



## Surface texture and form characterization for powder bed additive manufacturing

Özgür Poyraz<sup>ID</sup>, Ezgi Uğur Solakoğlu<sup>ID</sup>, Soner Ören<sup>ID</sup>, Cansinem Tüzemen<sup>ID</sup>, Güray Akbulut<sup>ID</sup>

EI Tusaş Motor Industry Inc., Esentepe District, Çevreyolu Boulevard, No 356, 26210, Tepebasi, Eskisehir, Turkey

### Highlights:

- Powder bed fusion additive manufacturing of Inconel 625 parts
- Novel test artifact design
- Surface texture and form characterization
- Benchmarking of angular and curved faces utilizing both contact and optical methods

### Keywords:

- Powder bed fusion
- Additive manufacturing
- Surface texture characterization
- Form characterization

### Article Info:

Research Article  
Received: 19.09.2018  
Accepted: 15.04.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.461588

### Graphical/Tabular Abstract

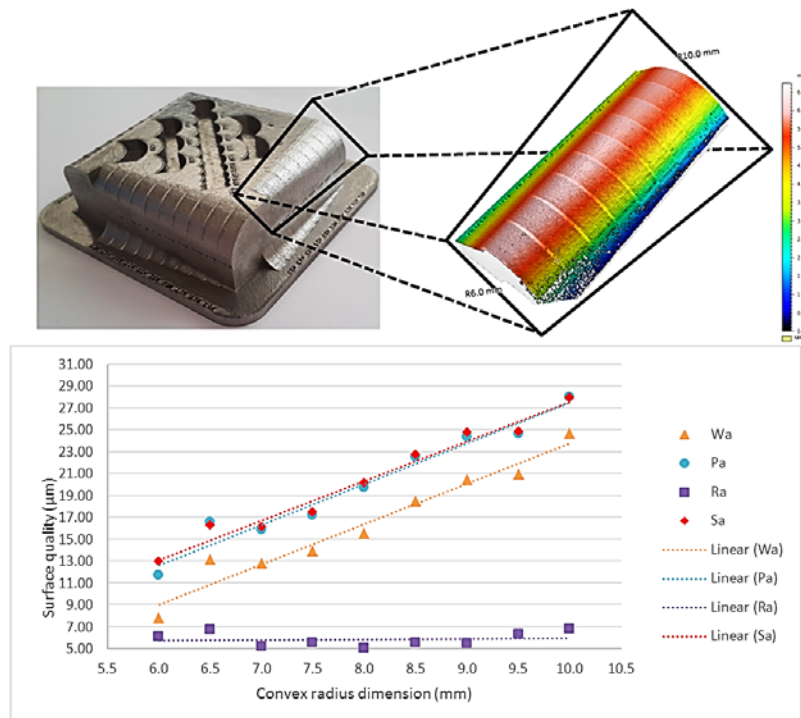


Figure A. Optical profilometer measurement results for convex faces of the manufactured test artifact

**Purpose:** The purpose of the presented paper is to characterize surface texture and form for powder bed additive manufacturing.

### Theory and Methods:

It contributes to literature with novel artifact design and also the methods used in evaluation. Evaluation was conducted for an artifact of Inconel 625 material made by laser powder bed additive manufacturing. Angular and curved faces were characterized with contact and optical measurement methods.

### Results:

It has been observed that the contact measurements on curved surfaces caused by radius values are not sufficient to characterize the change in the entire surface at the short sampling and evaluation distance of the probe. Therefore, studies were performed with an optical profilometer for curved surfaces and stair effect was clearly examined.

### Conclusion:

It was determined that the surface quality improved with increasing inclination angle, and also it worsened in convex and concave surfaces with increasing radius value. This can be explained as a result of the change in the inclination angle with the increased radius value. Furthermore, the effect of the inclination angle on the surface quality was found to be higher in convex geometry than in concave geometry.

### Correspondence:

Author: Özgür Poyraz  
e-mail:  
ozgur.poyraz@tei.com.tr  
phone: +90 222 211 2351



## Toz yatağı katmanlı imalat prosesinde yüzey dokusu ve form karakterizasyonu

Özgür Poyraz\*<sup>ID</sup>, Ezgi Uğur Solakoğlu<sup>ID</sup>, Soner Ören<sup>ID</sup>, Cansinem Tüzemen<sup>ID</sup>, Güray Akbulut<sup>ID</sup>

El Tusaş Motor Endüstrisi A.Ş., Esentepe Mahallesi, Çevreyolu Bulvarı, No 356, 26210, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Inconel 625 malzemeli parçaların toz yatağında katmanlı imalat ile üretimi
- Yenilikçi test numunesi tasarımı
- Yüzey dokusu ve form karakterizasyonu

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.09.2018

Kabul: 15.04.2019

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.461588

#### Anahtar Kelimeler:

Toz yatağı katmanlı imalat,  
eklemeli imalat,  
yüzey dokusu  
karakterizasyonu,  
form karakterizasyonu

#### ÖZET

Toz yatağında lazer katmanlı (eklemeli) imalat sonrası elde edilen yüzey kalitesi, parçaların, boyutsal doğruluğu ve herhangi bir yüzey işlemi olmaksızın kullanımını sınırlandıran etkenlerden biridir. Bu durumun temel sebebi prosesin doğası gereği ortaya çıkan ve diğer katmanlı imalat proseslerinde de görülen merdiven etkisidir. Merdiven etkisi görülen bir komponent yüzeyindeki geometrik ve form hataları montaj edilebilirlik, akış performans düşüşü ve yorulma başta olmak üzere çok sayıda riski beraberinde getirmektedir. Bu sebeple merdiven etkisi ve buna bağlı olarak yüzey dokusunun karakterizasyonu büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada sırası ile düz, açılı ve farklı yuvarlatma yarıçaplarına sahip yenilikçi numune geometrileri tasarlanmış ve Inconel 625 malzemeden toz yatağında lazer katmanlı imalat ile üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde yüzey dokusu ve form karakterizasyon incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Farklı unsur ve ölçüler için elde edilen sonuçlar sunulmuş, geometrik özelliklere bağlı yüzey kalitesi ve form değişim eğilimleri elde edilmiş, parametrelerin etkileri tartışılmıştır. Yarıçap değerlerinden kaynaklı eğrisel yüzeylerdeki dokunmalı yöntemin, probunun kısa örnekleme ve değerlendirme mesafesinde yaptığı ölçümlerin tüm eğrisel yüzeydeki değişimi karakterize etmeye yeterli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle eğrisel yüzeyler için optik profilometre ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir ve merdiven etkisi net bir şekilde görülmüştür. Artan eğim açısı ile yüzey kalitesinin iyileştiği, artan yarıçap değeri ile konveks ve konkav yarıçaplardaki yüzey kalitesinin kötüleştiği tespit edilmiştir. Bu durum artan yarıçap değeri ile eğim açısının değişiminin sonucu olarak da açıklanabilmektedir. Ayrıca katmanlı imalatta, yüzeydeki eğim açısının yüzey kalitesine olan etkisinin, konveks geometride konkav geometriye göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.

## Surface texture and form characterization for powder bed additive manufacturing

### H I G H L I G H T S

- Powder bed fusion additive manufacturing of Inconel 625 parts
- Novel test artifact design
- Surface texture and form characterization

#### Article Info

Research Article

Received: 19.09.2018

Accepted: 15.04.2019

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.461588

#### Keywords:

Powder bed fusion,  
additive manufacturing,  
surface texture  
characterization,  
form characterization

#### ABSTRACT

The surface quality obtained after laser powder bed additive manufacturing is one of the factors that limits the use of part without any surface treatment. The main reason of this situation is the stair effect form as a result of the layered nature of the process. Geometric and form errors on a component surface with a stair effect bring numerous risks, especially in terms of assembly operations, flow performance and fatigue resistance decrease. For this reason, the characterization of stair effect and the resultant surface texture is of critical importance. In this study, innovative test artifacts with flat, angled and curved faces were designed and produced with laser powder bed additive manufacturing of Inconel 625 material. Surface texture and form characterization studies were performed on the artifacts. By presenting the results for different features and dimensions, surface texture and form change trends due to geometric properties were obtained and the effects of the parameters were discussed. It has been observed that the contact measurements on curved surfaces caused by radius values are not sufficient to characterize the change in the entire surface at the short sampling and evaluation distance of the probe. Therefore, studies were performed with an optical profilometer for curved surfaces and stair effect was clearly examined. It was determined that the surface quality improved with increasing inclination angle, and also it worsened in convex and concave surfaces with increasing radius value. This can be explained as a result of the change in the inclination angle with the increased radius value. Furthermore, the effect of the inclination angle on the surface quality in additive manufacturing was found to be higher in convex geometry than in concave geometry.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ozgur.poyraz@tei.com.tr, ezgi.ugursolakoglu@tei.com.tr, soner.oren@tei.com.tr, cansinem.tuzemen@tei.com.tr, guray.akbulut@tei.com.tr / Tel: +90 222 211 2351  
1654

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

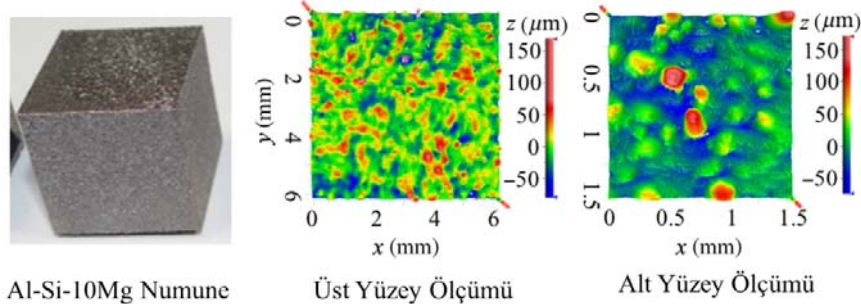
Katmanlı (eklemeli) imalat için terminoloji oluşturmayı amaçlayan standartlara göre katmanlı imalat; nesnelerin 3B (3 boyutlu) model verisinden, genelde üst üste dizilen katmanlar halinde malzemelerin birleştirilmesiyle parçaların oluşturulduğu bir imalat yöntemidir [1, 2]. Günümüzde katmanlı imalat üzerine yapılan çalışmalar; konvansiyonel döküm ve talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla tasarım serbestliği sunması, hücresel yapılar veya optimize tasarımlar sayesinde hafif ürünler ortaya konulması, iç soğutma kanalları gibi önemli fonksiyonel unsurların üretimine izin vermesi ve döküm veya deformasyon prosesleri için gerekli olan kalıplara ihtiyaç duyulmaması sebebi ile giderek yoğunlaşmaktadır [3-5]. Toz yatağında lazer katmanlı imalat tarafından sunulan avantajlara rağmen, yüksek gereksinimleri olan sektörlerde prosesin daha yaygın kabul görmesi için üstesinden gelinmesi gereken bazı zorluklar bulunmaktadır.

Bu zorluklardan biri olan düşük yüzey kalitesi, katmanlı imalatın doğası gereği ortaya çıkan bir sonuçtur [6]. Toz yatağında lazer katmanlı imalat, elektron demeti ile eritme (EBM) ve doğrudan metal biriktirme (DMD) gibi katmanlı imalat proseslerine kıyasla iki kat daha iyi yüzey kalitesi sağlanmasına rağmen, yüzey kalitesi açısından geleneksel işlemlerin gerisinde kalmaktadır [7]. Düşük yüzey kalitesinin temel nedenlerinden biri, aslında katmanlı imalatın doğasından gelen ve farklı proses tiplerinde de görülen merdiven etkisidir [8]. Merdiven etkisi, diğer katmanlı imalat proseslerine benzer şekilde toz yatağında lazer katmanlı imalatta da görülmektedir ve bu durum artarda gelen katmanların arasındaki geometrik basamak oluşumu, buna bağlı olarak yüzey kalitesinde bozulma olarak tanımlanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda merdiven etkisinin farklı faktörlerden etkilendiği raporlanmakta ve özellikle inşa yönü, katman kalınlığı ve bu iki faktörün birlikte etkilediği yüzey açıların merdiven etkisini ve bunun sonucunda yüzey kalitesinde bozulmayı tetiklediği ortaya koyulmaktadır [6, 7]. Katman kalınlığının merdiven etkisini artırmasının temel sebebi seçili inşa yönüne bağlı olan ve artarda gelen katmanların arasındaki geometrik basamakların yüksekliğinin artmasıdır. Yüzey açısının azalması ile iki basamak arasındaki mesafe de arttığı

için yüzey süreksizliklerini oluşturan tepelerin diyagonal mesafeleri de artmaktadır. Yapılan çalışmalardan biri, merdiven etkisine bağlı olarak aynı işlem ve malzeme için bile farklı inşa yönü seçildiğinde, elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki farkın iki kattan fazla olabileceğini ortaya koymuştur [9].

### 1.1. Katmanlı İmalat için Yüzey Karakterizasyonu (Surface Characterization for Additive Manufacturing)

Karakterizasyonu yapılacak yüzeyin durumu ve ölçümü hedeflenen dokunun yapısına bağlı olarak kullanılacak uygun teknikler değişmektedir. Bu kapsamda yüzey karakterizasyonu için dokunmatik yöntemlerin seçiminde yüzey ve probun etkileşimi dikkate alınmalı ve ölçüm aşamasında prob veya iş parçasının hasarlanma riski olup olmadığı değerlendirilmelidir. Örneğin katmanlı imalat proseslerinde görülebilen porozite, parçanın yüzeyindeki direnci düşürerek probun parça içine girmesine ve prob ucunun kütleşmesine veya kırılmasına neden olabilmektedir [10]. Prob uç yarıçapı ve koni açısı da dikkatli bir şekilde seçilmeli ve gerekli filtrelemeler sayesinde anlamlı ölçüm sonuçları ortaya çıkarılmalıdır [11]. Dokunmatik yöntemlere kıyasla optik yöntemlerin seçiminde, ölçülecek parça malzemesinin yansıtıcı özellikleri dikkate alınmalıdır. Katmanlı imalat prosesi ile üretilmiş parçaların ışığı yansıtma karakteristiği, aynı malzemeden konvansiyonel yöntemlerle üretilmiş ve/veya parlatma benzeri ikincil işlemlere uğramış yüzeylere göre oldukça farklıdır. Katmanlı imalat ile üretilen parçaların büyük çoğunluğu toz yatağı boşluklar, keskin girinti ve çıkıntılar, farklı açılarda geometrik değişimler olabilmektedir [10]. Daha da çarpıcı olan, aynı parça üzerinde ikincil işleme (bilye ile dövülmüş, kumlanmış, vb.) tabi olmuş ve olmamış yüzeyler arasında birbirine kıyasla büyük farkların bulunmasıdır [12, 13]. Bu doğrultuda katmanlı imalat sonrası karakterize edilmek istenen alanlarda optik teknikler arasından eş fazlı ilişkilendirme ile tarama interferometrisi (ing. coherence scanning interferometry), odak varyasyon mikroskopisi (ing. focus variation microscopy) veya renkli eş odak tekniği (ing. chromatic confocal technique) gibi teknikler kullanılmaktadır [14]. Şekil 1'de toz yatağında lazer katmanlı ile Al-Si-10Mg malzemeden üretilen bir kübik



Şekil 1. Katmanlı imal edilmiş Al-Si-10Mg malzeme için yüzey karakterizasyonu  
(Surface characterization for additive manufactured Al-Si-10Mg) [15]

numunenin eş fazlı ilişkilendirme ile tarama interferometrisi kullanılarak elde edilmiş ölçüm sonuçları verilmektedir [15].

### 1.2. Katmanlı İmalatta Kullanılan Test Numuneleri (Test Artifacts for Additive Manufacturing)

Yüzey kalitesini iyileştirmek için kullanılacak ikincil işlemler makine zamanı, işgücü, proses tipine göre takım/aparat gereksinimi ve malzeme tüketimi gibi nedenlerle maliyeti arttıracaktır [16, 17]. Bu sebeple literatürde yaygın olarak iki yaklaşım uygulanmaktadır. Bunlardan ilkinde yüzey kalitesinin öngörüldüğü modeller kullanılmaktadır [6, 18]. Diğer yöntemde ise karşılaştırmalı değerlendirme geometrilerinin tasarımı ve imalatı ile sistematik deneyler yapılmakta ve bu sayede proses limitlerinin belirlenmektedir [19, 20]. Karşılaştırmalı değerlendirme geometrilerinin kullanımı, geometrik esaslı modelleme çalışmaları özellikle proses, malzeme veya makineden kaynaklı değişkenliklerin ortaya koyduğu durumlarda yetersiz kalmaları sebebi ile tercih edilmektedir. Bu doğrultuda araştırmacılar çoğunlukla sabit kesit ve açılı yüzeylerin olduğu test geometrilerini deneyleri için tercih etmektedir. Bu geometriler duruma göre tek bir parça gövdesinde olabildiği gibi, çoklu parçalar şeklinde de olabilmektedir. Şekil 2’te literatürde yer alan ve katmanlı imalat prosesi sonrası yüzey karakterizasyonu ve karşılaştırmalı değerlendirme amaçları ile kullanılan örnek test numuneleri görülmektedir [18, 23].

Daha önceki çalışmalarda kullanılan numunelerin düzlemsel yüzeylere sahip olması, yüzey kalitesi ölçümlerinde kolaylık sağlamıştır ve bu anlamda yüzey karakteristiği ile ilgili genel bilgi vermesi açısından pratik kullanım imkânı sunmuştur. Bunun yanında, düzlemsel yüzeylere sahip test numuneleri, inşa yönü boyunca yüzey karakteristiğinde görülebilecek anlık değişimleri yansıtmaması açısından yetersiz kalmıştır. Bu sebeple söz konusu numuneler ile elde edilen bilgi birikimi karmaşık yüzeye sahip parçalardaki olası durumlar hakkında bir fikir verememekte ve öngörü sunamamaktadır. Bunlara ek olarak parçaların yerleşim ve yöne bağlı yüzey kalitesi değişimlerinin anlaşılması, eğer varsa gaz üfleme veya toz erme yönlerinin etkilerinin görülmesi amacıyla yeni numune geometrilerine ihtiyaç duyulduğu ortaya çıkmıştır.

Bu yayında toz yatağında lazer katmanlı imalat sonrası elde edilen yüzey kalitesi ve formun karakterizasyonu üzerine

yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Yapılan çalışmada öncelikle basit prizmatik bir numune üzerinde en yüksek malzeme yoğunluk değerini veren enerji yoğunluğu belirlenmiş ve ilgili prizmanın farklı yüzeylerindeki yüzey kalitesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra literatürde kullanılanlarla benzer şekilde açılı test numuneleri tasarlanmış ve bunların imalat ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ötesinde literatüre yenilikçi bir test numunesi tasarımı ile katkıda bulunulmuştur.

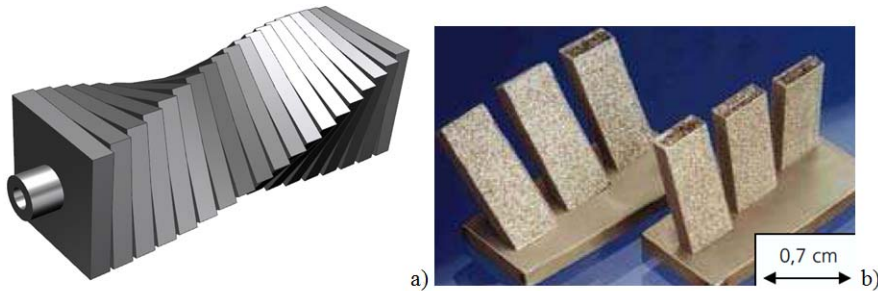
## 2. TASARIM (DESIGN)

Bu yayın kapsamında yapılan çalışmada üç aşamaya dikkat edilmiştir. İlk aşamada basit prizmatik bir numune üzerinde en yüksek malzeme yoğunluk değerini veren enerji yoğunluğu belirlenmiş, ikinci aşamada açılı test numuneleri oluşturulmuş ve son aşamada da literatür açısından yenilikçi bir karakterizasyon geometrisi ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

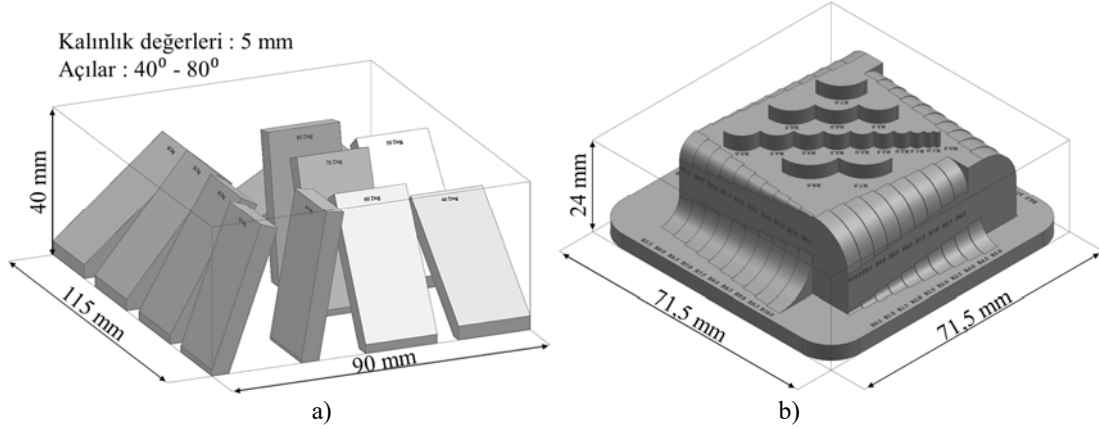
Basit prizmatik numune için kullanılacak boyutlar sırası ile 20 mm (X), 20 mm (Y) ve 10 mm (Z) şeklinde olmuştur.

Açılı test numuneleri ise taban düzlemine 40° açı ile başlamış ve 10° artımlarla 80° değerine kadar 5 adet yapılmıştır. Daha sonra yöne bağlı değişkenliklerin de çalışmada ortaya konması için açılı numuneler, 1 set X doğrultusunda ve 1 set de Y doğrultusunda olacak şekilde toplam 2 set olarak üretilmiştir (Şekil 3a). Her bir açılı duvar için 40 mm boy, 20 mm genişlik ve 5 mm kalınlık ayarlanmıştır. Ölçüler, numunelerin üzerinde yüzey karakterizasyonu için yeterli alan sağlanması ve bunun yanında inşa süreci bitene kadar yıkılmamayı garantileyecek dayanıklılıkta olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Yüzey kalitesi ölçümlerinin, numunelerin alt taş kesimi sonrasında yapılması planlanmıştır ve bu sebeple kesildikten sonra karışıklık olmaması için her birinin üzerine açı değerleri görünecek şekilde markalama tasarlanmıştır.

Literatürde daha önce yapılan çalışmalardaki ihtiyacın karşılanamaması sebebi ile yenilikçi bir numune tasarımı da çalışmaya dâhil edilmiştir. Yenilikçi tasarımda ilk olarak sabit yüzey formu olması, farklı yarıçap değerlerindeki yüzeylerin birbirinden ayrık tasarlanması ile engellenmiştir. Bu kapsamda birbirinden ayrık tasarlanan yüzeylerin yarıçap



Şekil 2. Literatürde yüzey karakterizasyonu için kullanılan test numuneleri  
(Test samples from literature used for surface characterization) [18, 23]



**Şekil 3.** Açılı yüzeyle (a) ve eğrisel yüzeyle (b) test numuneleri (Test samples with angular (a) and radius (b) faces)

değerleri 0,5 mm'den başlamakta ve 0,5 mm artım ile 10 mm değerine kadar ulaşmaktadır. Bu değerler ortama verilen asal gaz ve toz serici çarpışması gibi dış etkenlerin sonuç üzerindeki tesirinin anlaşılabilmesi için farklı yönlerde sağlanmış ve bu sayede hem X hem de Y yönlerine göre dizilim elde edilmiştir. Bu dizilim prizmatik bir gövde etrafındaki kenarlar sayesinde çevresel olarak sağlanmış ve bu yöntemle numunenin testte kaplayacağı alan küçültülmüştür. Daha da ileri tasarım özellikleri farklı yüzeylerin hem konveks hem de konkav olarak dizilimi ile sağlanmıştır. İlgili konveks ve konkav alanlar birbirlerini tamamlayacak şekilde üst üste sıralanmış ve bu özelliğin sağlanması ile parça yüksekliğinin fazla olmasına ihtiyaç kalmamıştır. Üst yüzeyde de ayrıca kesitleri 0,5 mm'den başlayan ve 0,5 mm artışla 8 mm değerine ulaşan yarıçaplarda cepler yerleştirilmiştir. Bütün ayarlamalar yapıldıktan sonra yüzeylerin yarıçap değerleri için, kendilerine komşu alanlara tasarımla markalama yapılmıştır. Nihai düzenlemede parçanın içi imalatta kullanılan toz ve süre gereksinimlerini azaltacak şekilde boşluklu yapılmıştır (Şekil 3b). Yapılan düzenlemeler ve tasarım sayesinde birbirinden farklı özellikteki çok sayıda yüzeyi 75 mm gibi küçük bir alana sığdırmak mümkün olmuştur.

### 3. İMALAT (MANUFACTURING)

Bu yayın kapsamında imal edilen numuneler ile ilgili detaylar bu bölümde sunulmaktadır. Sırası ile deneylerde kullanılan malzeme, imalat için kullanılan tezgah ve proses bilgisi bu aşamada aktarılmaktadır.

#### 3.1. Parça Malzemesi (Part Material)

Deneylerde kullanılmak üzere parça malzemesi olarak Inconel 625 (UNS. N06625) seçilmiştir. Sıklıkla Nikel esaslı süperalaşım olarak tanımlanan Inconel 625 malzemeler, mekanik dayanım, sıcaklık altında gösterdiği şekil değiştirme direnci ve oksidasyon riski olan ortamlarda sergilediği kararlı hal ile bilinmektedir [23]. Çoğunlukla Nikel (%61) ve Krom (%21,5) içeren Inconel 625 malzemesinin güçlendirme mekanizmalarına katkıda bulunan elementler arasında Molibden, Niyobyum ve Demir

sayılabilir. Sürünme direnci ve yüksek sıcaklıkta çalışabilme kabiliyeti de göz önüne alındığında, Inconel 625 malzemeler havacılık sektöründe ve özellikle de havacılık motorları için tercih edilmektedirler. Bu kapsamda egzoz lülesi, itki dönüştürücüleri, türbin kanatçık üstü kılıflar, yakıt/hidrolik tesisat boru ve komponentleri, bu malzemenin havacılık motorlarında kullanıldığı örneklerden sadece birkaçını oluşturmaktadır [23]. Kaynak ve döküm gibi alışılmış imalat yöntemleri ile üretilebilir olan malzeme, toz formunda da bulunmakta ve toz yatağında lazer katmanlı imalat için kullanılabilir. Bu çalışmada temin edilen toz EOS firması tarafından Inconel 625 muadili olarak sunulan EOS Nickel Alloy IN625 tozudur. Malzemenin detaylı kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmektedir [24].

**Tablo 1.** EOS IN625 malzeme kompozisyonu (EOS IN625 chemical composition) [24].

Element	Kompozisyon	Element	Kompozisyon
Ni	Tamamlayıcı	Al	≤ 0,4%
Cr	20-23%	Co	≤ 0,1%
Mo	8-10%	C	≤ 0,1%
Nb	3,1-4,1%	Ta	≤ 0,05%
Fe	≤ 5%	Si, Mn	≤ 0,5%
Ti	≤ 0,4%	P, S	≤ 0,01%

#### 3.2. İmalat Ekipmanları (Manufacturing Equipment)

Bu yayın kapsamındaki toz yatağında lazer katmanlı imalat çalışmaları için EOS marka tezgâh kullanılmıştır. EOS M290 model olan tezgâh, dalga boyu 1064 nm değerinde fiber lazer ile ergitme işlemini gerçekleştirmektedir. Korumucu atmosfer olarak Argon asal gazının kullanıldığı tezgâh alt taş ölçüleri 250 mm x 250 mm değerindedir. Katmanlı imalat için kullanılan tezgâh görseli Şekil 4'te verilmektedir. Katmanlı imalat sonrasında parçaların alt taştan ayrılması için literatürde kullanılan farklı yöntemler arasında şerit testere, tel erozyon ve su jeti ile kesme yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında imkânlar dâhilinde olan yöntemler şerit testere ile tel erozyondur ve bunlar arasından tel erozyon yöntemi seçilmiştir. Şerit testere ile kesme yönteminin seçilmemesinin temel nedeni hassas sonuçlar ortaya çıkarmamasıdır.

### 3.3. İmalat Süreci (Manufacturing Process)

Yüzey karakterizasyonunun hedeflendiği bu çalışma kapsamında, prizmatik geometriler üzerinde malzeme yoğunluğu açısından optimize edilmiş hacimsel enerji yoğunluğu sabitlenerek kullanılmıştır. Lazer gücünün lazer tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığına bölünmesi ile elde edilen hacimsel enerji yoğunluğu için kullanılan sabit değer 67 J/mm<sup>3</sup> olmuştur. Yine gerek modelleme ve gerekse deneysel çalışmalarda görüldüğü üzere yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan katman kalınlığı da, geometrik karşılaştırmaları etkilememesi açısından sabit tutulmuş ve 40 µm olarak kullanılmıştır. Şekil 5’de eğrisel yüzeyli numunelerin imalat sonrası durumları görülmektedir.

## 4. DEĞERLENDİRME (EVALUATION)

### 4.1. Dokunmatik Ölçümler (Contact Measurements)

Değerlendirme çalışmalarının ilk aşamasında yüzey kalitesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve bu ölçümlerde ISO 4287:1997 standardı ile uyumlu olacak şekilde Mitutoyo SJ-400 ölçüm ekipmanı kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde, katmanlı imalatın doğasından gelen yüzey dokusu dikkate alınarak herhangi bir filtreleme kullanmadan değerlendirme yapan ortalama birincil profil (Pa) ile belirli bir dalga

boyundan daha küçük olan profilin filtrelendiği ortalama dalgalılık (Wa) ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan örnekleme ve değerlendirme uzunlukları numune geometrilerine göre seçilmiştir. Bu doğrultuda erişimi en kolay ve düzlemsel yüzey alanı en fazla olan açılı test numunelerinde örnekleme ve değerlendirme uzunlukları en üst seviyede iken, yüzeylerinde iç ve dış bükümlere sahip eğrisel test numunesinde örnekleme ve değerlendirme uzunlukları en düşük seviyede kullanılmıştır. Tablo 2’de farklı numuneler ve bunlar için kullanılan örnekleme ve değerlendirme uzunlukları verilmektedir.

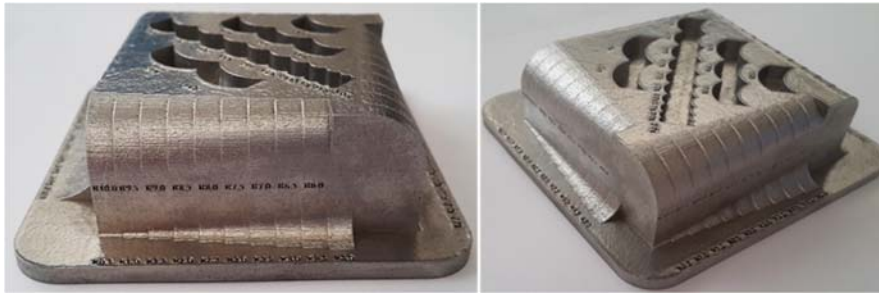
Aktarılan ölçüm koşulları ile gerçekleştirilen ölçümler sonrasında elde edilen yüzey değerlendirme sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4’te sunulmaktadır.

Test numunesi tasarımında yarıçap değerlerinin 0,5 mm’den başlamasına rağmen, değerlendirme adımında yapılan ölçümler 4 mm ile başlamaktadır. Bu durumun temel sebepleri arasında, kullanılan ölçüm ekipmanının dokunmatik olması ve bundan dolayı eğrisel yüzeyde sürekli bir tarama elde edememesi bulunmaktadır.

Yüzey kalitesi ölçümlerine ek olarak Mitutoyo CV-3200H4 tarayıcı kullanılarak konveks ve konkav yüzeylerdeki yarıçap değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler de makinede farklı yönlerde inşa edilen unsurların tekrar



Şekil 4. Toz yatağında lazer katmanlı imalat sistemi (Laser powder bed additive manufacturing system)



Şekil 5. İmalat sonrasında eğrisel yüzeyli numuneler (Manufactured test samples with radius faces)

**Tablo 2.** Farklı numuneler için ölçme koşulları (Measurement set-up conditions for test artifacts)

Prizmatik Numune		Açılı Numuneler		Eğrisel Yüzeyle Numuneler	
Örnekleme	Değerlendirme	Örnekleme	Değerlendirme	Örnekleme	Değerlendirme
Uzunluğu	Uzunluğu	Uzunluğu	Uzunluğu	Uzunluğu	Uzunluğu
0,8 mm	4 mm	2,5 mm	12,5 mm	0,25 mm	1,25 mm

**Tablo 3.** Prizmatik ve açılı numuneler için ortalama yüzey ölçüm sonuçları (Measurement results for prismatic and angular test artifacts)

	Açılı Numuneler					Prizmatik Numune
	(40°)	(50°)	(60°)	(70°)	(80°)	(90°)
Pa (µm)	7,97	7,18	6,60	6,46	5,89	5,38
Wa (µm)	3,66	3,28	3,14	2,47	2,07	2,05

**Tablo 4.** Eğrisel yüzeyle numuneler için ortalama yüzey ölçüm sonuçları (Measurement results for curved test artifacts)

Yüzey Yarıçap Değeri (mm)	Konveks					Konkav								
	4,0	4,5	5,0	5,5	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
Pa (µm)	3,90	4,20	3,75	4,50	6,23	5,76	5,62	4,08	5,81	3,63	3,83	3,38	4,12	3,69
Wa (µm)	2,42	3,22	2,72	3,27	2,60	2,90	3,04	2,11	3,11	2,10	2,49	2,24	2,42	2,48

edilebilirliğini değerlendirmek için X ve Y eksenlerine paralel bölgelerde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).

#### 4.2. Optik Ölçümler (Optical Measurements)

Eğrisel yüzeyle numuneler için yapılan dokunmatik ölçümler sonucunda, yüzeyin eğrisel olması nedeni ile dokunmatik ölçüm sisteminin kabiliyeti doğrultusunda tüm yüzey değil, sadece yüzeyin belirli bir alanı incelenebilmiştir. Bu da yapılan ölçümden, istatistiksel olarak anlamlı bir sonuç elde edilememesine neden olmuştur. Bu nedenle eğrisel yüzeyler için optik çalışmalar da yürütülmüştür.

Bu kapsamda Polytec TMS 500S sistemi ile eğrisel yüzeyle numunenin R 6,0 mm – R 10,0 mm arasındaki konveks ve konkav yarıçapları ölçülmüş ve yüzey kalitesi anlamında değerlendirilmiştir. Ölçüm, 2D ve 3D olmak üzere 2 farklı şekilde yapılmıştır. 2 boyutlu ölçümlerde örnekleme uzunluğu olarak 0,8 mm seçilmiştir ve Gaussian filtre kullanılmıştır.

Şekil 7’de konkav ve konveks yarıçaplı eğrisel yüzeyler için sırasıyla R 5,5 mm ila R 10,0 mm ve R 6,0 mm ila R 10,0 mm arasındaki yarıçapların optik profilometre ile yapılan tarama sonucu verilmiştir.

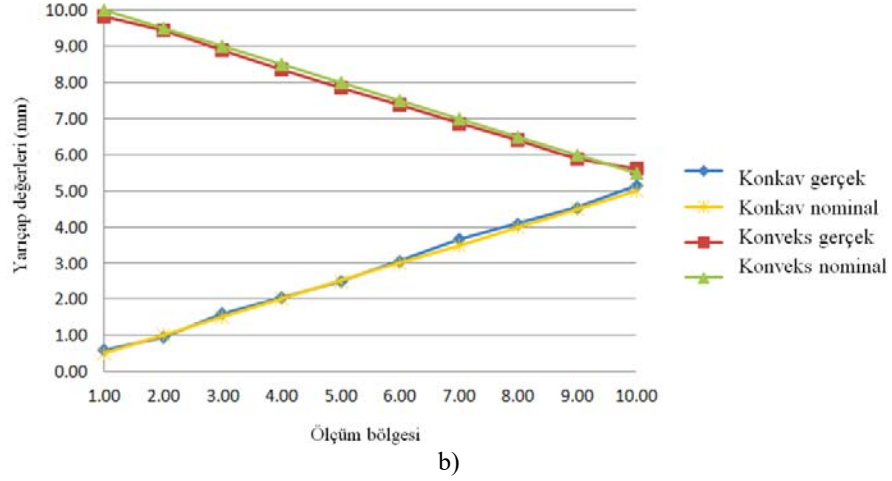
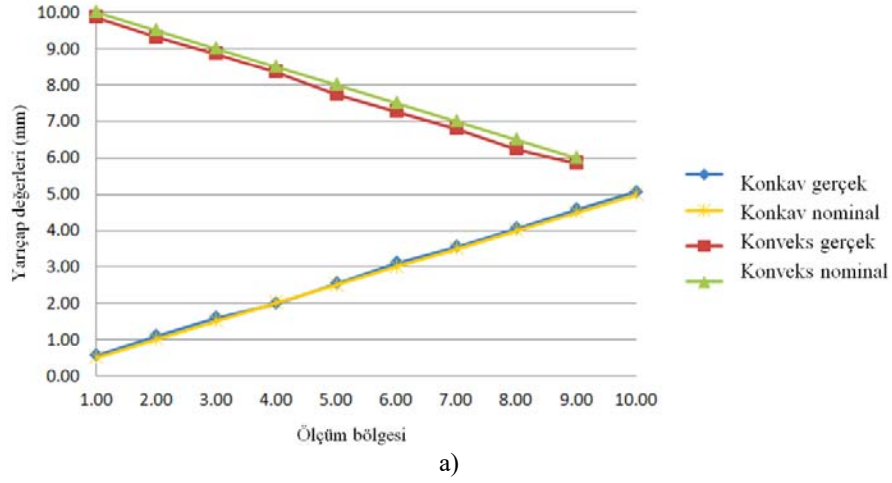
Her bir yarıçap için ISO 25178’e göre S-F yüzeyde (taranan yüzeyden formun çıkarılarak sadece yüzey dokusunun kaldığı yüzeydir) alansal yüzey kalitesi hesaplaması yapıldıktan sonra (Sa), yüzeye 3 farklı bölgeden çizgiler atılmış ve bunlar üzerinde birincil profil (Pa), dalgalılık (Wa) ve pürüzlülük (Ra) parametreleri incelenmiştir (Şekil 8). S-F yüzeyde yapılan alansal ölçüm sonuçları tüm yüzey alanını

ifade etmekle birlikte, 2 boyutlu ölçümlerde eşdeğeri olan ve hiçbir filtrelemenin kullanılmadığı birincil profil sonuçlarından daha büyük değerler elde edildiği görülmüştür. Ölçüm sonuçlarından yarıçap değeri arttıkça, yüzey kalitesinin özellikle alansal, birincil profil ve dalgalılık sonuçları açısından kötüleştiği görülmektedir. Bunlara kıyasla pürüzlülük değerinin artış oranının düşük olması, konvansiyonel imalat yöntemlerini değerlendirmek için kullanılan ve komponent tasarımı, teknik resimlerde yer verilen bu değer katmanlı imalattaki değişimleri tam olarak yansıtmadığını ortaya koymaktadır.

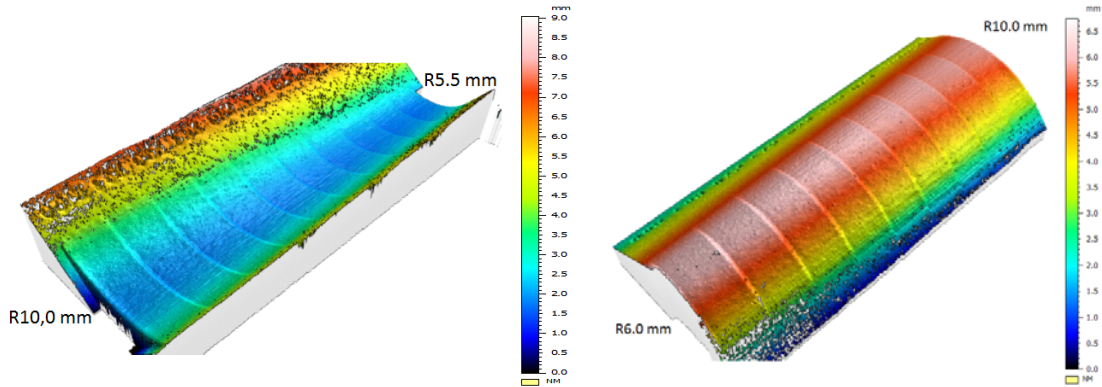
#### 4.3. Proses Limitleri (Process Limits)

Bunlara ek olarak, eğrisel geometri olan her bir yarıçap üzerinde, katmanlı imalatın doğasından kaynaklanan merdiven etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir. Merdiven etkisi, düşük eğim açılarında yüzey kalitesini daha çok etkilemektedir. Bu durum optik profilometre ile taranan konkav ve konveks yüzeylerdeki en küçük ve en büyük yarıçap üzerinde incelenmiştir. Şekil 9’da konkav yüzeydeki en küçük (R 5,5 mm) ve en büyük (R 10,0 mm) yarıçaplardaki yüzeyin durumu gösterilmektedir. Yarıçap yüzeyi üzerindeki eğim kaldırılmış olan görselde, yarıçap alanı 3 farklı bölgeye ayrılmıştır; 0°-30° (düşük eğim açısı), 30°-60° (orta eğim açısı) ve 60°-90° (yüksek eğim açısı). Aynı çalışma konveks yüzeylere de uygulanmış ve Şekil 10’de gösterilmiştir.

Ortaya çıkan durumun daha iyi anlaşılması ve değişim eğiliminin görülebilmesi adına konkav ve konveks yüzeylerdeki alanların ölçüm sonuçları konsolide edilerek grafik formatında Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 6. 0° a), ve 90° b) bölgelerinde yarıçap ölçümleri (Radius measurements on 0° and 90° regions)



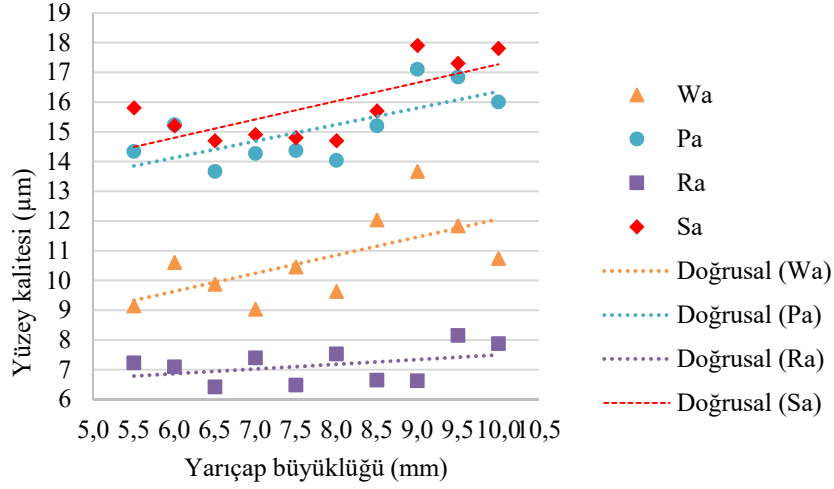
Şekil 7. Konkav ve konveks eğrisel yüzeyleri için optik profilometre tarama sonucu (Optical profilometer scanning results for concave and convex faces)

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

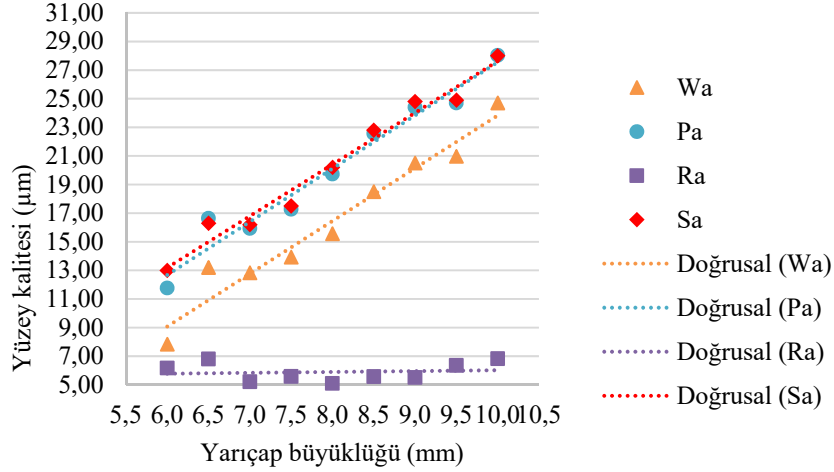
Yapılan çalışmada literatürde yer alan prizmatik ve açılı test numunelerine ek olarak eğrisel yüzeyli bir test numunesi de tasarlanmış ve tamamı Inconel 625 malzemeden toz yatağında lazer katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiştir.

Üretilen farklı test numuneleri üzerindeki yüzey kaliteleri incelenmiştir. Dokunmatik yöntemlerle gerçekleştirilen yüzey karakterizasyon çalışmalarında farklı parçaların yüzey büyüklükleri doğrultusunda farklı örnekleme ve değerlendirme koşulları kullanılmıştır. Yenilikçi bir tasarıma sahip eğrisel yüzeyli test numunesi, merdiven etkisi ile değişen yüzey karakteristiği hakkında iyi bir görsel





a)

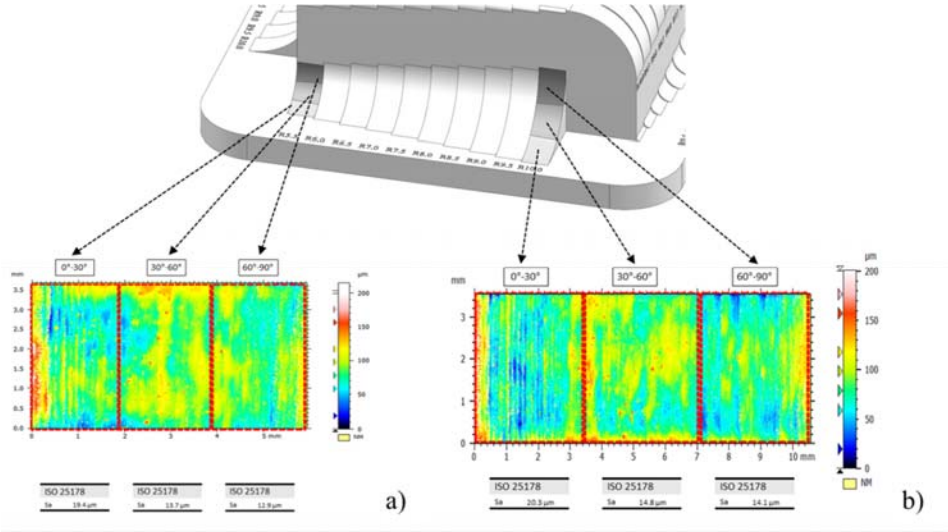


b)

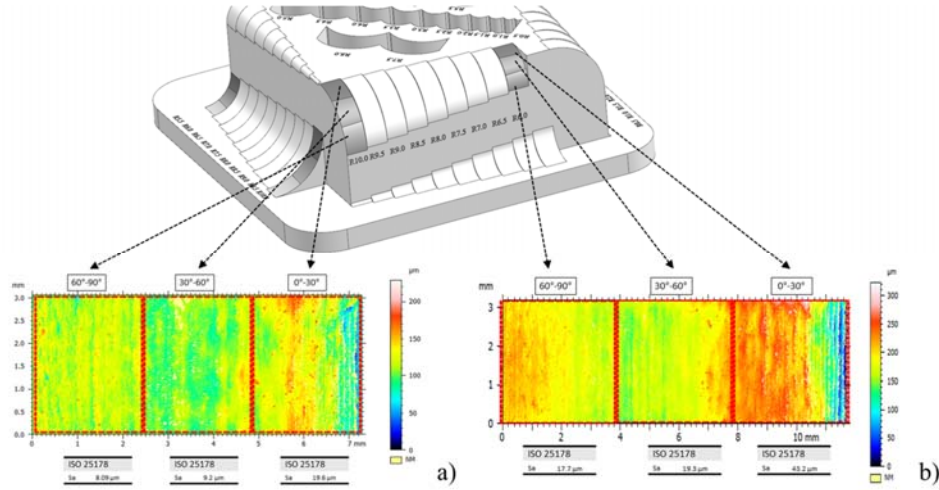
**Şekil 8.** Konkav a) ve konveks b) eğrisel yüzeyler için optik profilometre ölçüm sonuçları  
(Optical profilometer measurement results for concave and convex faces)

değerlendirme imkânı sunmuştur. Buna rağmen dokunmatik ölçüm sonuçlarında konveks ve konkav yüzeylerdeki değişen yarıçap değerlerine göre, yüzey karakteristiğinde değişim eğilim açısından belirgin bir fark görülmemiştir. Bununla beraber açılı yüzeylerde yatay yöne doğru azalan açı ile toplam profil ve dalgalılık değerleri yükselmiş, artan açı ile de azalmıştır. Bu durumu destekleyecek şekilde açısı tam yatay/dikey olan prizmatik numunede de 80° açılı numuneye yakın yüzey karakteristiği tespit edilmiştir. Hem birincil profil hem de dalgalılık açısından eğrisel yüzeyli test numunesinde görülen bu beklenmedik durum, dokunmalı yöntemlerin katmanlı olarak imal edilmiş yüzey ölçümlerindeki yetersizliği ile açıklanmaktadır. Diğer bir ifade yarıçap değerlerinden kaynaklı eğrisel yüzeylerdeki dokunmalı yöntemin, probunun kısa örnekleme ve değerlendirme mesafesinde yaptığı ölçümlerin tüm eğrisel yüzeydeki değişimi karakterize etmeye yeterli olmadığı görülmüştür.

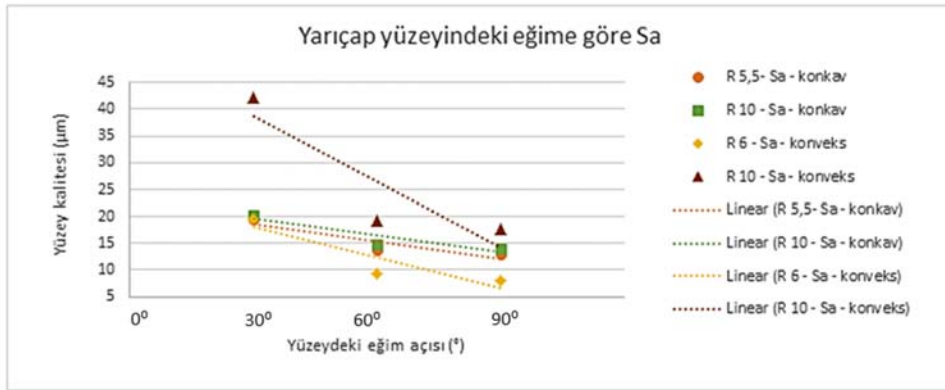
Endüstride kullanılacak ve belirli fonksiyonları yerine getirmesi beklenen gerçek komponentlerde, eğrisel yüzeylerin bulunması sebebi ile buradaki yetersizliğin giderilmesi ve gerekirse farklı karakterizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle tüm eğrisel yüzeyi karakterize edebilmek amacıyla beyaz ışık interferometre prensibine göre çalışan optik profilometre ile eğrisel yüzey taramaları yapılmıştır. Yapılan taramalar ile eğrisel yüzeydeki merdiven etkisi net bir şekilde görülebilmektedir. Artan eğim açısı ile yüzey kalitesinin iyileştiği tespit edilmiştir. Ayrıca artan yarıçap değeri ile konveks ve konkav yarıçaplardaki yüzey kalitesinin kötüleştiği görülmüştür. Bu durum artan yarıçap değeri ile eğim açısının değişmesinin sonucu olarak da açıklanabilmektedir. Ayrıca katmanlı imalatta, yüzeydeki eğim açısının yüzey kalitesine olan etkisinin, konveks geometride konkav geometriye göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 9. Konkav yüzeylerde R5,5 mm a) ve R 10,0 mm yarıçaplı bölgeler bölünmüş üç alan ve ölçüm sonuçları (Divided regions and measurement results for concave faces of R5.5 mm and R 10.0 mm)



Şekil 10. Konveks yüzeylerde R6,0 mm a) ve R 10,0 mm yarıçaplı bölgeler bölünmüş üç alan ve ölçüm sonuçları (Divided regions and measurement results for convex faces of R6.0 mm and R 10.0 mm)



Şekil 11. Yarıçap yüzeyindeki eğime göre ölçüm sonuçlarının değişimi (Change of measurement results according to slope in radius faces)

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada toz yatağında lazerle katmanlı imalat için yeni bir test numunesi tasarlanarak, üretimi ile yüzey dokusu ve form karakterizasyonu açısından yapılan değerlendirmesi sunulmuştur.

Katmanlı imalat ile üretilen parçalarda yüzey kalitesi ve form kontrolleri yapmak amacıyla tasarlanan test numuneleri incelenerek, yeni test numunesi için tasarım kriterleri ile hedefleri belirlenmiştir. Tasarım hedeflerine uygun olarak, test numunesi üzerine farklı büyüklüklerde ve yönlerde olacak şekilde konveks ve konkav yarıçaplar eklenmiştir.

Önerilen test numunesi üretim açısından bakıldığında iyi performans göstermiştir; üretim zamanı ve malzeme tüketimi düşük olmakla birlikte, üretim süresince çarpılma ve katmanlara ayrılma gibi bir problem gözlenmemiştir.

Üretilen parça farklı yarıçap yüzeylerinde değişen merdiven etkisini görsel olarak görülmesini sağlamasına rağmen, dokunmalı ölçüm cihazlarıyla yapılan birincil profil ve dalgalılık ölçümlerinde herhangi bir eğilim gözlemlenmemiştir. Bu beklenmedik sonucun, dokunmatik ölçüm cihazı ile kısa değerlendirme uzunluğu kullanılarak sadece yarıçapın orta kısmından yapılan ölçümden ve dokunmatik probun eğimli bir yüzey olan yarıçap üzerindeki erişim probleminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumu telafi etmek için dokunmasız ölçüm yöntemleri ile değerlendirmeler yapılmış ve tartışmalar ilgili bölümlerde sunulmuştur.

## TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın yapılmasında yazarlara yardımcı olan Çağdaş Şen ve Bengü Zuhal Kutlu'ya teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, 2015.
2. Levy G.N., Schindel R., Kruth J. P., Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 52 (2), 589-609, 2003.
3. Uglu A.A., Yılmaz O., Almusawi Ahmed R.J., Development and control of shaped metal deposition process using tungsten inert gas arc heat source in additive layered manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 232, 9, 1628-1641, 2016.
4. Poyraz Ö., Kuşhan 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), 730-742, 2018.
5. Kayacan M.C., Delikanli Y.E., Duman B., Ozsoy 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.
6. Yasa E., Poyraz O., Solakoglu E.U., Akbulut G., Oren S., A Study on the Stair Stepping Effect in Direct Metal Laser Sintering of a Nickel-based Superalloy, Procedia CIRP, 45, 175-178, 2016.
7. Herderick E., Additive manufacturing of metals: A review, Materials Science & Technology Conference, Ohio, ABD, 1413-1425, 16-20 October, 2011.
8. Hague R., Campbell I., Dickens P., Implications on design of rapid manufacturing, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 217 (1), 25-30, 2003.
9. Yasa E., Demir F., Akbulut G., Cızıoğlu N., Pilaşin S., Benchmarking Of Different Powder-Bed Metal Fusion Processes For Machine Selection in Additive Manufacturing, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 390-403, August, 2014.
10. Townsend A., Senin N., Blunt L., Leach R.K., Taylor J.S., Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review, Precision Engineering, 46, 34-47, 2016.
11. Zecchino M., How to choose the correct stylus for any application. Veeco; 2005.
12. Ross I., Kumstel J., Bremen S., Willenborg E., Laser polishing of laser additive manufactured surfaces made from Inconel 718 and ASTM F75. Achieving precision tolerances in additive manufacturing. In: ASPE 2015 Spring Topical Meeting, ASPE, 2015.
13. Beard M., Ghita O., Evans K.E. Using Raman spectroscopy to monitor surface finish and roughness of components manufactured by selective laser sintering. J Raman Spectrosc, 42, 744-8, 2011.
14. Krolczyk G., Raos P., Legutko S., Experimental analysis of surface roughness and surface texture of machined and fused deposition modelled parts. Tehnički Vjesnik-Tech Gaz, 2014, 21, 217-21, 2014.
15. Gomez C., Su R., Thompson A., DiSciaccia J., Lawes S., Leach R.K., Optimization of surface measurement for metal additive manufacturing using coherence scanning interferometry, Optical Engineering, 56 (11), 111714, 2017.
16. Król M., Kujawa M., Dobrzański L.A., Tański T., Influence of technological parameters on additive manufacturing steel parts in Selective Laser Sintering, Archives of Materials Science and Engineering, 67 (2), 84-92, 2014.
17. Taufik M., Jain P.K., Role of build orientation in layered manufacturing: a review, International Journal of Manufacturing Technology and Management, 27, (1-3), 47-73, 2013.
18. Strano G., Hao L., Everson R. M., Evans K. E., Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology, 213 (4), 589-597, 2013.
19. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B., Post-Processing in Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, US, 415-435, 2010.

20. Hague R., Mansour S., Saleh N., Material and design considerations for rapid manufacturing, *International Journal of Production Research*, 42 (22), 4691-4708, 2004.
21. Thomas D., Bibb R., Identifying the geometric constraints and process specific challenges of selective laser melting, In *Proceedings of Time Compression Technologies Rapid Manufacturing Conference*, Coventry, United Kingdom, 2008.
22. Over C., Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit Selective Laser Melting, PhD Thesis, RWTH Aachen, 2003.
23. Gonzalez J.A., Mireles J., Stafford S.W., Perez M.A., Terrazas C.A., Wicker R.B., Characterization of Inconel 625 Fabricated Using Powder-Bed-Based Additive Manufacturing Technologies, *Journal of Materials Processing Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.031>
24. EOS material datasheet for Nickel Alloy IN625.