*Uluslararası İleri Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi*
*Sayı 9, S. 306-312, 12, 2025*
*© Telif hakkı IJANSER'e aittir*
***Araştırma Makalesi***

IJANSER
https://as-proceeding.com/index.php/ijanser
ISSN:2980-0811

*International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*
*Volume 9, pp. 306-312, 12, 2025*
*Copyright © 2025 IJANSER*
***Research Article***

# Lazer Kaynakta Isı Girdisine Bağlı Kaynak Geometrisi ve Yapısal Deformasyonların Analizi

Salih KARAKAŞ[1], Samet ÖZDEMİR[1] ve Celalettin YÜCE[2]

[1] *ORAU Orhan Otomotiv, Bursa / Türkiye*
[2] *Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Bursa / Türkiye*

[*] *(cyuce@uludag.edu.tr)*

*(Received: 08 Deceember 2025, Accepted: 14 December 2025)*

(6th International Conference on Scientific and Innovative Studies ICSIS 2025, December 09-10, 2025)

**ATIF/REFERENCE:** Karakaş, S., Özdemir, S. & Yüce, C. (2025). Lazer Kaynakta Isı Girdisine Bağlı Kaynak Geometrisi ve Yapısal Deformasyonların Analizi, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(12), 306-312.

***Özet –*** Bu çalışmada, sabit lazer gücü altında farklı robot ilerleme hızlarının (15, 20 ve 25 mm/s) lazer kaynak dikişi geometrisi ve parça üzerindeki termomekanik deformasyonlar üzerindeki etkileri sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. Termal–yapısal sonlu elemanlar modeli kullanılarak sıcaklık dağılımları, ergime havuzu boyutları ve soğuma sonrası kalıcı deformasyonlar hesaplanmıştır. Analizler, ilerleme hızının artmasıyla birim uzunluğa düşen ısı girdisinin azalması; bunun ise daha dar ergime havuzu, azalan nufuziyet ve küçülen ısıl etki bölgesi ile sonuçlandığını göstermiştir. Düşük hızlarda ortaya çıkan yüksek ısı girdisi ise daha geniş dikiş geometrisi ve artmış termal deformasyonlara yol açmıştır. Elde edilen bulgular, lazer kaynak parametre optimizasyonunda ilerleme hızının kritik bir rol oynadığını ve hem kaynak kalitesi hem de parça boyutsal stabilitesi açısından dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

*Anahtar Kelimeler – Lazer Kaynak, İlerleme Hızı, Sonlu Elemanlar Analizi, Isı Girdisi, Termal Deformasyon.*

## I. GİRİŞ

Lazer kaynak; yüksek enerji yoğunluğu, dar ısıl etki bölgesi ve yüksek nufuziyet potansiyeli sayesinde otomotiv, havacılık ve imalat endüstrilerinde tercih edilen birleştirme yöntemlerinden biridir [1]. Ancak kaynakta oluşan termal döngüler artık gerilmeler ve distorsiyona neden olarak son ürünün mekanik ve boyutsal özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle kaynak parametrelerinin, özellikle lazer gücü ve ilerleme hızına bağlı olarak tespit edilen ısı girdisinin düzeltilmesi, istenen dikiş geometrisi ve minimal deformasyon için hayati önemdedir.

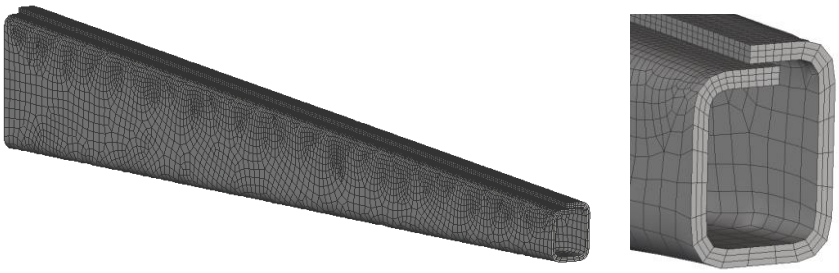
Lazer kaynakta ilerleme hızı, birim uzunluğa düşen ısı girdisini doğrudan belirler. Bu ilişki hem deneysel çalışmalarda hem de klasik parametre analizlerinde açıkça gösterilmiştir [2]. Sonlu elemanlar analizleri ile bu ilişkinin tespit edilmesi hem maliyet hem de süre olarak oldukça avantajlıdır. Son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalarda artış gözlenmektedir. Yılmaz ve ark. sac metal parçaların bindirme kaynak konfigürasyonunda Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen birleştirme sürecini sayısal olarak incelemiştir [3]. Uranga ve ark. S275JR yapı çeliği üzerinde lazer kaynağı için sonlu elemanlar tabanlı bir ısıl model önermiştir. Elde edilen sonuçlar, sayısal tahminlerin deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiğini kanıtlamıştır [4]. Peng ve ark. alüminyum alaşımlarının lazer derin nufuziyet kaynağındaki eriyik havuzu dinamiklerini simüle etmiş ve farklı kaynak hızlarının anahtar deliği (keyhole) davranışı ve akış alanı üzerindeki etkileri incelemiştir [5]. Bin ve ark. yüksek akım ve gerilim koşulları

altında gerçekleştirilen kalın plaka kaynaklarında oluşan termal gerilmeleri araştırmışlardır [6]. Xie ve ark. İse paslanmaz çelik plakalar üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, kaynak sonrası oluşan artık gerilmeleri ve deformasyonları deneysel verilerle doğrulayarak detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir [7].

Literatür taramasından elde edilen bulgular, kaynak kalitesinin doğrudan proses parametreleri tarafından belirlendiğini açıkça göstermektedir. Ancak, parametre optimizasyonu için yalnızca deneysel yöntemlere başvurulması, zaman ve maliyet açısından önemli kısıtlamalar doğurmaktadır. Bu bağlamda, parametrik etkilerin incelenmesinde maliyet etkin ve hızlı çözümler sunan sonlu elemanlar analizi (SEA) tabanlı yaklaşımlar kritik bir önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında üç farklı robot ilerleme hızında ve sabit lazer gücü altında gerçekleştirilen FEA analizleri ile dikiş geometrisi ve soğuma sonrası deformasyonların karşılaştırmalı değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, S235 kalite çelik sacların lazer kaynak yöntemiyle bindirme konfigürasyonunda birleştirilmesi süreci, Simufact Welding yazılımı aracılığıyla termal ve termomekanik olarak modellenmiştir. Sayısal analizler, sac bükme işlemi sonucu elde edilen nihai geometri esas alınarak yürütülmüş ve modelde S235 yapı çeliğine ait malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamda öncelikle kaynakla birleştirilecek parça modellenmiştir. Sonrasında belirlenen kaynak geometrisine uygun olarak parçalar konumlandırılarak yardımcı elemanlar ile birbirleri ile tutturulmuşlardır. Modellenen parçaların sonlu elemanlarına ayrılmasında Simufact Welding programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ağ modeli oluşturulduktan sonra eleman sayısı ve node sayısı sırası ile yaklaşık olarak 42425 ve 52165 olmuştur. Eleman tipi olarak sonlu elemanlar analizlerinde en yaygın kullanım alanı bulan ve hazırlanan geometriye uyumlu olan hexahedral elemanlar belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Sonlu elemanlar analizlerindeki ağ yapısına örnek görüntüler

Simufact Welding yazılımında oluşturulan sonlu elemanlar modelinde, öncelikle deneysel kurulumu temsil eden sınır şartları belirlenmiştir. Bu kapsamda, parçaların konumlandırıldığı yatak (bearing) ve sabitlendiği tutucu (clamp) elemanlar sisteme entegre edilerek, ilgili rijitlik değerleri ve sıkma kuvvetleri atanmıştır. Fikstür tanımlamalarının ardından, lazer kaynak sürecini simüle edecek ısı kaynağı (heat source) ve kaynak yörüngesi (trajectory) oluşturulmuştur. Analizlerde lazer gücü 3 kW olarak sabit tutulmuş ve üç farklı robot ilerleme hızında (15 mm/s, 20 mm/s ve 25 mm/s) analizler gerçekleştirilmiştir. Isıl verim katsayısı 0.9 olarak kullanılmıştır.

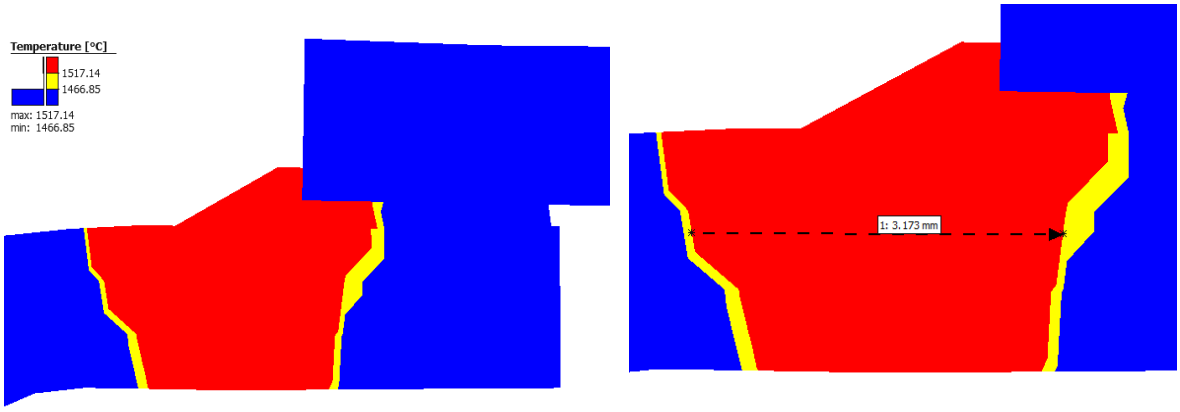
## III. BULGULAR

### *A. Termal Analiz Sonuçları*

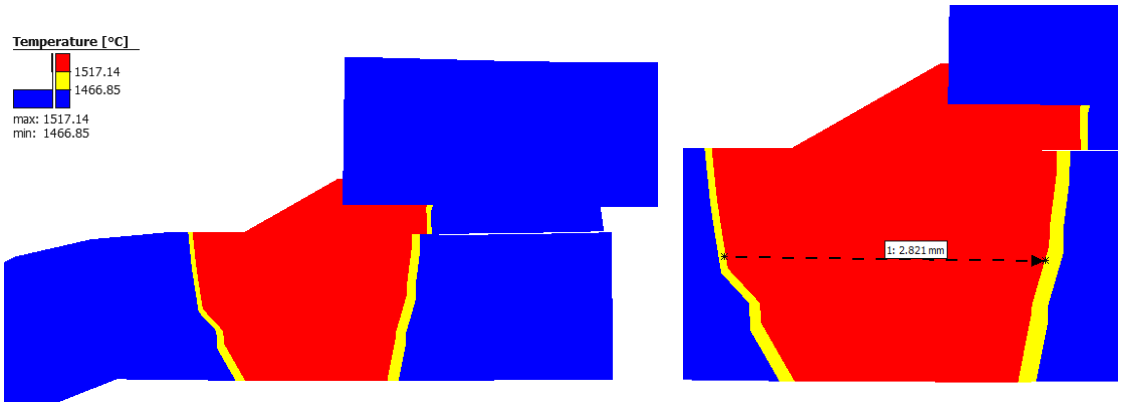
Sabit 3 kW lazer gücünde ve 15 mm/s robot ilerleme hızında gerçekleştirilen analize ait kaynak dikiş geometrisi Şekil 2'de verilmiştir. Belirlenen parametrelere göre 1900 J/cm ısı girdisinde gerçekleştirilen bu analiz sonucunda kaynak dikiş genişliği 3.173 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 2).

Şekil 3'de ise yine 3 kW lazer gücünde ancak 20 mm/s ilerleme hızında gerçekleştirilen analizin geometrik sonuçları verilmektedir. 1425 J/cm ısı girdisine karşılık gelen bu koşullarda, dikiş genişliğinin 2.821 mm olduğu belirlenmiştir.

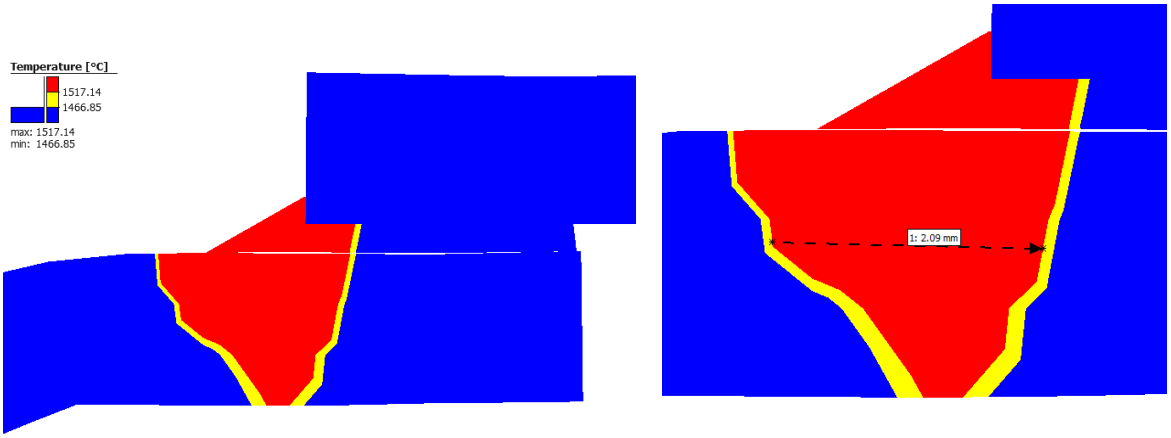
Lazer gücünün sabit 3 kW olarak korunduğu, buna karşılık robot ilerleme hızının 25 mm/s seviyesine yükseltildiği analiz konfigürasyonuna ait dikiş profili Şekil 4'te sunulmuştur. Hız artışıyla ters orantılı olarak, sisteme aktarılan lineer ısı girdisinin 1140 J/cm değerine gerilediği bu parametre setinde, eriyik havuzunun daraldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sayısal veriler ışığında, kaynak dikiş genişliği 2.09 mm olarak ölçülmüş olup, bu durum artan hızın kaynak geometrisini sınırlandırdığını doğrulamaktadır (Şekil 4).




Şekil 2. 15 mm/s ilerleme hızında elde edilen kaynak dikiş geometrisi boyutları




Şekil 3. 20 mm/s ilerleme hızında elde edilen kaynak dikiş geometrisi boyutları

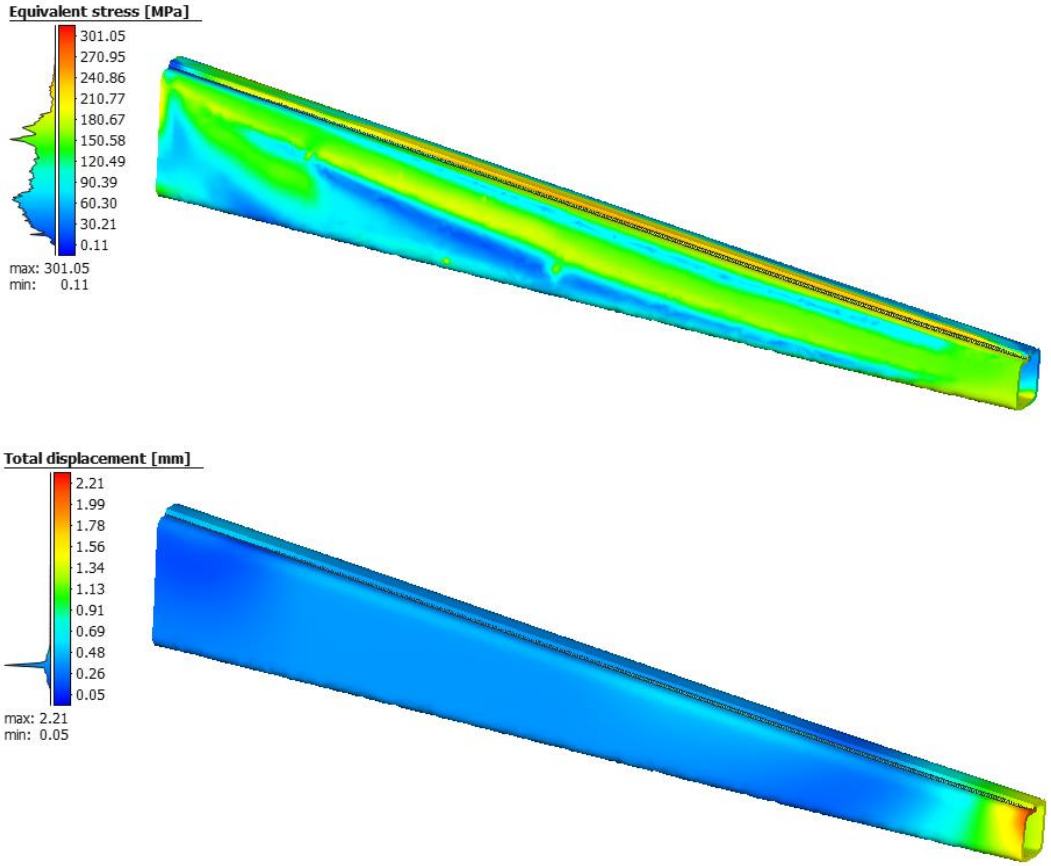



Şekil 4. 25 mm/s ilerleme hızında elde edilen kaynak dikiş geometrisi boyutları

### *B. Termomekanik Analiz Sonuçları*

Bu çalışma kapsamında ayrıca termal analizlerde kullanılan parametrelerde parçaların üzerinde meydana gelen eşdeğer gerilmeler ve toplam deformasyonlar incelenmiştir. Sabit 3 kW lazer gücünde üç farklı ilerleme hızında yapılan termomekanik analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

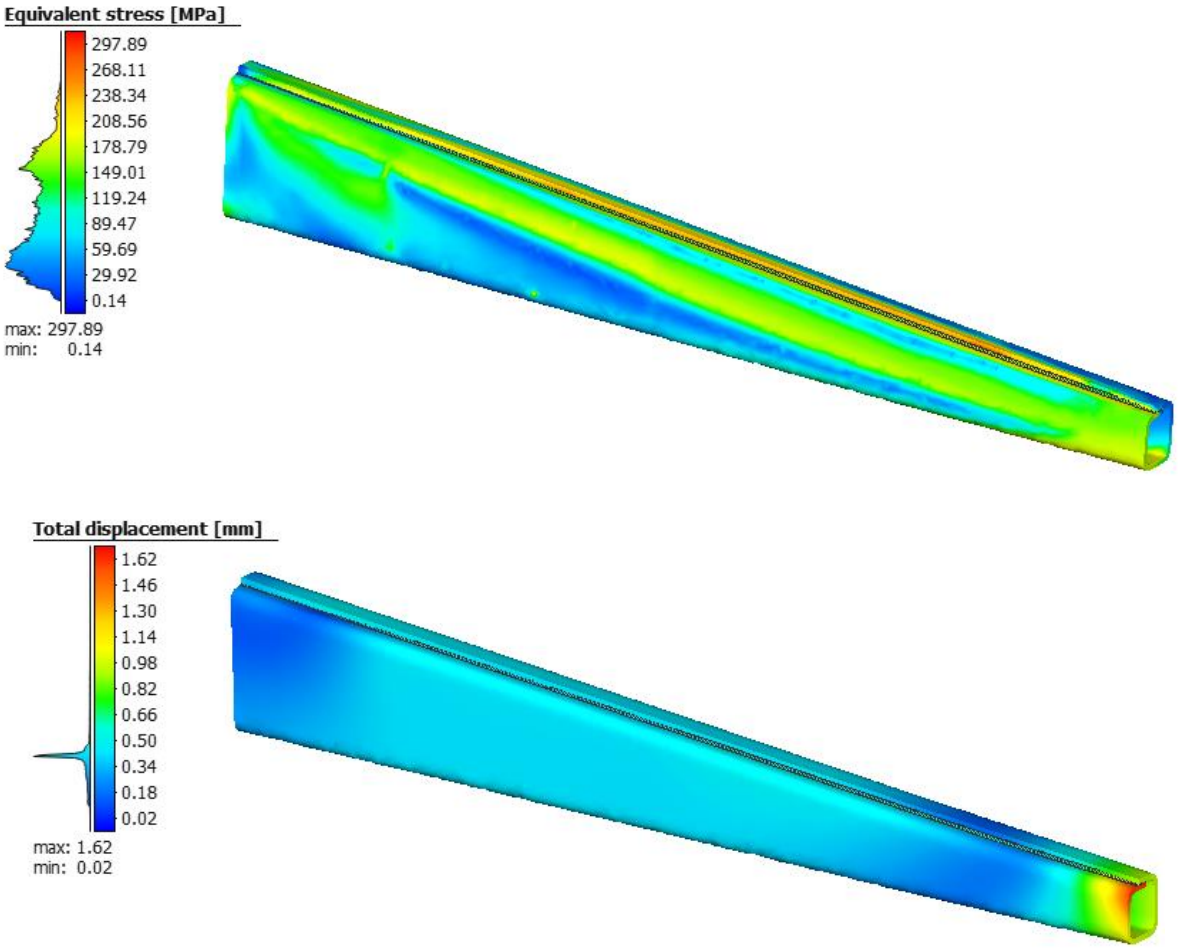
15 mm/s robot ilerleme hızında yapılan analiz sonucunda, kaynaklanan geometrinin soğuma sonrasında üzerinde gözlenen maksimum eşdeğer gerilme 301 MPa olarak tespit edilmiştir. Yine aynı geometri üzerinde toplam deformasyon miktarı en yüksek 2.21 mm olarak parçanın uç kısmında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5).



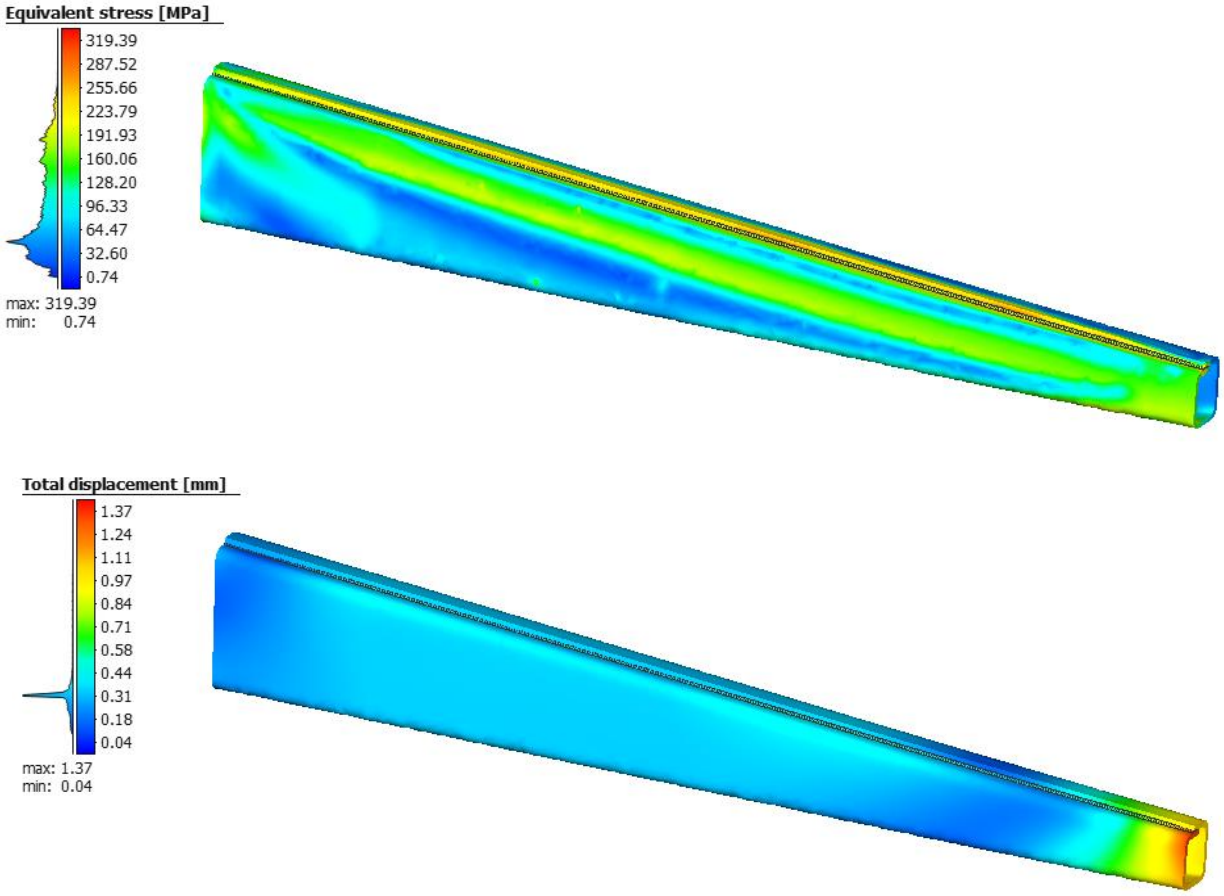

Şekil 5. 15 mm/s ilerleme hızında soğuma sonrası elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve toplam deformasyon miktarı

Soğuma sonrasında 20 mm/s ilerleme hızı için elde edilen termomekanik sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Analiz verilerine göre, parça üzerindeki maksimum eşdeğer gerilme 297 MPa seviyesinde gerçekleşirken; en yüksek deformasyon miktarı olan 1.62 mm, numunenin serbest ucunda tespit edilmiştir.

Robot ilerleme hızının 25 mm/s sınırına yükseltildiği analiz konfigürasyonunda elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Soğuma sonrası termomekanik verilere göre; kaynak bölgesinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme 319 MPa olarak ölçülmüştür. Parçanın geometrik kararlılığı açısından kritik olan toplam deformasyon miktarı ise, önceki düşük hızlı denemelere kıyasla beklenen düşüşü göstererek numunenin serbest uç noktasında 1.37 mm seviyesine gerilemiştir.




Şekil 6. 20 mm/s ilerleme hızında soğuma sonrası elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve toplam deformasyon miktarı




Şekil 7. 25 mm/s ilerleme hızında soğuma sonrası elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve toplam deformasyon miktarı

## IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada sabit 3 kW lazer gücü altında üç farklı robot ilerleme hızında (15, 20 ve 25 mm/s) gerçekleştirilen lazer kaynak işlemi, termal ve termomekanik sonlu elemanlar analizleri ile kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ilerleme hızının kaynak dikişi geometrisi ve parça üzerindeki deformasyon davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermiştir. İlerleme hızı arttıkça lineer ısı girdisinin azaldığı, bunun sonucunda ergime havuzunun daraldığı tespit edilmiştir. Buna karşılık düşük ilerleme hızlarında daha geniş kaynak dikişi, artan nufuziyet ve daha belirgin termal etkileşim bölgesi gözlemlenmiştir.

Soğuma sonrası elde edilen termomekanik sonuçlar incelendiğinde, toplam deformasyonun ve maksimum eşdeğer gerilmelerin ilerleme hızıyla değiştiği belirlenmiştir. Düşük hızda daha yüksek deformasyon ve daha geniş gerilme dağılımları ortaya çıkarken, hızın artmasıyla birlikte deformasyon miktarı azalmış ve parçanın geometrik stabilitesi artmıştır. Bu bulgular, lazer kaynak prosesinde ilerleme hızının hem kaynak kalitesi hem de boyutsal doğruluk açısından kritik bir optimizasyon parametresi olduğunu doğrulamaktadır. Çalışma, endüstriyel uygulamalarda daha kontrollü ve kalibre edilmiş proses parametreleri ile distorsiyonun azaltılması ve dikiş kalitesinin artırılması için sayısal modellemenin etkin bir araç olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR

[1] C. Yuce, M. Tutar, F. Karpat, and N. Yavuz, “The optimization of process parameters and microstructural characterization of fiber laser welded dissimilar HSLA and MART steel joints,” Metals (Basel)., vol. 6, no. 10, 2016, doi: 10.3390/met6100245.

[2] K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, and M. S. J. Hashmi, “Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile,” J. Mater. Process. Technol., vol. 164–165, pp. 978–985, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.060.

[3] O. Yılmaz, S. Özdemir, and C. Yüce, “Gaz Metal Ark Kaynağında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal ve Gerilme Analizi,” in 7. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, 2025, pp. 404–409.

[4] G. U. Uranga, M. A. Oiartzun, M. J. Cabello, C. Molpeceres, and M. Morales, “General Methodology for Laser Welding Finite Element Model Calibration,” 2024.

[5] J. Peng et al., “Numerical Simulation of Molten Pool Dynamics in Laser Deep Penetration Welding of Aluminum Alloys,” pp. 1–18, 2022.

[6] W. Bin, Z. Liu, M. Xu, Y. Hong, and D. Zhu, “Numerical simulation of efficient welding for thick plates in shipbuilding using simufact welding,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 2760, no. 1, pp. 0–8, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2760/1/012050.

[7] Y. Xie, J. Zhuang, B. Huang, Q. Chen, and G. Li, “Effect of different welding parameters on residual stress and deformation of 20/0Cr18Ni9 dissimilar metal arc-welding joint,” J. Adhes. Sci. Technol., vol. 34, no. 15, pp. 1628–1652, 2020, doi: 10.1080/01694243.2020.1715670.