

KATILIM SERTİFİKASI

“ERKAN CANER ÖZKAT”

*19 Temmuz 2023 tarihinde Türk Havacılık Uzay Sanayii tarafından düzenlenen
LIFT UP Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri Konferansı'na katılımınız için teşekkür ederiz.*

Prof. Dr. Temel KOTİL
*Türk Havacılık Uzay Sanayii
Yönetim Kurulu Üyesi ve Genel Müdürü*



Kafes Yapıların Eklemeli İmalatında Distorsiyon Analizi

Distortion Analysis in Additive Manufacturing of Lattice Structures

Öğrenci-1 Ümmühan Çakır Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Rize, Türkiye ummuhan_cakir19@erdogan.edu.tr	Akademik Danışman Ad Soyad Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Rize, Türkiye erkancaner.ozkat@erdogan.edu.tr	Sanayi Danışmanı Tuba Kahveci TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. Ankara, Türkiye tuba.kahveci@tai.com.tr
---	---	---

Özetçe—Eklemeli İmalat (AM), karmaşık geometrilerin üretilmesi, malzeme atığının azaltılması ve özelleştirilmiş parçaların üretimi gibi avantajları nedeniyle popüler hale gelen bir imalat yöntemidir. Ancak, AM sürecindeki katman katman malzeme birikimi, işlevsel ve güvenilir parçaların üretimini zorlaştıran bazı zorlukları beraberinde getirir. Bu çalışma, Lattice yapıya sahip bir parçanın süreç parametrelerinin distorsiyon üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, laser gücünün artması ve ilerleme hızının azalmasıyla distorsiyonun azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, Lattice yapıların analiz sürecinde daha ayrıntılı bir ağ yapısı gerektirmesi sürecin zamanını uzatmaktadır. Gelecekte, Multi-fidelite yaklaşımının kullanımı önerilmektedir, bu da daha düşük çözünürlükte başlayıp daha sonra daha yüksek çözünürlüğe geçerek analiz sürecini optimize etmektedir. Bu çalışma, AM sürecinde distorsiyonunu anlamak ve optimize etmek için önemli bilgiler sunmakta ve AM üretim parametrelerinden bağımsız üretilebilir alaşımların geliştirilmesine yönelik projelere temel teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler — *lattice yapısı; distorsiyon; üretim parametreleri; çoklu-fidelite model.*

Abstract—Additive Manufacturing (AM) has become a popular manufacturing method due to its advantages in producing complex geometries, reducing material waste, and enabling the production of customized parts. However, the layer-by-layer material deposition in the AM process introduces unique challenges that need to be overcome to produce functional and reliable components. This study aims to investigate the effect of process parameters on distortion in parts with a Lattice structure. The results indicate that increasing laser power and decreasing scanning speed lead to reduced distortion. However, the detailed mesh structure required for the analysis of Lattice structures prolongs the solution process. In future work, the use of a Multi-fidelity approach is recommended, starting with lower resolution and transitioning to higher resolution, to optimize the analysis process. This study provides valuable insights for understanding and optimizing distortion within the AM process and can serve as a basis for projects aiming to develop independent alloys in AM production parameters.

Keywords — *lattice structure; distortion; process parameters; multi-fidelity model.*

I. GİRİŞ

Eklemeli İmalat (AM), karmaşık geometrilerin üretilmesi, malzeme atığının azaltılması ve özelleştirilmiş parçaların üretimi gibi avantajları nedeniyle giderek popüler hale gelen bir imalat tekniği haline gelmiştir. Bununla birlikte, AM sürecinin doğasında bulunan, katman katman malzeme birikimi gerektiren karmaşıklık, işlevsel ve güvenilir bileşenlerin üretilmesini sağlamak için aşılması gereken benzersiz zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu zorluklar, parça distorsiyonu, kalıntı gerilmeler, şekil bozulması ve gözeneklilik ve çatlak gibi kusurlar gibi konuları içermektedir. Bu sorunların çözülmemesi, mekanik özelliklerin azalmasına, parça performansının tehlikeye girmesine ve düzeltme işlemleriyle veya hatta tamamen başarısızlıkla ilişkili maliyetlerin artmasına yol açabilir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için, AM sürecinde malzemelerin davranışını modellemek ve tahmin etmek için simülasyon araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar, süreç parametreleri, malzeme davranışı ve parça performansı konularında içgörüler sunarak mühendislerin tasarımları optimize etmelerini, kusurları minimize etmelerini ve deneme-yanılma iterasyonlarının sayısını azaltmalarını sağlamaktadır.

Çeşitli AM teknolojileri arasında öne çıkan yöntemlerden biri Seçici Lazer Eriyik Birleştirme (SLM) yöntemidir ve özellikle metal bileşenlerin üretimi için tercih edilmektedir. Birçok avantajı olmasına rağmen, SLM bazı zorluklarla karşılaşmaktadır ve bunlardan biri distorsiyondur. Distorsiyon, basılan nesnenin imalat süreci sırasında istenen şekil veya boyutlardan sapması anlamına gelir. Bu olgu, nihai parçaların yapısal bütünlüğünü, boyutsal doğruluğunu ve genel kalitesini olumsuz yönde etkileyerek, nihai uygulamalar için uygun olmayan parçaların üretilmesine neden olabilir.

SLM'deki distorsiyon, süreç parametrelerinin olarak adlandırılan bir dizi parametrenin etkisi altındadır. Bu parametreler arasında lazer gücü, tarama hızı, tabaka kalınlığı ve çizgi aralığı gibi faktörler yer almaktadır. Bu parametreler, basılan parçadaki termal geçmişi, katılaşma davranışını ve gerilme dağılımını doğrudan etkileyerek distorsiyon eğilimlerini belirler. Distorsiyon üzerindeki süreç

parametrelerinin etkisini anlamak, SLM sürecinin optimize edilmesi ve daha yüksek boyutsal doğruluk ve parça kalitesinin elde edilmesi için son derece önemlidir. Distorsiyona önemli katkıda bulunan kritik parametrelerin belirlenmesi ve etkilerinin anlaşılması, SLM'de distorsiyon kontrolü için etkili stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu araştırma, SLM yönteminde süreç parametrelerinin distorsiyon üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Deneyisel tasarım yöntemleri, süreç parametrelerinin belirlenmesi ve optimize edilmesi için kullanılan etkili bir yaklaşımdır. Ancak, geleneksel deneyisel tasarım yaklaşımı zaman alıcı ve maliyetli olabilir. Bu nedenle, sade bir deneyisel tasarım yaklaşımı kullanılarak AM sürecindeki süreç parametrelerinin simülasyon modellemesiyle belirlenmesi süreç parametrelerinin etkilerini daha hızlı ve verimli bir şekilde anlamayı sağlayacaktır.

II. LİTERATÜR DERLEMESİ

Eklenti imalat (AM) ile basılan parçaların kalitesi ve performansı, lazerle ilgili, tarama ile ilgili, tozla ilgili ve sıcaklıkla ilgili parametreler de dahil olmak üzere birçok işlem parametresi tarafından etkilenmektedir. Bu literatür derlemesi, bu işlem parametreleri ve eklemeli imalat süreci üzerindeki etkileri hakkında mevcut araştırmaların bir genel bakışını sunmayı amaçlamaktadır.

Lazerle ilgili parametreler, lazer gücü, leke boyutu, darbe süresi ve darbe frekansı gibi, eritme veya sinterleme süreci sırasında enerji girişini ve ısı dağılımını kontrol etmede önemli bir rol oynar. Bu parametreler, basılan parçanın malzeme birleşmesini, erime derinliğini ve çözünürlüğünü etkiler [1,2]. Ayrıca, lazerle ilgili parametrelerin optimizasyonu, parça kalitesini, yüzey bitişini ve mekanik özellikleri iyileştirebilir [3].

Tarama ile ilgili parametreler, tarama hızı, tarama aralığı ve tarama deseni gibi, eklemeli imalat süreci sırasında lazerin veya elektron demetinin hareketini belirler. Uygun tarama parametrelerinin seçimi, basılan parçanın biriktirme hızını, termal geçmişini ve mikroyapısını etkiler [4]. Araştırma çalışmaları, tarama parametrelerinin ayarlanmasının parça kalitesini, boyut hassasiyetini ve yapım süresi verimliliğini artırabileceğini göstermiştir [5,6].

Tozla ilgili parametreler, tozun parçacık boyutu, tabaka kalınlığı ve malzeme özelliklerini içerir. Tozun parçacık boyutu dağılımı, akışkanlığı, paketlenme yoğunluğunu ve toz yayılım davranışını etkiler [7]. Tabaka kalınlığının uygun şekilde kontrol edilmesi, basılan parçanın istenen çözünürlüğü, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik dayanıklılığına ulaşılması açısından önemlidir [8]. Ayrıca, termal iletkenlik, erime noktası ve viskozite gibi malzeme özelliklerinin etkisini anlamak, belirli malzemeler için işlem parametrelerini optimize etmek ve parça kalitesini geliştirmek açısından önemlidir [9].

Sıcaklıkla ilgili parametreler, toz yatağı sıcaklığı, toz besleme sıcaklığı ve sıcaklık homojenliği gibi, AM sürecinde malzeme davranışını, erime özelliklerini ve parça kalitesini önemli ölçüde etkiler [10]. Uygun sıcaklık seviyelerinin korunması, doğru toz birleşmesini, yapışmayı ve çarpıklık ve çatlak gibi kusurların azaltılmasını sağlar [11]. Birçok çalışma,

sıcaklık kontrolünün parça kalitesi, mekanik özellikler ve süreç istikrarı üzerindeki etkisini incelemiştir [12,13].

Sonuç olarak, işlem parametreleri, eklemeli imalatta önemli bir rol oynamaktadır ve basılan parçaların kalitesini, doğruluğunu ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Lazerle ilgili, tarama ile ilgili, tozla ilgili ve sıcaklıkla ilgili parametrelerin optimize edilmesi, AM sürecinde istenen sonuçların elde edilmesi için önemlidir. Bu alanda daha fazla araştırma, anlayışımızı derinleştirmek ve çeşitli uygulamalar için sağlam işlem parametreleri rehberleri geliştirmek için gereklidir.

III. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada AlSi10Mg alaşımı kullanılacaktır. AlSi10Mg alaşımının SLM-AM sürecinde kullanılması birçok avantaja sahiptir. İlk olarak, alaşımın mükemmel mekanik özelliklere sahip olması, dayanıklılık ve yüksek mukavemet gibi faktörleri içerir. Bu özellikler, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma gibi sektörlerde talep edilen yüksek performanslı parçaların üretiminde büyük öneme sahiptir. İkinci olarak, AlSi10Mg alaşımı iyi termal iletkenlik özelliğine sahiptir. Bu, alaşımın yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğu anlamına gelir ve ısı transferini etkin bir şekilde yönetebilir. Bu özellik, alaşımla üretilen parçaların termal yönetiminde ve ısıl işlem süreçlerinde avantaj sağlar.

Tam faktöriyel tasarım, diğer alternatif tekniklere kıyasla daha fazla deneyisel konfigürasyon gerektirmesine rağmen, sınırlı bir örneklem büyüklüğü ile bilinmeyen bir tasarım fonksiyonu hakkında tam bilgi elde etmek için anahtar faktörleri ve etkileşimleri yakalamak için tasarım noktalarının homojen bir şekilde yayılmasını sağlar. Bu çalışmada, tam faktöriyel hesaplaması için kullanılan proses parametreleri Tablo 1'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu parametreler, deneyisel sürecin kontrol ve değişken faktörlerini içermektedir. Her bir faktör, deneyin sonuçları üzerinde etkisi olabilecek değişken bir özelliği temsil etmektedir.

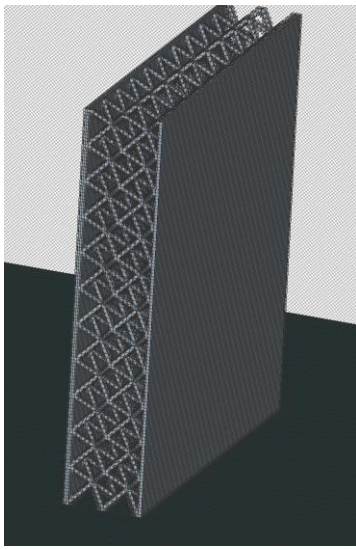
TABLO I. PROSES PARAMETRELERİ VE SEVİYELERİ

Proses Parametresi	Birim	Seviye 1	Seviye 2
Lazer Gücü	W	200	400
Tarama Hızı	mm/s	800	1000
Leke Boyutu	mm	140	-
Tarama Aralığı	mm	112	-
Katman Kalınlığı	mm	25	-
Toz Yatağı Sıcaklığı	°C	120	-

Sonlu Eleman Analizinde (FEA), voxel mesh, katı nesnelerin sayısal simülasyonları için kullanılan bir hacimsel ağ yapısıdır. Nesneyi üç boyutlu uzayda düzenli bir ızgara şeklinde küçük kübik elemanlar, yani voxel'lerden oluşan bir koleksiyon olarak temsil eder. Nesneyi voxel'lere bölerek, FEA

hesaplamaları bir hacimsel kafes üzerinde gerçekleştirilebilir ve farklı yükler, kısıtlamalar veya çevresel koşullar altında nesnenin davranışını analiz edebilir.

Ağ boyutu, bir simülasyon veya analiz için seçilen önemli bir parametredir ve sonuçları etkileyebilir. Genel olarak, daha küçük bir ağ boyutu daha detaylı sonuçlar sağlayabilirken, hesaplama süresini artırabilir. Ayrıca, ağ yapısı belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan bir tanesi de FEA'den elde edilen sonuçların ağdan bağımsız olarak doğru sonuçlar verdiğini gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan ağ yapısı için ağdan bağımsızlık çalışması yapılması yapılmış, voxel ağ boyutu olarak 0.7 ve 0.9 mm uniform mesh kullanılmıştır. Taban plakası için ise adaptif meshing kullanılarak 3 katman yoğunlaştırma yapılmış ve yüzey elemanların boyutu 1 mm seçilmiştir. Bu çalışmada, 110x110 mm boyutunda bir Lattice yapı kullanılmış ve Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. ÜRETİLEN NUMUNENİN AĞ YAPISI

IV. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE ÇIKTILAR

Lattice yapılar, iç içe geçen kafes yapıları sayesinde hafif ve güçlü parçaların üretilmesini sağlar. Bu, özellikle havacılık, otomotiv ve uzay endüstrilerindeki uygulamalarda önemlidir, çünkü hafif parçalar yakıt verimliliğini artırırken, yüksek mukavemet gereksinimlerini karşılamaktadır. Fakat, bu özellik FEA analizde gerekli olan ağ yapısını artırmakta ve çözüm sürecinde daha fazla hesaplama ve analiz gerektirmektedir.

Lattice yapılar, iç içe geçen kafes yapıları sayesinde hafif ve güçlü parçaların üretilmesini sağlar. Bu, özellikle havacılık, otomotiv ve uzay endüstrilerindeki uygulamalarda önemlidir, çünkü hafif parçalar yakıt verimliliğini artırırken, yüksek mukavemet gereksinimlerini karşılamaktadır. Bununla birlikte, lattice yapıların FEA analizi için gereken ağ yapısı daha detaylı olmalıdır ve bu da çözüm sürecinde daha fazla hesaplama ve analiz zamanı gerektirebilir. Voxel ağı eleman boyutu ile süre arasında ters bir ilişki vardır. Bu çalışmada gerçekleştirilen ağdan bağımsızlık çalışmasının ilk deneyinde voxel ağı

eleman boyutu 0.90 mm iken, süre yaklaşık 3 gün sürmüştür. İkinci deneyde ise eleman boyutu 0.70 mm olarak belirlenmiş ve süre yaklaşık 5 gün olmuştur. Tablo II'de elde edilen sonuçlar özetlenmiştir ve ağ boyutu 0.9 mm olarak seçilmiştir.

TABLO II. AĞ YAPISI ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI

Ağ Boyutu	Eleman Sayısı	Hata	Çözüm Süresi
0.9 mm	648836	0.07	72 saat
0.7 mm	1251326	0.05	120 saat

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, Lattice yapıya sahip parçaların distorsiyonunu analiz etmek için Tarama Hızı (mm/s) ve Lazer Güç (W) gibi iki önemli üretim parametresi incelenmiştir. Sonuçlar, bu parametrelerin distorsiyon üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir.

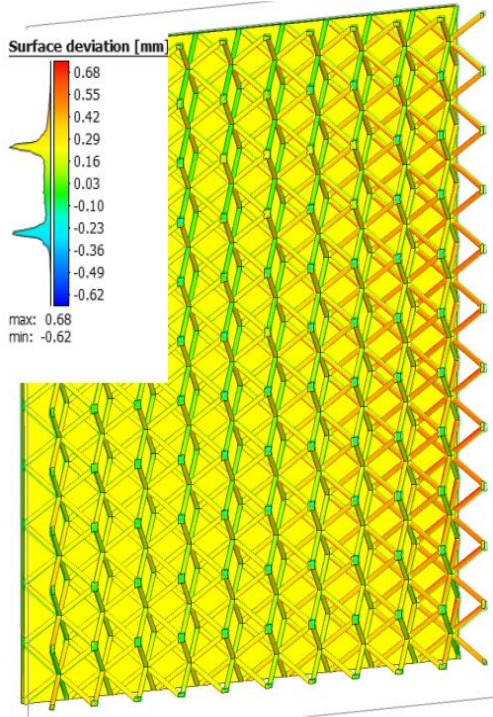
Sabit Lazer Güç 200 W iken Tarama Hızı 800 mm/s'den 1000 mm/s'e yükseltildiğinde distorsiyon değeri 0.26 mm'den 0.19 mm'ye azalmıştır. Bu durumda, tarama hızının artmasının distorsiyonu azaltıcı bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Diğer bir senaryoda, sabit Tarama Hızı 800 mm/s iken Lazer Güç 200 W'dan 400 W'a yükseldiğinde distorsiyon değeri 0.35 mm'ye arttığı gözlenmiştir. Üretim parametrelerine göre elde edilen distorsiyon değerleri Tablo III'de özetlenmiştir.

TABLO III. ÜRETİM PARAMETRELERİNE GÖRE DİSTORSİYON

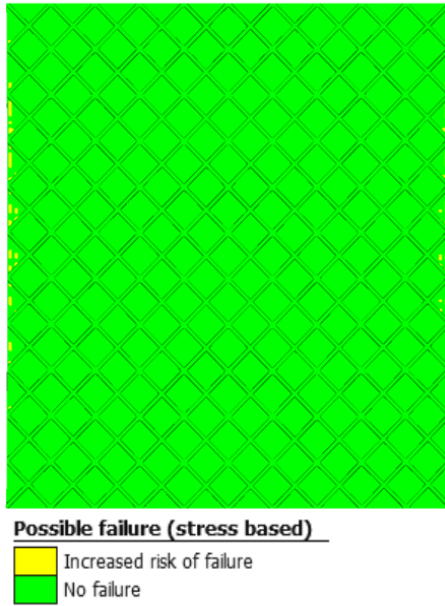
Lazer Güç (W)	Tarama Hızı (mm/s)	
	800	1000
200	0.26 mm	0.19 mm
400	0.35 mm	-

2 faktör 2 seviye tam faktöriyel tasarıma göre çalışmada 4 tane deney koşulu tasarlanmıştır. Bunlardan 3 tanesi gerçekleştirilebilmiştir. Deney koşulu Lazer Güç 400 W ve Tarama Hızı 1000 mm/s'de gerçekleştirilmesi planlanan FEA ise analiz sürelerinin beklenenden uzun sürmesi nedeniyle gerçekleştirilememiştir. Çoklu fidelite yaklaşısı ile analiz süresinin çalışmanın doğruluğundan ödün vermeden kısaltılması mümkündür.

Şekil 2 ve 3'te Lattice yapı için Lazer Güç 200 W ve Tarama Hızı 800 mm/s iken gerçekleştirilen FEA analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 2'de parçanın distorsiyon değerini ve Şekil 3'te parçanın AM yöntemiyle verilen parametrelerinde üretilmesi halinde üretimde karşılaşılabilecek olası hatalar gösterilmektedir. Şekil 1'de verilen yapının yatay kesiti üzerinde analiz sonuçları Şekil 2 ve 3'te gösterilmiştir. Şekil 2'de kenarlardaki distorsiyon değerinin ~0.68 mm ve ortalama değeri 0.29 mm olduğu belirtilmektedir. Şekil 3'te ise distorsiyon değerinin çok olduğu bölgelerde üretim sonunda hasarlar olabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, AM sürecinde Lattice yapıların distorsiyonunu anlamak ve optimize etmek için önemli bir yol haritası sunmaktadır.



Şekil. 2. ANALİZ SONUCU: DİSTORSİYON DEĞERİ (200 W, 800 MM/S)



Şekil. 3. ANALİZ SONUCU: OLASI HATALAR (200 W, 800 MM/S)

V. PROJE EKİBİNİN KAZANIMLARI VE TUSAŞ'A OLASI KATKILARI

Eklemeli imalat (AM) yöntemi, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimini hızlandırır ve prototipleme sürecini kolaylaştırır. Lattice yapılar, içi boş veya delikli bir yapıya sahip olup, AM sürecinde kullanılarak parçaların tasarımı

özellikle geliştirilebilir ve belirli gereksinimlere uygun olarak optimize edilebilir. Ayrıca Lattice yapılar, yük dağılımını optimize ederek parçaların yapısal bütünlüğünü artırır ve stres konsantrasyonunu azaltır. Bu özellikler havacılık ve uzay sanayinde parçaların performansını artırır, enerji tasarrufu sağlar ve daha güvenli uçuşlar ve uzay misyonlarına katkıda bulunur. AlSi10Mg gibi alaşımlar, hafif ve dayanıklı lattice yapıların AM yönteminde yaygın olarak kullanılır.

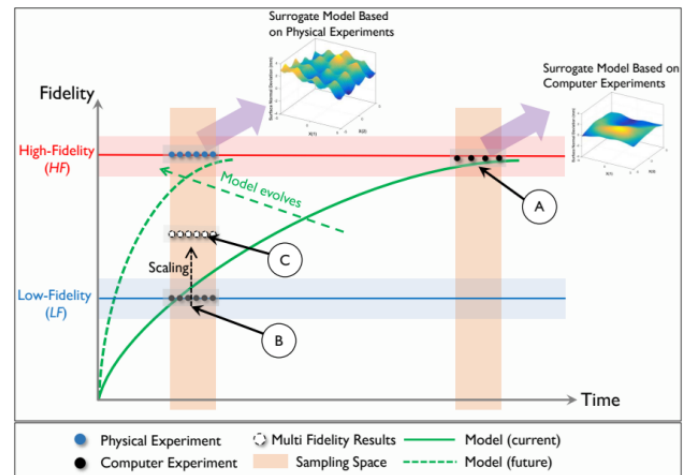
Bu çalışma ile proje ekibi, deneysel tasarım yöntemini öğrenerek, AM üretim sürecini daha verimli hale getirmek için Lattice (kafes) yapıdaki nihai ürüne etki eden üretim parametrelerini anlama ve kontrol etme yeteneği kazanmıştır.

Bu projenin TUSAŞ'a katkıları ise AM üretim süreçlerinde verimlilik, ürün kalitesinin iyileştirilmesi olarak özetlenebilir. Ayrıca, bu proje yenilikçilik/rekabet avantajı sağlayan AM üretim parametrelerinden bağımsız üretilebilir alaşımların geliştirilmesine yönelik projelere temel teşkil eder.

VI. ÖNERİLER, ALINAN DERSLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Çoklu-fidelite (multi-fidelity) modelleme, yüksek fidelite (high-fidelity) ve düşük fidelite (low-fidelity) modellerin entegrasyonu ile gerçekleştirilen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, karmaşık sistemlerin analizinde hem doğruluk hem de hesaplama verimliliği arasında bir denge sağlamayı hedefler.

Yüksek fidelite modeli, sistem üzerindeki tüm ayrıntıları ve kompleksiteleri yakalamak amacıyla geliştirilir. Bu model, kapsamlı bir fiziksel anlayış sunar ve detaylı ağ örgüsü sunar ve hesaplama açısından maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Öte yandan, düşük fidelite modeli, sadece temel fiziksel anlayışı içeren ve daha basit bir ağ yapısına sahip bir modeldir. Bu model, hesaplama süreleri açısından daha verimlidir ve daha hızlı sonuçlar üretebilir. Ancak, düşük fidelite modellerin doğruluk açısından bazı zayıflıkları olabilir, çünkü sistemin detaylarını tam olarak yakalayamazlar. Bu nedenle, deneysel verilerden elde edilen düzeltme değeri ile (scaling parameter) düşük fidelite modelin doğruluğu artırılırken aynı zamanda hesaplama zamanında iyileşme sağlanabilmektedir. Şekil 4'te çoklu-fidelite metodu görsel olarak sunulmuştur.



Şekil. 4. ÇOKLU-FİDELİTE METODUNUN GENEL YAPISI

Gelecekte, çoklu fidelite modelleri kullanmak, yüksek fidelite modellerine kıyasla simülasyonlar açısından daha fazla zaman kazandırabilir. Bu yaklaşım, simülasyon sürecinde zaman kazandırır çünkü tüm işlem için yüksek fidelite modellerini kullanmak yerine, daha az hesaplama gücü gerektiren bölgelerde daha hızlı sonuçlar üretebilir. Çoklu fidelite modeli ile ele alınan proses parametrelerinin sınırlarını genişletebilir. Farklı ayırntı düzeylerinde çalışan modeller, işlemin parametrelerinin farklı değerlerini ele alabilir ve sınırların ötesine geçebilir. Bu, tasarım veya optimizasyon süreçlerinde daha geniş bir aralıkta çalışmayı mümkün kılar.

KAYNAKLAR

- [1] Harun, W. S. W., Kamariah, M. S. I. N., Muhamad, N., Ghani, S. A. C., Ahmad, F., & Mohamed, Z. (2018). A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. *Powder Technology*, 327, 128-151.
- [2] Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2015). Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1).
- [3] Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2020). Microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by directed energy deposition-based additive manufacturing: A review. *Applied sciences*, 10(9), 3310.
- [4] Sun, Q., Guo, K., Wang, X., Liu, J., & Sun, J. (2020). Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 793, 139879.
- [5] Baitimerov, R., Lykov, P., Zhrebtsov, D., Radionova, L., Shults, A., & Prashanth, K. G. (2018). Influence of powder characteristics on processability of AISi12 alloy fabricated by selective laser melting. *Materials*, 11(5), 742.
- [6] Hartunian, P., & Eshraghi, M. (2018). Effect of build orientation on the microstructure and mechanical properties of selective laser-melted Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 69.
- [7] Dejene, N. D., & Lemu, H. G. (2023). Current Status and Challenges of Powder Bed Fusion-Based Metal Additive Manufacturing: Literature Review. *Metals*, 13(2), 424.
- [8] Hussein, A., Hao, L., Yan, C., & Everson, R. (2013). Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting. *Materials & Design* (1980-2015), 52, 638-647.
- [9] Salman, O. O., Gammer, C., Chaubey, A. K., Eckert, J., & Scudino, S. (2019). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 748, 205-212.
- [10] Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 255-263.
- [11] Guo, M., Ye, Y., Jiang, X., & Wang, L. (2019). Microstructure, mechanical properties and residual stress of selective laser melted AISi10Mg. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 6753-6760.
- [12] Liao, H. T., & Shie, J. R. (2007). Optimization on selective laser sintering of metallic powder via design of experiments method. *Rapid Prototyping Journal*, 13(3), 156-162.
- [13] Yang, T., Liu, T., Liao, W., MacDonald, E., Wei, H., Chen, X., & Jiang, L. (2019). The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AISi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 26-36.