



THERMAL CHANGES AND MODELING IN ADDITIVE MANUFACTURING

Onur Özsolak¹

¹Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, Turkey

Review Paper

The use of additive manufacturing (AM) methods is constantly increasing in terms of application and market share. It continues to grow rapidly in industry such as energy, surgical implants, aerospace and automotive. In additive manufacturing method, design freedom is quite high and manufacturing time is faster than traditional methods. In order to make AM processes faster and more reliable, modeling of metal AM processes is of great importance for process and product optimization. In this study, thermal changes occurring in additive manufacturing method and their modeling are investigated.

Keywords: Additive Manufacturing, Thermal Analysis, Modeling, Temperature Distribution

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE OLUŞAN ISIL DEĞİŞİMLER VE MODELLENMESİ

Derleme

Eklemlerli imalat (Eİ) yöntemlerinin kullanımı uygulama ve pazar payı açısından sürekli artış göstermektedir. Enerji, cerrahi implantlar, havacılık-uzay ve otomotiv gibi endüstri alanlarında büyümeye hızla devam etmektedir. Eklemlerli imalat yönteminde tasarım özgürlüğü oldukça fazla ve imalat süresi geleneksel yöntemlere göre daha hızlıdır. Eİ işlemlerinin daha hızlı ve daha güvenilir hale getirilmesi için metal Eİ süreçlerinin modellenmesi süreç ve ürün optimizasyonu için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada eklemlerli imalat yönteminde oluşan ısıl değişimler ve modellenmesi araştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemlerli İmalat, Termal Analiz, Modelleme, Sıcaklık Dağılımı

1 Giriş

Yeni sanayi devrimi olan Endüstri 4.0 akıllı üretim sistemlerinin ve gelişmiş bilgi teknolojilerinin entegrasyonunu teşvik etmektedir. Bu yeni teknoloji entegrasyonunda eklemlerli imalat yöntemi temel bir bileşen olarak kabul edilir. Eklemlerli imalat, işletme birimlerini birbirine bağlamak ve iş dağılımını sağlamak için oluşturulmuş olan endüstri 4.0 teknolojisi ekosisteminin temel bir parçasıdır.

Son birkaç yılda, havacılık ve motor sporları uygulamaları gibi ağırlık tasarruflarından faydalanabilecek alanlarda metal esaslı ana yapısal parça uygulamalarında eklemlerli imalat yöntemi üretimine önemli bir eğilim vardır. Eİ işlemlerinin daha hızlı ve daha güvenilir hale getirilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, metal Eİ süreçlerinin modellenmesi süreç ve ürün optimizasyonu için büyük önem arz ettiğinden gerek araştırmacılar gerekse imalatçılar için güncel bir konudur.

Purtonen ve ark., doğrudan lazer biriktirme (DLB) ve lazer kaplaması için temassız sıcaklık ölçüm yöntemlerinin ayrıntılı bir literatür taramasını yapmıştır [1].

Wang ve ark., ince bir paslanmaz çelik levhanın DLB 'si sırasında pirometri kullanarak, eritilmiş havuz içindeki sıcaklık dağılımının lazer giriş gücüne duyarlı olduğunu

ve incelenmiş olan lazer güçlerinin ön-boşluğunun likidus sıcaklığının üzerinde aşırı ısındığını göstermiştir [2].

Tang ve Landers, H13 takım çeliği için tek nozüllü DLB kullanarak, ortalama eriyik havuz sıcaklığının 2140 K civarında olduğunu tespit etmiştir. Eriyik havuzu sıcaklık dağılımı, işlem parametrelerinin değiştirilmesiyle deneysel olarak ölçülmüştür [3].

Peng ve ark., DLB sırasında özgül enerjinin, bir eriyik havuzunun temsili / şekli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Genel olarak, özgül enerji arttıkça, biriken katman yüksekliği, genişliği ve derinliğinin arttığını göstermiştir [4].

Parça boyunca enerji aktarımı, kendi içsel mikroyapısal evrimi ile doğrudan bağlantılıdır. Costa ve ark., termal enerji problemi önce belirli bir zaman adımı için çözülebilir, daha sonra mikroyapı ampirik korelasyonlarla belirlenir ve daha sonra bir sonraki termal zaman adımı gerçekleştirilebilir olduğunu göstermişlerdir [5].

Sonlu elemanlar analizindeki ticari programlar ile Nisar ve ark., katmanlı üretim işlemlerinde meydana gelen sıcaklık bölgesi için bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model ile sıcaklık bölgesini incelemişlerdir [6].

Kolossov ve ark., ise titanyum tozunun lazer ile sinterlenmesi esnasında titanyum toz yatağının üst kısmındaki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için sonlu

* Corresponding author.

E-mail address: onurozsolak@gmail.com (O. Özsolak) | ORCID Number : 0000-0001-8219-9305

Received 31 October 2019; Received in revised form 10 December 2019; Accepted 13 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

elemanlar modeli geliştirmiştir. Buradaki sonlu elemanlar yöntemi modelinde sinterleme potansiyeli ve özgül ısı kapasitesi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaba katılmıştır. Aynı zamanda sıcaklık ölçümlerinin doğrulanması için toz yatağının üst kısmından infrared kamera ile ölçümler yapılmıştır [7].

Roberts ve ark., yaptığı çalışmada çok tabakalı taramayı içeren bir lazer ergitmeli prosesinde sıcaklık değişimini belirlemek için bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Proses sürecinde zaman ve sıcaklık ilişkisinde ısı transferinin malzeme üzerinde etkileri incelenmiştir [8].

Modelleme ve simülasyon, malzemelerin davranışını öngörmek ve uzun süreli, kapsamlı deney ihtiyacını azaltmak için kolaylaştırıcı bir yöntem olarak kullanılabilir. Romano ve ark., Ti6Al4V, paslanmaz çelik 316L ve 7075 Al tozları gibi yaygın olarak kullanılan malzemeler için sonlu elemanlar simülasyonu ile termal modelleme yaparak bu toz malzemelerin termal karakteristik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Toz yatağındaki sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu geometrisini lazer eritme işlemini termal modellemiştir [9].

Metal lazer sinterleme, metalik tozlardan doğrudan karmaşık şekilde parçalar üretmek için kullanılabilen bir toz yataklı eritme işlemidir. Toz yataklı eritme işlemlerinin başlıca problemlerinden biri, lazer ışınının sürekli hareketi sırasında, sıcaklık dağılımının homojen olmadığı ve toz içinde kararsız hale gelmesidir. Dong ve ark., titanyum esaslı toz malzemelerin lazer ile sinterlenmesinde üç boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımı ile ABAQUS yazılım paketi kullanılarak toz yatağı eritme

işleminde sıcaklık dağılımını tahmin etmek için çalışmışlardır [10].

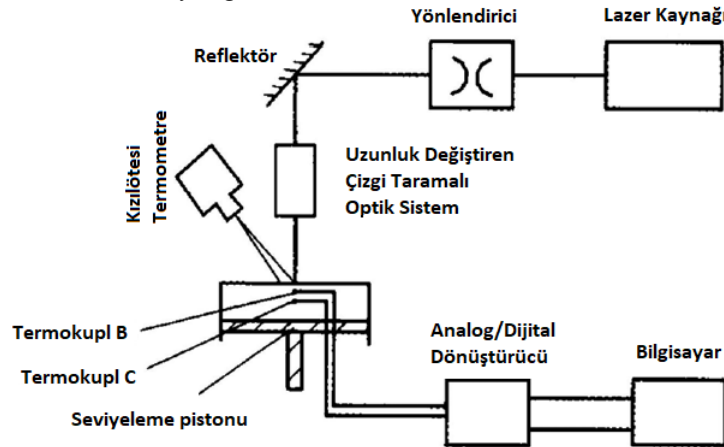
Eİ prosesi sürecinde oluşan ısı değişimlerin anlaşılması, malzeme mikroyapısının değişimini anlamak ve kontrol etmek için gereklidir. Eİ prosesi sürecinde parçanın termal sürecin bilinmesi bu açıdan önemlidir.

2 Materyal ve Metod

2.1 Eİ Yönteminde Termal Ölçme ve Görüntüleme

İmalat sırasında bir parçanın sıcaklık süreci geleneksel ölçüm aletleri kullanılarak deneysel olarak kaydedilebilir. Termokupullar sıcaklığı sadece noktasal olarak ölçerken termal kameralar sıcaklık dağılımının görüntüsünü vererek sıcaklık alanının değerlendirilmesinde daha fazla bilgi vermektedir. Bai ve ark., kızılötesi termometre ve termokupl sistemi kullanarak seçici lazer sinterleme yöntemi ile molibden tozunun polimer ile kaplanmasında termometre ile toz yüzeyindeki sıcaklığı ölçerken termokupl içerdeki sıcaklığı ölçmüştür [11]. Şekil 1' de bu sistem gösterilmektedir.

Termografik görüntüler, görüntüleme ekipmanının çözünürlük, örnekleme ve entegrasyon süresi ile sınırlıdır. Bazı malzemeler için DLB sırasında ortaya çıkan maksimum sıcaklıklar da yüksek sıcaklık kalibrasyonu veya yüksek derecede özelleştirilmiş ekipman gerektirir. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve eriyik havuzunun sıcaklığı, sıcaklık arttıkça daha görünür radyasyon (yani daha kısa dalga boyları) yayan kızılötesi (birçok metal için) radyasyon yayar [12].



Şekil 1. Kızılötesi termometre ve termokupl bileşenli sıcaklık ölçüm sistemi [11]

Termal izleme, DLB işlem verimliliğini arttırmaya yardımcı olsada, DLB yapı odası, uygulanan termografi için elverişli değildir. Lazer radyasyonunun yaklaşık üçte ikisi yayılır / yansır ve bu da ölçüm ekipmanını etkileyebilir. Ayrıca, ince toz partikülleri görüş hattını kısmen gölgelemekte ve ölçülecek bölge sürekli olarak pozisyon değiştirmektedir. DLB eriyik havuzunun yakın çevresinde nispeten sert olan ortam, ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek birçok termal radyasyon kaynağından oluşmaktadır yayma, yansıma ve plazma etkileşimini içerir [1]. Hedefi çevreleyen ortam da dikkate alınmalıdır.

Hedefe yakın olan nesnelere, hedeften yansıyan karışık radyasyon sağlayabilir. Çevreleyen üfleme tozu ve inert gaz da termal radyasyonun saçılmasını ve emilmesini sağlar.

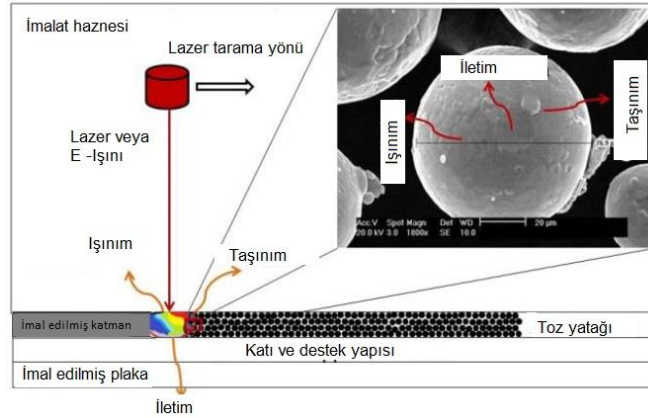
2.2 Termal (Isı) Analiz ve Sayısal Modelleme

Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde bulunan çeşitli birleştirme işlemleri mevcut birçok karmaşık fiziksel özelliğin bir sonucudur. Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde hem ısı hem de kütle transferi makro

ve mikroskobik ölçeklerde başlı başına bir problem kaynağıdır [9]. Şekil 2 'de toz yataklı işlemlerde bulunan makroskobik ve mikroskobik ısı transferi mekanizmaları gösterilmektedir.

Eİ prosesi sürecinde kullanılan besleme malzemesinin enerji emilimi, sıcaklık profilini, metal biriktirme geometrisini, katılaşmayı, iç yapıyı ve nihai ürünün

özelliklerini etkilemektedir. Enerji emili enerji kaynağının özelliklerine göre değişmektedir. Lazerler, elektron ışınları ve plazma arklar için çap ve güç yoğunluk dağılımı ısı kaynağı için önemli özelliklerdir. Bu ısı kaynaklarının güç yoğunluğu dağılımı genellikle Gauss ışın profilleri ile anlaşılmalı çalışılmaktadır [13].



Şekil 2. Makro ölçekli ve mikro ölçekli ısı transfer modeli ve ısı kaynağının yönelimi [9]

Biriktirilen malzemeden parçaya kadar, proses sürecinde çok sayıda etkili termal ve akışkan olayı vardır: Bunlar eriyik havuzu başlatma (toz eritme), eriyik havuzu aşırı ısıtma ve katılaşma, eriyik havuzu akışkanlar mekaniği ve ıslatma davranışı, konveksiyon ve termal radyasyonu içeren sınır ısı transferi (parçadan çevreye ve tersi) ve iletimi içeren (eriyik havuzdan alt katmana) iç kısım ısı transferi ve ısı üretimi / tahribatı (katı hal dönüşümleri ile ilgili) içeren termal ve akışkan olaylarıdır.

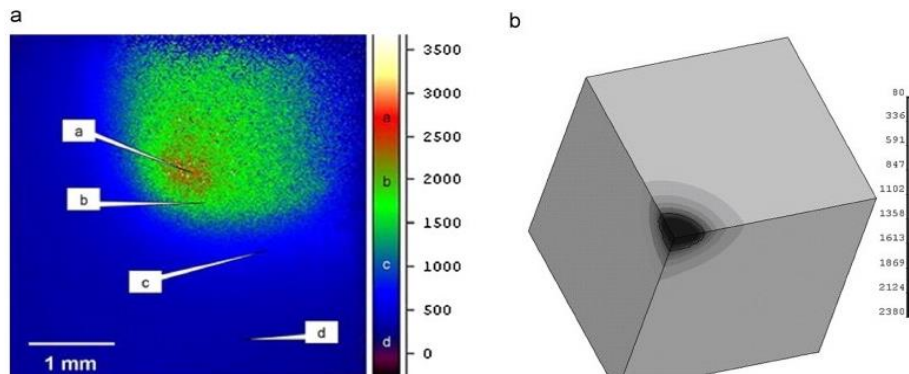
Eriyik havuzu ve parça içi ısı transferinin termal / akışkan davranışı, nihai parça kalitesine önemli bir bakış açısı sağladığından, DLB sürecini anlamak ve optimize etmek, iş sırasında meydana gelen termal / akışkan olaylarının anlaşılmasını gerektirir. Lazer ile metal biriktirme yöntemi için ısıl analiz literatürü incelendiğinde eriyik havuz termal / akışkan davranışı, katılaşma, ısı transferi, termal görüntüleme gibi alt başlıklar göze çarpmaktadır [12].

Katılaşma simülasyonu birçok farklı yolla ele alınabilir, modelleyici mikroskobik veya makroskobik bir yaklaşımı alabilir. Makroskobik yaklaşımda ısı ve kütle korunum denklemleri sonlu fark / elemental yöntemler ile

çözülebilir. Bu makroskobik yaklaşımlarda, mantar bölgesi oldukça basitleştirilebilir [14].

Sayısal olarak DLB sürecini modellemede karşılaşılan ortak zorluklar şunları içerir: kütle ekleme, 3 boyutlu nesnelerin çoklu iz biriktirme etkileri, sıcaklığa bağlı özellikler, erime/katılaşma ve eriyik havuzu akışkan dinamiği/ıslatma davranışı. Simülasyonun mesh şeması ve boyutsallığı da önemlidir çünkü bu daha doğru sonuçlar sağlayabilir. Termo-kinetik modeller, sıcaklık alanını, parçadaki mikroyapısal dağılımın tahmin edilmesine yardımcı olmak için ampirik mikroyapı-özellik ilişkileri ile birleştirmek için kullanılabilir [5].

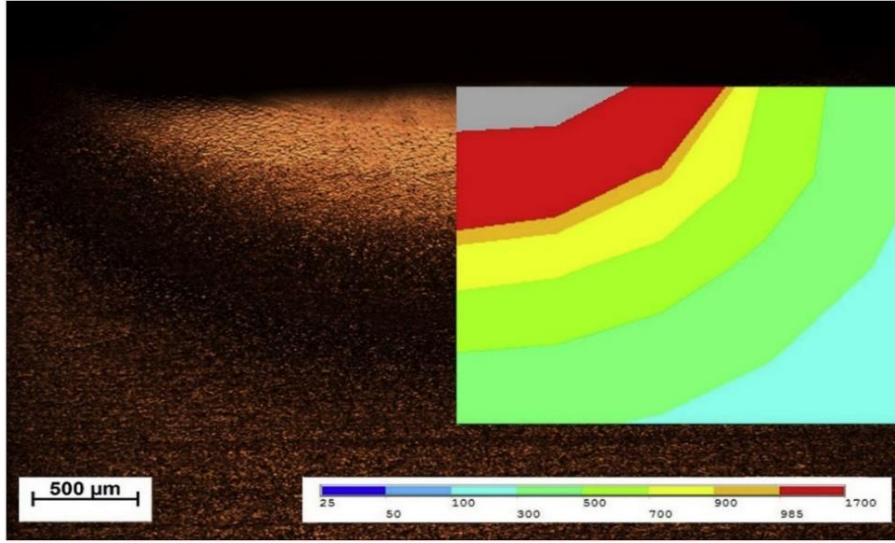
Fischer ve ark., gerçekleştirdiği deneysel çalışmadaki verileri kullanarak yapılan modellemenin deneysel sonuçlara yakın sonuçları tahmin edebildiğini vurgulamışlardır [15]. Referans çalışmada Titanyum tozunun seçici lazer ile sinterlenerek yüzey sıcaklığı bir Raytheon kızılötesi kamera ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmadaki yüzeydeki sıcaklık dağılımı ve simülasyondaki tahmin edilen değerler Şekil 3 'de gösterilmektedir.



Şekil 3. (a) Kızıl ötesi kamera ile ölçülen sıcaklık dağılımı (Kelvin) (b) Simülasyon modelindeki (Çeyrek simetri modeli) sıcaklık dağılımı (°C) [15]

Tang ve ark., Ti-22Al-25Nb malzemeden lazer esaslı eklemeli imalat yöntemi ile ince cidarlı numuneler imal etmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile ısı süreç incelenerek Ti esaslı numunenin mikro yapı analizi, mikro sertlik ve çekme testleri ile sayısal modelleme

doğrulanmıştır. Çalışmada eriyik havuzu ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) morfolojisindeki sıcaklık dağılımını doğrulamak için Ti esaslı alaşımın optik görüntülerini kullanmışlardır (Şekil 4) [16].

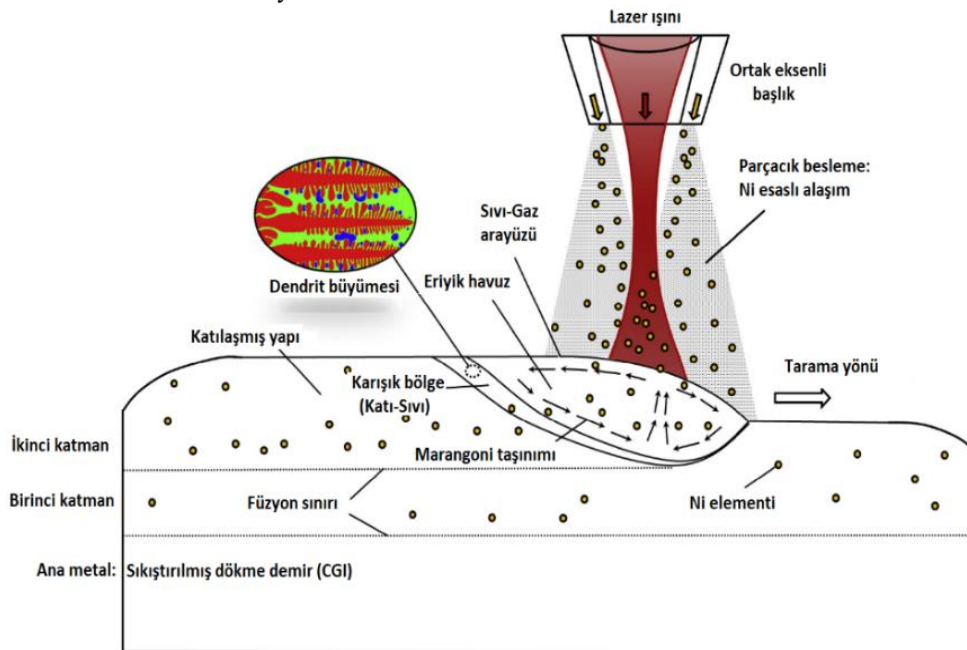


Şekil 4. Ti-22Al-25Nb numunenin eriyik bölgesi ve ITAB morfolojisine ait optik mikroskop görüntüsünün (sol kısım) sayısal simülasyon (sağ kısım) ile karşılaştırılması [16]

Gan ve ark., yapmış olduğu bu çalışmada, üç boyutlu bir sayısal modelleme geliştirilerek dökme demir üzerinde nikel esaslı alaşımların çok katmanlı olarak imal edilmesi Marangoni etkisi, termal davranış, bileşimin taşınımı, katılma davranışı ve dendrit büyümesi gibi çok yönlü fiziksel özelliklerin tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen tahmin modelinin yapılan deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür [17].

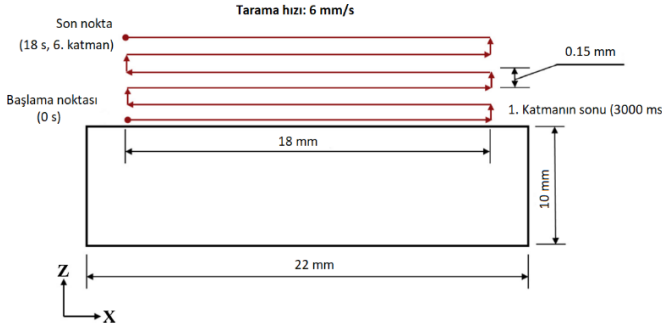
Gri dökme demir üzerindeki Ni esaslı alaşımının çok katmanlı lazer esaslı eklemeli imalat yönteminde ısı

taşınımı, katılma davranışı ve çözünen maddenin taşınımının anlaşılması için geçici, ısı ve kütle transferinin, sıvı metal akışının üç boyutlu sayısal modeli geliştirilmiştir. Hesaplanan erimiş eriyik havuz geometrisi ve bileşen profili ilgili deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [17]. Çok katmanlı eklemeli imalat için çok yönlü fiziksel özellikler Şekil 5’de gösterilmektedir.



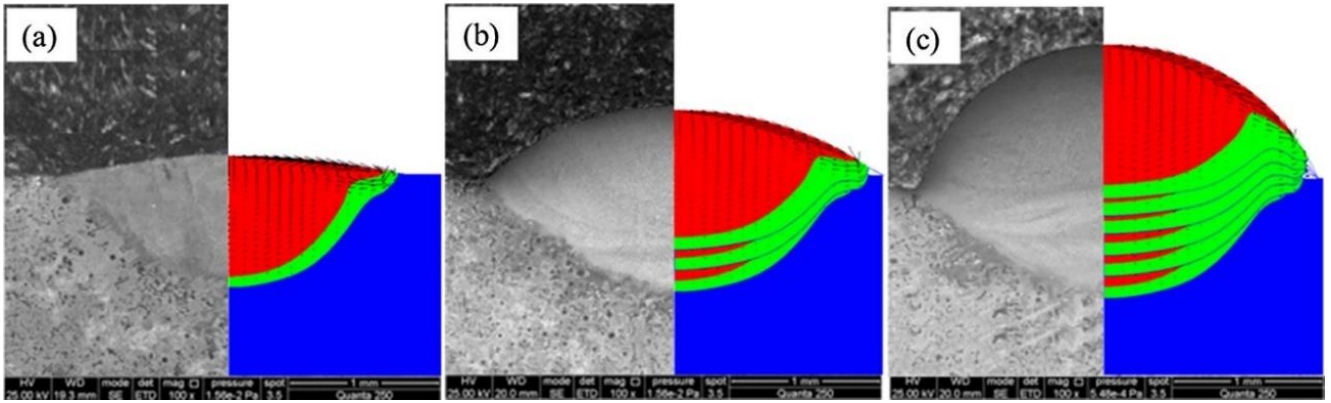
Şekil 5. Çok katmanlı eklemeli imalatta çoklu fiziksel özellikler [17]

Gri (grafitli) dökme demir üzerindeki Ni esaslı alaşımın altı katmanlı eklemeli imalat prosesi sayısal olarak simüle edilmiştir [17]. Şekil 6 altı katmanlı eklemeli imalat prosesinin şematik görüntüsüdür.



Şekil 6. 6 katmanlı eklemeli imalat sürecinin şeması [17]

Farklı katmanlardaki erimiş havuzun hesaplanan geometrisinin kesitleri ve deneysel kesitleri Şekil 7 'de



Şekil 7. Deneysel ve hesaplanmış kesitlerinin karşılaştırması: (a) bir katman, (b) üç katman, (c) altı katman [18]

Tablo 1. Sıcaklık ve akışkan akışı için mevcut yaklaşımların karşılaştırılması [13]

Yaklaşım	Özellikler
<i>Analitik Yaklaşım</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Analitik olarak Rosenthal'ın ısı iletim eşitliğini çözer ✓ Çıktıları sıcaklık alanı, son boyutlar ve soğutma oranı ✓ Hesaplama maliyeti nispeten ucuz, kullanımı kolay ve ✓ Etkili ısı transferi mekanizmalarını dikkate almaz ve bilinen hata oranı büyüktür
<i>Sonlu Elemanlar Metodu ile Isı İletim Modeli</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sürekli ve geçici hal enerji korunumu eşitliği ile taşınım ve ışıyım sınır koşullarını çözer ✓ Çıktıları 3B sürekli ve geçici hal sıcaklık dağılımı, son boyut ve şekil ✓ Karmaşık geometrilerin çözümü için uygulanabilen yazılım paketleri ✓ Eriyik havuzundaki sıcaklık bölgesinde sıvı metalin taşınım akışını dikkate almaz. Bu nedenle pik sıcaklığı ve soğutma oranını değerinden fazla tahmin eder
<i>Sonlu Farklar Metodu ile Isı Transferi ve Akışkan Akışı Modeli</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 3B geçici kütle korunumu eşitliği, momentum ve enerjiyi çözer ✓ Çıktıları 3B geçiş sıcaklığı, hız dağılımı, katılma parametleri son şekil ve boyut ✓ Eriyik havuzundaki eriyik akışını dikkate alır ve bu nedenle kesin doğru sıcaklık dağılımını sağlar ✓ Hesaplamaları çözülebilir yapmak için biriken kısmın üst geometrisini düz kabul eder
<i>Seviye Ölçüm Metodu</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Eriyik havuzunun serbest yüzeyini izler ✓ Çıktıları serbest eğri yüzeyinin 3B sıcaklık ve hız dağılımı ✓ Hesaplanan birikintinin şekil ve boyutu deney ile oldukça uyumludur ✓ Hesaplamalar hassas ve kütle korunumuna izin verme eğilimindedir
<i>Sonlu Farklar Metodu ile Akışkan Hacim Modeli</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Eriyik havuzunun serbest yüzeyini izler ✓ Çıktıları serbest eğri yüzeyinin 3B sıcaklık ve hız dağılımı ✓ Hassas hesaplamalar ✓ Seviye ölçüm metodu'na kıyasla kütle korunumu en az keskin ara yüzey içindir
<i>Lattice Boltzman Metodu ve Keyfi Lagrangian-Eulerian</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 2B ve 3B numerik metotlar ile hücresel otomat modelleme, ayrık uzay, zaman ve parçacık hızları ile ayrık parçacık kinetiği ✓ Serbest yüzey koşullarında termodinamik işlemi, yüzey gerilimi, faz geçişleri ve ıslatma ✓ Çıktıları eriyik havuzu geometrisi, son parça boyut ve şekli ✓ Son parçanın geometrisini doğru tahmin eder, yumru hatası ve yüzey pürüzlülüğü simüle edilebilir ✓ Hassas hesaplamaları olduğu için kütle paralel hesaplama uygundur

3 Bulgular ve Sonuç

Eİ işlemlerinin daha hızlı ve daha güvenilir hale getirilmesi için metal Eİ süreçlerinin modellenmesi süreç ve ürün optimizasyonu için büyük önem arz etmektedir.

Eklemeli imalat yöntemi ile imalat esnasında oluşan ısıl değişimlerin ve termal sürecin bilinmesi malzeme mikroyapısının değişimini anlamak ve kontrol etmek için oldukça önemlidir.

İlgili literatür ışığında bu çalışmada aşağıdaki belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Eklemeli imalatla katılma esnasında termal akış olayı ısı transferini doğrudan etkiler ve böylece parçanın mikro yapısını ve ilgili termomekanik özellikleri etkiler.
2. Eklemeli imalat sürecinin optimizasyonu, tutarlı olabilmesi ve yüksek kaliteli parçaların sağlanması için termal / akışın yönünü tam olarak anlamak çok önemlidir.
3. Termal davranışın kontrolü, ürün tekrarlanabilirliğini ve kalitesini sağlayan bir araçtır.
4. Mikroyapı ve sonuçtaki mekanik özelliklerini kontrol etmek için, katman esaslı üretim prosesi sırasında termal gradyanlarını, lokal-katılma olaylarını ve artık gerilmelerini anlamak ve tahmin etmek büyük önem taşımaktadır.
5. Sonlu eleman yöntemleri ve sayısal akışkanlar dinamiği çok yönlü-fiziksel DLB problemini modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, 2018 - 1. Dönem - TÜBİTAK 2219 Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında, "Lazer ile Metal Biriktirme Yöntemiyle Eklemeli İmalatta Isı Tesiri Etkisinde Kalan Bölgenin Sayısal ve Deneysel Olarak Araştırılması" adlı proje ile desteklenmeye değer bulunmuştur. TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

4 Kaynaklar

- [1] Purtonen, T., Kalliosaari, A., Salminen, A., Monitoring and adaptive control of laser processes, *Physics Procedia*, 56, 1218–1231, 2014.
- [2] Wang, L., Felicelli, S.D., Craig, J.E., Experimental and numerical study of the LENS rapid fabrication process, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131, 041019-8, 2009.
- [3] Tang, L., Landers, R.G., Melt pool temperature control for laser metal deposition processes-Part I: Online temperature control, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132, 011010-9, 2010.
- [4] Peng, L., Taiping, Y., Sheng, L., Dongsheng, L., Qianwu, H., Weihao, X., Xiaoyan, Z., Direct laser fabrication of nickel alloy samples, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 45, 1288–1294, 2005.
- [5] Costa, L., Vilar, R., Reti, T., Deus, A.M., Rapid tooling by laser powder deposition: process simulation using finite element analysis, *Acta Materialia*, 53, 3987–3999, 2005.

- [6] Nisar, A., Schmidt, M.J.J., Sheikh, M.A., Li, L., Three-dimensional transient finite element analysis of the laser enamelling process and moving heat source and phase change considerations, In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 217, 753–764, 2003.
- [7] Kolossov, S., Boillat, E., Glardon, R., Fischer, P., Locher, M., 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 117–123, 2004.
- [8] Roberts, I.A., Wang, C.J., Esterlein, R., Stanford, M., Mynors, D.J., A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 916–923, 2009.
- [9] Romano, J., Ladani, L., Sadowski, M., Thermal modeling of laser based additive manufacturing processes within common materials, *Procedia Manufacturing*, 1, 238–250, 2015.
- [10] Dong, L., Correia, J.P.M., Barth, N., Ahzi, S., Finite element simulations of temperature distribution and of densification of a titanium powder during metal laser sintering, *Additive Manufacturing*, 13, 37–48, 2017.
- [11] Bai, P.K., Cheng, J., Liu, B., Wang, W.F., Numerical simulation of temperature field during selective laser sintering of polymer-coated molybdenum powder, *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 16, 603–607, 2006.
- [12] Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N., Yadollahi, A., An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics, *Additive Manufacturing*, 8, 36–62, 2015.
- [13] DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Heid, A.W., De, A., Zhang, W., Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, 92, 112–224, 2018.
- [14] Grujicic, M., Cao, G., Figliola, R.S., Computer simulations of the evolution of solidification microstructure in the LENS rapid fabrication process, *Applied Surface Science*, 183, 43–57, 2001.
- [15] Fischer, P., Locher, M., Romano, V., Weber, H.P., Kolossov, S., Glardon, R., Temperature measurements during selective laser sintering of titanium powder, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 1293–1296, 2004.
- [16] Tang, Y.J., Zhang, Y.Z., Liu, Y.T., Numerical and experimental investigation of laser additive manufactured Ti2AlNb-based alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 196–204, 2017.
- [17] Gan, Z., Liu, H., Li, S., He, X., Yu, G., Modeling of thermal behavior and mass transport in multi-layer laser additive manufacturing of Ni-based alloy on cast iron, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 709–722, 2017.
- [18] Liu, H., Hao, J., Han, Z., Yu, G., He, X., Yang, H., Microstructural evolution and bonding characteristic in multi-layer laser cladding of NiCoCr alloy on compacted graphite cast iron, *Journal of Materials Processing Technology*, 232, 153–164, 2016.
- [19] Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389–405, 2016.