

# Kaynaklı Bağlantıya Sahip Karmaşık Bir Yapıda Goldak Modeli Kullanılarak Distorsiyonların ve Kalıntı Gerilmelerin Nümerik Analizler ile Belirlenmesi

Barış GÖKÇE<sup>1</sup>  Osman Bahadır ÖZDEN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, [bgokce@erbakan.edu.tr](mailto:bgokce@erbakan.edu.tr) (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

<sup>2</sup> MPG Makine Prodüksiyon Grubu Makine İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş., Konya, Türkiye, [bozden@mpg.com.tr](mailto:bozden@mpg.com.tr)

Makale Bilgileri	ÖZ
<p><b>Makale Geçmişi</b> Geliş: 19.06.2023 Kabul: 25.07.2023 Yayın: 31.12.2023</p> <p><b>Anahtar Kelimeler:</b> Kaynaklı Bağlantılar, Termal Analiz, Isı Etkisi, Distorsiyon.</p>	<p>Bu çalışma, sonlu elemanlar analizlerinde (SEA) kullanılan termal analiz ve yapısal analiz yöntemlerinin birleşik kullanımı ve Goldak modeli ile distorsiyonun ve kalıntı gerilmenin tespit edilmesini ele almaktadır. Distorsiyon, bir malzemenin ısı uygulaması veya mekanik yük altında deformasyon veya bükülme şeklindeki değişimini ifade eder. Distorsiyonun kontrol edilmesi, özellikle hassas parçaların üretimi ve montajı süreçlerinde birçok uygulamada büyük önem taşımaktadır. Kalıntı gerilmelerde yapının özellikle yorulma ömrünü azaltmakta olup yapısal olarak emniyetini etkilemektedir. Bu çalışmanın başlangıcında, karmaşık bir yapıda dört farklı kaynak yolu için termal analizler gerçekleştirilmiştir. SEA yazılımı olarak Ansys yazılımı kullanılmış olup Goldak çift elipsoit modeli Ansys programlama tasarım dili (APDL) ile tanımlanmıştır. Analizden elde edilen veriler, malzemenin ısınma ve soğuma davranışını anlamak için kullanılmıştır. Ardından, termal analiz sonuçları yapısal analiz ile birleştirilerek distorsiyonun nedenlerini ve etkileri ile birlikte kalıntı gerilmenin tespiti için bir değerlendirme yapılmıştır. Yapısal analiz sonrasında, yapı üzerinde ısıdan dolayı oluşan yüklerin neden olduğu gerilmeler ve deformasyonlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda, mobil bir vinçe ait karmaşık bir yapıda kalıntı gerilme 243.56 MPa, kaynak tamamlandıktan sonra oluşan distorsiyon ise X yönünde 0.56mm, Y ekseninde 0.83 mm ve Z ekseninde 0.37 mm tespit edilmiştir. Bu bulgular ve yaklaşımlar ile hassas parçaların üretimi ve montajı süreçlerinde distorsiyonun önlenmesi veya minimize edilmesi için yaklaşımlar sunulmuştur.</p>

## Determination of Distortions by Finite Element Analysis Using the Goldak Model in a Welded Joint Structure

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Article History</b> Received: 19.06.2023 Accepted: 25.07.2023 Published: 31.12.2023</p> <p><b>Keywords:</b> Welded Joints, Thermal Analysis, Heat Effect, Distortion.</p>	<p>This study deals with the combined use of thermal analysis and structural analysis methods used in finite element analysis (FEA) and the determination of distortion and residual stress with the Goldak model. Distortion refers to the change in the way a material deforms or bends under the application of heat or mechanical load. Controlling distortion is of great importance in many applications, especially in the manufacturing and assembly of sensitive parts. Residual stresses reduce the fatigue life of the structure and affect its structural safety. At the beginning of this study, thermal analyzes were performed for four different welding paths in a complex structure. Ansys software was used as SEA software and Goldak double ellipsoid model was defined with Ansys programming design language (APDL). The data from the analysis are used to understand the heating and cooling behavior of the material. Then, thermal analysis results were combined with structural analysis and an evaluation was made to determine the causes and effects of distortion as well as residual stress. After the structural analysis, the stresses and deformations caused by the loads on the structure due to the heat were investigated. As a result of the study, the residual stress in a complex structure of a mobile crane was found to be 243.56 MPa, and the distortion after welding was 0.56 mm in the X direction, 0.83 mm in the Y axis and 0.37 mm in the Z axis. With these findings and approaches, approaches are presented to prevent or minimize distortion in the manufacturing and assembly processes of sensitive parts.</p>

**Atıf/Citation:** Gökçe, B. & Özden, O.B. (2023). Kaynaklı Bağlantıya Sahip Karmaşık Bir Yapıda Goldak Modeli Kullanılarak Distorsiyonların ve Kalıntı Gerilmelerin Nümerik Analizler ile Belirlenmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 53-64. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2023.9>



"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). (CC BY-NC 4.0)"

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapısal analizler, yapı tasarımlarında önemli bir rol oynamaktadır [1]. Özellikle hassas parçaların üretim ve montaj süreçlerinde, malzemenin davranışının doğru bir şekilde analiz edilmesi ve kontrol edilmesi büyük önem taşır. Bu bağlamda, termal analiz ve yapısal analiz yöntemleri, malzeme davranışının anlaşılması ve ürün performansının iyileştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Distorsiyon, malzemenin ısı uygulaması altında deformasyon veya bükülme şeklindeki değişimini ifade eder [2]. Distorsiyon, malzeme kalitesini etkileyebilir, ürün performansını azaltabilir ve tamamen işlevsiz hale getirebilir. Bu nedenle, distorsiyonun nedenleri, etkileri ve kontrol yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, malzeme mühendisleri ve tasarımcılar için önemli bir konudur. Kaynaklı bağlantılarda distorsiyonun boyuna, enine ve açısal çarpılma gibi etkileri bulunmaktadır [3]. Distorsiyonun kontrol edilmesi, birçok endüstriyel uygulama için kritik bir zorluktur. Özellikle hassas parçaların üretimi, montaj süreçleri ve yapısal bileşenlerin kullanımı gibi alanlarda distorsiyonun kontrol altına alınması gerekmektedir.

Sonlu elemanlar analizlerinde (SEA) termal analiz yöntemleri, distorsiyonun belirlenmesi ve kontrol edilmesinde kullanılan etkili araçlardır [4-7]. Termal ve yapısal analiz, malzemenin ısınma ve soğuma davranışını anlamak için kullanılırken, yapısal analiz, sıcaklık etkisiyle yapıda oluşan gerilmeleri ve deformasyonları inceler [8, 9]. Bu iki analiz yöntemi birleştirildiğinde, malzemenin termal ve mekanik etkiler altında nasıl distorsiyona uğradığı daha iyi anlaşılabilir [10]. Bunlar, malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu ve üretim süreçlerinin geliştirilmesi için öneme sahip olmaktadır. Ancak, termal analiz yalnızca sıcaklık değerlerini ortaya koyabilmekte ve mekanik yüklerin etkisini dikkate almamaktadır. SEA aşamasında, malzeme üzerine uygulanan mekanik yüklerin veya ısıların neden olduğu gerilmeler ve deformasyonlar incelenebilmektedir [11]. Bu analiz, malzemenin dayanıklılığını, elastik ve plastik davranışını, gerilme-kırılma ilişkilerini ve deformasyon miktarlarını belirlemek için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, malzemenin mekanik özelliklerinin performansının distorsiyon üzerindeki etkisinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Termal genleşme katsayısı düşük, termal stabilitesi yüksek ve mekanik dayanıklılığı optimal olan malzemeler, distorsiyonun minimize edilmesine yardımcı olabilir. Aynı zamanda, tasarım optimizasyonu sürecinde distorsiyon etkilerinin dikkate alınması ve uygun tasarım değişikliklerinin yapılması gerekmektedir. Üretim süreçlerinde ise sıcaklık kontrolü, soğutma yöntemleri ve malzeme işleme tekniklerinin dikkatlice yönetilmesi önemlidir. Optimal sıcaklık profillerinin belirlenmesi, malzeme şekillendirme işlemlerindeki termal etkilerin minimize edilmesine yardımcı olabilir. Ayrıca, kalıp tasarımı, ısı dağılımı ve soğutma sistemleri gibi faktörlerin gözden geçirilmesi de distorsiyon kontrolünde etkili olabilir.

Goldak modeli, ısı transferi ve termal davranışın simülasyonunda yaygın olarak kullanılan bir modeldir [12, 13]. Bu model, kaynaklı bağlantılarda malzeme içindeki ısı dağılımını, termal gradyanları ve ısı geçişini hesaplamak için kullanılan bir yaklaşımdır [14, 15]. Goldak modeli, termal analizlerde özellikle kaynak işlemleri sırasında ortaya çıkan ısıl etkileri incelemek ve anlamak için kullanılır [16, 17]. Bu model, kaynak sırasında oluşan ısı kaynakları, ısı yayılımı, malzeme erimesi ve donması gibi termal olayları simüle etmek için kullanılan matematiksel bir yaklaşımdır. SEA analizlerinde de farklı yazılımlar ile kullanılabilir [18, 19]. Ansys yazılımında APDL (Ansys Parametrik Tasarım Dili) kodu ile çift elipsoit geometri tanımlaması yapılarak ısı girdisi analiz edilebilmektedir [20-22]. Goldak modeli, kaynak işlemlerinin optimizasyonu, distorsiyon kontrolü ve kaynak hatasının azaltılması gibi konularda mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir araçtır. Bu model, malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu ve üretim süreçlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda katkılar sağlamaktadır.

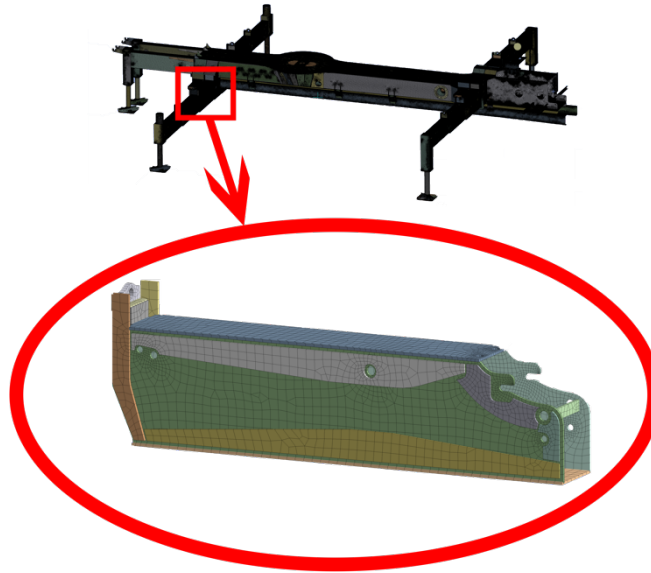
Bu çalışmada, termal analiz ve yapısal analiz yöntemlerinin birleşik kullanımı sayesinde distorsiyonun nedenleri ve etkileri daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, SEA yazılımı olan Ansys ile APDL kodu kullanılarak gerçekleştirilen Goldak modeli ile termal analizi incelenmiştir. Bu model, malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımını, ısı geçişini ve termal gradyanları hesaplamak için kullanılır. Termal etkilerin mekanik yükler üzerindeki etkisini incelemek, distorsiyonun tam anlamını anlamak için önemlidir. Bu birleşik analiz yaklaşımı, malzemenin ısıl genleşmesi, termal gerilmelerin ve mekanik gerilmelerin etkileşimi ve sonuç olarak distorsiyonun mekanizmaları hakkında

daha fazla bilgi sağlamaktadır. Sonuç olarak, distorsiyonun mekanik yükler ve termal etkiler arasındaki etkileşimden kaynaklandığı ve endüstriyel uygulamalarda malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesiyle kontrol edilebileceği belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, distorsiyonla mücadelede daha etkili stratejilerin geliştirilmesine ve daha dayanıklı ve güvenilir ürünlerin üretilmesine katkıda bulunabilir. Distorsiyonun azaltılması veya kontrol altına alınması, ürünlerin performansını ve kalitesini artırabilir, maliyetleri düşürebilir ve üretim süreçlerini verimli hale getirebilir. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda distorsiyonun önlenmesi veya minimize edilmesi için bu çalışmadaki yaklaşımlar önerilmiştir.

## MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

### *SEA Modeli ve Tanımlanan Malzeme Özellikleri (SEA Model and Defined Material Properties)*

Çalışmada SEA yazılımı olarak Ansys kullanılmıştır. Termal analiz uygulanmış ve ısı etkilerinin sonuçları yapısal analiz girdisi olarak tanımlanmıştır. Analiz geometri modeli ise Şekil 1’de gösterilen mobil bir vincin alt parçalarından olan bir yapıda incelemeler gerçekleştirilmiştir. Analiz süresini azaltmak ve ağ kalitesini artırmak amacıyla sonucu etkilemeyecek geometrilerde sadeleştirmeler yapılmıştır. Karmaşık bir yapıya sahip olduğu için bu tür sadeleştirmeler özellikle analiz süresini olumlu olarak etkilemektedir.



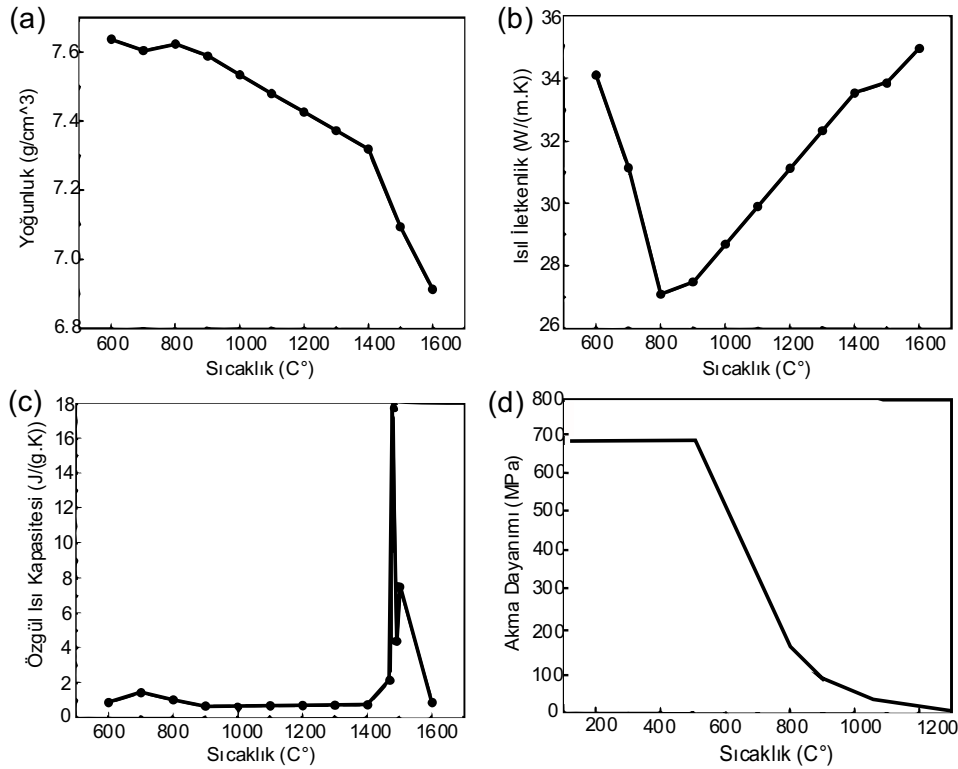
Şekil 1. İncelenen yapının SEA geometri modeli

SEA modelinde malzeme mekanik özellikleri akma noktasının üzerinde gerilmeler oluşacağı için doğrusal olmayan özellikler ile tanımlanmıştır. Analizler, Hooke yasasına göre Euler-Bernoulli deformasyon yaklaşımına göre doğrusal olmayan malzeme tanımlamaları ile gerçekleştirilmiştir. Kalıntı gerilme değerleri ise maksimum normal gerilme değerlerine göre incelenmiştir. Distorsiyonu belirlemek için malzemenin plastik bölgedeki tanımlanması gerekmektedir. İncelenen yapıda malzeme seçimi yüksek mukavemetli çelik olan S690QL olup termal analizleri bu malzemenin özelliklerine göre incelenmiştir. Tablo 1’de, SEA için tanımlanan S690QL malzemesinin oda sıcaklığında çekme testi ve araştırmalar ile elde edilen mekanik özellikleri belirtilmektedir.

Tablo 1. S690QL Oda Sıcaklığı Mekanik Özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Akma Dayanımı	MPa	710
Çekme Dayanımı	MPa	740
Elastikiyet Modülü	GPa	200
Poisson Oranı		0.3
Yüzden Uzama	%	12
Tanjant Modülü		0.1

S690 malzemesinin analiz modelinde tanımlanan sıcaklığa bağlı termo-mekanik özellikleri Şekil 2’de gösterilmektedir. S690 malzemelerin termo-mekanik özellikleri için literatürde bulunan çalışmalardan alınarak SEA için tanımlanmıştır [23, 24].



Şekil 2. SEA’da tanımlanan S690 termal özellikleri

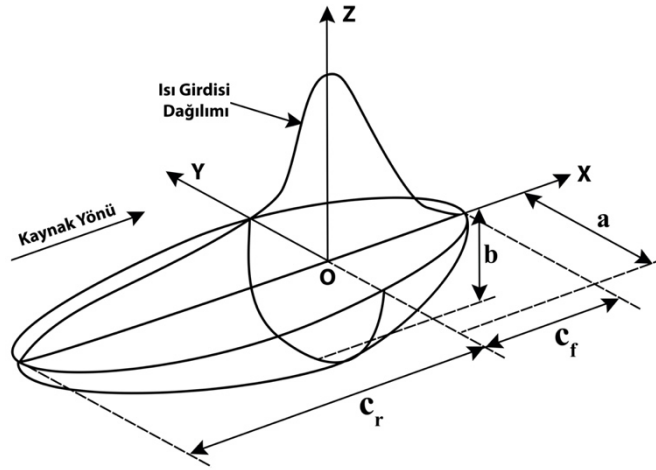
Hazırlanan geometride ve tanımlamalar ile beraber ağ (mesh) modeli oluşturulurken genellikle 8 köşeli (hexagonal) ve ortada düğüm bulunan (quadratic) ağ modeli tercih edilmiştir. Bu ağ tipinde bir elemenda 20 düğüm noktası bulunmaktadır. Daha doğru sonuçlar alındığı için belirtilen ağ tipi modeli tercih edilmiştir. Ağ modeli oluşturulduktan sonra 4964 eleman sayısı ve 7501 düğüm sayısı elde edilmiştir. Ağ kalitesi, çarpıklık (skewness) kriterine göre değerlendirilmiş olup ortalama 0,17 tespit edilmiştir. Bulunan değer çarpıklık kriterine göre kaliteli ağ olarak değerlendirilmektedir.

#### Termal Analiz Isı Kaynağı için Goldak Modeli (Thermal Analysis Goldak Model for Heat Source)

Goldak modeli, kaynak işlemindeki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için kullanılan bir sayısal simülasyon yöntemidir. Model, kaynak işlemi sırasında malzeme üzerine uygulanan ısı enerjisini ve buna bağlı olarak oluşan sıcaklık dağılımını hesaplamak için çift elipsoid şeklini sağlayan formüller ile temsil edilir. Goldak modelinin temelinde, kaynak hızı, elektrik akımı, voltaj gibi giriş parametreleri yer alır. Bu parametreler, kaynak işlemine özgü olarak belirlenir. Bu sayede, kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımının tahmin edilmesi ve kaynak sonuçlarının analiz edilmesi mümkün olur. SEA’da Goldak modeli, fortran dili ile programlanan APDL kodu tanımlanmıştır. Denklem 1 ve 2’de ısı girdisi modeli APDL kodunda kullanılmış termal analiz ısı girdileri bu denklemler ile tanımlanmıştır [25]. APDL kodu EK 1’de belirtilmektedir. Bu denklemlerin oluşturduğu çift elipsoid Goldak modeli Şekil 3’te gösterilmektedir.

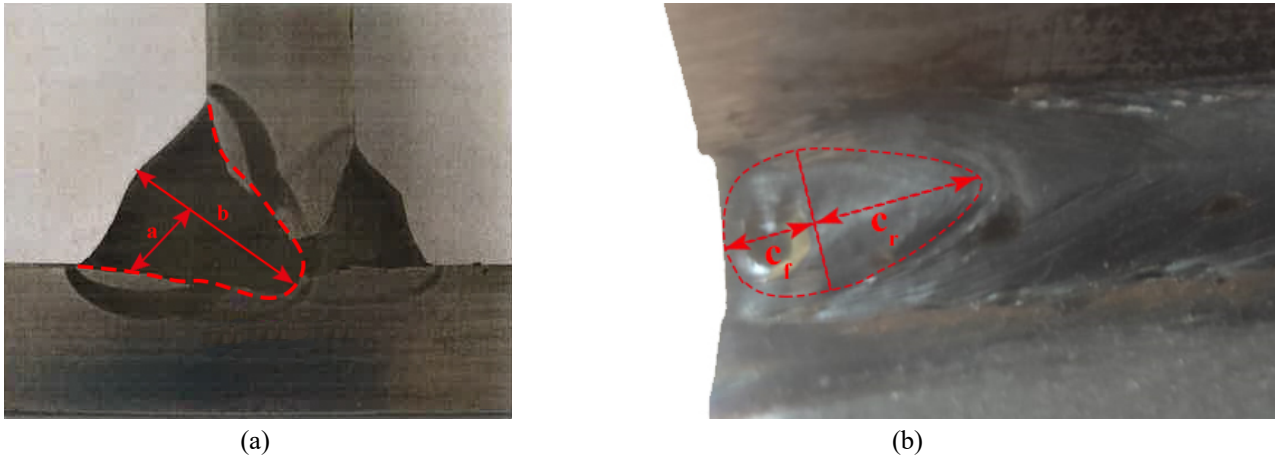
$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}QQ_f}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+\theta(\tau-t)]^2}{c_f^2}} \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}QQ_r}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+\theta(\tau-t)]^2}{c_r^2}} \quad (2)$$



Şekil 3. Çift elipsoid Goldak modeli

APDL kodu ile tanımlamalar yapılırken Goldak modelinin parametreleri, kaynak hızı, toplam süre parametreleri ile programlanmaktadır. Bu parametrelerin kod vasıtasıyla girilmesi ile ısı girdisi, termal analiz için tanımlanmaktadır. Termal analizde tanımlanan Goldak parametreleri için metal aktif gaz (MAG) kaynağı ile numune hazırlanmış olup Şekil 4'te gösterilmektedir. Tablo 2'de hazırlanan numunenin kaynak parametreleri ve bu parametrelere göre çıkarılan Goldak parametreleri belirtilmektedir.



Şekil 4. Goldak parametreleri için hazırlanan numune (a) a ve b değeri için (b)  $c_f$  ve  $c_r$  değerleri için

Tablo 2. Kaynak ve Goldak Parametreleri

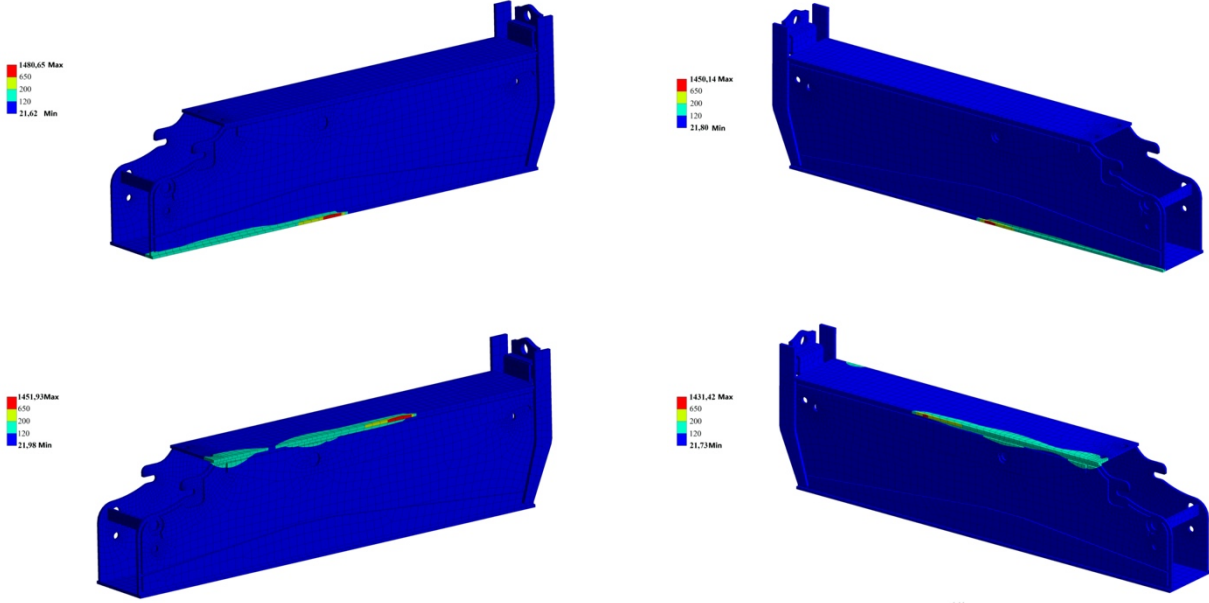
Parametre	Birim	Değer
Kaynak İlerleme Hızı	cm/dk	30
Voltaj	V	26
Akım	A	200
Dolgu Teli Kalınlığı	mm	1.2
Isı Girdisi	kJ/mm	0.81
İş Parçası ve Ana Malzeme Kalınlığı	mm	10
Dolgu Teli Akma Dayanımı	MPa	700
a	mm	5
b	mm	12
$c_f$	mm	11
$c_r$	mm	23

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

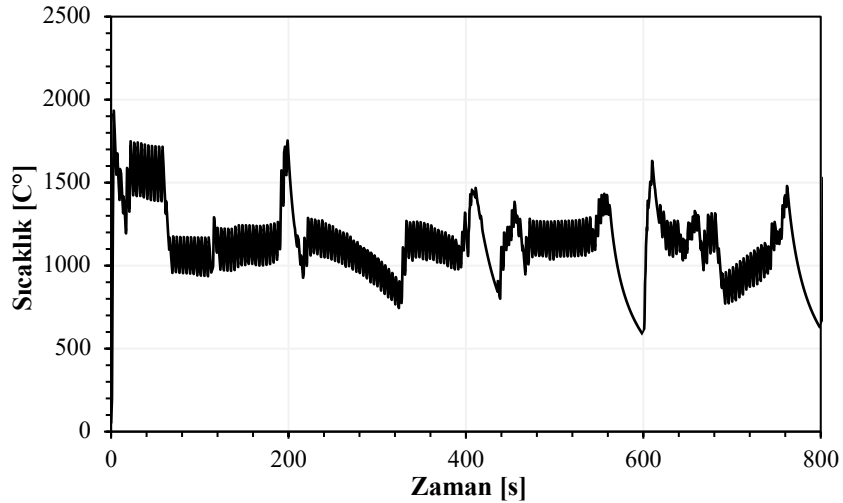
SEA modelinin APDL kodunda bulunan Goldak tanımlanması ile termal analiz hazır hale getirilmiştir. Kaynak sırası yapı üzerinde koordinat sisteminin numarası ile tanımlanmış olup 800s süre tanımlanmıştır. Dört adet kaynak sırası tanımlanmıştır. Termal ve yapısal analizler toplam 40.6 saatte tamamlanmıştır. Şekil 5'te



gösterilen termal analiz sonuçlarında kırmızı renk skalası 650 C° üzerindeki değerleri ifade etmekte olup anlık zamandaki kaynağın yapıldığı bölgeyi ifade etmektedir. Kaynak sırası için Şekil 5 (a) 1. kaynak sırasının 100. Saniyedeki anı, (b) 2. kaynak sırasının 300. saniyedeki anı, (c) 3. kaynak sırasının 500. saniyedeki anı, (d) 4. kaynak sırasının 700. saniyedeki anını göstermektedir. Şekil 6’da termal analizi sonucunda 800 saniye boyunca elde edilen sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Goldak modeli ile tanımlanan kaynak parametreleri için termal analiz sonuçlarına göre maksimum sıcaklık 1915°C tespit edilmiştir.



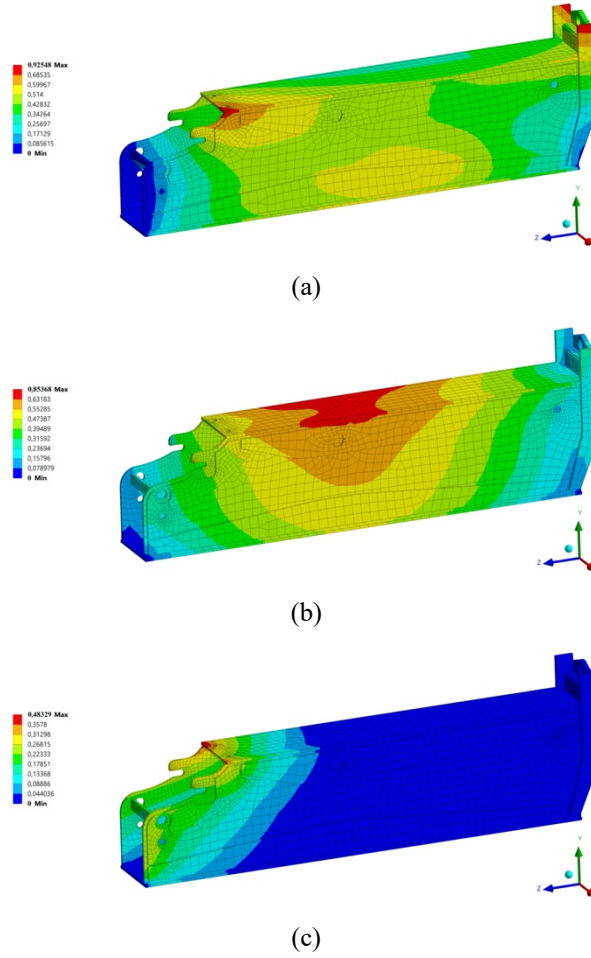
Şekil 5. Kaynak işlemi anlık termal analiz sıcaklık (°C) sonuçları



Şekil 6. Termal analiz sıcaklık grafiği

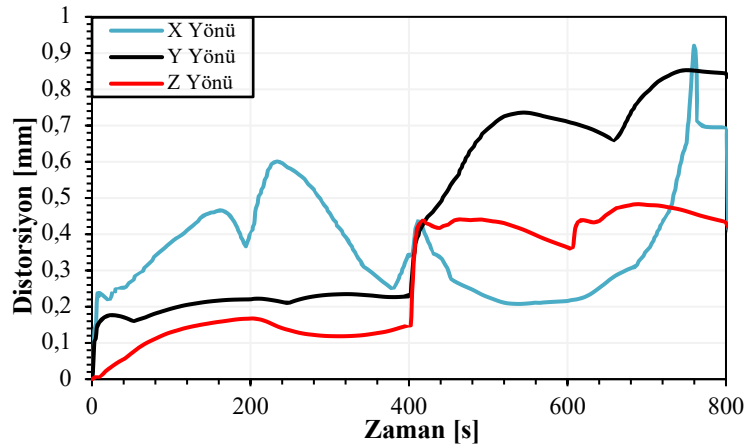
Termal analizde elde edilen zamana bağlı sıcaklık değerleri yapısal analiz girdilerine tanımlanmıştır. Sınır şartları olarak yapının alt ön ve arka kenarlarından sabitlenmiştir. Malzeme ise S690 özelliklerine göre Tablo 1 ve Şekil 2 belirtilen doğrusal olmayan özellikler ile tanımlanmıştır. Böylelikle plastik deformasyon değerleri de görülmüştür. Şekil 7’de yapısal analiz sonucunda, zamana bağlı olarak elde edilen kaynak bitiminden sonra oluşan distorsiyon değerleri gösterilmektedir.

Termal analizde elde edilen sıcaklık değerleri yapının geometrik özelliklerine bağlı olarak da değişkenlik gösterebilmektedir. Termal analiz sonucunda gerçekleştirilen yapısal analizde de distorsiyon miktarı sıcaklığa bağlı olarak atalet momentine göre de değişkenlik gösterebilmektedir. Buna bağlı olarak maliyeti de değişkenlik



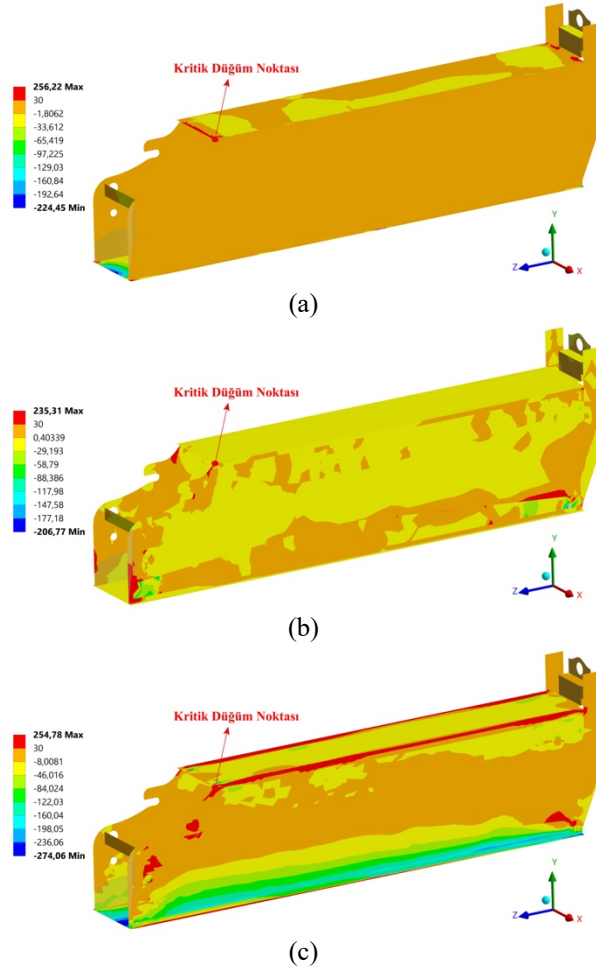
Şekil 7. SEA distorsiyon sonuçları (a) X yönü (b) Y yönü (c) Z yönü

göstermektedir. İncelenen yapıda tasarım atalet momentini artırmak, üretim maliyetinin yüksek olmaması, ağırlıkların yüksek olmaması, yapısal emniyeti sağlayan tasarım iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar iyileştirilmiş nihai tasarıma göre değerlendirilmiştir. Şekil 8’de tüm kaynak sürecinde oluşan distorsiyon miktarları gösterilmektedir. Şekil 8’de gösterilen distorsiyon miktarları yapının herhangi bir noktasındaki maksimum deformasyon miktarına göre belirlenmiştir. Kaynak esnasında X yönünde 0.92 mm, Y yönünde 0.85 mm, Z yönünde 0.48 mm distorsiyon miktarları tespit edilmiştir. Kaynak tamamlandıktan sonra 800°C’de sıcaklığın azalması ile beraber X yönünde 0.56 mm, Y yönünde 0.83 mm ve Z yönünde 0.37 mm distorsiyon değerleri tespit edilmiştir.



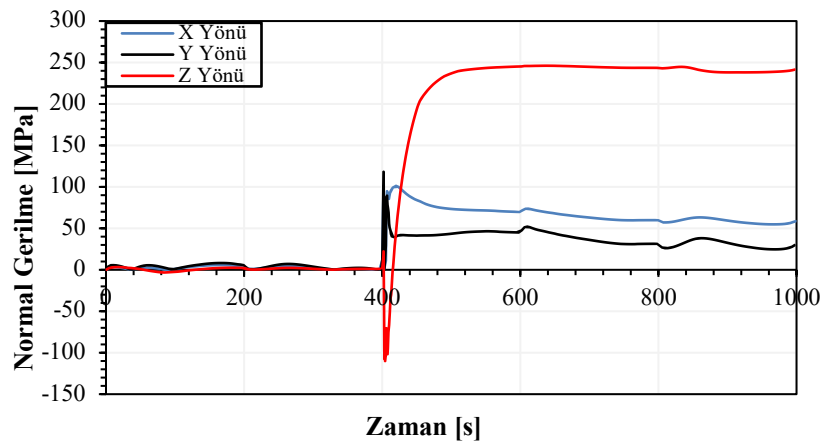
Şekil 8. Distorsiyon miktarı sonuçları

Distorsiyon tespit edildikten sonra ısı girdisinden dolayı kaynak sonrası kalıntı gerilmeler incelenmiştir. İncelemeler maksimum normal gerilme olarak değerlendirilmiş olup en kritik düğüm noktası tespit edilmiştir. Bu düğüm noktası 3 eksende incelenerek oluşan maksimum normal gerilmeye göre belirlenmiştir. Şekil 9’da incelenen yapıda kaynak yapıldıktan sonra oluşan kalıntı gerilmeler gösterilmektedir. Kalıntı gerilmelerde düğümlerine göre çekme ve basma gerilmeleri bulunmaktadır.



Şekil 9. Kaynak sonrası kalıntı gerilme sonuçları (a) X yönü (b) Y yönü (c) Z yönü

Elde edilen normal gerilme sonuçlarına göre X ve Z eksenlerinde yüksek gerilmeler tespit edilmiştir. Bu eksenlerde, tasarım iyileştirme sürecinde, yapının normal gerilme ve distorsiyon miktarlarının azaltılması amaçlanmış olup gösterilen nihai tasarım sonuçları elde edilmiştir. İncelemeler neticesinde kritik düğüm noktası 400-600 saniye arasında kaynak yapılan yolda olduğu belirlenmiştir. Şekil 10’da kritik düğüm noktasının tüm kaynak sürecinde oluşan normal gerilme dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 10. Kritik düğüm noktası zamana bağlı normal gerilme sonuçları



Düğüm noktasında kaynağın 400. saniyesinde basma gerilmeleri oluşmakta olup yaklaşık 20 saniyeden sonra tüm eksenlerde çekme gerilmesine dönmüştür. Düğüm noktasının bulunduğu 3. kaynak yolu 600. saniye tamamlandıktan sonra o noktadaki normal gerilme de azalma görülmüştür. Bu noktada kaynak boyunca oluşan en yüksek gerilme çekme gerilmesi Z ekseninde 246.14 MPa, en yüksek basma gerilmesi ise -110.04 MPa tespit edilmiştir. Kaynak diğer kaynak yolunda tamamlandıktan sonra kritik düğüm noktasında kalıntı gerilme değeri, X ekseninde 59.87 MPa, Y ekseninde 31.4 MPa ve Z ekseninde 243.56 MPa olduğu tespit edilmiştir. Kritik düğüm noktasında kaynak tamamlandıktan sonra %1.06 normal gerilmenin azaldığı görülmüştür.

Goldak modeli için hazırlanan SEA çalışmalarında Goldak parametrelerinin numune hazırlanarak belirlenmesi distorsiyon ve kalıntı gerilmenin tespiti için daha doğru sonuçlar elde edilebileceği literatürde bulunan çalışmalarda incelenmiştir [26]. Fakat bu parametreleri doğrulamadan yapılan çalışmalarda mevcut olup bu kaynak parametrelerine göre yapılması durumunda farklı hatalı değerlere sebep olabilir. Distorsiyon ve kalıntı gerilme değerleri kaynak yönü, geometrisi ve birçok etkene bağlı olup bu etkenlere göre incelemeler gerçekleştirilebilir. Karmaşık yapıda olmayan geometrilerde distorsiyonların ve kalıntı gerilmelerin kaynak yönlerine göre optimize edilmesi gibi çalışmalar bulunmaktadır [27]. Bazı çalışmalarda çok pasolu kaynak işlemleri için incelemeler yapılmıştır [28, 29]. Fakat bu çalışmada olduğu gibi karmaşık yapılarda bu tür uygulamalar oldukça uzun sürmektedir. Bu çalışma da bu sebeple 4 kaynak yolunun -Z ekseninde ilerlemesi tanımlamalar bulgular elde edilmiştir. Bu çalışmada maksimum kalıntı gerilme değeri Z ekseninde 243.56 MPa, maksimum distorsiyon miktarı ise Y ekseninde 0.83 mm tespit edilmiştir. Literatürde farklı çalışmaların malzeme ve parametrelerinde, tasarlanan yapının atalet momentine göre kalıntı gerilme ve distorsiyon miktarları değişkenlik gösterebilmektedir [30, 31].

### SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi kullanılarak termal analiz ve yapısal analiz yöntemlerinin birleşik kullanımı ve Goldak modeli ile distorsiyon ve kalıntı gerilme tespit edilmiştir. Distorsiyon, malzemenin ısı veya mekanik yük altında deformasyon veya bükülme şeklindeki değişimi olarak tanımlanır. Distorsiyonun kontrolü, hassas parçaların üretimi ve montajı süreçlerinde büyük önem taşır. Ayrıca, kalıntı gerilmeler yapısal olarak emniyeti etkileyerek yorulma ömrünü azaltabilir. Bu çalışmada, dört farklı kaynak yolu için karmaşık bir yapıda termal analizler gerçekleştirilmiştir. Ansys yazılımı kullanılarak SEA analizi yapılmış ve Goldak çift elipsoit modeli APDL ile tanımlanmıştır. Elde edilen veriler, malzemenin ısınma ve soğuma davranışını anlamak için kullanılmıştır. Daha sonra, termal analiz sonuçları yapısal analizle birleştirilerek distorsiyonun nedenleri, etkileri ve kalıntı gerilme tespiti değerlendirilmiştir. Yapısal analiz sonucunda, ısı kaynaklı yüklerin neden olduğu gerilmeler ve deformasyonlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda, mobil bir vince ait karmaşık bir yapıda kalıntı gerilme olarak 243.56 MPa ve kaynak tamamlandıktan sonra oluşan distorsiyon olarak X ekseninde 0.56 mm, Y ekseninde 0.83 mm ve Z ekseninde 0.37 mm tespit edilmiştir. Bu bulgular ve yaklaşımlar, hassas parçaların üretimi ve montajı süreçlerinde distorsiyonun önlenmesi veya minimize edilmesi için yaklaşımlar sunmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, termal analiz ve yapısal analiz yöntemlerinin birleşik kullanımıyla distorsiyonun ve kalıntı gerilmenin tespit edilmesini ele almıştır. Bu yaklaşım, SEA ile önceden tespit edilerek hassas parçaların üretimi ve montajı süreçlerinde distorsiyonun kontrolünü sağlamak ve kalıntı gerilmenin etkilerini azaltmak için bir araç olarak önerilmiştir. Gelecek çalışmalarda, literatürde sıralama optimizasyonunda kullanılan genetik algoritmanın bu çalışmada kullanılan APDL kodu ile haberleştirilmesi sağlanarak karmaşık yapılarda en uygun kaynak sırasının tespiti için geliştirilebilir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma MPG Makine İmalat Sanayi ve Tic. A.Ş. tarafından desteklenmiştir. MPG Makine İmalat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

**KAYNAKÇA (REFERENCES)**

- [1] B. Chandrasekaran, T.R. Johnson, J.W. Smith, Task-structure analysis for knowledge modeling, *Communications of the ACM*. 35(9) (1992), 124-137. doi:10.1145/130994.131002
- [2] D. Deng, H. Murakawa, Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint, *Computational Materials Science*. 43(2) (2008), 353-365. doi:10.1016/j.commatsci.2007.12.006
- [3] D. Deng, H. Murakawa, W. Liang, Numerical simulation of welding distortion in large structures, *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 196(45-48) (2007), 4613-4627. doi:10.1016/j.cma.2007.05.023
- [4] K. Zhang, W. Dong, S. Lu, Residual stress and distortion in thick-plate weld joint of AF1410 steel: finite element simulations and experimental studies, *Materials Research Express*. 9(1) (2022), 016524. doi:10.1088/2053-1591/ac4c5d
- [5] S.D. Banik, S. Kumar, P.K. Singh, S. Bhattacharya, M.M. Mahapatra, Distortion and residual stresses in thick plate weld joint of austenitic stainless steel: Experiments and analysis, *Journal of Materials Processing Technology*. 289 (2021), 116944. doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116944
- [6] J. Zhang, L. Yu, Y. Liu, H. Li, C. Liu, J. Wu, J. Ma, Z. Li, Effect of welding sequences on the welding stress and distortion in the CFETR vacuum vessel assembly using finite element simulation, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 175 (2019), 103930. doi:10.1016/j.ijpvp.2019.103930
- [7] C. Wu, J.-W. Kim, Review on mitigation of welding-induced distortion based on FEM analysis, *Journal of Welding and Joining*. 38(1) (2020), 56-66. doi:10.5781/JWJ.2020.38.1.6
- [8] H. Vemanaboina, E. Gundabattini, K. Kumar, P. Ferro, B. Sridhar Babu, Thermal and residual stress distributions in Inconel 625 butt-welded plates: simulation and experimental validation, *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021 (2021), 1-12. doi:10.1155/2021/3948129
- [9] H. Vemanaboina, M.M. Babu, I.C. Prerana, G. Edison, B. Yelamasetti, K.K. Saxena, K. Hazim Salem, M.I. Khan, S.M. Eldin, M.K. Agrawal, Evaluation of residual stresses in CO2 laser beam welding of SS316L weldments using FEA, *Materials Research Express*. 10(1) (2023). doi:10.1088/2053-1591/acb0b5
- [10] H. Vemanaboina, S. Akella, A. Uma Maheshwer Rao, E. Gundabattini, R.K. Buddu, Analysis of thermal stresses and its effect in the multipass welding process of SS316L, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 235(2) (2021), 384-391. doi:10.1177/0954408920965062
- [11] M.B. Bilgin, K. Gök, A. Gök, Three-dimensional finite element model of friction drilling process in hot forming processes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 231(3) (2017), 548-554. doi:10.1177/0954408915614300
- [12] M. Nezamdost, M.N. Esfahani, S. Hashemi, S. Mirbozorgi, Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 87 (2016), 615-624. doi:10.1007/s00170-016-8509-4
- [13] A. Chiocca, F. Frendo, L. Bertini, Evaluation of heat sources for the simulation of the temperature distribution in gas metal arc welded joints, *Metals*. 9(11) (2019), 1142. doi:10.3390/met9111142
- [14] J. Goldak, M. Bibby, J. Moore, R. House, B. Patel, Computer modeling of heat flow in welds, *Metallurgical transactions B*. 17 (1986), 587-600. doi:10.1007/BF02670226
- [15] N. Moslemi, S. Gohari, B. Abdi, I. Sudin, H. Ghandvar, N. Redzuan, S. Hassan, A. Ayob, S. Rhee, A novel systematic numerical approach on determination of heat source parameters in welding process, *Journal of Materials Research and Technology*. 18 (2022), 4427-4444. doi:10.1016/j.jmrt.2022.04.039
- [16] F. Vakili-Tahami, A. Ziaei-Asl, Numerical and experimental investigation of T-shape fillet welding of AISI 304 stainless steel plates, *Materials & design*. 47 (2013), 615-623. doi:10.1016/j.matdes.2012.12.064
- [17] A. Gharib, F. Biglari, M. Shafaie, A. Kokabi, Experimental and numerical investigation of fixture time on distortion of welded part, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 104 (2019), 1121-1131. doi:10.1007/s00170-019-03874-0
- [18] S. Sarkani, V. Tritchkov, G. Michaelov, An efficient approach for computing residual stresses in welded joints, *Finite elements in analysis and design*. 35(3) (2000), 247-268. doi:10.1016/S0168-874X(99)00068-2

- [19] T. Kik, M. Slovacek, J. Moravec, M. Vanek. Numerical Analysis of Residual Stresses and Distortions in Aluminium Alloy Welded Joints: *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ*, (2015), 443-448.
- [20] R. Farias, P. Teixeira, L. Vilarinho, Variable profile heat source models for numerical simulations of arc welding processes, *International Journal of Thermal Sciences*. 179 (2022), 107593. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2022.107593
- [21] D.B. Darmadi, A. Kiet-Tieu, J. Norrish, A validated thermo mechanical FEM model of bead-on-plate welding, *International Journal of Materials and Product Technology* 15. 48(1-4) (2014), 146-166. doi:10.1504/IJMPT.2014.059047
- [22] K. Venkateswarlu, P.N. Kumar, P. Ravikumar, Finite element simulation of temperature distribution, distortion and residual stresses of dissimilar welded joints, *Materials Today: Proceedings*. 5(5) (2018), 11933-11940. doi:10.1016/j.matpr.2018.02.167
- [23] F. Zamiri Akhlaghi, C. Acevedo, A. Nussbaumer, J. Krummenacker. Investigation of technological size effects of welding on the residual stresses and fatigue life of tubular joints made of structural steels S355 and S690: *Fatigue design*, France, (2011), 1-8.
- [24] S. Liu, Z. Wu, H. Liu, H. Zhou, K. Deng, C. Wang, L. Liu, E. Li, Optimization of welding parameters on welding distortion and stress in S690 high-strength steel thin-plate structures, *Journal of Materials Research and Technology*. (2023). doi:10.1016/j.jmrt.2023.05.169
- [25] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions B*. 15 (1984), 299-305. doi:10.1007/BF02667333
- [26] K. Sripriyan, M. Ramu, K. Anantharuban, M. Karthigha, Characteristic of weld bead using flat wire electrode in GMAW inline during the process: An experimental and numerical analysis, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 196 (2022), 104623. doi:10.1016/j.ijpvp.2022.104623
- [27] A. Savaş, TIG kaynağı ile gerçekleştirilen sert dolgu sırasında oluşan artık gerilme ve deformasyonların modellenmesi, *Mühendis ve Makina*. 62(704) (2021), 620-636. doi:10.46399/muhendismakina.937623
- [28] A. Capriccioli, P. Frosi, Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation, *Fusion engineering and Design*. 84(2-6) (2009), 546-553. doi:10.1016/j.fusengdes.2009.01.039
- [29] Y. Zhang, L. Tian, The effect of joint configuration on residual stress and distortion of the 304 stainless steel multi-pass welded joints, *Materials Today Communications*. 30 (2022), 103070. doi:10.1016/j.mtcomm.2021.103070
- [30] X. Li, L. Hu, D. Deng, Influence of contact behavior on welding distortion and residual stress in a thin-plate butt-welded joint performed by partial-length welding, *Thin-Walled Structures*. 176 (2022), 109302. doi:10.1016/j.tws.2022.109302
- [31] A. Pavan, B. Arivazhagan, M. Vasudevan, G.K. Sharma, Numerical simulation and validation of residual stresses and distortion in type 316L (N) stainless steel weld joints fabricated by advanced welding techniques, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 39 (2022), 294-307. doi:10.1016/j.cirpj.2022.08.010

**EK-1: Tek Kaynak Uzunluğu için Hazırlanan APDL Kodu**

```
CMSEL, ALL
*GET,EMAX,ELEM,,NUM,MAX
*GET,EMIN,ELEM,,NUM,MIN
ALLSEL
TIME_WELD=200
DT=1
a=0.005
b=0.012
Cf=0.011
Cr=0.023
TAU=0.5
FF=0.6
FR=1.4
V=26
I=200
Q=810
VEL=4e-3
NPT=TIME_WELD/DT
NROPT,FULL
*DO,i,1,NPT,1
WTIME=(i)
TIME,WTIME
HCENTER=VEL*WTIME
*DO,j,EMIN,EMAX,1
CSYS,12
*GET,X,ELEM,jj,CENT,X
*GET,Y,ELEM,jj,CENT,Y
*GET,Z,ELEM,jj,CENT,Z
X=CENTRX(j)
Y=CENTRY(j)
Z=CENTRZ(j)
CSI=Z+VEL*(WTIME)
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(a*b*c*3.14*(3.14**0.5))
PART2=(exp(-3*(X/a)**2))*(exp(-3*(Y/b)**2))*(exp(-3*(CSI/c)**2))
QF=PART1*PART2
BFE,j,HGEN,,QF
*ENDDO
SOLVE
*ENDDO
CMSEL,ALL
BFEDELE,ALL,ALL
ALLSEL
```