



Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method

Berkay Ergene*

Department of Mechanical Engineering, Pamukkale University, Denizli, 20160, Turkey

Highlights:

- Additive manufacturing simulation of biomedical parts such as scaffold and implant core with Amphyon 2021.
- Relative density of the parts effect the residual stress occurring directly.
- Material choice of the biomedical parts should be done carefully for additive manufacturing of possible implementations.

Keywords:

- Simulation
- Amphyon 2021
- Selective laser melting
- Residual Stress
- Biomedical

Article Info:

Research Article
Received: 07.05.2021
Accepted: 20.06.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.934143

Correspondence:

Author: Berkay Ergene
e-mail: bergene@pau.edu.tr
phone: +90 554 281 4943

Graphical/Tabular Abstract

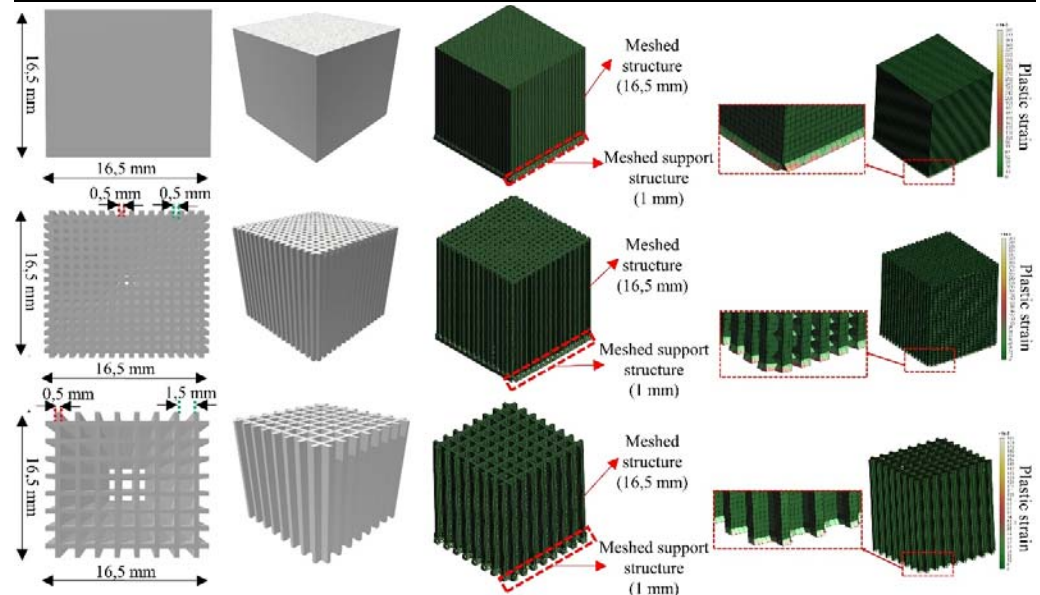


Figure A. Designed biomedical structures with various relative density and occurred plastic strains on structures during additive manufacturing

Purpose: Additive manufacturing (AM) simulations of biomedical parts made of Ti6Al4V and Inconel 718 with various relative densities were conducted in order to determine residual stresses and distortions. It is known that measurement of residual stress and distortions of cellular structures are time consuming and sometimes impossible process. Hence, a general prediction approach for biomedical parts such as scaffolds and implant cores in real size is necessary for being able to foresight possible manufacturing defects.

Theory and Methods:

Biomedical parts with different relative densities were designed by AutoCAD program and then AM simulations of these parts were examined via Amphyon 2021 program.

Results:

The results show that material type, relative density and build height of the parts are the most significant factors that affect the residual stress and displacement values which occur on the parts during AM. Moreover, designed models on actual usage dimensions can provide predictions for future studies thanks to AM simulation.

Conclusion:

When the maximum temperatures occurring during the manufacturing of the parts are compared, it has been determined that the parts with high relative density have a higher maximum temperature up to a certain build height. However, after a certain building height, parts with lower relative density begin to accommodate higher maximum temperatures. Lastly, plastic strains were localized between 1th layers of part and support structure.



Farklı bağıl yoğunluklardaki Inconel 718 ve Ti6Al4V biyomedikal parçaların seçici lazer ergitme (SLE) metoduyla üretiminin simülasyonu

Berkay Ergene*

Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Kınıklı, Denizli, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Biyomedikal alanda kullanılan hücresel yapıların tasarımı
- Seçici lazer ergitme metoduyla biyomedikal parçaların üretiminin Amphyon 2021 programı ile simülasyonu
- Eklemeli imalat süresince meydana gelen kalıntı gerilmeler, çarpılmalar ve sıcaklık değişimlerinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.05.2021

Kabul: 20.06.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.934143

Anahtar Kelimeler:

Seçici lazer ergitme,
biyomedikal,
kalıntı gerilme,
simülasyon,
amphyon 2021

ÖZ

Metal eklemeli imalatta en yaygın kullanılan alaşımlar olan Inconel 718 ve Ti6Al4V, otomotiv, uzay-uçak ve biyomedikal gibi bir çok alandaki uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bilindiği üzere, fonksiyonel hafifletilmiş parçalar, hafif olmalarına karşın yüksek özgül dayanımlarından dolayı araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Artan ilgilerin bir sonucu olarak da, üzerine gelen yükü homojen dağıtma, iyi düzeyde soğurma gibi üstün özelliklere sahip olan hafifletilmiş parçaların eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi ile üretilme fikri ön plana çıkmıştır. Seçici lazer ergitme (SLE) gibi Eİ yöntemlerinin geleneksel imalat yöntemlerine nazaran bir çok avantajı olmasına rağmen, üretim sırasında parçada kalıntı gerilme ve çarpılmalar meydana gelmekte ve bunların hücresel yapılarda ölçümleri deneysel olarak oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu çalışmada, biyomedikal alanda iskele ve implant çekirdek yapısı olarak kullanılan hücresel yapılar % 100, % 73,4 ve % 42,6 doluluk oranı ile tasarlanmıştır. Bu hücresel yapıların Inconel 718 ve Ti6Al4V malzemelerden SLE metoduyla üretimi sırasında oluşan kalıntı gerilmeler (σ_x , σ_y , ve σ_z), çarpılmalar, plastik birim şekil değişimleri ve maksimum sıcaklık değerleri Eİ simülasyon programı Amphyon 2021'le belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, plastik birim şekil değişimleri destek yapı ile asıl parçanın arasındaki köşe bölgelerde lokalize olmuştur. Ayrıca, kritik bir imalat yüksekliğinden sonra hücresel yapılarda tam dolu yapıya nazaran daha fazla maksimum sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir.

Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method

H I G H L I G H T S

- Design of cellular structures used in the biomedical field
- Simulation of the manufacturing of the biomedical parts by selective laser melting with the Amphyon 2021 program
- Investigation of residual stresses, distortions and temperature changes during additive manufacturing

Article Info

Research Article

Received: 07.05.2021

Accepted: 20.06.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.934143

Keywords:

Selective laser melting,
biomedical,
residual stress,
simulation,
amphyon 2021

ABSTRACT

Inconel 718 and Ti6Al4V which are the most widely used alloys in metal additive manufacturing, are preferred in applications in many fields such as automotive, aerospace and biomedical. As it is known, functional lightweight parts attract the attention of researchers due to their high specific strength despite their light weight. As a result of the increasing interest, the idea of producing lightweight parts with superior properties such as homogeneous distribution of the load and good absorption with additive manufacturing (AM) technology has come to the fore. Although AM methods such as selective laser melting (SLE) have many advantages over traditional manufacturing methods, residual stresses and distortions occur in the part during production, and their measurements in cellular structures are experimentally very difficult and time consuming. In this study, cellular structures used as scaffold and implant core structure in the biomedical field were designed with 100%, 73.4% and 42.6% infill rates. The residual stresses (σ_x , σ_y , and σ_z), distortions, plastic strains and maximum temperature values that occur during the production of these cellular structures from Inconel 718 and Ti6Al4V materials by SLM method were determined by the Amphyon 2021 AM simulation program. According to the obtained results, plastic strains, which provide a prediction of crack formation, were localized in the corner regions between the support structure and the main part. In addition, after a critical manufacturing height, higher maximum temperature values were observed in the cellular structures than the full structure.

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author : *bergene@pau.edu.tr / Tel: +90 554 281 4943

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat yöntemleri toz yataklı ergitme, yapıştırıcı ile imalat, direkt enerji depolama, malzeme ekstrüzyon, malzeme püskürtme, sac laminasyon ve fotopolimerizasyon olarak 7 ana sınıfa ayrılmış olup, bunlar içerisinde metalik malzemelerden parça üretiminde en sık tercih edileni toz partiküllerin lazer ışını yardımıyla ergitildiği ve yapılan tasarıma göre katman katman üç boyutlu bir ürün inşa etme sürecine dayanan toz yataklı ergitme sınıfının bir alt üyesi olan seçici lazer ergitme (SLE) metodudur [1, 2]. SLE metoduyla Inconel 718 [3], Ti6Al4V [4], AlSi10Mg [5], 316L [6], Cu-15Ni-8Sn [7] gibi malzemelerden üretim sağlamak mümkündür. Bu malzemelerden çoğunlukla tercih edilenler arasında yer alan Inconel 718 alaşımı 700°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda dayanım, sürünme direnci ve iyi bir yorulma ömrü göstermektedir [8, 9]. Ayrıca, Inconel 718 malzeme yüksek sıcaklıklarda iyi düzeyde mukavemet göstermesi ve yorulmaya, aşınmaya ve sıcak korozyona karşı mükemmel bir direnç sergilemesinden dolayı yüksek sıcaklığa maruz kalan uçak parçalarında, gaz türbinlerinde, nükleer reaktörlerde ve çeşitli diğer uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir [8]. Tüm bu avantajlı özelliklerine karşın Inconel 718 alaşımının yüksek sertliği ve düşük ısı iletkenliği, özellikle karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde konvansiyonel imalat metodları ile üretimini oldukça zorlaştırmaktadır [10]. Dahili soğutma kanallarına sahip türbin kanatları ya da sıvı roket motoru enjektörlerinin sayısız küçük nozullarının üretimi için Eİ gibi yenilikçi bir yöntemle gerek duyulmaktadır [11, 12].

Metalik malzemelerden Ti6Al4V alaşımı da yüksek dayanımı, düşük yoğunluk değeri, yüksek kırılma tokluğu, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluğu [13] nedeniyle uçak yapısal uygulamalarında [14], gaz türbinlerinde, jet motorlarında [15] kimya endüstrisinde [16], otomotiv sektöründe [17] ve biyomedikal alanında [18] geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Diğer bir yandan ise, Ti6Al4V alaşımı zayıf termal iletkenliğinden [19], sertleşme eğiliminden [20] ve oksijene karşı aktif kimyasal reaktivitesinden [21] dolayı bir dizi üretim zorluklarına sahiptir. Ti6Al4V ürünlerin dövme, döküm ve haddeme gibi yöntemlerin yanı sıra talaşlı imalatla da üretilebildiği bilinmektedir. Ancak bu yöntemler, yüksek miktarda malzeme atığına, yüksek üretim maliyetine ve uzun imalat sürecine neden olabilmektedir [22]. Yukarıda bahsedilen üretim zorluklarından dolayı, yapılan tasarımlar doğrultusunda karmaşık geometrilere sahip Inconel 718 ve Ti6Al4V malzemenin ürünler, yenilikçi bir imalat yöntemi olan Eİ yöntemi ile son boyutlarına yakın ve verimli bir şekilde üretilmektedir [23-25].

Diğer yandan bakacak olursak, her imalat yöntemi gibi Eİ yöntemi de bir dizi dezavantajlara sahiptir. Toz yataklı ergitme sınıfına mensup olan SLE metoduyla üretilen parçalarda kalıntı gerilme oluşumu, çatlaklar, çarpılmalar ve yüksek yüzey pürüzlülüğü çözülmesi gereken problemlerdir [26]. Sıcaklık girişi, tarama vektörü ve stratejisi, katman

kalınlığı ve üretim tablasının ön ısıtılması gibi imalat parametrelerinin [27] yanı sıra, parça geometrisinin ya da parçaların imalat tablasındaki konumlandırmanın optimizasyonu ile birlikte bu problemleri minimize etmek mümkündür [28]. Tarama vektörünün kısaltılması [29], imalat tablasının ön ısıtılması [30] ve katman kalınlığının düşük seçilmesinin [31] kalıntı gerilmeleri düşürdüğü bilinmektedir. Eİ ile üretilen parçalarda yüksek sıcaklık gradyan değişimlerinden dolayı [32, 33] meydana gelen kalıntı gerilmeleri tespit etmek amacıyla tabaka kaldırma, delik delme, halka çekirdek, kanal açma, kesit profil ölçümü, tüp yarma, ince kesitlere ayırma, X-ışını kırınımı, şiddetli X-ışını kırınımı ve nötron kırınımı gibi çeşitli kalıntı gerilim ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır [34]. Literatürdeki çalışmalarda, lazerle metal toz ergitme prosesi ile üretilmiş parçalardaki kalıntı gerilmelerin ölçülebilmesi adına, mikro girinti tekniğinin kullanıldığı [35] ya da mevcut kalıntı gerilme ölçme yöntemlerine bir alternatif olarak hibrit kalıntı gerilme ölçme metodu önerildiği [36] görülmektedir. Yüzey kalitesini geliştirme adına ise lazerle parlatma işlemleri yapılmaktadır [37, 38]. Kalıntı gerilme ölçümlerinin yanı sıra, gözenekli ya da kafes yapılı parçaların imalatında da Eİ parametrelerinin mekanik dayanımlara etkisi bir çok çalışmada incelenmiştir [39-41]. Bilindiği üzere, Eİ metoduyla üretilen parçaların maliyetinin pahalı olması, kalıntı gerilme ve çarpılma ölçüm metodlarının zaman alıcı olmasından dolayı, deneyerek öğrenme hem maliyet hem de zaman açısından verimsiz bir yöntem olacaktır. Bu noktada, Eİ ile üretilmek istenen parçaların üretimi sırasında oluşacak gerilmeleri, deplasmanları, sıcaklık oluşumlarını imalat öncesinde tahmin etmeye yarayan Additive Works Amphyon, Atlas 3D Sunata, MSC Simufact Additive, Autodesk NetFabb Simulation, Ansys Additive Print gibi çeşitli Eİ simülasyon programları ve Abaqus, Ansys gibi sonlu elemanlar bazı programlar ön plana çıkmaktadır [42].

Literatürdeki kalıntı gerilme ve çarpılmaların tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, Mukherjee vd. [31], Inconel 718 ve Ti6Al4V parçaların eklemeli imalatı sırasında meydana gelen kalıntı gerilmeleri ve çarpılmaları Abaqus sonlu elemanlar analiz programı yardımıyla tahmin etmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri bulgular neticesinde, Inconel 718 parçaların Ti6Al4V parçalara nazaran daha fazla kalıntı gerilme ihtiva ettiği ve kalıntı gerilmelerin katman kalınlığının azaltılmasıyla önemli ölçüde düşürülebileceğini rapor etmişlerdir. Galerati ise [43] elektrik motor çekirdek yapılarının 316 paslanmaz çelik malzemenin SLE metoduyla üretimi sırasında meydana gelebilecek kalıntı gerilmeleri Ansys Workbench yazılımı ile belirlenmiş ve akabinde topolojik optimizasyona giderek kalıntı gerilmelerin minimize edilebileceğini ifade etmiştir. Başka bir çalışmada [36], SLE yöntemiyle farklı boyut ve geometrilerdeki Ti6Al4V parçaların eklemeli imalatı Autodesk Netfabb Simülasyon programı ile simüle edilmiş ve oluşan kalıntı gerilmeler ve çarpılmalar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, parçaların imalat tablasında tekil ya da birden fazla oluşu, konumlandırma yerleri ve geometrileri oluşan kalıntı gerilmeleri doğrudan etkilediği

vurgulanmıştır. Mayer vd. [44] de Ti6Al4V malzemeden SLE metoduyla üretilen farklı geometrilerdeki parçaların simülasyonunu Ansys Additive Print ve Ansys Additive Suit programları ile gerçekleştirmişler ve parça geometrisinin, lokal ergiyik havuz geometrisi ve tarama stratejisi ile birlikte makroskobik çarpılmaları doğrudan etkilediğini açıklamışlardır. Son olarak, Söylemez vd. [45] de SLE yöntemi ile AlSi10Mg malzemeden parçaların SLE simülasyonunu Netfabb programı aracılığıyla gerçekleştirerek, eklemeli imal edilecek olan parça üzerindeki deformasyonları tahmin etmeye çalışmışlardır.

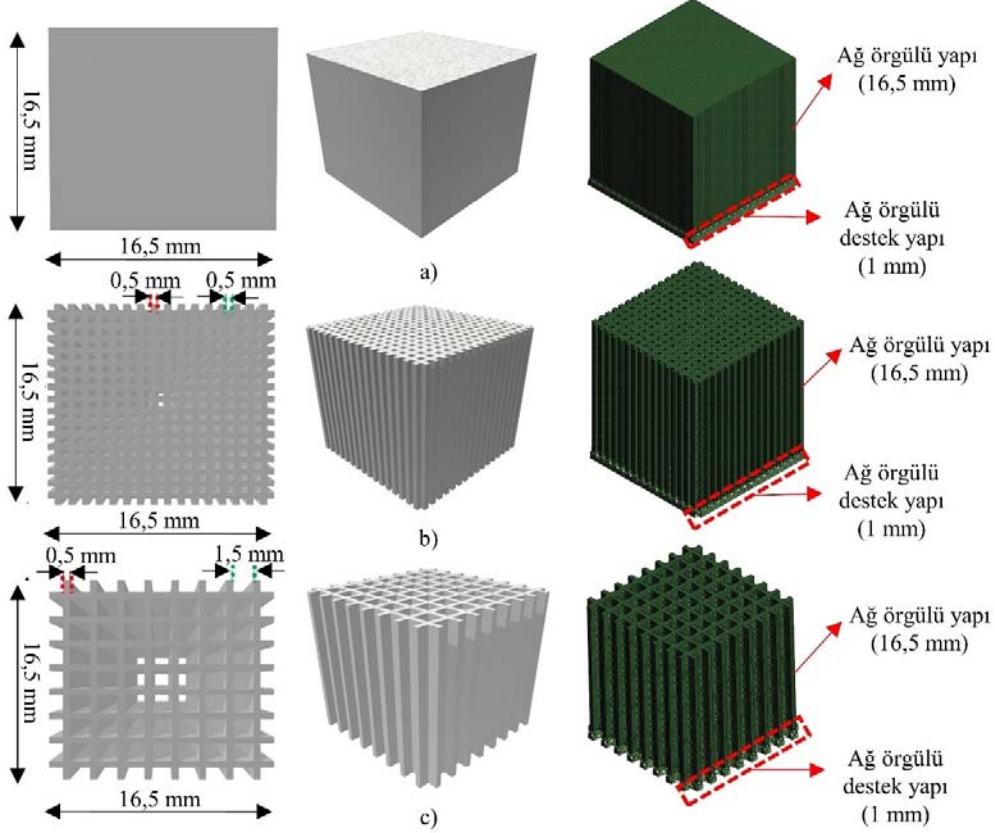
Literatürde, farklı geometrilerdeki parçalarda meydana gelebilecek kalıntı gerilmeleri ve çarpılmaları öngörmek amacıyla bir dizi çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak, çeşitli bağıl yoğunluk değerlerine sahip, biyomedikal alanında destek elemanı ya da implantların çekirdek kısmında kullanılan ve mevcut kalıntı gerilim ölçüm yöntemleriyle kalıntı gerilme tespitinin çok zor olduğu hücresel yapıların Inconel 718 ve Ti6Al4V malzemelerinden SLE metoduyla Eİ simülasyonu Amphyon 2021 programı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ile birlikte imalat süresince ve akabinde meydana gelen maksimum sıcaklık değişimi, deplasman ve gerilmeler tespit edilerek bağıl yoğunluğun ve malzeme çeşidinin sonuçlara etkileri irdelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Şekil 1a, Şekil 1b ve Şekil 1c de sırasıyla bağıl yoğunlukları (ρ^*), 1, 0,734 ve 0,426 olan ve Amphyon programı ile Eİ simülasyonu yapılacak biyomedikal parçaların bilgisayar destekli tasarım (BDT) üzerinde boyutları ve hücresel yapıların imalatı sonrası tel erozyon yöntemi ile kesilmesi sırasındaki olası problemleri önlemek amacıyla atılan destek yapı ile birlikte ağ örgülü görüntüleri verilmiştir. İlgili tasarımlar AutoCAD programında yapılmıştır. Her bir parçanın genişliği, boyu ve yüksekliği iskele ve implant çekirdek yapısı boyutlarına uygun olması amacıyla 16,5 mm olarak belirlenirken [46-48], parçaların bağıl yoğunluk değerleri ise iskele yapıların bağıl yoğunluk değerlerine paralel olarak [49, 50] boyutları 0,5 x 16,5 x 16,5 mm olan kiriş yapıların sıklığının değişimi ile sağlanmıştır.

Ayrıca, Tablo 1’de Eİ simülasyonu yapılacak tüm parçaların boyutları, bağıl yoğunlukları, malzemeleri ve kodlanma şekilleri hakkında detaylı bilgi paylaşılmıştır. Parçaların bağıl yoğunluk değerleri, Tablo 1’de verilen parçanın dolu hacminin toplam hacmine oranından hesaplanmıştır.

Eİ simülasyonu yapılan parça, birden fazla parça üretimi sırasında meydana gelen termal etkileşimleri ortadan kaldırmak amacıyla imalat hacim boyutları 400x400x400



Şekil 1. Tasarlanan farklı bağıl yoğunluklardaki (ρ^*) parçaların boyutları, BDT ve ağ örgülü görüntüsü, a) $\rho^*=1$, b) $\rho^*=0,734$, c) $\rho^*=0,426$

(Dimensions of designed parts with different relative densities (ρ^*), CAD and mesh view, a) $\rho^*=1$, b) $\rho^*=0,734$, c) $\rho^*=0,426$)

mm olan ve Yb-fiber lazer kullanılan SLE cihazının [51] imalat tablasının merkezine tek parça olarak konumlandırılmıştır. Eİ simülasyonu yapılan her parçanın ağ örgüsü sırasında en küçük giriş genişliği olan 0,5 mm'yi eşit bölebilmesi amacıyla 0,25 mm boyuta sahip kübik elemanlar kullanılmıştır (Şekil 1). Ayrıca, simülasyon verileri girilirken tüm parçalara 1 mm yüksekliğinde destek yapı atılmış ve imalat süreci tamamlanan parçalar destek yapılarından ve imalat tablasından ayrılmıştır. Analizler sırasında değişen bağıl yoğunluk değerlerine ilişkili olarak en fazla 327878 düğüm noktası ve 289168 eleman, en düşük ise 109143 düğüm noktası ve 82422 eleman kullanılmıştır. Ek olarak, 0,25 mm boyuta sahip kübik elemanlar kullanıldığından destek yapı ve parça dahilinde toplam 70 adet katmana göre sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak, Eİ simülasyonu yapılan yapılara diğer birçok çalışmada olduğu gibi herhangi bir ısı işlem uygulanmamıştır [52-54].

Eklemeli imalat simülasyonları için sırasıyla Tablo 2'de mekanik özellikleri, Tablo 3'te ise termal özellikleri verilen Inconel718 ve Ti6Al4V atanmıştır. İlgili malzeme özellikleri malzeme üreticisi katalog verisinin yer aldığı Amphyon 2021 programının malzeme kütüphanesinden çekilmiştir.

Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman yüksekliği gibi eklemeli imalat parametrelerinin parçaların mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği bilinmektedir [55]. Tablo 4'te farklı bağıl yoğunluklardaki parçaların eklemeli imalatı için kullanılan optimum eklemeli imalat parametreleri detaylı olarak verilmiştir. Parçaların eklemeli imalatı sırasında meydana gelen kalıntı gerilme, çarpılma ve sıcaklık değişimi gibi bulguların doğru bir şekilde mukayese edilebilmesi amacıyla hem Inconel 718 hem de Ti6Al4V parçaların imalatında literatürdeki çalışmalarda imalat parametrelerine benzer şekilde ortak imalat parametreleri seçilmiştir [56-58].

Analizler sırasında Amphyon programı, gerilmeleri ve çarpılmaları tahmin ederken orijinalinde döküm işlemlerini simüle etmek amacıyla geliştirilen ancak daha sonra SLE gibi toz yataklı ergitme eklemeli imalat proseslerinde de tercih edilen var olan gerinim metodunu kullanmaktadır. İlgili metotta, kullanılan lazer çapının üretilen parçalardan çok daha küçük olduğu ifade edilip, lazerin bırakmış olduğu her bir izin termo-mekanik geçişinin benzer olduğu düşünülmektedir. Bu varsayımlar sayesinde lazer toz yataklı ergitme simülasyonu geleneksel sonlu elemanlar analizi yöntemine nazaran önemli ölçüde zaman kazandırmakta ve bunun yanı sıra birleştirilmiş termomekanik simülasyon yerine termal yüklerle mekanik bir proses olarak simüle edilmesine olanak tanıdığı ifade edilmektedir [59]. Katman katman imalat sürecinin gerçekleştiği toz yataklı ergitme işlemlerinde bir katmanın inşa edilmesi sırasında ilgili katman onu çevreleyen katlanmış bölgeler ve alt katmandan gelen gerilime maruz kaldığı bilinmektedir. Eklemeli imalat süresince periyodik olarak tekrarlanan ısınma ve soğumadan kaynaklanan mekanik kısıtlamalar ve plastik deformasyonlar, parçada kalıntı gerilmelerin oluşumuna sebebiyet vermektedir. Başka bir çalışmada da eklemeli imal edilen bir parçanın imalat tablasından kesildiğinde elastik gerilmelerin ortadan kalkmasına bağlı olarak var olan kalıntı gerilmelerin yeniden parça üzerinde dağıtıldığı vurgulanmaktadır [60]. Dolayısıyla, katman katman üretimi sağlanan parça, gerinimlerin bir kombinasyonunu ortaya koymaktadır [61]. Var olan gerinim ϵ_{vo} , lazer taraması sırasında meydana gelen hızlı ısınma ve soğuma neticesinde; plastik deformasyondan meydana gelen $\epsilon_{plastik}$, termal genişleme ve daralmadan meydana gelen ϵ_{termal} ve faz değişimlerinden kaynaklanan ϵ_{faz} gerinimlerinin toplamına eşittir (Eş. 1) [62-64]. Lazer taraması sırasında oluşan toplam gerinim değerini ϵ_{toplam} ile ifade edecek olursak, toplam gerinim değeri, elastik gerinim değeri $\epsilon_{elastik}$ ve var olan gerinim değeri ϵ_{vo} 'nun toplamına eşit olacaktır (Eş. 2).

Tablo 1. Eklemeli imalat simülasyonu yapılan parçaların boyutları, doluluk oranları ve bağıl yoğunluk değerleri
(Dimensions, infill rate and relative density values of additive manufacturing simulated parts)

Kod	Malzeme	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	Destek yapı yüksekliği (mm)	Dolu hacim (mm ³)	Boş hacim (mm ³)	Toplam hacim (mm ³)	Bağıl yoğunluk
Inconel718 (%100)	Inconel 718	16,5	16,5	16,5	1	272,25	0	272,25	1
Inconel718 (%73,4)	Inconel 718	16,5	16,5	16,5	1	199,83	72,42	272,25	0,734
Inconel718 (%42,6)	Inconel 718	16,5	16,5	16,5	1	115,98	156,27	272,25	0,426
Ti6Al4V (%100)	Ti6Al4V	16,5	16,5	16,5	1	272,25	0	272,25	1
Ti6Al4V (%73,4)	Ti6Al4V	16,5	16,5	16,5	1	199,83	72,42	272,25	0,734
Ti6Al4V (%42,6)	Ti6Al4V	16,5	16,5	16,5	1	115,98	156,27	272,25	0,426

Tablo 2. Eklemeli imalat simülasyonu için atanan Inconel 718 ve Ti6Al4V malzemelerin mekanik özellikleri
(Mechanical properties of Inconel 718 and Ti6Al4V materials assigned for additive manufacturing simulation)

Malzeme	Poisson oranı	Elastisite modülü (MPa)	Akma dayanımı (MPa)
Inconel 718	0,30	210 000	1150
Ti6Al4V	0,34	110 000	1030

Tablo 3. Eklemeli imalat simülasyonu için atanan Inconel 718 ve Ti6Al4V malzemelerin termal özellikleri
(Thermal properties of Inconel 718 and Ti6Al4V materials assigned for additive manufacturing simulation)

Sıcaklık (°C)	Inconel 718		Ti6Al4V	
	İletkenlik (W/mm. K)	Kapasite (W/mm ³ .K)	İletkenlik (W/mm. K)	Kapasite (W/mm ³ .K)
50	0,01141	0,00346	0,00671	0,00249
75	0,01182	0,00349	0,00729	0,00252
100	0,01223	0,00352	0,00784	0,00255
125	0,01264	0,00356	0,00836	0,00258
150	0,01304	0,00359	0,00887	0,00261
175	0,01344	0,00362	0,00936	0,00263
200	0,01384	0,00365	0,00983	0,00266
225	0,01424	0,00368	0,01029	0,00268
250	0,01463	0,00371	0,01074	0,00270
275	0,01503	0,00374	0,01119	0,00273
300	0,01542	0,00376	0,01162	0,00275
325	0,01581	0,00379	0,01205	0,00277
350	0,01621	0,00382	0,01247	0,00279
375	0,01660	0,00385	0,01289	0,00281
400	0,01699	0,00387	0,01331	0,00283

Tablo 4. Inconel 718 ve Ti6Al4V parçaların eklemeli imalat simülasyonu sırasında atanan SLE parametreleri
(SLM parameters assigned during additive manufacturing simulation of Inconel 718 and Ti6Al4V parts)

Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Katman yüksekliği (mm)	Tarama aralığı (mm)	Başlangıç tabla sıcaklığı (°C)	Toz serme süresi (s)
300	1000	0,04	0,1	35	10

Eş. 2’de var olan gerinim ifadesini yalnız bırakırsak, Eş. 3’teki var olan gerinim ifadesi elde edilmiş olur.

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{plastik} + \varepsilon_{termal} + \varepsilon_{faz} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{toplam} = \varepsilon_{elastik} + \varepsilon_{vo} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{toplam} - \varepsilon_{elastik} \quad (3)$$

İmalat süresince biriken gerinimler, parçanın toplam çarpılma miktarını etkilemektedir. Gerinim değerlerinin yanı sıra aşağıdaki eşitlikler sonlu elemanlar analizlerinde elastik malzemeler için kalıntı gerilmeleri hesaplamada kullanılmaktadır [60, 61].

$$[K]\{u\} = \{f^*\} \quad (4)$$

$$\{f^*\} = \int [B][D]\{\varepsilon_{vo}\} \quad (5)$$

$[K]$, $\{u\}$ ve $\{f^*\}$ sırasıyla elastik katılık matrisini, düğümsel deplasman matrisini ve var olan gerinim kaynaklı düğüm kuvvetini belirtmektedir. Deplasman alanı $\{u\}$ Eş. 4’te gösterildiği gibi bulunduğu, kalıntı gerilme $\{\sigma\}$ Eş. 7 ile hesaplanabilmektedir.

$$\{e\} = [B]\{u\} \quad (6)$$

$$\{\sigma\} = [D^e](\{\varepsilon_{toplam}\} - \{\varepsilon_{vo}\}) \quad (7)$$

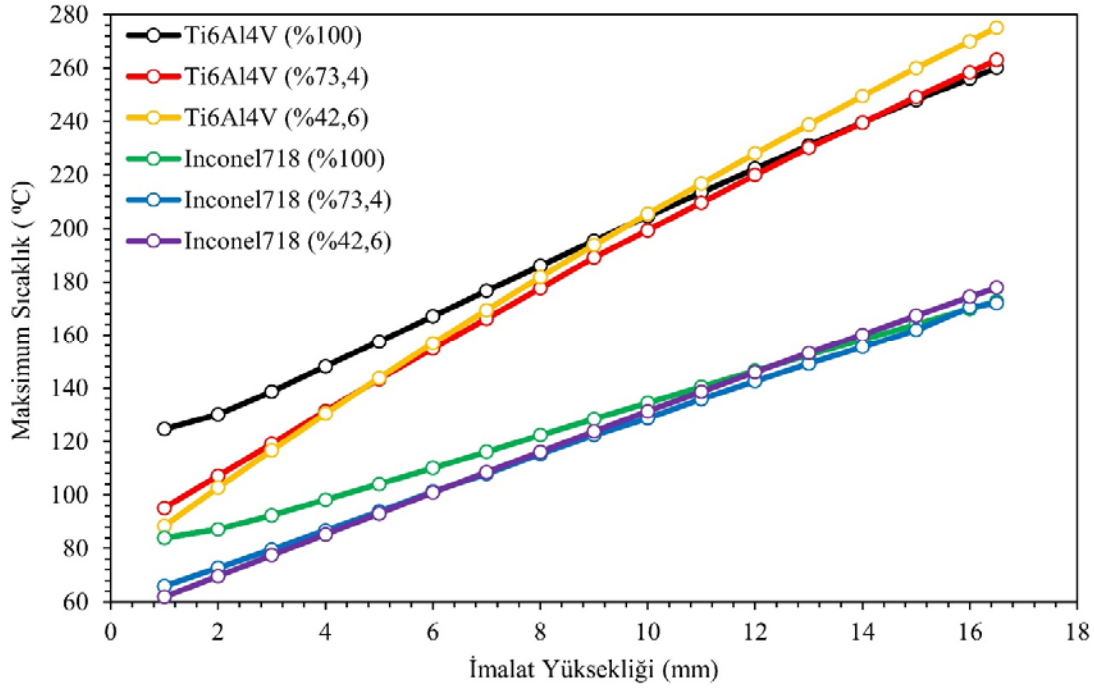
Eş. 6 ve Eş. 7’de $[B]$ düğümsel deplasman matrisini ve $[D^e]$ elastik gerilme-gerinim matrisini tanımlamaktadır. Böylelikle, var olan gerinimlerin büyüklüğü ve dağılımı bilindiğinde, kalıntı gerilmeler ve onlara bağlı olarak

deformasyon yukarıdaki eşitlikleri (Eş. 1 – Eş. 7) kullanarak hesaplanabilmektedir [42].

3. SİMULASYONLA ELDE EDİLEN BULGULAR (SIMULATION FINDINGS)

Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde oluşan maksimum sıcaklıkların ve sıcaklık değişimlerinin oluşan kalıntı gerilmeleri ve şekil değişimlerini doğrudan etkilediği bilinmektedir [64-66]. Şekil 2’de üretilen tüm parçaların imalat yüksekliğine karşılık gelen maksimum sıcaklıkları verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Ti6Al4V parçalar, Inconel718’den imal edilen parçalara göre bünyesinde daha fazla maksimum sıcaklık barındırmaktadır. Bu durum, Ti6Al4V malzemenin düşük termal iletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Artan imalat yüksekliği ile dışarı atılamayan ısı, parça bünyesinde birikecek ve parçanın üst katmanlarında sıcaklık değerlerinin daha da artmasına neden olacaktır [67]. Her bir malzemenin üretilen yapılar bağlı yoğunluk değişimlerine göre kendi içlerinde kıyaslandığında ise bağlı yoğunluğu yüksek olan parçalar imalatın ilk evresinde daha yüksek maksimum sıcaklığa sahipken, artan imalat yüksekliğine bağlı olarak, bağlı yoğunluğu düşük olan parçaların gerisinde kalmaktadır. Örneğin, bağlı yoğunluğu 0,426 ile minimum değere sahip olan Ti6Al4V parça yaklaşık 10 mm imalat yüksekliği ile birlikte tam dolu Ti6Al4V parçanın maksimum sıcaklık bakımından önüne geçmiştir. Ti6Al4V parçalarda gözlenen bu eğilim, Inconel 718 malzemenin üretilen parçaların imalatı sırasında da görülmüş olup, bağlı yoğunlukları farklı olan Ti6Al4V parçaların SLE metoduyla üretimi esnasında sıcaklıklarının



Şekil 2. İmalat yüksekliğine bağlı olarak parçalarda meydana gelen maksimum sıcaklık değişimi
(Maximum temperature variation in parts depending on the building height)

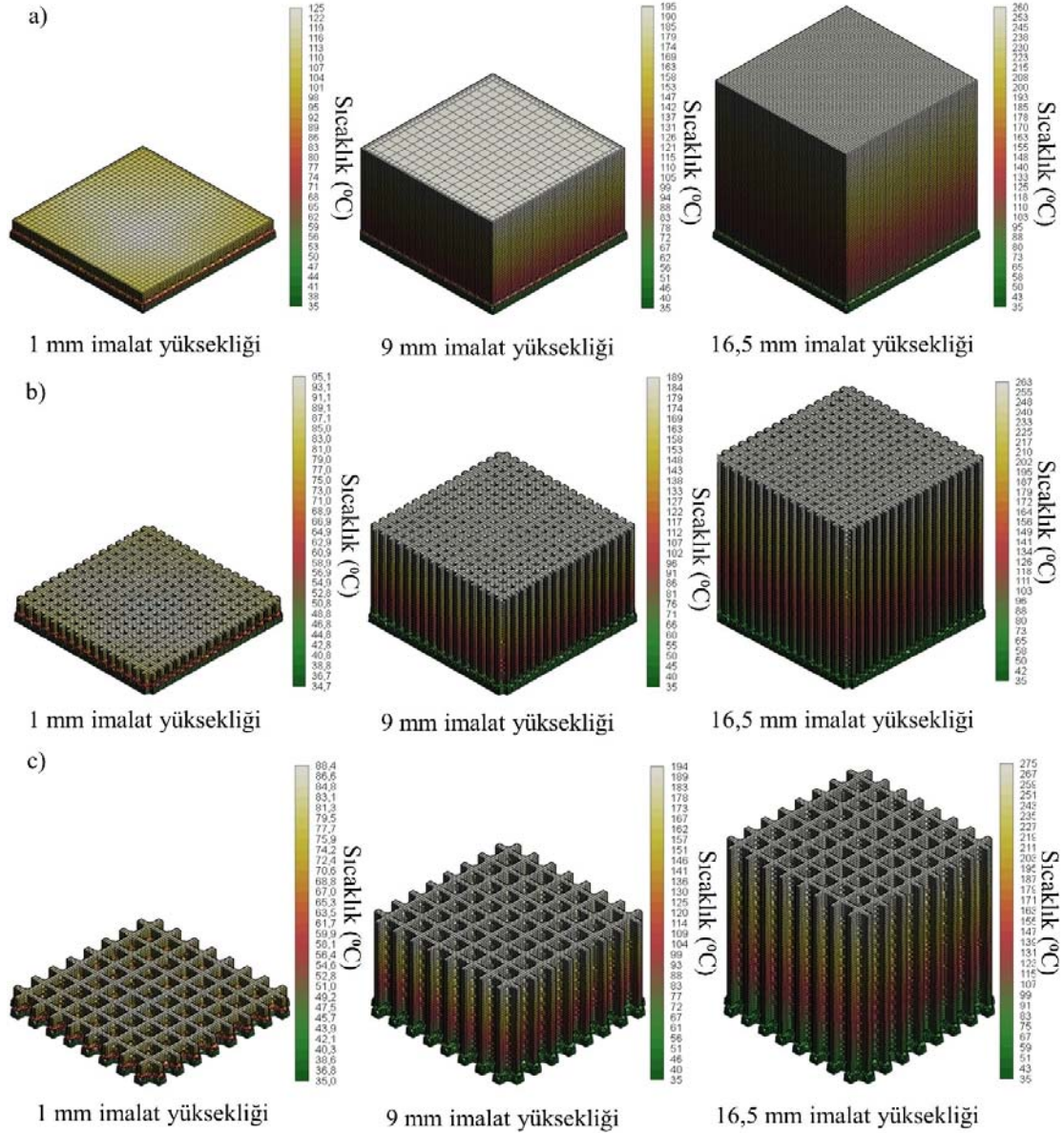
termal kamera ile deneysel olarak ölçümünü ve sonlu elemanlar analizlerini kapsayan çalışmanın sonuçları ile örtüşmektedir [36].

Şekil 3a, Şekil 3b ve Şekil 3c'de ise sırasıyla Ti6Al4V malzemeden imal edilen $\rho^*=1$, $\rho^*=0,734$ ve $\rho^*=0,426$ olan parçaların 1 mm, 9 mm ve 16,5 mm imalat yüksekliklerinde sıcaklıkları görülmektedir. Görüldüğü üzere, imalat yüksekliği arttıkça parçalarda meydana gelen sıcaklık değerleri artmakta ve destek yapıdan yukarı doğru çıkıldıkça da aynı şekilde sıcaklıkların arttığı belirlenmiştir. Bu durumun nedeni olarak, daha geç imal edilen katmanın daha geç soğuması olarak yorumlanabilmektedir [68].

Şekil 4'te ise farklı bağıl yoğunluklara sahip Ti6Al4V ve Inconel718 parçaların Eİ ile üretimi sırasında meydana gelen maksimum bileşke deplasman değerleri verilmiştir. Şekil 4'den de görüleceği üzere, hem Ti6Al4V hem de Inconel 718 parçaların imalat yüksekliklerinin artmasıyla birlikte, maksimum bileşke deplasman değerleri de artış göstermektedir. Bağıl yoğunluk değeri 1, yani doluluk oranı % 100 olan, başka bir ifadeyle tam dolu parçalar, doluluk oranları daha düşük olan parçalara nazaran daha yüksek maksimum bileşke deplasman göstermektedir. Mugwagwa vd. [69] de SLE metoduyla 1.2709 sıcak iş takım çeliğinden ürettikleri yapılar da gözenek miktarının artmasıyla birlikte çarpılma miktarının azaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, değinilmesi gereken bir diğer durum ise Ti6Al4V parçaların, Inconel 718 parçalara göre daha fazla çarpılmaya uğradığıdır. Bu durumun da Ti6Al4V'un Inconel 718'e göre elastisite modül değerinin düşük olmasından kaynaklandığı literatürdeki bir diğer çalışmada olduğu gibi ifade edilebilir

[70]. Parçaların eklemeli imalatı tamamlandıktan sonra destek yapıların çıkarılıp, parça tabladan ayrıldıktan sonra maksimum bileşke deplasman değerlerinde %10 ile % 25 aralığında artış gözlemlenmiştir. Maksimum bileşke deplasman değerlerinde meydana gelen bu artış da eklemeli imal edilen parçanın, hareketini sınırlayan imalat tablasından ayrılması ve rahatlaması sonucu oluşmaktadır [71, 72]. Maksimum artış % 25 ile bağıl yoğunluğu 0,426 olan Ti6Al4V parçanın imalatında, minimum artış ise % 10 ile bağıl yoğunluğu 1 olan Inconel 718 parçanın üretim sürecinde gerçekleşmiştir. Son olarak Kayacan da [36] SLE metoduyla Ti6Al4V malzemeden ürettiği 10x10x10 mm boyutlarındaki kübik parçanın 220 μ mertebesinde maksimum deplasman değerine sahip olduğunu rapor etmiştir.

Eklemeli imalat simülasyonu gerçekleştirilen parçaların eğilim olarak benzer deplasman davranışları gösterdikleri tespit edilmiştir. Şekil 5'te benzer çarpılma davranışında bulunan parçalardan 0,426 bağıl yoğunluk oranına sahip Inconel 718 parçanın imalat sonrası üzerinde meydana gelen yönlere bağıl deplasmanlar ve bileşke deplasman verilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b'de sırasıyla x ve y yönünde meydana gelen deplasmanlar verilmiş olup, üretilen parçanın hem x yönünde hem de y yönünde daralma gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 5c incelendiğinde ise ilgili parçanın yapım yönü olan z yönünde ise uzama gösterdiği, ayrıca z yönünde maksimum deplasmanın parçanın alt köşe kısımlarında meydana geldiği görülmektedir. Yukarı doğru iç bükey olarak gözlemlenen parçanın şekil değişimi, parçanın ve imalat tablasının termal geçmişinden kaynaklanmaktadır. Önce, parçanın üst katmanında bulunan



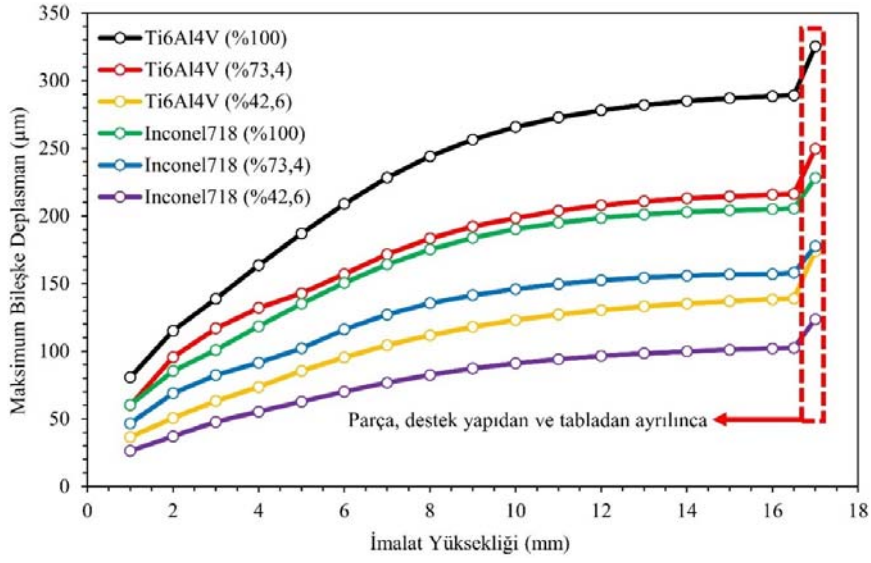
Şekil 3. Farklı bağıl yoğunluklardaki Ti6Al4V parçaların çeşitli imalat yüksekliklerindeki sıcaklık dağılımları, a) $\rho^* = 1$, b) $\rho^* = 0,734$, c) $\rho^* = 0,426$.

(Temperature distribution of Ti6Al4V parts with different relative densities at various building heights, a) $\rho^* = 1$, b) $\rho^* = 0,734$, c) $\rho^* = 0,426$)

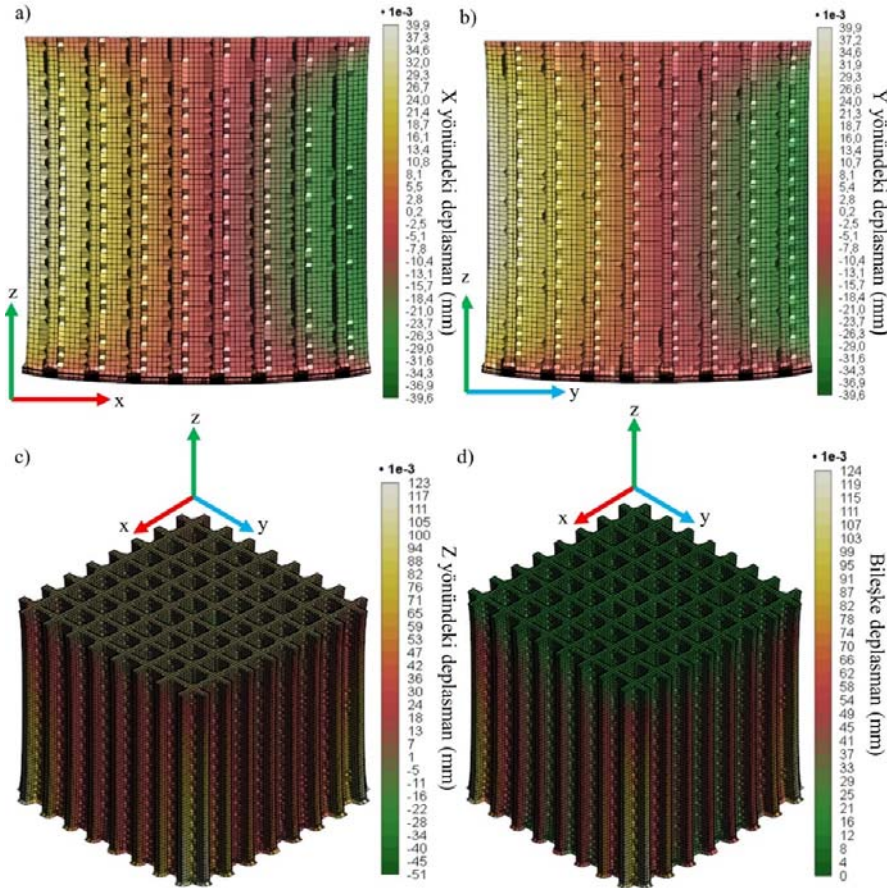
malzeme lazer ısınması nedeniyle genişlemektedir. Malzeme soğudukça, üst katmanlardaki plastik şekil değişimi, alt katmanlara göre daha küçük hale gelmektedir. Böylelikle, içbükey formda parçada şekil değişimi oluşmaktadır [73]. Şekil 5d'de, üretilen parçanın bileşke deplasman değerine göre ise, parçanın alt köşeleri yukarı doğru maksimum deplasman eğiliminde iken parçanın en üst kısmı minimum seviyede deplasmana sahiptir. Yakout vd. [74] SLE metoduyla elastisite modülü ve Poisson oranı gibi malzeme özellikleri Inconel 718 ile paralellik gösteren 316L malzemeden boyutları yaklaşık 50x10x10 mm boyutlarında üretilen parçada oluşan kalıntı gerilme ve çarpılmalar hem deneysel hem de sonlu elemanlar analiziyle tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre parçanın Z eksen

boyunca 0,14 mm deplasmana sahip olduğu belirtilmiştir. Üretilen parçaların boyutları eşit olmadığından dolayı tam bir mukayese yapılamasa da, genel bir çıkarım yapmak mümkündür. Ayrıca aynı çalışmada Ti6Al4V malzemeden üretilen parçanın 316L malzemeye nazaran daha fazla çarpılmaya uğradığı da ifade edilmiştir.

Şekil 6a, Şekil 6b ve Şekil 6c'de sırasıyla doluluk oranları % 100, % 73,4 ve % 42,6 olan Ti6Al4V parçaların eklemeli imalatı sırasında meydana gelen plastik birim şekil değişimleri verilmiştir. Plastik şekil değişimlerinin lokalize olduğu bölgelerde parça üzerinde çatlak oluşma riskinin daha fazla olduğu bilinmektedir [75-77]. İlgili yapılar incelendiğinde, plastik birim şekil değişimlerinin



Şekil 4. İmalat yüksekliği boyunca üretilen parça üzerinde meydana gelen maksimum bileşke deplasman. (The maximum resultant displacement that occurs on the manufactured part along the building height)

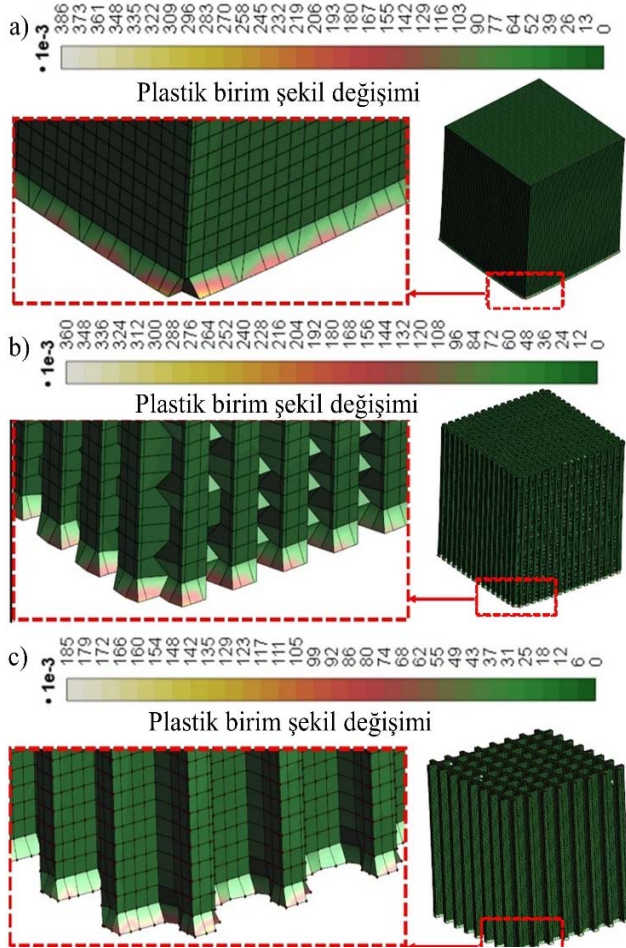


Şekil 5. $\rho^*=0,426$ olan Inconel718 parçanın imalat sonrası deplasman değerleri, a) x yönündeki deplasman, b) y yönündeki deplasman, c) z yönündeki deplasman, d) bileşke deplasman. (displacement values of Inconel 718 part with $\rho^*=0,426$ after manufacturing, a) displacement along x axis, b) displacement along y axis, c) displacement along z axis, d) resultant displacement)

çoğunlukla parçaların destek yapılarının hemen üstünde, üretilen parçanın tabanına yakın ve keskin geçişlerin olduğu

bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Liu vd. [78] de yaptıkları çalışmada SLE metoduyla ürettikleri parçalarda

destek yapı ile ürettikleri parçanın ilk katmanlarında arasındaki bölgede kalıntı gerilmelerin en yüksek mertebede olmalarından dolayı bu bölgede çatlakların meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada da çatlakların destek yapı ile üretilen parça arasındaki bölgede meydana geldiği ve bu çatlakları engellemeye yönelik, tablanın ön ısıtılması ya da lazerle uygun ön ergitme işlemi önerilmiştir [79].

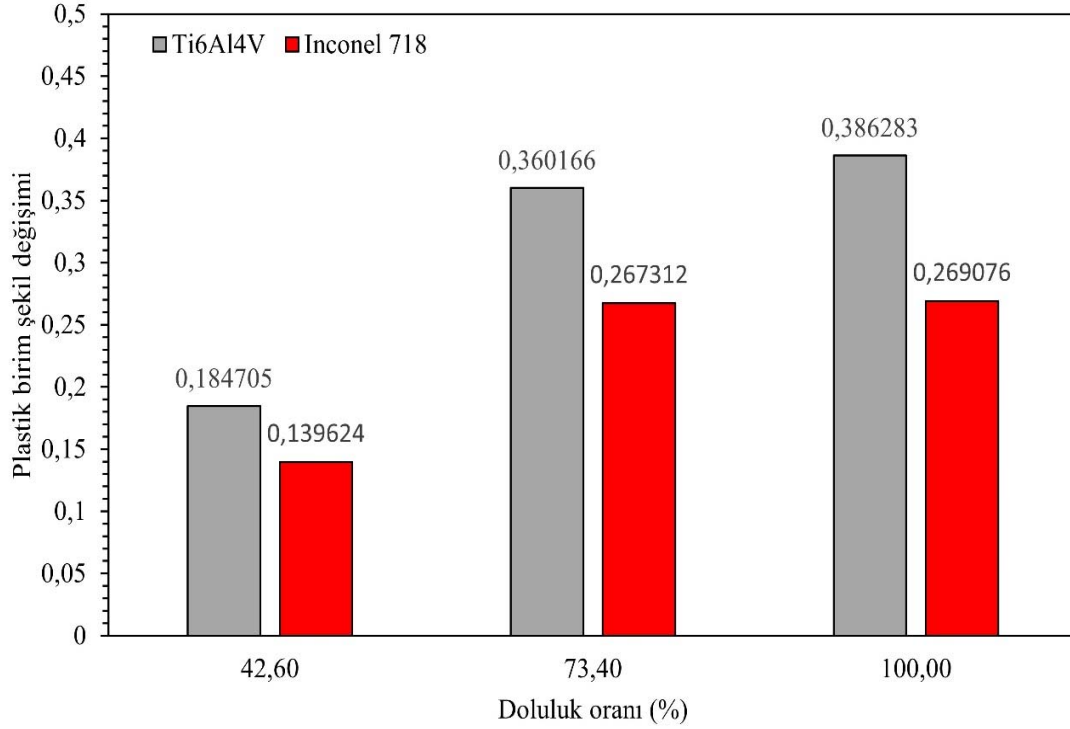


Şekil 6. Ti6Al4V parçalarda plastik birim şekil değişimlerinin gösterimi, a) $\rho^*=1$, b) $\rho^*=0,734$, c) $\rho^*=0,426$
(Representation of plastic strains in Ti6Al4V parts, a) $\rho^*=1$, b) $\rho^*=0,734$, c) $\rho^*=0,426$)

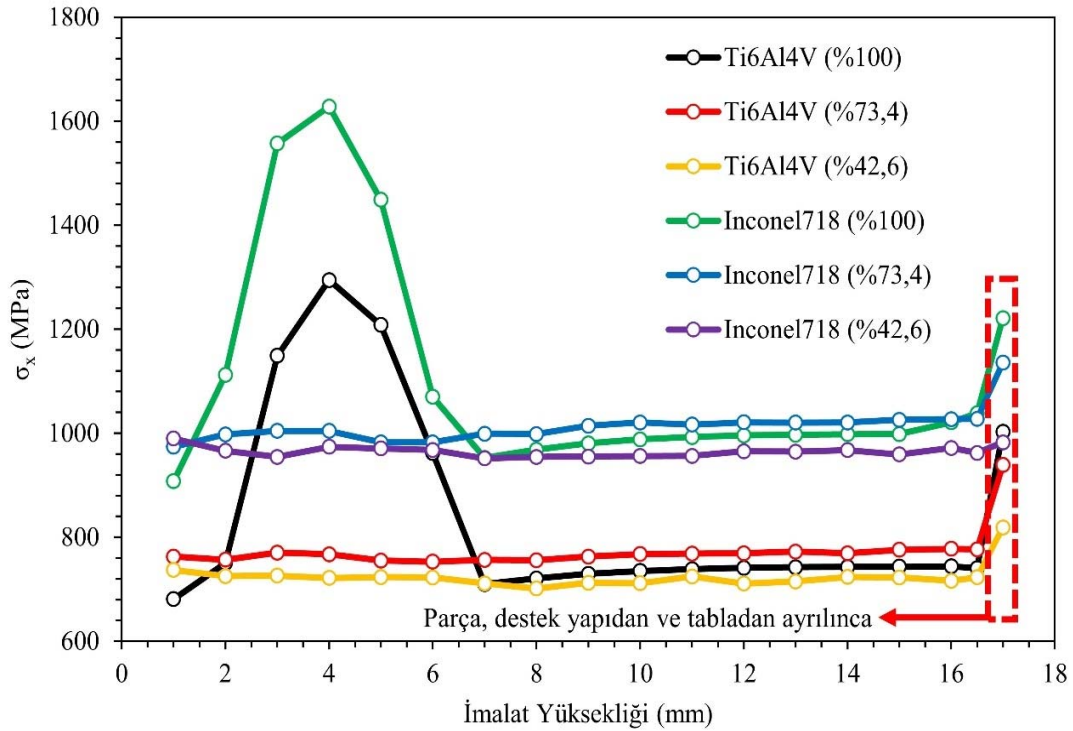
Eİ süresince oluşan termal gradyenler nedeniyle termal kalıntı gerilmelerin oluşumunun etki ettiği plastik şekil değişimleri üretilen parçalarda çarpılmaya sebebiyet vermektedir [80]. Şekil 7’de de her iki malzeme türünde üretilen parçaların doluluk oranlarına göre plastik birim şekil değişimleri grafik halinde sunulmuştur. Şekil 7’ye göre doluluk oranı % 42,6 olan parçalardan Ti6Al4V’da 0,184 değerinde plastik birim şekil değişimi meydana gelirken, bu değer Inconel 718’de ise 0,139 mertebesinde görülmüştür. Doluluk oranı % 73,4 olan parçalarda ise Ti6Al4V 0,360 plastik birim şekil değişimi ile Inconel 718’den % 34,7 oranında daha fazla şekil değişimi göstermektedir. Son olarak, tam dolu parçalarda ise Ti6Al4V, Inconel 718’e göre

% 43,6 daha fazla plastik birim şekil değişimine sahiptir. Şekil 7’den de görüldüğü üzere, Ti6Al4V’den üretilen parçalar Inconel 718’den üretilen parçalara kıyasla daha fazla plastik birim şekil değişimi sergilemektedir. Bir diğer önemli bulgu ise, doluluk oranı % 73,4’ten % 100’e geçişte Ti6Al4V parçanın plastik birim şekil değişimi % 7,25 mertebesinde artarken, Inconel 718 parçada ise bu oran % 0,65’te kalmıştır. Belirlendiği üzere, malzeme seçimi ve doluluk oranları hücrel parçaların eklemeli imalatında büyük bir önem arz etmektedir.

Şekil 8’de parçaların imalatı sırasında x yönünde meydana gelen gerilmeler (σ_x) verilmiştir. Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemeden üretilen aynı bağıl yoğunluğa sahip parçalar mukayese edildiğinde, Inconel parçalar üzerinde σ_x gerilmesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, Inconel 718 malzemenin Ti6Al4V malzemeye nazaran daha rijit olması ile yorumlanabilir. Her bir malzeme çeşidi kendi içerisinde bağıl yoğunluklarının değişimi bakımından incelendiğinde ise, bağıl yoğunluk değeri ile parçalarda oluşan σ_x arasında direkt bir bağlantı olmadığı saptanmıştır. Belirli bir imalat yüksekliği gözardı edilirse, bağıl yoğunluğu 0,734 olan yapılar ilk sırada, onu sırasıyla $\rho^*=1$ ve $\rho^*=0,426$ olan yapılar takip etmektedir. Daha önce ifade edilen belirli bir imalat yüksekliği ifadesi ile tam dolu parçaların imalat yüksekliğinin 2 mm ile 7 mm arasında olduğu durum kastedilmektedir. Bu aralıkta, $\rho^*=1$ olan parçaların üretimi sırasında, diğer bağıl yoğunluk değerlerinde olan parçaların imalatında gözlemlenmeyen çekme ve basma gerilmelerindeki değişim meydana gelmekte, bu nedenle bu bölgede gerilme değerleri pik bir değere ulaşmıştır. Ayrıca, parçaların imalatları tamamlandıktan sonra destek yapıların çıkarılıp, parçanın tabladan ayrılması ile birlikte σ_x değerlerinde yaklaşık % 20 mertebesinde artış görülmektedir. İmal edilen parçalarda y yönündeki gerilmelerin (σ_y) imalat yüksekliğine bağıli olarak değişiminin verildiği Şekil 9, Şekil 8 ile paralellik göstermekte ve benzer şekilde tam dolu numunelerde çekme-basma gerilmesinin değişimi tespit edilmiştir. Ayrıca, imalat yüksekliği boyunca σ_y değerleri dalgalanmakta, üretilen parçanın destek yapıdan ve tabladan ayrılması ile gerilme değerlerinde artış görülmektedir. Şekil 10’da parçaların üretimi esnasında ve tabladan ayrıldıktan sonraki z yönündeki gerilmeler (σ_z) paylaşılmıştır. Görüldüğü üzere, Inconel 718 malzemeden üretilen yapılar, Ti6Al4V malzemeden üretilen yapılara göre daha fazla gerilim göstermiştir. Aynı malzeme türünde, doluluk oranı değerlerinin etkisi incelendiğinde ise, doluluk oranı yüksek olan parçaların daha yüksek σ_z değerine sahip olduğu ve doluluk oranı % 73,4 olan parçanın imalatında Inconel 718 için imalat yüksekliği 6 mm, Ti6Al4V için imalat yüksekliği 8 mm iken z yönündeki gerilmelerde ani yükselmeler tespit edilmiştir. Ürünlerin imalatları tamamlandıktan sonra, destek yapıların çıkarılması ve ürünlerin tabladan ayrılmasıyla diğer bir deneysel çalışmada olduğu üzere [81], var olan gerilmelerin tekrar dağıtılması ile birlikte σ_z değerlerinde düşüşler belirlenmiştir. Ek olarak, Xiao vd. de [82] SLE metoduyla Ti6Al4V malzemeden ürettikleri parçalarda oluşan kalıntı gerilmelere eklemeli imalat parametrelerinin



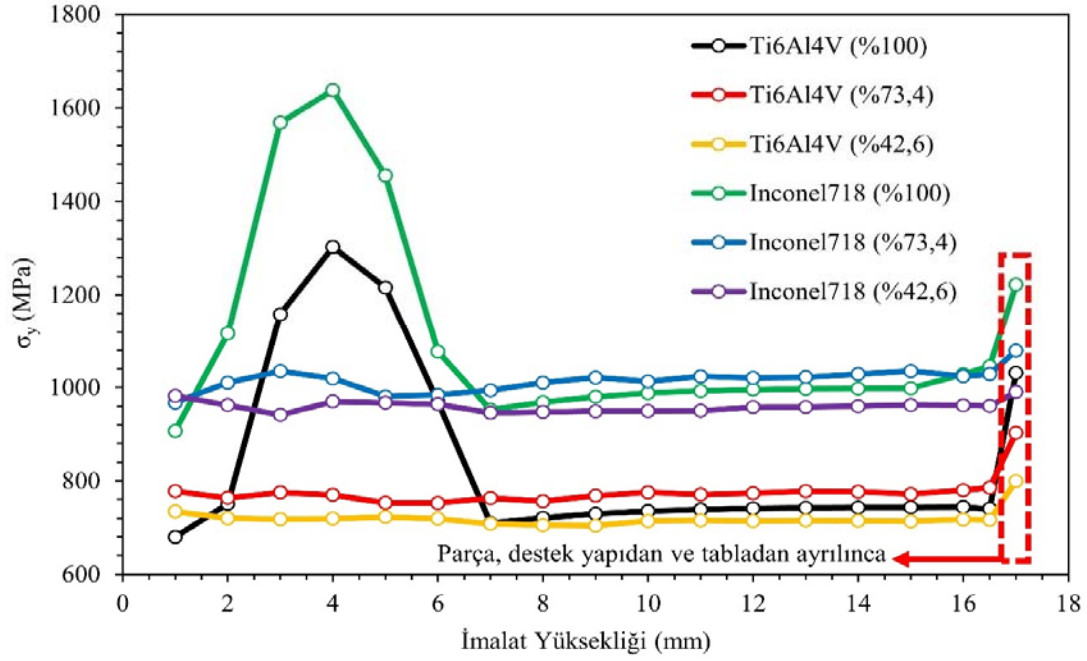
Şekil 7. Parçaların doluluk oranına göre plastik birim şekil değişimleri. (Plastic strains related with infill ratio of parts)



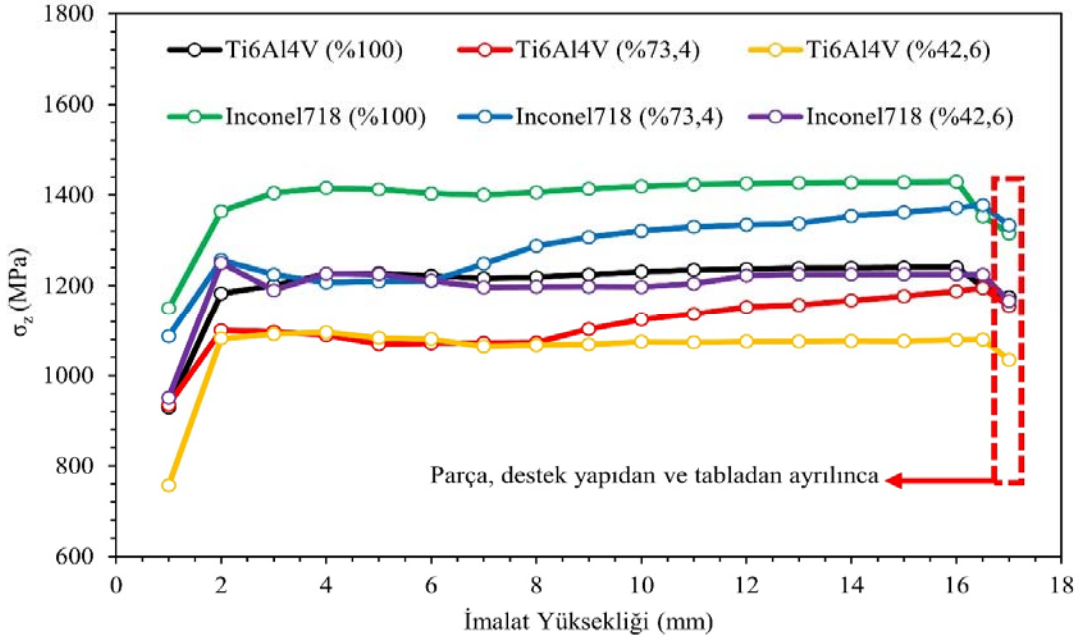
Şekil 8. İmalat yüksekliğine bağlı olarak parçalarda meydana gelen σ_x değerleri (σ_x values occurring in parts depending on the building height)

etkilediğini ve bu çalışmadaki eklemeli imalat parametreleri olan 300 W lazer gücü ve 1000 mm/s tarama hızı ile üretim

sırasında parça üzerinde yaklaşık 1200 MPa kalıntı gerilmenin oluştuğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 9. İmalat yüksekliğine bağlı olarak parçalarda meydana gelen σ_y değerleri (σ_y values occurring in parts depending on the building height)



Şekil 10. İmalat yüksekliğine bağlı olarak parçalarda meydana gelen σ_z değerleri (σ_z values occurring in parts depending on the building height)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bir çok alanda sıklıkla kullanılan Ti6Al4V ve Inconel 718 toz partiküllerinden SLE eklemeli imalat metoduyla farklı bağıl yoğunluklardaki biyomedikal parçaların imalatının simülize edildiği bu çalışmada aşağıda sıralanan önemli bulgular elde edilmiştir.

- Bağıl yoğunluğu 1 olan tam dolu yapıda maksimum bileşke deplasman meydana gelirken, bağıl yoğunluk değeri düştükçe, deplasman değerleri de azalmaktadır.
- Parça imalatı sırasında deplasman değerleri artmakta, imalatın tamamlanıp, parçadan destek yapılarının ayrılması ve parçanın tabladan ayrılması ile birlikte deplasman değerlerinde ani bir artış görülmüştür.

- İmal edilen parçalar x ve y eksenleri boyunca daralırken, inşa yönü olan z eksenini boyunca ise genişleme göstermektedir.
- X ve Y doğrultuları boyunca meydana gelen σ_x ve σ_y gerilmeleri benzer değerler göstermiştir. Ancak, Inconel 718 malzemeden imal edilen yapılar daha fazla gerilme gösterirken, bağıl yoğunluk değerleri açısından değerlendirildiğinde ise bağıl yoğunluğu 0,734 olan yapı en fazla gerilime sahip olmuştur. Parçalar tabladan ayrıldıktan sonra gerilmeler artmıştır.
- Z eksenini doğrultusunda oluşan σ_z değerleri incelendiğinde, Inconel 718 malzemeden üretilen yapıların Ti6Al4V malzemeden üretilen yapılara göre daha fazla gerilim sergilediği belirlenmiştir. Bağıl yoğunluk değerleri düştükçe, σ_z değerleri de azalmaktadır. Ek olarak, σ_x ve σ_y 'nin aksine parçalar tabladan ayrıldıktan sonra σ_z gerilme değerleri azalmaktadır.
- Parçaların imalatı sırasında meydana gelen maksimum sıcaklıklar kıyaslandığında ise bağıl yoğunluğu yüksek olan parçaların belirli bir inşa yüksekliğine dek daha fazla maksimum sıcaklığa sahip oldukları tespit edilmiştir. Ancak, belirli bir inşa yüksekliğinden sonra bağıl yoğunluğu düşük olan parçalar daha yüksek maksimum sıcaklık barındırmaya başlamaktadırlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kumar R., Kumar M., Chohan J.S., The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 828-850, 2021.
2. Baghi A.D., Nafisi S., Hashemi R., Heidepriem H.E., Ghomashchi R., Experimental realization of build orientation effects on the mechanical properties of truly as-built Ti-6Al-4V SLM parts, *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 140-452. 2021.
3. Nadammal N., Cabeza S.A., Mishurova T., Thiede T., Kromm A., Seyfert C., Farahbod L., Haberland C., Schneider J.A., Portella P.D., Bruno G., Effect of hatch length on the development of microstructure, texture and residual stresses in selective laser melted superalloy Inconel 718, *Mater. Des.*, 134, 139-150, 2017.
4. Dallago M., Zanini F., Carmignato S., Pasini D., Benedetti M., Effect of the geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices, *Procedia Struct. Integrity*, 13, 161-167, 2018.
5. Alabort E., Barba D., Reed R.C., Design of metallic bone by additive manufacturing, *Scr. Mater.*, 164, 110-114, 2019.
6. Yan C., Hao L., Hussein A., Young P., Raymond D., Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting, *Mater. Des.*, 55, 533-541, 2014.
7. Wang J., Zhou X.L., Li J., Brochu M., Zhao Y.F., Microstructures and properties of SLM-manufactured Cu-15Ni-8Sn alloy, *Additive Manufacturing*, 31, 100921, 2020.
8. Qi H., Azer M., Ritter A., Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718, *Metall. Mater. Trans. A*, 40 (10), 2410-2422, 2009.
9. Parimi L.L., Attallah M.M., Gebelin J.C., Reed R.C., Direct laser fabrication of Inconel 718: effects on distortion and microstructure, *Superalloys*, 12th Int. Symp. on Superalloys, 7 Springs, PA, September 09-13, 511-519, 2019.
10. Hosseini E., Popovich V.A., A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 30, 100877, 2019.
11. Soller S., Barata A., Beyer S., Dahlhaus A., Guichard D., Humbert E., Kretschmer J., Zeiss W., Selective laser melting (SLM) of Inconel 718 and stainless-steel injectors for liquid rocket engines, *Space Propulsion Conference*, Rome, Italy, 1-10, May 02-06, 2016.
12. Soller S., Behr R., Beyer S., Laithier F., Lehmann M., Preuss A., Salapete R., Design and testing of liquid propellant injectors for additive manufacturing, 7th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), Milan, Italy, 1-10, July 03-06, 2017.
13. Donachie M.J., *Titanium: A Technical Guide*, second ed. ASM International, Materials Park, OH, 2000.
14. Inagaki, I., Takechi T., Shirai Y., Ariyasu N., Application and features of titanium for the aerospace industry, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 22-27, 2014.
15. Uhlmann E., Kersting R., Klein T.B., Cruz M.F., Borille A.V., Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components, *Proc. CIRP*, 35, 55-60, 2015.
16. Gurrappa I., Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications, *Mater. Charact.*, 51 (2), 131-139, 2003.
17. Abdullah N.A.Z., Sani M.S.M., Salwani M.S., Husain N.A., A review on crashworthiness studies of crash box structure, *Thin-Walled Structures*, 153, 106795, 2020.
18. Emmelmann C., Scheinermann P., Munsch M., Seyda V., Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics, *Phys. Procedia*, 12, 375-384, 2011.
19. Parry L., Ashcroft L.A., Wildman R.D., Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation, *Addit. Manuf.*, 12, 1-15, 2016.
20. Formanoir C.D., Brulard A., Vivès S., Martin G., Prima F., Michotte S., Rivière E., Dolimont A., Godet S., A strategy to improve the work-hardening behavior of Ti-6Al-4V parts produced by additive manufacturing, *Mater. Res. Lett.*, 5 (3), 201-208, 2017.
21. Prasad A.V.S.R., Ramji K., Datta G.L., An experimental study of wire EDM on Ti-6Al 4V alloy, *Proc. Mater. Sci.*, 5, 2567-2576, 2014.
22. R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, E. Masanet, Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, *J. Clean. Prod.*, 135, 1559-1570, 2016.
23. Kolken H.M.A., Jonge C.P.D., Sloten T.V.D., Garcia A.F., Poursan B., Willemsen K., Weinans H., Zadpoor

- A.A., Additively manufactured space-filling meta-implants, *Acta Biomaterialia*, 125, 345-357, 2021.
24. Kas M., Yılmaz O., Radially graded porous structure design for laser powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 296, 117186, 2021.
 25. Yong C.K., Gibbons G.J., Wong C.C., West G., A critical review of the material characteristics of additive manufactured IN718 for high-temperature application, *Metals*, 10, 1576, 2020.
 26. Periane S., Duchosal A., Vaudreuil S., Chibane H., Morandau A., Xavier M.A., Leroy R., Influence of heat treatment on the fatigue resistance of Inconel 718 fabricated by selective laser melting (SLM), *Materialstoday: Proceedings*, In press. Doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.447.
 27. Nadammal N., Cabeza S., Mishurova T., Thiede T., Kromm A., Seyfert C., Farahbod L., Haberland C., Schneider J.A., Portella P.D., Bruno G., Effect of hatch length on the development of microstructure, texture and residual stresses in selective laser melted superalloy Inconel 718, *Mater. Des.* 134, 139–150, 2017.
 28. Vayssette B., Saintier N., Brugger C., May M.E., Pessard E., Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life. *Procedia Engineering*, 213, 89-97, 2018.
 29. Lu Y., Wu S., Gan Y., Huang T., Yang C., Junjie L., Lin J., Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy, *Optics Laser Technol.*, 75, 197–206, 2015.
 30. Sames W.J., Medina F., Peter W.H., Babu S.S., Dehoff R.R., Effect of process control and powder quality on Inconel 718 produced using electron beam melting, 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, 409–423, 2014.
 31. Mukherjee T., Zhang W., DebRoy T., An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, *Comput. Mater. Sci.*, 126, 360–372, 2017.
 32. Zhang D., Niu W., Cao X., Liu Z., Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 644, 32–40, 2015.
 33. Harrison N.J., Todd I., Mumtaz K., Reduction of micro-cracking in nickel superalloys processed by selective laser melting: a fundamental alloy design approach, *Acta Mater.*, 94, 59–68, 2015.
 34. Yiğit O., Dilmeç M., Halkacı S., Tabaka kaldırma yöntemi ile kalıntı gerilmelerin ölçülmesi ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması, *Mühendis ve Makine*, 49 (579), 20-27, 2008.
 35. Yasa E., Poyraz Ö., Investigation of residual stresses by micro indentation in selective laser melting, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 1029-1040, 2021.
 36. Kayacan M.Y., Seçici Lazer Ergitme (SLE) ile İmalatta Geometrik Parametrelerin Sıcaklık Dağılımı, Kalıntı Gerilme ve Deformasyona Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2020.
 37. Nesli S., Yılmaz O., Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 271-289, 2021.
 38. Ermergen T., Taylan F., Review on Surface Quality Improvement of Additively Manufactured Metals by Laser Polishing, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021,
 39. Ergene B., Eklemeli imalat ile titanyum ve polimer esaslı malzemelerden üretilen hücresel yapıların mekanik davranışlarının deneysel olarak araştırılması, Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2020.
 40. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of mechanical properties of transitive (variable) porous specimens produced by SLS using Ti6Al4v alloy powder, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 127-143, 2018.
 41. Crupi V., Kara E., Epasto G., Guglielmino E., Aykul H. Static behavior of lattice structures produced via direct metal laser sintering technology, *Materials & Design*, 135, 246-256, 2017.
 42. Peter N., Pitts Z., Thompson S., Saharan A., Benchmarking Build Simulation Software for Laser Powder Bed Fusion of Metals, *Additive Manufacturing*, 36, 101531, 2020.
 43. Galerati M., Residual Stress Prediction of Additive Manufactured Electric Motor Cores Using Finite Element Analysis, Master Thesis, Politecnico Di Torino McMASTER UNIVERSITY, 2020.
 44. Mayer T., Brandle G., Schönerberger A., Eberlein R., Simulation and validation of residual deformations in additive manufacturing of metal parts, *Heliyon*, 6, e03987, 2020.
 45. Soylemez E., Koç E., Coşkun M., Thermo-mechanical simulations of selective laser melting for AlSi10Mg alloy to predict the part-scale deformations, *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 465-478, 2019.
 46. Kolken H.M.A., Janbaz S., Leeftang S.M.A., Lietaert K., Weinans H.H., Zadpoor A.A., Rationally designed meta-implants: A combination of auxetic and conventional meta-biomaterials, *Materials Horizons*, 5 (1), 28-35, 2018.
 47. Dobrzanski L.A., Danikiewicz A.D.D., Gawel T.G., Franczak A.A., Selective Laser Sintering and Melting of pristine titanium and titanium Ti6Al4V alloy powders and selection of chemical environment for etching of such materials, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (3), 2039-2045, 2015.
 48. Rahmani R., Rosenberg M., Ivask A., Kollo L., Comparison of Mechanical and Antibacterial Properties of TiO₂/Ag Ceramics and Ti6Al4V-TiO₂/Ag Composite Materials Using Combined SLM-SPS Techniques, *Metals*, 9 (8), 1-13, 2019.

49. Lutzweiler G., Halili A.N., Vrana N.E., The overview of porous, bioactive scaffolds as instructive biomaterials for tissue regeneration and their clinical translation, *Pharmaceutics*, 12, 602, 2020.
50. Liao B., Xia R.F., Li W., Lu D., Jin Z.M., 3-D printed Ti6Al4V scaffolds with graded triply periodic minimal surface structure for bone tissue engineering, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021. Doi: 10.1007/s11665-021-05580-z.
51. Eos M400-4. <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-400-4>. Eriřim tarihi Nisan 12, 2021.
52. Kelly C.N., Francovich J., Julmi S., Safranski D., Guldberg R.E., Maier H.J., Gall K., Fatigue behavior of As-built selective laser melted titanium scaffolds with sheet-based gyroid microarchitecture for bone tissue engineering, *Acta Biomaterialia*, 94, 610-626, 2019.
53. Liang H., Yang Y., Xie D., Li L., Mao N., Wang C., Tian Z., Jiang Q., Shen L., Trabecular-like Ti-6Al-4V scaffolds for orthopedic: fabrication by selective laser melting and in vitro biocompatibility, *Journal of Materials Science & Technology*, 35 (7), 1284-1297, 2019.
54. Ginestra P., Ferraro R.M., Hauber K.Z., Abeni A., Giliani S., Ceretti E., Selective Laser Melting and Electron Beam Melting of Ti6Al4V for Orthopedic Applications: A Comparative Study on the Applied Building Direction, *Materials*, 13, 1-22, 2020.
55. Poyraz Ö., Kuřhan M.C., Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 33 (2), 729-742, 2018.
56. Jiang R., Mostafaei A., Pauza J., Kantzos C., Rollett A.D., Varied heat treatments and properties of laser powder bed printed Inconel 718, *Materials Science & Engineering A*, 755, 170-180, 2019.
57. Yan X., Shi C., Liu T., Ye Y., Chang C., Ma W., Deng C., Yin S., Liao H., Liu M., Effect of heat treatment on the corrosion resistance behavior of selective laser melted Ti6Al4V ELI, *Surface & Coatings Technology*, 396, 125955, 2020.
58. Rubaie K.S.A., Melotti S., Rabelo A., Paiva J.M., Elbestawi M.A., Veldhuis S.C., Machinability of SLM-produced Ti6Al4V titanium alloy parts, *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 768-786, 2020.
59. Keller N., Ploshikhin V., New Method for fast predictions of residual stress and distortion of AM parts, *The Twenty-Fifth Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, Austin-USA, 1229-1237, 4-6 August, 2014.
60. Hill M., Nelson D.V., The Inherent Strain Method For Residual Stress Determination And Its Application To A Long Welded Joint, *ASME Press. Vessels Pip.* 318, 1999.
61. Ma N., Nakacho K., Ohta T., Ogawa N., Maekawa A., Huang H., Murakawa H., Inherent Strain Method for Residual Stress Measurement and Welding Distortion Prediction, 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Busan-South Korea, 1-8, 19-24 June, 2016.
62. Ueda Y., Fukuda K., Nakacho K., Endo S., A New Measuring Method of Residual Stresses with the Aid of Finite Element Method and Reliability of Estimated Values, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1975, 499-507, 1975.
63. Bugatti M., Semeraro Q., Limitations of the inherent strain method in simulating powder bed fusion processes, *Additive Manufacturing*, 23, 329-346, 2018.
64. Chen Y., Sun H., Li Z., Wu Y., Xiao Y., Chen Z., Zhong S., Wang H., Strategy of Residual Stress Determination on Selective Laser Melted Al Alloy Using XRD, *Materials*, 13 (2), 1-11, 2020.
65. Mercelis P., Kruth J.P., Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyp. J.*, 12, 254-265, 2006.
66. Anderson L.S., Venter A.M., Vrancken B., Marais D., van Humbeeck J., Becker T.H., Investigating the Residual Stress Distribution in Selective Laser Melting Produced Ti-6Al-4V using Neutron Diffraction, *Mater. Res. Proc.*, 4, 73-78, 2018.
67. Liu S., Shin Y.C., Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, *Materials and Design*, 164, 107552, 2019.
68. Mirkoohi E., Ning J., Bocchini P., Fergani O., Chiang K.N., Liang S.Y., Thermal Modeling of Temperature Distribution in Metal Additive Manufacturing Considering Effects of Build Layers, Latent Heat, and Temperature-Sensitivity of Material Properties, *J. Manuf. Mater. Process.* 2, 63, 1-19, 2018.
69. Mugwagwa L., Dimitrov D., Matope S., Yadroitsev I., Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting, *Procedia Manufacturing*, 21, 92-99, 2018.
70. Ahmad B., Veen S.O.V.D., Fitzpatrick M.E., Guo H., Residual stress evaluation in selective-laser-melting additively manufactured titanium (Ti-6Al-4V) and inconel 718 using the contour method and numerical simulation, *Additive Manufacturing*, 22, 571-582, 2018.
71. Poyraz Ö., Kuřhan M.C., Residual stress-induced distortions in laser powder bed additive manufacturing of Nickel-based superalloys, *Journal of Mechanical Engineering*, 65, 343-350, 2019.
72. Afrazov S., Denmark W.A.D., Toralles B.L., Holloway A., Yaghi A., Distortion and prediction and compensation in selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 17, 15-22, 2017.
73. Li C., Liu J.F., Guo Y.B., Prediction of Residual Stress and Part Distortion in Selective Laser Melting, *Procedia CIRP*, 45, 171-174, 2016.
74. Yakout M., Elbestawi M.A., Veldhuis S.C., Smith S.N., Influence of thermal properties on residual stresses in SLM of aerospace alloys, *Rapid Prototyping Journal*, 26 (1), 213-222, 2020.
75. Romero C., Yang F., Bolzoni L., Fatigue and fracture properties of Ti alloys from powder-based processes – A review, *International Journal of Fatigue*, 117, 407-419, 2018.

76. Vilaro T., Colin C., Bartout J.D., As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42, 3190-3199, 2011.
77. Singla A.K., Banerjee M., Sharma A., Singh J., Bansal A., Gupta M.K., Khanna N., Shahi A.S., Goyal D.K., Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments, *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 161-187, 2021.
78. Liu Y., Yang Y., Wang D., A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 647-656, 2016.
79. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F., Formation of cracks in the selective laser melting of objects from powdered stainless steel 17-4 PH, 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 240, 012074, 2017.
80. Martinez S., Ortega N., Celentano D., Egea A.J.S., Ukar E., Lamikiz A., Analysis of the part distortions for Inconel 718 SLM: A case study on the NIST test artifact, *Materials*, 13, 5087, 2020.
81. Mishurova T., Cabeza S., Thiede T., Nadammal N., Kromm A., Klaus M., Genzel C., Haberland C., Bruno G., The Influence of the Support Structure on Residual Stress and Distortion in SLM Inconel 718 Parts, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49, 3038-3046, 2018.
82. Xiao Z., Chen C., Zhu H., Hu Z., Nagarajan B., Guo L., Zeng X., Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V, *Materials and Design*, 193, 108846, 2020.