



## Araştırma Makalesi / Research Article

# ÇELİK ÇEKME ELEMANLARININ DOĞRUSAL ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAĞILIMININ HESABI İÇİN BİR YÖNTEM

Şahin SÖZEN<sup>\*1</sup>, A.Zafer ÖZTÜRK<sup>2</sup>, Murat GÜLER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Yıldız-İSTANBUL

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

<sup>3</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Geliş/Received: 30.05.2008 Kabul/Accepted: 22.09.2008

### ÖZET

Bilindiği gibi, yapı birleşim bölgesinde kullanılan malzeme cinsi, birleşim kalitesi, imalat yöntemleri çelik birleşimlerin davranışını ve böylece bütün yapı davranışını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdendir. İmal edilmiş bir birleşim ile onun bilgisayar modeli arasındaki muhtemel performans farklılıkları, çelik yapılar için ihmal edilemez tasarım problemlerine neden olabilir. Güvenilir bir yapı tasarımı ancak, yapı davranışını belirleyecek malzeme özelliklerinin ve modellerinin tasarıma ne kadar doğrulukla alındığına bağlıdır. Çelik birleşimlerde gerilme-şekil değiştirme dağılımları günümüzde, kabul edilen malzeme özellikleri ve malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar metoduyla hesaplanmaktadır. Geleneksel şekil değiştirme ölçerler de, şekil değiştirme bilgisini yalnız bir nokta ve belirli bir süre için sağladığından, laboratuvar testlerinden sonra birleşim içerisindeki şekil değiştirme dağılımını ayrıntılarıyla belirlemek mümkün olmamaktadır.

Bu çalışmada, çekme kuvveti altında test edilen çelik birleşimlerin şekil değiştirme dağılımının ölçülebilmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Metot, deney sırasında periyodik olarak alınan birleşim örneğine ait dijital görüntülerin analizi esasına dayanmaktadır. Bu metot kullanılarak, test edilen birleşimler için şekil değiştirme dağılımı kabul edilebilir hassasiyet ve doğrulukla belirlenebilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Çelik Konstrüksiyon, Çelik Birleşim, Görüntü Yöntemleri, Görüntü İşleme, Görüntü Analizi.

### A METHOD TO CALCULATE LINEAR DEFORMATION DISTRIBUTIONS IN STEEL TENSION ELEMENTS

#### ABSTRACT

It is known that material properties, connection quality and manufacturing methods are among the important factors directly affecting the behavior of steel connections and hence steel structures. The possible performance differences between a fabricated connection and its computer model may cause critical design problems for steel structures. Achieving a reliable design depends, however, on how accurately the material properties and relevant constitutive models are considered to characterize the behavior of structures. Conventionally, the stress and strain fields in structural steel connections are calculated using the finite elements method with assumed material properties and constitutive models. Because the 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 study, a new method is developed to measure deformation distribution of steel connections 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.

**Keywords:** Steel structures, Steel connections, Image processing, Image acquisition, Image analysis.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: e-mail / e-ileti: ssozen@gop.edu.tr, tel: (356) 252 16 14 / 2647  
Gaziosmanpaşa Ün., Tokat Meslek Yüksek Okulu, TOKAT

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmada verilen görüntü yöntemlerini kullanarak şekil değiştirme hesabı, hali hazırda kullanılmakta olan şekil değiştirme ölçme yöntemleriyle kıyaslandığında önemli birçok avantaj sunmaktadır. Özellikle kaynaklı birleşimlerin sonlu elemanlar veya sayısal yöntemlerle modellenmesinde, kaynak performansı ve yük altındaki davranışı tam olarak ifade edilememekte, imalat hatasından kaynaklanan etkilerin analizlere yansıtılması mümkün olamamaktadır. 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 imalat hataları, birleşimden beklenen davranışının dışında bir performans sergilemesine neden olabilmektedir. Yine bulonlu veya perçinli birleşimlerde 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 ölçülen şekil değiştirmeleri ve dolayısıyla elastik bölgede gerilme değerlerini ve dağılımlarını, şekil değiştirme ölçme sensörlerinde olduğu gibi tek bir noktada ve bir doğrultuda değil, birleşimin görüntülenen bütün kısmı için elde etmek mümkündür. Bu yöntem birleşim bölgesinde oluşan şekil değiştirmelerin veya yük altındaki deney örneğinin davranışının açıkça gözlenmesine imkân sağlamaktadır.

Görüntü yöntemleri kullanılarak şekil değiştirme veya gerilme ölçme yöntemi aynı zamanda laboratuvar testlerinin ekonomikliği açısından da birçok avantaja sahiptir. Şekil değiştirme sensörlerinin numuneye yerleştirilmesi zaman alıcı bir işlemdir ve ölçümler ancak her bir numune için bir noktada yapılabilir ve sensör sadece bir defa kullanılabilir. Buna karşın görüntü yönteminde şekil değiştirmeler sadece dijital resimlerin analizi yapılarak kolayca ve farklı parametreler için defalarca hesaplanabilmektedir. Ayrıca deney düzeneğinin kurulması şekil değiştirme sensörlerinin kullanıldığı deney düzeneği ile kıyaslandığında oldukça kolaydır. Görüntü yöntemleri ile şekil değiştirme analizleri aynı zamanda inşaat mühendisliğinin diğer birçok dalında da benzer amaçlar için başarıyla kullanılmaktadır [4-13].

Bu çalışmada, kaynaklı birleşim örneklerinin laboratuvarında çekme yüklemesine maruz bırakılmasıyla, birleşim noktalarında oluşan şekil değiştirme dağılımlarının ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hazırlanan birleşimlerde kullanılacak çelik malzemelerin seçimi ve birleşimlerin imalatı, şartname esaslarına göre yapılmıştır. Çelik malzemelerin seçimi ve malzeme parametrelerinin belirlenmesi için yapılan çelik çekme deneyleri, A370-05 [1] şartnamesine göre yapılmıştır. Kaynaklı birleşimler için AISI [2] ve "Structural Welding Code" [14]'de belirlenen esaslar dikkate alınmıştır.

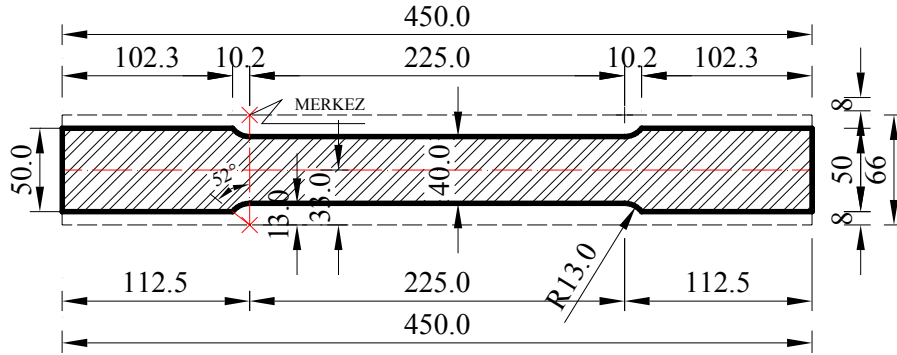
Birleşimlerin görüntü yöntemleriyle analizinden önce, yöntemin standart çelik çekme deneyinde geçerliliğinin ispatlanması gerekmektedir. Bu amaçla A370-05 [1] şartnamesine göre, kaynaklı birleşimlerde kullanılacak malzemelerden hazırlanan standart örnekler test edilmiştir.

Çekme deneyinde kullanılacak örnekler üzerine deneylerden önce şekil değiştirme sensörleri yerleştirilmiştir. Deney anında uygulanan çekme kuvveti, gerilme değerleri ve şekil değiştirme sensörlerinin alanından dijital görüntüler periyodik olarak kaydedilmiştir. Deneyler sonrasında, sensörler yardımıyla ölçülen şekil değiştirmeler ve dijital görüntülerden hesaplanan şekil değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Standart örnek deneylerinde ayrıca, kullanılan çeliğe ait malzeme parametreleri [Elastisite Modülü (E), Akma Gerilmesi ( $\sigma_y$ ) ve Kopma Gerilmesi ( $\sigma_u$ )] belirlenmiştir. Bu parametreler yapılacak olan çekme deneylerinden sonra hesaplanarak verilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan şekil değiştirme sensörlerinden elde edilecek şekil değiştirme değerlerinin görüntü yöntemlerinden elde edilen şekil değiştirmelerle kıyaslaması yapılmış, yöntemin avantajları şekil değiştirme değerlendirmeleriyle birlikte verilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada test edilmiş olan birleşimlerin imal edildiği çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla dokuz adet standart örnek hazırlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Standart örneklerin hazırlanmasında A370-05 [1] standardı referans alınmıştır. Bu standardın çekme deneyinde kullanılacak çelik malzeme için öngördüğü boyut kriterlerine göre hazırlanan örnekler Şekil 1'de görülmektedir. Standart örneklerin hazırlanmasında 5 mm kalınlıklı çelik levha kullanılmıştır. Çekme deneylerinde altı adet örnek üzerine şekil değiştirme ölçerler yapıştırılarak deney tabi tutulmuştur. Bu örnekler SG1, SG2, SG3, SG4, SG5 ve SG6 olarak isimlendirilmiştir.

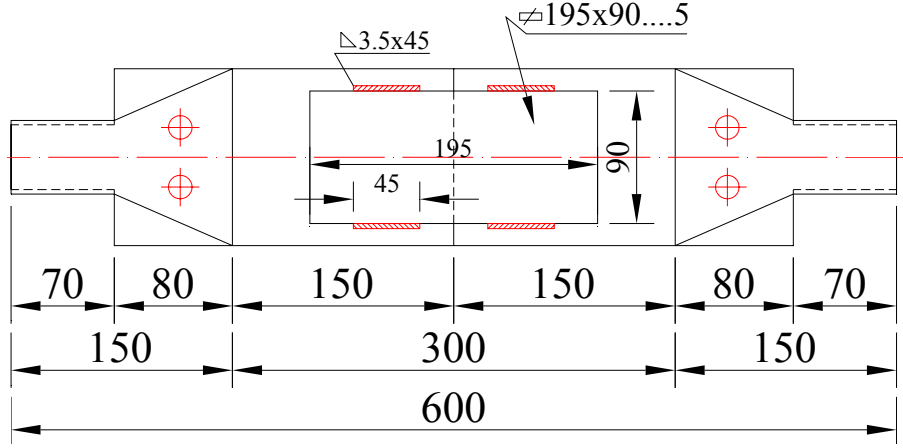
Deneylerde kullanılacak örneklerin görüntü alan kameralara bakan yüzleri, boya tutabilmeleri için, kumlama işlemine tabii tutulmuş, ayrıca gerekli kısımları zımparalandıktan sonra asetonla temizlenmiştir. İyice temizlenen örnekler sprey boya yardımıyla beyaza boyanmıştır. Sıcak hava fanıyla tamamen kuruması sağlanan örneklerin beyaz boyalı olan yüzlerine, görüntü işleme esnasında kullanılacak desenler, siyah renkli ahşap boyasının bir fırça yardımıyla serpiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Siyah ahşap boyasının fırça yardımıyla serpiştirilmesi; beyaz boyalı yüzey üzerinde oluşacak lekelerin tamamen rastgele desenler şeklinde oluşmasını sağlayarak, analiz yazılımının makro blokların görüntüleri arası takibine imkân sağlamaktadır.



Şekil 1. Standart örnek.

Standart örneklerin imal edildiği çelik malzeme ile bir kaynaklı birleşim tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleşimler, 90 mm genişlikli ek levhasının ana parçalara her iki yüzünden kaynaklanmasıyla imal edilmiştir. Hazırlanan kaynaklı birleşim Şekil 2'de görülmektedir.

Birleşimde, ek levhalarını ana parçalara birleştirmek için köşe kaynağı kullanılmıştır. 45 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. Birleşim içindeki 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.



Şekil 2. Kaynaklı birleşim örneği.

## 2.1. Standart Örnek Deneyleri ve Deney Düzenegi

### 2.1.1. Deney Düzenegi

Deneylerde 28 ton çekme/basınç kapasiteli SATEC System Inc. marka üniversal test cihazı kullanılmıştır. Bütün test örnekleri 0.074 mm/s sabit şekil değiştirme hızıyla yüklenerek çekilmiş, bu hız deney sonuna kadar sabit tutulmuştur. Cihazın örnekler üzerine uyguladığı kuvvet verileri, National Instruments marka kart üzerinden saniyede dört adet okunarak veri toplama sistemi aracılığı ile bilgisayar sabit diskine kaydedilmiştir.

Deneylerde iki adet SONY marka endüstriyel tip dijital kamera kullanılmıştır. Örneklerin deney sırasında yüksek çözünürlüklü (1024x768) dijital görüntülerini alan kameraların da içerisinde bulunduğu görüntü toplama sistemi şu şekildedir:

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

12 ve 16 mm odak uzunluklarına sahip lensler iki kamera üzerinde kullanıldığından teste tabi tutulan deney örneğinin aynı yüzünün iki farklı uzaklıktan görüntüleri alınabilmektedir. Kameralardan bir tanesi deney örneğinin bütününe görece şekilde konumlandırılmışken, diğeri sadece beklenen kopma bölgesine odaklanmıştır. Deneyler sırasında periyodik olarak her 2 saniyede bir alınan dijital görüntüler "bmp" formatında "image" ismi verilerek ve sıfırdan başlayarak devam eden numaralarla bilgisayar diskine kaydedilmiştir.

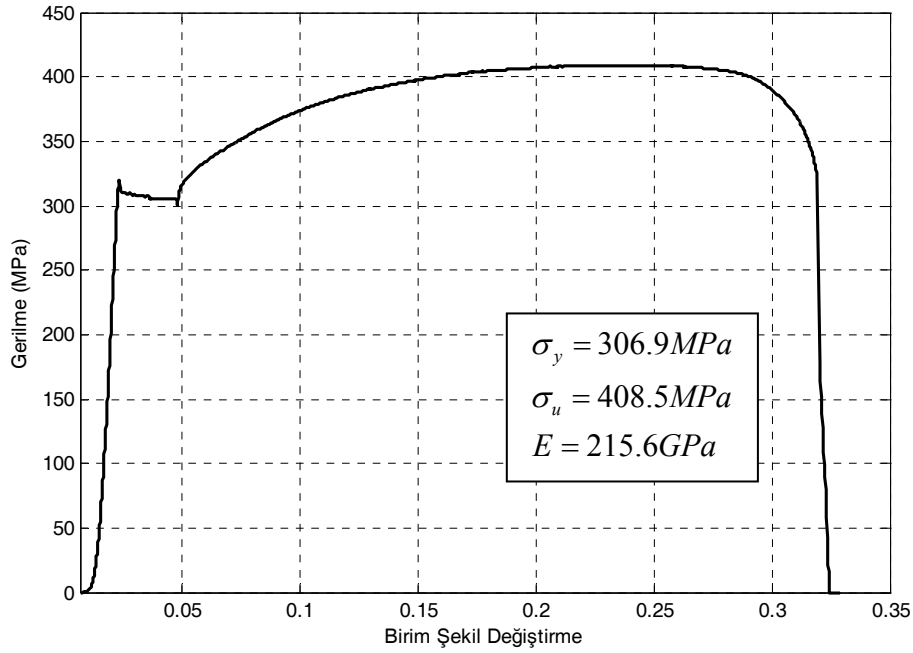
Deneyler sırasında çekme cihazının çeneleri arasındaki şekil değiştirme Lvdt cihazı yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Şekil değiştirme verileri de diğer veriler gibi saniyede dört adet olarak okunup veri toplama sistemi üzerinden bilgisayara aktarılmıştır.

Gerçekleştirilen standart tip deney örneklerinden altı adedine şekil değiştirme ölçer (Strain Gage) yapıştırılarak deneye tabii tutulmuştur. Şekil değiştirme ölçerler, örneklerin temizlenen arka yüzlerine yapıştırılmıştır. Diğer enstrümanlar gibi, şekil değiştirme ölçerlerin ürettiği veriler saniyede dört adet olarak okunup bilgisayara kaydedilmiştir. Okunan şekil değiştirme değerleri diğer verilerle birlikte, malzeme mekanik parametrelerinin belirlenmesi ( $E, \sigma_y, \sigma_u$ ) için kullanılmıştır.

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 floresan ışık kaynağı ile birlikte iki adet spiralli masa lambası kullanılmıştır. Işık kaynakları test edilen örnek ile görüntü alan dijital kamera arasına ve örnekten yaklaşık 20 cm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir.

### 2.1.2. Standart Örnek Deneyleri İçin Değerlendirme

Standart örneklerden SG1 örneğine ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Deney verileri kullanılarak hesaplanan akma gerilmesi, kopma gerilmesi ve elastisite modülü de şekil üzerinde verilmiştir. Hesaplanan bu veriler aynı malzemeyle imal edilmiş kaynaklı birleşim örneğinin bilgisayar ortamında hazırlanan sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır.



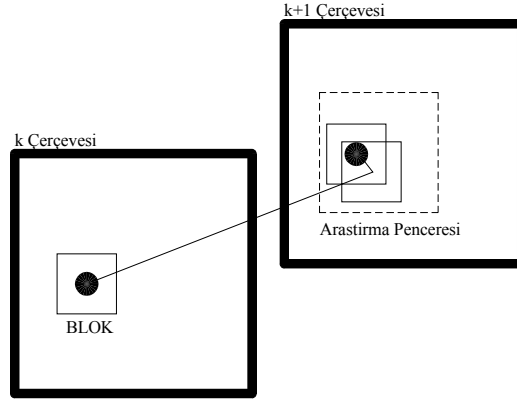
Şekil 3. SG1 örneği gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

### 2.1.3. Dijital Görüntülerden Şekil Değiştirmelerin Hesaplanması

#### 2.1.3.1. Blok Eşleme Metodu

Blok eşleme metodu, daha basit donanım gerektirdiği için bilinen en popüler ve pratik hareket izleme yöntemlerindedir. Bu yönüyle blok eşleme yöntemi, fazla işlem gücü gerektirmeksizin küçük ölçekli donanımlar yardımıyla, bütün H.261 ve MPEG 1-2 formatlarındaki görüntülerde hareket izleme işlemlerinde kullanılabilir. Blok eşlemede en iyi hareket vektörü yorumu piksel alanının araştırılmasıyla bulunur [15]. Blok eşlemenin temel mantığı Şekil 4'de tarif edilmektedir. Burada bir pikselin k çerçevesindeki şekil değiştirmesi,  $(n_1, n_2)$ , bu pikseli merkez

arak oluşturulan  $N_1 \times N_2$  boyutlu bloğun (k+1) karesinde aranması işlemi yapılmaktadır. Arama genel olarak sayısal sonuçlar için arama penceresi olarak tanımlanan bir  $N_1 + 2M_1 \times N_2 + 2M_2$  bölgesiyle sınırlı tutulur.



Şekil 4. Blok eşleme metodu.

Blok eşleme yöntemi eşleme kriteri, arama stratejisi ve blok boyutunun belirlenmesi gibi kriter ve stratejilere göre değişiklik göstermektedir. Blokların eşlenmesi farklı bir takım kriterler temel alınarak yapılabilir. Bunlar maksimum cross korelasyonu, minimum kare hatası (MSE), minimum ortalama mutlak fark (MAD) ve maksimum eşlenen piksel sayısı (MPC) gibi kriterler olabilir.

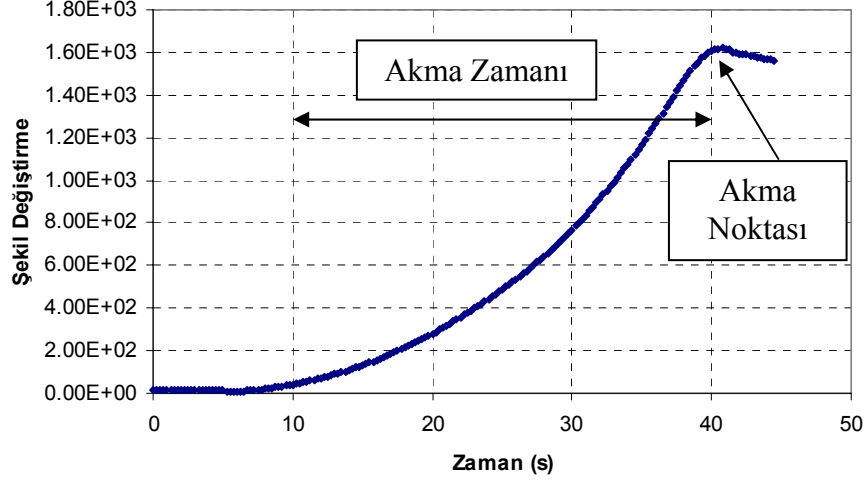
En iyi eşleşen bloğu bulma işlemi, her bir pikseldeki  $(n_1, n_2)$  deplasman vektörleri üzerinde eşleme kriterinin optimizasyonundan ibarettir. Bu her pikseldeki  $d_1, d_2$  değerlerinin tümü için eşleme kriterini değerlendiren ve oldukça zaman alan bir işlem akışıyla mümkün olmaktadır. Sayısal yükü 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 4'de bir arama penceresi görülmektedir. Sayısal yükü azaltmak amacıyla sıkça kullanılan diğer bir yöntem, piksellerin seyrek aralıklarında hareket vektörünü belirlemektir.

Tam bir optimizasyona götürmese de, yine de birçok durumda bütün alanın aranmasından daha hızlı sonuç veren arama stratejileri de kullanılmaktadır. Daha hızlı olan bu arama stratejileri **üç adım arama** ve **çapraz arama**dır.

### 2.1.3.2. Analiz Edilecek Görüntü Sayısının Belirlenmesi

Yüksek çözünürlüklü dijital görüntülerden şekil değiştirmelerin hesaplanabilmesi için, gerçek şekil değiştirme verisinin alındığı şekil değiştirme ölçer verilerine bakarak akma 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. Şekil değiştirme ölçer verilerinden anlaşılmıştır ki her üç örnek de yaklaşık aynı zaman süresinde (yaklaşık 30 s) akma noktasına ulaşmıştır. 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 şekil değiştirme ölçer verisinden elde edilen akma zamanına karşılık gelen toplam dijital görüntü sayısı hesaplanarak şekil değiştirme analizinde kullanılmıştır. Örneğin SG1 numunesi için akma süresinin deneyin başlangıcından itibaren 30 s olduğu Şekil 5'te görülmektedir. Önceki paragraflarda ayrıntıları verildiği üzere her iki saniyede bir dijital görüntü alındığı düşünülürse, şekil değiştirme analizi için toplam 15 adet dijital görüntünün kullanılmasının gerektiği açıktır.



Şekil 5. SG1 örneği şekil değiştirme-zaman grafiği.

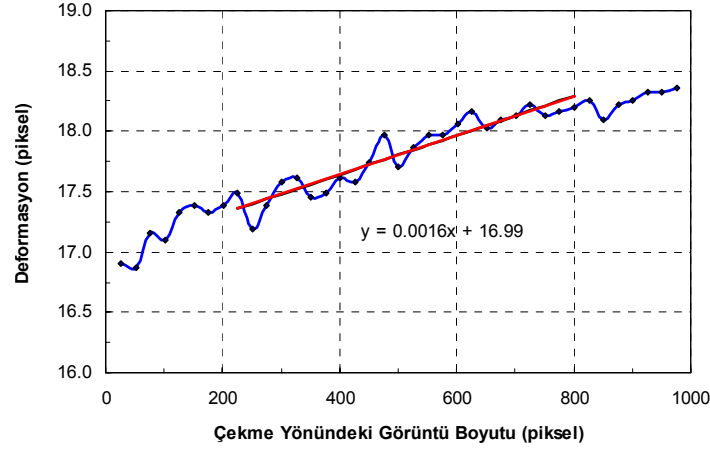
Yukarıdaki paragraflarda verilen teori çerçevesinde, deneylerde SG1 olarak isimlendirilen ve üzerinde şekil değiştirme ölçer yapıştırılarak deneye tabii tutulan örneğin şekil değiştirme analizleri, akma anına kadar alınan görüntüler kullanılarak yapılmıştır. Gerek görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme değerleri ve de gerekse şekil değiştirme ölçerlerin kaydettiği şekil değiştirme değerleri arasında yapılan karşılaştırmalardan elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

SG1, SG2 ve SG3 örnekleri için şekil değiştirme ölçerden ve görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme değerleri ve aralarındaki korelasyon Şekil 7'de verilmiştir. Çekme deneyine tabii tutulan standart örneklerden yalnız SG1 örneğine ait ayrıntılı veriler buraya alınmıştır.

SG1 örneğine ait görüntü alanı şekil değiştirme dağılımı ve bu dağılım için çizilen regresyon doğrusu Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da yatay eksen uygulanan çekme kuvveti yönündeki görüntü boyutunu temsil ederken, dikey eksen örnek üzerinde aynı düşeyde bulunan makro blokların toplam şekil değiştirmesini piksel cinsinden temsil etmektedir. Şekil 6'da verilen regresyon doğrusu örnek üzerinde yer alan şekil değiştirme ölçer bölgesi için verilmiştir. Regresyon doğrusunun eğimi örneğin akma anına kadar yapmış olduğu birim şekil değiştirme olarak okunabilir. Aynı örnek için görüntülerden elde edilen şekil değiştirme değerleri ile şekil değiştirme ölçer verisinin ayrıntılı karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir.

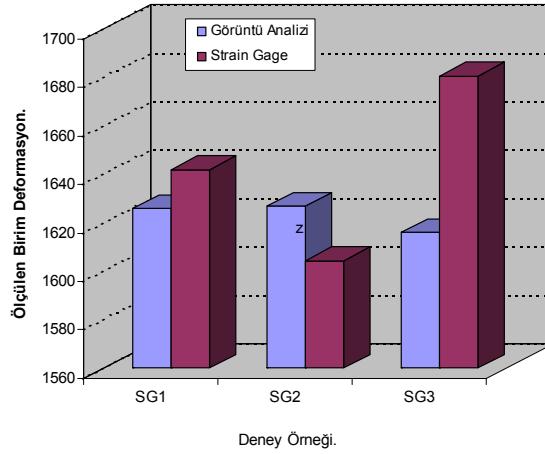
Şekil 7'nin dikey ekseninde, yatay ekseninde verilen örnekler için görüntü analizinden ve şekil değiştirme ölçerden elde edilen şekil değiştirmeler verilmiştir. Her iki şekil değiştirme ölçüm yönteminden elde edilen değerlerin birbirine kabul edilebilir oranda yakın olduğu görülmektedir. Deney sırasında SG1 örneği üzerinde bulunan şekil değiştirme ölçerden elde edilen şekil değiştirme değerlerinin dikey ekseninde, zamanın yatay ekseninde verildiği grafikte

(Şekil 5) deney örneğinin akma anındaki birim şekil değişimmesinin 0.0016 olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6. SG1 örneği şekil değiştirme grafiği.

Sonuç olarak görüntülerden hesaplanan şekil değiştirme değerleri gerçek değerlerine kabul edilebilir oranda yakındır. Dijital görüntü yöntemleriyle şekil değiştirme analizi laboratuvar çalışmalarında kullanılabilir.



Şekil 7. Görüntü analizinden ve şekil değiştirme ölçerden elde edilen şekil değiştirme değerleri arasındaki ilişki.

## 2.2. Kaynaklı Birleşim Deneyi

Birleşim deneylerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü dijital görüntüler blok eşleme metoduyla analiz edilerek birleşimlerin deney sırasında yapmış oldukları şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Görüntü analizleri için Matlab® programlama dili kullanılmıştır. Bu programlama dili içerisinde yazılan kodlar sayesinde, deneylerden elde edilen dijital görüntüler önce analize hazır hale

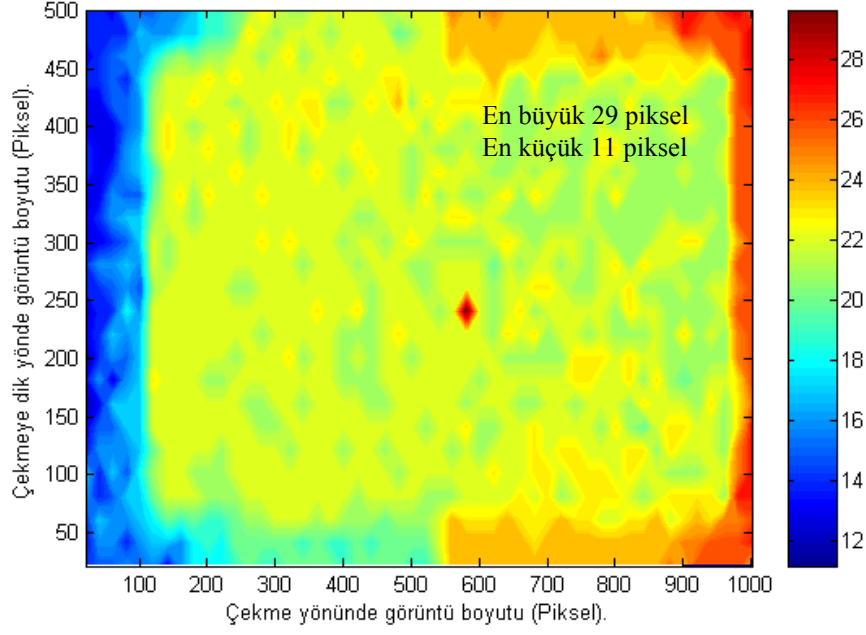


getirilmiş, daha sonra da analiz edilmişlerdir [3], [16]. Bu amaçla üç farklı Matlab® kodu yazılmıştır. Gereksiz kısımları asıl görüntülerden çıkarılmış deney görüntüleri artık analize hazır hale gelmiş olmaktadır. Görüntülerin analizi için yine Matlab® programlama dilinde hazırlanan *ccrc.m* isimli program kodu kullanılmıştır. Her program analizi yapılacak görüntüler için gerekli parametreler girildikten sonra çalışmaktadır. Hesaplanan şekil değiştirme vektörleri bir “txt” dosyasında toplamaktadır.

Elde edilen bu şekil değiştirme vektörleri kullanılarak, örneğe ait şekil değiştirme haritaları çıkarılmıştır. Şekil değiştirme vektör grafiği ile şekil değiştirme haritaları için *qplots.m* isimli Matlab® program kodu kullanılmıştır. Program analizden elde edilen ve “txt” dosyasında saklanan verileri kullanarak oluşturulan verilerden şekil değiştirme haritalarını üretmektedir. Şekil değiştirme haritaları, deney başlangıcından birleşimin akma anına kadar geçen süre zarfında birleşimin yaptığı toplam şekil değiştirme için hesaplanarak oluşturulmuştur. Birleşimlerin sonlu eleman çözümleri de birleşimin akma anına kadar yapıldığından şekil değiştirmelerin karşılaştırılabilirliği için görüntü analizlerinde de bu süre aralığı dikkate alınmıştır. İstendiği takdirde, aynı yazılımlar kullanılarak, deney başlangıcından bitimine kadar alınan görüntülerin analiz edilmesi, toplam şekil değiştirme değerlerinin hesaplanması ve bu değerler için şekil değiştirme haritalarının çizilmesi mümkündür.

Şekil 8’de kaynaklı birleşim örneğine ait çekme yönündeki şekil değiştirme dağılımı görülmektedir. Bu şekilde 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 olarak haritanın sağ tarafında bulunan şekil değiştirme çubuğundan okunabilir. Şekil 8’de görüldüğü üzere, haritanın sarı ve yakın tonları renklerle markalanmış bölümleri birleşimi oluşturan ek levhasını temsil etmektedir ve akma anına kadar ek levhasının yaklaşık 21-23 piksellik rijit bir ötelenme yaptığı rahatlıkla söylenebilir. Alt mesnet kısmı hareketsiz olduğundan şekil değiştirmeler, mavi bölgeyle temsil edilmekte ve toplam şekil değiştirmelerin sifıra 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 kopmasından 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. Ek levhasının ana parçaya göre daha büyük oranda ve üniform bir şekil değiştirme yapmış olması, yüklem sırasında kaynaklarda oluşan ani kırılmaların varlığına işaret etmektedir. En yüksek şekil değiştirmelerin görüldüğü sağ alt bölüm, birleşimin toptan geçmesine yol açacak kırılmanın bu bölgeden başlayacağını işaret etmektedir. Bir bütün olarak bu birleşimin 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 540x1024 piksel çözünürlük değerine sahiptirler. 540 piksellik görüntü genişliğinin örneğin kısa kenarına ait olduğu düşünülürse, 540 pikselin 120 mm uzunluğa karşılık geldiği ve 1 pikselin 0.2222 *mm* lik uzunluğa denk geldiği kolaylıkla hesaplanabilir. Bu durumda, şekil değiştirme haritasındaki en küçük şekil değiştirme değeri olan 11 pikselin,  $11 \times 0,222 = 2,44$  *mm* olacağı açıktır. Aynı şekilde şekil değiştirme haritasında açıkça okunabilen en büyük şekil değiştirme değeri olan 29 piksel de,  $29 \times 0,222 = 6,438$  *mm* olacaktır (Şekil 8).



Şekil 8. Kaynaklı birleşim örneği şekil değiştirme haritası.

### 3. BİRLEŞİM SONLU ELEMANLAR MODELİ

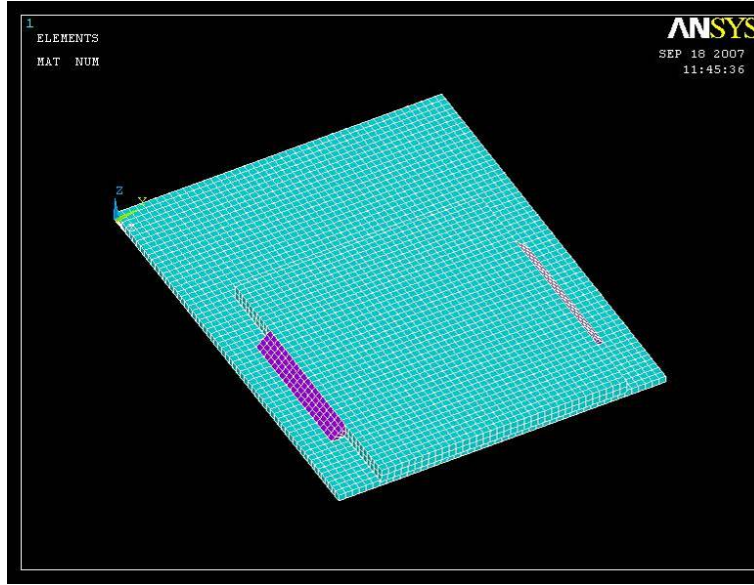
Bu çalışmada, çelik yapılarda kullanılan tipik kaynaklı birleşimlerde çekme yükleri altında oluşan şekil değiştirme değerlerinin ve bağlantı noktası civarındaki dağılımlarının dijital görüntü yöntemleri kullanarak ölçülmesi araştırılmıştır. Dijital görüntü yöntemleri kullanılarak hesaplanan şekil değiştirme değerlerinin, birleşime ait sonlu elemanlar modelinden elde edilen şekil değiştirme değerleriyle kabul edilebilir oranda yakın olması ve her iki yöntem kullanılarak elde edilen şekil değiştirme dağılımlarının da kabul edilebilir oranda benzerlik göstermesi çalışmanın hipotezini oluşturmaktadır. Bu bölümde kaynaklı bir birleşime ait sonlu eleman modelleri Ansys® programı yardımıyla oluşturularak birleşimlerin yapısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar modellerinden elde edilen şekil değiştirme değerleri ve dağılımları önceki bölümlerde verilmiş olan ve dijital görüntü yöntemleriyle elde edilen değer ve dağılımlarla karşılaştırılmıştır.

Birleşimlerde kullanılan çelik malzemenin gerçek davranışına olabildiğince yakın temsil edilebilmesi için, sonlu elemanlar modelinde elastik olmayan multi-lineer malzeme modeli kullanılmıştır. Bu modelde, akma gerilmesi  $\sigma_y = 300MPa$ , kopma gerilmesi  $\sigma_u = 400MPa$  ve bu gerilme değerlerine karşı sırasıyla %0.14 elastik birim uzama ve %25 kopma birim uzaması kullanılmıştır..

Kaynaklı birleşimlerde kaynak malzemesi model içinde ayrı bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Kaynak için akma gerilmesi üreticinin verdiği teknik bilgilerden,  $\sigma_y = 380MPa$ , kopma gerilmesi ise  $\sigma_u = 600MPa$  olarak seçilmiştir. Bütün modellerde standart çelik ve kaynak malzemesi için poisson oranı  $\nu = 0.35$  seçilmiştir.

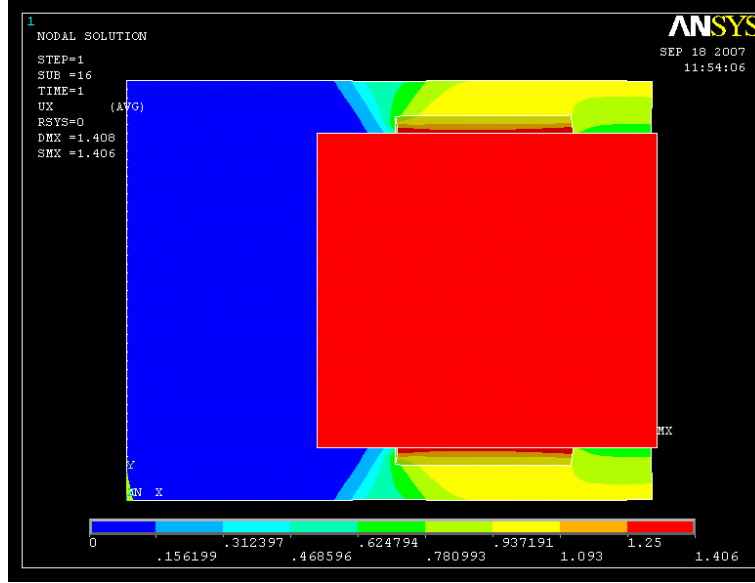
Kaynaklı birleşim olan KBD1 örneğine ait sonlu elemanlar modeli Şekil 9'da görülmektedir. Bilgisayar çözümlerinin daha hızlı yapılabilmesini sağlamak ve kullanılan programın sonlu eleman sayısı bakımından kapasite sınırını aşmamak amacıyla çözüm birleşimin

tamamıyla değil, simetrik yapısı kullanılarak 1/4 ü ile yapılmıştır. Modelde iki farklı renkle iki farklı malzeme temsil edilmektedir. Mavi renkle temsil edilen malzeme birleşim çeliğini göstermektedir (Şekil 9).



Şekil 9. KBD1 örneği sonlu elemanlar modeli.

Şekil 10'da sonlu elemanlar çözümünden elde edilerek verilen şekil değiştirme dağılımı ile Şekil 9'da verilen ve görüntü analizlerinden elde edilen birleşim gerçek şekil değiştirme davranışlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil değiştirme davranışları arasındaki en önemli farkın kaynak bölgelerinde ortaya çıktığı açık olarak görülmektedir. Sonlu elemanlar modelinde kaynak dikişlerinin kendi içerisinde oldukça üniform bir şekil değiştirme yaptığı görülmektedir. Gerçekte karşılaşılan ve birleşimin şekil değiştirme hareketinde ve toptan göçmesinde belirleyici olan kaynak dikişlerindeki ani kırılmalar sonlu elemanlar modeline alınmadığından, bu üniform şekil değiştirme davranışı bilgisayar modeli için kabul edilebilir bir durumdur. Oysa kaynak dikişlerinin birleşim nihai şekil değiştirmelerini de belirleyen gerçek davranışları, imalatta yakalanması çok mümkün olmayan homojen olmayan kaynak yapısına ve kontrol edilemeyen birçok imalat kusurlarına bağlıdır. Gerçek şekil değiştirme ve gerilme davranışında belirleyici faktörler olan bu ayrıntılar sonlu elemanlar modeline yansıtılmazken, birleşimin gerçek şekil değiştirme davranışını gösteren ve görüntü analizlerinden elde edilen şekil değiştirme haritalarından rahatlıkla ve tüm ayrıntılarıyla elde edilebilir (Şekil 8). Şekil 8'den örnek üzerindeki en büyük şekil değiştirme değerinin 6.438 mm olduğu görülmektedir. Oysa en büyük şekil değiştirme değeri sonlu elemanlar çözümünde 1.4 mm olarak kendini göstermektedir (Şekil 10). Sonlu elemanlar modelinde birleşim izotropik olarak modellendiğinden, kaynak dikişlerinin farklı bölümlerinde ve ani olarak ortaya çıkan kırılmaları sayısal modele aktarmak mümkün olamamaktadır. Oysa kaynak dikişlerindeki kırılmalar, birleşimin gerçek şekil değiştirme davranışının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle akma anına kadar ortaya çıkan en büyük şekil değiştirme değerleri arasındaki farkın makul olduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. KBD1 örneği şekil değiştirme dağılımı.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, dijital görüntü yöntemleri kullanarak çelik yapılarda kullanılan tipik birleşimler üzerinde oluşan şekil değiştirmelerin sağlıklı olarak ölçülebilmesi için bir yöntem geliştirilerek, yöntemin geçerliliğinin araştırılması ve bu yöntemle hesaplanan şekil değiştirmelerin sonlu elemanlar modellerinden elde edilen şekil değiştirmelerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Görüntü yöntemleriyle ölçülen şekil değiştirmelerin yeterince hassas olduğu bu çalışmadan elde edilen en önemli sonuçtur. Bu çalışmada, klasik şekil değiştirme ölçüm tekniklerinin yerini alacak bir yöntemden söz edilmemektedir. Klasik şekil değiştirme ölçüm yöntemleri ile kıyaslandığında birçok avantaja sahip olan dijital görüntü yöntemi ile şekil değiştirme ölçümü, klasik ölçüm cihazları ile birlikte kullanılmaları durumunda birbirini tamamlayan ayrı unsurlar olabilmektedir. Bu noktada görüntü yöntemleriyle şekil değiştirme ölçümünün diğer klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında çok önemli bazı üstünlüklerinin olduğu muhakkaktır. Buna göre;

- Klasik şekil değiştirme ölçümünde, şekil değiştirmenin kaynağı ile ilgili herhangi bir bilgi elde edilemezken, bu yöntemde şekil değiştirmeye neden olan unsurları izleyebilmek ve bu şekil değiştirmeleri 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 şekil değiştirme ölçüm yöntemlerinde deney örneğinin akmadan sonraki şekil değiştirmelerinin ölçümleri oldukça zordur. Belirli kapasite sınırlarında çalışan şekil değiştirme ölçer (strain gage ve ekstensometre

gibi) cihazlarının aksine görüntü yöntemlerinde şekil değiştirme tayini 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 şekil değiştirme 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, yüklemeye düzleminin dışında kendisinden beklenmeyen ve farklı ayrıntılara bağlı olan bütün şekil değiştirmeleri ölçülebilir. Bu da bütün deneyi tüm ayrıntılarıyla kayıt altına alma ve istenilen kayıttan şekil değiştirme analizi yapma imkânını vermektedir.

- Klasik şekil değiştirme 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.

Çalışmada ele alınan birleşimlerin sonlu elemanlar modelinden elde edilen şekil değiştirme sonuçlarının, görüntü yöntemleri kullanılarak elde edilen şekil değiştirme sonuçlarından, belirli ölçüde 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, birleşimin 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 zor, hatta neredeyse imkânsızdır. Kaynak dikişinin homojen olmayan yapısı birleşimin şekil değiştirme davranışında belirleyici bir faktördür. 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 birbirini tamamlar nitelikteki bu verilerin daha sağlıklı değerlendirilmesi açısından son derece önemlidir.

## KAYNAKLAR

- [1] ASTM, A370-05 (2005), Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, American Society for Testing and Materials, USA.
- [2] 2002 Edition of Cold-Formed Steel Design Manual AISI, American Iron and Steel Institute, Newyork, 2002
- [3] Arifoğlu, A., Matlab® Simulink ve Mühendislik Uygulamaları, Alfa yayınları 1637, Bilgisayar dizisi 315, 1. Basım, İstanbul, 2005
- [4] Aydilek, Ahmet H., Güler M., Edil Tuncer B., "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, 2004.
- [5] De Roover, C., Vantomme, J., Wastiels, J., Taerwe, L., "Deformation Analysis of a Modular Connection System by Digital Image Correlation.", ProQuest Science Journals Experimental Techniques, Nov/Dec 2002: 26,6, 2002

- [6] Donohoe, Gregory W. and Bocabella, Micheal F., "Segmentation and Object Tracking for the Microstructure Analysis of Soil," IEEE, Vol. 1-2, No.25:1215-1219, 1991
- [7] Frost, J. D. and Kuo, C. Y., "Automated Determination of the Distribution of Local Void Ratio from Digital Images", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No. 2:107-117, 1996.
- [8] Güler, M., Edil, Tuncer B., Bosscher, Peter J., "Measurement of Particle Movement in Granular Soils Using Image Analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, 13(2): 116-122, 1999.
- [9] Hryciw, R. D. and Raschke, S. A., "Development of a Computer Vision Technique for in-situ Soil Characterisation," Transportation Research Record, 1526: 86-97, 1996a.
- [10] Hryciw, R. D., Raschke, S. A. and Donohoe, Gregory W., "Micro-Deformations in Sands by Digital Image Processing and Analysis", Transportation Research Record, 1548: 31-37, 1996b.
- [11] Macari J. E., Al-Shibli, K. and Sture, S., "Digital Imaging Techniques for the Assessment of Homogeneity of Granular Materials", Emerging Technologies in Geotechnical Engineering, Transportation Research Record No. 1526:121-128, 1996.
- [12] MCenteggart, I., 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, 1995.
- [13] Spyrou, S. , Davision, J.B., "Displacement Measurement in Studies of Steel T-Stub Connections.", Journal of Constructional Steel Research 57 (2001): 647-659, 2001.
- [14] Structural Welding Code:Steel Ansi/Aws D1.1-96, Strucrural Welding Code for Steel, Aws Committee on Structural Welding, American Welding Society, Newyork, 1996.
- [15] Tekalp, M., Digital Video Processing, Prentice Hall, First Edition, Upper Saddle River, NJ, 1995.
- [16] Yüksel, İ., Matlab® ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü, Uludağ Üniversitesi güçlendirme vakfı yayın no:167, Genişletilmiş ikinci baskı, Bursa, 2000.