaktadır. Nihai veri bir lojik operatör yardımıyla zamanlama sıralamasıyla doğru adreslenerek, alınan görüntüyü temsil etmek için kaydedilirler. Bu işlemlerin sonunda alınan veriler görüntü hafızası içerisine, temsil edilen görüntü tarafından bir dizi şeklinde kaydedilirler.

2.3 Görüntü Analizi

2.3.1 Tanım

Görüntü analizinin amacı, analizi yapacak olana eldeki görüntü ile ilgili kesin bilgileri sağlamak için, orijinal görüntünün karakteristiklerini temel alarak oluşturulmuş sayısal bilgileri çıkarmaktır. Görüntü analizinin bazı pratik uygulamaları, inceleme ve denetim için belirli nesneleri tanıma, obje algılama ve görüntü üzerinde bazı değerleri ölçmek ve tasnif etmek şeklindedir. Görüntü analizi teknikleriyle, ilgilenilen bir sahnenin özel

karakteristiklerini çıkarmada, onun özelliklerini ayırma, prosedürün üzerinde düşünülmesi gereken ana kısmını oluşturmaktadır.

2.3.2 Bölümleme Yöntemleri

Ayrırma işlemi asıl objeden çıkarılması gereken bilgilerin boyutsal özellikleriyle olduğu kadar, piksellerin kendi parlaklık seviyelerine göre tasnif edilmesidir. Tipik bir ayırma işleminde, bilgileri ayrı bölgelerden çıkarmak istediğimizden, asıl amaç piksellerin aynı bölgelere tasnif edilmesidir. Ticari görüntü analizi yazılımlarında birçok ayırma yöntemi mevcuttur. Treshold tekniğinde, maksimum treshold aralığında bir referans piksel değeri seçilir. Bu referans piksel değerinin altına düşen pikseller arka plan, referans değerinin üzerine çıkan pikseller ön plan olarak adlandırılırlar. Referans değerinin üzerindeki pikseller genellikle üzerinde analizin gerçekleştirileceği objeye işaret ederler. Bu işlem treshold tekniği olarak bilinir. Kenar belirleme metodunda piksellerin farklı bir objenin sınırlarına mı ait olduğu veya komşu piksellerle izafi olarak keskin bir geçişe mi sahip olduğunu belirlemek için bir kriter uygulanır. Yukarıda anılan her iki teknik de uygulamalar için bilinen birçok görüntü analizinin yaygın ayırma teknikleridir.

2.3.2.1 Treshold Tekniği

Bu tekniğin genel olarak başarılı bir yöntem olduğu kabul görmez. Piksellerin tasnifi fikrini temel alarak çalışır. Bu metodun kullanımından iyi sonuçlar alabilmek için bazı özel koşulların sağlanması gerekmektedir (Lewis, 1990).

- Analiz edilen görüntü alanında yalnız bir obje bulunmalıdır.
- Seçilen treshold değeri hedeflenen objeleri diğerlerinden iyi bir şekilde ayırabilmelidir. Bunun için arka planda olması gereken objeler başarılı bir şekilde asıl objeden ayrılmalıdır.

Bu ayırma tekniğinde görüntü alanındaki parçalarını birbirinin üzerine binmesi çok önemli bir problemdir. Görüntü alanındaki ayrılmış objelerin sayısını arttırma yollarından birisi objenin kendisine oranla arka planı daha fazla aydınlatmaktadır. Önemli objelerin renklendirildiği bazı uygulamalar da mümkündür. Ayırma işlemi, uygun bir treshold değeri tanımlandığında, başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir.

2.3.2.2 Kenar Belirleme Yöntemi

Bu metot treshhold tekniğine karşı geliştirilen ve en çok bilinen bir ayırma metodudur. Treshhold tekniğinden farkı, treshhold tekniği bölgeleri grilik seviyelerine göre tanıyıp etiketlerken, kenar belirleme tekniği objelerin sınırlarıyla ilgilenir. Bu teknikte parlaklık seviyesindeki süreksizliklerin parçaları arka plandan ayıran obje sınırlarında olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla çalışma alanında bulunan objeyle ilgili bilgi bu metotla analiz edilen resimden doğrudan çıkarılabilir. Yinede treshhold tekniğinde olduğu gibi bu yaklaşım doğrulukla ilgili bazı problemleri bünyesinde barındırmaktadır.

- Bu teknik sınır kesitleriyle ilgili yerel bir yöntemdir. Başka bir ifadeyle global olarak tüm parça sınırlarını kavrayan bir durum söz konusu değildir.
- Algoritmanın ayırım işlemini tamamlamak için bir sınırının sonuna varıp varmadığını kestirmek zordur.
- Bazı uygulamalarda, bir objenin gölgesi diğerinin üzerine düşerse, ayırmak istediğiniz objeyle ilgi yanıltıcı sonuçlara götürebilir.

2.3.2.3 Alansal Bölümleme Yöntemi

Bu yöntemin temel prensibi, görüntüyü daha küçük parçalara ayırarak bölümleme işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu prensip temel olarak treshhold tekniğinin uygulamasını kapsamaktadır. Bu yöntem iki farklı şekilde kullanılabilir:

- Pksel gruplandırma ile alan büyütme yöntemi,
- Alan bölme ve ekleme yöntemi.

Pksel gruplandırma ile alan büyütme yönteminde, görüntünün belirli noktalarında alınan ve tohum adı verilen pksel değerleri seçilir. Tohum pksel değerlerine benzer özellikte olan komşu pkseller (pksel gri değerleri, yapısal özellikleri, renk v.b.) tohum pksellere eklenerek alanlar oluşturulur. Böylece aynı pksel değerinde, renk veya yapısal özellikleri aynı veya benzer olan pksellerden alanlar oluşturulmuş olur.

Benzer şekilde yukarıda bahsedilen yöntem tersten uygulanarak alan bölme ve birleştirme yöntemi uygulanır. Bu yöntemde, görüntü alanı belirli ve ayrık küçük parçalara bölünür. Daha sonra aynı renk, yapısal özellikleri olan küçük alanlar birleştirilerek aynı veya benzer özelliklere sahip olan daha büyük alanlar oluşturulmuş olur. Her iki yöntem genellikle çok karmaşık olmayan geometriye sahip cisimlerin görüntülerinin analizinde başarıyla kullanılabilir.

2.4 Yapısal Bilgilerin Çıkarılması

Bu alt bölümün amacı, dijital bir resim içerisinde bulunan basit geometrik şekildeki objelerin belirgin özelliklerini çıkarmak ve ayırt etmektir. Genel olarak tanıma için orijinal parça geometrisini kullanarak analiz yapmak, karmaşık matematik formülasyonlarla çok uzun bilgisayar işlemleri gerektirmektedir. Parçanın belirgin özellikleri vasıtasıyla bilgi elde etmenin birçok yolu vardır (Lewis, 1990).

2.4.1 Yapısal Özellik Çıkarma

Özellik çıkarma, üzerinde çalışılan objenin farklı kısımlarının belirlenmesi için yürütülen bir yöntemdir. Örneğin medikal bir görüntüde partiküler objeler ve boyutları, çevrelerine intibakından daha önemlidir. Amaç, teşhis için ayırt edici özellikleri tanımak ve belirlemektir. Endüstriyel bir ürünün incelenmesinde ise tersine, son ürünlerdeki hataların belirlenmesinde objelerin varlıkları kadar oryantasyonları da önemlidir.

İki özellik çıkarma metodu altında gruplanabilecek birçok özellik çıkarma metodu mevcuttur. Bunlar boyutsal özelliklerin çıkarılması ve parametrik özellik çıkarma metodu olarak sıralanabilir. Boyutsal özelliklerin araştırıldığı metot da objenin şekil özelliklerinin orijinal objeyle uygunluğu araştırılırken, parametrik metot da bazı tanımlayıcı şekil parametreleri asıl olarak kabul edilir.

2.5 Görüntü Tanımlama ve Eşleme

2.5.1 Tanım

Görüntü tanımlama ve eşleme yöntemleri genel olarak yukarıda bahsedilen görüntü işleme ve analiz aşamalarının sonunda uygulanabilen gelişmiş analizleri içermektedir. Görüntü tanımlama ve eşleme aşamasında, görüntünün belirli bir karakterinin görüntü alanı içerisinde zaman ve pozisyondan bağımsız olarak belirlenip izlenmesi gerçekleştirilir. Görüntü tanımlama ve eşleme yöntemleri birçok uygulama ve araştırma-geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Örneğin, robot tasarımında objelerin tanımlanması, askeri amaçlı uydu fotoğraflarından izleme ve pozisyon belirleme uygulamaları, meteorolojik araştırmalarda hava tahminlerinin yapılması, parmak izi ve güvenlik kamerası görüntülerinin araştırılması gibi kriminal uygulamalarda, şehir içi trafik düzenleme ve denetimi ve şehir planlama, kaçak yapı ve tesislerin denetimleri gibi oldukça geniş alana yayılmaktadır.

Görüntü eşleme yöntemleri, karar-teorik yöntemleri, optik akış yöntemleri ve yapay zekâ yöntemleri olarak üç ayrı teknik kullanılarak yapılmaktadır. Günümüzde bu alanda yapılan çalışmalar, obje tanımlama ve derleme yeteneklerinin, bilgisayar ortamında insan beyninde nöronların çalışması prensibine dayanarak yapılması konusunda yöntem geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

2.5.2 Karar-Teorik Yöntemleri

Bu yöntemde görüntü eşleme işlemi minimum mesafe tanımlayıcıları yardımıyla yapılmaktadır. Seçilmiş olan objeye ait örnek görüntünün benzeri, minimum mesafe tanımlayıcı kriterlerine göre bir sonraki görüntüde aranması ilkesine göre yapılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan minimum mesafe tanımlayıcıları genellikle nesne ile grup arasında hesaplanan norm vektörleri (2.2) yardımıyla gerçekleştirilir.

$$D_j(x) = \|x - m_j\|, \quad j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2.2)$$

Her bir obje, bir grup vektörüyle (x) temsil edildiğinde, belirli bir gruba (m_j) ait olup olmadığı yukarıda verilen ilişki kullanılarak hesaplanmaktadır. Eğer belirli bir gruba ait minimum mesafe sağlandığında, objenin o gruba ait olduğu kabul edilmektedir. Burada bahsedilen grup, aynı objenin özelliklerini taşıyan eşdeğer görüntü olarak tanımlanmaktadır.

2.5.3 Optik Akış Yöntemleri

Optik akış yöntemleri, görüntü tanımlama ve eşleme problemleri için çok değişik uygulamalar sunmaktadır. Bu yöntemlerde genel prensip, cisimlerin sadece iki boyutlu düzlemde oluşan hareketlerinin (yer değiştirme ve hız) incelenmesinden ibarettir. Optik akış yöntemlerinde, eşlenmesi veya takip edilmesi gereken cismin görüntüsünün, bir sonraki görüntü düzleminde, genellikle benzerlik ilişkisine dayanan kros-korelasyon fonksiyonu kullanılarak takibi yapılmaktadır. Optik akış yöntemleri, deforme olabilir genelleştirilmiş blok hareket modelleri ve bu yöntemin türevlerinden elde edilen sabit blok hareket modelleri olarak iki genel kategoride uygulanabilir. Bu yöntemler, günümüzde MPEG standartlarında ve dijital videoların sıkıştırılmasında kullanılan yaygın modellerden birisidir. Bu tez çalışmasında kullanılan blok hareket modelleri, bir sonraki bölümde daha detaylı olarak irdelenmiştir.

2.5.4 Yapay Zekâ Yöntemleri

Bu konudaki çalışmaların henüz oldukça yeni olmasına karşın son yıllarda büyük gelişmeler kaydetmiştir. Bu görüntü tanımlama ve eşleme yöntemleri ise, eşlenmesi düşünülen görüntü

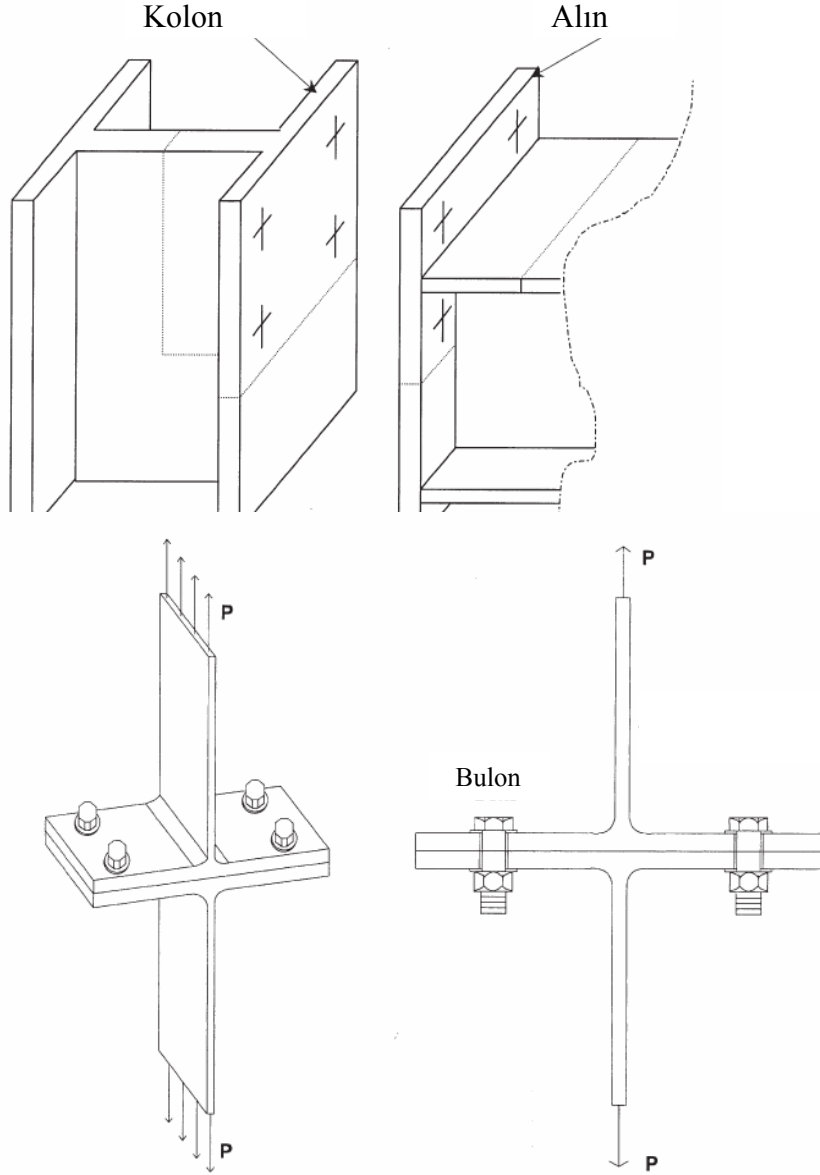
nesneleri yardımıyla yapay zekâ ağında öğrenme gerçekleştirilerek, daha sonra elde edilen parametreler yardımıyla cismin hareketini tahmin edilmesi prensibine dayanmaktadır. Yapay zekâ yöntemleri diğer iki yöntemlerden ayrı olarak lineer olmayan ve cismin yapısal özelliğini içinde simgeleyen ağırlık katsayıları hesaplanarak gerçekleştirilmektedir. Öğrenme işlemi bir veya birkaç tabakadan müteşekkil ağlardan oluşmaktadır. Bu konu hakkında teorik kapsam oldukça geniş olduğundan bu bölümde ayrıntılı olarak bahsedilmeyecektir.

2.6 Görüntü Yöntemlerinin Çelik Yapı Elemanlarına Uygulanması

2.6.1 Çelik T-Stub Birleşimlerde Şekil Değiştirme Ölçümleri (Spyrou vd., 2001)

2.6.1.1 Özet

Geleneksel olarak yangın limit durumunda çelik ve kompozit kiriş kolon birleşimlerinin ortam sıcaklığında davrandığı gibi davranış gösterdiği kabul edilir. Ortam sıcaklığında bulonlu/ perçinli olan bir birleşimin yükselen sıcaklıklar altında da bulonlu/ perçinli olarak davrandığı kabul edilir. Yakın zamanlarda Cardington'da 8 katlı bir bina üzerinde yapılan yangın deneylerinde, ortam sıcaklığında bulonlu/ perçinli olarak tasarlanan birleşimlerin artan sıcaklarda mukavemet ve rijitliğe önemli ölçüde katkı sağladığı gözlenmiştir. Çelik yapılarda kolon- kiriş düğüm noktası birleşimleri, düğüm noktasını ifade edebilen değişik yöntemlerle araştırılabilir. Kabul gören yaklaşımlardan biri, birleşim davranışını bir bütün olarak ele alan yöntemdir. Bu yaklaşımın geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır (Jaspart vd., 1995). Çelik yapılar yangına maruz kaldıklarında, yüke mukabele imkânı oldukça zayıflamakta ve birleşim davranışı daha da önem kazanmaktadır (Guo-Qiang vd., 2001). Bugüne kadar yüksek ısı altındaki düğüm noktası davranışları, birebir ölçekli fırın testlerinden elde edilmiştir (Leston vd., 2001). Bu metodun yüksek ısılar altında uygulaması yeni araştırmaların konusudur. Yine de çarpılmış profil unsurlarının araştırılması problemli olabilir. Bu çalışmada T-Stub birleşimlerinin şekil değiştirmelerinin ölçümünde görüntü yakalama ve işleme tekniğinin kullanımı anlatılmaktadır. Uygulama yüksek ısılardaki şekil değiştirme ölçümleri ile ilgili problemleri çözmek için geliştirilmiş olmasına rağmen ortam sıcaklığındaki uygulamalar için avantajları da sunmaktadır. Video kameralar ve dijital görüntü işleme teknolojilerindeki gelişmeler, video kaydından gerçek zamanlı şekil değiştirme ölçümünü mümkün kılmaktadır.



Şekil 2.5 Deneyde kullanılan tipik birleşim (Spyrou vd., 2001).

Geçmişte şekil değiştirmeler lineer voltaj dönüştürücüler, eğimölçerler yardımıyla ölçülüp kaydedilmiştir. Yüksek ısılardaki şekil değiştirme değerleri elde edilmek istendiğinde şekil değiştirme ölçümleri ile ilgili bir problem doğal olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntemle bu problem ortadan kalkmakta ve şekil değiştirme ölçümleri rahatlıkla yapılabilmektedir.

2.6.1.2 Sonuç

Görüntü işleme yoluyla yer değiştirme tayininin yeterince hassas sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu yöntem klasik mekanik yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok avantajı beraberinde sunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Deney düzeneği üzerine bağlamamız gereken herhangi bir cihaz yoktur.
- Kameranın görüntü alanını değiştirebilmek suretiyle istenilen kısmın yer değiştirmeleri ölçülebilir. Burada yapılması gereken istenilen hassasiyete bağlı olarak kamera çözünürlüğünü değiştirmektir.
- Fırın vb. gibi elverişsiz ortamlarda kullanılması durumunda kameralar örneklerden belirli mesafe uzakta kullanılabilir.
- Bütün test prosedürü izlenip kayıt altına alınabilir. Böylelikle kayıtlar üzerinde geri dönüp tekrar inceleme yapma imkânı doğar.
- Görüntü yönteminin avantajı iki farklı yönde deneyin izlenebilmesidir. Böylelikle yükleme düzleminin dışına doğru olan yer değiştirmeler de izlenebilir.
- Deneye tabi tutulan elemanların deforme olmuş şekillerinin sonlu elemanlar sonuçlarından elde edilen deforme olmuş biçimleriyle karşılaştırılabilmesi imkânını verir.

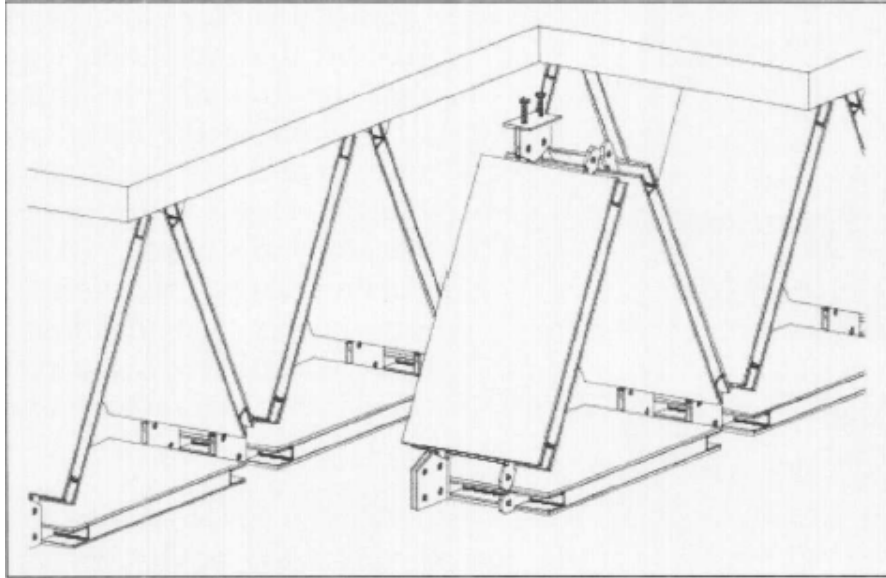
Yukarıda genel hatlarıyla özeti ve sonuçları verilen makalede T- Stub birleşiminin yüksek ısılarda deneyleri yapılarak yer değiştirmelerin görüntü işleme metodu ile analizi yapılmıştır. Çalışmada, metodun bünyesinde barındırdığı kolaylıklar/avantajlar nedeniyle, yüksek ısılardaki yer değiştirmelerin hassas bir şekilde izlenebildiği ifade edilmektedir. Ayrıca birleşimin tümünün davranışının izlenebilmesi bakımından oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Birleşimin tümünün davranışının izlenebilmesi birleşime ait göçme mekanizmalarının belirlenebilmesi bakımından çok önemli bir avantaj sunmaktadır.

2.6.2 Modüler Bağlantı Sisteminin Dijital Görüntü Korelasyonu ile Deformasyon Analizi (De Roover vd., 2002)

2.6.2.1 Özet

Uzun yıllar süren çalışmalardan sonra Vrije Üniversitesinin (VUB) araştırmacıları IPC olarak adlandırılan ve bir çeşit yapısal seramik olan yeni non-alkaline mineral polimer geliştirdiler (İnorganik fosfat çimento) (Watiels, 1999). Bu seramik malzeme dayanıklılığın ve rijitliğinin artırılması amacıyla cam lifleriyle güçlendirilebilir bir malzemedir (Gu vd., 1998 ve Cuypers vd., 2000). Yakın zamanda çalışılan bir projede böyle bir malzeme, geleneksel yapı malzemeleriyle birlikte bir köprü tasarımında kullanılmıştır (De Roover, 2000a; 2000b). 13 m açıklıklı bir yaya köprüsü beton platform ve bu platformu taşıyan ve cam lifiyle güçlendirilmiş 3 adet kafes kiriş kullanılarak inşa edilmiştir. Makas elemanları arasında çelik bağlantılar kullanılmıştır. Bu birleşimler yapının modüler ve hızlı bir şekilde inşasına izin

vermiştir. Bu makalede her bir elemanın sistem toplam deformasyonuna katkısını belirlemek amacıyla, makasları oluşturan sandviç panellerin uçlarındaki deformasyonlar araştırılmıştır. Bu tipteki bir analiz için klasik deformasyon ölçüm yöntemleri pek uygun değildir. Çünkü deformasyon ölçerler yardımıyla elde edilen bilgiler oldukça sınırlı ve yerel kalmaktadır. Bu nedenle dijital görüntü korelasyonu yöntemi (DIC) daha uygun gözükmemektedir. Bütün bir yüzeyin deformasyon analizleri için bu yöntem oldukça ideal bir yöntemdir (Lyons vd., 1996). Bu yöntemde yüzey yer değiştirme ve gerilmelerinin elde edebilmek için yüklemeden önce ve yüklemeden sonra elde edilen dijital görüntüler karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmada metalik ve kompozit parçaların oluşturduğu karmaşık birleşimlerin, bu yöntem kullanılarak detaylı bir analizi verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada bu yöntemin pratik faydaları izah edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.6 Modüler elemanlardan oluşan köprü yapısı (De Roover vd., 2002).

2.6.2.2 Sonuç

Bu çalışmada sandviç panellerden oluşan karmaşık çelik birleşimlerin deformasyonlarının ölçülmesinde dijital görüntü yöntemlerinin kabiliyetleri ortaya konulmuştur. Çalışmada dijital görüntü yöntemlerinin klasik deformasyon ölçüm yöntemlerinin bir tamamlayıcısı olduğu gösterilmiştir. Klasik deformasyon ölçümleri deformasyonun orijini ile ilgili bilgiye ulaşma imkânı vermezken, görüntü yöntemleri kullanılarak yapılan analizlerde değişik deformasyon kaynaklarını izlemenin ve bu deformasyonları ölçmenin mümkün olduğu ifade edilmektedir.

- Eşleme kriteri.
- Arama stratejisi.
- Blok boyutunun belirlenmesi.

3.2 Eşleme Kriteri

Blokların eşlenmesi farklı bir takım kriterler temel alınarak yapılabilir. Bunlar maksimum kros korelasyon (NCC), minimum kare hatası (MSE), minimum ortalama mutlak fark (MAD) ve maksimum eşlenen piksel sayısı (MPC) dır.

Maksimum kros korelasyon kriteri 3.1 eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$NCC(d_x, d_y) = \frac{\sum_{x,y} I_t(x, y) I_{t+1}(x + d_x, y + d_y)}{\sqrt{\sum_{x,y} I_t(x, y)^2 \sum_{x,y} I_{t+1}(x + d_x, y + d_y)^2}} \quad (3.1)$$

Burada, $I_t(x, y)$ t anında ve x, y konumundaki piksel yoğunluğunu, $I_{t+1}(x + d_x, y + d_y)$ $t + 1$ anında ve $x + d_x, y + d_y$ konumundaki piksel yoğunluğunu ifade ederken, d_x, d_y sırayla x ve y yönlerindeki yer değiştirme bileşenlerini göstermektedir.

Minimum kare hatası (MSE) kriterinde, MSE değeri aşağıda verilen ifadesiyle değerlendirilir.

$$MSE(d_1, d_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{(n_1, n_2) \in \beta} [s(n_1, n_2, k) - s(n_1 + d_1, n_2 + d_2, k + 1)]^2 \quad (3.2)$$

Burada β , d_1, d_2 aday hareket vektörleri için bir $N_1 \times N_2$ bloğunu göstermektedir. Hareket vektörünün hesabı için MSE değerini minimize edecek d_1 ve d_2 değerleri aranır. Yani,

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{bmatrix}^T = \arg \min_{(d_1, d_2)} MSE(d_1, d_2) \quad (3.3)$$

MSE kriterinin minimize edilmesi blok içerisindeki tüm pikseller üzerindeki optik akış sınırının empoze edilmesi olarak görülebilir. MSE kriteri donanımda kare işleminin zorluğu nedeniyle pek tercih edilmemektedir. Bunun yerine minimum ortalama mutlak fark (MAD) kriteri en yaygın kullanıma sahip diğer bir seçenektir. Bu kriter (3.4) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$MAD(d_1, d_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{(n_1, n_2) \in \beta} |s(n_1, n_2, k) - s(n_1 + d_1, n_2 + d_2, k + 1)| \quad (3.4)$$

Bu eşitlikten yer değiştirme hesabı aşağıdaki ifadeyle çıkarılabilir (3.5).

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{bmatrix}^T = \arg \min_{(d_1, d_2)} MAD(d_1, d_2) \quad (3.5)$$

Yerel etkilerden dolayı büyüyen arama alanı yüzünden MAD kriterinin performansının azaldığı bilinmektedir.

Diğer bir alternatif, maksimum eşdeğer piksel sayısı kriteridir (MPC). Bu yaklaşımda β bloğu içerisindeki her bir piksel aşağıda verilen bağıntıya göre, eşlenen piksel veya eşlenmeyen piksel olarak sınıflandırılır.

$$T(n_1, n_2; d_1, d_2) = \begin{cases} |s(n_1, n_2, k) - s(n_1 + d_1, n_2 + d_2, k + 1)| \leq t & \text{ise} \Rightarrow \frac{1}{\beta} \\ \text{değilse} & \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Burada t önceden belirlenmiş bir treshhold değerini göstermektedir. Blok içerisindeki eşleşen piksellerin sayısı;

$$MPC(d_1, d_2) = \sum_{(n_1, n_2) \in \beta} T(n_1, n_2; d_1, d_2) \quad (3.7)$$

olarak verilebilir. Bu bağıntıdan hareket hesabı;

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 & \hat{d}_2 \end{bmatrix}^T = \arg \max_{(d_1, d_2)} MPC(d_1, d_2) \quad (3.8)$$

olur. Yani hareket ifadesi en fazla eşleşen piksel sayısını veren d_1, d_2 değerleri olmaktadır. MPC kriteri bir treshhold değer kıyaslayıcısına ve bir $\log_2(N_1 \times N_2)$ sayacına ihtiyaç duymaktadır.

3.3 Arama Yöntemi

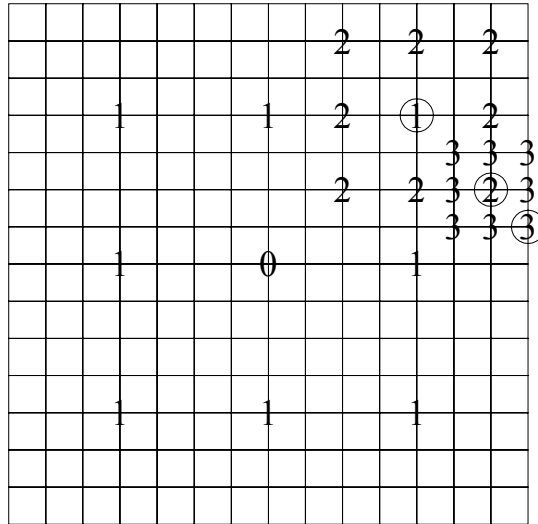
En iyi eşleşen bloğu bulma işlemi, her bir pikseldeki (n_1, n_2) yer değiştirme vektörleri üzerinde eşleme kriterinin optimizasyonundan ibarettir. Bu işlem, her pikseldeki d_1, d_2 değerlerinin tümü için eşleme kriterini değerlendiren ve oldukça zaman alan bir işlem akışıyla mümkün olmaktadır. Sayısal yükü azaltmak için ilk önlem olarak genellikle arama alanı, $-M_1 \leq d_1 \leq M_1$ ve $-M_2 \leq d_2 \leq M_2$ şeklinde sınırlandırılır. Bu sınırlandırılmış arama penceresi hareket vektörünün değerlendirileceği her bir pikseli merkez kabul eden bir alandır. Burada M_1 ve M_2 önceden belirlenmiş tam sayılardır. Şekil 3.1’de bir arama penceresi görülmektedir. Sayısal yükü azaltmak amacıyla sıkça kullanılan diğer bir yöntem, piksellerin seyrek aralıklarında hareket vektörünü belirlemektir. Örnek olarak, her sekiz pikselde bir ve 16×16 blok kullanarak 8 hat ve buradan hareket alanına enterpolasyon yapmak ve kalan hareket vektörlerini belirlemek verilebilir.

Tam bir optimizasyona götürmese de, yine de birçok durumda bütün alanın aranmasından daha hızlı sonuç veren arama stratejileri kullanılmaktadır. Daha hızlı olan bu arama stratejileri şunlardır:

- Üç adım arama
- Çapraz arama.

3.4 Üç Adım Arama

Bu arama prosedürü arama penceresi parametreleri M_1 ve M_2 'nin birbirine eşit olarak kullanıldığı bir arama çerçevesini gösteren Şekil 3.2'de görülmektedir. Şekil 3.2 üzerindeki "0" la işaretlenmiş pikseller mevcut piksellerin hemen arkasındaki pikselleri ifade etmektedir. Birinci adımda, kriter fonksiyonu 9 noktada değerlendirilmiş ve pikseller "0" veya "1" olarak markalanmıştır. Eğer en düşük MSE veya MAD "0" pikselinde bulunursa, hareket olmadığı kabul edilmektedir. İkinci adımda, kriter fonksiyonu 8 noktada değerlendirilerek pikseller "2" pikseli olarak markalanır. Bu pikseller birinci adımda "1" olarak markalanan piksellerle en iyi uyuşan pikselleri merkez alan markalarla işaretlenmektedir. İlk adımda arama piksellerinin pencerenin köşe noktalarında kaldığını not etmek gerekir. Daha sonraki her adımda daha iyi çözünürlük elde etmek için yeni merkez noktasından arama piksellerinin mesafesi yarıya indirilmektedir. Hareket tahmini üçüncü adımdan sonra elde edilebilmektedir. Bu adımda bütün arama pikselleri merkezden bir piksel uzakta bulunmaktadır.

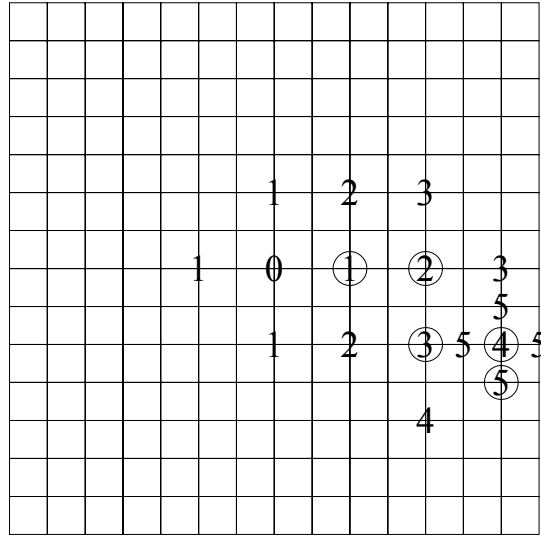


Şekil 3.2 Üç adım arama stratejisi

Hareket tahmininde daha hassas sonuçlar elde etmek için bu işlem akışına farklı adımlar ilave edilebilir. Alt piksel bölünmelerinde kriter fonksiyonunun değerlendirilebilmesi için enterpolasyon yapılması gerektiğini ifade etmek gerekir.

3.5 Çapraz Arama

Çapraz arama, her bir adımda dört arama bölgesi bulunan diğer bir logaritmik arama stratejisidir. Bu arama bölgeleri, “X” veya “+” şeklindeki bir alanın uç noktalarıdır. Bu yöntemde kullanılan “+” şeklindeki arama durumu, Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Çapraz arama stratejisi

Eğer en iyi çakışma, bu çapraz şekillerin merkezinde veya bu çakışma, arama penceresinin sınırında ortaya çıkarsa, arama noktaları arasındaki mesafe azalmış olur. Bu arama stratejinin değişik versiyonları literatürde bulunmaktadır. Yakın zamanda bloklar arasındaki hareket vektörlerinin uzaysal ve geçici korelasyonlarını kullanan daha etkili arama stratejileri önerilmiştir. Aynı zamanda blok eşleme, rastgele bir şekil için de uygulanabilir. Örnek olarak sezgisel arama stratejileri kullanarak eğrilerden oluşan şekillerin eşleşmesini aramak verilebilir.

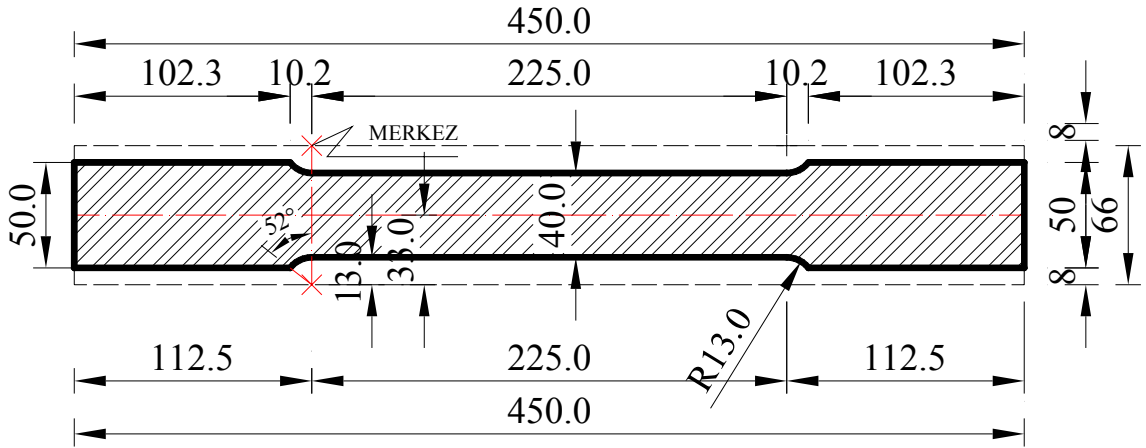
Hangi algoritma kullanılırsa kullanılsın, uygun blok boyutunun seçimi blok eşleme prosedürünün sağlıklı çalışabilmesi için önemlidir. Arama işlemine tabi tutulan blokların boyutlarıyla ilgili çelişkili durumlar söz konusu olabilmektedir. Eğer blok boyutları çok küçük seçilmişse, eşleştirme aynı gri ton seviyelerine sahip bloklar arasında yapılabilir ki bu

blokların hareketle ilgisi olmayabilir. Diğer taraftan blok boyutları çok büyük seçilmişse bir blok içerisindeki gerçek hareket vektörleri olduğundan farklı elde edilebilir.

4. STANDART ÖRNEKLER İÇİN ÇEKME DENEYLERİ

4.1 Standart Örneklerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında test edilmiş olan birleşimlerin imal edildiği çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve birinci bölümde ifade edilen birinci tez hipotezinin doğruluğunun araştırılması amacıyla, dokuz adet standart örnek hazırlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Standart örneklerin hazırlanmasında A370–05 “**Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**” standardı referans alınmıştır. A370–05 standardının çekme deneyinde kullanılacak çelik malzeme için öngördüğü boyut kriterlerine göre hazırlanan örnekler Şekil 4.1’de görülmektedir. Şekilde verilen boyutlar *mm* cinsindendir.



Şekil 4.1 Standart Örnek.

Örneklerin, A370–05 ‘te verilen ölçülerde ve olabildiğince hassas yapılabilmesi için, bütün örnekler CNC freze tezgâhında işlenmiştir. Böylelikle bütün örnekler A370–05’te verilen boyut toleransları bakımından hatasız veya kabul edilebilir boyut hatalarıyla imal edilebilmiştir.

Standart örneklerin hazırlanmasında 5 *mm* kalınlıklı çelik levha kullanılmıştır. Bu kalınlık değeri A370–05’te verilen minimum kalınlık değerine eşittir. Örneklerin hazırlandığı ve tez çalışmasının diğer bölümlerini oluşturacak olan birleşimlerin imal edildiği çelik levha **Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. (ERDEMİR)** tarafından DIN EN 10025 S235JRG2 (ERD 3237) kalitesinde üretilmiştir. Teslim alınan ürün, üretici firma tarafından kenarları kesilmemiş rulodan kesilmiş levha olarak isimlendirilmiş olup 5.0x1500x6000 *mm*

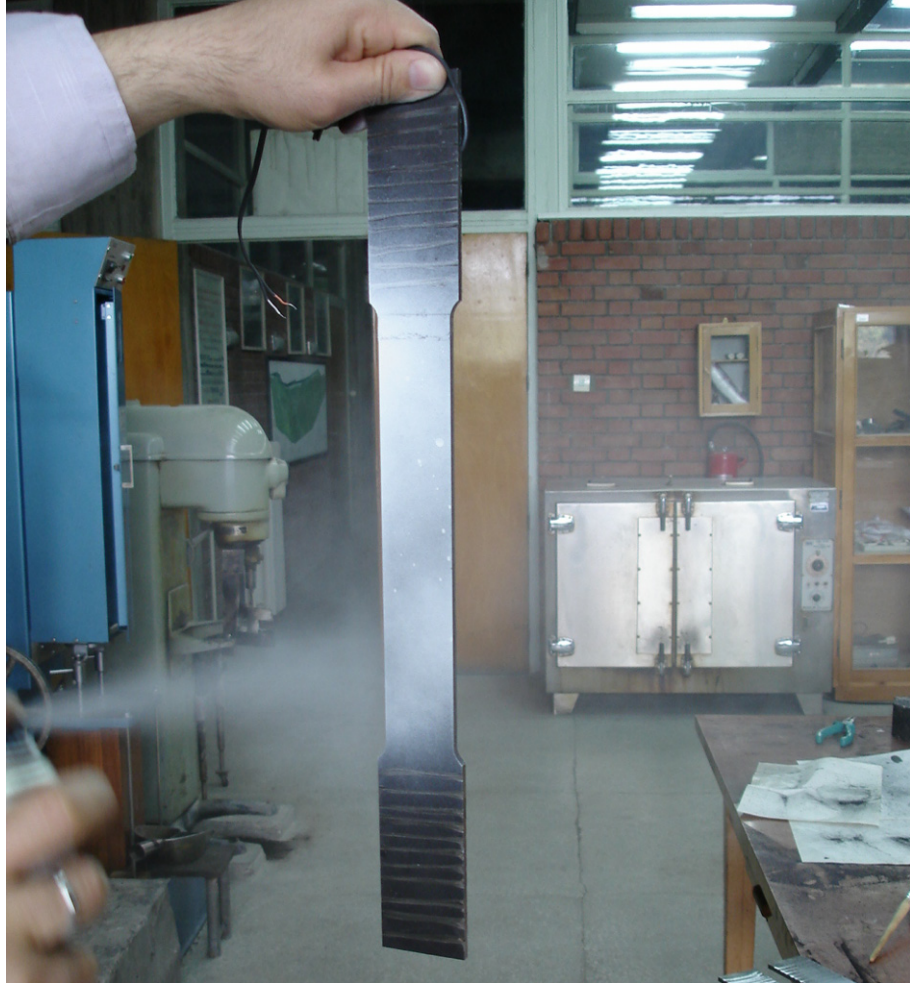
boyutlarındadır. Üretici firmanın yaptığı çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre ürün, 32.80 kgf/mm^2 (328.00 N/mm^2) akma mukavemetine ve 42.70 kgf/mm^2 (427.00 N/mm^2) çekme mukavemetine sahiptir. Yapılan deneylerden ürünün kopma birim şekil değiştirmesinin % 44 olarak tespit edildiği çelik levhaya birlikte verilen test raporundan anlaşılmaktadır. Çelik levhaya ait bu mekanik veriler, Ereğli Demir ve Çelik T.A.Ş.'nce gerçekleştirilmiş olan çekme deneylerinden elde edilen, 01.03.2006 tarih ve 5021709Y numaralı rapordan alınmıştır.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi örneklerin toplam uzunluğu 450 mm dir. Çekme cihazı çeneleri arasında kalacak örnek uzunluğu 102.50 mm ve örneğin daraltılmış kesit uzunluğu 225 mm dir. Daraltılmış kesit genişliği 40 mm , çekme cihazı çeneleri arasında kalan örnek genişliği 50 mm dir. Çekme cihazı çeneleri arasında kalan genişlik ile azaltılmış kesit genişliği arasındaki geçiş 13 mm yarıçaplı yaylar ile sağlanmıştır (Şekil 4.1).

Hazırlanan örneklerin çekme cihazı çeneleri arasında kalan bölümünde, çenelerin örnek üzerinden kaymasını engellemek ve çene dişlerinin kavrayışını kolaylaştırmak amacıyla, çentikler açılmıştır.

Çekme deneylerinde kullanılan dokuz adet örneğin üç tanesi üzerine deformasyon ölçerler yapıştırılarak deneye tabi tutulmuş ve bu örnekler SG1, SG2 ve SG3 olarak isimlendirilmiştir. Diğer üç örnek üzerine ekstensometre bağlanarak deneye tabi tutulmuş ve EXT1, EXT2 ve EXT3 olarak isimlendirilmiştir. Üzerinde herhangi bir deformasyon ölçer kullanılmadan deneye tabi tutulan örnek sayısı da üç olup, bu örnekler NS1, NS2 ve NS3 olarak isimlendirilmiştir.

Deneylerde kullanılacak dokuz adet örneğin görüntü alan kameralara bakan yüzleri, boya tutabilmeleri için, kumlama işlemine tabii tutulmuş, ayrıca gerekli kısımları zımparalandıktan sonra asetonla temizlenmiştir. İyice temizlenen örnekler spreyci boya yardımıyla beyaza boyanmıştır (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Sıcak hava fanıyla tamamen kurumayı sağlayan örneklerin beyaz boyalı olan yüzlerine, görüntü işleme esnasında kullanılacak desenler, siyah renkli ahşap boyasının bir fırça yardımıyla serpiştirilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 4.4). Boyama işlemi tamamlanarak deneye hazır hale gelen standart örnek Şekil 4.5'de görülmektedir. Siyah ahşap boyasının fırça yardımıyla serpiştirilmesi; beyaz boyalı yüzey üzerinde oluşacak lekelerin tamamen rastgele desenler şeklinde oluşmasını sağlayarak, analiz yazılımının makro blokların görüntüler arası takibine imkân sağlamaktır.



Şekil 4.2 Örneklerin spreyl boya ile beyaza boyanması.



Şekil 4.3 Temizlenmiş ve boyanmış örnekler.



Şekil 4.4 Boyanmış örnekler üzerine siyah ahşap boyası ile desen oluşturulması.



Şekil 4.5 Siyah ahşap boyası ile üzerine desen oluşturulmuş örnekler.

4.2 Çekme Deney Düzenegi ve Deney Parametreleri

Bu tez çalışmasının tümü için planlanan deneylerin ilk grubunu oluşturan standart örnek çekme deneyleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvar imkânları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen mekanik parametreler tezin altıncı bölümünü oluşturan bilgisayar modellerinde kullanılmıştır. Ayrıca deneyler esnasında deformasyon ölçerlerin kaydetmiş olduğu deformasyon değerleri ile görüntülerden elde edilen deformasyon değerlerinin bir karşılaştırılması yapılarak, birinci bölümde verilen tezin birinci hipotezinin doğruluğu araştırılmıştır. Hazırlık aşaması bir önceki bölümde verilen

ve deneylerde kullanılan örnekler dışında kalan deney düzeneğinin diğer elemanları ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Çekme Cihazı

Deneylerde 274.68 *kN* (28 ton) çekme/basınç kapasiteli SATEC System Inc. marka universal test cihazı kullanılmıştır. Test cihazına ait fotoğraf Şekil 4.6'da görülmektedir. Test cihazının kalibrasyonu deneyler öncesinde göstergeli loadcell kullanılarak yapılmıştır. Bütün test örnekleri 0.074 *mm/s* sabit deformasyon hızıyla yüklenerek çekilmiş, bu hız deney sonuna kadar sabit tutulmuştur.

Standart örnekler çekme cihazı çeneleri arasına düşey olarak yerleştirilmiştir. Örnekleri kavrayan ve 53 *mm* genişlik boyutunda imal edilmiş olan çekme cihazı çenelerinin bağlı bulunduğu tablalardan alt çeneyi tutan tabla sabit dururken, üst tablayı belirlenen deformasyon hızında yukarı doğru hareket ettirmek suretiyle örnek üzerine çekme kuvveti uygulanmıştır.

Cihazın örnekler üzerine uyguladığı kuvvet verileri, National Instruments marka veri toplama kartı üzerinden saniyede dört adet okunarak veri toplama sistemi üzerinden bilgisayar sabit diskine kaydedilmiştir. Bu kayıt işleminde cihazın uyguladığı kuvvete karşı ürettiği voltaj verileri, kalibrasyon işlemi sırasında tespit edilen ve doğru akım voltaj değeri ile gerçek kuvvet değeri arasındaki ilişkiyi belirleyen sabitler kullanılarak gerçek yük değerine dönüştürülmüştür. Veri toplamada hem cihazın ürettiği voltaj değerleri, hem de gerçek yük değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.6 Çekme cihazı.

4.2.2 Dijital Kameralar

Tez çalışmasının aynı zamanda Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen **“Görüntü Yöntemlerinin Beton Mikro Yapısında ve Çelik Birleşimlerin Deformasyon Davranışlarında Kullanılması”** projesinin bir ayağını oluşturduğu birinci bölümde ifade edilmişti. Bu proje kapsamında, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)’nın sağladığı mali destekle iki adet endüstriyel tip SONY marka dijital kamera ile kameraların kullanılabilmesi için gerekli ek donanım ve yazılım satın alınmıştır. Görüntü toplama sistemi toplam dört farklı birimden oluşmaktadır. Bunlar:

- SONY XCD-X710 dijital kameralar (Şekil 4.7).
- C Mount Lensler (12 ve 16 mm sabit odaklı-fixed focal length)
- Görüntü toplama kartı (NI IEEE-1394 FireWire Driver/Board) (Şekil 4.8).
- LabView dilinde yazılmış kullanıcı ara yüz programı.

Kullanılan kameraların bilgisayarla iletişimi “firewire” olarak isimlendirilen ve Şekil 4.8’de görülen iletişim portu aracılığıyla sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan iki kamera da aynı anda bu porta bağlanarak alınan görüntülerin bilgisayara iletimi sağlanmıştır. 12 ve 16 mm odak uzunluklarına sahip lensler iki ayrı kamera üzerinde kullanıldığından teste tabi tutulan deney örneğinin aynı yüzünün iki farklı uzaklıktan görüntüleri alınabilmektedir. Kameralardan bir tanesi deney örneğinin bütününe görecekte şekilde konumlandırılmışken, diğeri sadece beklenen kopma bölgesine odaklanmıştır. Böylelikle deneyin her iki görüntüden ayrı ayrı takip edilebilmesi ve görüntülerin ayrı ayrı analiz edilebilmesi imkânı sağlanmıştır.



Şekil 4.7 Dijital kamera ve sehpa.



Şekil 4.8 Fire Wire iletişim portu ve kartı.

4.2.3 Yer Değiştirme Sensörü (LVDT)

Deneyler sırasında çekme cihazının çeneleri arasındaki yer değiştirme LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) cihazı yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Yer değiştirme verileri de diğer veriler gibi saniyede dört adet olarak okunup veri toplama sistemi üzerinden periyodik olarak bilgisayara aktarılmıştır. LvdT cihazının kalibrasyonu deneylere başlamadan yapılmıştır. Kalibrasyon işleminde, bir kumpas yardımıyla hassas bir biçimde verilen doğrusal deformasyon değerleri için, cihazın ürettiği voltaj okunarak kaydedilmiştir. Doğrusal deformasyon ve üretilen voltaj arasında kurulan korelasyon yardımıyla cihazın ürettiği doğru akıma karşı gelen doğrusal deformasyon değeri ve başlangıç için verilmesi gereken öteleme değeri hesaplanmıştır. Okunan bütün yer değiştirme değerleri veri toplama sisteminde bir porta atanarak bilgisayardan takibi sağlanmıştır. Cihazın ürettiği doğru akım voltajı gerçek port üzerinden kaydedilirken, bu voltaja karşı gelen yer değiştirme değerleri üretilen sanal port üzerinden okunup veri toplama sistemi yardımıyla kayda alınmıştır.

4.2.4 Işık Kaynakları

Deneyler sırasında, üzerinden görüntü alınan örnek kısmının üniform olarak aydınlatılması, elde edilen görüntülerin işlenmesi ve doğru sonuçlar alınabilmesi bakımından çok önemlidir. Bu nedenle deneylerin yapıldığı laboratuvarın ışık kaynakları ve bunların örnek üzerinde oluşturduğu etkiler de dikkate alınarak ek bir aydınlatma kullanılmıştır. Aydınlatma için floüresan ışık kaynağı ile birlikte iki adet spiralli masa lambası kullanılmıştır. Kullanılan ek aydınlatmalar Şekil 4.9'da görülmektedir. Işık kaynakları test edilen örnek ile görüntü alan dijital kamera arasına, ve örnekten yaklaşık 20 cm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece ışık kaynaklarının sağladığı ek aydınlatma sayesinde örnekler üzerinde oluşan gölgeler yok edilerek görüntü analizi açısından daha elverişli üniform bir aydınlık sağlanmıştır.



Şekil 4.9 Işık kaynakları.

4.2.5 Birim Şekil Değiştirme Ölçer (Strain Gage)

Gerçekleştirilen standart tip deney örneklerinden üç adedine 30 mm uzunluklu ve ölçüm çarpanı 2.1 olan şekil değiştirme ölçerler yapıştırılarak deneye tabii tutulmuştur. Şekil değiştirme ölçerler örneklerin temizlenen arka yüzlerine yapıştırılmıştır. Arka yüzüne şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış bir standart örnek Şekil 4.14’de görülmektedir. Deneyler öncesinde şekil değiştirme ölçerler kalibre edilerek ürettiği voltaj verisi ile ölçülen birim şekil değiştirme arasında korelasyon kurulmuştur. Diğer enstrümanlar gibi, şekil değiştirme ölçerin doğru akım olarak ürettiği veriler saniyede dört adet olarak alınıp kalibrasyon verileriyle gerçek değerlerine dönüştürüldükten sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Okunan birim şekil değiştirme değerleri diğer verilerle birlikte, çalışmanın sonraki bölümlerinde de kullanılmak üzere, malzeme mekanik parametrelerinin belirlenmesi (E, σ_y, σ_u) için kullanılmıştır.

4.2.6 Ekstensometre

Test edilen standart deney örneklerinden üç adedi üzerine ekstensometre bağlanarak deneye tabii tutulmuştur. Üzerine ekstensometre bağlanarak deneye tabi tutulan bir standart örnek Şekil 4.10’da görülmektedir. Kullanılan ekstensometrenin şekil değiştirme ölçüm kapasitesi 840 mikrondur ve kalibrasyonu deneylerden önce yapılmıştır. Elde edilen şekil değiştirme verileri diğer tüm verilerde olduğu gibi saniyede dört adet olarak okunmuş ve kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 4.10 Örnek üzerine bağlı ekstensometre.

4.3 Veri Toplama Sistemi

Gerçekleştirilen deneyler sırasında, teste tabii tutulan örnek üzerinden gelen veriler veri toplam sistemi yardımıyla bilgisayar sabit diskine kaydedilmiştir. Bu veriler; zaman, yer değiştirme, kuvvet, birim şekil değiştirme ve ekstensometre verileri ile her 2 saniyede alınan dijital görüntülerden oluşmaktadır. Veri toplamada National Instruments tarafından üretilmiş bir veri toplama kartı kullanılmıştır. Cihaz üzerindeki sanal portlara gelen voltaj verileri, deney öncesi yapılan kalibrasyon parametreleri yardımıyla gerçek değerlerine dönüştürüldükten sonra, hem voltaj değerleri hem de gerçek değerleri ile bilgisayara kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan iki adet kameraya ait kontrol, yine National Instruments tarafından üretilmiş Labview 8 yazılımı kullanarak yazılan bir program kodu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Grafik tabanlı programlama imkânı veren yazılım sayesinde, kameraların hangi aralıklarla görüntü alacağı, iki kamera görüntüsü arasındaki gecikme zamanı ve diğer görüntü parametreleri kontrol edilebilmiştir.

Deneyler sırasında kamera görüntülerini alıp kaydeden ve diğer deney verilerini (kuvvet, deformasyon vb.) alıp kaydeden iki ayrı yazılım eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır.

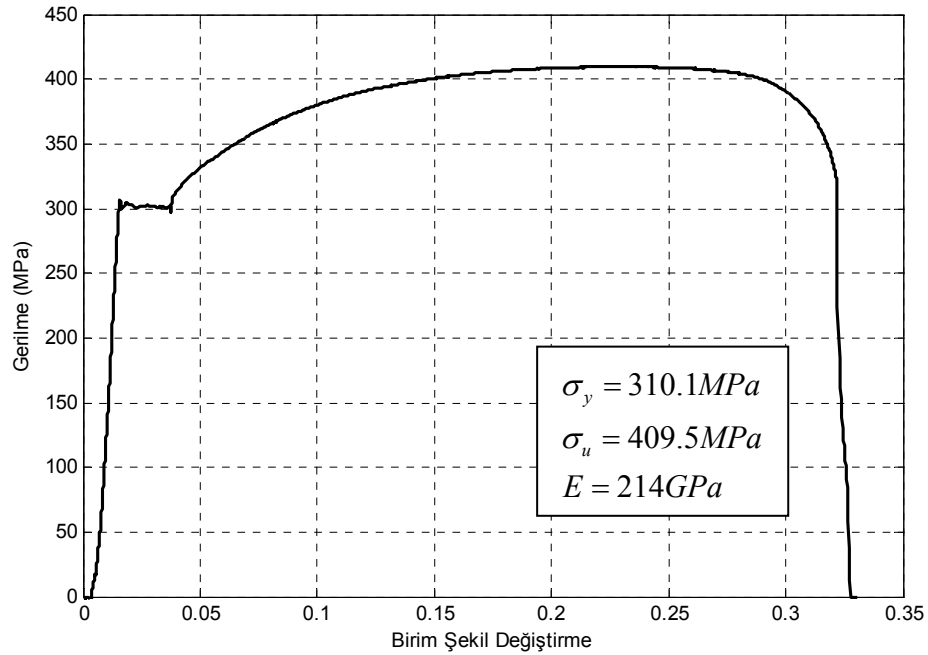
Gerçekleştirilen standart örnek deneylerinden üzerine şekil değiştirme ölçer bağlı üç örnek ile üzerine deformasyon ölçer bağlanmamış üç örneğe ait veriler teze alınmıştır. Gerek şekil değiştirme ölçer ve de gerekse ekstensometre ile yapılan şekil değiştirme ölçümlerinde akma sınırının ötesinde gerçekleşen birim şekil değiştirmeler kaydedilebilmiştir. Ancak bu ölçümlerde kullanılan ekstensometre cihazının ve deformasyon ölçerlerin sınırlı kapasiteleri nedeniyle şekil değiştirmeler, kopma anına kadar takip edilememiştir. Şekil değiştirme

ölçerler kapasite sınırlarında örnekten kopmuş, ekstensometre cihazı ise, deformasyonlar cihaz kapasite sınırına ulaştığında, deney devam ederken örnek üzerinden çıkarılmıştır.

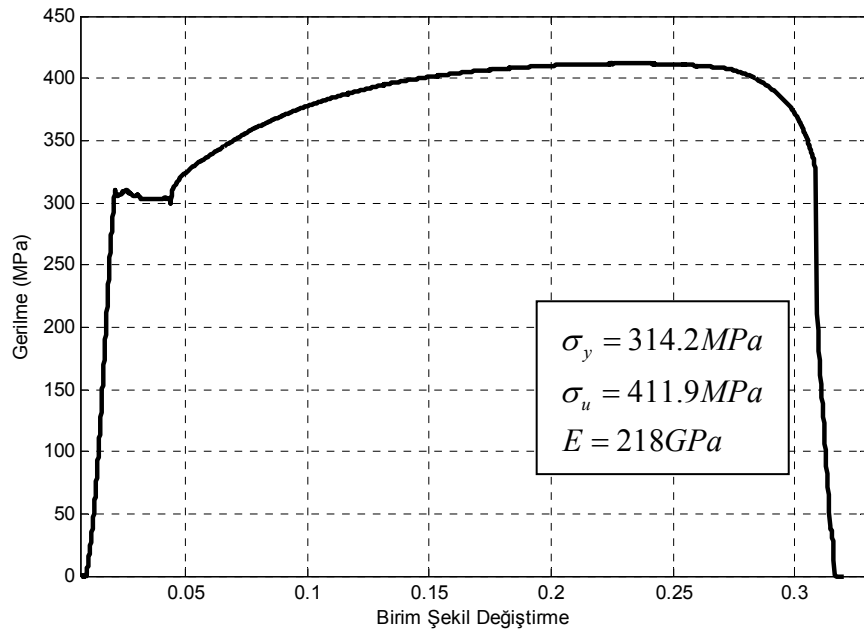
4.4 Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

4.4.1 NS1, NS2 ve NS3 Örneklerine Ait Deneyler

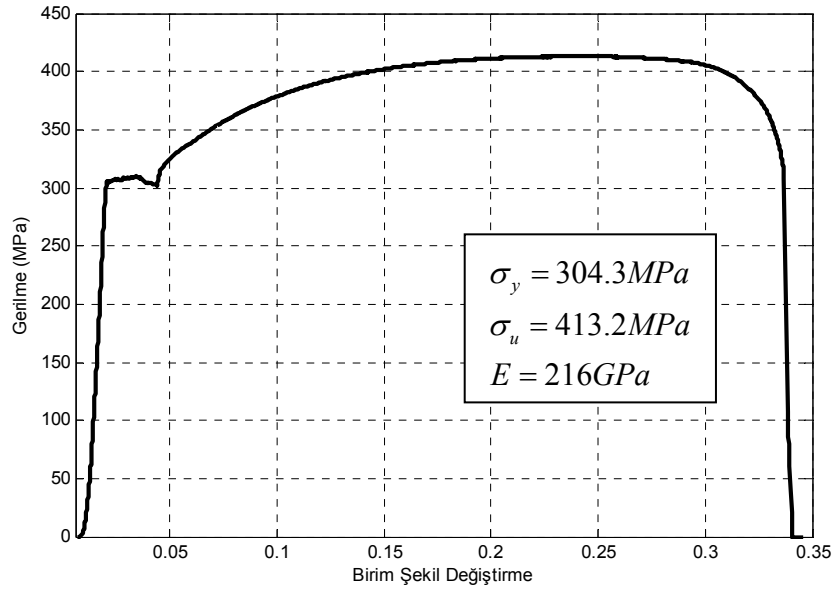
Bölüm 4.1’de ayrıntıları verildiği üzere bu örnekler üzerine deformasyon ölçerler (Strain Gage) yapıştırılmadan deneye tabi tutulan standart örneklerdir. Tüm deney boyunca teste tabi tutulan örneğin ilgili bölümünün 2 saniyede bir alınan dijital fotoğrafı, veri toplama sistemi üzerinden bilgisayara kaydedilmiştir. Deney kopma anına kadar sürdürülerek dijital görüntülerin kopma anına kadar alınabilmesi sağlanmıştır. Alınan dijital görüntüler 1024x768 çözünürlük değerine sahiptir. Yüksek çözünürlüklü dijital görüntüler analiz edilerek birim şekil değiştirme değerleri hesaplanmış ve tez hipotezinin doğruluğu bu değerler üzerinden araştırılmıştır. Bu örnekler için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ile bu deneylerden elde edilen çelik malzeme mekanik parametreleri (Akma gerilmesi, Kopma gerilmesi ve Elastisite modülü) Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir. Elde edilen bu veriler yardımıyla bütün örnekler için hesaplanan ve altıncı bölümde ele alınan sonlu elemanlar modelinde kullanılacak olan malzeme mekanik değerleri, Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.11 NS1 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil 4.12 NS2 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil 4.13 NS3 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

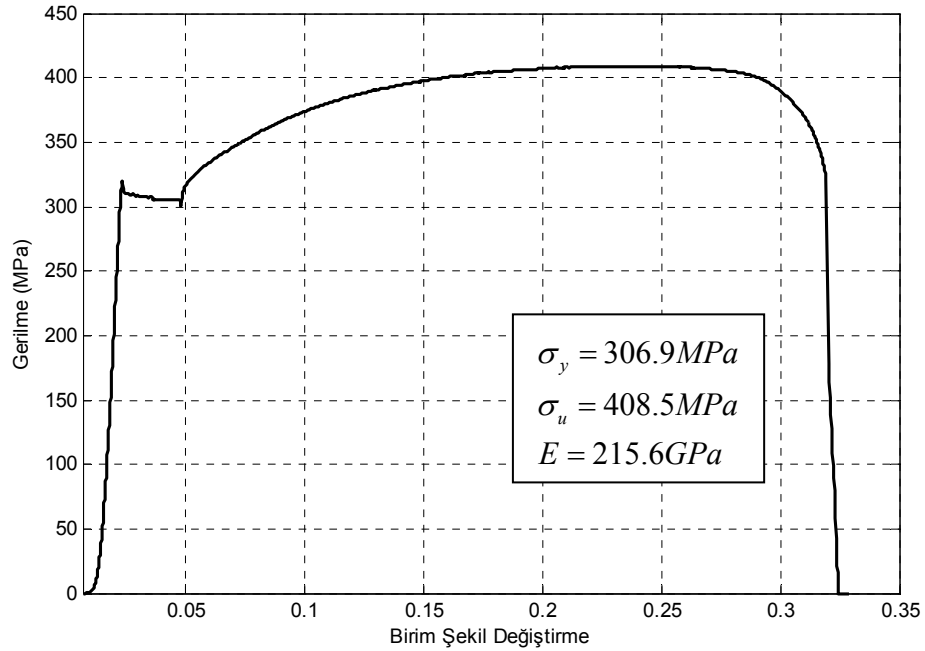
4.4.2 SG1, SG2 ve SG3 Örneklerine Ait Deneyler

Bu başlık altında irdelenecek olan örnekler, NS1, NS2 ve NS3 olarak isimlendirilen standart örneklerden üzerlerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış olanlarıdır (Şekil 4.14). Üzerlerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılan standart örnekler SG1, SG2 ve SG3 olarak isimlendirilmiş

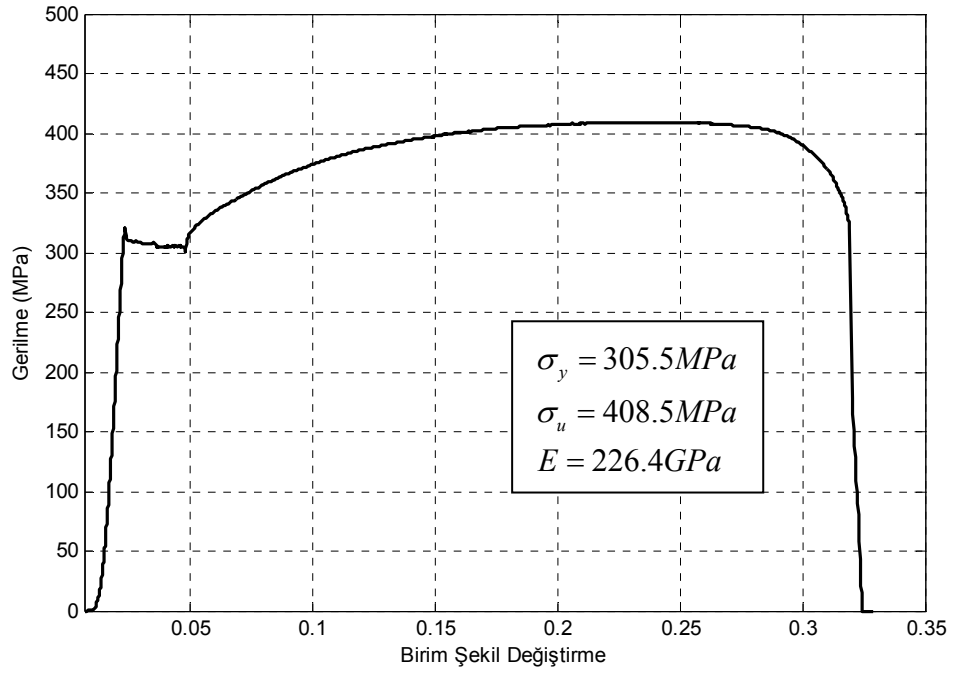
ve deneye tabii tutulmuşlardır. Bu örnekler için deney prosedürü önceki örnekler için çalıştırılan prosedürle aynıdır. Deneylerde örnekler üzerinde bulunan şekil değiştirme ölçerlerin ürettiği veriler, diğer verilerle birlikte, saniyede dört adet olmak üzere veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Kopma anına kadar yürütülen bu deneylerde, şekil değiştirme ölçer verileri kendi kapasite sınırlarına kadar alınabilmiş, kapasite sınırında örnek üzerinden kopan şekil değiştirme ölçerlerden artık veri alınamamıştır. Yine deneyler sırasında örneklerin yüksek çözünürlüklü dijital fotoğrafları periyodik olarak alınmış ve kaydedilmiştir. Bu deneylerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir. Bu veriler kullanılarak hesaplanan malzeme mekanik değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.



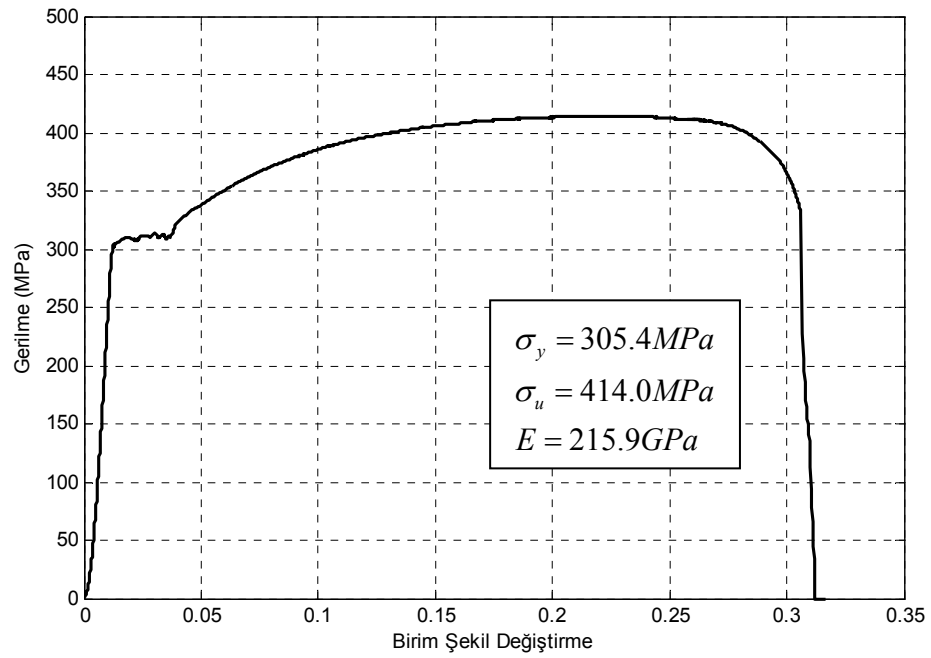
Şekil 4.14 Üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış standart örnek.



Şekil 4.15 SG1 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil 4.16 SG2 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.



Şekil 4.17 SG3 örneği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

4.4.3 EXT1, EXT2 ve EXT3 Örneklerine Ait Deneyler

Bu başlık altında irdelenecek olan örnekler, NS1, NS2 ve NS3 olarak isimlendirilen standart örneklerin üzerlerine ekstensometre yerleştirilmiş olanlarıdır. Üzerine ekstensometre yerleştirilen bu örnekler EXT1, EXT2 ve EXT3 olarak isimlendirilmiştir. Bu örnekler için deney prosedürü diğerleriyle tamamen aynıdır. Bu örnekler için deneylerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve malzeme mekanik parametreleri diğer örnekler için elde edilen eğriler ve malzeme mekanik parametreleri ile yakın benzerlikler gösterdiğinden buraya alınmamıştır.

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle örneklere ait elastisite modülü, akma gerilmesi ve kopma gerilmesi verileri hesaplanmıştır. Daha sonraki bölümlerde irdelenecek olan sonlu elemanlar modelinde kullanılmak üzere hesaplanan mekanik veriler Tablo 4.1’de görülmektedir. Tablonun en alt satırında ilgili parametre için hesaplanan varyans katsayısı verilmiştir. Her parametre için ayrı hesaplanan varyans katsayılarının (C.O.V.) %5’in altında olduğu tablodan görülmektedir ki hesaplanan bu değerler kabul edilebilir sınırlar içerisinde.

Tablo 4.1 Standart örneklere ait mekanik veriler.

Sıra No	ÖRNEK İSMİ	AKMA GERİLMESİ σ_y [MPa]	KOPMA GERİLMESİ σ_u [MPa]	ELASTİSİTE MODÜLÜ E [GPa]
1	NS1	310.100	400.700	214.0
2	NS2	314.200	401.400	218.0
3	NS3	304.300	405.800	216.0
4	SG1	306.900	397.300	215.6
5	SG2	305.500	397.500	226.4
6	SG3	305.400	397.300	215.9
7	C.O.V (%)	1.22	0.57	2.05

4.5 Görüntü Analizlerinden ve Birim Şekil Değiştirme Sensörlerinden Elde Edilen Birim Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması

4.5.1 Ardışık Karşılaştırma Yöntemine Kısa Bir Bakış

Tüm deneylerden elde edilen görüntü verileri Matlab® 7.0.0.19920 R(14) sürümü kullanılarak yazılan bir program kodu yardımıyla analiz edilmiştir. Bu kod içerisinde Matlab® programının görüntü işlemler için geliştirdiği program komutları kullanılmıştır (Arifoğlu, 2005; İnan, 2004). Yapılan programda ikinci ve üçüncü bölümde verilen görüntü işleminin teorik temelleri temel alınmıştır. Veri toplama sistemi başlığı altında detayları verildiği üzere her iki saniyede bir adet olmak üzere alınan görüntüler, anılan program kodu yardımıyla işlenerek, şekil değiştirmeler piksel hassasiyetinde hesaplanmışlardır.

Birbirini takip eden görüntüler, yazılan programda yerini alan ve Matlab®’de *Normalized Cross-Correlation* algoritması olarak ifade edilen ardışık karşılaştırma yöntemiyle analiz edilmektedir (Arifoğlu, 2005). Burada referans olarak alınan ve boyutları kullanıcı tarafından belirlenen bir makro bloğun, bir sonraki görüntüde, arama penceresi olarak adlandırılan bölgede aranması ve böylece birbiriyle en iyi çakışan makro bloğun tespit edilmesi esasına dayalı bir işlem yürütülmektedir.

Eğer bir görüntünün diğer bir görüntünün bir parçası olduğu düşünülüyorsa, parça olan görüntü bütün olan diğer görüntü üzerinde gezdirilerek üst üste çakıştığı pikseller tespit edilebilir (Şekil 4.18). Her iki görüntüdeki çakışma veya çakışmama Normalized Cross-Correlation ifadesinde “1” veya “-1” olarak ifade edilmektedir. Her piksele ait bu korelasyon değerinde “1” ’e eşit olan kısımlar çakışan veya benzeyen, “-1” ’e eşit olan kısımlar ise çakışmayan veya benzemeyen pikseller olarak kabul edilir. Bu işlem Matlab®’de üç boyutlu bir matris olarak okunan renkli resimlerin herhangi bir boyutu üzerinde yapılabilmektedir.



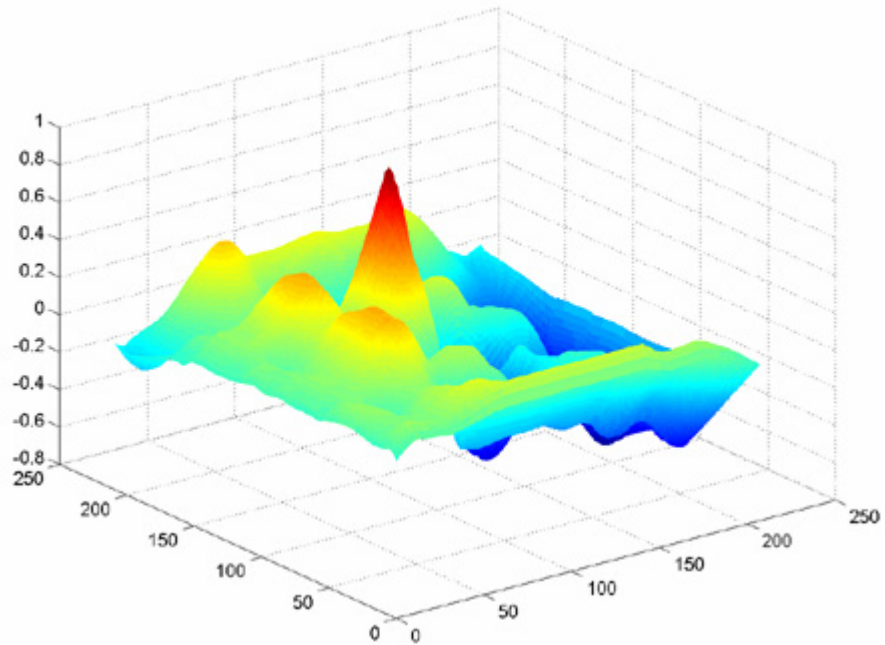
Şekil 4.18 Peppers ve Onion isimli fotoğraflar (The MathWorks User’s Guide, (2004).

Şekil 4.18’de görülen iki adet fotoğraftan küçük olanı diğerinin bir alt parçasıdır. Büyük olanının bir parçası olduğu bilinen küçük fotoğrafı, büyük parça içerisinde aramak mümkündür. Matlab® tarafından okunan bu renkli fotoğraflar boyutları görüntü çözünürlüğüne eşit olan 3 boyutlu birer matrise atanmıştır. Matrislerin 3 boyutlu oluşu Matlab®’in fotoğrafları *RGB* renkleri olarak görüp, her renk değerini ayrı bir matris olarak değerlendirmesiyle ilişkilidir (Yüksel, 2000). Görüntü analizi bu 3 boyutlu matrisin herhangi bir boyutu üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Bunun için dijital resimler üzerinde aşağıda ifadesi verilen *Normalized Cross-Correlation* komutu uygulanmıştır:

$$c = \text{normxcorr2}(\text{sub_onion}(:,:,1), \text{sub_peppers}(:,:,1)); \quad (4.1)$$

$$\text{figure, surf}(c), \text{shading flat} \quad (4.2)$$

4.1 eşitliğinde *normxcorr2* komutu Matlab®’de bulunan ve kullanıcı için hazırlanmış komutlardan olup daha önce bilgisayara okutularak hafızaya alınmış iki resim arasında *Normalized Cross-Correlation* uygulaması ile fotoğrafları karşılaştırmaktadır. Bu uygulamadan sonra yine Matlab®’de bulunan ilgili komutlarla bu işleme ait 3 boyutlu grafik (4.2)’de verilen komut yardımıyla çizilerek en iyi çakışan veya çakışmayan bölümler tespit edilebilmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Eşleştirilme grafiği (The MathWorks User’s Guide, (2004).

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi, hesaplanan Cross Correlation matrisinin pik değerleri küçük fotoğrafın büyükle en iyi çakıştığı piksellerde ortaya çıkmaktadır. En iyi eşleşmenin gerçekleştiği bölümde fotoğrafların üst üste çakıştığını ifade etmek gerekmektedir (Şekil 4.20)



Şekil 4.20 Çakıştırılan iki resim (The MathWorks User's Guide, (2004).

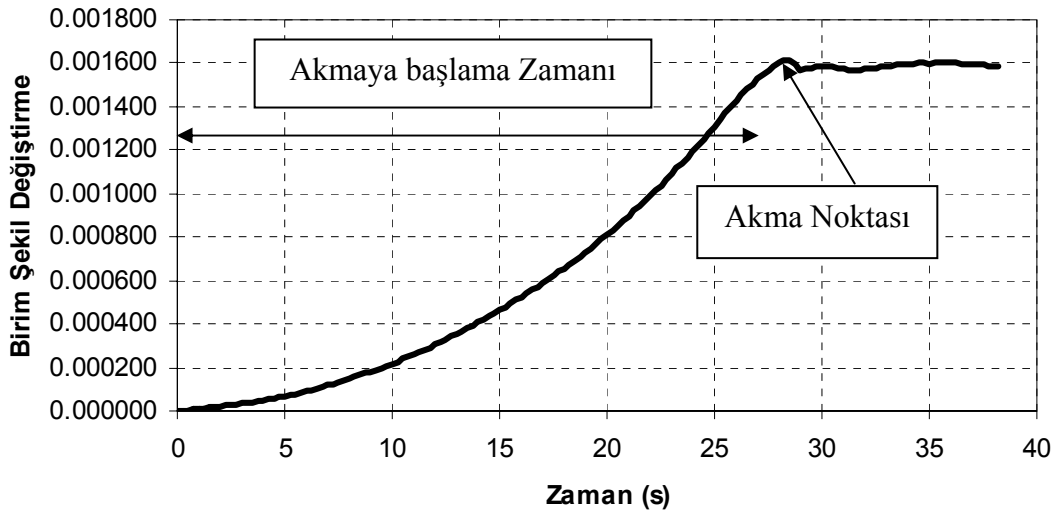
Yukarıda kısaca açıklanmaya çalışılan görüntü analizi mantığı kullanılarak Matlab® ortamında bir program kodu yazılmıştır. Yazılan program kodu deneylerden elde edilen görüntüler üzerinde çalıştırılarak deformasyon analizleri, önceki bölümlerde verilmiş teorik yapıyı kullanarak yapılmıştır. Analizler için kullanılan program kodu Ek 1'de verilmiştir.

Kullanılan analiz programı görüntüleri analiz ederek makro bloklar için piksel cinsinden hesapladığı yer değiştirmeleri bir veri dosyasına yazmaktadır. Bu dosyada her bir makro bloğun bir sonraki resim karesine göre yer değiştirmesi, $0,0$ koordinatındaki piksel referans alınarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu yer değiştirmeler yine Matlab® ortamında yazılan ve Ek 2'de verilen diğer bir program kodu yardımıyla grafiğe dökülerek, görüntü alanında kalan bütün parçanın şekil değiştirme dağılımı elde edilebilmektedir. Piksel cinsinden elde edilen şekil değiştirmeler, her deney için bir pikselin uzunluk cinsinden değeri bilindiğinden, uzunluk cinsine dönüştürülebilmektedir. Ayrıca birim şekil değiştirmeler, piksel cinsinden hesaplanan şekil değiştirme değerleri veya uzunluk cinsine dönüştürülmüş şekil değiştirme değerleri yardımıyla hesaplanabilmektedir.

4.5.2 Birim Şekil Değiştirme Analizi İçin Gerekli Görüntü Sayısının Belirlenmesi

Yüksek çözünürlüklü dijital görüntülerden birim şekil değiştirmelerin hesaplanabilmesi için, gerçek şekil değiştirme verisinin alındığı strain gage verilerine bakarak akma birim şekil değiştirmesi ile bu ana karşılık gelen zamanın belirlenmesi gerekmektedir. Şekil değiştirme ölçer verileri temel alınarak akma zamanı ve akma anındaki şekil değiştirme SG1, SG2 ve SG3 örnekleri için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Bu verilerinden anlaşılmıştır ki her üç örnek de yaklaşık aynı zaman süresinde (yaklaşık 30 s) akma noktasına ulaşmıştır (Şekil 4.21). Örnekler için elde edilen akma zamanları arasındaki küçük farkların deneye başlama zamanı ve çekme cihazının deney örneğini kavrayıncaya kadar geçen zamanla ilgili olduğu düşünülmektedir.

Her bir deformasyon ölçer verisinden elde edilen akma zamanına karşılık gelen toplam dijital görüntü sayısı belirlenerek birim şekil değiştirme analizinde kullanılmıştır. Örneğin SG1 örneği için akma süresinin deneyin başlangıcından itibaren 30 s olduğu Şekil 4.21’de görülmektedir. Önceki bölümde ayrıntıları verildiği üzere her iki saniyede bir dijital görüntü alındığı düşünülürse, deformasyon analizi için toplam 15 adet dijital görüntünün kullanılmasının gerektiği açıktır.



Şekil 4.21 SG1 örneği birim şekil değiştirme-zaman grafiği.

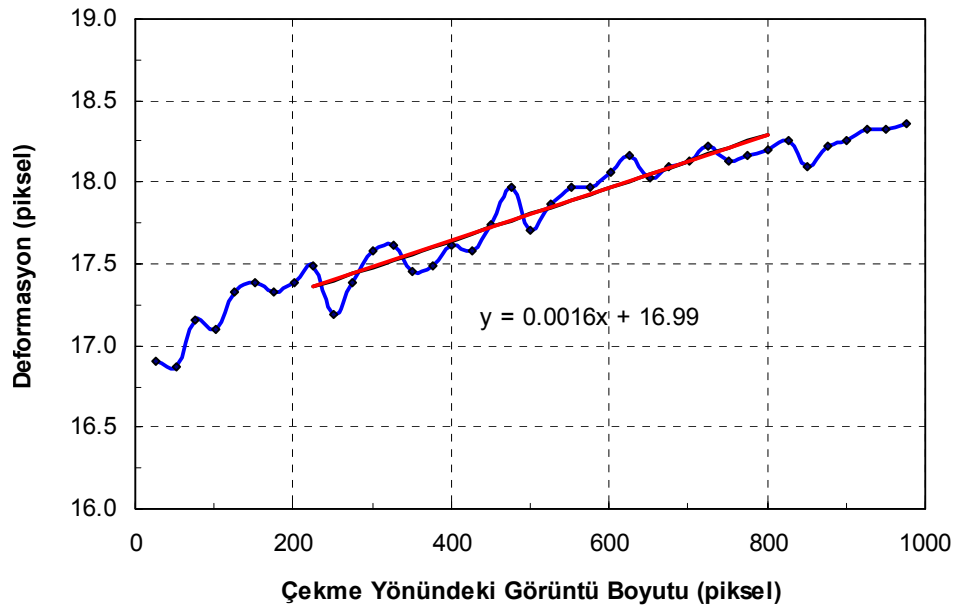
Analiz edilecek görüntülerin seçiminde dikkat edilecek önemli bir diğer husus da, analiz edilecek görüntülerin, şekil değiştirme ölçerlerin veri kaydetmeye başladığı ve bittiği zaman aralığına denk düşen görüntüler olması gerektiğidir. Şekil değiştirme ölçerlerin veri kaydetmeye başladığı zaman aralığı deney verilerinden kolayca okunabilmektedir. Eğer bu ayrıntı gözden

kaçırılırsa görüntü analizlerinden elde edilen birim şekil değıştirmeler olduğundan küçük veya büyük hesaplanabilir.

4.5.3 Dijital Görüntülerden Birim Şekil Değıştirmelerin Hesaplanması

Yukarıdaki paragraflarda verilenler teori çerçevesinde, deneylerde kullanılan SG1, SG2 ve SG3 olarak isimlendirilen ve üzerinde şekil değıştirme ölçer (Strain Gage) yapıştırlarak test edilen örneklerin birim şekil değıştirme analizleri, örneklerin akma anına kadar alınan görüntüler kullanılarak yapılmıştır. Gerek görüntü analizlerinden elde edilen birim şekil değıştirme değeri ve de gerekse şekil değıştirme ölçerin (strain gage) kaydettiğı birim şekil değıştirme değeri arasında yapılan karşılaştırmalardan elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

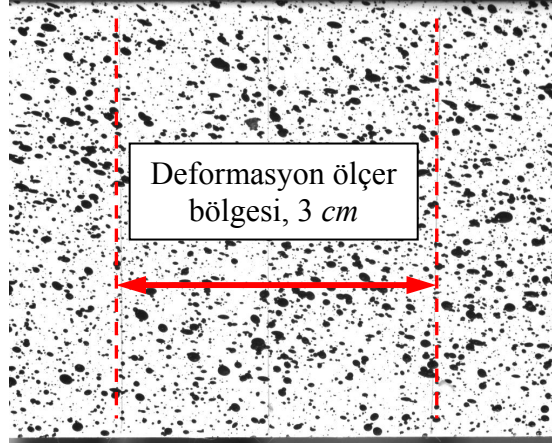
SG1 örneğine ait görüntü alanı yer değıştirme dağılımı Şekil 4.22’de verilmiştir. Şekil 4.22’de yatay eksen uygulanan çekme kuvveti yönündeki görüntü boyutunu temsil ederken, düşey eksen örnek üzerinde aynı düşeyde bulunan makro blokların çekme yönündeki toplam yer değıştirmesinin ortalamasını piksel cinsinden vermektedir. SG1, SG2 ve SG3 örneklerinin görüntülerden hesaplanan birim şekil değıştirme değeri ile deformasyon ölçer verilerinden elde edilen birim şekil değıştirme değeri karşılaştırması bölüm 4.5.4’te verilmiştir.



Şekil 4.22 SG1 örneğı yer değıştirme grafiğı.

Görüntülerden birim şekil değıştirmelerin hesaplanabilmesi için, örneğın arka yüzeyinde bulunan şekil değıştirme ölçerin konumunun piksel cinsinden tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu nedenle şekil değiştirme ölçerlerin bağlı bulunduğu örnek kısmı deneyler öncesinde tükenmez kalemle işaretlenmiştir (Şekil 4.23). Görüntü işleyebilen herhangi bir program kullanılarak şekil değiştirme ölçerin (Strain Gage) yerini belirleyen çizili bölgenin piksel cinsinden koordinatları kolayca elde edilebilir. Bu değerler kullanılarak şekil değiştirme ölçer bölgesi için hesaplanan birim şekil değiştirme, o bölgede çizilen eğri için çizdirilen doğrunun eğimi olarak okunabilir (Şekil 4.22).



Şekil 4.23 Şekil değiştirme ölçer bölgesi.

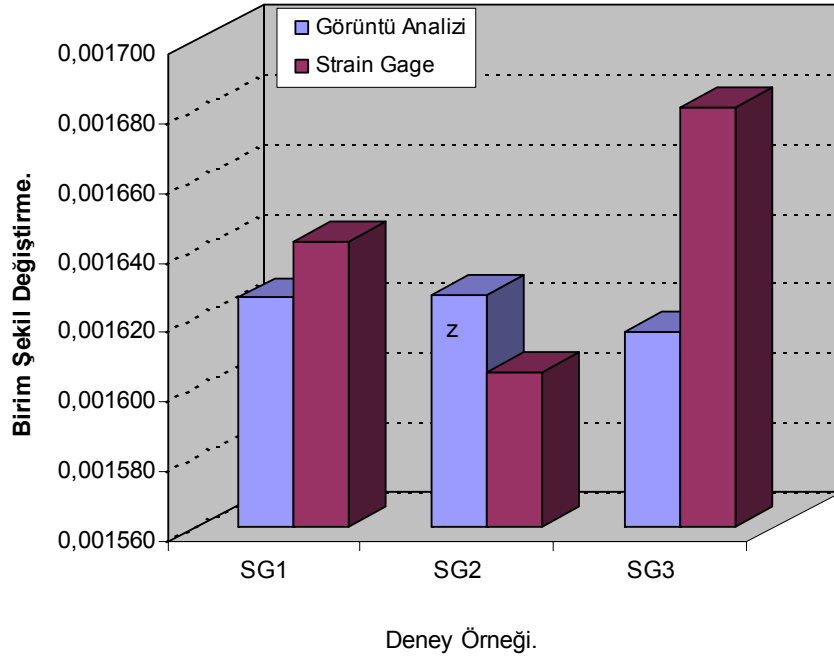
4.5.4 Birim Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması

Yapılan analizler neticesinde SG1, SG2 ve SG3 örnekleri için görüntü analizinden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ile şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri Tablo 4.2'nin ilgili sütununda verilmiştir. Tablonun son sütununda her iki yöntemle ölçülen/hesaplanan bu birim şekil değiştirme değerleri arasında ortaya çıkan maksimum mutlak hata hesaplanarak verilmiştir. Elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Birim şekil değiştirme değerleri arasında ortaya çıkan maksimum mutlak hata SG3 örneği için %3.96 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.2 SG1, SG2 ve SG3 örnekleri birim şekil değiştirme değerleri.

Örnek Adı	Birim Şekil Değiştirmeler (ε)				Maksimum Mutlak Hata (%)
	Görüntü Analizinden	Deformasyon Ölçerden	ε*10 ⁶		
SG1	1.62581E-03	1.64189E-03	1626	1642	0.98
SG2	1.62669E-03	1.60418E-03	1627	1604	1.40
SG3	1.61600E-03	1.68045E-03	1616	1680	3.96

Standart deney örneklerinden SG1, SG2 ve SG3 örnekleri için şekil değiştirme ölçerden (Strain Gage) elde edilen şekil birim değiştirmeler ile görüntü analizlerinden elde edilen birim şekil değiştirmeler Şekil 4.24'te grafik olarak görülmektedir. Şekil 4.24'ün dikey ekseninde, yatay ekseninde verilen örnekler için hesaplanan birim şekil değiştirmeler görülmektedir. Şekilde verilen grafikte farklı renkli sütunlarla temsil edilen birim şekil değiştirme değerlerinden birisi şekil değiştirme sensörlerine (Strain Gage) ait iken diğer renkli sütun, görüntü analizlerinden elde edilen birim şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Her iki şekil değiştirme ölçüm yönteminden elde edilen birim şekil değiştirmelerin birbirine kabul edilebilir oranda yakın olduğu bu grafikten de görülmektedir (Şekil 4.24). SG1, SG2 ve SG3 örnekleri için görüntü analizlerinden hesaplanan birim şekil değiştirmeler aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

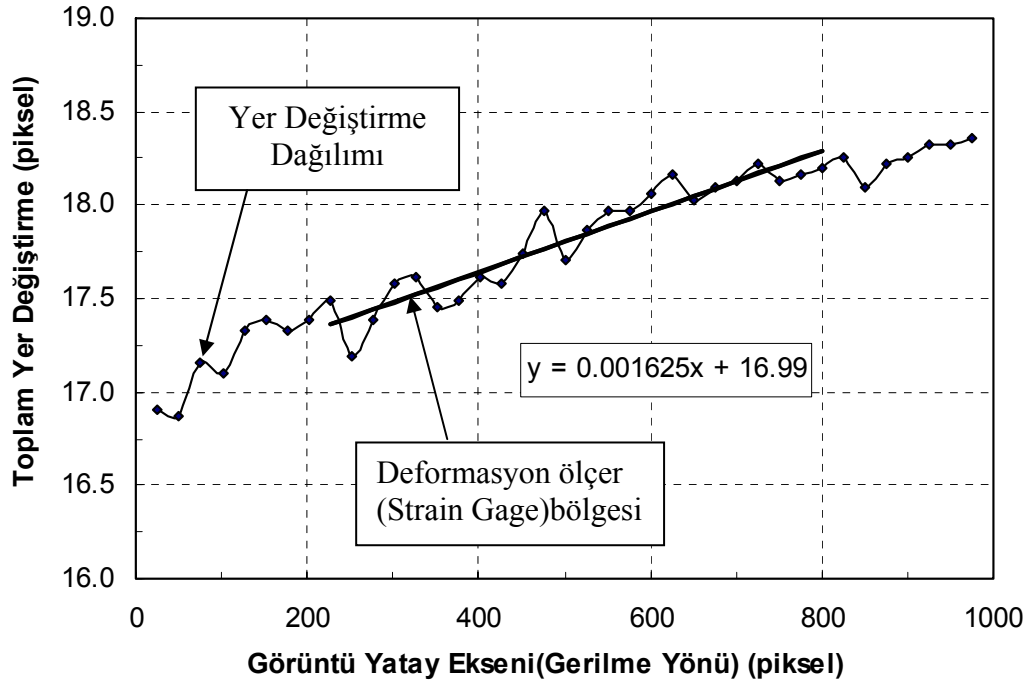


Şekil 4.24 Görüntü analizinden ve şekil değiştirme ölçerden elde edilen birim şekil değiştirmelerin karşılaştırılması.

4.5.4.1 SG1 Örneği Birim Şekil Değiştirme Analizi

SG1 örneğinin deney sırasında akma anına kadar yapmış olduğu toplam birim şekil değiştirme deformasyon ölçer verisinden **0.00164189** olarak okunmuş ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Ayrıca bu değer, deformasyon ölçerden elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin dikey ekseninde, zamanın yatay ekseninde verildiği grafik olan Şekil 4.21'den de okunabilmektedir. Şekil 4.25'te ise SG1 örneği için görüntü analizlerinden elde edilen toplam

şekil değiştirmeler ve birim şekil değiştirme hesabı için çizilen regresyon doğrusu görülmektedir. Şekil 4.25'te görülen eğri makro blokların çekme yüklemesi yönünde, akma anına kadar yapmış olduğu toplam doğrusal yer değiştirmeyi piksel cinsinden tüm görüntü alanı için temsil etmektedir. Siyah renkli olan doğru parçası, toplam yer değiştirme eğrisi içerisinde Şekil 4.23'de görülen şekil değiştirme ölçer bölgesine denk gelen bölüm için çizilmiş regresyon doğrusudur. Bu doğru parçasının eğimi olarak okunan deney örneğinin toplam birim şekil değiştirmesi **0.00162581** dir. Şekil değiştirme ölçer (strain gage) verilerinden elde edilen birim şekil değiştirme ile görüntü analizinden elde edilen değer birbirine oldukça yakın olduğunu tespit etmek gerekmektedir (**0.00164189-0.00162581**). Her iki birim şekil değiştirme değeri arasında maksimum mutlak hata %0.98 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.2). Birim şekil değiştirmeler arasındaki çok küçük fark tezin ilk bölümünde verilen tez hipotezini doğrulamaktadır. Yani dijital görüntü yöntemi kullanılarak ölçülen birim şekil değiştirmeler deformasyon ölçer yardımıyla elde edilen birim şekil değiştirme verilerine kabul edilebilir oranda yakındır. Ayrıca kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalan bu farkın her iki deformasyon ölçüm yönteminden de kaynaklanabileceği unutulmamalıdır.

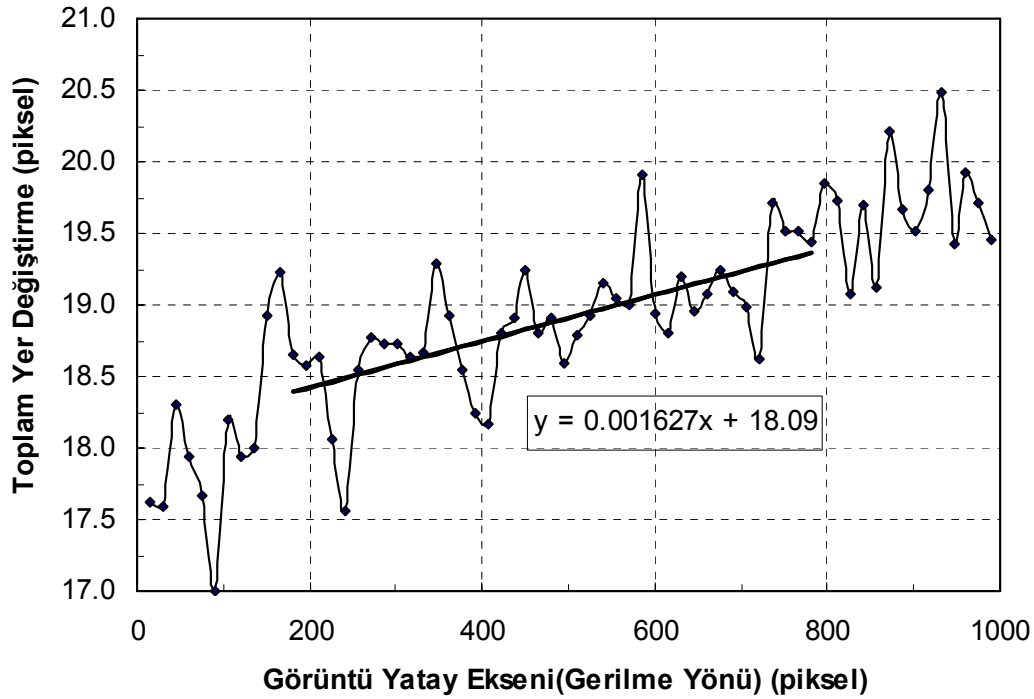


Şekil 4.25 SG1 örneği için görüntü yöntemi ile birim şekil değiştirme analizi.

4.5.4.2 SG2 Örneği Birim Şekil Değiştirme Analizi

SG2 örneğinin deney sırasında akma anına kadar yapmış olduğu toplam birim şekil değiştirme deneylerden **0.00160418** olarak elde edilmiş ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Şekil

4.26’da ise SG2 örneği için görüntü analizlerinden her bir makro blok için elde edilen çekme yönündeki toplam yer değiştirmeler ve birim şekil değiştirme hesabı için çizilen regresyon doğrusu görülmektedir. Bu doğru parçasının eğimi olarak okunan deney örneğinin toplam birim şekil değiştirmesi **0.00162581** olarak, SG2 örneği için birim şekil değiştirmeler arasındaki maksimum mutlak hata % 1.40 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.2). Bu örnek için de şekil değiştirme ölçer verilerinden elde edilen birim şekil değiştirme ile görüntü analizinden elde edilen değer birbirine kabul edilebilir oranda yakın olduğunu tespit etmek gerekmektedir.

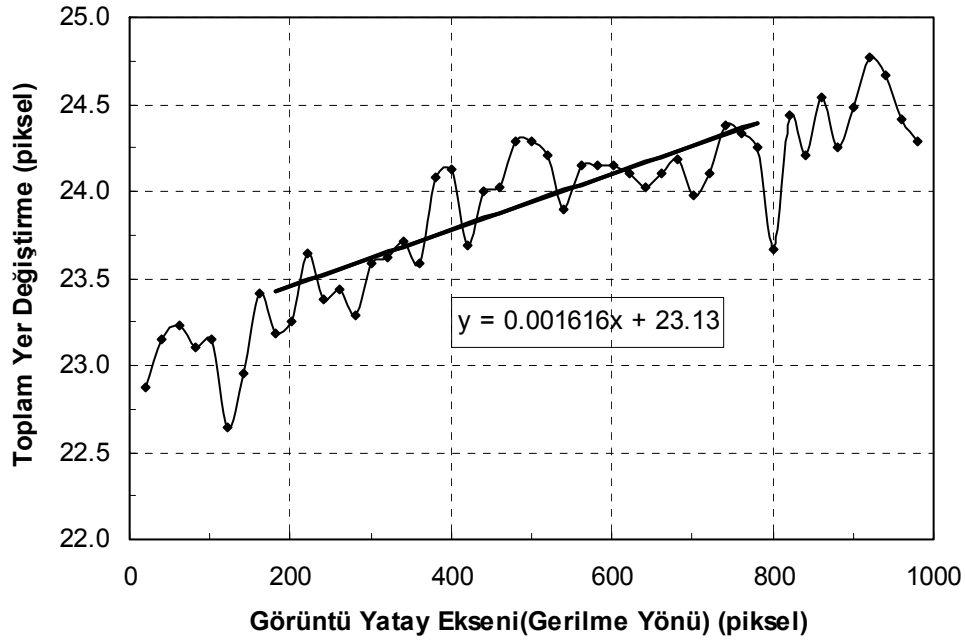


Şekil 4.26 SG2 örneği için görüntü yöntemi ile birim şekil değiştirme analizi.

4.5.4.3 SG3 Örneği Deformasyon Analizleri

SG3 örneğinin deney sırasında akma anına kadar yapmış olduğu birim şekil değiştirme deneylerden **0.00168045** olarak elde edilmiş ve Tablo 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.27’de ise SG3 örneği için görüntü analizlerinden her bir makro blok için elde edilen toplam yer değiştirmeler ve birim şekil değiştirme hesabı için çizilen regresyon doğrusu görülmektedir. Bu doğru parçasının eğimi olarak okunan deney örneğinin birim şekil değiştirmesi **0.00161600** olarak hesaplanmıştır. SG3 örneği için de deformasyon ölçer verilerinden elde edilen birim şekil değiştirme ile görüntü analizinden elde edilen değer birbirine kabul

edilebilir oranda yakın olduğunu tespit etmek gerekmektedir. Her iki veri arasında ortaya çıkan maksimum mutlak hata %3.96 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.27 SG3 örneği için görüntü yöntemi ile birim şekil değiştirme analizi.

4.5.5 Standart Örnek Deneyleri için Sonuç ve Değerlendirme

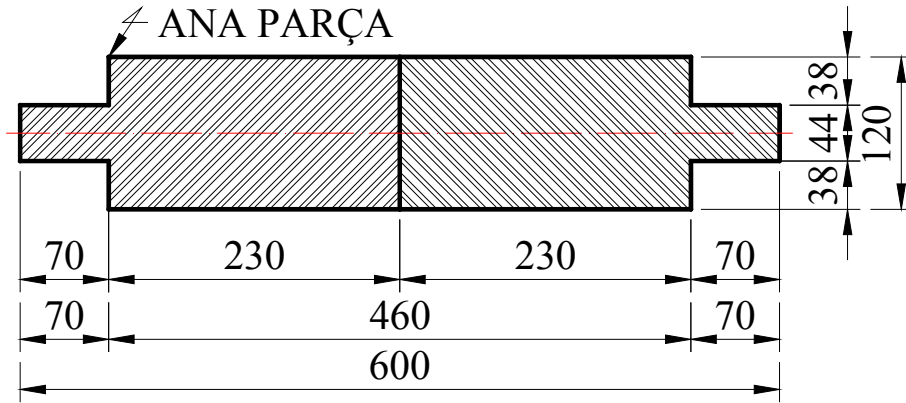
Bu tez çalışmasının birinci bölümünde, dijital görüntülerin işlenmesiyle elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin klasik deformasyon ölçüm yöntemleriyle elde edilen birim şekil değiştirme değerlerine kabul edilebilir oranda yakın olması tez hipotezi olarak ifade edilmişti. Görüntü analizi ile şekil değiştirme tayininin çelik yapılarda kullanılabilmesi, ancak bu hipotezin doğrulanması durumunda mümkün olabilecekti. Yukarıdaki paragraflarda ayrıntıları verilen ve standart deney örnekleri için görüntü analizi ile elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin her üç örnek için de (SG1, SG2 ve SG3) şekil değiştirme ölçerlerden (Strain Gage) elde edilen birim şekil değiştirme değerlerine son derece yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil değiştirme ölçer ve görüntü analizlerinden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri arasındaki maksimum mutlak hata SG3 örneği için % 3.96 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.2). SG1 ve SG2 örnekleri için maksimum mutlak hata değerleri sırayla %0.98 ve % 1.40 olarak hesaplanmıştır. Birbirine kabul edilebilir oranda yakın olan bu değerler göstermektedir ki görüntü analizleri ile yer değiştirme ve birim şekil değiştirme hesabı standart çelik çekme örnekleri için laboratuvar şartlarında kullanılabilir bir yöntemdir.

5. ÇELİK ÇEKME ELEMANLARININ EKLERİNİN HAZIRLANMASI VE TEST EDİLMESİ

5.1 Birleşimlerin Tasarlanması ve Örneklerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında deneyleri gerçekleştirilen birleşimlerin imal edileceği çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesine ilişkin testler, dördüncü bölümde detaylarıyla verilmişti. Mekanik özellikleri deneylerle belirlenen çelik malzeme kullanılarak, basit kaynaklı ve bulonlu çekme elemanları imal edilmiştir. Birleşimlerin tasarlanmasında, öncelikle laboratuvar imkânları dikkate alınmıştır. Birleşim deneylerin yapılmasında da, standart örneklerin de test edildiği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi laboratuvarları kullanılmıştır. Deneyler için farklı tip ve ebatlarda kaynaklı ve bulonlu (cıvatalı) örnekler hazırlanmıştır.

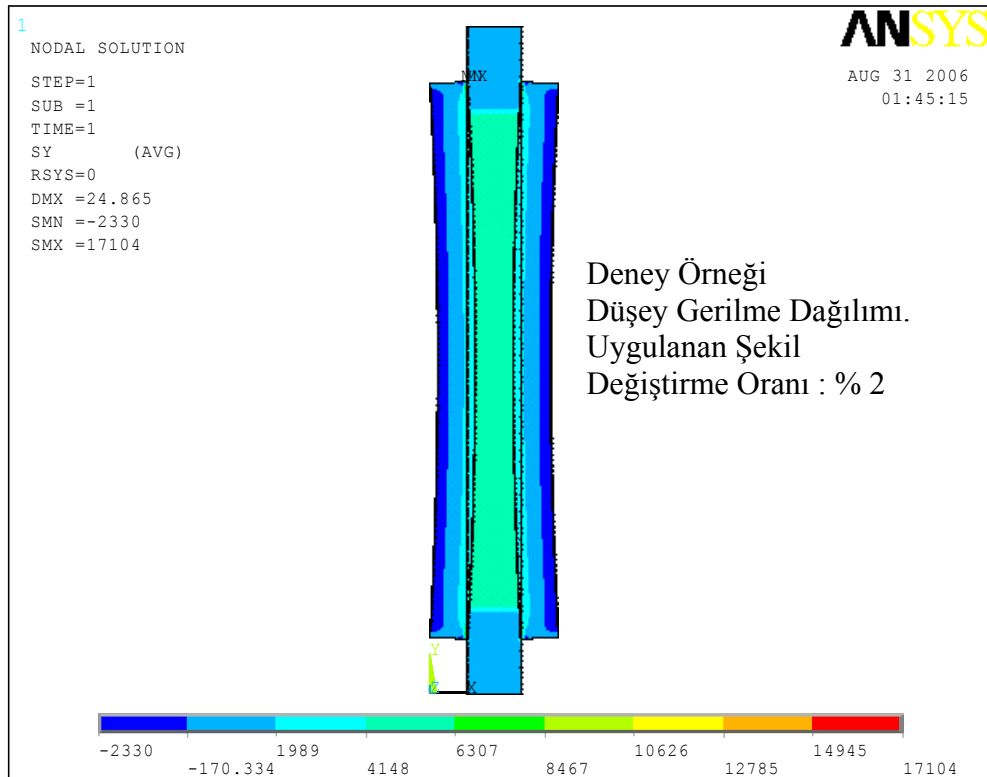
Birleşim detayları kendi aralarında değişmek kaydıyla, kaynaklı ve bulonlu eklerle birleşimi sağlanan parçalar ile bu parçaların çekme cihazı çeneleri arasında kalacak kısmına ait ait detay Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekilde verilen boyutlar *mm* cinsindendir.



Şekil 5.1 Birleştirilecek parçalara ait detay.

Birleştirilecek parçaların boyutlarının tespitinde, standart örnekler için çekme deneyinde kullanılmış ve teknik özellikleri önceki bölümlerde verilmiş olan çekme cihazının boyut sınırları ve maksimum çekme kapasitesi dikkate alınmıştır. Standart deney örneklerinden birleşimlerde kullanılacak çelik malzeme için kopma mukavemeti $\sigma_u = 414.1527 MPa$ olarak tespit edilmişti. Buna göre, Şekil 5.1’de boyutları verilmiş olan birleşimi oluşturacak parçaların kopma mukavemeti, birleşimin ana parçadan kopması durumunda, eksenel çekme kuvveti olarak en fazla $292.515 kN$ ($29.818 t$) olacaktır ki bu değer, çekme cihazı kapasite sınırları içinde kalmaktadır. Kaldı ki birleşimin, birleşimi oluşturan diğer parçalardan ve/veya

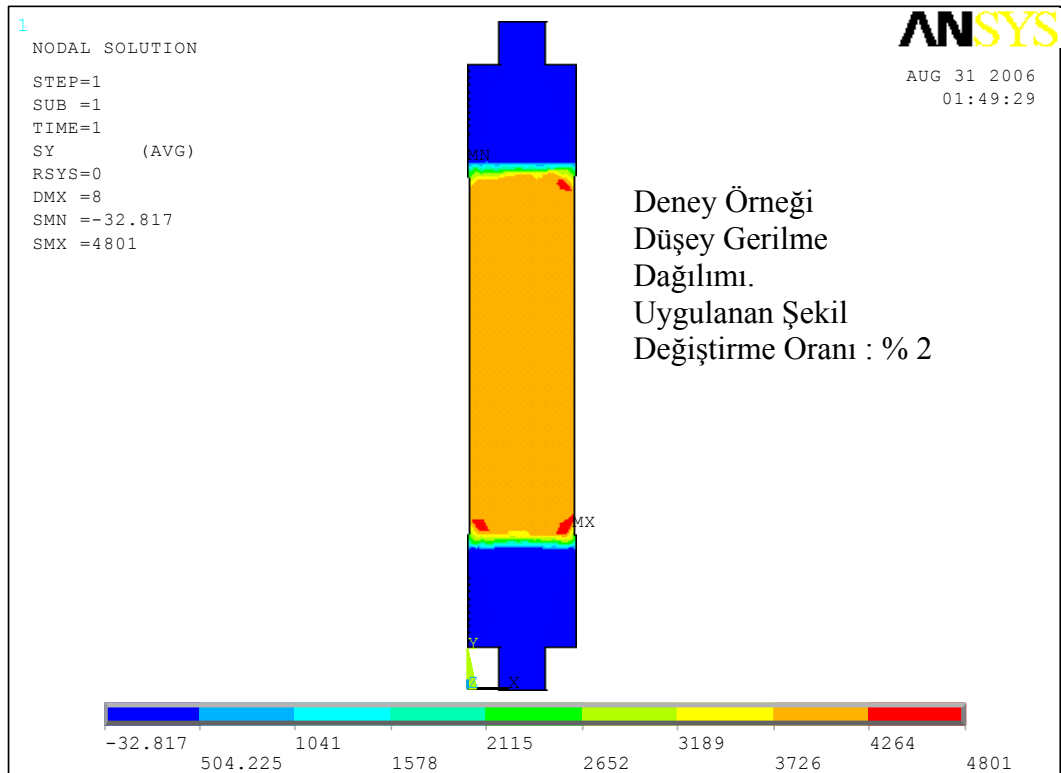
birleşimi sağlayan birleştirme elemanlarından göçmesi durumunda bu eksenel çekme kuvveti değerlerine ulaşmak mümkün olmayacaktır. Şekil 5.1’de $70 \times 44 \text{ mm}$ ebatlarında görülen kısım çekme cihazı çeneleri arasında kalacak kısımdır. Bu boyutlar da yine çekme cihazı boyut sınırları değerlendirilerek tasarlanmıştır. Çekme cihazında kuvvet aktaracak çenelere ait genişlik 53 mm dir ve bu değerden daha geniş boyutlu bir örnek tasarlanması halinde çekme deneylerini gerçekleştirmek mümkün olmayacaktır. Dolayısıyla çekme cihazı çeneleri arasında kalacak bölüm 50 mm olarak imal edilmiştir. Ancak bu durumda da cihazın bu dar kısım üzerinden uyguladığı kuvvetin, cihaz tablaları arasında kalan ve birleşimi oluşturan parçalara, üniform olarak yayılmayacağı düşünülerek, Şekil 5.1’de verilen parçanın sonlu elemanlar modeli bilgisayar ortamında Ansys programı yardımıyla oluşturulmuş ve eksenel çekme kuvveti altındaki davranışı izlenmiştir (Şekil 5.2). Şekilde yükün, çekme cihazı çenelerine ait genişliğe tekabül eden 50 mm lik bölüm kullanılarak uygulanması durumunda, meydana gelen gerilmelerin, birleşimi oluşturan asıl bölümde üniform olarak dağılmadığı görülmektedir. Numunenin orta kısmı çekme gerilmelerine maruz kalırken, kenar kısımlarında basınç gerilmelerinin olduğu sonlu elemanlar çözümüyle tespit edilmiştir (Şekil 5.2).



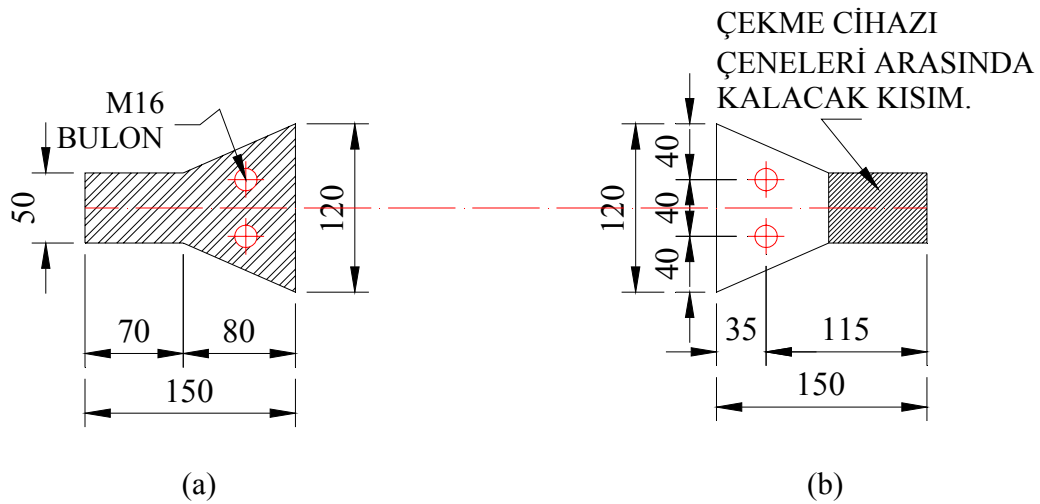
Şekil 5.2 Dar çeneler kullanılarak yapılan yüklemede gerilme dağılımı.

Alınan bu sonuç, yükün birleşim parçaları üzerine daha üniform bir şekilde aktarılabilmesini sağlayacak bir detay geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu detayla, 50 mm çene genişliği kullanılarak uygulanmak zorunda olan eksenel yükün, birleşimi oluşturan ana parça genişliği olan 120 mm genişlik üzerine üniform bir şekilde dağılması amaçlanmıştır. Yükün tüm eleman genişliği kullanılarak uygulanması durumunda, modele ait gerilme sonuç grafiği Şekil 5.3’de görülmektedir. Şekil 5.3’te, elemanın maruz kaldığı %2 lik birim şekil değiştirmeye karşın, birleşimde ortaya çıkan gerilme ve parçalar üzerindeki dağılımı görülmektedir. Birleşim üzerindeki gerilmelerin beklendiği üzere parçalar üzerinde üniform olarak dağıldığı şekilden anlaşılmaktadır (Şekil 5.3).

Şekil 5.3’de sonuç grafiği verilmiş olan üniform gerilme dağılımının elde edilebilmesi için geliştirilen çene bağlantısına ait detay Şekil 5.4’te verilmiştir. Şekilde ayrıntıları verilen birleşim detayı, birleşimlerin imal edildiği makine atölyesinde yapılmıştır. Bu ek parçalarla cihazının eleman üzerine uyguladığı çekme yükünün tüm eleman genişliği olan 120 mm’ye yayılması, parçayı bağlayan ve Şekil 5.5’te görülen kaynak dikişleriyle sağlanmıştır. Şekilde verilen boyutlar mm cinsindendir.

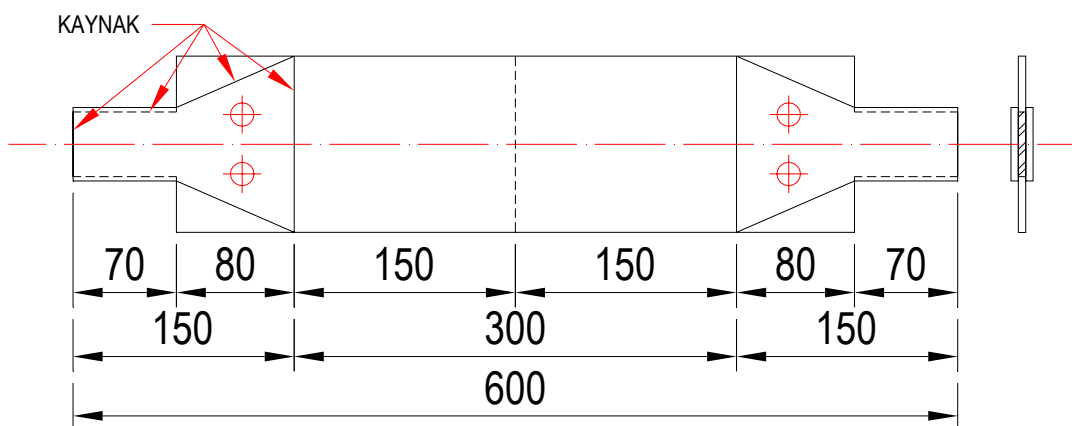


Şekil 5.3 Ek mesnet detayı ile birleştirilmiş deney örneğinde gerilme dağılımı.



Şekil 5.4 Çekme cihazı çene bağlantısı detayı.

Bu ek detay, birleşimin her iki yüzüne olmak üzere her birleşimde dört adet kullanılmıştır. Şekil 5.4 (b)'de görülen taralı kısım çekme cihazı çeneleri arasında kalacak kısımdır ve 50 mm genişliğe sahiptir. Bu parça, çekme cihazı çenelerinin tuttuğu 50x70 mm boyutlu bölümden sonra eğimli olarak birleşimi oluşturan ana parça üzerine genişleyen bir formda uzanmakta ve 80 mm sonra tüm birleşim genişliğine ulaşmaktadır. Bütün çevresi boyunca ana parçaya köşe kaynağıyla bağlanan bu ek detay, ayrıca iki adet ISO 8.8 kalitesinde M16 bulon yardımıyla kuvvetlendirilmiştir. Birleşimin mesnedini oluşturan bu detay, birleşim toplam kapasitesinin üzerinde bir kapasiteye sahip olacak şekilde tasarlanmış ve böylece deneyler sırasında birleşimden önce göçmesinin önüne geçilmiştir. Hazırlanan tipik bir çekme elemanı çenelere bağlanacak bölümleri ile birlikte Şekil 5.5'te görülmektedir. Şekilde verilen boyutlar mm cinsindendir.



Şekil 5.5 Çene bağlantı detaylarıyla tipik birleşim örneği.

Yukarıda ayrıntıları verilen imalatlar küçük sanayi sitesinde bir makine imalat atölyesinde yaptırılmıştır. Birleşimi oluşturacak parçaların kesimleri elektronik makas ve/veya testere yardımıyla yapılmıştır.

Birleşimlerin mesnet bölgelerinde ve kaynaklı birleşimler içerisindeki tüm kaynaklarda, standart elektrik arkı kaynağı (elektrot kaynağı) kullanılmıştır. Kaynaklama işlerinde, 300 *A* akım çekebilen (170 *KW* gücünde) bir kaynak makinesi kullanılmış ve tüm kaynaklar bu makinede 160 *A* lik bir elektrik akımı ayarıyla yapılmıştır. Kaynaklama işlerinin tamamında Oerlikon marka (Overcord-S 3.25x350) Rutil tip kaynak elektrotu kullanılmıştır. Seçilen elektrotlara ait malzeme mekanik özellikleri üretici firma tarafından şu şekilde verilmiştir:

Çekme Mukavemeti : $\sigma_u=510-650 \text{ N/mm}^2$

Akma Gerilmesi : $\sigma_y=380 \text{ N/mm}^2$

Kopma Birim Şekil Değiştirmesi : $U_f=\%22$

Ana levha ve mesnet detayları yukarıda verilen elemanlar kullanılarak dört grup birleşim imal edilmiştir. İki grubu bulonlu, iki grubu da kaynaklı olarak imal edilen birleşimlerin her bir grubunda, birbirinin aynı üç adet birleşim örneği bulunmaktadır. Yani, kaynaklı ve bulonlu olmak üzere toplam oniki adet birleşim imal edilerek deneye tabii tutulmuştur.

Bu deney gruplarının dışında tutularak, bütün birleşim parametreleri ve boyutları bölüm 5.1.1 Şekil 5.9'da verilen birleşimlerle aynı iki adet kaynaklı birleşim daha hazırlanmıştır. KBSG1 ve KBSG2 ismi verilen bu iki birleşim üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılarak deneye tabii tutulmuştur. 4. bölümde ayrıntıları verilen standart örnek deneylerinde, örnek üzerine yapıştırılan şekil değiştirme ölçerden alınan verilerin görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme verileriyle karşılaştırılması yapılarak sonuçları grafik olarak verilmişti (Şekil 4.24). Standart örnekler için her iki ölçüm yönteminden elde edilen verilerin birbirine kabul edilebilir oranda yakın olduğu tespit edilmişti. Bu durumun birleşimler için geçerli olup olmadığını tespit etmek üzere hazırlanan iki adet kaynaklı birleşim örneği üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılarak test edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan kaynaklı birleşim örneği ve üzerine yapıştırılmış şekil değiştirme ölçer Şekil 5.6'da görülmektedir. Şekil değiştirme ölçerler her iki örnekte de, örneğin kameraya bakan yüzüne yapıştırılmıştır. Şekil değiştirme ölçerlerin kalibrasyonu deneyler öncesinde yapılmıştır. Bu örneklere ait değerlendirmeler Bölüm 5.3'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

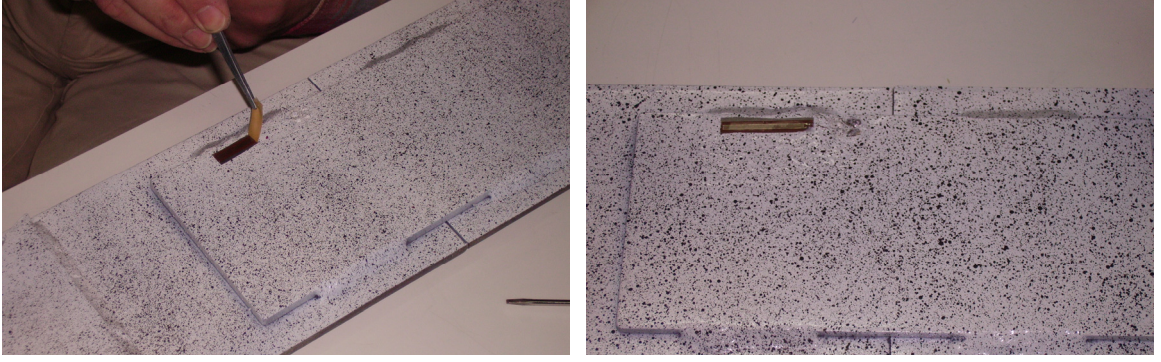


Şekil 5.6 KBSG1 örneği fotoğrafı.

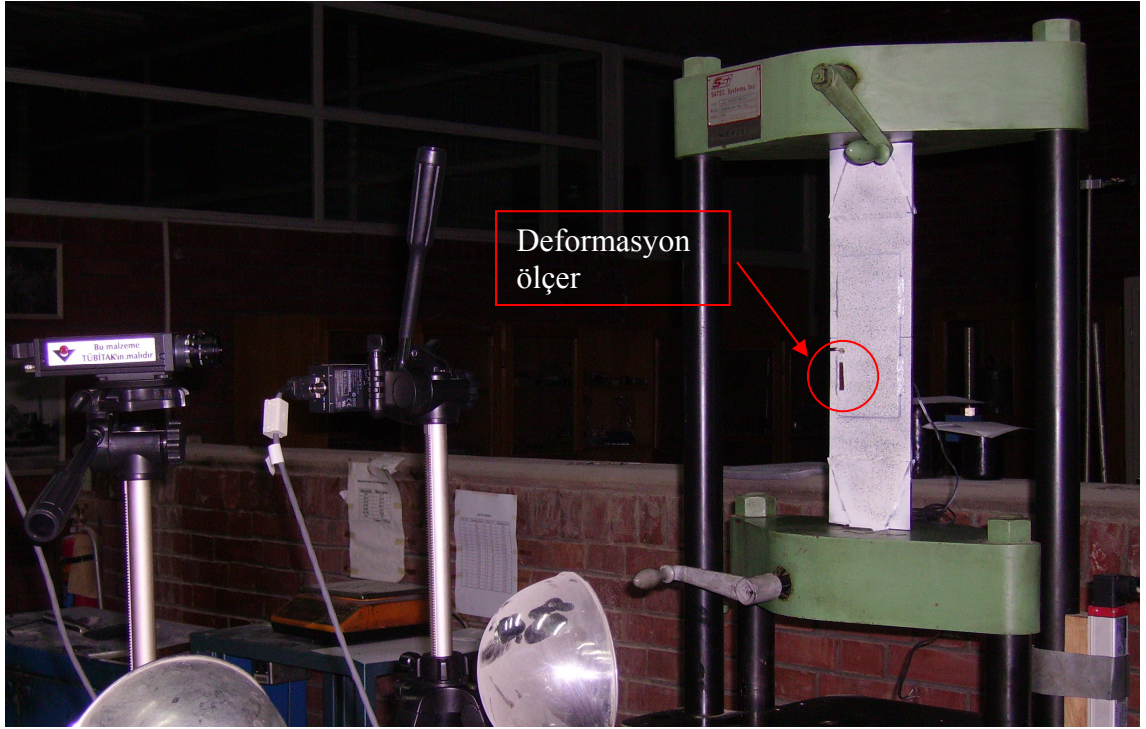
Deneylerde kullanılacak örneklerin tümünün görüntü alan kameralara bakan yüzleri, standart örnekler üzerinde yapılan deneylerde olduğu gibi, boya tutabilmeleri için, kumlama işlemine tabii tutulmuş, ayrıca gerekli kısımları zımparalandıktan sonra asetonla temizlenmiştir. İyice temizlenen örnek yüzeyleri, sprey boya yardımıyla tamamen beyaza boyanmıştır. Sıcak hava fanıyla tamamen kuruması sağlanan örneklerin beyaz boyalı olan yüzlerine, görüntü işleme esnasında kullanılacak desenler, siyah renkli ahşap boyasının bir fırça yardımıyla boyalı yüzey üzerine serpiştirilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 5.7 ve Şekil 5.10). Siyah ahşap boyasının fırça yardımıyla serpiştirilmesi; beyaz boyalı yüzey üzerinde oluşacak lekelerin tamamen rastgele desenler şeklinde oluşmasını sağlayarak, analiz yazılımının makro blokların görüntüler arası takibine imkân sağlamaktır. KBSG1 ve KBSG2 örneklerinde, şekil değiştirme ölçerlerin boyama işleminden olumsuz etkilenmelerini önlemek amacıyla şekil değiştirme ölçerlerin üzeri boyama işleminden önce bir bantla kapatılmıştır. Tüm boyama işlemlerinin ardından bu bant açılarak şekil değiştirme ölçerin açığa çıkması sağlanmış ve gerekli ek bağlantıları da yapılarak kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.7). Ayrıca çekme cihazına bağlanmış üzerinde şekil değiştirme ölçer bulunan bir kaynaklı birleşim örneği Şekil 5.8’de görülmektedir.

Hazırlanan tüm birleşimlerde ve bunlara ait çekme deneylerinde temel hedef, birleşim performansının test edilmesi değildir. Asıl olarak bu tez çalışmasının konusu da birleşim performanslarının test edilmesi değil, çelik yapılarda yaygın olarak kullanılan çekme birleşimleri için yapılan deneylerde ortaya çıkan yer değiştirmelerin dijital görüntü yöntemi

kullanarak tespitinin pratik olup olmadığıdır. Bu tez çalışmasıyla, şekil değiştirme tespitinde geçerliliği ve güvenilirliği ispatlanmış olacak bu yöntem daha farklı birleşimler için daha farklı yüklemeler için kullanılabilecektir. Bu husus tez hipotezinde de ayrıntılı ifadesini bulmuştur.



Şekil 5.7 Üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış kaynaklı birleşim örneği (KBSG1).

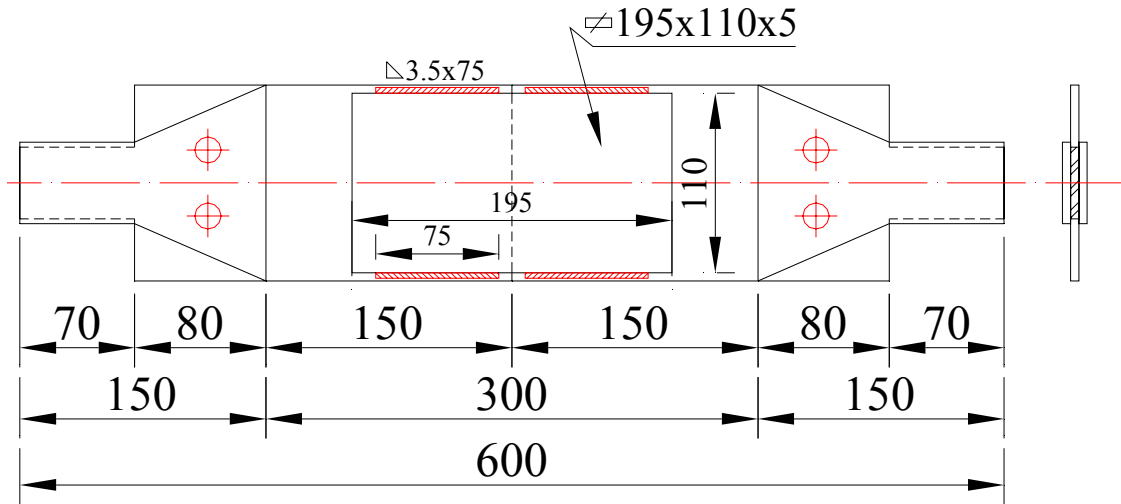


Şekil 5.8 Çekme cihazına bağlanmış KBSG1 örneğinin deney öncesi görüntüsü.

5.1.1 Kaynaklı Birleşimler

Test edilmek üzere iki grup kaynaklı birleşim tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Her iki gruptaki kaynaklı birleşimler, birleşim yapısı itibarıyla birbiriyle çok benzer birleşimler olup

aralarındaki fark, birleşimde kullanılan ek levhalarının ve birleşimi sağlayan kaynak boyunun farklı olmasıdır. İki grup birleşimden biri, 110 mm genişlikli bir ek levhasının ana parçaya her iki yüzden kaynaklanmasıyla imal edilmişken, diğerinde 90 mm genişlikli ek levhasının ana parçaya her iki yüzünden kaynaklanmasıyla imal edilmiştir. Hazırlanan kaynaklı birleşimlerden geniş ek levhalı olanı Şekil 5.9’da görülmektedir. Şekilde verilen boyutlar mm cinsindendir.



Şekil 5.9 Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim örneği detayı.

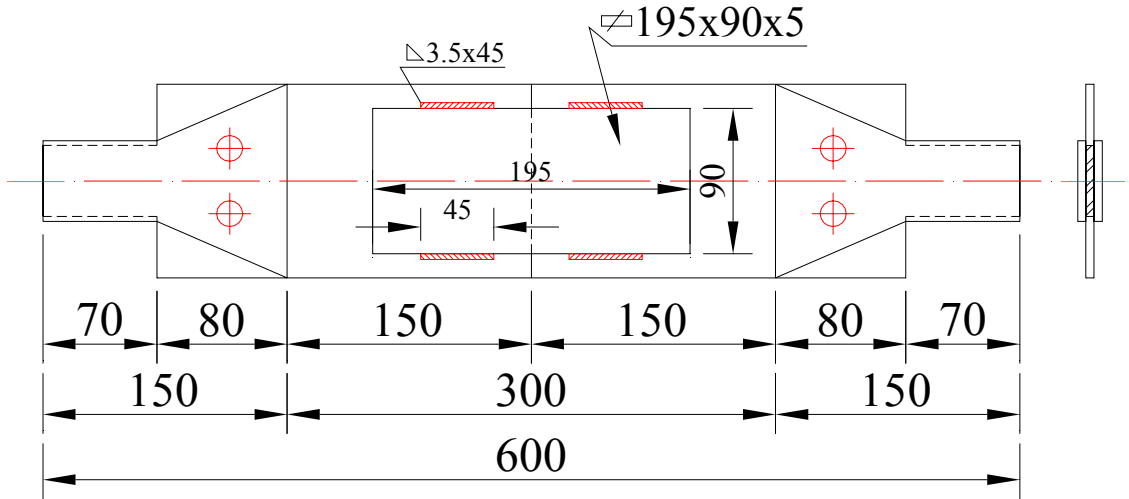
Bu birleşim, mesnet detayları yukarıdaki paragraflarda verildiği üzere hazırlanan parçaların, $195 \times 110 \times 5$ mm boyutlu ek levhaların her iki yüzde de birer adet olmak üzere, birleşim gövdesini oluşturan parçalara köşe kaynağıyla bağlanması şeklinde imal edilmiştir. 75 mm uzunluklu kemersiz düz dikiş olarak çekilen köşe kaynakta kaynak kalınlığı 3.5 mm olarak uygulanmıştır. Birleşimde alın dikişi kullanılmamış, birleşim sadece yan dikişlerle oluşturulmuştur.

Şekil 5.9’da görülen geniş ek levhalı birleşimden üç adet hazırlanmış ve KBG1, KBG2, KBG3 olarak isimlendirilmiştir. Deneyler sırasında iki kameranın aynı anda görüntü alması sağlandığından, kameralardan birisi tüm birleşimi görüntülerken, diğeri birleşimin muhtemel kopma bölgesine odaklanmıştır. Bu nedenle, KBG1 örneği için yapılan 1 numaralı deneyde, muhtemel kopma bölgesine odaklanarak görüntü alan kameraya ait dijital fotoğraflar KBG11, birleşimin mesnetler de dâhil tümünü görüntüsü içerisine alan kameraya ait fotoğraflar KBG12 olarak isimlendirilmiş ve kaydedilmiştir. Böylece görüntüler ayrı ayrı analiz edilebilmiştir. İmalatı tamamlanarak deneye hazır hale gelmiş geniş ek levhalı bu kaynaklı birleşimlere ait görüntüler Şekil 5.10’da görülmektedir.



Şekil 5.10 Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim örnekleri.

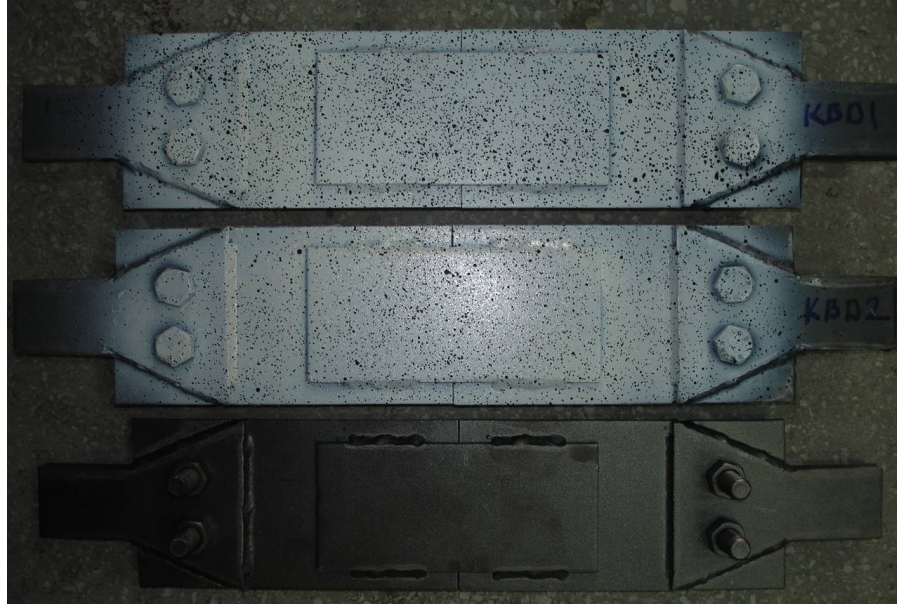
Yukarıdaki paragrafta da açıklandığı üzere, birleşim mantığı aynı fakat birleşim ek levhası boyutları ve kaynak uzunluğu farklı tutularak oluşturulan ikinci grup dar ek levhalı kaynaklı birleşime ait detay Şekil 5.11’de görülmektedir. Şekilde verilen boyutlar *mm* cinsindendir.



Şekil 5.11 Dar ek levhalı kaynaklı birleşim örneği detayı.

Şekil 5.11’de görülen kaynaklı birleşimde, Şekil 5.9’den verilen kaynaklı birleşimden farklı olarak, birleşim ek levhası genişliği 90 *mm* olarak küçültülmüş ve levhayı bağlayan kaynak dikişi uzunluğu da 45 *mm* olarak uygulanmıştır. Birleşime ait diğer parametreler üst

paragraflarda verilen kaynaklı birleşime ait birleşim parametreleriyle aynıdır. Hazırlanan bu birleşim örneği grubuna ait fotoğraf Şekil 5.12’de görülmektedir.

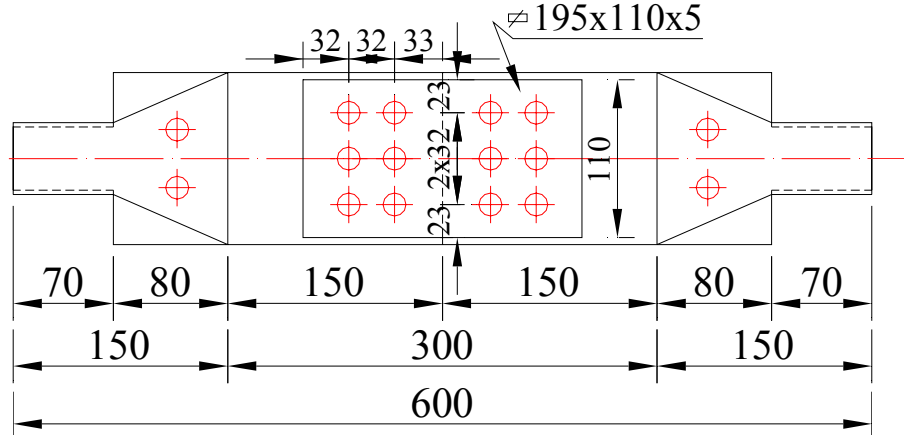


Şekil 5.12 Dar ek levhalı kaynaklı birleşim örnekleri.

Şekil 5.12’de görülen dar ek levhalı birleşimden üç adet hazırlanmış ve KBD1, KBD2, KBD3 olarak isimlendirilmiştir. KBD1 örneği için yapılan 1 numaralı deneyde, muhtemel kopma bölgesine odaklanarak görüntü alan kameraya ait dijital fotoğraflar KBD11, birleşimin mesnetler de dâhil tümünü görüntüsü içerisine alan kameraya ait görüntüler KBD12 olarak isimlendirilmiştir ve kaydedilmiştir.

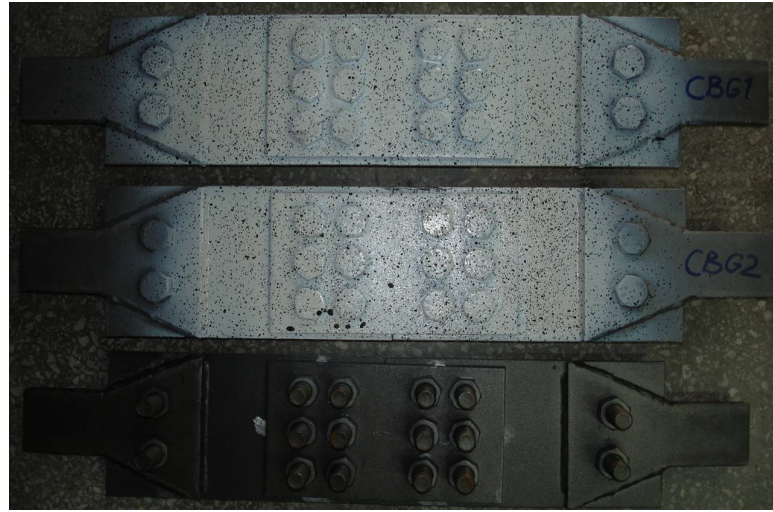
5.1.2 Bulonlu (Cıvatalı) Birleşimler

Bölüm 5.1.1’de detayları verilen kaynaklı birleşimlerin boyut büyüklüklerine bağlı kalarak, geniş ve dar ek levhalı benzer birleşimler, yine iki grup halinde bulonlu (cıvatalı) olarak imal edilmiştir. Birleşimde kullanılan ek levhası boyutları kaynaklı birleşimlerde kullanılan ek levhası boyutları ile aynıdır. Birleşimlerde ISO 8.8 kalitesinde M16 bulonlar kullanılmıştır. Geniş ek levhalı birleşimde birleşim aracı olarak 6 adet M16 bulon kullanılırken, dar ek levhalı birleşimde 4 adet M16 bulon kullanılmıştır. Her iki birleşimden de üçer adet hazırlanarak test edilmiştir. Geniş ek levhalı birleşime ait detay Şekil 5.13’de görülmektedir. Şekilde verilen boyutlar *mm* cinsindendir.



Şekil 5.13 Geniş ek levhalı bulonlu (cıvatalı) birleşim örneği detayı.

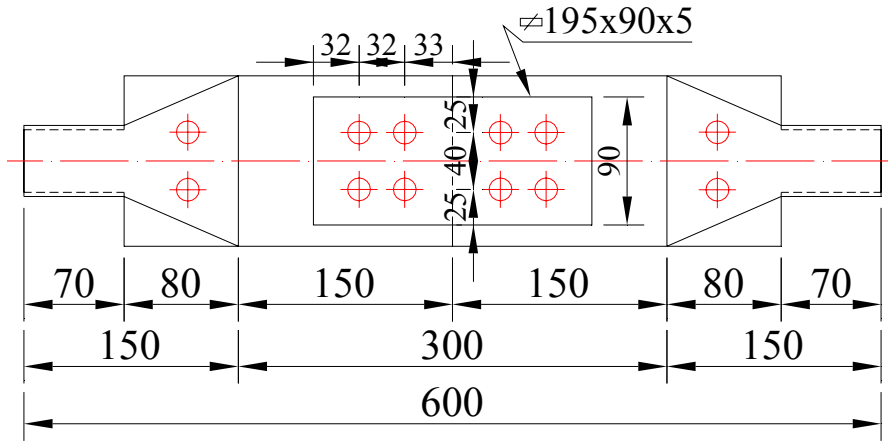
Şekil 5.13’de teknik resmi verilen geniş ek levhalı birleşim örneği grubunun imalatı tamamlanarak deneye hazır hale getirilmiş durumdaki ön ve arka yüzlerine ait fotoğrafı Şekil 5.14’de görülmektedir.



Şekil 5.14 Geniş ek levhalı bulonlu (cıvatalı) birleşim örnekleri.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de görülen geniş ek levhalı bulonlu (cıvatalı) birleşimden üç adet hazırlanmış ve CBG1, CBG2, CBG3 olarak isimlendirilmiştir. Deneyler sırasında iki kamera aynı anda görüntü aldığından, CBG1 örneği için, muhtemel kopma bölgesine odaklanarak görüntü alan kameraya ait dijital fotoğraflar CBG11, birleşimin mesnetler de dâhil tümünü görüntüsü içerisine alan kameraya ait görüntüler CBG12 olarak isimlendirilmiştir ve “bmp” formatında kaydedilmiştir.

Dar ek levhası ile 4 adet M16 bulonun kullanıldığı birleşime ait detay Şekil 5.15’de görülmektedir. Bu birleşimler CBD1, CBD2, CBD3 olarak isimlendirilmiştir. CBD1 örneği için, muhtemel kopma bölgesine odaklanarak görüntü alan kameraya ait dijital fotoğraflar CBD11, birleşimin mesnetler de dâhil tümünü görüntüsü içerisine alan kameraya ait görüntüler CBD12 olarak isimlendirilmiş ve kaydedilmiştir. Şekilde verilen boyutlar *mm* cinsindendir.



Şekil 5.15 Dar ek levhalı bulonlu (cıvatalı) birleşim örneği detayı.

Şekil 5.15’de detayları verilen bulonlu (cıvatalı) birleşim grubunun imalatı tamamlanarak deneye hazır hale getirilmiş durumdaki fotoğrafı Şekil 5.16’da verilmiştir. Fotoğrafta birleşim örneğinin boyalı olan ve kameralara bakan yüzleri ile arka yüzleri aynı anda görülmektedir.



Şekil 5.16 Dar ek levhalı bulonlu (cıvatalı) birleşim örnekleri.

5.2 Deney Düzeneği ve Deney Parametreleri

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan birleşim deneyleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvar imkânları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında kaydedilen görüntüler yardımıyla elde edilen şekil değiştirme verileri, tezin altıncı bölümünde yapılacak olan birleşimlere ait sonlu elemanlar bilgisayar modellerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan ve örnekler dışında kalan deney düzeneğinin diğer elemanları önceki bölümlerde ayrıntılı olarak verildiğinden burada tekrar detaylarıyla ele alınmayacak, kısaca değinilecektir.

Deneylerde standart örnek deneylerinde kullanılan 274.68 *kN* (28 ton) çekme/basınç kapasiteli SATEC System Inc. marka universal test cihazı kullanılmıştır. Bütün test örnekleri 0.074 *mm/s* sabit deformasyon hızıyla yükleme yapılarak çekilmiş, bu hız deney sonuna kadar sabit tutulmuştur. Uygulanan yük değeri saniyede dört adet olarak okunup bilgisayar diskine kaydedilmiştir.

Kamera donanımı da bir önceki bölümde ayrıntıları verilen şekilde kullanılmıştır. Kullanılan iki kamera da aynı anda bilgisayara bağlanarak her ikisinin de aynı anda görüntü alması sağlanmıştır. 12 ve 16 *mm* odak uzunluklarına sahip lenslerle çalışan kameralar teste tabi tutulan deney örneğinin aynı yüzünün iki farklı uzaklıktan görüntülerini almıştır. Kameralardan bir tanesi deney örneğinin bütününe görecek şekilde konumlandırılmışken, diğeri sadece beklenen kopma bölgesine odaklanmıştır (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18). Böylelikle deneyin her iki görüntüden ayrı ayrı takip edilebilmesi ve görüntülerin ayrı ayrı analiz edilebilmesi imkânı sağlanmıştır. Deneye tabii tutulan örneklerin yüksek çözünürlüklü görüntüleri her iki saniyede bir adet olmak üzere, iki kamera için ayrı ayrı “*bmp*” formatında alınarak bilgisayar sabit diskine sıfırdan başlayan numaralarla “image0, image1, image2, ...” ismi verilerek kaydedilmiştir.

Üzerine şekil değiştirme ölçer bağlanmış birleşim örneklerinde kamera, şekil değiştirme ölçer bölgesine odaklanacak şekilde konumlandırılarak sadece bu bölgeden görüntüleri almıştır. Tek bir kameranın kullanıldığı bu deneylerde görüntüler, saniyede 4 adet olarak alınarak kaydedilmiştir. Böylelikle bu örneklere ait birim şekil değiştirme analizlerinin daha hassas yapılabilmesi imkânı sağlanmıştır. Tüm deneyler için görüntü çözünürlüğü 1024×768 piksel olarak seçilmiştir.

Birleşim deneylerinde çekme cihazı çeneleri arasındaki yer değiştirme verileri Lvdt cihazı yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Lvdt cihazı haricinde başka herhangi bir deformasyon

ölçer kullanılmamıştır. Yukarıdaki paragraflarda açıklandığı üzere iki adet kaynaklı birleşim hariç diğer grup birleşim örnekleri üzerine herhangi bir deformasyon ölçer bağlanmadan deneyler gerçekleştirilmiştir. Lvdt cihazından olunan yer değiştirme verileri de diğer veriler gibi saniyede dört adet olarak okunup veri toplama sistemi üzerinden bilgisayara aktarılmıştır.

Birleşim deneylerini görüntülemek üzere kurulmuş kameralar ve çekme cihazına bağlanmış bir adet birleşim Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de çekme cihazı ve ışık kaynaklarıyla birlikte görülmektedir.



Şekil 5.17 Aynı anda görüntü alan kameralar ve ışık kaynakları.



Şekil 5.18 Aynı anda görüntü alan kameralar ve deney örneği.

Çekme deney düzeneğine ait elemanları test etmek amacıyla hazırlanan ve yukarıda detayları verilen birleşimler dışında olan bir birleşim, birleşim deneylerine başlamadan teste tabii tutulmuştur. Deney düzeneğine ait herhangi bir aksaklığın gözlenmemesi üzerine diğer deneylere geçilerek deneyler tamamlanabilmiştir. Mesnet detayları diğer birleşimlerle aynı olan bu birleşim levhaların küt kaynakla birleştirilmiyle oluşturulmuştur. Birleşimin tamamlanmış deneyi sonrasında çekme cihazı üzerindeki görüntüsü, Şekil 5.19'da verilmiştir. Bu birleşime ait görüntüler de birleşim kopma anına kadar alınmış ve analizleri yapılmıştır. Ancak bu analiz sonuçları tez çalışmasına alınmamıştır.



Şekil 5.19 Deney düzeneği testine ait görüntü.

5.3 Çekme Deneylerinin Yapılması ve Görüntülerin Kaydedilmesi

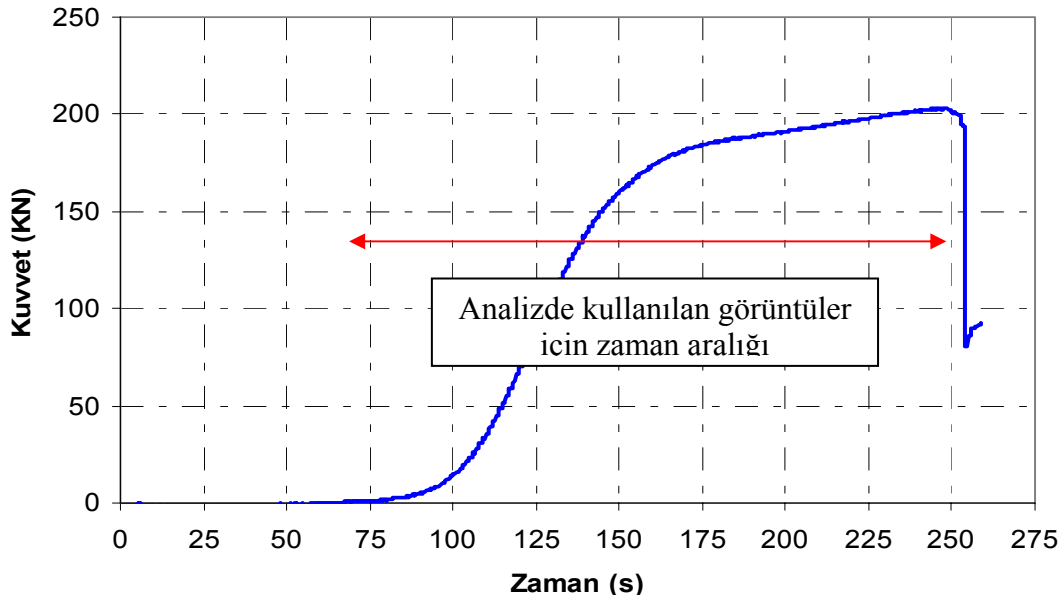
Deneyler sırasında kameralar aracılığıyla her iki saniyede bir alınan dijital görüntüler firewire iletişim portu aracılığıyla bilgisayar sabit diskine kaydedilmiştir. Kamera ve yardımcı donanımı ve kontrol yazılımlarıyla ilgili geniş bilgi önceki bölümlerde verilmiştir.

Çekme deneylerinin tümünde sabit deformasyon hızıyla yükleme yapılmıştır. Bu hız deney sonuna kadar korunmuştur. Bütün çekme deneyleri kopma anına kadar sürdürülmüş ve örneklerle ait yüksek çözünürlüklü (1024×768) görüntüler deney sonuna kadar alınmıştır. Deney süresine göre değişmek kaydıyla, alınan görüntü sayısı 80 ile 300 adet arasında değişmektedir. Deneylerde kullanılan iki adet kameradan muhtemel kopma bölgesine odaklanan kamera 1 numaralı, tüm birleşimi görüntüleyen kamera 2 numaralı kamera olarak

isimlendirilmiş ve her iki kameradan ayrı ayrı gelen görüntüler yukarıda verilen isimlendirme formatıyla sabit diske kaydedilmiştir.

5.3.1 Şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış kaynaklı birleşimler

Üzerine şekil değiştirme ölçer yapıştırılmış bu örnekler sabit deformasyon hızında yüklenerek test edilmiştir. KBSG1 örneğine ait kuvvet - zaman grafiği Şekil 5.20’de görülmektedir. Örneğe ait kuvvet zaman verilerinden örnek üzerine uygulanan kuvvetin yaklaşık 60. saniyede artmaya başladığı görülmektedir. Bu durum görüntü analizlerinden şekil değiştirmelerin hesaplanmasında önemli bir ayrıntıyı oluşturmaktadır. Bu deney için her 2 saniyede bir görüntü alındığı düşünülürse 60. saniyeye kadar olan örnek görüntülerinde herhangi bir şekil değiştirmenin olmayacağı açıktır. Bu durumda örnek üzerinden alınan ilk 30 görüntünün analiz dışında tutulması daha sağlıklı bir analiz için önemli bir ayrıntı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca Şekil 5.20’den örnek üzerindeki kuvvetin 240. saniyede en yüksek değerine ulaştığı bu noktadan sonra düşüşe geçtiği görülmektedir. Bu durumda da 240. saniye itibariyle alınan 120. örnek görüntüsünden sonraya kalan görüntülerin de analiz dışında tutulmaları daha sağlıklı bir analiz için gerekli olmaktadır. Bu durumda analiz için 90 adet dijital görüntü kullanıldığını belirtmek yerinde olacaktır.

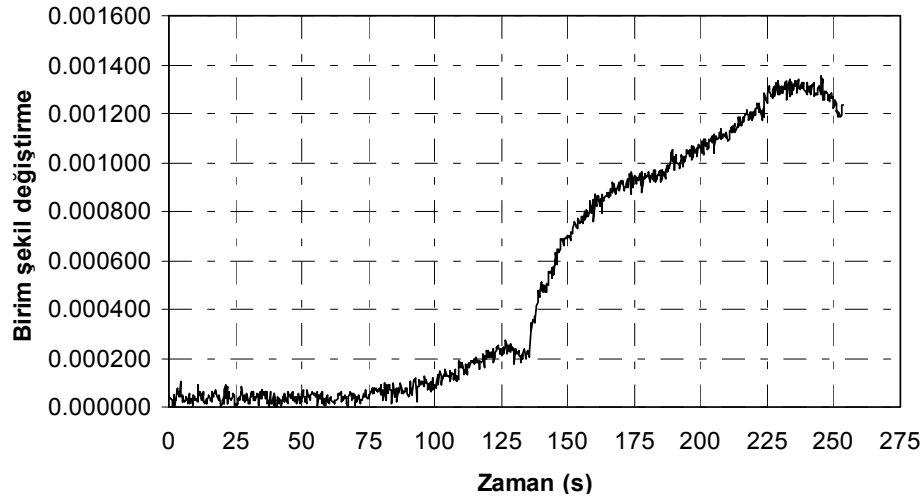


Şekil 5.20 KBSG1 örneği kuvvet-zaman grafiği.

Ayrıca, yukarıdaki paragrafta verilen ayrıntıları, Şekil 5.21’de verilen ve şekil değiştirme ölçerden alınan örneğe ait birim şekil değiştirme – zaman grafiğinden de takip etmek mümkündür. Şekil 5.21’de, deformasyon ölçerden alınan verilerin yaklaşık 60. saniyeden

itibaren artış göstermeye başladığı görülmektedir. Yine birim şekil değiştirmelerinde yaklaşık 240. saniye itibariyle en yüksek değerine ulaştığı, bu noktadan sonra bir düşüşün başladığı aynı şekilden görülmektedir.

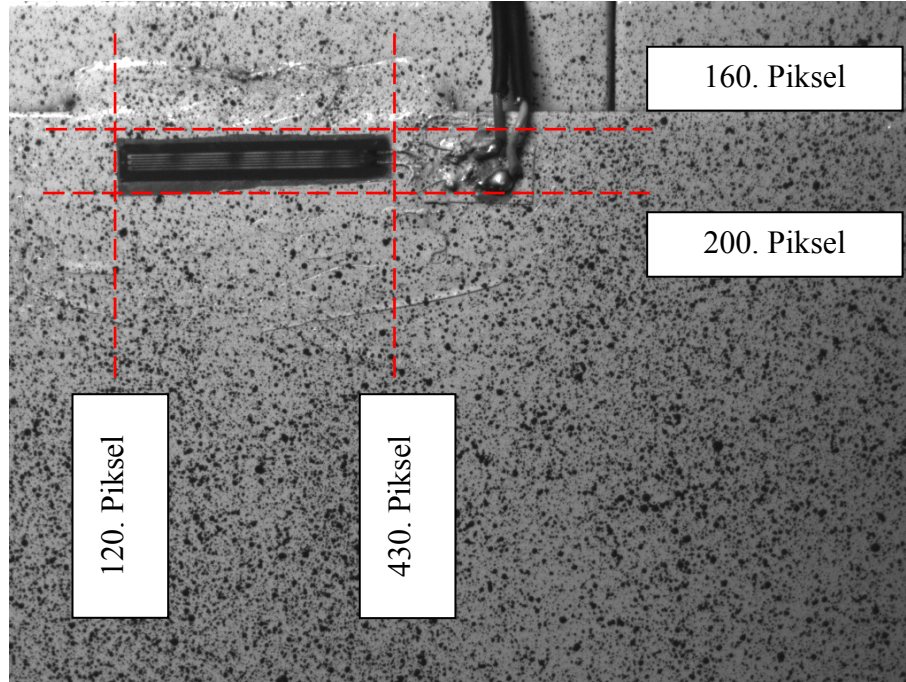
Yukarıdaki paragrafta verilen bilgiler ışığında gereksiz olan görüntülerin analizden çıkarılması daha hassas bir analiz için önemli bir ayrıntıyı oluştururken, aynı zamanda analiz için ihtiyaç duyulan bilgisayar performansını ve analiz zamanını önemli ölçüde kısaltmıştır.



Şekil 5.21 KBSG1 örneği birim şekil değiştirme-zaman grafiği.

Standart örnek deneylerinde olduğu gibi, şekil değiştirme ölçer (Strain Gage) verileri ile görüntü analizlerine ait veriler şekil değiştirme ölçerin denk geldiği görüntü bölümü için işlenerek karşılaştırılmıştır. Analizde kullanılan bir örnek görüntüsü ve şekil değiştirme ölçerin örnek üzerinde denk geldiği kısım piksel cinsinden Şekil 5.22’de görülmektedir. Dijital kameralar sehpaları üzerinde yana yatık olarak kullanıldıklarından, 1024×768 piksel görüntü çözünürlüğüne sahip örnek görüntülerinde 1024 piksellik uzunluk, örneğin çekme kuvveti doğrultusundaki boyutuna karşı gelmektedir. Bu görüntü içerisinde şekil değiştirme ölçer yatayda, yani çekme kuvveti doğrultusunda, 120. piksel ile 430. piksel arasında, düşeyde 160. piksel ile 200. piksel arasında bulunmaktadır. Örnek üzerine yapıştırılmış şekil değiştirme ölçer 40 piksel genişliğe ve 310 piksellik uzunluğa sahiptir. Bu değerlerin bu örnek görüntüsü için olduğu ve değerlerin görüntü çözünürlüğü ve kamera donanımına bağlı bir olgu olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Şekil 5.22’den görüldüğü üzere şekil değiştirme ölçer (strain gage) kaynak dikişine yakın bir yere konumlandırılmıştır ki bu bölüm örneğin diğer bölümlerine nispeten gerilme yoğunlaşmalarını beklediği bir alandır. Dolayısıyla, bu bölgede ortaya çıkabilecek şekil değiştirmeler diğer bölümlere oranla daha fazla olabilecektir. Bu nedenle, görüntü analizinde sadece bu bölgeye isabet eden makro bloklar kullanılmış, bu

alan dışında kalan makro bloklar birim şekil değiştirme hesabı için kullanılmamıştır. Ancak örnek görüntüsü üzerindeki tüm makro blokların deformasyonları analizde hesaplanmıştır.



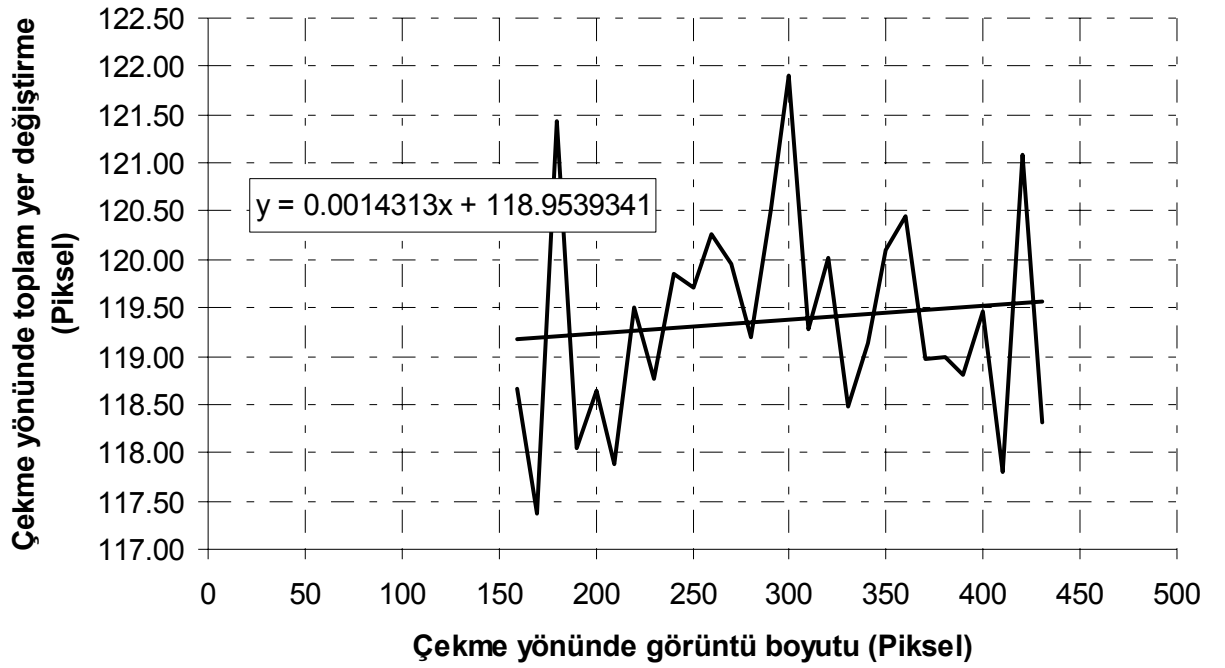
Şekil 5.22 KBSG1 örnek görüntüsü ve üzerindeki şekil değiştirme ölçer bölgesi.

Şekil değiştirme ölçer verilerinden en büyük birim şekil değiştirme **0.001354843** olarak ölçülmüştür. Görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme değerlerinin şekil değiştirme ölçer bölgesindeki makro bloklar için dağılımı Şekil 5.23’de görülmektedir. Şekil 5.23’ün yatay ekseninde şekil değiştirme ölçerin denk geldiği görüntü bölümü piksel cinsinden ifade edilirken, düşey ekseninde bu görüntü bölümüne denk düşen makro blokların yapmış oldukları toplam yer değiştirme yine piksel cinsinden gösterilmiştir. Şekil değiştirme ölçer bölgesine denk düşen makro blok grubunun yaptığı şekil değiştirme eğrisi için çizdirilen regresyon doğrusuna ait eğim, birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. Bu regresyon doğrusuna ait eğim, yani birim şekil değiştirme **0.00143127** olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.23).

Her iki örnek için hesaplanan ve deneyler sırasında şekil değiştirme ölçerden elde edilen birim şekil değiştirmeler Tablo 5.1’de verilmiştir. Tabloda her bir örnek için şekil değiştirme ölçerden alınan birim şekil değiştirmeler ile görüntü analizinden hesaplanan birim şekil değiştirmeler verilerle, bu değerler arasındaki mutlak hata hesaplanmıştır. KBSG1 örneği için hesaplanan maksimum mutlak hata %5.34 iken bu değer, KBSG2 örneği için %3.42 olarak hesaplanmıştır. Tablonun son kolonunda verilen maksimum mutlak hata değerleri, her iki

örnek için ve her iki ölçüm ve/veya hesap yöntemiyle ölçülen ve hesaplanan birim şekil değiştirmelerin birbirine kabul edilebilir oranda yakın olduğunu göstermektedir. Değerler arasındaki maksimum mutlak hata %5'in altındadır.

KBSG2 örneği için elde edilen kuvvet, şekil değiştirme dağılımları ve bunlara ait grafikler KBSG1 örneğine çok yakın benzerlikler gösterdiğinden tezde bu grafiklere yer verilmeyip örnek için yalnız deney ve görüntü analizi sonuçlarından elde edilen birim şekil değiştirme değerleri teze alınmıştır.

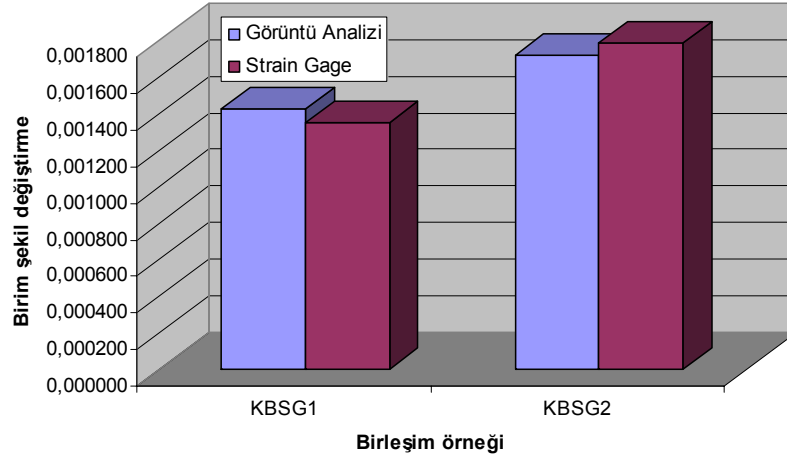


Şekil 5.23 KBSG1 örneği şekil değiştirme dağılımı.

Birleşim örnekleri için Tablo 5.1'de verilen, şekil değiştirme ölçerden (Strain Gage) elde edilen şekil birim değiştirmeler ile görüntü analizlerinden elde edilen birim şekil değiştirmeler Şekil 5.24'de karşılaştırmalı grafik olarak da verilmiştir. Şekil 5.24'ün düşey ekseninde, yatay ekseninde verilen örnekler için her iki yöntemden elde edilen veya hesaplanan birim şekil değiştirmeler görülmektedir. Şekil 5.24'de verilen grafikte farklı renkli sütunlarla temsil edilen birim şekil değiştirme değerlerinden birisi şekil değiştirme sensörlerine (Strain Gage) ait iken diğer renkli sütun, görüntü analizlerinden hesaplanan birim şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Her iki şekil değiştirme ölçüm yönteminden elde edilen birim şekil değiştirmelerin birbirine kabul edilebilir oranda yakın olduğu aynı grafikten görülmektedir (Şekil 5.24).

Tablo 5.1 KBSG1 ve KBSG2 örneklerine ait birim şekil değiştirmeler.

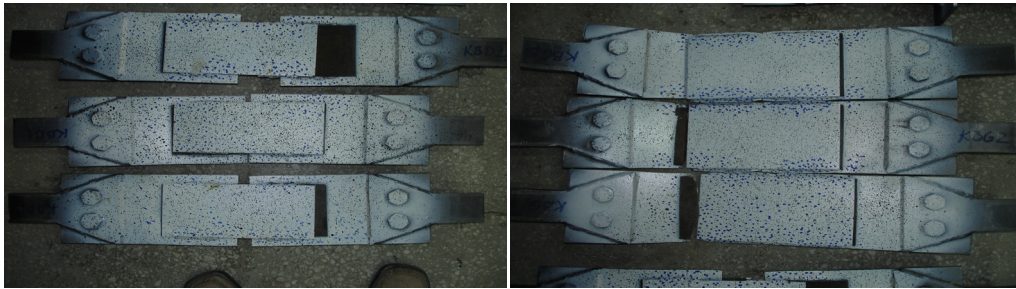
Örnek Adı	Şekil Değiştirmeler (ε)				Maksimum Mutlak Hata (%)
	Görüntü Analizinden	Deformasyon Ölçerden	$\varepsilon \times 10^6$		
KBSG1	0.00143127	0.0013548	1431	1355	5.34
KBSG2	0.00172545	0.0017861	1725	1786	3.42



Şekil 5.24 KBSG1 ve KBSG2 örnekleri birim şekil değişime karşılaştırması.

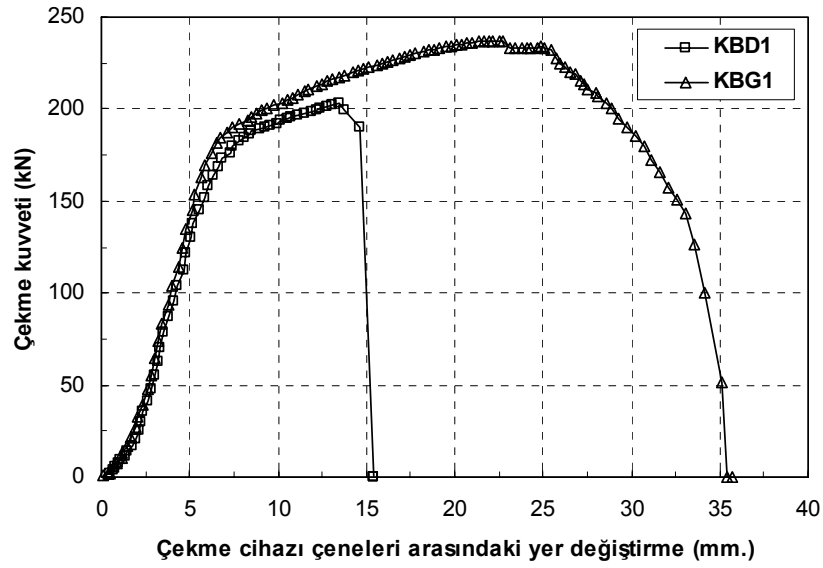
5.3.2 Kaynaklı Birleşim Deneylerine Ait Değerlendirmeler

Kaynaklı birleşimlere ait deneylerde toplam göçme, dar ek levhalı birleşimler için kaynak dikişlerinin göçmesiyle ortaya çıkmışken geniş ek levhalı birleşimlerde kaynak dikişinin başladığı noktadan ana levhanın yırtılmasıyla ortaya çıkmıştır. Geniş ek levhalı birleşimlerde kaynak dikişinin ana levha kenarına çok yakın olmasının, levhanın yırtılmasına neden olduğu düşünülmektedir. Geniş ve dar ek levhalı birleşimlerin deney sonrasındaki fotoğrafları Şekil 5.25’de görülmektedir. Kaynaklı birleşim deneylerinden KBD1 ve KBG1 örneklerine ait kuvvet-şekil değişime grafikleri Şekil 5.26’da görülmektedir.



Şekil 5.25 Kaynaklı birleşimlerin deney sonrası görüntüleri.

Dar ek levhalı kaynaklı birleşimlerin deney sonrasındaki incelemelerinde kaynağın ana levhaya bağlantı yüzeylerinde ortaya çıkan kırılmaların birleşimin toptan göçmesine neden olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlendirmeleri, analizleri yapılan görüntülerden elde edilen şekil değiştirme haritalarında ayrıntılı olarak kendini gösterdiği, birleşime ait tüm şekil değiştirme hareketinin ayrıntılı olarak takip edilebildiği bölüm 5.4'te ayrıntılarıyla verilmiştir. Bu analizlerde birleşimin nasıl deforme olduğu ve nasıl göçtüğü değil, bu şekil değiştirme görüntü analizleriyle hangi hassasiyette takip edilip edilemediği konuları bu tez çalışmasının ana eksenini oluşturmaktadır ve sonraki bölümlerde ayrıntılarıyla ele alınacaktır.

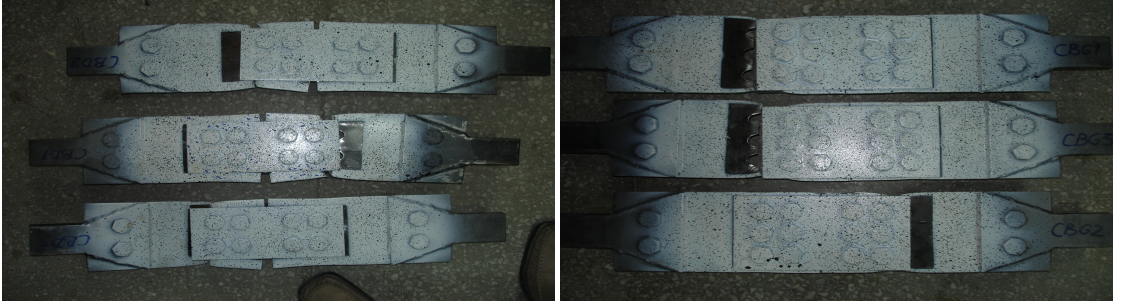


Şekil 5.26 KBD1 ve KBG1 örnekleri kuvvet-şekil değiştirme grafikleri.

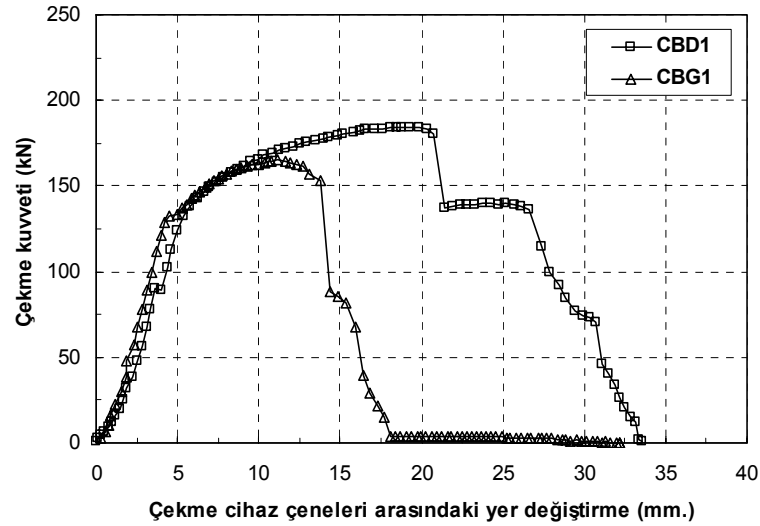
5.3.3 Bulonlu (Cıvatalı) Birleşim Deneyleri

Bulonlu birleşimlerin tamamında göçme, birleşimi oluşturan ana levhanın çekme cihazı çenelerine yakın bulon sırasındaki bulon ekseninden yırtılmasıyla gerçekleşmiştir. Bu yırtılma geniş ek levhalı birleşimde, bulonların kenar mesafelerinin daha küçük olması nedeniyle, dar ek levhalı birleşime oranla daha erken fakat yine birleşim ana levhasında ortaya çıkmıştır. Her iki birleşim grubunun ek levhalarında herhangi bir yırtılma gözlenmemiştir. Bu şekil değiştirme davranışı görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme haritalarından ayrıntılı olarak izlenebilmektedir. Örnekler için şekil değiştirme haritaları bölüm 5.4'de verilmiştir. Geniş ve dar ek levhalı birleşimlerin deney sonrasındaki görüntüleri Şekil 5.27'de verilmiştir.

Deney sonrası görüntüleri incelenen bulonlu (cıvatalı) birleşimlerin bulonlarında, gözlenebilir bir deformasyon oluşmadığı tespit edilmiştir. Bulonlu birleşimlerden CBD1 ve CBG1 örneklerine ait kuvvet-şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.27 Bulonlu (cıvatalı) birleşimlerin deney sonrası görüntüleri.



Şekil 5.28 CBD1 ve CBG1 örneklerine ait kuvvet-şekil değiştirme grafiği.

5.4 Doğrusal Deformasyon Haritalarının Oluşturulması

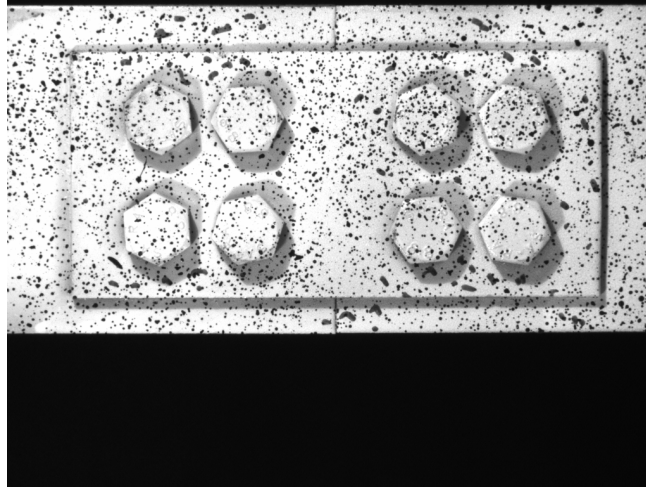
5.4.1 Matlab® Program Kodları

Birleşim deneylerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü dijital görüntüler, önceki bölümde temel mantığı verilen blok eşleme metoduyla analiz edilerek, birleşimlerin deney sırasında yapmış oldukları şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Görüntü analizleri için Matlab® programlama dili kullanılmıştır. Bu programlama dili içerisinde yazılan kodlar sayesinde, deneylerden elde edilen dijital görüntüler önce analize hazır hale getirilmiş, daha sonra da

analiz edilmişlerdir. Bu amaçla üç farklı Matlab® kodu yazılmıştır. Yazılan program kodları ile ilgili ayrıntılı bilgi ilerleyen paragraflarda, program kodları da ekler bölümünde verilmiştir.

Görüntülerin analizinden önce, alınan görüntüler içerisinde kalan ve birleşimle herhangi bir ilgisi bulunmayan siyah bölümlerin görüntülerden çıkarılması, daha hızlı bir analiz için önemli bir ayrıntıdır. Bu amaçla bir Matlab® kodu yazılarak görüntülerde bulunan siyah bölümler çıkarılmıştır. Görüntülerden birleşimlerle alakası olmayan kısımların çıkarılması analiz için gerekli süreyi kısaltmanın yanında, analiz sonuçlarının daha kolay değerlendirilmesi imkânını sağlamıştır. Bu amaçla yazılmış olan **cimage.m** isimli Matlab® program kodu Ek 3'te verilmiştir. Analiz öncesi bir örnek görüntüsü Şekil 5.29'da görülmektedir.

Gereksiz kısımları asıl görüntülerden çıkarılmış deney görüntüleri analize hazır hale gelmiştir. Görüntülerin analizi için yine Matlab® programlama dilinde hazırlanan **ccrc.m** isimli program kodu kullanılmıştır. Program kodu Ek 1'de verilmiştir.



Şekil 5.29 Kırılmadan önceki örnek görüntüsü

Her iki program da, kırılacak ve analizi yapılacak görüntüler için gerekli bazı parametreler girildikten sonra çalışmaktadır. Bu parametreler **ccrc.m** program kodu için, iki görüntü arasında aranacak olan makro blokların piksel cinsinden yatay ve düşey çözünürlükleri, sonraki görüntü karesinde aranacak olan makro bloğun arama penceresine ait boyutun yine piksel cinsinden değeri, analizi yapılacak görüntülerin dosya ismi ve kaç fotoğraf karesinde bir arama yapacağını belirlediğimiz değerlerdir. Yazılım, analiz mantığı önceki bölümde verilen şekilde çalışarak, analizi yapılan görüntüler için deformasyon vektörlerini hesaplamaktadır. Hesaplanan bu deformasyon vektörleri bir **“txt”** dosyasında (örneğin,

data20-20-10.txt) toplamaktadır. Dosya ismindeki rakam değerleri analizi yapılan görüntülere ait makro blok yatay ve düşey çözünürlüğü ile arama penceresi boyutlarını piksel cinsinden ifade etmektedir. Bu değerler kullanıcı tarafından seçilmektedir. Kullanılan program kodlarına ait analiz parametreleri sonraki bölümde ayrıntılarıyla verilmiştir.

Elde edilen bu yer değiştirme vektörleri kullanılarak, örneğe ait şekil değiştirme haritaları çıkarılmıştır. Yer değiştirme vektör grafiği ile şekil değiştirme haritalarının oluşturulması için de yine, farklı bir Matlab® program kodu kullanılmıştır. Analizden elde edilen ve “txt” dosyasında saklanan verileri kullanarak oluşturulan yer değiştirme vektör grafiği ve şekil değiştirme haritaları için yazılan *qplots.m* isimli program kodu, Ek 2’de verilmiştir. Programın çalıştırılabilmesi için gerekli parametrelerin kullanımı ile ilgili ayrıntılı bilgi sonraki bölümde verilmiştir.

5.4.2 Birleşimlerin şekil değiştirme haritalarının oluşturulması

Yukarıda açıklanan Matlab® kodları yardımıyla deneyler sırasında alınan, birleşime ait dijital görüntüler analiz edilerek şekil değiştirme haritaları oluşturulmuştur. Şekil değiştirme haritaları, deney başlangıcından birleşimin akma anına kadar geçer süre zarfında birleşimin yaptığı toplam şekil değiştirmeyi göstermektedir. Birleşimlerin sonlu eleman çözümleri de birleşimin akma anına kadar yapıldığından, şekil değiştirmelerin karşılaştırılabilmesi için görüntü analizlerinde de bu süre aralığı dikkate alınmıştır. İstendiği takdirde, aynı yazılımlar kullanılarak, deney başlangıcından bitimine kadar alınan görüntülerin analiz edilmesi, toplam yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin hesaplanması ve bu değerler için şekil değiştirme haritalarının çıkarılması mümkündür.

Aşağıdaki paragraflarda birleşimler için yer değiştirme vektör grafikleri ve şekil değiştirme haritaları verilmiştir. Şekil değiştirme haritaları ve şekil değiştirmelerin karşılaştırması her birleşim grubundan sadece bir örnek için verilmiştir. Diğer örneklerle ait şekil değiştirme haritaları Ek 3’te verilmiştir.

Analizlerde kullanılan yardımcı yazılımlar ve analiz yazılımının çalıştırılmasında kullanılan program ve program parametreleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- **cimage.m** Programı kullanım parametreleri
 - Görüntülerden çıkarılacak siyah bölgenin düşeyden piksel olarak uzaklığı
 - Çıkarılacak görüntülerin bulunduğu klasör
 - Analiz görüntülerin kaydedileceği klasör.

Muhtemel kopma bölgesine odaklanmış kameranın aldığı görüntülerde kırpma mesafesi 540 piksel olarak, deney örneğinin tümünü görüntü alanı içersine alan kameranın almış olduğu görüntülerde ise kırpma mesafesi 320-330 piksel olarak uygulanmıştır. Bu değerler, tüm siyah kısım görüntüden çıkarılınca kadar, deneme yanılma yoluyla, kolayca tespit edilebilmekte ve uygulanmaktadır. Burada, analiz edilecek kırpılmış görüntülerin çözünürlüklerinin, kırpma işleminden dolayı, değişmiş olduğunu ifade etmek gerekir.

- **ccrc.m** Programı kullanım parametreleri
 - Makro Blok Yatay Çözünürlüğü (Piksel) :20 (Örnek)
 - Makro Blok Düşey Çözünürlüğü (Piksel) :20 (Örnek)
 - Arama Penceresi Boyutu (Piksel) :10 (Örnek)
 - Dosya İsmi :image
 - Analiz Edilecek Görüntü Sıklığı :3 (Örnek)

Burada girilen ilk iki parametre, görüntü içerisinde oluşturulan makro blokların boyutlarını piksel cinsinden ifade etmektedir. Yani 20×20 piksel boyutunda her alan farklı bir makro blok olarak isimlendirilmekte ve bu makro bloğun benzeri, diğer görüntü karesinde aranmaktadır. Arama penceresi boyutu olarak piksel cinsinden girilen ve üçüncü parametre olan 10 değeri ise, bir önceki görüntü karesinde referans alınan makro bloğun bir sonraki görüntü karesinde aranacağı alanı sınırlayarak arama işlemini pratik hale dönüştürmektedir. Yani önceki görüntüde referans alınan makro blok, sonraki görüntüde önceki makro blok boyutları ile ± 5 piksel ebatlarındaki bir arama penceresinde aranacaktır. Dosya ismi, kameralardan alınan görüntülerin kaydedildiği orijinal isimleri ifade etmektedir. Deneyler sırasında alınan dijital görüntüler “*image*” ismi verilerek kaydedildiğinden, programın çalışması sırasında dosya ismi olarak “*image*” parametresi girilmiştir. Analiz edilecek görüntü sıklığı, deney sırasında alınan her görüntünün analize tabii tutulup tutulmayacağını ifade eden son parametredir. Burada girilen 3 değeri, ilk referans alınan makro bloğun kendisinden hemen sonra gelen fotoğraf karesinde değil, kendisinden sonra gelen üçüncü fotoğraf karesinde aranacağını ifade etmektedir. Bu parametre analiz için gerekli hassasiyet ve zaman değişkenlerini birlikte düşünerek belirlenebilen bir değerdir ve hangi zaman aralıklarıyla görüntü alındığına ve deney objesinin bu zaman aralığında ne kadar deformasyon yaptığına bağlıdır.

Bu parametrelerle çalıştırılan program, görüntüleri analiz ederek her makro blok için hesapladığı toplam yer değiştirme değerlerini, “*data20-20-10.txt*” isimli dosyada

toplamaktadır. Dosya her makro bloğun deney süresinde yapmış olduğu yer değiştirmelere ait piksel cinsinden verileri içermektedir.

- **qplots.m** Programı kullanım parametreleri
 - Data Dosyası İsmi : data20- 20- 10.txt (Örnek)
 - Makro Blok Yatay Çözünürlük Değeri (Piksel) : 20
 - Makro Blok Düşey Çözünürlük Değeri (Piksel) : 20

Yukarıda verilen parametrelerle çalıştırılan program, analizi yapılan görüntülere ait veri dosyasından her bir makro bloğun deney süresince yaptığı toplam doğrusal yer değiştirmeyi, yer değiştirme vektör grafiği ile yatay ve düşey (x ve y yönü) doğrultudaki şekil değiştirme haritaları şeklinde oluşturmaktadır. Kaynaklı ve bulonlu birleşim örneklerinden her biri için elde edilen toplam yer değiştirme vektör grafikleri ve toplam yer değiştirme haritaları ayrı ayrı aşağıda verilmiştir.

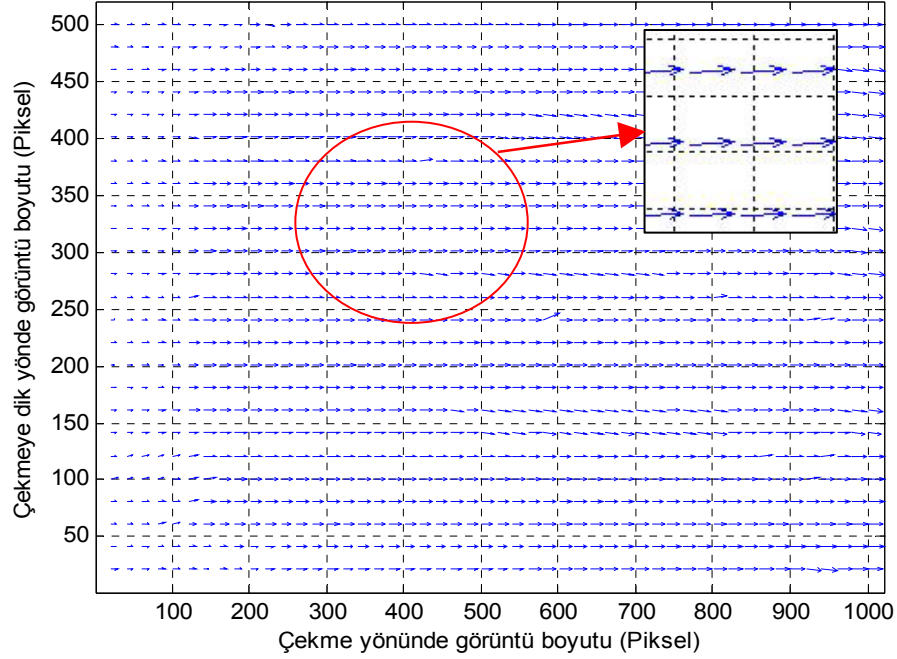
5.4.3 Kaynaklı birleşimler

5.4.3.1 Dar ek levhalı kaynaklı birleşim

Şekil 5.30'da KBD1 örneğinin görüntülenen bölümü için yer değiştirme vektör grafiği, Şekil 5.31'de ise aynı örneğe ait çekme yönündeki şekil değiştirmeye ait dağılım görülmektedir. Birleşime ait yer değiştirme vektör grafiğinden birleşimin bütün olarak yer değiştirme hareketi takip edilebilmektedir. Şekil 5.30'da görülen her bir ok, analizde kullanılan makro bloğun analiz edilen görüntüler boyunca yapmış olduğu toplam yer değiştirme hareketini vektörel olarak temsil etmektedir. Bu grafikte makro blokların ne kadar ve hangi yönde yer değiştirme yaptıkları ifade edilerek her bir makro bloğun nasıl bir yer değiştirme davranışı yaptığı rahatlıkla gözlenebilmektedir. Yer ve şekil değiştirmelerin sayısal değerleri ise şekil değiştirme haritalarında verilmektedir.

Şekil 5.31'de verilen şekil değiştirme haritasında sol düşey kenar numunelerin deney anında alt hareketsiz mesnedini, sağ düşey kenar ise üst hareketli mesnedini göstermektedir. Birleşimin farklı bölgelerinin yaptığı şekil değiştirme değerleri haritadaki renk dağılımına bağlı kalarak haritanın sağ tarafında bulunan göstergeden okunabilmektedir. Şekil 5.31'de görüldüğü üzere, haritanın sarı ve yakın tonları renklerle markalanmış bölümleri birleşimi oluşturan ek levhasını temsil etmektedir. Grafikten ek levhasının akma anına kadar yaklaşık 21-23 piksellik rijit bir ötelenme yaptığı rahatlıkla okunabilmektedir. Alt mesnet kısmı hareketsiz olduğundan, şekil değiştirmeler mavi renk dağılımıyla temsil edilmekte ve toplam

şekil değiştirmelerin sıfıra yakın veya oldukça küçük olduğu görülmektedir. En hızlı hareket eden üst mesnet bölgesi ise en fazla şekil değiştirmeye maruz kalan kısım olarak koyu kırmızı bölgelerle temsil edilmektedir. Hesaplanan 21-23 piksellik üniform şekil değiştirmenin, kaynak dikişlerinin kompasından sonra ek levhanın rijit olarak ötelenmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Şekil değiştirme haritasından birleşimi oluşturan ana parçanın, ek levhasına göre daha az şekil değiştirme yapmış olduğu açıkça görülmektedir.

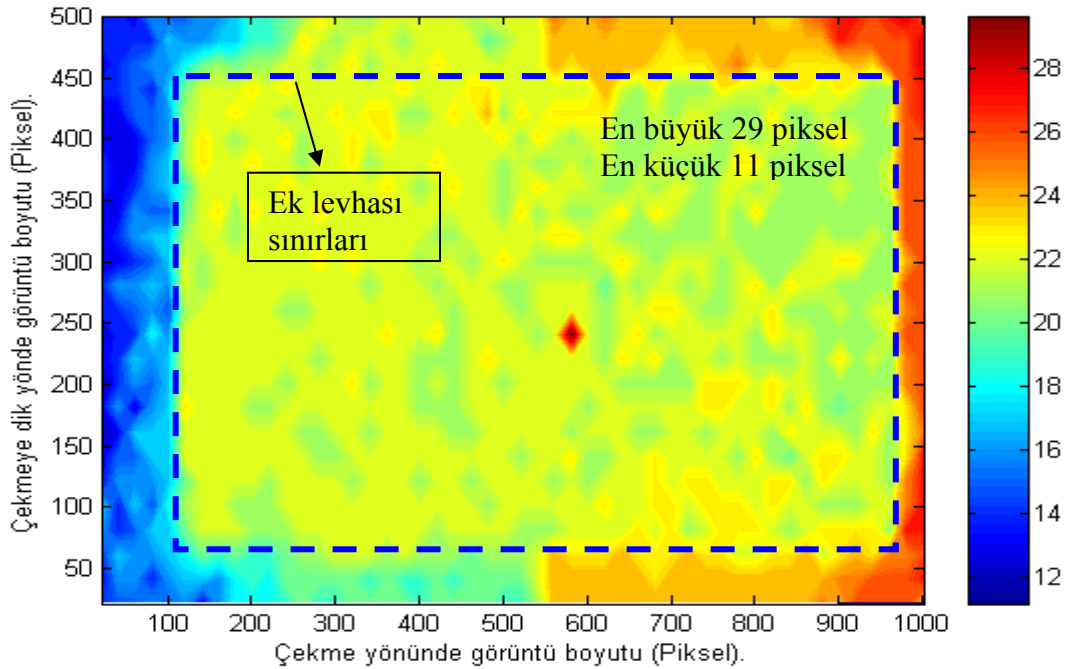


Şekil 5.30 KBD1 örneği yer değiştirme vektör grafiği.

Ek levhasının ana parçaya göre daha büyük oranda ve üniform bir şekil değiştirme yapmış olması, yükleme sırasında kaynaklarda oluşan ani kırılmaların varlığına işaret etmektedir. En yüksek şekil değiştirmelerin görüldüğü sağ alt bölüm, birleşimin toptan göçmesine yol açacak kırılmanın bu bölgeden başlayacağını işaret etmektedir. Bir bütün olarak bu birleşimde, sağ ek kısmında kalan kaynakların kırılmasıyla akmanın başladığı açıkça görülmektedir. Akma anına kadar birleşimin görüntülenen kısmına ait en küçük şekil değiştirme değeri 11 piksel iken, birleşimdeki en büyük şekil değiştirme 29 piksel olarak hesaplanmıştır. Şekil değiştirme haritasındaki renklerdeki değişim, şekil değiştirme oranlarındaki değişimi temsil ettiğinden, birleşimde hangi bölgelerin üniform ve hangi bölgelerin daha değişken şekil değiştirmelere maruz kaldığı kolayca görülmektedir.

Piksel cinsinden hesaplanan bu şekil değiştirme miktarları mm cinsinden uzunluk değerine kolayca dönüştürülebilir. Örneğin, analizi yapılan KBD1 örneğine ait görüntüler 540×1024

piksel çözünürlük değerine sahiptirler. 540 piksellik görüntü genişliğinin örneğin kısa kenarına ait olduğu için, 540 pikselin 120 mm uzunluğa eşit olduğu söylenebilir ve buradan, 1 pikselin 0.2222 mm lik uzunluğa denk geldiği kolaylıkla hesaplanabilir. Bu durumda, şekil değiştirme haritasındaki en küçük şekil değiştirme değeri olan 11 pikselin, $11 \times 0.222 = 2.44 \text{ mm}$ olacağı açıktır. Aynı şekilde şekil değiştirme haritasında açıkça okunabilen en büyük şekil değiştirme değeri olan 29 pikselin de, $29 \times 0.222 = 6.438 \text{ mm}$ olacağı açıktır (Şekil 5.31). Birleşimi sağlayan kaynak dikişlerinde şekil değiştirmelerin uniform olmadığı, kaynak dikişine göre farklılıklar gösterdiği yine aynı şekilden görülmektedir. Birleşimin Ansys modelinde de kullanılan sol yarısı içinde bulunan kaynak dikişlerinden üst kısımda bulunanlar ile alt kısımda bulunanlar arasında yaklaşık 2 piksellik şekil değiştirme farkı olduğu görülmektedir.

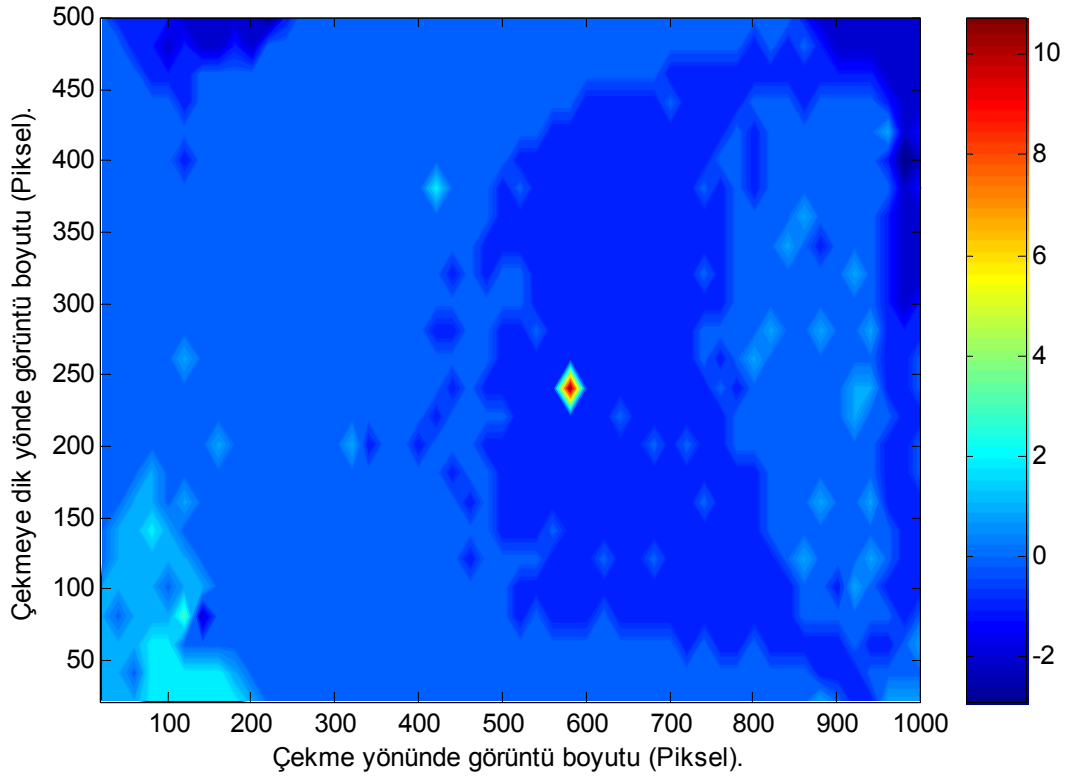


Şekil 5.31 KBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.

Bu dönüşümler analiz edilen görüntüye ait çözünürlük değerleri kullanılarak her deney örneği için rahatlıkla yapılabilir. Ayrıca yine bu dönüşümlerde kullanılmak üzere, dördüncü bölümde ayrıntılı olarak verilen standart örnek deneylerinde olduğu gibi, örnekler üzerine bir cetvel koyularak alınacak bir fotoğraftan da yararlanılabilir. Cetvel yardımıyla görüntüdeki bir pikselin uzunluk cinsinden karşıladığı değer kolayca hesaplanabilir. Burada görüntüye ait çözünürlük değerinin değiştirilmesi ve örneğin görüntülenme uzaklığı değiştirilerek görüntü

analizlerinden elde edilen şekil değiştirme hassasiyetinin istenen yönde değiştirilebileceğini de not etmek yerinde olacaktır.

Şekil 5.32’de KBD1 örneğinin çekme yönüne dik yönde (sonlu elemanlar modeli y ekseni) yapmış olduğu şekil değiştirme dağılımı görülmektedir. Bu yöndeki şekil değiştirme hareketinin oldukça üniform bir hareket olduğu, haritada ortaya çıkan ve birleşim görüntü alanında çokça değişmeyen renk dağılımından anlaşılmaktadır. Haritada, şekil değiştirmelerin -2 ila +2 piksel arasında değiştiği, ancak şekil değiştirmelerin büyük ölçüde 0 piksel değerine yakın olduğu açıkça görülmektedir. -2 ila +2 piksel değeri arasında değişen bu şekil değiştirme hareketinin, örneğin çekme cihazı çeneleri arasında çenelerin örneği kavrayıncaya kadar geçen süre içerisinde yaptığı ötelenme ve kısmi dönme hareketinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.



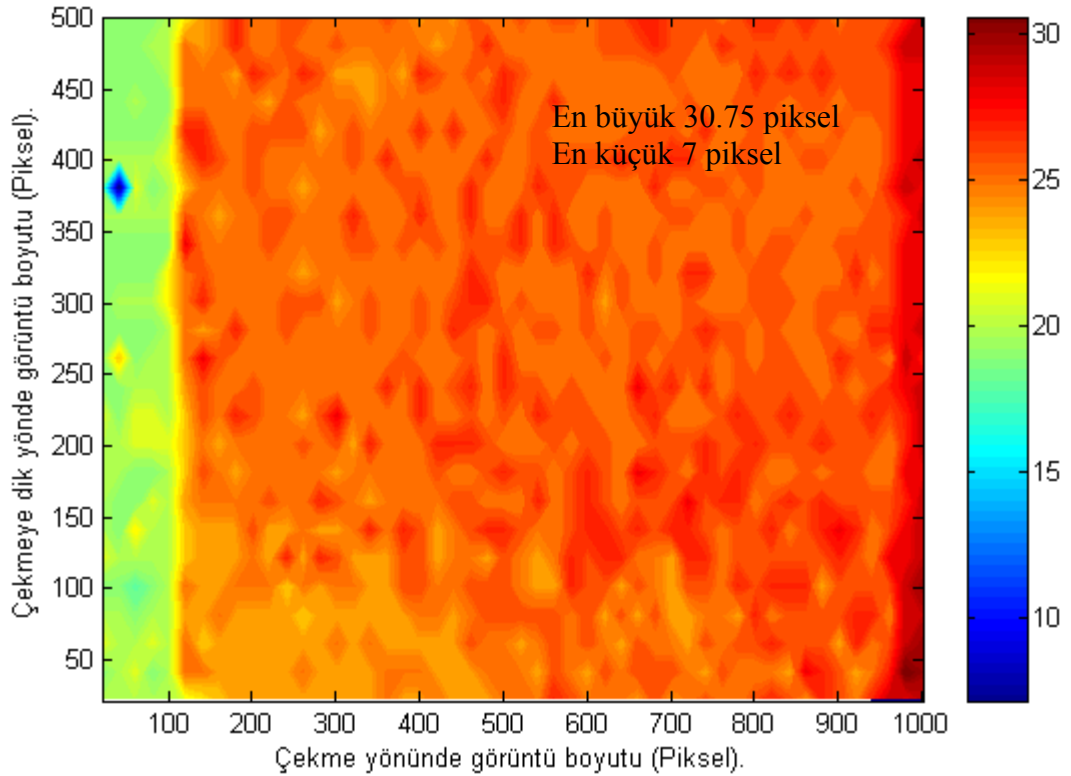
Şekil 5.32 KBD1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme haritası.

5.4.3.2 Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim

Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim örneği KBG1’e ait şekil değiştirme dağılımı Şekil 5.33’de görülmektedir. Birleşimin yaptığı en büyük ve ek küçük şekil değiştirme değerleri KBD1 ile benzerlik göstermektedir. Birleşim ek levhasının burada da üniform bir şekil değiştirme yaptığı gözlenmektedir. Ayrıca ek levhasının boyut büyüklüğü ve kaynak uzunluğunun daha

fazla olmasının, dar ek levhalı birleşim oranla daha üniform bir şekil değiştirme sağladığı açıkça görülmektedir.

Şekil değiştirme haritasından, örneğin en büyük 30.75 piksel, en küçük 7 piksel şekil değiştirme yaptığı okunabilmektedir. 535×1024 piksel çözünürlük değerine sahip örnek görüntüleri için yukarıda verilen piksel cinsinden şekil değiştirme değerleri uzunluk cinsinden hesaplandığında, en büyük şekil değiştirme değeri 6.89 mm 'ye ve en küçük şekil değiştirme değeri 1.57 mm 'ye karşılık gelmektedir. En büyük ve en küçük şekil değiştirme değerleri arasında birleşim ek levhasının, ortalama 25-27 piksel üniform şekil değiştirme yaptığı şekilden görülebilmektedir (Şekil 5.33). Ek levhasının yaptığı üniform şekil değiştirme 5.6 mm ile 6.05 mm arasında değişmektedir.



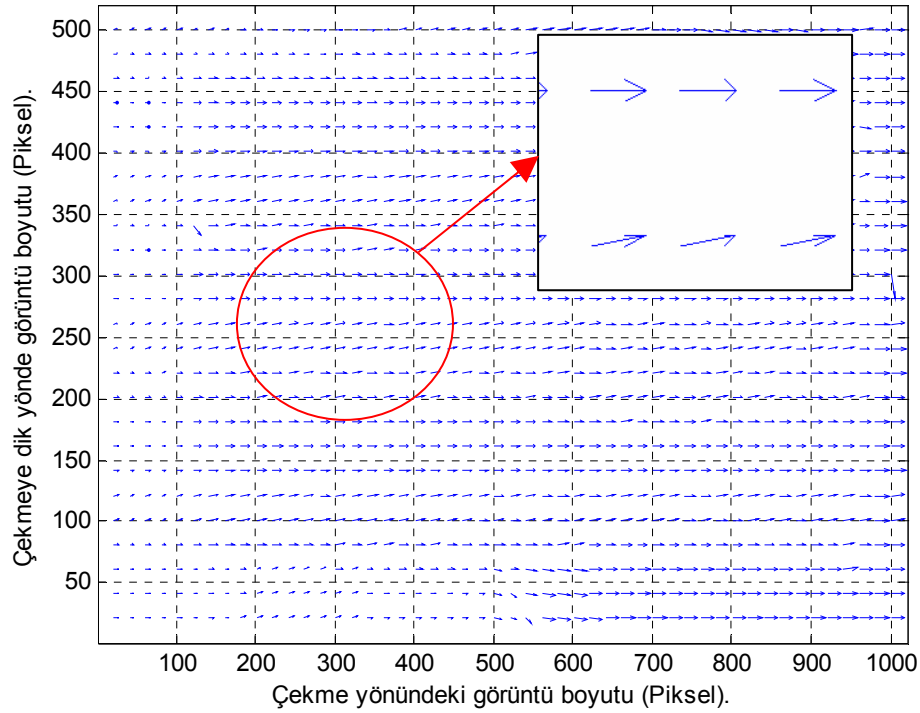
Şekil 5.33 KBG1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.

Çekme doğrultusuna dik doğrultudaki şekil değiştirme dağılımı ve yer değiştirme vektör grafiği KBD1 örneği ile çok benzerlik gösterdiğinden buraya alınmamıştır. Bu doğrultudaki şekil değiştirme değerleri beklendiği gibi sıfır veya sıfıra çok yakın değerler olarak hesaplanmıştır.

5.4.4 Bulonlu birleşimler

5.4.4.1 Dar ek levhalı bulonlu birleşim

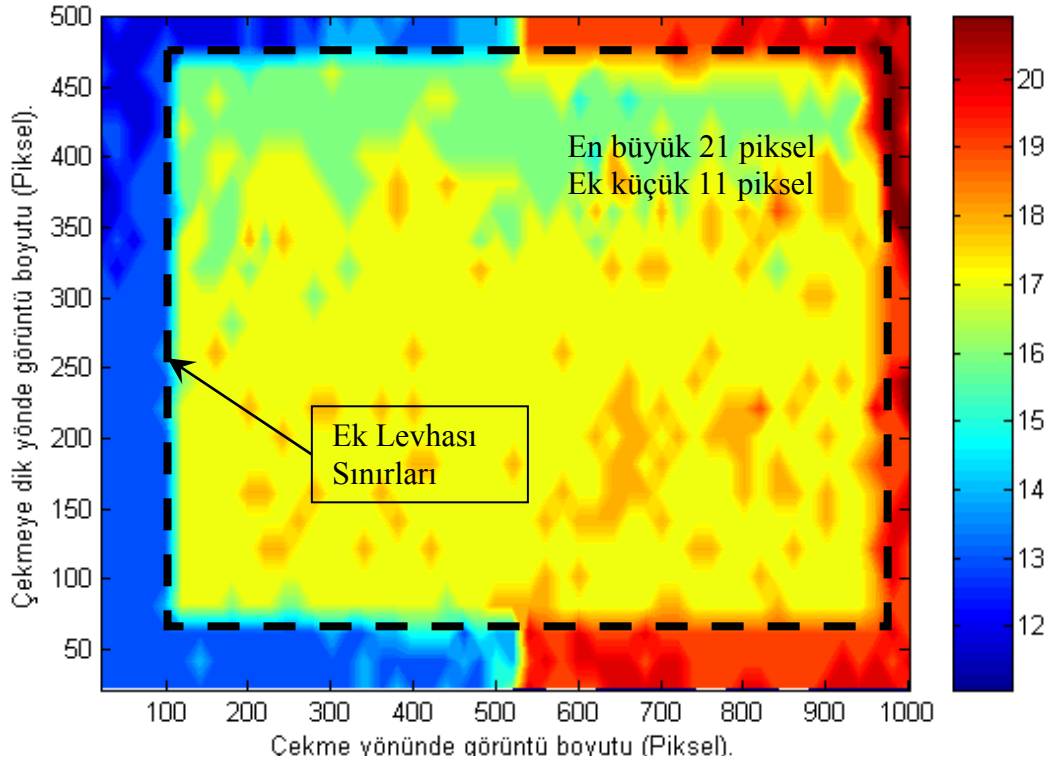
Şekil 5.34’de görülen yer değiştirme vektör grafiğinde okların her biri CBD1 örneğinin her bir makro bloğunun deney süresinde yapmış olduğu toplam yer değiştirme vektörel olarak temsil etmektedir. Her iki fotoğraf karesi arasında ve her makro blok için aranan yer değiştirmeler toplanarak, o makro bloğa ait toplam çekme doğrultusunda ve bu doğrultuya dik yer değiştirme hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu yer değiştirmeler ilgili makro blok için yer değiştirme vektörü şeklinde gösterilmektedir. Yer değiştirme vektörlerinin izlenmesinden, deney sırasında birleşimi oluşturan parçaların ve/veya birleşimin tamamının nasıl bir yer değiştirme hareketi yaptıkları izlenebilmektedir.



Şekil 5.34 CBD1 örneği yer değiştirme vektör grafiği.

Şekil 5.35’de CBD1 örneğine ait çekme doğrultusundaki, Şekil 5.36’da aynı örneğe ait çekme doğrultusuna dik yöndeki şekil değiştirme dağılımı verilmiştir. Şekil değiştirme haritasından birleşimin akma anına kadar yaptığı en büyük şekil değiştirmenin, 21 piksel olarak birleşimi oluşturan ana parçada, en küçük şekil değiştirmenin ise, 11 piksel olarak yine birleşimi oluşturan ana parçanın hareketsiz mesnedinde ortaya çıktığı okunabilmektedir. Birleşimin sağ tarafında kırmızı renkle temsil edilen büyük şekil değiştirmeler, birleşimin göçmesinin bu

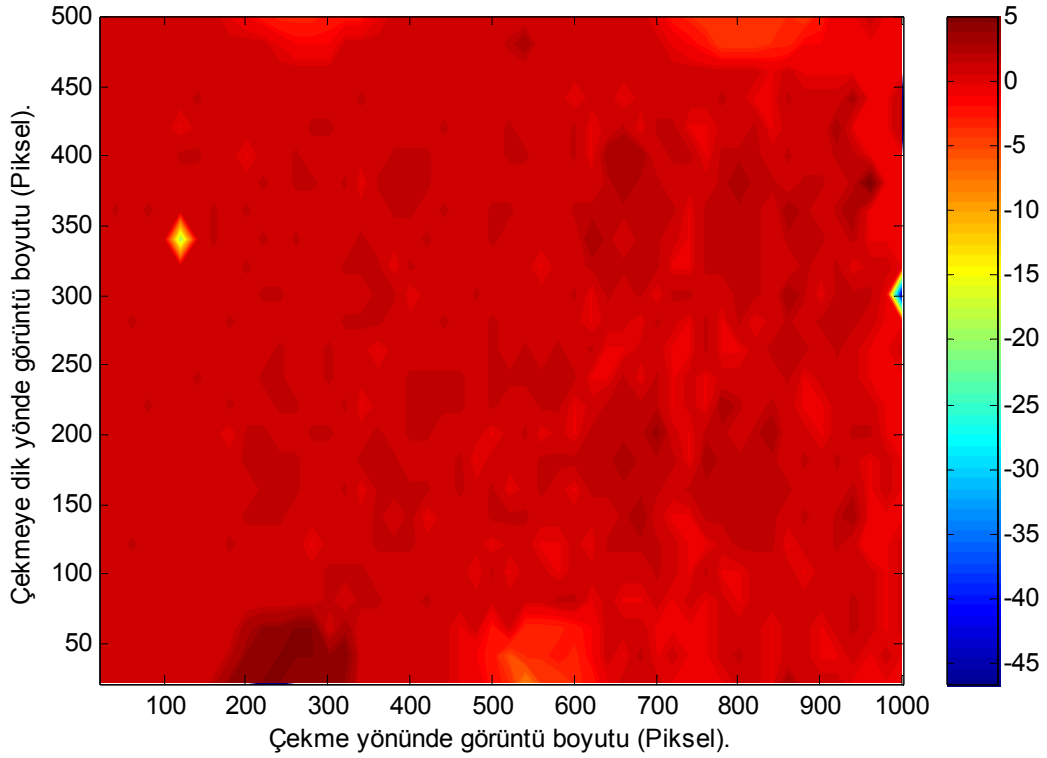
levhanın diğer parçadan kopmasıyla ortaya çıkacağını göstermektedir. Birleşim ek levhasında 16-17 piksellik yaklaşık üniform bir şekil değiştirme görülmektedir.



Şekil 5.35 CBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.

Şekil 5.35’de piksel cinsinden görülen şekil değiştirme değerleri önceki bölümde verildiği gibi uzunluk cinsinden değerlere dönüştürülebilir. 540×1027 piksel çözünürlüğe sahip bu görüntülerde de bir piksel 0.222 mm ye karşı gelmektedir. Bu durumda, Şekil 5.35’de verilen en büyük şekil değiştirme değeri olan 21 piksel 4.662 mm olarak, en küçük şekil değiştirme değeri olan 11 piksel de 2.442 mm olarak değerlendirilebilir. Birleşim ek levhasının akma anına kadar yaptığı 16-17 piksellik şekil değiştirmenin, ortalama olarak 3.552 mm ye karşılık geldiği kolayca hesaplanabilir.

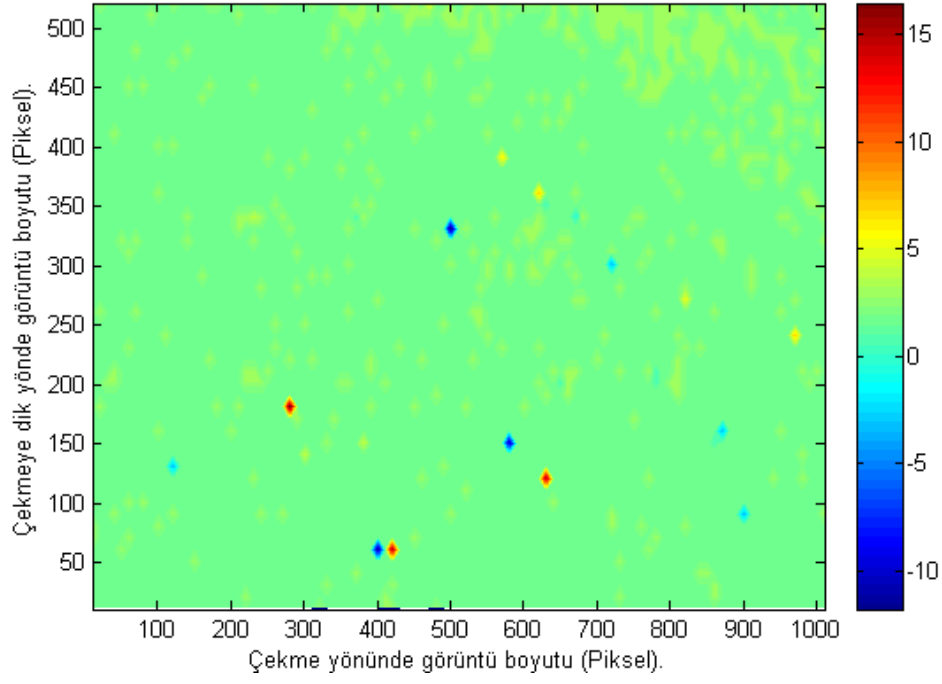
Çekme doğrultusuna dik doğrultuda ortaya çıkan şekil değiştirmelerin sıfır veya sıfıra yakın değerler olduğu Şekil 5.36’dan görülmektedir. bu doğrultuda ortaya çıkan şekil değiştirmelerin -5 ila +5 piksel arasında değiştiği aynı şekilden okunabilmektedir.



Şekil 5.36 CBD1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme haritası.

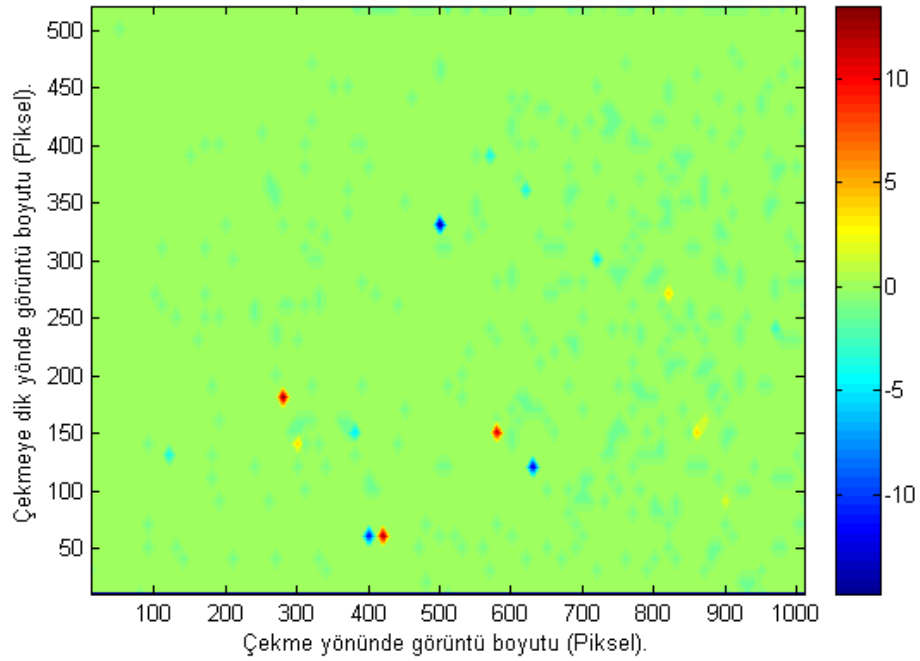
5.4.4.2 Geniş ek levhalı bulonlu birleşim

CBG1 örneğine ait çekme yönündeki şekil değiştirme haritası Şekil 5.37’de verilmiştir. 6. bölümde detayları verildiği üzere bu örnek, kullanılan sonlu elemanlar programının (Ansys®) çözüm için sonlu eleman kapasite sınırlarını aştığından, bilgisayar çözümünün yakınsaması için, diğer örneklerde olduğu gibi akma anına kadar yüklenerek değil, akma kuvvetin %70’ine karşılık gelen (105 kN) bir yükleme için çözülmüştür. Bu nedenle, görüntüler kullanılarak yapılan şekil değiştirme analizlerinde de bu durum dikkate alınmış ve bu kuvvet değerine karşı gelen görüntüler diğer görüntüler arasından çıkarılarak analize tabii tutulmuşlardır. Şekil değiştirme haritasından birleşimin yaptığı en büyük şekil değiştirmenin birleşim üzerinde bir iki noktaya sınırlı kalmak üzere 16 piksel olduğu görülmektedir. Şekil değiştirme haritasından okunan en küçük şekil değiştirme değerini ise, yine yerel bir iki noktada olmak üzere, -11 piksel olduğu görülmektedir. Bunu dışında birleşimi oluşturan ana parça ve geniş ek levhasının yaklaşık 2-2.5 piksellik üniform bir şekil değiştirme yaptığı Şekil 5.37’de görülmektedir. Örneğin sağ üst bölümünde, sarı renkle temsil edilen 7-8 piksellik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durumda, birleşimin akmasına neden olacak kaynak kırılması veya ek levhasındaki yırtılmanın bu bölgeden başlayacağı rahatlıkla ifade edilebilir.



Şekil 5.37 CBG1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme haritası.

Çekme yönüne dik yöndeki şekil değiştirme haritası da Şekil 5.38’de verilmiştir. Diğer birleşim örneklerinde olduğu gibi, bu örnekte de çekme yönüne dik yöndeki şekil değiştirme değerleri beklendiği üzere sıfır veya sıfıra yakın değerler olarak okunmaktadır.



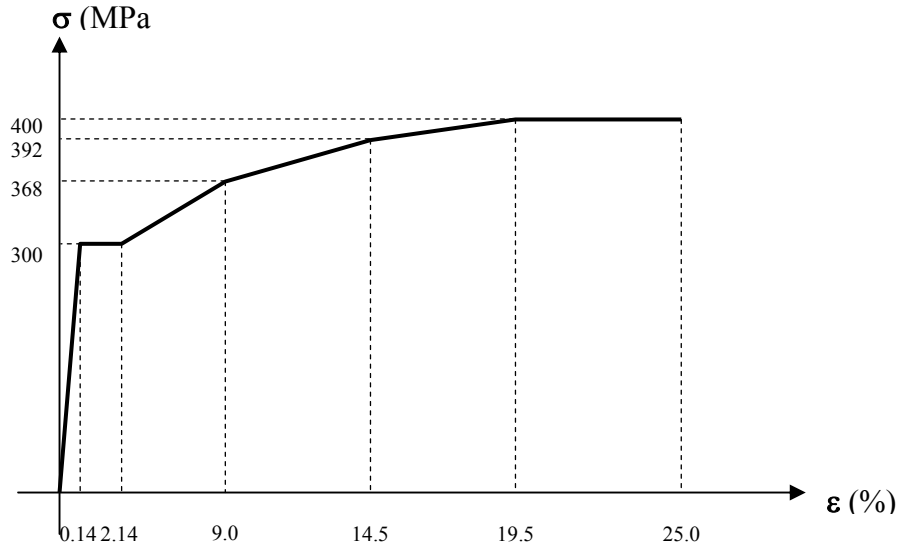
Şekil 5.38 CBG1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme haritası.

6. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE BİRLEŞİMLERİN MODELLEMESİ ve ŞEKİL DEĞİŞTİRMELERİN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1 Birleşimlerin Sonlu Elemanlar Modeli

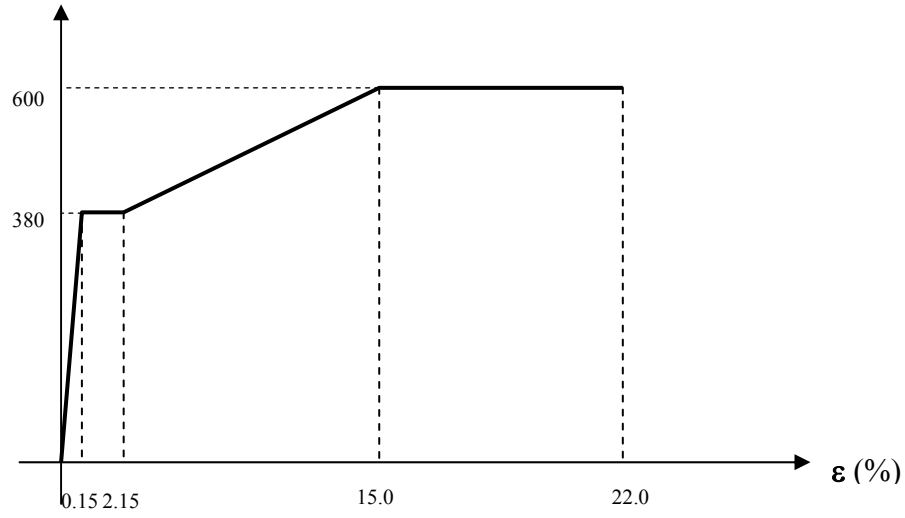
Bu tez çalışmasında, çelik yapılarda kullanılan tipik kaynaklı ve bulonlu çekme elemanlarında çekme yükleri altında oluşan yer ve şekil değiştirme değerlerinin ve birleşim içerisindeki dağılımlarının dijital görüntü yöntemleri kullanarak ölçülmesi araştırılmıştır. Bu bölümde kaynaklı ve bulonlu çekme elemanlarına ait sonlu eleman modelleri Ansys® R9.0 programı yardımıyla oluşturularak birleşimlerin yapısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Dijital görüntü yöntemleri kullanılarak hesaplanan şekil değiştirme değerlerinin, birleşime ait sonlu elemanlar modelinden elde edilen şekil değiştirme değerleriyle karşılaştırılması yapılarak ortaya çıkan farklılıklar yorumlanmıştır.

Birleşimlere ait sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme mekanik parametrelerinin hesaplanmasına ait detaylı açıklamalar dördüncü bölümde verilmiştir. Birleşimlerde kullanılan çelik malzemenin gerçek davranışına olabildiğince yakın temsil edilebilmesi için, sonlu elemanlar modelinde elastik olmayan, izotropik multi-lineer malzeme modeli kullanılmıştır. Birleşimlerde kullanılan çelik malzeme modeline ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.1’de verilmiştir. Bu modelde, akma gerilmesi $\sigma_y = 300MPa$, kopma gerilmesi $\sigma_u = 400MPa$ olarak alınmıştır. Malzeme modelinde bu gerilme değerleri için sırasıyla, akma gerilmesine karşılık %0.14 elastik birim şekil değiştirme ve kopma gerilmesine karşılık %25 kopma birim şekil değiştirmesi malzeme modeline yansıtılmıştır.



Şekil 6.1 Birleşim çeliği malzeme modeli.

Kaynaklı birleşimlerde kaynak malzemesi model içinde, elastik olmayan, izotropik multi-lineer davranış gösteren ayrı bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Kaynak malzeme modeli için kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.2’de görülmektedir. Kaynak için akma gerilmesi üreticinin verdiği teknik bilgilerden, $\sigma_y = 380MPa$, kopma gerilmesi ise $\sigma_u = 600MPa$ olarak seçilmiştir. Bütün modellerde birleşim çeliği ve kaynak malzemesi için poisson oranı $\nu = 0.35$ seçilmiştir.



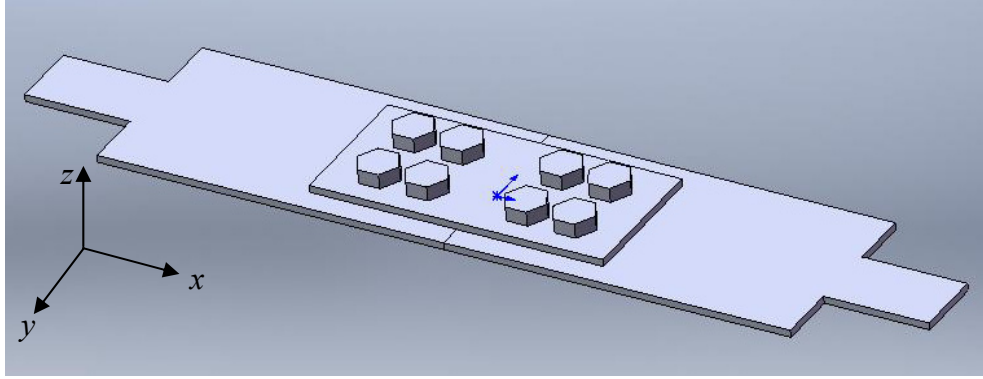
Şekil 6.2 Birleşimlerde kullanılan kaynağa ait malzeme modeli.

6.1.1 Sonlu Elemanlar Modeli Sınır Şartları

Birleşim örneklerinin tamamında çözümler, birleşimin simetrik yapısından faydalanılarak birleşimin tamamıyla değil, $\frac{1}{4}$ 'ü ile yapılmıştır. Simetrik yapıdan kaynaklanan bu durum, çözümler için gerekli bilgisayar performansını ve çözüm için ihtiyaç duyulan zamanı önemli ölçüde azaltmıştır. Birleşimlere ait simetrik yapı, kaynaklı ve bulonlu birleşimler için herhangi bir değişiklik göstermemektedir. Bu nedenle simetriden gelen sınır şartları bütün birleşim örnekleri için aynıdır. Deneylerde kullanılan birleşim örneklerinden bulonlu bir birleşime ait resim Şekil 6.3’de görülmektedir.

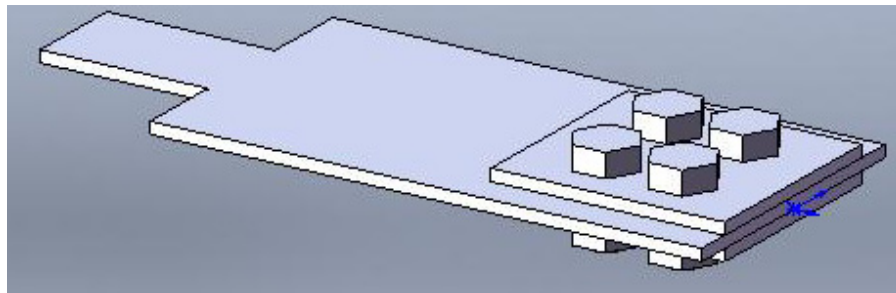
Birleşimin üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde iki düzlemde ortaya çıkan simetri dikkate alınmıştır. Bunlardan birincisi Şekil 6.3’de görülen ek levhasını y eksenine doğrultusunda enine kesen y - z simetri düzlemidir. Bu simetrik yapı kullanılarak birleşimin bir yarısı modellenmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeline alınan birleşim bir yarısı Şekil 6.4’de görülmektedir. Şekil 6.4’de görülen simetrik yapı modellenirken sınır şartı olarak, simetri

düzleminde bulunan noktaların tamamının x , y ve z eksenlerindeki hareketleri serbest bırakılmıştır. Ancak, bu noktaların yükleme eksenini doğrultusundaki yer değiştirmeleri sabitlenerek bu alandaki noktaların düzlem dışı hareketleri engellenmiştir.

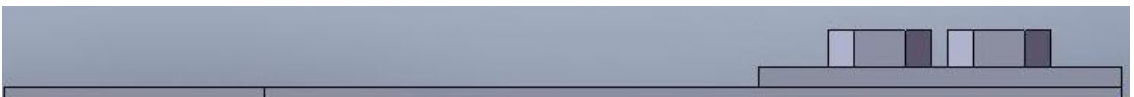


Şekil 6.3 Birleşim örneği 3D resmi.

İkinci simetri düzlemi x - y düzleminde ana parçayı kalınlığı boyunca x eksenini doğrultusunda ikiye bölen düzlemdir. Bu simetrik yapı sayesinde birleşim ekini sağlayan ikinci ek levhası sayısal modelin dışında tutulmuştur. Ayrıca ana levha kalınlığının yarısıyla modele girdiğinden sayısal modeldeki sonlu eleman sayısı da azalmıştır. Modele alınan x - y düzlemindeki simetrik yapı Şekil 6.5’de verilmiştir. Şekil 6.5’de görülen simetrik yapının modellenmesinde de simetri düzleminde bulunan alan içerisinde kalan noktaların tamamının x ve y eksenleri yönündeki hareketleri serbest bırakılırken, z eksenini yönündeki hareketleri tutulmuştur. Yükleme x eksenini doğrultusunda yapılmıştır.



Şekil 6.4 Birleşimin y - z düzlemindeki simetrik yapısıyla modellenen yarısı.



Şekil 6.5 Birleşimin x - y düzlemindeki simetrik yapısıyla modellenen yarısı.

6.1.2 Yükleme Durumu

Çekme cihazı yardımıyla uygulana yük, kaynak dikişleri veya bulonlar yardımıyla birleşime ait iki ek levhasına aktarılmakta, oradan da yine aynı birleşim araçları vasıtasıyla birleşimin diğer yarısına iletilmektedir. Birleşimin sayısal modele $\frac{1}{4}$ 'ü ile alındığı önceki paragraflarda verilmişti. Yani, sayısal modelde birleşime ait tek ek levhası bulunmaktadır. Bu durumda sayısal modelde yüklemenin bu ek levhası üzerine yapılması gerekmektedir. Birleşimde ek levhası iki adet olduğundan, gerçekte iki levha üzerine eşit dağıldığı kabul edilen yükün, sayısal modelde bulunan tek ek levhası üzerine yarısıyla uygulanması gerektiği açıktır. Sonlu elemanlar modelinde yükleme birleşimin akma anına denk gelen yük değeriyle yapılmıştır. Bu yük, kuvvet-şekil değiştirme grafiklerinden kaynaklı birleşimler için 185 *kN*, bulonlu birleşimler için 150 *kN* olarak okunmuştur (Şekil 5.26 ve Şekil 5.28). Bu yük değerleri sayısal modele yarı değerleriyle ve ek levhası üzerine gerilme olarak uygulanmıştır.

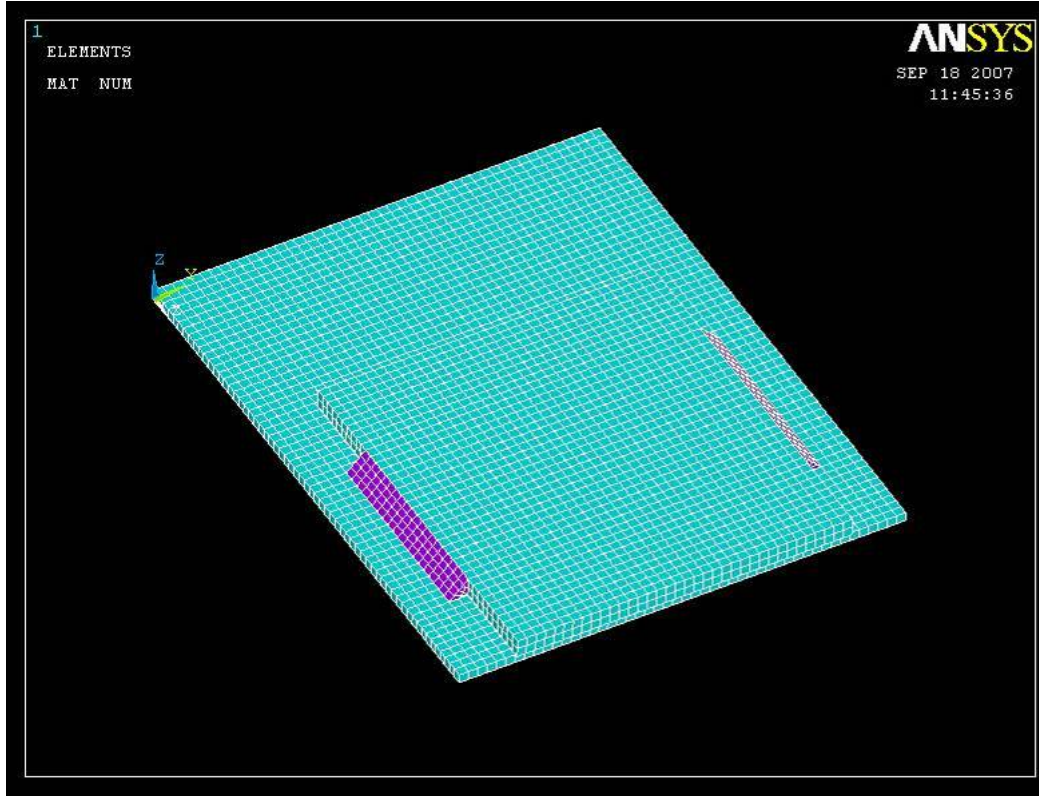
6.1.3 Kaynaklı Birleşimler

Bu bölümde, önceki bölümlerde deneyleri yapılan kaynaklı birleşimlerin tamamının 3 boyutlu bilgisayar modelleri ve çözümlerinden elde edilen sonuçlar ele alınmıştır. Sonlu elemanlar modelinden elde edilecek şekil değiştirme verileri ile görüntü analizinden elde edilmiş şekil değiştirme verilerinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için dar ve geniş ek levhalı birleşimler modellenmiş ve birleşimler akma anına kadar yüklenecek yapısal çözümü tamamlanmıştır. Dar ve geniş ek levhalı birleşimlere ait çözümler aşağıda verilmiştir.

6.1.3.1 Dar ek levhalı kaynaklı birleşim

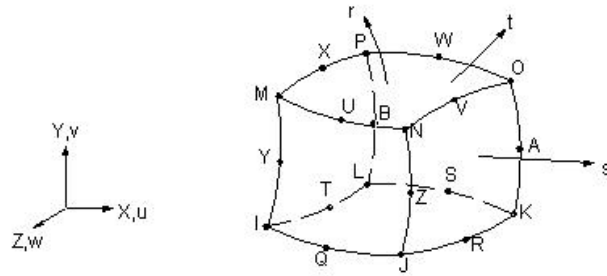
Modelde düzensiz geometriler ve kıvrımlı hatlara sahip modeller için iyi sonuçlar veren ve program kütüphanesinde bulunan Solid 95 isimli kübik eleman kullanılmıştır. Solid 95 sonlu elemanı her biri 3 serbestlik derecesine sahip multi-lineer izotropik malzeme özellikleri tanımlanmış 20 noktaya sahiptir. Dar ek levhalı kaynaklı birleşim olan KBD1 örneğine ait sonlu elemanlar modeli Şekil 6.6'da görülmektedir. Birleşimde kullanılan kaynaklar için de kaynak malzemesi için verilen malzeme parametreleriyle tanımlanmış Solid 95 isimli kübik eleman kullanılmıştır. Solid 95 isimli sonlu eleman geometrisi Şekil 6.7'de verilmiştir.

Birleşim *x-y* ve *y-z* düzlemlerinde (Ansys model eksenleri) ortaya çıkan simetrik bir yapıya sahip olduğundan, birleşimin $\frac{1}{4}$ 'ü ile yapılan sonlu elemanlar çözümünde 6088 adet sonlu eleman kullanılmıştır.



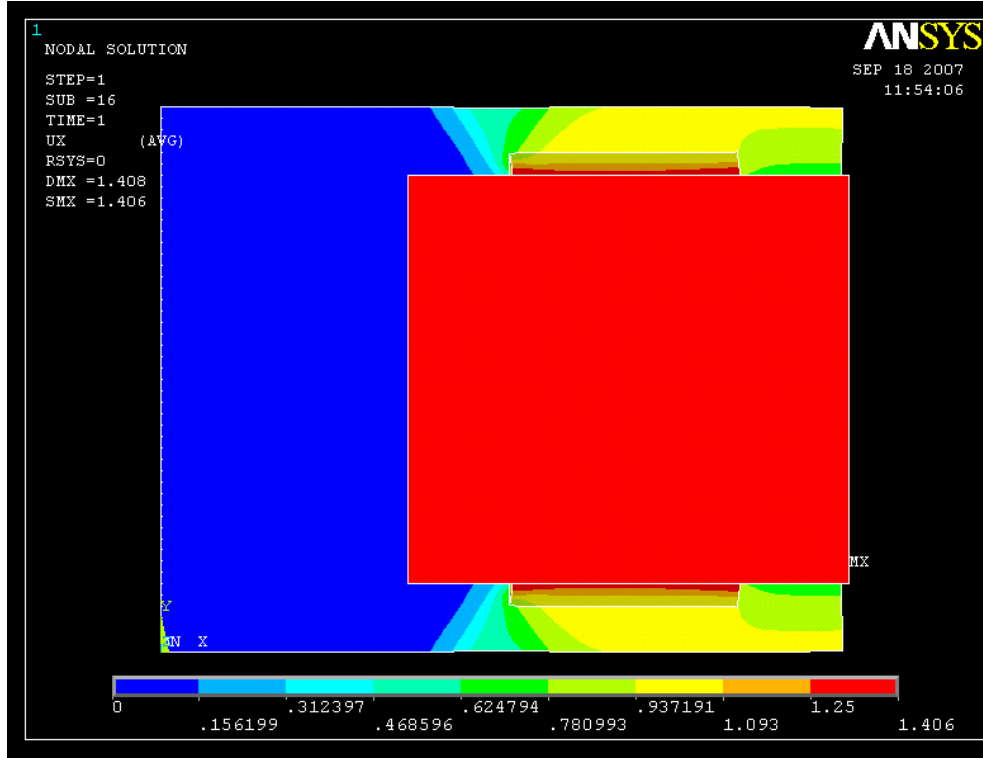
Şekil 6.6 KBD1 örneğine ait Ansys® modeli.

Birleşimin modellenmesinde, birleşimin imalatında titizlikle uyulan ve dördüncü bölümde verilen detaylardaki boyut büyüklüklerine bağlı kalınmıştır. Uygulanan kaynak kalınlığı, uzunluğu ve kaynak dikişine ait mekanik veriler modelde aynen kullanılmıştır. Modelde iki farklı renkle iki farklı malzeme temsil edilmektedir. Mavi renkle temsil edilen malzeme birleşim çeliğini gösterirken, sonlu elemanlar modelinde mor renkli bölgeler farklı malzeme olarak tanımlanan kaynak dikişlerini temsil etmektedir (Şekil 6.6).



Şekil 6.7 Solid95 eleman geometrisi (Ansys, Inc. Theory Reference).

Bu modelin akma anına kadar yüklenerek yapılan çözümünden elde edilen çekme yükü doğrultusundaki (x eksenı boyunca) şekil değıştirme dağılımı Şekil 6.8’de görölmektedir.

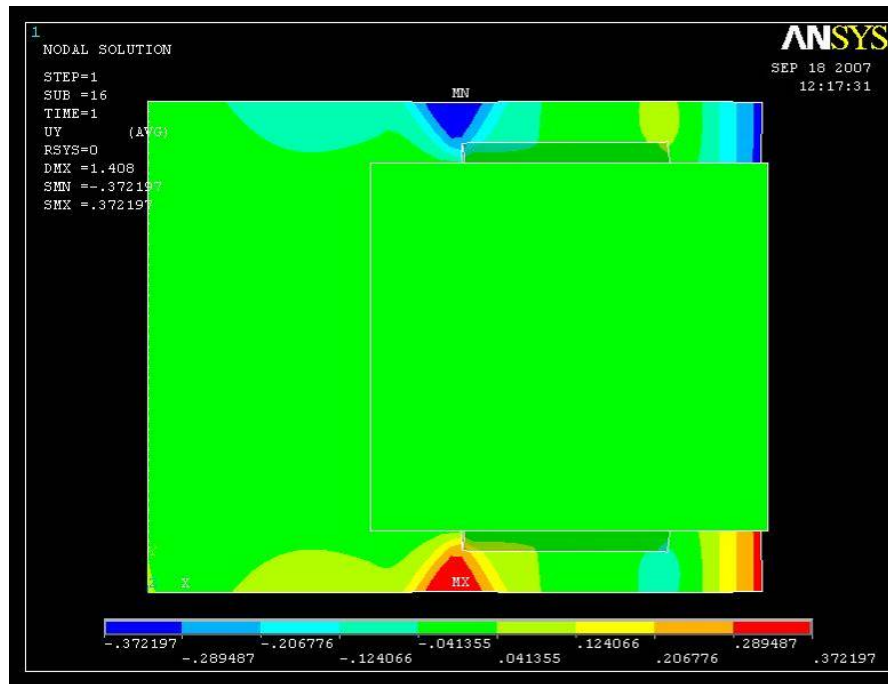


Şekil 6.8 KBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme dağılımı.

Şekil 6.8’de sonlu elemanlar çözümünden elde edilerek verilen şekil değiştirme dağılımı ile önceki bölüm Şekil 5.31’te verilen ve görüntü analizlerinden elde edilen birleşim gerçek şekil değiştirme davranışlarının birbirine yakın olmasına rağmen, hesaplanan şekil değiştirme değerleri arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Yer değiştirme davranışları arasındaki en önemli farkın kaynak bölgelerinde ortaya çıktığı açık olarak görülmektedir. Sonlu elemanlar modelinde kaynak dikişlerinin kendi içerisinde oldukça üniform bir yer değiştirme yaptığı görülmektedir. Gerçekte karşılaşılan ve birleşim şekil değiştirme hareketinde ve toptan göçmesinde belirleyici olan kaynak dikişlerindeki ani kırılmalar sonlu elemanlar modeline alınamadığından, bu üniform yer değiştirme davranışı bilgisayar modeli için kabul edilebilir bir durumdur. Oysa kaynak dikişlerinin, birleşim nihai yer değiştirmelerini de belirleyen gerçek davranışları, imalatla yakalanması çok mümkün gözükmeyen, homojen olmayan kaynak yapısına ve kontrol edilemeyen birçok imalat kusurlarına bağlı olabilmektedir. Gerçek şekil değiştirme ve gerilme davranışında belirleyici faktörler olan bu ayrıntılar sonlu elemanlar modeline yansıtılamazken, birleşim gerçek şekil değiştirme davranışını gösteren ve görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme haritalarından rahatlıkla ve tüm ayrıntılarıyla elde edilebilmektedir (Şekil 5.31). Bölüm 5.4.2.1’de bu örneğin gerçek şekil değiştirme davranışı ayrıntılı olarak ele alınmıştı. Şekil 5.31’ten örnek ek levhası üzerindeki

en büyük şekil değiştirme değerinin 4.88 mm (22 piksel) olduğu görülmektedir. Oysa en büyük şekil değiştirme değeri sonlu elemanlar çözümünde 1.4 mm olarak kendini göstermektedir (Şekil 6.8). Sonlu elemanlar modelinde birleşim izotropik olarak modellendiğinden, kaynak dikişlerinin farklı bölümlerinde ve ani olarak ortaya çıkan kırılmaları sayısal modele aktarmak mümkün olmamaktadır. Oysa birleşim şekil değiştirme davranışının belirlenmesinde kaynak dikişlerindeki kırılmaların önemi, önceki paragrafta verilmişti. Bu nedenle akma anına kadar ortaya çıkan en büyük şekil değiştirme değerleri arasındaki farkın bu şartlar altında gerçekleştirilen sayısal çözüm için makul olduğu düşünülmektedir. Kaynak prosedürünün malzemede sebep olduğu yapısal değişikliklerin ve benzeri imalat kusurları gibi faktörlerin sayısal modele yansıtılması durumunda yer değiştirme değerleri arasındaki bu farkın azalarak birbirine yakın hale geleceği düşünülmektedir. Bu durum bir sonraki alt bölümde verilen geniş ek levhali kaynaklı birleşim örneği için de geçerlidir.

KBD1 örneğine sonlu elemanlar çözümünden elde edilen çekme yönüne dik yer değiştirme dağılımı (y eksenı doğrultusunda) Şekil 6.9'da görülmektedir. Görüntü analizlerinden elde edilen ve Şekil 5.26'da görülen düşey yer değiştirme dağılımı ile Ansys® çözümünden elde edilen yer değiştirme verilerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda elde edilen yer değiştirme değerlerinin birleşimin tamamı için sıfır veya sıfıra yakın olduğu Şekil 6.9 ve Şekil 5.32'da açıkça görülmektedir.

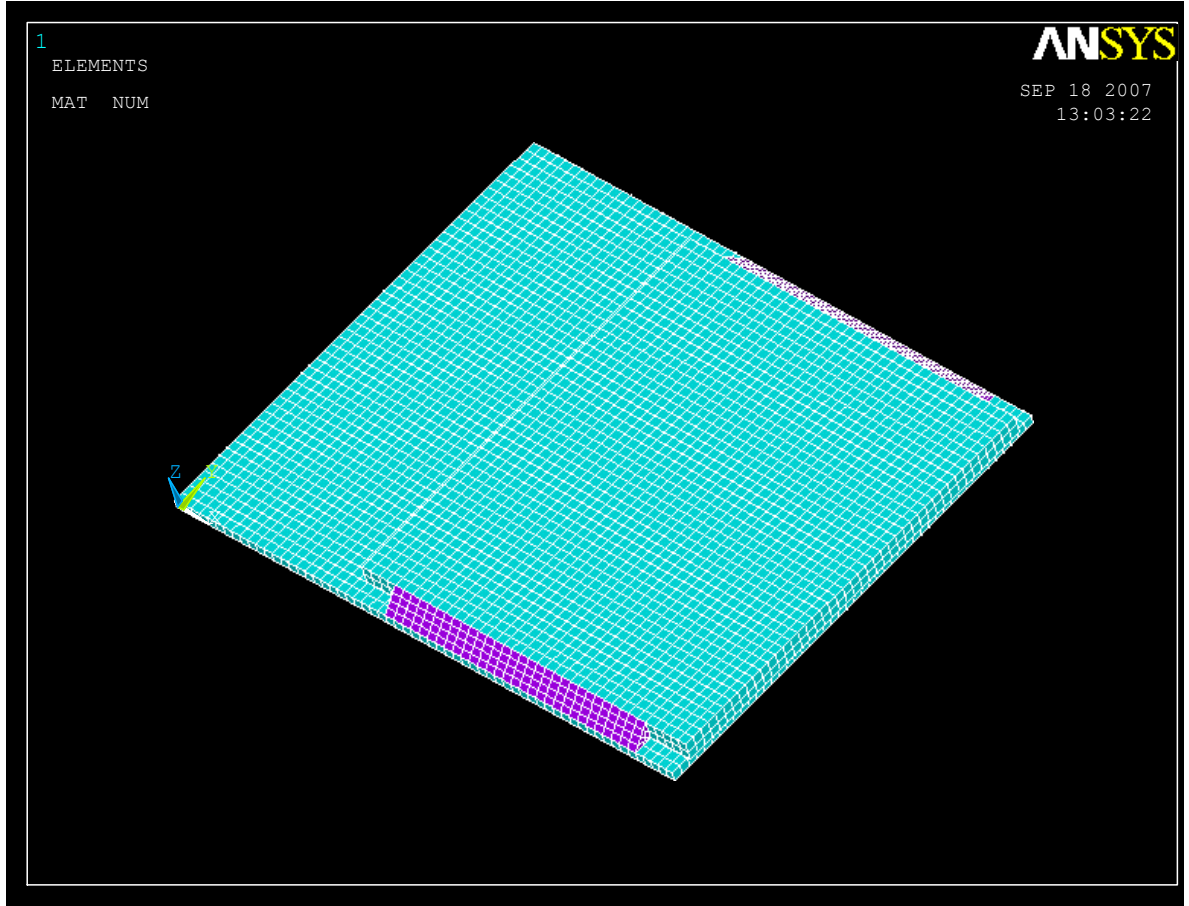


Şekil 6.9 KBD1 örneği çekme doğrultusuna dik şekil değiştirme dağılımı.

6.1.3.2 Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim

Birleşimin sayısal modelinde dar ek levhalı kaynaklı birleşimde olduğu gibi çelik levhalar ve kaynak dikişleri için Solid 95 isimli, her biri 3 serbestlik derecesine sahip 20 noktalı sonlu eleman kullanılmıştır. Geniş ek levhalı kaynaklı birleşim olan KBG1 örneğine ait sonlu elemanlar modeli Şekil 6.10'da görülmektedir. Bu örnek için de yapısal çözüm, birleşimin tamamıyla değil, dar ek levhalı birleşimde olduğu gibi birleşim simetrik yapısından faydalanılarak birleşimin $\frac{1}{4}$ 'ü ile yapılmıştır. Bu durumda birleşim sonlu elemanlar modelinde kullanılan sonlu eleman sayısı 6780 adettir.

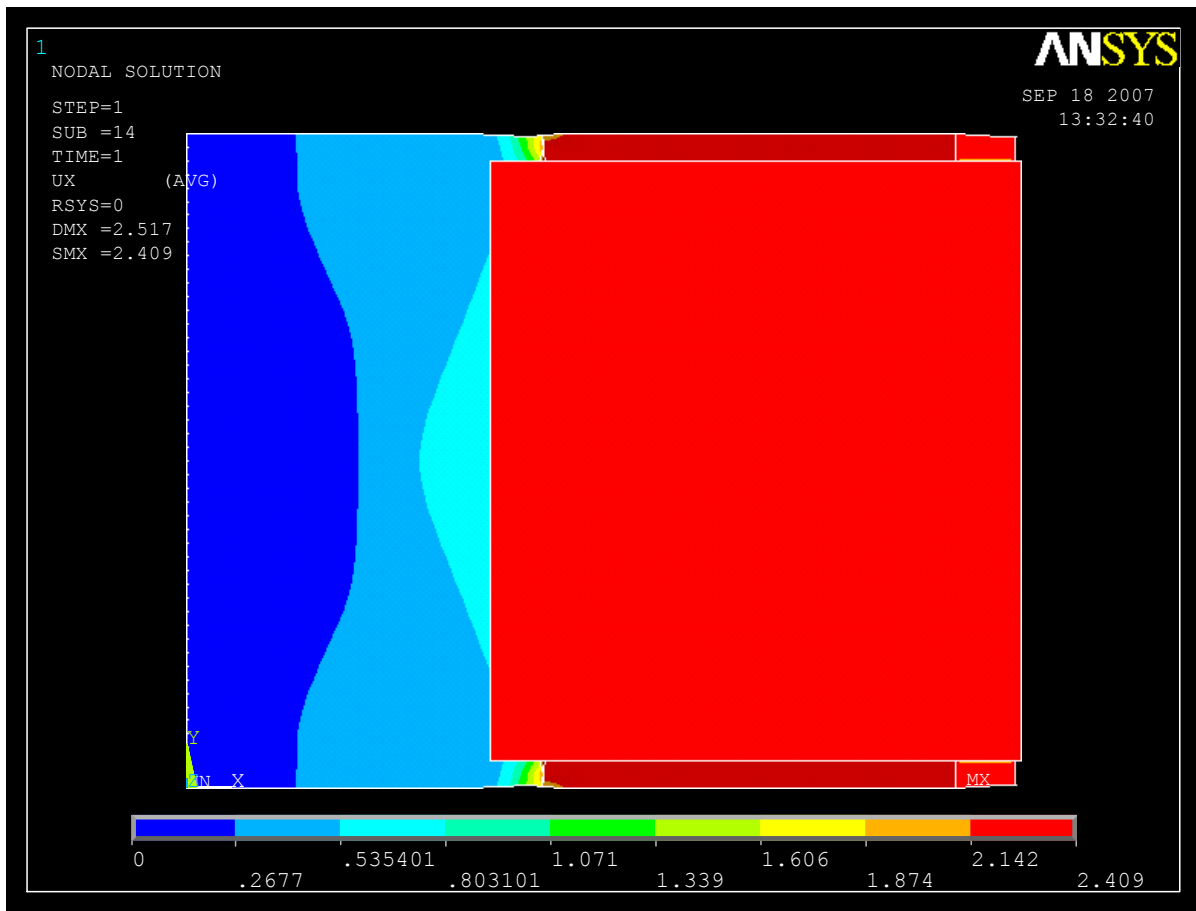
Birleşimin modellenmesinde, birleşimin imalatında titizlikle uyulan teknik resimlerde verilen boyut büyüklüklerine bağlı kalınmıştır. Uygulanan kaynak kalınlığı, uzunluğu ve kaynak dikişine ait mekanik veriler modelde aynen kullanılmıştır.



Şekil 6.10 KBG1 örneğine ait Ansys® modeli.

Modelin birleşim akma sınırına kadar çözümünden elde edilen, yükleme doğrultusundaki şekil değiştirme dağılımı Şekil 6.11'de görülmektedir. KBD1 örneği için bölüm 6.1.1.1'de

verilen değerlendirmeler geniş ek levhalı birleşim rneği olan KBG1 için de geçerlidir. nceki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmış olan ve görüntü analizlerinden elde edilen ek levhası üzerindeki en büyük yer değiştirme değeri 25-26 piksel arasında değişmektedir (şekil 5.33). Piksel cinsinden verilen bu şekil değiştirme değerlerinin uzunluk cinsinden karşılığı 5.6 mm olarak hesaplanabilir. Sonlu elemanlar çözümünden elde edilen ve ek levhası üzerinde ortaya çıkan en büyük şekil değiştirme değeri 2.409 mm olarak okunmaktadır. şekil değiştirme değerleri arasındaki bu farkın birleşim yapısıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Geniş ek levhalı kaynaklı birleşimlerin tamamında birleşimin toptan göçmesi ana levhadan yırtılmayla gerçekleşmiştir. Ek levhasının birleşim ana levhası genişliğine yakın bir genişlik değerine sahip olması, kaynak dikişlerinin ana levhayı zayıflatma açısından olumsuz bir yapı oluşturmuştur. Bu nedenle akma noktasına yaklaşıldığında en zayıf yerinden yırtılarak deformasyona devam eden birleşimin görüntü analizlerinden büyük şekil değiştirme değerleri alınmıştır. Buna karşın, tamamen üniform bir yapıya sahip bilgisayar modelinde, bu ayrıntı yakalanamamıştır.



şekil 6.11 KBG1 rneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme dağılımı.

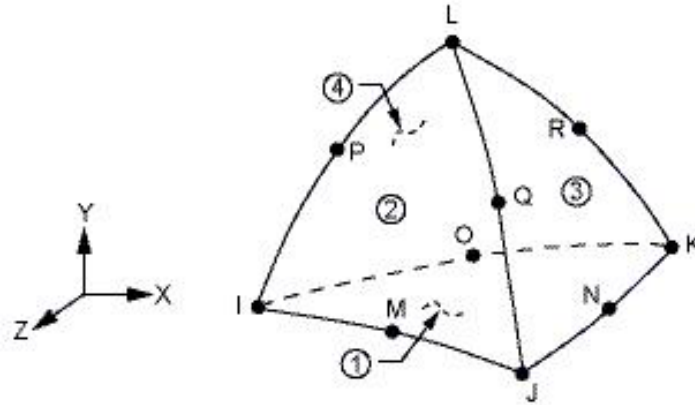
KBG1 örneğine ait çekme yönüne dik yöndeki şekil değiştirme dağılımları (y eksenı doğrultusunda) KBD1 örneği ile çok yakın benzerlik gösterdiğinden, sonlu elemanlar modeline ait şekil değiştirme dağılımı buraya tekrar alınmamıştır. Bu doğrultudaki şekil değiştirmeler da sıfır veya sıfıra çok yakın olarak tespit edilmiştir.

6.1.4 Bulonlu Birleşimler

Bu bölümde, önceki bölümlerde deneyleri yapılan bulonlu birleşimlerin tamamının 3 boyutlu sonlu elemanlar bilgisayar modellerine ait çözümlerinden elde edilen sonuçlar ele alınmıştır. Kaynaklı birleşim çözümlerinde olduğu gibi, sonlu elemanlar modelinden elde edilen şekil değiştirme verileri ile önceki bölümde verilmiş olan görüntü analizinden elde edilmiş şekil değiştirme verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

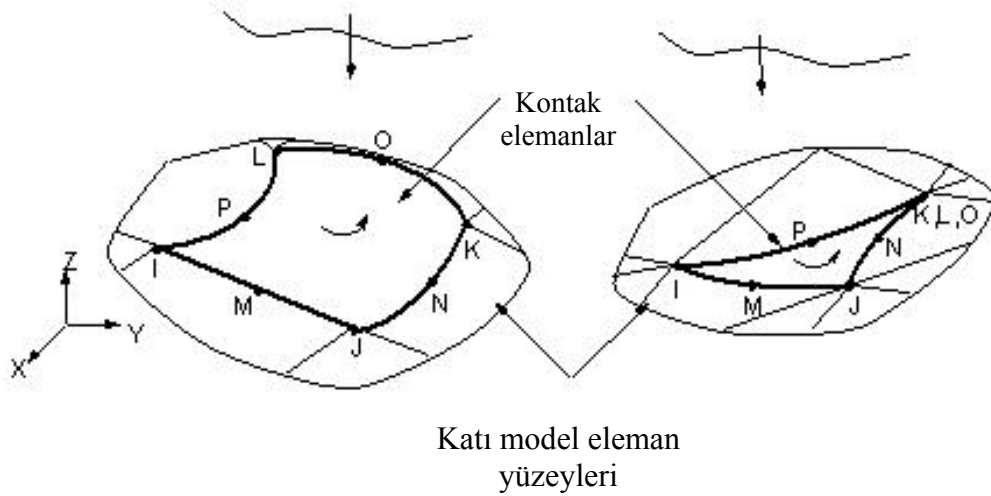
6.1.4.1 Dar ek levhalı bulonlu birleşim

Bulonlu birleşimlerde de kaynaklı birleşimlerde olduğu gibi, bilgisayar çözümlerinin daha hızlı yapılabilmek amacıyla çözüm birleşimin tamamıyla değil, simetri özelliklerinden faydalanılarak, $\frac{1}{4}$ 'ü ile yapılmıştır. Dar ek levhalı bulonlu birleşimlerden CBD1 örneğine ait sonlu elemanlar modeli Şekil 6.14'de görölmektedir. Birleşimin bulonlarla birlikte ortaya çıkan karmaşık yapısı nedeniyle birleşim modelinde, her biri 3 serbestlik derecesine sahip 10 noktalı Solid 92 isimli piramidik sonlu elemanlar hem çelik levhalar için hem de birleşimdeki bulonlar için kullanılmıştır. Karesel deplasman davranış özelliğine sahip Solid 92 sonlu elemanı düzensiz geometriler için iyi sonuç vermektedir (Ansys, Inc. Theory Reference). Solid 92 eleman geometrisi Şekil 6.12'de görölmektedir. Birleşimin sayısal modelinde 23866 adet sonlu eleman kullanılmıştır.



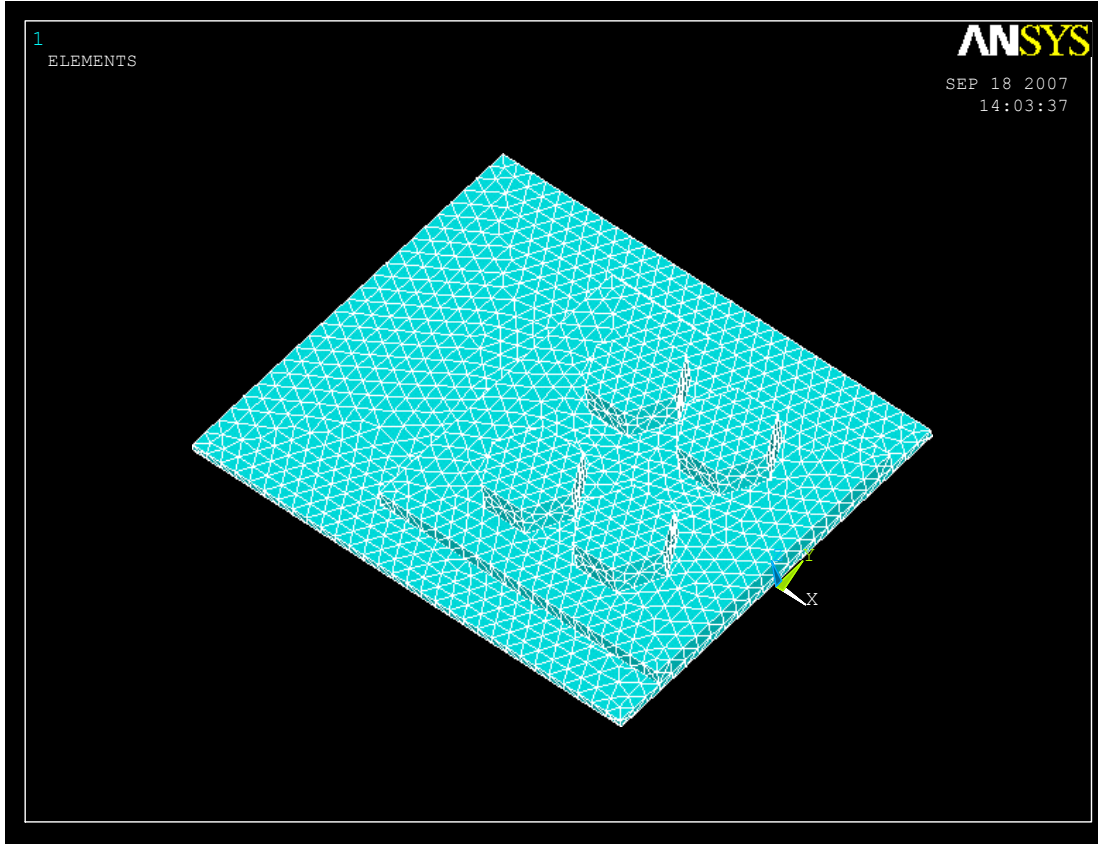
Şekil 6.12 Solid92 eleman geometrisi (Ansys, Inc. Theory Reference).

Birleşimin modellenmesinde, birleşimin imalatında titizlikle uyulan teknik resimlerde verilen boyut büyüklüklerine bağlı kalınmıştır. Birleşimde kullanılan 4 adet M16 bulon sayısal modele bulon başı, bulon gövdesi ve somunları içeren tüm geometrik yapısıyla aynen alınmıştır. Bu nedenle bulonlar ve birleşimdeki diğer parçalarla etkileşimi için herhangi bir kabul ve basitleştirme yapılmamıştır. Modelde bulonlarla birleştirilen parçalar (levhalar) ile bulon gövdesi ve bulon delikleri arasında ortaya çıkan kontak yüzeyler Ansys® model kütüphanesinde bulunan ve birbirine değen veya birbirini üzerinden kayan yapılar için tasarlanmış Conta 174 isimli eleman, hedef bölümler ise Targe 170 isimli eleman kullanılarak modellenmiştir. Conta 174 ve Targe 170 isimli elemanlar gerçekte var olmayan, sadece birleşim içerisindeki birbirine değen yüzeyleri modellemek amacıyla kullanılmış sonlu elemanlardır. Bulonla birleştirilen parçalar arasındaki sürtünme ihmal edilmiştir. Conta 174 bu bulonlu birleşim modelinde kullanılan Solid 92 gibi 3 boyutlu katı elemanlar üzerinde yüzey-yüzey teması için tanımlanabilecek 8 noktalı karesel bir sonlu elemandır. Birlikte tanımlandığı katı model elemanı ile aynı geometrik karakteristiklere sahiptir. Conta 174 eleman geometrisi Şekil 6.13’de görülmektedir.



Şekil 6.13 Conta174 eleman geometrisi (Ansys, Inc. Theory Reference).

Bu modelin akma anına kadar yüklenerek yapılan çözümünden elde edilen, yükleme doğrultusundaki (x eksen doğrultusunda) şekil değiştirme dağılımı Şekil 6.15’de görülmektedir. Önceki bölümde, aynı örneğin deneylerde yaptığı şekil değiştirme, görüntü yöntemleriyle hesaplanarak Şekil 5.35’de verilmişti.

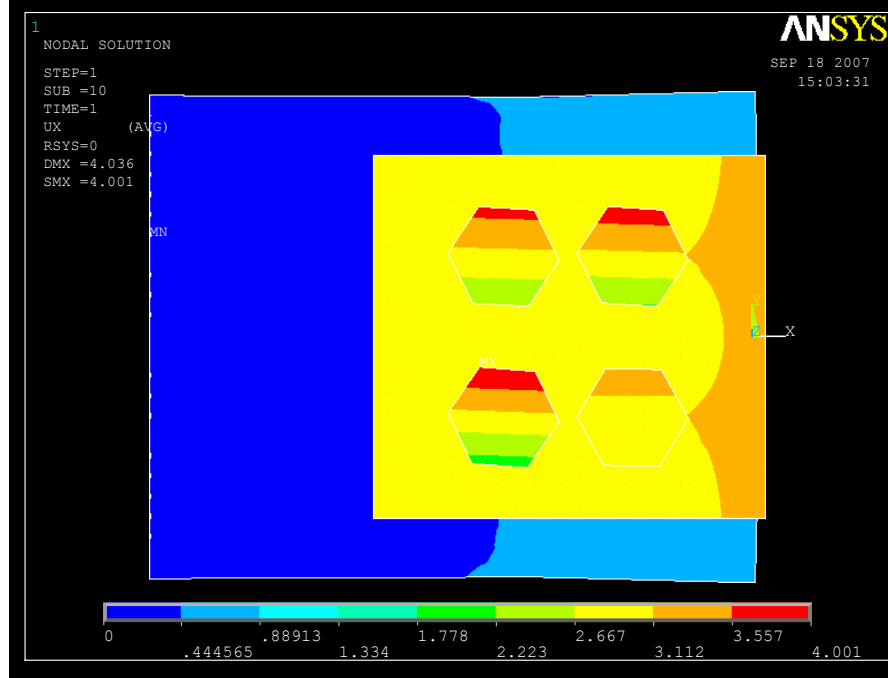


Şekil 6.14 CBD1 örneği Ansys® modeli.

Şekil 6.15’de sonlu elemanlar çözümünden elde edilerek verilen şekil değiştirme dağılımı ile Şekil 5.35’de verilen ve görüntü analizlerinden elde edilen birleşim gerçek şekil değiştirme davranışlarının ve değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen çözümde ek levhasının en büyük 3.1 mm şekil değiştirme yaptığı görülmektedir (Şekil 6.15). Ek levhaları ile ana levhayı birleştiren bulonlarda şekil değiştirme 4.1 mm olarak okunmaktadır. Deneyler sırasında alınan görüntülerin analizinden elde edilen şekil değiştirme haritasında ek levha ortalama olarak $3.552\text{-}3.774 \text{ mm}$ arasında değişen bir şekil değiştirme yapmıştır (Şekil 5.35). Her iki şekil değiştirme değerinin de birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar çözümünde parametrelerin değiştirilmesinin yukarıda değerlendirilen sonuçları değiştireceği unutulmamalıdır.

Sonlu elemanlar modelinde ek levhası için yaklaşık üniform bir şekil değiştirme gözlenirken, görüntü analizlerinden ek levhasına ait bu şekil değiştirmenin sayısal modelde olduğu kadar üniformite göstermediği görülmektedir. Şekil 5.35’de görülen şekil değiştirme haritasında sağ alt bölümlerde daha büyük şekil değiştirme hareketi gözlenmektedir. Ana levhanın bulon ekseninde alt kısmından başlayan yırtılmasının bu şekil deformasyonu ortaya çıkardığı

anlaşılmaktadır. Önceki bölümlerde ifade edildiği gibi bulonlu birleşim deneylerinin tamamında yırtılmalar, ana levhanın bulon ekseninde ortaya çıkmıştır ve bu durum görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme haritalarından kolaylıkla takip edilebilmektedir.



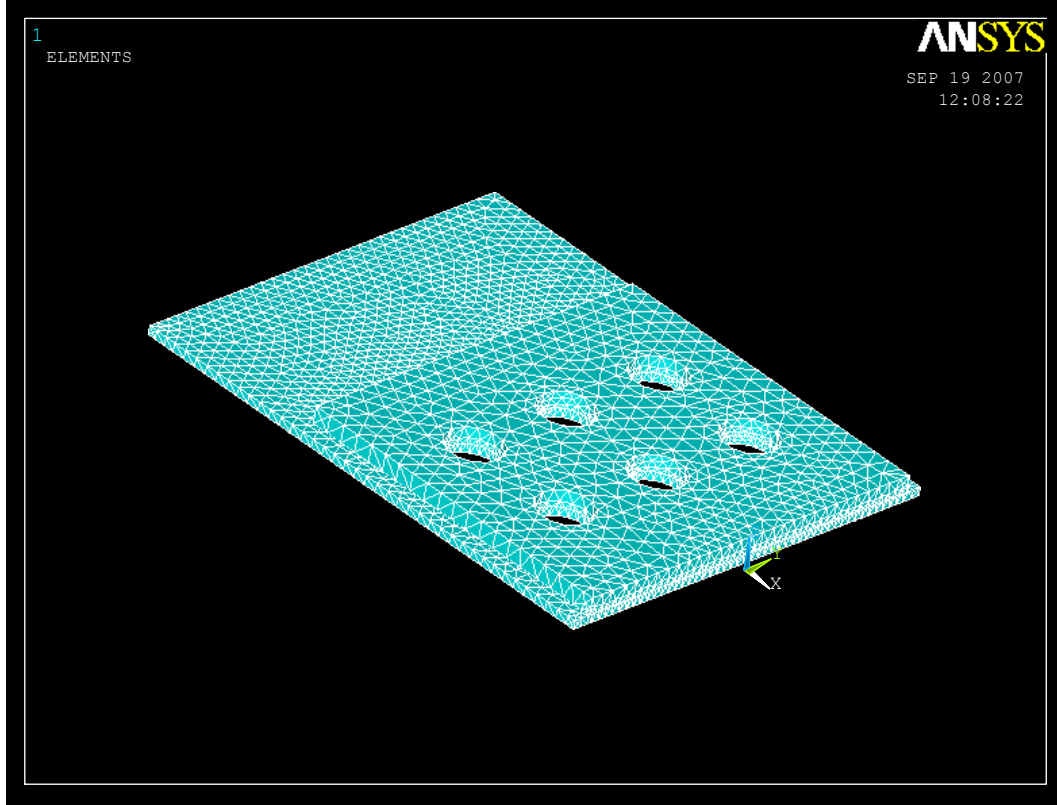
Şekil 6.15 CBD1 örneği çekme doğrultusuna paralel şekil değiştirme dağılımı.

Birleşimin sonlu elemanlar modelinde görülen en büyük şekil değiştirmenin bulon başlarında ortaya çıkması bulonların kendi eksenini etrafında döndüğünü göstermektedir.

6.1.4.2 Geniş ek levhalı bulonlu birleşim

Geniş ek levhalı birleşime ait sayısal modelde Solid 92 isimli piramidik eleman ile kontak yüzeyler ve hedef bölümler için sırasıyla Conta 174 ve Targe 170 elemanları kullanılmıştır. Solid 92 elemanına ait geometri Şekil 6.13’de verilmiştir. Bulonların gerçek yapılarıyla modellenmesi durumunda birleşim tümüne ait sonlu eleman sayısı kullanılan lisanslı programın kapasite sınırını aştığından, geniş ek levhalı birleşime ait sayısal modelde kullanılan 6 adet M16 bulon gerçek yapılarıyla değil, birleşimdeki sınır şartlarıyla dikkate alınmıştır. Bu şartlarda birleşimin sayısal modelinde 38481 adet sonlu eleman kullanılmıştır. Geniş ek levhalı bulonlu birleşimlerden CBG1 örneğine ait sonlu elemanlar modeli Şekil 6.16’da görülmektedir. Bilgisayar çözümlerinin daha hızlı yapılabilmesini sağlamak ve kullanılan programın sonlu eleman sayısını aşmamak amacıyla çözüm, simetri özelliklerinden

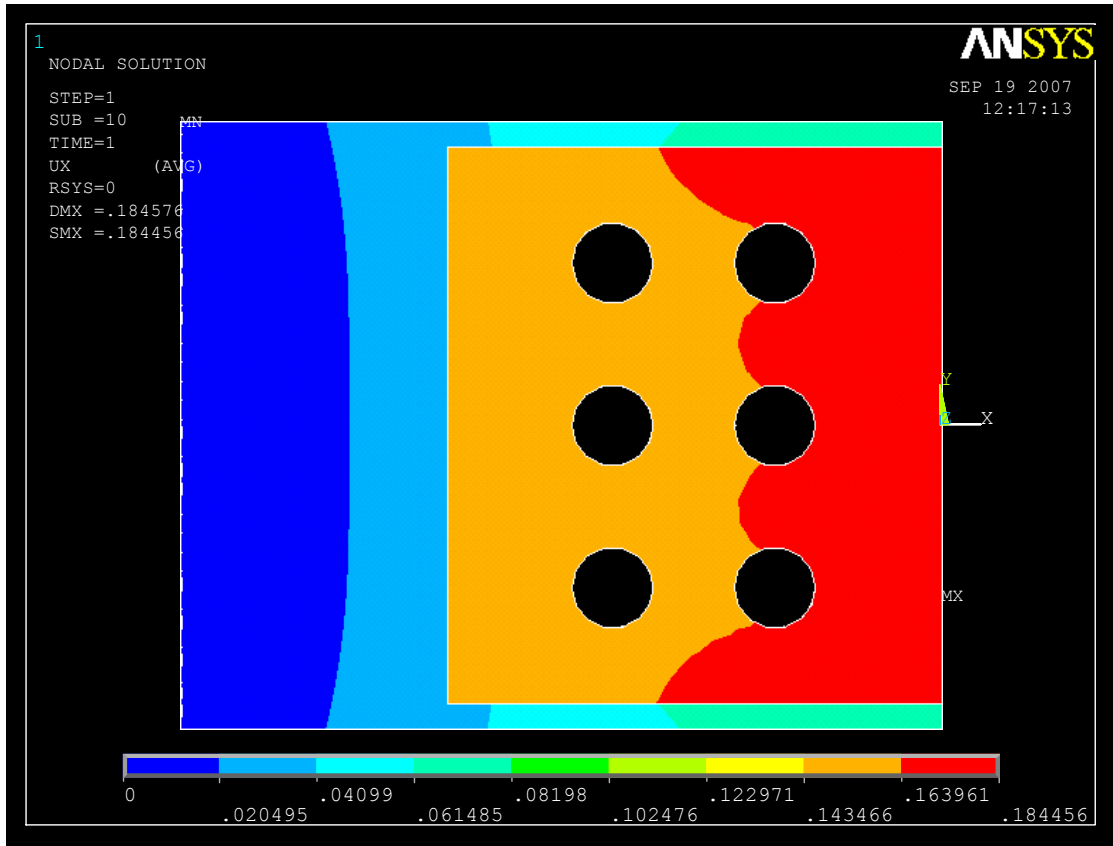
faydalanılarak birleşimin tamamıyla değil, $\frac{1}{4}$ 'ü ile yapılmıştır. Birleşimin modellenmesinde, birleşimin imalatında titizlikle uyulan teknik resimlerde verilen boyut büyüklüklerine bağlı kalınmıştır.



Şekil 6.16 CBG1 örneği Ansys® modeli.

Bu model için çözümün yakınsamasını sağlamak amacıyla sayısal çözüm, birleşimin akma anına kadar değil, akma kuvvetinin %70'ine karşılık gelen 105 *kN* luk kuvvet için gerçekleştirilmiştir. Çözümünden elde edilen yükleme doğrultusundaki şekil değiştirme dağılımı Şekil 6.17'de görülmektedir.

Birleşim şekil değiştirme dağılımından ek levhası üzerinde ortaya çıkan en büyük şekil değiştirme değerinin 0.184456 *mm* olduğu görülmektedir (Şekil 6.17). Birleşim ana levhası ve ek levhası üzerinde değişen şekil değiştirme değerlerinin bu şekil değiştirme değerine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Yapısal çözümün 105 *kN*'luk bir yüklemeyle sınırlanmış olması şekil değiştirmelerin de bu mertebeye küçük olmasını beraberinde getirmiştir.



Şekil 6.17 CBG1 örneği şekil değiştirme dağılımı.

Sonlu elemanlar modeli ve şekildeğiştirme haritası yukarıda verilen örneğin görüntü analizlerinden elde edilen çekme yönündeki şekil değiştirme haritası Şekil 5.37’de verilmişti. Şekil 5.37’de görülen şekil değiştirme haritasında, örneğin görüntü alanında kalan kısmının yaklaşık olarak 2-2.5 piksel ($2 \times 0.222 = 0.444 \text{ mm}$, $2.5 \times 0.222 = 0.555 \text{ mm}$) aralığında üniform bir şekil değiştirme yaptığı görülmektedir. Sonlu elemanlar modelinde ise, şekil değiştirme davranışının örneğin bütünü için bir üniformite göstermediği Şekil 6.17’den anlaşılmaktadır. Birleşimi oluşturan geniş ek levhasının yüke yakın olan kısmının daha fazla ve örnek içerisinde de en büyük şekil değiştirmeyi yaptığı görülmektedir. Tüm örnek içerisinde en büyük şekil değiştirme değerinin 0.184456 mm olarak hesaplandığı yine aynı şekilden görülmektedir (Şekil 6.17). Görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme davranışı ile sonlu elemanlar modelinden elde edilen şekil değiştirme davranışı arasındaki bu farkın, sonlu elemanlar çözümünün yakınsaması için belirli bir yük değeriyle sınırlandırılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Eksenel yükün 105 kN ile sınırlanması, yukarıdaki paragraflarda da açıklandığı üzere şekil değiştirmelerin çok küçük değerler olarak elde edilmesine yol açmıştır. Oysa görüntü analizlerinden elde edilebilecek en küçük şekil değiştirme değeri bir piksel olmak durumundadır. Bir pikselden daha küçük şekil değiştirme hesabı söz konusu

değildir. Bu örnek deneylerinde alınan görüntüler 540×1024 çözünürlük değerine sahip olduğundan, bu örnek için bir piksel gerçekte 0.222 mm 'ye karşı gelmektedir. Yani, görüntü analizlerinden elde edebileceğimiz şekil değiştirme değerinin en küçüğü, deneylerde kullanılan donanıma bağlı olarak, 0.222 mm den daha küçük olamaz. Oysa Şekil 6.17'de görülen şekil değiştirme haritasında, örnek üzerindeki en büyük şekil değiştirme değerinin dahi bir pikselin karşı geldiği uzunluk değerinden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu nedenle görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme haritasında tüm örnek alanı için uniform bir şekil değiştirme izlenirken, bu davranış sonlu elemanlar modelinde farklılıklar göstermektedir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen ve farklı gözüken şekil değiştirme değerleri için sayısal modelin çözüme yansıtılamayan farklı ayrıntılarla ele alınarak yeniden çözülmesi faydalı olacaktır. Ancak bu durum bu çalışmanın sınırlarını aşmaktadır. Sayısal model üzerinden yapılacak değerlendirmeler farklı bir çalışmanın konusu olabilir.

Bu durum, görüntü analizleriyle şekil değiştirme hesabı için bir eksiklik değil, deneyler öncesinde karar verilip ayarlanması gereken birkaç parametreyle değiştirilebilecek ayrıntılardır. Örneğin daha yüksek çözünürlüğe sahip görüntülerle çalışmak, bir pikselin daha küçük uzunluk değerlerini karşılamak için yeterlidir. Yine bu hassasiyet kameralarda kullanılan lenslerle de rahatlıkla sağlanabilir.

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, dijital görüntü yöntemleri kullanarak çelik yapılarda kullanılan tipik çekme ekleri üzerinde oluşan doğrusal şekil değiştirmelerin sağlıklı olarak ölçülebilmesi için bir yöntem geliştirilerek, yöntemin geçerliliğinin araştırılması ve bu yöntemle hesaplanan şekil ve birim şekil değiştirmelerin, sonlu elemanlar modellerinden elde edilen şekil değiştirmeler ve şekil değiştirme ölçerden (Strain Gage) elde edilen birim şekil değiştirmelerle karşılaştırılması yapılmıştır. Tamamı sekiz bölümden oluşan tez çalışmasının birinci bölümde, konuyla ilgili genel bilgiler verildikten sonra tezin önemi, amacı, hipotezi ve materyal ve yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

İkinci bölümde geniş bir literatür özeti verildikten sonra, konuyla ilgili yapılmış çalışmalara şekil verilmiştir.

Üçüncü bölümde, görüntü analizlerinde kullanılacak olan blok eşleme metodunun teorisi metodun diğer kriterleriyle birlikte geniş olarak ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde, birleşimlerin imal edileceği çeliğe ait mekanik parametreleri belirlemek amacıyla standart örnekler hazırlanarak çekme deneyine tabii tutulmuşlardır. Bu deneylerde kullanılan deney düzeneği ve deney parametreleri bu bölümde bütün ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Yine bu bölümde, standart örneklerin deney sırasında yapmış oldukları ve değişik deformasyon ölçerler vasıtasıyla kaydedilen birim şekil değiştirmeleri, görüntü yöntemleriyle de hesaplanarak tez hipotezinin geçerliliği bu birim şekil değiştirmelerin karşılaştırılması yapılarak kontrol edilmiştir.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde, mekanik özellikleri bir önceki bölümde deneylerle belirlenmiş olan çelik malzeme kullanılarak imal edilen tipik kaynaklı ve bulonlu çekme elemanlarının deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yine bu deneyler sırasında, şekil ve şekil değiştirme analizlerinde kullanılmak üzere dijital görüntüler kaydedilmiştir. Bu bölümde, deneyler sırasında kaydedilen dijital görüntüler kullanılarak, birleşimlere ait şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Şekil değiştirmelerin hesabında Matlab® algoritması kullanılmıştır. Hesaplanan bu şekil değiştirme değerlerinden yola çıkarak ve farklı bir Matlab® algoritması kullanılarak, şekil değiştirmeler tüm görüntü alanı için bir haritaya dönüştürülmüştür. Bütün görüntü alanındaki şekil değiştirmeleri değişen renk dağılımıyla ifade edebilen bu haritalar, şekil değiştirmeler üzerinde yorum yapabilmeyi ve şekil değiştirmeleri sonlu elemanlar sonuçlarıyla karşılaştırabilmeyi daha kolay hale getirmektedir.

Tez çalışmasının altıncı bölümünde, deneyleri yapılan kaynaklı ve bulonlu birleşimlerin sonlu elamanlar modeli Ansys® programı için oluşturularak bilgisayar ortamında çözümleri yapılmıştır. Birleşimlere ait şekil değiştirme dağılımları, kullanılan bilgisayar programı yardımıyla çıkarılarak, önceki bölümde dijital görüntülerin analizinden elde edilen şekil değiştirme dağılımlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır.

Sonuç olarak, çelik çekme elemanlarının ekleri için görüntü yöntemleriyle ölçülen şekil değiştirmelerin yeterince hassas sonuçlar verdiği bu tez çalışmasından elde edilen en önemli sonuçtur. Bu tez çalışmasında, klasik deformasyon ölçüm tekniklerinin yerini alacak bir yöntemden söz edilmemektedir. Klasik deformasyon ölçüm yöntemleri ile kıyaslandığında birçok avantaja sahip olan dijital görüntü yöntemi ile yer ve şekil değiştirme ölçümü, klasik ölçüm cihazları ile birlikte kullanılmaları durumunda birbirini tamamlayan unsurlar olabilmektedir. Bu noktada görüntü yöntemleriyle yer ve şekil değiştirme ölçümünün diğer klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında çok önemli bazı üstünlüklerinin olduğu muhakkaktır. Buna göre;

- Klasik deformasyon ölçümünde, deformasyonun kaynağı ile ilgili herhangi bir bilgi elde edilemezken, bu yöntemde deformasyona neden olan unsurları izleyebilmek ve bu deformasyonları ölçmek mümkündür.
- Deney örneği üzerine bağlamanız gereken herhangi bir cihaz yoktur. Örnekle hiç temas etmeden tüm deney takip edilip kayıt altına alınabilir. Deney verilerine deney sonrasında tekrar ulaşılabilir ve veriler farklı parametreler için yeniden incelenebilir.
- Kameranın görüntü alanı değiştirilerek istenilen örnek bölümünün şekil değiştirmeleri takip edilebilir, ölçülebilir. Burada yapılması gereken, istenilen hassasiyete bağlı olarak kamera donanımı üzerinde değişiklik yapmak veya görüntü çözünürlüğünü değiştirmektir.
- Görüntü yöntemleri kullanılarak, çelik malzemenin akma anına kadar göstermiş olduğu küçük şekil değiştirmeler yanında, akma sonrasında hatta kopma anına kadar bütün şekil değiştirmeleri takip edip hesaplamak mümkündür. Oysa klasik deformasyon ölçüm yöntemlerinde deney örneğinin akmadan sonraki şekil değiştirmelerinin ölçümleri oldukça zordur. Belirli kapasite sınırlarında çalışan deformasyon ölçer (strain gage ve ekstensometre gibi) cihazlarının aksine görüntü yöntemlerinde şekil değiştirme hesabı için herhangi bir sınırlama yoktur.
- Çelik birleşimlerin performans deneylerinde, birleşim içerisindeki şekil değiştirme dağılımı görüntü yöntemleriyle rahatlıkla belirlenebilir. Yine bu şekil değiştirmeler,

kayıtlı görüntüler üzerinde farklı ölçüm parametreleri kullanılarak, deney sonrasında aynı örnek için defalarca hesaplatılabilir. Kayıtlı görüntüler üzerinde tekrar tekrar geri dönerek analiz kendi içerisinde detaylandırılabilir. Oysa klasik deformasyon ölçüm elemanları kullanılarak yapılacak ölçümlerde, şekil değiştirme verileri örnek için bir defa alınabilecek, yeni şekil değiştirme verileri için yeni örnek deneyleri gerekecektir.

- Kamera donanımına bağlı olmak üzere, deney örneği istenilen yön ve doğrultuda kayıt altına alınabilir. Böylelikle, deney örneğinin üzerindeki yüke bağlı olarak yapması beklenen şekil değiştirmelerin dışında, yükleme düzleminin dışında ve kendisinden beklenmeyen bütün yer ve şekil değiştirmeler takip edilip ölçülebilir. Bu da bütün deneyi tüm ayrıntılarıyla kayıt altına alma ve istenilen kayıttan yer değiştirme ve şekil değiştirme analizi yapma imkânını vermektedir.
- Klasik deformasyon ölçüm cihazlarının çalışmayacağı durumların hepsinde görüntü yöntemiyle şekil değiştirme ölçümü rahatlıkla uygulanabilir. Örneğin fırın gibi yangın deneylerinin yapıldığı elverişsiz ortamlarda, deney örneği ile temas söz konusu olmadığından görüntü yöntemleri rahatlıkla uygulanabilir bir yöntemdir.

Tez çalışmasının altıncı bölümünde ele alınan birleşimlerin sonlu elemanlar modelinden elde edilen şekil değiştirme sonuçlarının, görüntü yöntemleri kullanılarak elde edilen şekil değiştirme sonuçlarından, bazı birleşimlerde, farklı olabileceği görülmüştür. Bu farklılığın malzeme ve birleşimin üniform olmayan yapısından ve birleşimin sayısal modelinde kullanılan sınır şartlarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Birleşimlerin imalatları sırasında ortaya çıkan ve kaçınılması adeta imkânsız olan imalat kusurlarının, birleşim sayısal modeline yansıtılması çoğu zaman imkânsızdır. Örneğin, kaynaklı birleşimlerde kaynak dikişi, tüm uzunluğu boyunca üniform bir yapıya sahip bir malzeme olarak modele alınmaktadır. Oysa belirli bir uzunluk boyunca homojen bir kaynak dikişi çekmek oldukça zordur, hatta neredeyse imkânsızdır. Kaynak dikişinin homojen olmayan yapısının birleşimin şekil değiştirme davranışında nasıl belirleyici bir faktör olarak ortaya çıktığı, birleşim deneyleri ve sonuçlarının değerlendirildiği beşinci bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Burada, görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme değerlerinin birleşimin gerçek şekil değiştirmeleri olduğunu ifade etmek gerekir. Buna karşın, bilgisayar modeli ideal birtakım kabulleri içerisinde barındırarak hesap yapmakta ve şekil değiştirme hesaplamaktadır. Dolayısıyla, bazı birleşimler için her iki yöntemde hesaplanan şekil değiştirme değerleri arasında ortaya çıkacak farklılıklar, malzeme ve birleşim yapısıyla ilgili olmak üzere normal karşılanabilir. Bu durumda sonlu elemanlar çözümünden elde edilen

sonuçların mühendislik yorumu ve değerlendirmesi birbirinin tamamlar nitelikteki bu verilerin daha sağlıklı değerlendirilmesi açısından son derece önemlidir.

Kullanılan bilgisayar programları ne kadar yetenekli olurlarsa olsunlar, kullanılan sayısal modelin, hesaplanmak istenen yapı modelini bütünüyle temsil edebilmesi mümkün değildir. Bu durum birleşim yapısından kaynaklanabileceği gibi, tasarımcı veya imalatçının gözünden kaçan ve fakat birleşim performansını doğrudan etkileyen bir takım faktörlerden de kaynaklanabilir. Yani, birleşimi bütünüyle temsil edebilecek bir sayısal modeli oluşturmak adeta imkânsızdır. Dolayısıyla bilgisayar hesaplamalarından elde edilen şekil değiştirme değerleri, sayısal modele alınamayan bu ayrıntılar nedeniyle, bu hataları bünyesinde her zaman barındırmak durumundadır. Oysa dijital görüntü analizi kullanılarak yapılan şekil değiştirme hesaplamalarında elde edilen değerler, birleşim gerçek şekil değiştirmelerini oluşturmaktadır. Yani elde ettiğiniz şekil değiştirme değerlerinde hesaba katılmayan herhangi bir ayrıntı yoktur. Birleşimin gerçek performansını olumlu veya olumsuz etkileyebilecek tüm ayrıntılar elde edilen şekil değiştirme değerlerine yansımış olmaktadır. Görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme değerlerinin, birleşimin gerçek şekil değiştirme değerleri olması, birleşimlerin performans değerlendirmesinin mühendislik yorumları açısından oldukça önemli bir veriyi bize vermektedir. Ayrıca elde edilen bu gerçek şekil değiştirme değerleri bütün mühendislik çalışmalarında rahatlıkla kullanılabilir.

8. GELECEKTE ARAŞTIRILMASI ÖNERİLEN KONULAR

Görüntü analizlerinde kullanılan dijital resimlerin çözünürlük seviyeleri, kameralarda kullanılan lenslerin büyütme oranına bağlıdır. Özellikle yerel şekil değiştirme dağılımlarının daha detaylı incelenebilmesi için daha yüksek büyütme oranına sahip lensler kullanılması gerekmektedir. Kaynaklı birleşimlerde, kaynak bölgelerinde ortaya çıkan yüksek gerilmelerin sebep olduğu şekil değiştirmeler, bulonlu (cıvatalı) birleşimlerde ise bulonların ek levhalarla temas noktalarında oluşan şekil değiştirmeler birleşimlerin taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkileyen ayrıntıları oluşturmaktadır. Laboratuvarlarda kullanılan kamera ve lenslerin sağladığı görüntülerin çözünürlük seviyeleri sınırlı olduğundan bu bölgelerin daha detaylı incelenmesi yapılamamıştır. Yerel şekil değiştirme dağılımlarının incelenerek sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılmasının, birleşimlerin bilgisayar modellerinin daha sağlıklı değerlendirilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. Gelecekte yapılacak olan araştırmalarda bu ayrıntılar ele alınarak yapılacak analizlerin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca, farklı tipte kaynaklı ve bulonlu birleşimlerin birleşim performansları ve şekil değiştirme analizleri yangın gibi yüksek ısıya maruz kalmaları durumunda ayrıntılı olarak daha sonraki çalışmalarda incelenebilir.

Farklı tiplerdeki kaynaklı ve/veya bulonlu birleşimler ile yapı elemanlarının bu çalışmada kullanılmayan yüklemeler altındaki şekil değiştirme davranışları görüntü yöntemleriyle araştırılabilir. Örneğin, bir eğilme elemanının moment-eğrilik ilişkisi bu yöntem kullanılarak belirlenebilir.

Bu tez çalışmasında test edilen birleşimlerin bir kısmına ait şekil değiştirme değerleri görüntü analizi ve sonlu elemanlar çözümü için farklılıklar göstermiştir. Genel şekil değiştirme davranışı birbirine oldukça yakın olsa bile, hesaplanan şekil değiştirme değerleri arasında farklılıklar olduğu, yine birleşim çeliğinin imalat sırasında maruz kaldığı yapısal bazı etkilerin (kaynak dikişi çekilmesi veya bulon deliği açılması) modele yansıtılmadığı tezin 6. bölümünde ayrıntılı olarak değerlendirilmişti. Modeller için sonlu elemanlar çözümleri bir başka çalışmada daha ayrıntılı olarak ele alınarak, ortaya çıkan bu farklılığın sebepleri malzeme ve model parametreleri daha ayrıntılı değerlendirilerek araştırılabilir.

KAYNAKLAR

2002 Edition of Cold-Formed Steel Design Manual AISI, (2002), American Iron and Steel Institute, Newyork.

ANSYS, Inc. Theory Reference.

ASTM, A370-05 (2005), Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, American Society for Testing and Materials, USA.

Arifoğlu, A., (2005), Matlab® Simulink ve Mühendislik Uygulamaları, Alfa yayınları 1637, Bilgisayar dizisi 315, 1. Basım, İstanbul.

Aydilek, Ahmet H., Güler M., Edil Tuncer B., (2004), "Use of Image Analysis in Determination of Strain Distribution During Geosynthetic Tensile Testing", Journal of Computing in Civil Engineering, Volume 18, Issue 1: 65-74.

Baxes, Gregory A., (1984), Digital Image Processing: A Practical Primer, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, N.J.

Chen, W.F., Sohal, I., (1995), Plastic Design and Second-Order Analysis of Steel Frames, Springer-Verlag Newyork Inc., Newyork.

Cuyppers, H., Wastiels J., Gu, J., Croes, K., Vantomme, J., De Roover, C., (2000), "The Use of a New Cementitious Glass Fiber Reinforced Composite in Sandwich Structures for Building Applications", Fifth International Conference on Sandwich Construction, 5-7 September 2000, Zurich-Switzerland.

De Roover, C., Vantomme, J., Wastiels, J., (2000a), Stress Computation Methods for Hybrid IPC-Concrete Bridge Cross Section, Composites From Fundamentals to Exploitation (ECCM 9), Brighton, UK.

De Roover, C., Vantomme, J., Wastiels, J., Croes, K., Taerwe, L., Blontrock, H., (2000b), "A New Non-alkaline Cement Material Reinforced by Glass Fibers (IPC) for the Construction of Bridges", Third International Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures (ACMBS III), August 2000, Ottawa, Canada.

De Roover, C., Vantomme, J., Wastiels, J., Taerwe, L., (2002), "Deformation Analysis of a Modular Connection System by Digital Image Correlation.", ProQuest Science Journals Experimental Techniques, Nov/Dec 2002: 26,6.

Donohoe, Gregory W., Bocabella, Micheal F., (1991), "Segmentation and Object Tracking for the Microstructure Analysis of Soil," IEEE, Vol. 1-2, No.25:1215-1219.

Frost, J. D., Kuo, C. Y., (1996), "Automated Determination of the Distribution of Local Void Ratio from Digital Images", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No. 2:107-117.

Global Lab Image® User Manual, (1994), 5th Edition, Data Translation Inc., Marlboro, Mass.

Gonzalez C., Rafael and Woods E. Richard, (1993), Digital Image Processing, Addison Wesley Inc, New York.

Gu, J., Wu, X., Cuyppers, H., Wastiels, J., (1998), "Modelling of the Tensile Behaviour of an E-glass Fiber Reinforced Phosphate Cement", Computer Methods in Composite Materials VI:589-598.

Guo-Qiang LI, Guo-Biao LOU, (2001), "The principles of fire resistance for steel structures in China", Proceedings of the International Seminar on Steel Structures in Fire, 1–3 November. 2001, Shanghai, PR China.

Güler, M., Edil, Tuncer B., Bosscher, Peter J., (1999), "Measurement of Particle Movement in Granular Soils Using Image Analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, 13(2): 116-122.

Hryciw, R. D., Raschke, S. A., (1996a), "Development of a Computer Vision Technique for in-situ Soil Characterisation," , Transportation Research Record, 1526: 86-97.

Hryciw, R. D., Raschke, S. A., Donohoe, Gregory W., (1996b), "Micro-Deformations in Sands by Digital Image Processing and Analysis", Transportation Research Record, 1548: 31-37.

İnan, A., (2004), Matlab® ve Programlama, Papatya yayıncılık, İstanbul.

Jaspart, JP., Weynand, K., Steenhuis, M., (1995), "The Stiffness Method of Revised Annex J of Eurocode 3", 3rd International Workshop on Connections in Steel Structures-Behaviour, Strenght and Design, CH.53:441-452, 29-31 May 1995, Trento, Italy.

Leston-Jones, LC., Burgess, IW., Lennon, T., Plank, RJ., (1997), "Elevated Temperature Moment-Rotation Tests on Steelwork Connections.", Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Bldgs., 122:410-419.

Lewis, Rhys, (1990), Practical Digital Image Processing, Ellis Horwood Series, West Sussex, PO19 1EB, England.

Lyons, J.S., Liu, J., Sutton, M.A., (1996), "High-temperature Deformation Measurements Using Digital-image Correlation", Experimental Mechanics, 36 1: 64–70.

Macari J. E., Al-Shibli, K., Sture, S., (1996), "Digital Imaging Techniques for the Assessment of Homogeneity of Granular Materials", Emerging Technologies in Geotechnical Engineering, Transportation Research Record No. 1526:121-128.

MCenteggart, I., (1995), Contacting and non-contacting extensometry for ultra high temperature testing. In: R.D. Lohr and M. Steen, Editors, *Ultra high temperature mechanical testing*, Woodhead, Cambridge.

The MathWorks User's Guide, (2004), Image Processing toolbox for use with Matlab®, Version 5, August 2004.

Russ, C. John, (1992), The Image Processing Handbook, CRC Press, Inc., Florida.

Spyrou, S., Davison, J.B., (2001), "Displacement Measurement in Studies of Steel T-Stub Connections.", Journal of Constructional Steel Research 57 (2001): 647-659.

Structural Welding Code:Steel Ansi/Aws D1.1-96 (1996), Strucrural Welding Code for Steel, Aws Committee on Structural Welding, American Welding Society, Newyork.

Tekalp, M., (1995), Digital Video Processing, Prentice Hall, First Edition, Upper Saddle River, NJ..

Watiels, J., (1999), Sandwich Panels in Construction with HPFRCC Faces: New Possibilities and Edequate Modelling, Ed Reinhardt, H.W., Naaman, A.E., Rilem Publications, France.

Yüksel, İ., (2000), Matlab® ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü, Uludağ Üniversitesi güçlendirme vakfı yayın no:167, Genişletilmiş ikinci baskı, Bursa.

EKLER

- Ek1 Yer değiştirme vektörlerinin hesaplanmasında kullanılan Matlab[®] algoritması.
- Ek2 Şekil değiştirme haritalarının oluşturulmasında kullanılan Matlab[®] algoritması.
- Ek3 Görüntülerin düzenlenmesinde kullanılan Matlab[®] algoritması.
- Ek4 Birleşimlere ait şekil değiştirme haritaları.

Ek 1 Yer değiştirme vektörlerinin hesaplanmasında kullanılan Matlab[®] algoritması.

```
clear all
```

```
% determine macro blocks and search window dimensions
```

```
MxSize = input('Macro Block Hor. Resolution: ');
```

```
MySize = input('Macro Block Ver. Resolution: ');
```

```
SwSize = input('Search Window Increment: ');
```

```
FileName = input('Enter File Name = ','s');
```

```
f = input('Frame Rate: ');
```

```
disp(' ')
```

```
% find number of frames to analyze
```

```
files = dir([FileName '*.bmp']);
```

```
NumFiles = size(files,1);
```

```
MacSize = MxSize*MySize;
```

```
disp(['Number of Frames to Process = ',num2str(NumFiles)])
```

```
disp(' ')
```

```
% determine image resolutions
```

```
Image0=imread([FileName '0' '.bmp']);
```

```
ImxSize = size(Image0,2);
```

```
ImySize = size(Image0,1);
```

```
% find pad image sizes for macro block resolutions
```

```
ImxSizePad = ceil(ImxSize/MxSize)*MxSize;
```

```
ImySizePad = ceil(ImySize/MySize)*MySize;
```

```
% find indexes from which image will be inserted into pad image
```

```
PadxInd = floor((ImxSizePad-ImxSize)/2)+1;
```

```
PadyInd = floor((ImySizePad-ImySize)/2)+1;
```

```

Displacements = [];tic
% determine macro block locations within the frames
for k = 1:NumFiles-1
    disp(['Processed Frame = ',num2str(f*k-f)])
    if (f*k > NumFiles-1)
        break
    end

% read frames for correlation
Image0 = imread([FileName num2str(f*(k-1)) '.bmp']);
Image1 = imread([FileName num2str(f*k) '.bmp']);

% initialize pad images
ImagePad0 = zeros(ImySizePad,ImxSizePad);
ImagePad1 = zeros(ImySizePad,ImxSizePad);

% insert image into the initialized arrays (images) ImagePad0 and ImagePad1
ImagePad0(PadyInd:ImySize+PadyInd-1,PadxInd:ImxSize+PadxInd-1)=Image0;
ImagePad1(PadyInd:ImySize+PadyInd-1,PadxInd:ImxSize+PadxInd-1)=Image1;

% i = row number and j = column number and
% the analysis is performed in columnwise order
for j = 1:ImxSizePad/MxSize
    for i = 1:ImySizePad/MySize
        %Macro Block coordinates
        TemInd(1,1) = (i-1)*MySize+1;
        TemInd(1,2) = i*MySize;
        TemInd(2,1) = (j-1)*MxSize+1;
        TemInd(2,2) = j*MxSize;
        %Search window coodinates
        SubInd(:,1) = TemInd(:,1) - SwSize;

```

```

SubInd(:,2) = TemInd(:,2) + SwSize;

if (SubInd(1,1) <= 0)
    SubInd(1,1) = 1;
end
if (SubInd(2,1) <= 0)
    SubInd(2,1) = 1;
end

if (SubInd(1,2) > ImySizePad)
    SubInd(1,2) = ImySizePad;
end
if (SubInd(2,2) > ImxSizePad)
    SubInd(2,2) = ImxSizePad;
end

TImage = ImagePad0(TemInd(1,1):TemInd(1,2),TemInd(2,1):TemInd(2,2),1);
SImage = ImagePad1(SubInd(1,1):SubInd(1,2),SubInd(2,1):SubInd(2,2),1);

% enlarge template and search window if templete has not
% enough contrast (coefficient of variation is less than 6%).
% if no enough contrast exists then enlarge template and search
% window by 1 pixels
CovCont = std(std(TImage))/mean(mean(TImage));
while (CovCont < 0.06)
    if max(size(TImage)) >= 2*max(MxSize,MySize)
        break
    end
    TemInd(:,1)=TemInd(:,1)-1;
    TemInd(:,2)=TemInd(:,2)+1;
    SubInd(:,1) = TemInd(:,1) - SwSize;

```

```
SubInd(:,2) = TemInd(:,2) + SwSize;
```

```
if (SubInd(1,1) <= 0)
```

```
SubInd(1,1) = 1;
```

```
end
```

```
    if (TemInd(1,1) <= 0)
```

```
        TemInd(1,1) = 1;
```

```
    end
```

```
if (SubInd(2,1) <= 0)
```

```
SubInd(2,1)= 1;
```

```
end
```

```
    if (TemInd(2,1) <= 0)
```

```
        TemInd(2,1) = 1;
```

```
    end
```

```
if (SubInd(1,2) > ImySizePad)
```

```
SubInd(1,2) = ImySizePad;
```

```
end
```

```
    if (TemInd(1,2) > ImySizePad)
```

```
        TemInd(1,2) = ImySizePad;
```

```
    end
```

```
if (SubInd(2,2) > ImxSizePad)
```

```
SubInd(2,2) = ImxSizePad;
```

```
end
```

```
    if (TemInd(2,2) > ImxSizePad)
```

```
        TemInd(2,2) = ImxSizePad;
```

```
    end
```

```
TImage = ImagePad0(TemInd(1,1):TemInd(1,2),TemInd(2,1):TemInd(2,2),1);
```

```

    SImage = ImagePad1(SubInd(1,1):SubInd(1,2),SubInd(2,1):SubInd(2,2),1);
    CovCont = std(std(TImage))/mean(mean(TImage));
end

% it is assumed that the peak of the correlation function appears
% at the lower right corner and that the center of the search window
% is on the upper left corner
Ccorr = normxcorr2(TImage(:,1),SImage(:,1));
[maxC, Imax] = max(abs(Ccorr(:)));
[Ypeak, Xpeak] = ind2sub(size(Ccorr),Imax(1));
CorrOffset = [(Xpeak-size(TImage,2))
              (Ypeak-size(TImage,1))];

% calculate displacements
Displacements = [Displacements; SubInd(2,1) + CorrOffset(1) - TemInd(2,1)...
                SubInd(1,1) + CorrOffset(2) - TemInd(1,1)];
%figure, surf(Ccorr), shading flat

    end

end

end

fid = fopen(['data' num2str(MxSize) '-' num2str(MySize) '-' num2str(SwSize) '.txt'],'a');
fprintf(fid,'%6.2f\t %6.2f\n',Displacements);
fclose(fid);toc

```

Ek 2 Şekil değiştirme haritalarının oluşturulmasında kullanılan Matlab® algoritması.

% Side length should be assigned as $2 \times \text{Grid spacing}(\text{GS}) + 1 > \text{SL} \geq \text{Grid spacing}(\text{GS}) + 1$

```
clear all, close all hidden
```

```
FileName=input('Data File Fame: ','s');
```

```
ImSize=imread('image0.bmp');
```

```
ImData=load(FileName);
```

```
ImHorRes=size(ImSize,2);
```

```
ImVerRes=size(ImSize,1);
```

```
MacHorRes=input('Macro Block Hor. Resolution: ');
```

```
MacVerRes=input('Macro Block Ver. Resolution: ');
```

```
NumOfMacHor=ceil(ImHorRes/MacHorRes);
```

```
NumOfMacVer=ceil(ImVerRes/MacVerRes);
```

```
NumOfHorElem=(size(ImData,1)/NumOfMacVer);
```

```
Xcomps=reshape(ImData(:,1),NumOfMacVer,NumOfHorElem);
```

```
Ycomps=reshape(ImData(:,2),NumOfMacVer,NumOfHorElem);
```

```
MeanXcom=[];MeanYcom=[];
```

```
sumXcom=zeros(NumOfMacVer,NumOfMacHor);
```

```
sumYcom=zeros(NumOfMacVer,NumOfMacHor);
```

```
xcord=1:MacHorRes:MacHorRes*NumOfMacHor;
```

```
ycord=1:MacVerRes:MacVerRes*NumOfMacVer;
```

```
for i=1:NumOfHorElem/NumOfMacHor
```

```
    index=(i-1)*NumOfMacHor+1:i*NumOfMacHor;
```

```
    VecXcom=Xcomps(:,index);
```

```
    VecYcom=Ycomps(:,index);
```

```
    sumXcom=sumXcom+VecXcom;
```

```

sumYcom=sumYcom+VecYcom;

    %figure,index';
    %%set(gca,'XLim',[0 NumOfMacHor]);set(gca,'YLim',[0 NumOfMacVer]);
    %quiver(xcord,ycord,VecXcom,VecYcom,0.5);grid

end

sumXcom=sumXcom(2:size(sumXcom,1)-1,2:size(sumXcom,2)-1);
sumYcom=sumYcom(2:size(sumYcom,1)-1,2:size(sumYcom,2)-1);
xcordp=xcord(2:length(xcord)-1);
ycordp=ycord(2:length(ycord)-1);
figure(1);quiver(xcordp,ycordp,sumXcom,sumYcom,0.75);grid
xlim([xcord(1) xcord(length(xcord))]);
ylim([ycord(1) ycord(length(ycord))]);

maxin=max(max(sumXcom));
minin=min(min(sumXcom));
%Generate 100 points between min and max of SumXcom
v=linspace(minin,maxin,100);
figure(2)
contourf(xcordp,ycordp,sumXcom,v)
colorbar
shading flat
    maxin=max(max(sumYcom));
    minin=min(min(sumYcom));
%Generate 100 points between min and max of SumYcom
v=linspace(minin,maxin,100);
figure(3)
contourf(xcordp,ycordp,sumYcom,v)
colorbar
shading flat

```

Ek 3 Görüntülerin düzenlenmesinde kullanılan Matlab® algoritması.

```
clear all

%Enter the row index from which to crop image frames
RowIndex = input('Enter the row index for cropping: ');

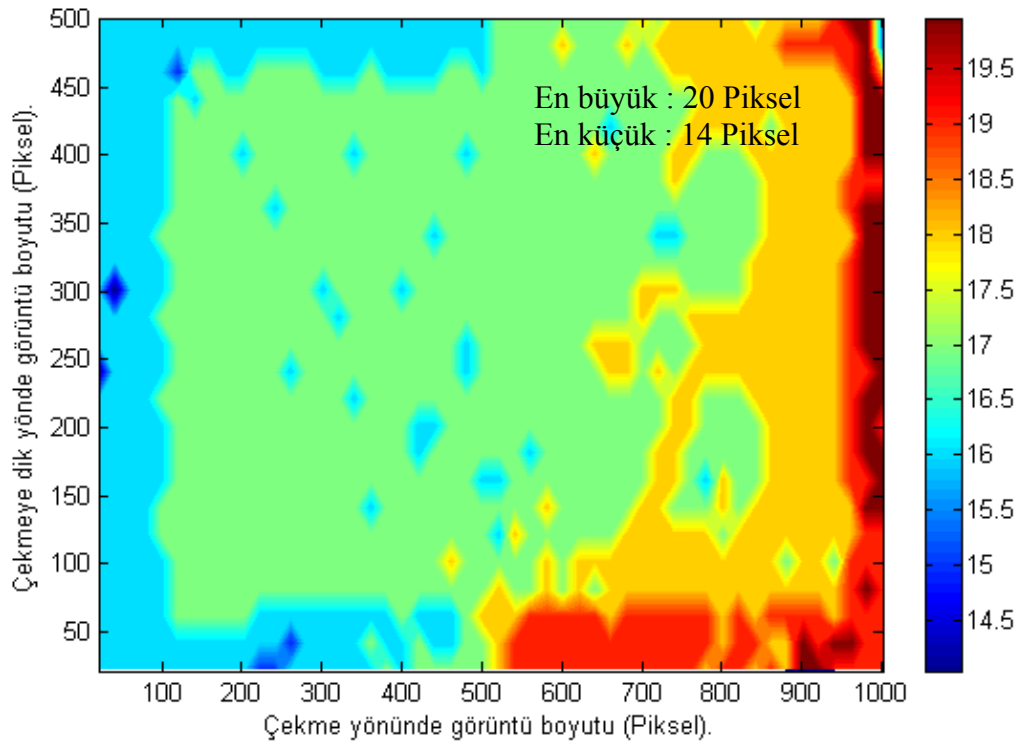
%Select the directory where the image frames are located
ImDir = uigetdir('','Image Folder');

%Select the directory to copy cropped images
CropDir = uigetdir('','Folder for Cropped Images');

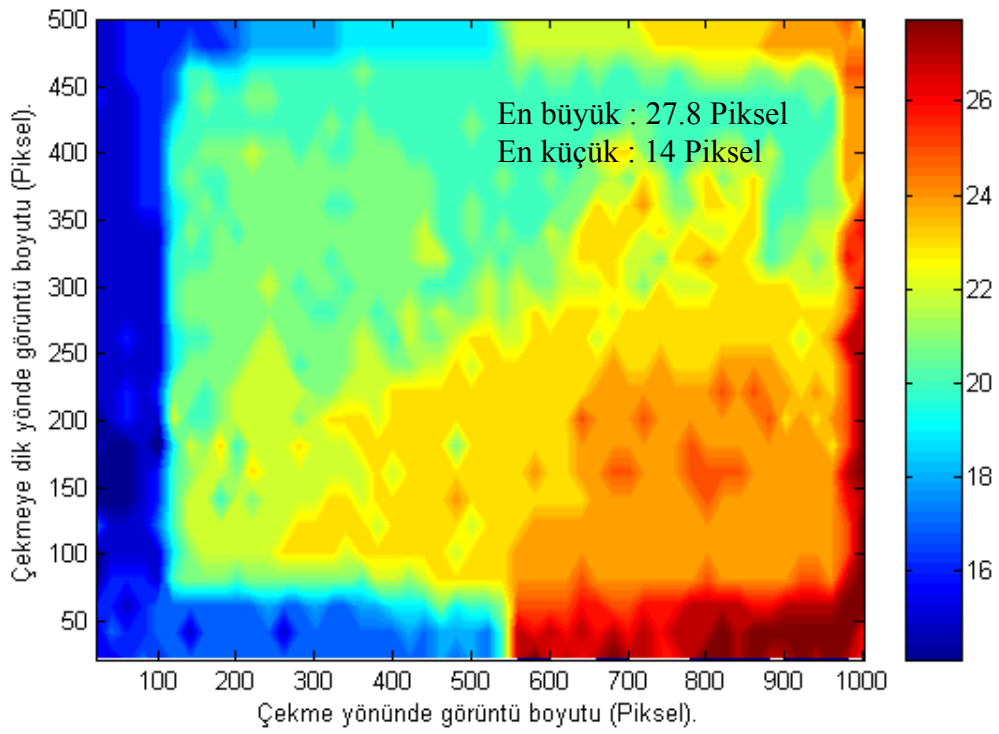
%Find number of frames
files = dir([ImDir '\ 'im*.bmp']);
NumFiles = size(files,1);

%Crop images and save them into CropDir directory
for k = 0:NumFiles-1
    ImUncrop = imread([ImDir '\ 'image' num2str(k) '.bmp']);
    ImCrop = ImUncrop(1:RowIndex,:);
    imwrite(ImCrop,[CropDir '\ 'image' num2str(k) '.bmp']);
end
```

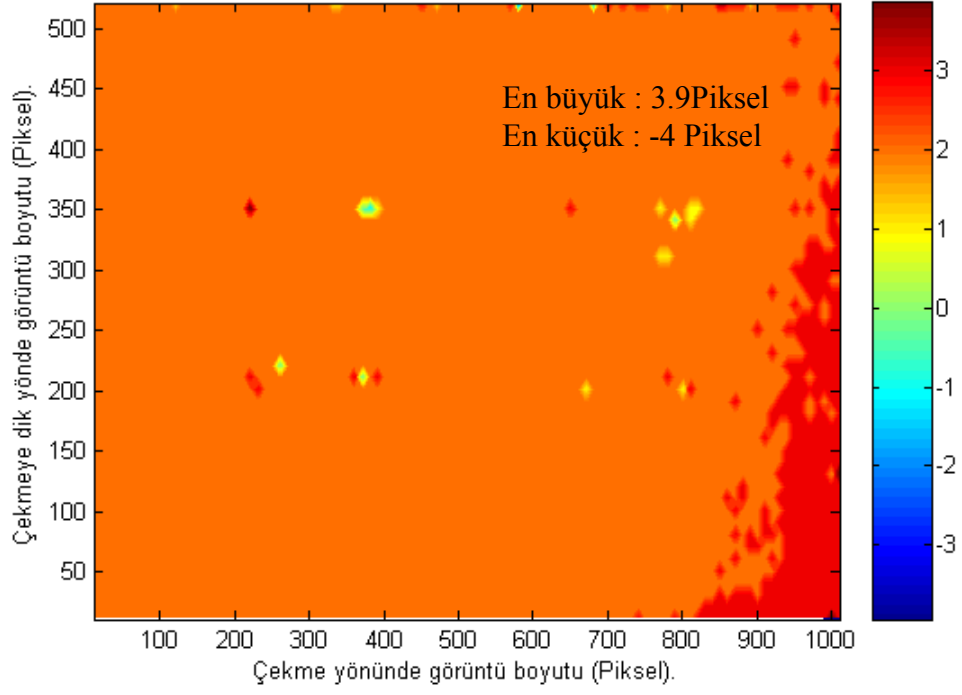
Ek 4 Birleşimlere ait şekil değiştirme haritaları.



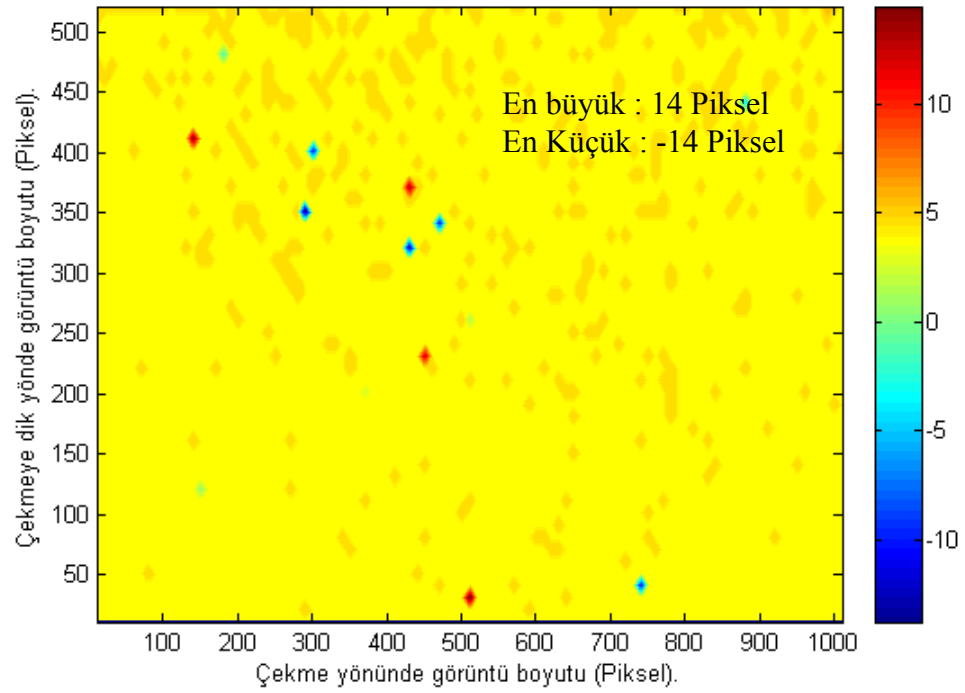
Şekil Ek 4.1 CBD2 örneği şekil değiştirme dağılımı.



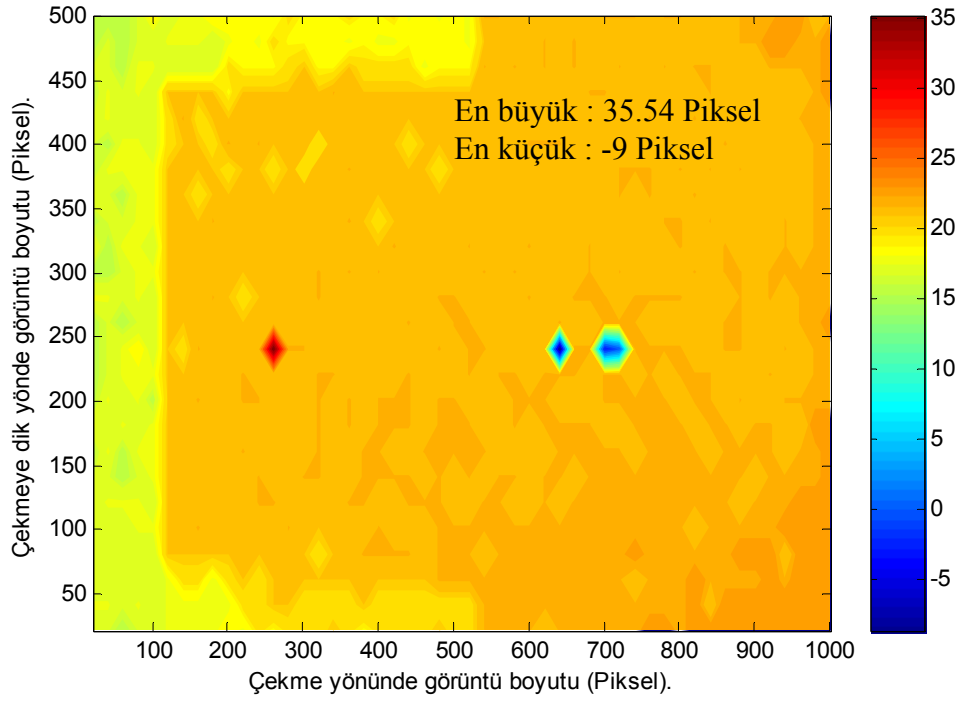
Şekil Ek 4.2 CBD3 örneği şekil değiştirme dağılımı.



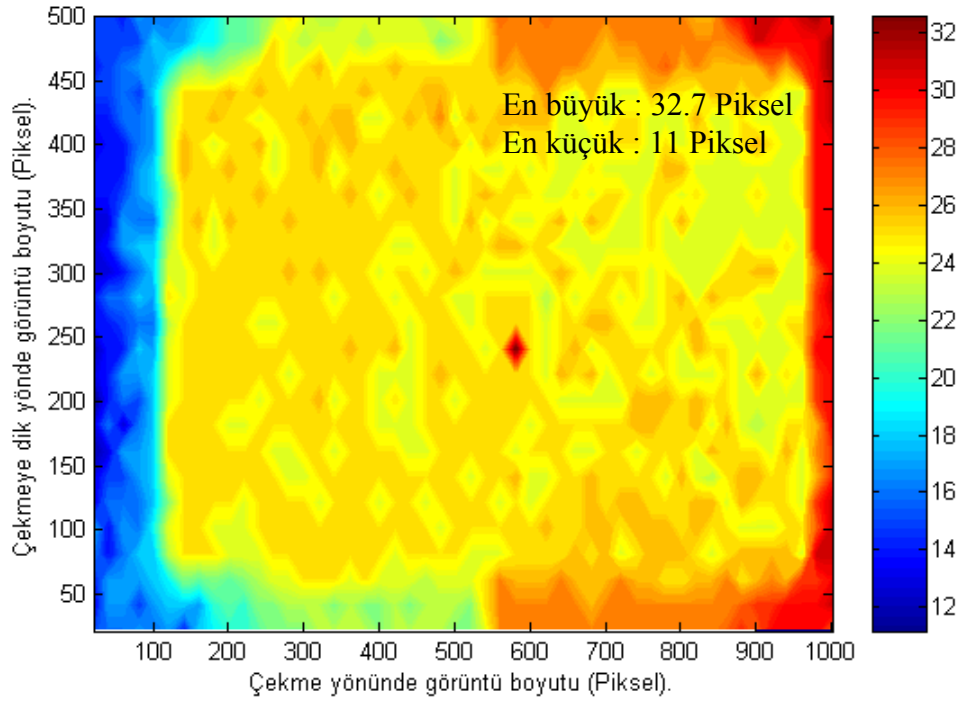
Şekil Ek 4.3 CBG2 örneği şekil değiştirme dağılımı.



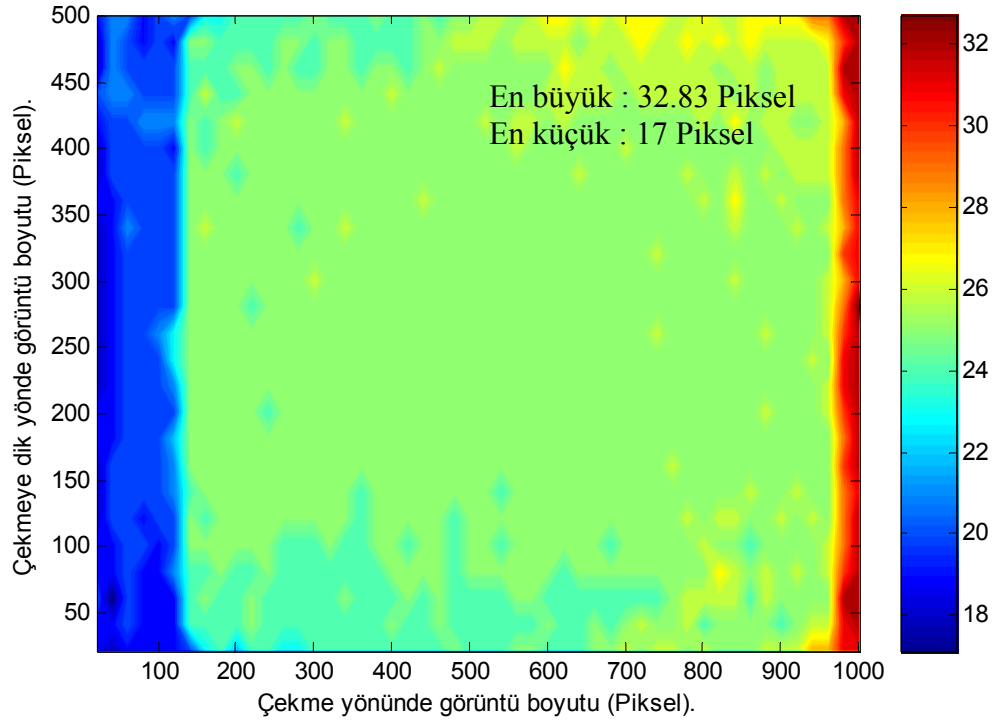
Şekil Ek 4.4 CBG3 örneği şekil değiştirme dağılımı.



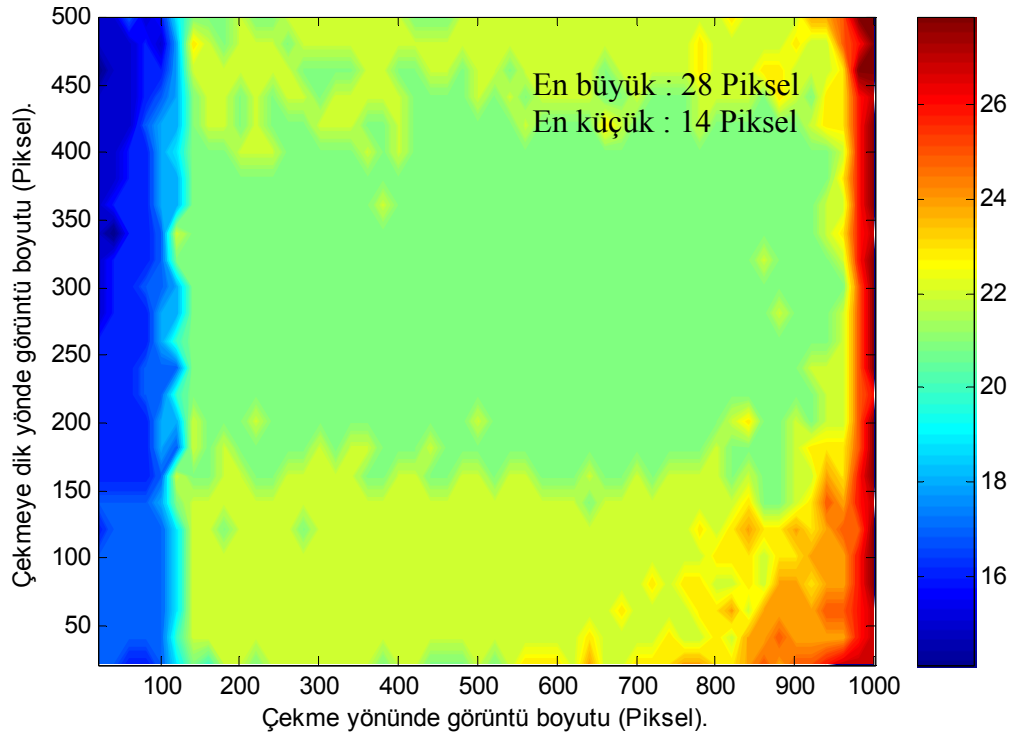
Şekil Ek 4.5 KBD2 örneği şekil değiştirme dağılımı.



Şekil Ek 4.6 KBD3 örneği şekil değiştirme dağılımı.



Şekil Ek 4.7 KBG2 örneği şekil değiştirme dağılımı.



Şekil Ek 4.8 KBG3 örneği şekil değiştirme dağılımı.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 01.01.1972

Doğum yeri Tokat

Lise 1985–1988 Tokat Gaziosmanpaşa Lisesi

Lisans 1988–1992 Karadeniz Teknik Üniversitesi Müh. Mim. Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1994–1997 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Doktora 2002–2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurumlar

1992–1994
1994–

Özel sektör.
Gaziosmanpaşa Üniversitesi