

Çarpılma Kuvvetleriyle Kaynak Sırasının Optimizasyonu ve Çeşitli Uygulamaların Değerlendirilmesi

Yusuf ÖZÇATALBAŞ*¹

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Beşevler-Ankara

Geliş tarihi: 11.01.2016

Kabul tarihi: 30.03.2016

Özet

Bu çalışmada, kompleks kaynaklı birleştirmeli konstrüksiyonların imalat sürecinde ve sonrasında oluşabilecek çarpılmaların belirlenmesi için yeni bir metot geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Kaynaklı birleştirme sürecinde çarpılma kuvvetlerinin ölçülmesi esasına dayanan bu yöntemin uygulanması ile karmaşık kaynaklı yapıların kaynak sıralarının (KS) optimizasyonu yapılabilmektedir. Yöntemin esası, rijit bir kafes hücre içerisine yerleştirilmiş konstrüksiyon modeline uygulanan kaynak sıralarının meydana getirdiği çarpılma kuvvetlerinin ölçülmesine dayanır. Üç boyutlu ölçülen kuvvetlerin yönleri ve şiddetlerine bağlı olarak çarpılma eğilimleri belirlenebilir. Çeşitli KS uygulamalarından elde edilen kuvvetlerin sayısal değerleri kullanılarak yapılan analizlerle çarpılma formları oluşturulabilir. Kaynaklı konstrüksiyonlarda en uygun kaynak sıralarının belirlenmesi ve minimum çarpılma/kalıntı gerilme oluşturulması açısından uygun bir metot olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaynaklı konstrüksiyon, Çarpılma, Çarpılma kuvvetleri, Kaynak sırası

Optimization of Welding Sequence by Distortion Forces and Evaluation of Some Applications

Abstract

In this study, a new method has been developed to determine the distortion tendencies of welded structures, by means of distortion forces, caused by welding process in complex welded structures. During welding process, optimization of complex welding procedures can be done with this method based on measuring of distortion forces. For this purpose, a rigid lattice frame and load cells (LCs), which takes the distortion forces in the welded structures, were designed. Distortions in the some samples, which occur at the welding of connection points, were obtained as forces by means of LCs. Distortion tendencies can be determined depend on direction and intensity of measured forces in 3D space. By using the numerical value of the force obtained from the various welding sequence (WS) applications, representative distortion forms can be created. The method can be used to determine the most appropriate WS and minimal distortion/residual stress in welded structures.

Key words: Welded structure, Distortion, Distortion forces, Welding sequence

* Sorumlu yazar (Corresponding author) : Yusuf ÖZÇATALBAŞ, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Beşevler-Ankara
yusufoz@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

Geleneksel tasarım metotları, kaynaklı yapıların boyutsal kontrolünü ve yapısal düzgünlüğüne kaynak işleminin etkilerini değerlendirmek için ya deneysel teknikler kullanır veya ihmal edilir. Yapı performansı üzerine kaynak etkilerinin değerlendirmesini yapmak ve kaynak çarpılmalarını minimize etmek veya kontrol etmek amacıyla, kaynaktan dolayı oluşan çarpılmaları belirlemek için bir metodoloji uygulamak gereklidir.

Kaynak sebepli çarpılmanın değişik tiplerini kontrol etme ve azaltma tekniklerini bilinmektedir. Gemi yapımında, demir yollarında, havacılık ve otomobil endüstrisinde sıklıkla kullanılan ince kesitli yapılarda burkulma (buruşma) çarpılması genel bir çarpılma tipidir. Bu tip çarpılma olduğunda, çarpılma eğilimlerinin şiddeti çok fazla olabilir. Daha da önemlisi burkulma düzensizlikleri, kaynaklı yapıların yapısal bütünlüğünü azaltır. Tahmin analiz ve araçlarının kullanımı, değişik çarpılma tipleri için hassas bir tasarım belirleyebilir ve çarpılmayı minimize edebilecek üretim prosesleri ve geometrik biçimlerin seçimine yardımcı olabilir [1,2].

Son zamanlarda, kaynak çarpılmasının kontrolü belirli şartlar altında gerçekleştirilen deneysel verilerin kullanımıyla gerçekleştirilir. Geometrik faktörler ve değişik kaynak işlemlerinin etkilerini parametrelerle ifade eden bir ilişki geliştirmek için deneysel sonuçlar kullanılır ve sonra kabul edilebilir yapıların üretimi için izin verilen kaynak prosedürleri belirlenir [3]. Bu tip deneysel olarak türetilmiş kriterler yalnızca test edilen kaynak şartları ve geometrik konfigürasyonlar için uygulanabilir. Modife edilen geometri ve şartları değerlendirmek için ilave testler gerekir. Masubuchi, burkulmaya duyarlı kaynak şartlarının değerlendirilmesi için basitleştirilmiş yakın formulu analitik çözümler sunmuştur. Fakat bu çözümler yalnızca basitleştirilmiş geometriler için uygulanabilmektedir.

Yirmi yılı aşkın süredir, kaynak sebepli oluşan kalıntı gerilmeleri ve çarpılmaları belirlemek amaçlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır

[4-6]. Aynı analizle yapılan son gelişmeler ise, faz dönüşümlerinin kalıntılarını ve plastisite dönüşümlerini içermektedir [7-10]. Bu simülasyon çalışmalarının çoğunluğu, kaynak dikişinin hemen bitişik alanında, basit yapısal parçalardaki kalıntı gerilme, bölgesel çarpılma ve mikroyapı araştırmalarına odaklanmıştır [11-14].

Brown ve Sonng [15], kaynak bölgesi ve yapısı arasındaki etkileşimin toplam çarpılma miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermiştir. Çoğu durumlarda gerilme ve çarpılma durumuna yapının katkısı hakimdir ve bu durum yalnızca kaynak bölgesinin simülasyonu ile belirlenenden çok daha farklıdır. Bazı çarpılma modelleri, özellikle boyuna gerilmeler sebebiyle oluşan burkulma (buckling), kaynak doğrultusuna dik düzlem içindeki iki boyutlu modeller yoluyla tanımlanamaz. Bununla birlikte kompleks yapıların termo-mekanik kaynak simülasyonlarını yapmak için üç boyutlu bir modelin oluşturulması kullanışsız ve analitik çözümü engelleyicidir [16].

Literatürde ki çalışmaların çoğu, özel konstrüksiyonlarda karşılaşılan çarpılma problemlerinin çözümüne yönelik kaynak sıralarının sunulmasına veya çarpılmaya ilgili temel deneysel verilerden elde edilen sonuçların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesine yöneliktir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda kullanılan yöntem ise, bir konstrüksiyona uygulanan kaynak sırasının meydana getirdiği çarpılmaların belirli doğrultularda boyutsal değişimi çeşitli mekanik, elektronik veya optik cihazlarla ölçülmesini içerir [17-21]. Ancak, çarpılma sebepli boyutsal ve geometrik sapmaların ölçüm hassasiyeti, çarpılmanın analizinin hassasiyetini de etkiler. Bu sebeple, konstrüksiyonun belirli bir bölgesine uygulanacak kaynak işleminin meydana getireceği çarpılmanın sınır şartlarının doğru ve yeterli hassasiyette belirlenmesi, çarpılma analizlerinin doğruluk derecesini de arttıracaktır.

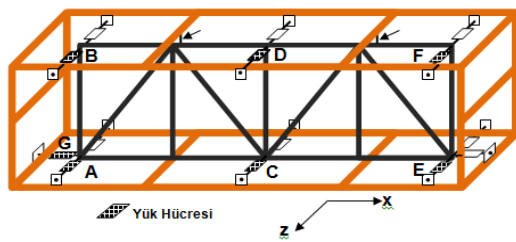
Bu çalışmada, özellikle karmaşık ve yoğun kaynaklı birleştirmeler içeren konstrüksiyonlarda oluşabilecek çarpılma eğilimlerinin, çarpılmaya sebep olan kuvvetlerin ölçümüyle belirlenmesi amaçlanmıştır [22,23]. Her tür kaynaklı

konstrüksiyonun belirli ölçekte küçültülmüş bir modelinin veya gerçek boyutlardaki prototipinin rijit bir kafes içerisine yerleştirilerek, uygulanan bir kaynak sırası veya kaynak yönteminin oluşturacağı çarpılma eğilimlerinin, üç boyutlu olarak ölçülebilmesi için bir sistem hazırlanmıştır. Geliştirilen sistemin uygulanabilirliği kafes kiriş üretimi sırasında oluşan çarpılma etkileri tartışılarak açıklanmıştır.

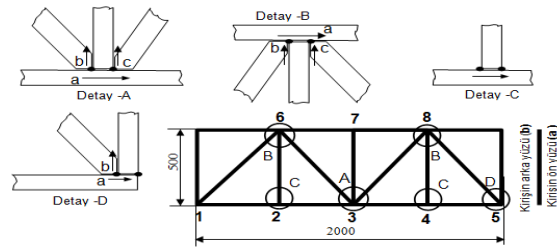
2. DENEY METODU

2.1. Yük Hücresi (YH)

Kaynaklı birleştirme sürecindeki ısıl genişlemeler ve birleştirme tamamlandıktan sonra soğuma sürecindeki çarpılma kuvvetlerini (kendini çekme kuvvetlerini) belirlemek için gerinim ölçerli yük hücreleri (YH) kullanılmıştır. 175x22x0,5 mm boyutlarındaki ve SAE1080 kalitesinde çelik sac, YH malzemesi olarak kullanılmıştır. Boyuna (eksenel) doğrultudaki gerinimi ölçmek için 2 adet ve bu doğrultuya dik gerinimi ölçmek için de 2 adet gerinim ölçer kullanılarak tam Wheatstone köprüsü kurulmuştur. Bu sayede, sıcaklık değişimlerinin YH'lerin ölçüm hassasiyetine etkileri minimize edilmiştir. Ayrıca, kaynak işlemi sırasında gerinim ölçerler ve devrelerin zarar görmemesi için YH'ler, ince kesitli ara bağlantı parçasıyla kirişe bağlanmış ve kuvvet algılayıcı plakaların yüzeyleri silikon kaplama malzemesi ile kaplanmıştır. Hazırlanan 7 adet YH'lerin her biri sabit ağırlıklar kullanılarak kalibre edilmiştir [23].



a) Rijit kafes içine konumlanmış kafes kiriş



b) Kafes kiriş ve düğüm noktalarına uygulanan kaynak yolları

Şekil 1. Çarpılma kuvvetleri ölçüm düzeneği ve örnek kafes kiriş kaynak yolları

2.2. Çarpılma Kuvvetinin Ölçülmesi

Şekil 1'de, karşılık plakaları ve YH'ler arasında yerleştirilmiş numune bir kafes kirişin x ve z doğrultularında ön germe kuvvetiyle yüklenmiş konumu görülmektedir. Numune kafes kiriş, rijit kafes tavanına iki noktadan asılarak (oklarla gösterilmiştir) yerleştirilmiştir. Hazırlanan YH'ler, kafes kiriş ile rijit kafes arasında 7 noktadan bağlanmıştır. YH'lerin yerleştirildiği konumların eksenleri doğrultusunda kafes kirişin diğer yüzeylerine karşılık plakaları bağlanmıştır. Bu sayede numune kiriş, gergi vidaları vasıtasıyla gerilerek YH'ler üzerinde belirli miktarda çekme gerilmesi oluşması sağlanmıştır. Yük hücrelerindeki ön germe sayesinde, YH plakalarında 200 N basma kuvvetine kadar meydana gelebilecek flambaj etkisi giderilmiştir. YH'lerde meydana gelen çekme veya basma kuvvetleri 0,4 N hassasiyette algılanabilmektedir. Deneyler sırasında, YH'lerde algılanan öngerme kuvvetleri sıfıra eşitlenmiştir [23].

Yapılan çalışma, kaynak işlemi ile kafes kirişte meydana getirilen çarpılma eğiliminin yük hücrelerinde oluşturduğu basma veya çekme kuvvetlerini ölçme prensibine dayanmaktadır. A, B, C, D, E ve F harfleri ile gösterilen YH'ler, deney numunelerine dik yerleştirilmiş (z eksenine doğrultusunda) ve numunede oluşacak yanal çarpılma eğilimini belirlemek için kullanılmıştır. G yük hücresi ise, kafes kirişin boyuna eksenine doğrultusunda yerleştirilmiş (x eksenine doğrultusunda) ve numunenin boyuna çarpılma eğilimlerinin tespiti için kullanılmıştır.

Rijit kafes içine yerleştirilen 30x500x2000 mm boyutlarındaki kiriş için 30x30x1,2 mm kare profil boru kullanılmıştır. Bu çalışmada çelik yapılarda yaygın olarak kullanılan kafes kiriş bir numunenin kaynaklı birleştirilmesi sırasında en uygun kaynak sırasının belirlenmiştir. Özellikle otobüs şase ve kasasında oluşan geometrik sapmalar, boyutsal değişimler, şase üzerine monte edilecek üst elemanların uyumunda yaşanan problemler ve aşırı kalıntı gerilmelerin meydana getirdiği yorulma çatlakları vb. olumsuz etkiler bu kirişin çalışma sebebini oluşturmuştur. Şekil 1’de, kafes kirişe bağlanan ve z ile x doğrultusunda çarpılma

kuvvetlerini ölçen yük hücreleri ve kodları (A dan G ye kadar) ile düğüm noktalarına uygulanan kaynak yolları detaylıca gösterilmiştir. Çizelge 1’de ise kirişin sekiz adet düğüm noktasının ön ve arka yüzeyine olmak üzere toplam 16 adet kaynak yolunun kaynak sıraları gösterilmiştir. Kirişin “a” yüzeyi YH tarafı olan ön yüzey, “b” yüzeyi ise gergi levhasının bulunduğu arka yüzeydir. Çizelge 1 ve Şekil 2’de gösterilen KS-1, kiriş merkezinden başlanan ve arkalı-önlü karşılıklı ve yanlara doğru çapraz yürütülen kaynak sırasını temsil eder. KS-2 ise, çift yönlü karşılıklı ve karışık tip KS örnekleme içerir [22].

Çizelge 1. Kafes kirişin kaynağında uygulanan kaynak sıraları

Kaynak Sırası	Kaynak Sayısı															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Kirişin düğüm noktası ve kaynaklanan yüzeyi															
KS-1	7a	7b	3a	3b	6a	6b	4a	4b	2a	2b	8a	8b	1a	1b	5a	5b
KS-2	6a	5b	1a	8b	3a	4b	7a	2b	6b	5a	1b	8a	3b	4a	7b	2a

3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

3.1. Kafes Kiriş Kaynak Sırası Uygulaması

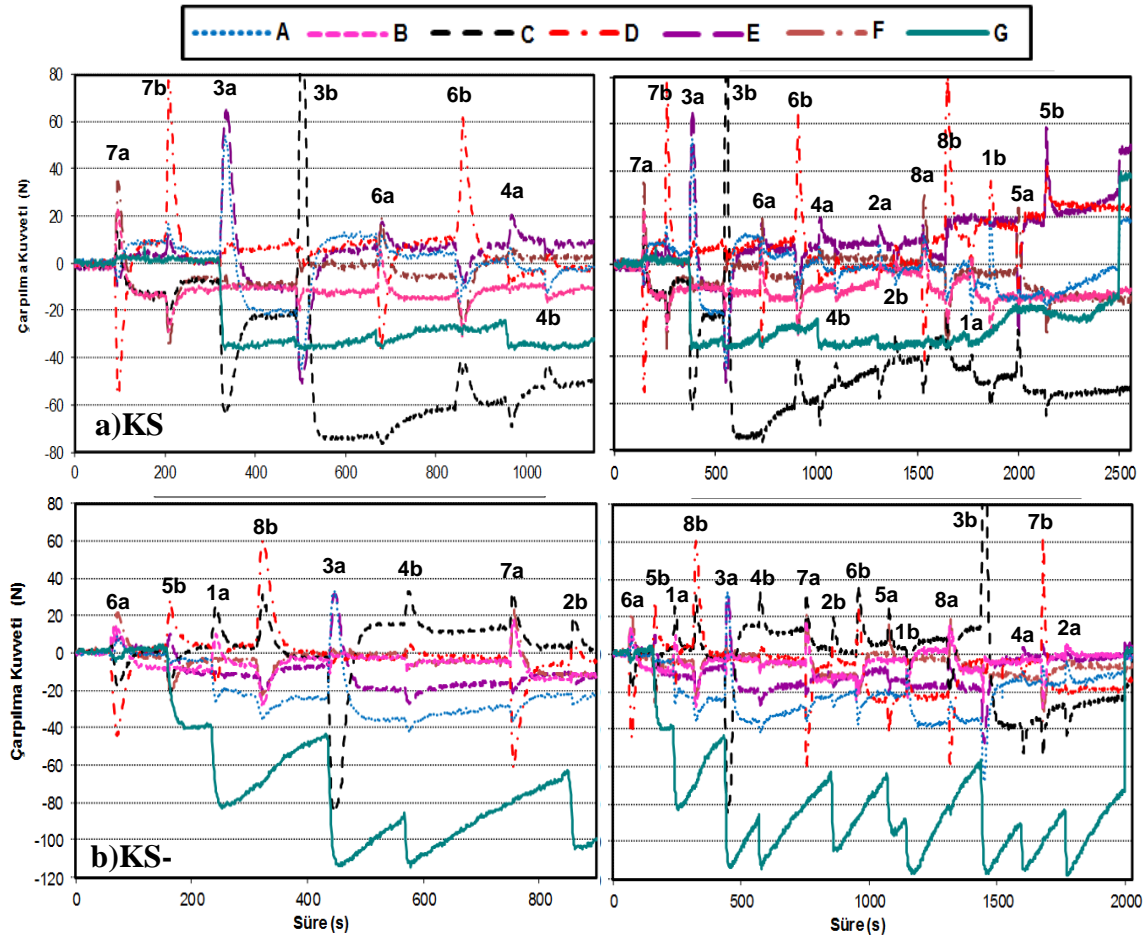
Şekil 2a’daki ilk grafikte, KS-1 uygulamasının ilk 1200 s’lik süresi gösterilmiştir. Punta ile birbirine bağlanmış kafes kirişin ilk birleştirme kaynağı orta dikmenin üst ucu ön yüzeyine (7a) yapılırken, D noktası yaklaşık 55 N’luk kuvvetle basma ile z yönünde deformasyona zorlanırken B, C ve F noktalarındaki YH’ler çekmeye maruz kalmış yani bu noktalar z’ yönünde deformasyona zorlanmışlardır. Soğuma sürecinde ise, tamamen ters yönlere zorlanan bu noktalarda yaklaşık 10 N’luk kalıcı çarpılma kuvvetleri meydana gelmiştir. Devamında 7b kaynağı uygulanırken oluşan ısıl genişleme etkisiyle belirtilen noktalarda tamamen ters yönde kuvvetler meydana gelmiş ve soğuma sürecindeki çekme etkisiyle D noktasındaki kuvvet dengelenerek yaklaşık sifıra eşitlenmiştir. Ancak B, C ve F noktaları, 10N civarında kalıcı basma kuvveti ile z yönünde deformasyona zorlanmıştır. Grafikte 3a ile gösterilen ve kirişin 3 nolu düğüm noktasının ön yüzeyinde (C yük hücresi) yapılan kaynak işlemi sırasında ise, C noktası 62 N basma kuvveti ile z

yönünde, A ve E noktaları ise zıt yönde sırasıyla 55 N ve 65 N kuvvetlerle çekilmeye zorlanmaktadır. Kirişin 3 nolu düğüm noktasında soldan sağa doğru E noktasına yönelen kaynak yolu (Şekil 1, Detay-A) sebebiyle E noktasındaki çekme kuvveti A dan daha fazladır. Bu noktada kirişin boyuna doğrultuda yaklaşık 40 N ile basıldığı yani kaynak sürecinde genişlediği görülmektedir. Soğuma süreci sonunda ise D noktası hariç kirişin diğer bütün noktalarında kalıcı basma etkisiyle z yönünde deformasyon belirlenmiştir. Aynı düğüm noktasının diğer yüzeyine yapılan kaynak işlemi ile oluşan kuvvet değişim pikleri 3b ile gösterilmiştir. Kaynak işlemi sırasında C noktası 80 N’u aşan kuvvetle z’ yönünde çekilirken, soğuma sürecinde bu noktada yine 80 N’a yakın kalıcı basma kuvveti ile z yönünde deformasyona zorlanmıştır. 3b kaynağının ilerleme yönünde olan kirişin A noktası dışındaki diğer noktalarda belirgin bir çarpılma eğilimi görülmemiştir. Kirişin 6a dikiş ile hemen her noktada stabil kalan çarpılma kuvvetlerinde, 6b dikişi ile sadece C ve D noktalarında kaynak sırasında belirgin çarpılma eğilimi meydana gelmiş ancak soğuma sürecindeki tersinir etki ile minimize edilmiştir. KS-1 uygulamasındaki her bir kaynak işlemi sırasındaki genişleme etkisinin ve soğuma sürecindeki kendini

çekme kuvvetlerinin meydana getirdiği çarpılma eğilimleri detaylıca açıklanmıştır.

KS-1 uygulamasının tamamının meydana getirdiği etkiler ise Şekil 2a'daki ikinci grafikte genel olarak gösterilmiştir. Burada, KS-1 uygulamasındaki 16 adet kaynak yolunun uygulanması sırasında ve birleştirme sonunda kafes kirişte meydana gelen çarpılma kuvvetleri hakkında genel bir bilgi vermektedir. Kafes kirişin uçlarında olan 1 ile 5 ve kaynak miktarı az olan 2 ile 4 numaralı düğüm noktalarının kaynağı sırasında oluşan çarpılma kuvvetleri minimumdur. Ancak yoğun kaynak içeren 3 ile 6 ve 8 düğüm noktalarında ve özellikle

kiriş ortasındaki 7 nolu düğüm noktasında durum tersinedir. Birleştirme tamamlandıktan sonra kafes kirişte meydana gelen kalıntı çarpılma kuvvetleri ise 2500 s sonrasında görülmektedir. C noktasındaki YH tarafından yaklaşık 55 N'luk z yönünde basma kuvveti oluşurken, sırasıyla F ve P noktalarında ise daha düşük (12 ve 17N) basma kuvvetleri mevcuttur. Ayrıca E noktasında en fazla (50N) olmak üzere, sırasıyla G, D ve A noktalarında daha az kalıcı çekme kuvvetleri mevcuttur. Kirişte mevcut kalıntı kuvvetler değerlendirildiğinde, alt başlık boyunca dış bükey, üst başlık iç bükey ve ciddi miktarda boyuna çekme etkisiyle çarpılma eğilimindedir.

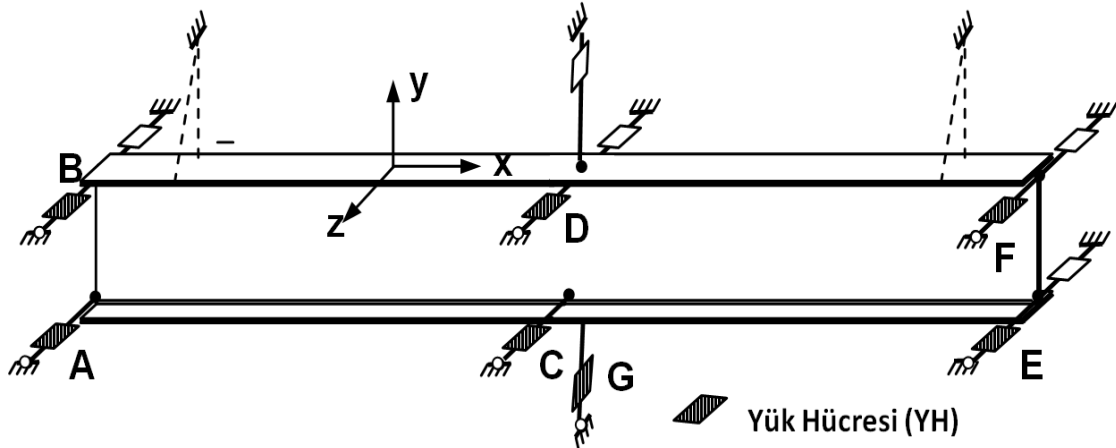


Şekil 2. Kafes kirişe uygulanan kaynak sıraları ve çarpılma kuvvetleri ilişkisi

Şekil 2b de gösterilen KS-2 uygulamasında ise, kirişin 6 numaralı düğüm noktasının ön yüzeyinde (6a) yapılan kaynak işlemi sırasında D noktasında önemli miktarda basma etkisi ile z yönünde deformasyona zorlanmıştır. Ancak diğer ölçüm noktalarında da olduğu gibi soğuma sürecinde bu kuvvetler minimize olmuştur. 5b ve 1a kaynaklarında da benzer etkiler meydana gelmiştir. Ancak, bu iki kaynak adımında da kirişin boyuna doğrultuda kaynak sırasında önemli basma etkileri yani kirişin genişleme etkisi soğuma sırasında ise belirgin çekme etkileri görülmektedir. Özellikle kirişin alt düğüm noktalarında yapılan kaynak işlemlerinde (5b, 1a, 3a, 4b ve 2b) boyuna doğrultudaki genişlemenin etkileri daha belirgindir. 3a kaynağı sürecinde C noktasında önemli basma, A ve E noktalarında çekme kuvvetleri oluşurken, soğumada ise ters yönde önemli miktarda kalıcı kuvvetler meydana gelmiştir. Genleşme ve büzülme sürecinde oluşan bu etkiler, tamamen

kirişin ağırlık merkezi boyuna eksenine uygulanan moment etkisi ile meydana gelmektedir.

Şekil 2b’de dikişin KS uygulamasının tamamını içine alan ikinci grafikte ise, kaynak işlemi tamamlanan kafes kirişte meydana gelen kalıntı çarpılma kuvvetleri görülmektedir. Son kaynak işlemi olan 2a uygulamasında da kaynak sırasındaki genişleme sebebiyle YH’de belirgin bir basma etkisi oluşmuş, ancak kirişin tamamının ortam sıcaklığına düşmesi sonunda bu kuvvette minimize olarak sıfırlanmıştır. Genel olarak KS-2 de kirişin C ve D noktalarında minimal düzeyde basma etkisi yani z yönünde deformasyon eğilimi mevcuttur. Çift yönlü karşılıklı ve karışık tip kaynak işlemlerinin uygulandığı bu kaynak sırasındaki çarpılma kuvvetlerinin ve dolayısı ile çarpılma eğilimlerinin bir önceki KS-1 uygulamasından çok daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Örnek I kiriş çarpılma kuvvetleri ölçüm deney düzeneği

3.2. I Kiriş Kaynak Sırası Uygulaması

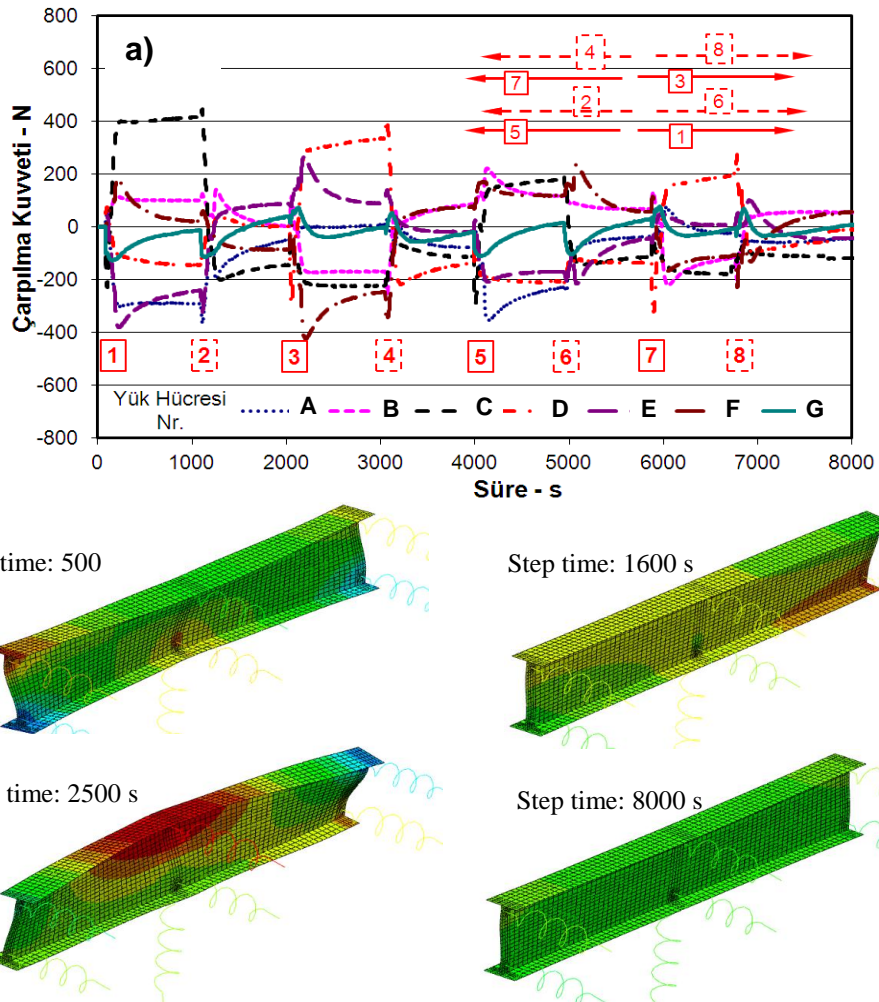
Şekil.3 de, farklı boyutlarda tasarıma özel olarak kaynaklı birleştirme ile üretilen I kirişlerin kaynak sıralarını optimize etmek için kullanılan yük hücresi yerleşim düzenleri gösterilmiştir. I kirişin merkezinde başlanıp uçlarında sonlandırılan kesikli-karşılıklı-çapraz sekiz adet kaynak sırası içeren KS-8 uygulamasına ait sonuçlar Şekil 4a’da verilmiştir. Gayet net olarak görülmektedir ki, grafikte gösterilen kaynak sırası uygulamasındaki

her bir kaynak işlemi sırasında çarpılma kuvvetleri şiddetle artmakta, soğuma sürecinde ise kalıntı kuvvetler ya azalmakta veya stabil kalmaktadır. Bir sonraki kaynak işleminde ise, önceki kaynak işleminin oluşturduğu kuvvetlerin tersi kuvvetler oluşmakta bir önceki kaynağın çarpılma etkisi nötrlenmekte veya ters yönde çarpılma eğilimleri oluşmaktadır. Dolayısıyla, uygulanan her kaynak işlemi sonunda oluşan çarpılma eğilimleri bir sonraki kaynak işlemi ile dengelenmiştir. Son birleştirme işlemi sonunda oluşan kalıntı çarpılma

kuvvetleri minimal düzeydedir ve ihmal edilebilecek miktarda açılma çarpılma eğilimi görülmektedir.

Şekil 4b’de ise, deneysel ölçümler neticesinde elde edilen kuvvet değerleri kiriş üzerindeki yay eleman bağlantılarına uygulanarak elde edilen sonlu elemanlar analizi gösterilmiştir. Çalışmanın sonlu elemanlar ile modellenmesi Abaqus kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde toplam 2550 quaratic shell eleman bulunmaktadır. Analizlerde kirişin sabitlendiği yük hücrelerine bağlı çubukların rijitlikleri yay elemanlarla tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar yaklaşımının avantajları sonucunda

kirişin farklı kaynak sıralarındaki şekil değişimleri kaynak süresi boyunca gözlenebilmiştir. Bu analizlerin temsil ettiği süredeki çarpılma şekilleri, Şekil 4a’da gösterilen kuvvet değişimleri ile örtüşmekte, daha somut ve görsel bir modelle çarpılma eğilimleri gösterilmektedir. Sonuç olarak, çarpılma kuvvetleri vasıtasıyla bir kaynak sırasının konstrüksiyonda meydana getireceği çarpılma eğilimleri ve optimum KS bu metodlarla belirlenebilir. Ancak burada belirtilen kuvvetler ve kuvvetlere bağlı hazırlanan boyutsal değişim analizleri gerçek çarpılma veya şekil değiştirme değerlerini vermez.



Şekil 4. I kirişe uygulanan bir kaynak sırası/çarpılma kuvvetleri ilişkisi ve sonlu elemanlar analizi

4. SONUÇLAR

Kaynaklı konstrüksiyonlarda oluşan çarpılma eğilimlerinin belirlenmesi amacıyla, çarpılma kuvvetlerini ölçme esasına dayalı deneysel bir metodun uygulanmasıyla elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuç ve öneriler söylenebilir;

- Kaynaklı birleştirme işlemleri sırasında ve sonrasında konstrüksiyonda meydana gelen çarpılma kuvvetleri bu metod vasıtasıyla başarı ile ölçülmüş, kaynak sürecinde oluşan genleşme ve büzülme (kendini çekme) etkilerinin oluşturduğu kuvvetler ölçülebilmektedir.
- Bu metotla, kaynak prosedürlerinin uygulanması sürecindeki her bir işlem sırasında eş zamanlı olarak konstrüksiyonda meydana gelen çarpılma eğilimlerini izleyebilmek ve kayıt edebilmek mümkün olabilmektedir.
- Farklı konstrüksiyonlar için farklı kaynak sıralarının uygulanmasında oluşan kalıntı çarpılma kuvvetleri analiz edilebilmiş ve her bir konstrüksiyon için optimum kaynak sıraları belirlenebilmiştir.
- Çarpılmayı önleyici temel yaklaşımlarla belirlenemeyecek kadar karmaşık kaynaklı birleştirme uygulamalarına sahip bir konstrüksiyonun prototipine veya belirli ölçekte küçültülmüş bir modeline bu metodun uygulanması ile konstrüksiyon için en uygun kaynak sıraları ve prosedürleri oluşturulabilir.
- Bu metod vasıtasıyla elde edilen sayısal veriler, kaynakta çekme ve çarpılma etkilerinin belirlenmesi amacıyla, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenip değerlendirilebilir veya benzer çalışmaların deneysel olarak doğrulanması amacıyla kullanılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Masubuchi, K., 1980. Analysis of Welded Structures, Oxford, Pergamon Press.
2. Deng, D., Hidekazu M. and Yukio U., 2002. Theoretical Prediction of Welding Distortion Considering Positioning and the Gap between Parts, The 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.
3. Chakravarti, L., Malik M., and Goldak, J., 1986. Prediction of Distortion and Residual Stresses in Panel Welds. Symposium on Computer Modeling of Fabrication Processes and Constitutive Behavior of Metals, Ottawa, Ontario, pp. 547-561.
4. Bibby, M. J., Goldak, J. A., Szyszkowicz, M.S. and Jefferson, I., 1988. Computational Developments in the Watt Transient Microstructure Algorithm. Modeling of Casting and Welding Processes IV, The Metals Society, 81-91.
5. Free, A. J. and Goff, R. F. D., 1989. Predicting Residual Stresses in multi-pass Weldments With the Finite Element Method, Computers and Structures, 32(2), 365-378.
6. Teckiwal, P. and Mazumder, J., 1991. Transient and Residual Thermal Strain-stress Analysis of GMAW, Journal of Engineering Materials and Technology, 113:336-343.
7. Watt, D. F., Coon, L. Bibby, M. J., Goldak, J. and Henwrod, C., 1988. An Algorithm for Modeling Microstructural Development in Weld Heat Affected Zones (Part A) Reaction Kinetics, Acta. Metall. 36:3029-3035.
8. Oddy, A. S. Goldak, J. A. and McDill, J. M., 2009. Numerical Analysis of Transformation Plasticity in 3D Finite Element Analysis of Welds. European Journal of Mechanics, A/Solids (3):253-263.
9. Le Blond, J. B., 1989. Mathematical Modeling of Transformation Plasticity in Steels II: Coupling With Strain Hardening Phenomena, International Journal of Plasticity, 5:573-591.
10. Das, S., Upadhyay, G. C., Kleinosky, M. J. and Tims, M. L., 1993. Finite Element Modeling of a Single-pass GMA Weldment. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification

- Processes VI. pp. 593-600, The Minerals & Metals Society.
11. Guangming, F., 2014. Effect of Boundary Conditions on Residual Stress and Distortion in T-joint Welds, *Journal of Constructional Steel Research*, 102, 121-135.
 12. Guangming, F., 2016. Influence of the Welding Sequence on Residual Stress and Distortion of Fillet Welded Structures, *Marine Structures*, 46 30-55.
 13. Bai-Qiao, C., and Soares, C. G., 2016. Effect of Welding Sequence on Temperature Distribution, Distortions and Residual Stress on Stiffened Plates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-12.
 14. Gannon, L., 2010. Effect of Welding Sequence on Residual Stress and Distortion in Flat-bar Stiffened Plates, *Marine Structures*, 23.3, 385-404.
 15. Brown S. B., and Song, H., 1992. Finite Element Simulation of Welding of Large Structures, *Journal of Engineering for Industry*, 114:441-451.
 16. Panagiotis, M., and DeBiccari, A., 1997. Prediction of Welding Distortion, *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 76.4 172.
 17. Sikström, F., 2006. 3D-scanning for Weld Distortion Measuring, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC2006, Proceedings of the IEEE*.
 18. Hackmair, C., Werner, E. and Pönisch, M., 2003. Application of Welding Simulation for Chassis Components Within the Development of Manufacturing Methods, *Computational Materials Science*, 28.3 540-547.
 19. Voutchkov, I., 2005. Weld Sequence Optimization: the Use of Surrogate Models for Solving Sequential Combinatorial Problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194.30, 3535-3551.
 20. Junqiang, W., 2016. Predicting Distortion in Butt Welded Plates Using an Equivalent Plane Stress Representation Based on Inherent Shrinkage Volume, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 138.1, 110-112.
 21. Zargar, S. H., Farahani, M., and Kazem, M., Givi, B., 2015. Numerical and Experimental Investigation on the Effects of Submerged Arc Welding Sequence on the Residual Distortion of the Fillet Welded Plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*
 22. Ozcatalbas, Y., and Vural., H. I., 2009. Determination of Optimum Welding Sequence and Distortion Forces in Steel Lattice Beams, *Journal of Materials Processing Technology*, 209.1 599-604.
 23. Özçatalbaş, Y., 2008. Kaynaklı Birleştirmeli Konstrüksiyonların Çarpılma Eğilimlerinin Belirlenmesi İçin Deneysel Bir Yaklaşım, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23.1, 52-28.

