

Journal of Engineering Faculty

cumfad.cumhuriyet.edu.tr Founded: 2023 Available onlin

Available online, ISSN:3023-7203 Pu

Publisher: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Thermo-Mechanical Analysis in Directed Energy Deposition Additive Manufacturing: Prediction of Distortion and Residual Stresses

Büşra Aslan Çığır^{1,a,*}, Oğuzhan Yılmaz^{2,b}

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mimar Sinan Mah. Eflak Cd. No:177, 16310 Yıldırım/Bursa, Türkiye ²Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eti Mah. Yükseliş Sk. No:5, 06570 Çankaya, Ankara, Türkiye *Corresponding author

Research Article ABSTRACT

Received:27/04/2025 Accepted: 14/05/2025

History

Thermo-Mechanical Analysis in Directed Energy Deposition Additive Manufacturing: Prediction of Distortion and Residual Stresses

Directed Energy Deposition (DED) is a metal additive manufacturing technique that enables the production of complex geometries by melting material using an energy source such as a laser, electron beam, or arc, and depositing it layer by layer. However, the high thermal gradients generated during the process can lead to residual stresses and distortions, negatively affecting the mechanical properties of the fabricated parts. In this study, a thermo-mechanical finite element-based numerical model was developed to predict the temperature distribution, distortion, and residual stresses during the DED process. Simulations were conducted using Abaqus software. The findings indicate that rapid heating and cooling cause the highest distortions to occur in the initial layers. This study provides insights into optimizing process parameters to enhance manufacturing quality and improve material properties during DED. In future work, advanced fluid dynamics effects such as the Marangoni effect, buoyancy, and recoil pressure can be considered to improve the model's accuracy.

Copyright

<u>c</u> 0 S

This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Süreç

Geliş: 27/04/2025 Kabul: 14/05/2025 *Keywords:* Residual Stress; Distortion Prediction; Additive Manufacturing; Finite Element Method; Thermo-Mechanical Analysis; Directed Energy Deposition

Yönlendirilmiş Enerji Yığma (YEY) Eklemeli İmalat Yönteminde Termo-Mekanik Analiz: Çarpılma ve Artık Gerilmelerin Tahmini

ÖZ

Yönlendirilmiş Enerji Yığma (YEY), malzemenin lazer, elektron ışını ve ark gibi bir enerji kaynağı ile malzemeyi ergiterek katmanlar halinde biriktirilmesiyle karmaşık geometrilerin üretimine imkân sağlayan bir metal eklemeli imalat yöntemidir. Ancak, üretim esnasında oluşan yüksek sıcaklık gradyanları, artık gerilmeler ve çarpılmalara yol açarak üretilen parçaların mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu çalışmada, YEY sürecinde ki sıcaklık dağılımını, çarpılmaları ve artık gerilmeleri tahmin etmek amacıyla, termo-mekanik sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal bir model geliştirilmiştir. Abaqus yazılımı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bulgular, hızlı ısıtma ve soğutmanın, en yüksek çarpılmaların ilk katmanlarda meydana gelmesine neden olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, YEY üretim esnasında, üretim kalitesini artırmak ve m65alzeme özelliklerini iyileştirmek için üretim parametrelerinin optimize edilmesine yönelik bilgiler sunmaktadır. Gelecekte ki çalışmalarda, modelin doğruluğunu artırmak için Marangoni etkisi, kaldırma kuvveti ve geri tepme basıncı gibi ileri düzey akışkan dinamiği etkileri dikkate alınabilir.

Anahtar Kelimeler: Artık Gerilme; Çarpılma Tahmini; Eklemeli İmalat; Sonlu Elemanlar Yöntemi; Termo-Mekanik Analiz; Yönlendirilmiş Enerji Yığma



0000-0003-3035-1680 00RCID 00RCID



0000-0002-2641-2324
ORCID
ORCID

How to Cite: Aslan Çığır B., Yılmaz O. (2025). Thermo-Mechanical Analysis in Directed Energy Deposition Additive Manufacturing: Prediction of Distortion and Residual Stresses, Journal of Engineering Faculty, 3(1): 55–63.

Giriş

Eklemeli imalat, karmaşık parçalar için tasarım özgürlüğü ve etkin bir sekilde üretilmesi için imkân yöntemidir. Geleneksel sağlayan imalat imalat yöntemlerinden farklı olarak eklemeli imalat, malzemeyi katman katman ekleyerek ve bunu bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelini kullanarak üretim yapar. Yönlendirilmiş Enerji Yığma (YEY), metal eklemeli üretim yöntemlerinden biridir. YEY, lazer, elektron ışını veya plazma arkı gibi bir enerji kaynağı kullanarak metal tozunu ergitir ve bu ergimiş malzemeyi katmanlar halinde yığarak parçayı oluşturur. YEY, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde, onarımında ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılır. Havacılık, otomotiv ve enerji gibi yüksek hassasiyet ve performans ihtiyacı olan sektörler, YEY'in sunduğu üretim esnekliği ve kişiselleştirilebilir üretim imkânlarından yararlanmaktadır[1-4].

Geometrilerden istenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için parça kalitesini önemli sekilde etkileyen çarpılma, kalıntı gerilme, büzülme ve gözeneklilik gibi kusurların önlenmesi amacıyla üretim parametreleri (lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer tarama stratejisi ve toz besleme hızı vb.) üzerinde çalışılması gereklidir. Uygun üretim parametrelerinin seçilmesiyle YEY ile üretilen parçaların kalitesi arttırılabilir. Literatür çalışmalarına göre, YEY kalitesini etkileyen en önemli faktörler katmanlar arası mesafe, toz besleme hızı, lazer tarama stratejisi, lazer gücü ve lazer spot çapıdır. Parametreler yığılan malzemenin mikro-yapısını da etkileyebilir ve bu da parçalardan beklenen özellikleri etkileyebilir.

Sonlu Eleman (SE) yöntemi gibi sayısal modelleme yöntemleri, Yönlendirilmiş Enerji Yığma (YEY) üretiminin optimize edilmesi ve potansiyel sorunların önceden tahmin edilebilmesi için önemlidir. Özellikle sıcaklık dağılımı, kalıntı gerilmeler ve çarpılmalar gibi termomekanik parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, üretim sürecinin daha iyi kontrol edilmesine imkân sağlarken, deneysel çalışmalara olan ihtiyacı da azaltmaktadır. Yapılan araştırmalar da, üretim yöntemlerini geliştirmek ve parça kalitesini artırmak için yeni yaklaşımlar bulunmaktadır [5-6].

Ayrıca, YEY üretimin de oluşan yüksek sıcaklık gradyanları, malzeme üzerinde kalıcı gerilmeler ve şekil bozulmalarına neden olur. Bu durum, üretilen veya onarılan parçaların yapısal bütünlüğünü ve kullanım süresini etkileyebilir. Literatürde, bu olumsuz etkilerin deneysel olarak incelenmesi çoğu zaman sınırlı kalmakta ve yüksek maliyetler gerektirmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar (SE) yöntemi gibi nümerik analiz yöntemleri, meydana gelebilecek olan etkilerin tahmini ve kontrol edilebilmesi için büyük bir öneme sahiptir. Bu yöntemler, yalnızca sorunları önceden tahmin etmekle kalmayıp, aynı zamanda üretim parametrelerinin optimize edilmesi için de önemlidir [7].

Bu çalışmada, YEY yöntemi üretim sırasında oluşabilecek problemlerin tahmin edilebilmesi için geliştirilmiş modelleme ele alınacaktır. Amaç, YEY'in daha geniş endüstriyel uygulamalara dâhil edilmesini destekleyecek şekilde, üretimin kalitesini artırmak ve daha tahmin edilebilir bir üretim süreci sunmaktır. YEY üretim süreci için birleşik bir termo-mekanik analiz modeli geliştirilmiştir. Termal dağılım, parçanın mekanik etkisini ve termal davranışını belirlemiştir. Bu nedenle, geliştirilen model, ısı transfer probleminin sonuçlarının mekanik simülasyon da termal gerilme şeklinde girdi olarak kullanılmasını sağlamıştır. Modelleme ve simülasyon, Abaqus yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kısaca, katman katman üretim yapan eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Yönlendirilmiş Enerji Yığma yönteminin deformasyonlarını ve kalıntı gerilmelerini öngörmek için sonlu eleman simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Materyal ve Metot

Sonlu Elemanlar Modeli, YEY üretimi sırasında sıcaklık ve gerilmenin zaman içindeki değişimini tahmin etmek için kullanılır. Bunun için, belirli bir yol vardır. Birinci adım, ısı transferi problemini çözerek geçici sıcaklık dağılımı bulunur. Daha sonra, bu sıcaklık dağılımı, mekanik analizine entegre edilir. İki önemli faktör göz önünde bulundurulur: İlk olarak, sıcaklık değişimleri, malzeme içinde düzensiz bir termal genleşmeye yol açar ve bu durum, stres hesaplamalarına dâhil edilir. İkinci olarak, malzeme özelliklerinin sıcaklıkla birlikte değişmesi dikkate alınır. Örneğin, ısıl iletkenlik ve Young modülü gibi termofiziksel ve mekanik özellikler, hesaplanan sıcaklık alanına göre dinamik olarak güncellenir. Bu şekilde, gerilme evrimi daha doğru bir şekilde tahmin edilebilir.

Yığma malzemesi Inconel 718 ve alt tabla için de SS316L kullanılmıştır. SS316L ve Inc718'in bileşimi tablo 1 ve malzeme özellikleri de tablo 2 de sunulmuştur [8-9].

Tablo 1. Inc718 ve SS316L'nir	Element ve Kimyasal	Kompozisyon Orani (%)
-------------------------------	---------------------	-----------------------

Alaşı m	С	Mn	Si	Cr	Ni	Мо	Nb	Ti	Со	Al	Fe	Diğ.
SS31 6L	0,02	1,1	0,6	16,9	11,0 8	2,3	-	-	-	-	Den	_
IN718	0,02 4	0,0 9	0,0 7	17,6 8	54,2	2,9 5	5,1 7	0,9 6	0,2 8	0,4 7	18,0 2	0,08 5

Özellik (Birim)	Sembol	IN718	316L
Katı Sıcaklığı (K)	Ts	1523	1722
Sıvı Sıcaklığı (K)	TI	1608	1790
Buharlaşma Sıcaklığı (K)	Tv	3188	3090
Erime Gizli Isısı (J·kg ⁻¹)	Lm	210	270
Buharlaşma Gizli Isısı (J·kg ⁻¹)	Lv	6,400,000	7,450,000
Katı Yoğunluğu (kg·m⁻³)	ρs	8190 - 0.392 × (T - 298)	8004 + 0.0290 × T - 3.9 × 10 ⁻⁵ T ²
Sıvı Yoğunluğu (kg·m⁻³)	ρΙ	7400 - 0.80 × (T - 1608)	$7433 + 0.039 \times T - 1.8 \times 10^{-4} T^{2}$
Isıl İletkenlik (W·m⁻¹·K⁻¹)	λ	$0.56 + 2.9 \times 10^{-7}$ T - 10^{-6} T ²	9.243 + 0.015710 T
Katı Özgül Isı (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Cs	$360 + 0.0257 \times T - 4 \times 10^{-7}T^2$	462 + 0.134 T
Yüzey Gerilimi (N·m⁻¹)	γ	1.84 - 0.0001 × (T - 1650)	1.6

Tablo 2. Inc718 ve SS316L'nin Malzeme Özellikleri

Termal modeli geliştirmek için ABAQUS sonlu elemanlar (SE) yazılımı kullanılmıştır Mesh 8 düğümlü DC3D8 (8 düğümlü lineer ısı transfer mesh) ile lineer altıgen elemanlarla yapılandırılmıştır. Mekanik analiz için ise kütüphane üzerinden doğrusal elemanlar C3D8 kullanılmıştır. Tabla için bu bölgedeki düşük termal gradyanlar nedeniyle oluşturulan mesh daha kaba hazırlanmıştır.

Model oluşturulurken ve sonlu eleman analizinin basitleştirmek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Alt tabaka yüzeyi koaksiyel nozul eksenine ve yerçekimine diktir;
- Eriyik havuzu difüzyonu ihmal edilmiştir;
- Lazer ışını, tarama yönünde hareket eden düzgün dağılımlı dairesel bir ısı kaynağı olarak kabul edilir ve
- ısı akısı halkasının yarıçapı lazer spot boyutuna eşittir;
- Güç dağılımı Goldak ısı dağılımıdır;
- Alt tabaka, toz jetinin odak noktasına yerleştirilir. Bu konumda, toz dağılımı dairesel Gauss'tur;
- Konveksiyondan kaynaklanan Marangoni akışı ihmal edilmiştir;
- Ortam sıcaklığının 300 K olduğu varsayılmıştır [10];

YEY'de, alt tabakanın termal iletkenliği, Marangoni akışlarından kaynaklanan konveksiyon ve taşıyıcı gaz tarafından oluşturulan konveksiyon ile birlikte eriyik havuzu dinamiklerine etkileyen temel unsurlardır. Termal radyasyon da çok önemlidir. Bunun nedeni yüksek yüzey sıcaklığıdır.

Aşağıda termal davranışın modele nasıl dâhil edildiğine dair açıklamalar belirtilmiştir. Enerji dengesi denklemi, yani ısı transferi denklemi aşağıdaki gibi formüle edilmiştir;

 $\rho C_{\rm p} \frac{dT}{dt} = -\nabla q(r, t) + Q(1)$

Burada p malzeme yoğunluğu, Cp özgül ısı kapasitesi, T sıcaklık, t zaman, Q ısı girdisi, r göreli konum vektörü ve q Fourier ısı iletimi yasasına göre ısı akısı yoğunluğudur,

 $q = -k\nabla T \qquad (2)$

Burada k malzemenin termal iletkenliğidir. Başlangıç model sıcaklığı ortam sıcaklığıdır.

 $T(x, y, z, 0) = T_0$ (3) Burada TO formüldeki ortam sıcaklığıdır.

Toz partikülleri inert bir gaz aracılığıyla eriyik havuzuna enjekte edilir. Bu gaz akışı, eriyik havuzunun üst kısmında zorlanmış konveksiyon oluşturur ve türbülanslı yapısı nedeniyle iz bırakır. Bu nedenle, konveksiyon mekanizmasının bir zorlanmış konveksiyon mekanizması olduğu varsayılmaktadır. Bu modelde, taşıyıcı gazın etki yarıçapı içindeki konveksiyon katsayısının değeri tekdüze olarak kabul edilmiş ve eriyik havuzu ve biriktirme yoluna uygulanmıştır. Isı dağılımını hesaplamak için Newton'un konveksiyon tipi soğutma yasası kullanılmıştır:

 $q_{con} = h(T - T_0)$ (4) burada h konveksiyon katsayısıdır.

Yüksek sıcaklıklarda, YEY süreçlerinde, termal radyasyon çok önemli hale gelir. Bu ısı transferi mekanizmasını modele dâhil etmek için yüzey emisivite katsayısı ɛr kullanılmıştır. Bu modeldeki varsayım yüzey emisivitesinin sabit olduğudur. Stefan-Boltzmann kuralına göre ışınımsal ısı kaybı için ifade aşağıda ki gibidir;

 $q_{rad} = \in \sigma(T^4 - T_0^4) \quad (5)$

Burada ϵ radyasyon katsayısı ve σ Stefan-Boltzmann sabitidir [11-12].

Alt tabakayı ve tozu eritmek için gereken enerji, YEY üretimin de bir lazer ışını olan ısı kaynağı tarafından sağlanır. Güvenilir sonuçlar elde etmek için lazer güç dağılımının sayısal olarak tanımlanması çok önemlidir. Bu tez de sayısal simülasyonlar da kullanılan ısı kaynağı modeli Goldak çift elipsoid modelidir. Şekil 1 modelin, şemasını göstermektedir.

Isı kaynağı modeli şu şekilde gösterilir:

$$Q = \frac{6\sqrt{3}\eta Pf_i}{\pi\sqrt{\pi}abc_i}exp\left[-(\frac{3x'^2}{a^2} + \frac{3y'^2}{b^2} + \frac{3xz'^2}{c^2})\right] (i=1,2)$$
(6)

Burada P ısı kaynağının gücü, η enerji soğurma oranı, f1 ve f2 sırasıyla ön ve arka elipsoidlerin enerji dağılım katsayılarıdır ve f1 + f2 = 2'yi sağlamalıdır ve a, b, c1 ve c2 ısı kaynağının şekil parametreleridir.

Isı akısı dağılımının ön ve arka kısımları aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır [14].

 $f_i = \alpha \frac{c_f}{c_f + c_r} \tag{7}$

Mekanik hesaplamalar, analiz sürecinin ikinci aşamasını oluşturur ve statik denge denklemi temel alınarak gerçekleştirilir:

 $(\nabla \cdot \sigma + F) = 0$ (8)

Bu denklemde:

- σ: Gerilme tensörü
- F: Birim hacim başına düşen cisim kuvveti
- ∇: Diverjans operatörü

Mekanik analiz sırasında genel deformasyon, aşağıdaki üç farklı bileşenin toplamı olarak tanımlanır:

- ε^e Elastik deformasyon
- ε^p Plastik deformasyon
- εth Termal deformasyon

Bu toplam deformasyon şu şekilde ifade edilir [15]:

 $\varepsilon^{\text{toplam}} = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{\text{th}}$ (9)

Mekanik Davranış Denklemi:

 $\sigma = C. \varepsilon^e \qquad (10)$

Bu denklemde:

- C Dördüncü dereceden elastik sertlik tensörü
- σ Gerilme tensörü
- ε^e Elastik deformasyon

Şekil 2'de sunulan model, iki bölümden oluşmaktadır: bir taban ve duvardan oluşmaktadır. Yığma 10 mm genişliğinde, 50 mm uzunluğunda ve 6 mm yüksekliğindedir. Her bir katman 3.35 mm genişlikte ve 0.9071 mm yükseklikte tasarlanmıştır. Kullanılan taban, 65 mm uzunluğunda, 15 mm genişliğinde ve 5 mm kalınlığındadır [16-18].

Geçici ısı transferi ve statik yapı esasına dayalı olarak termo-mekanik bağlantılı bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Baskı sırasında, termal yükler parçaya uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, statik yapısal analiz, sıcaklık alanının geçmişine bağlı olarak yürütülmüştür. İleri seviye simülasyonlar, zaman ve mekân da çok hassas bir tanımlama yapılmasını sağlar.

Şekil 3, yığma duvarının termo-mekanik analizi için Abaqus yazılımı tarafından oluşturulan model geometrisini ve sonlu elemanlar mesh yapısını göstermektedir. Aynı mesh yapısı hem yapısal analiz hem de termal analiz için kullanılmıştır. Tabla mesh, 2936 adet Hex-8 eleman ve duvar 4708 adet Hex-8 eleman içermektedir. Üç boyutlu termo-mekanik bağlantı uygulanmıştır. Bu bağlantıda, termal analiz lazer enerjisini serbest bırakır ve bu enerji, parçanın yapısal modeline uygulanır [19].





Şek. 2. Model geometrisi: taban plakası ve yığılan duvar.



Şek. 3. Sonlu Elemanlar Yöntemi simülasyonunda kullanılan mesh geometrisi.

Bulgular ve Tartışma

Termal Sonuçlar:

YEY üretim sırasında, enerji kaynağı (lazer) ve metal tozları kullanılarak parçalar, katman katman eklenerek üretilir. 1. katmandan 12. katmana kadar olan üretim süreci ve farklı zaman aralıklarındaki sıcaklık simülasyonları, ergimiş havuzun oluşumu ve katılaşma süreci şekil 4'te gösterilmiştir. Hazırlanan simülasyon da, Goldak çift elipsoid ısı dağılım modeli kullanılmış ve bu model, yığma ve alt tabla çevresindeki sıcaklık dağılımını hesaplamak için seçilmiştir.

Sıcaklık dağılımı, yığılan (Inc718) malzemesinin likidüs sıcaklığının üzerinde olduğunda malzeme erir ve erimiş havuz oluşur. Soğuma sırasında metal katılaşarak yeni bir katman meydana getirir. Bu süreçte, iletim, konveksiyon ve radyasyon gibi ısı transfer mekanizmaları etkindir. Simülasyon sonuçları, sıcaklık alanı açısından beklenen sonuçlar olduğundan, doğru sıcaklık ve artık gerilme tahminleri alınmıştır. Bu analiz, YEY üretim parametre optimizasyonu ve kalitesinin iyileştirilmesi için bilgiler sunmaktadır.

YEY sırasında eklenen her katmanın sıcaklık değişimi 12 katman için simüle edilip Şekil 5'de gösterilmiştir.

- Katman 2'te maksimum sıcaklık 4443°C olarak okunmuştur. Bu, alt katmanlardan gelen ısı birikimi ve iletimle taban plakasına olan ısı transferinin azalmasından kaynaklanmaktadır.
- Katman 12'nin maksimum sıcaklığı ise 3655°C olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklık, Katman 11'e göre daha düşüktür, çünkü Katman 12 daha geniş bir yüzey alanına sahip olduğu için ortama daha fazla radyasyon ısı transferi gerçekleşmiştir.



Şek. 4. Farklı zaman aralıklarında 1. katmandan 12. katmana kadar simüle edilen katmanlar arası sıcaklık alanı (a) Katman 1 Step Time 38 sn, (b) Katman 2 Step Time 80.72 sn, (c) Katman 4 Step Time 166.4 sn, (d) Katman 6 Step Time 252. sn, (e) Katman 11 Step Time 465.4 sn, (f) Katman 12 Step Time 508.4 sn.

Şekil 5 de sıcaklık değişimi için belirlenen yol gösterilmiştir. Şekil 6, yönlendirilmiş enerji yığma sürecinde farklı noktalar için zamanla sıcaklık değişimini göstermektedir. İlk aşamada, sıcaklık kademeli olarak artarken, 10 saniye civarında ani bir yükseliş gözlemlenmesi lazerin malzemeye etki etmeye başladığını göstermektedir. Maksimum sıcaklık değerleri 3000 K (~2726°C) civarına ulaşarak erimiş havuz oluşumunu desteklemektedir. Soğuma evresi, yaklaşık 1000 saniye civarında başlamış olup, taban malzeme sıcaklığı daha yavaş düşerek soğutma etkisini göstermektedir. Part-1-1'e ait noktalar yüksek sıcaklık değişimleri sergilerken, Substrate-1 noktaları daha düşük sıcaklıklara sahiptir. 100-1000 saniye arasında bazı noktaların sıcaklık eğrilerinde düzensiz dalgalanmalar görülmesi, lazer hareketi, malzemenin yeniden ergimesi veya modelleme sırasında kullanılan zaman adımı büyüklüğüne bağlı olduğundandır.





Termo-Mekanik Bağlantı Kullanılarak Çarpılma Tahmini

sonrasında, Termal analiz sonlu elemanlar modelindeki her düğümdeki sıcaklık geçmişi, mekanik analizde termal gerilme olarak kullanılmıştır. Şekil 7, x-(boyuna), y- (enine) ve z- (kalınlık) yönlerinde çarpılma dağılımını göstermektedir. Svetlizky ve arkadaşları [10], YEY yöntemiyle üretilen Inconel 625 parçalarındaki çarpılmanın, biriktirilen katman sayısına ve taban malzemenin başlangıç sıcaklığına bağlı olduğunu belirlemiştir. Taban malzeme ile biriktirilen katman birleştiğinde, sıcaklık gradyanı önemli ölçüde artmakta ve bu durum artık gerilmelerin yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, ilk katman toplam çarpılmanın %50'sinden sorumludur [20].

Şekil 8, Abaqus simülasyonu kullanılarak elde edilen taban malzeme üzerindeki çarpılma değişimini karşılaştırmaktadır. Substrate-1 N:39 düğüm noktasındaki yer değiştirme değişimini zamanla göstermektedir. Başlangıçta büyük bir yer değiştirme gözlemlenirken, zaman ilerledikçe bu değer stabil hale gelmektedir. Kırmızı eğri (U: Magnitude), toplam yer değiştirmeyi gösterirken, siyah (U1), mor (U2) ve yeşil (U3) eğrileri sırasıyla x, y ve z yönlerindeki bileşenleri temsil etmektedir. Başlangıç anında (t \approx 0), hızlı bir yer değiştirme artışı gözlemlenmiş olup, bu durum lazer kaynağının etkisiyle oluşan termal genleşmeden kaynaklanmaktadır. Zaman ilerledikçe (t > 2.0E3), ısıl etkilerin azalmasıyla yer değiştirme değerleri düşüş göstermekte ve sistem kararlı bir duruma ulaşmaktadır. Özellikle U1 (siyah eğri), negatif değerlere ulaşarak taban malzemenin x yönünde büzülme yaşadığını göstermektedir. Genel olarak, termal yüklerin neden olduğu ilk genleşme ve ardından gelen soğuma ile yer değiştirmelerin azaldığı, çarpılmanın zamanla dengelendiği görülmektedir.





Termal model tamamlandıktan sonra, termal geçmiş mekanik analize önceden tanımlanmış bir alan olarak aktarılmış ve distorsiyon tahmini geliştirilmiştir. Lazer gücü, katman biriktirme sürecinden sürekli olarak taban malzemeye iletilerek, termal genleşmeye bağlı çarpılmalara neden olmaktadır. Soğuma sürecinin ardından, sıcaklığın azalmasıyla birlikte malzemenin rijitliği geri kazanılmaktadır. Bu büyük distorsiyon, soğuk taban malzemeye uygulanan ısı kaynağının yarattığı yüksek sıcaklık gradyanlarından kaynaklanmaktadır. Ancak, YEY sürecinin ilk katmanlarında soğuk taban malzeme hızla ısıyı absorbe ettiğinden, ergime havuzunun boyutu küçülmekte ve biriktirilen katman kalınlığı azalmaktadır.

Gerilme Dağılımı

Mekanik modelin ağ yapısı, termal modelle aynı şekilde oluşturulmuştur. Yerinde distorsiyon ölçümlerine ek olarak, farklı depozisyon süreçleri sırasında gerilme dağılımı da izlenmiştir. Şekil 9, soğuma sonrası artık gerilme dağılımını temsil etmektedir.

Şekilde gösterildiği gibi, 12 katman biriktirme işlemi sonrasında termal gerilme dağılımı bulutlu bir harita şeklinde sunulmuştur. Malzemenin ergime sürecinin başlangıcında, gerilme oldukça ihmal edilebilir düzeydedir. Sıcaklık gradyanındaki artış, akma mukavemetini aşan termal gerilmelerin oluşmasına ve plastik deformasyona neden olmaktadır [21].

Soğuma sürecinde, katılaşan metal büzülme etkisi göstererek kademeli olarak termal gerilmeler oluşturur. Soğuma tamamlandıktan sonra, termal gerilmeler dengelenir ve artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin birikimi, üretimin

mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir [21]. Farklı termal genleşme katsayılarına bağlı olarak, soğuma sonrası büzülme meydana gelir, bu da malzemenin iç gerilmelerinde değişikliklere yol açar.

Termal gerilme, sıcaklık gradyanına bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklık gradyanı çok büyük olduğunda, termal gerilme artarak plastik deformasyona neden olmaktadır. Katman biriktirme işlemi devam ettikçe, taban malzemenin sıcaklığı kademeli olarak artmakta ve ısı akışı ile ısı yayılımı arasında bir denge sağlanarak termal denge durumu oluşmaktadır. Soğuma tamamlandıktan sonra, maksimum artık gerilme yaklaşık 1019 MPa olarak stabilize olmaktadır ve bu maksimum gerilme, büyük sıcaklık gradyanı nedeniyle basılan parça ile taban malzeme arasındaki birleşim bölgesinde meydana gelmektedir.



Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, Yönlendirilmiş Enerji Yığma (YEY) yöntemiyle üretilen parçaların termo-mekanik analizine odaklanılmış ve sıcaklık dağılımı, artık gerilmeler ve çarpılmaların incelenmesi amacıyla bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Abaqus yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar, üretim sürecinde oluşan sıcaklık gradyanlarının parça üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Yapılan analizler sonucunda, yüksek sıcaklık gradyanlarının ilk katmanlarda daha büyük çarpılmalara neden olduğu, soğuma sürecinde ise artık gerilmelerin dengeye ulaştığı tespit edilmiştir. Distorsiyon analizi, üretim sürecinin ilk katmanlarında yüksek sıcaklık farklarından kaynaklanan deformasyonların daha belirgin olduğunu, katman sayısı arttıkça sıcaklık birikimi nedeniyle bu etkilerin azaldığını ortaya koymuştur. Bu durum, YEY süreçlerinde optimum üretim parametrelerinin belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen termo-mekanik analiz, YEY sürecinin daha hassas kontrol edilmesine ve süreç optimizasyonuna yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, Marangoni akışı ve geri tepme basıncı gibi sıvı faz etkilerinin modele dahil edilmesi, elde edilen sonuçların doğruluğunu artırabilir. Ayrıca, deneysel verilerle daha kapsamlı karşılaştırmalar yapılarak modelin endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliği test edilebilir. Bu araştırma, YEY yöntemiyle üretilen parçaların mekanik performansını artırmak ve üretim süreçlerini iyileştirmek için simülasyon tabanlı yaklaşımların önemini bir kez daha göstermektedir. Çalışma sonuçları, havacılık,

otomotiv ve enerji sektörlerinde YEY sürecinin daha güvenilir ve tekrarlanabilir hale getirilmesine katkı sağlayacak şekilde değerlendirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1002 – Hızlı Destek Programı kapsamında desteklenen [Proje No: 223M403] numaralı proje ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından ADEP (Araştırma Destek Programı) kapsamında sağlanan [Proje No: FGA-2024-9152] desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Sağlanan bu kıymetli desteklerden dolayı ilgili kurumlara teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Carter, D. C. (2017). A study on CAM based path planning for hybrid machining center with direct energy deposition. University of California, Davis.
- [2] Vundru, C., Singh, R., Yan, W., & Karagadde, S. (2021). A comprehensive analytical-computational model of laser directed energy deposition to predict deposition geometry and integrity for sustainable repair. *International Journal of Mechanical Sciences*, 211, 106790.
- [3] Biyikli, M., Karagoz, T., Calli, M., Muslim, T., Ozalp, A. A., & Bayram, A. (2023). Single track geometry prediction of laser metal deposited 316L-Si via multi-physics modelling and regression analysis with experimental validation. *Metals and Materials International, 29*(3), 807-820.
- [4] Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., ... & Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295.

- [5] Noh, I., Jeon, J., & Lee, S. W. (2023). A Study on Metallographic and Machining Characteristics of Functionally Graded Material Produced by Directed Energy Deposition. *Crystals*, 13(10), 1491.
- [6] Xin, B., Wang, Y., Zhu, W., Qin, J., & Cao, G. (2024). Evaluation of powder mixing homogeneity for laser-directed energy deposition (L-DED) of functionally graded materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(9), 4729-4747.
- [7] Nain, V., Engel, T., Carin, M., Boisselier, D., & Seguy, L. (2021). Development of an elongated ellipsoid heat Source model to reduce computation time for directed energy deposition process. *Frontiers in Materials*, *8*, 747389.
- [8] Pereira, J. C., Borovkov, H., Zubiri, F., Guerra, M. C., & Caminos, J. (2021). Optimization of thin walls with sharp corners in SS316L and IN718 alloys manufactured with laser metal deposition. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(1), 5.
- [9] Zhou, J., Shen, L., Yang, X., Li, R., & Pan, K. (2025). Tuning pores and mechanical properties for the heterogeneous interface of laser directed energy deposited IN718/316L laminate via in-situ laser surface remelting. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 177872.
- [10] Samad, Z., Nor, N. M., & Fauzi, E. R. I. (2019, June). Thermo-Mechanical Simulation of Temperature Distribution and Prediction of Heat-Affected Zone Size in MIG Welding Process on Aluminium Alloy EN AW 6082-T6. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 530, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- [11] Hagen, L., Yu, Z., Clarke, A., Clarke, K., Tate, S., Petrella, A., & Klemm-Toole, J. (2023). High deposition rate wire-arc directed energy deposition of 316L and 316LSi: Process exploration and modelling. *Materials Science and Engineering: A*, 145044.
- [12] Dortkasli, K., Isik, M., & Demir, E. (2022). A thermal finite element model with efficient computation of surface heat fluxes for directedenergy deposition process and application to laser metal deposition of IN718. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 369-382.
- [13] Song, X., Feih, S., Zhai, W., Sun, C. N., Li, F., Maiti, R., ... & Korsunsky, A. M. (2020). Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components. *Materials & design*, 193, 108779.
- [14] Kiran, A., Li, Y., Hodek, J., Brázda, M., Urbánek, M., & Džugan, J. (2022). Heat source modeling and residual stress analysis for metal directed energy deposition additive manufacturing. *Materials*, 15(7), 2545.
- [15] Kiran, A., Hodek, J., Vavřík, J., Urbánek, M., & Džugan, J. (2020). Numerical simulation development and computational optimization for directed energy deposition additive manufacturing process. *Materials*, 13(11), 2666.
- [16] Zhao, L., Li, Y., Xu, R., Guo, Z., Liu, Y., Feng, S., ... & Zheng, K. (2025). Numerical and experimental investigations on the thermomechanical oscillations of additively manufactured stainless steel parts. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 240*, 126666.
- [17] https://caeassistant.com/product/3d-printing-simulation-withfusion-deposition-modeling-fdm-in-abaqus/#1699942463782-2948e770- c5c2
- [18] https://help.3ds.com/2022x/English/DSDoc/SIMA3DXEXARefMap/ simaexa-c-amdirectedenergydeposition.htm?contextscope= cloud &id=fc507aa8e1194ac7b74e0adbb35f2ace
- [19] Ghanavati, R., Naffakh-Moosavy, H., Moradi, M., Gadalińska, E., & Saboori, A. (2023). Residual stresses and distortion in additivelymanufactured SS316L-IN718 multi-material by laser-directed energy deposition: A validated numerical-statistical approach. *Journal of Manufacturing Processes*, *108*, 292-309.
- [20] Lu, X.; Lin, X.; Chiumenti, M.; Cervera, M.; Hu, Y.; Ji, X.; Ma, L.; Yang, H.; Huang, W. Residual stress and distortion of rectangular and Sshaped Ti-6Al-4V parts by Directed Energy Deposition: Modelling and experimental calibration. Addit. Manuf. 2019, 26, 166–179.
- [21] Glaspell, A.; De la Peña, J.A.D.; Ryu, J.J.; Choo, K. Thermal Stress Characteristics of Dissimilar Joints Joining Ti-64 and CCM via Linear Friction Welding. Energies 2022, 15, 5588
- [22] Mukherjee, T.; Zhang, W.; DebRoy, T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. Comput. Mater. Sci. 2017, 126, 360–372.