





## Investigation of residual stresses by micro indentation in selective laser melting

Evren Yasa<sup>1</sup> , Özgür Poyraz<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir, Turkey.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Eskişehir Technical University, Eskişehir, Turkey.

### Highlights:

- Powder bed fusion additive manufacturing of Inconel 625 parts
- Microhardness testing using different loads and investigation using optical microscope
- Residual stress identification and benchmarking with previous studies

### Keywords:

- Laser powder bed fusion
- Inconel 625
- Residual stresses
- Micro indentation

### Article Info:

Received: 09.09.2020

Accepted: 13.12.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.792584

### Acknowledgement:

The authors would like to thank ONATUS for supporting this research.

### Correspondence:

Author: Özgür Poyraz  
e-mail:  
ozgurpoyraz@eskisehir.edu.tr  
phone: +90 532 601 7098

### Graphical/Tabular Abstract

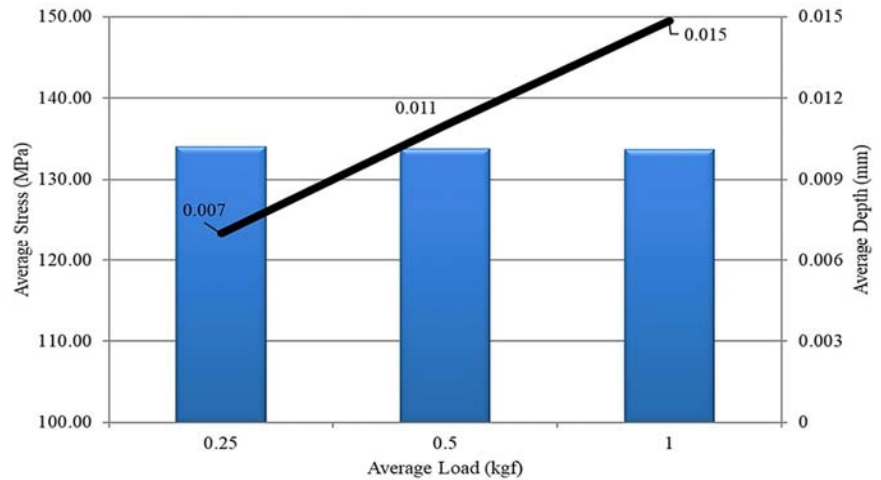


Figure A. Applied methods and calculated residual stresses of SLMed (L-PBF AM) Inconel 625

**Purpose:** The purpose of the presented paper is to investigate residual stresses of additively manufactured part by low-cost micro indentation technique.

### Theory and Methods:

This paper contributes to scientific knowledge by applying the low-cost micro indentation residual stress measurement technique to additively manufactured parts. Investigation was conducted on Inconel 625 samples produced by Selective Laser Melting (Laser Powder Bed Fusion). Necessary material properties were calculated by using JMatPro® software.

### Results:



Compressive stresses were generated at the top surface of the samples as the result of SLM process. The stress magnitude showed values between 100 MPa – 150 MPa with a considerable increase within 0.02 mm indentation depth. The findings were benchmarked with the previous studies conducted with other residual stress measurement methods and found to be comparable.

### Conclusion:

Residual stresses are one of the common problems associated with metal additive manufacturing including SLM process. Various techniques can be employed to identify the so-called residual stresses and micro indentation is one of those having low-cost investment requirement advantage and easiness of application. This paper showed the applicability of the technique on Inconel 625 samples produced by SLM by benchmarking the findings with the previous studies.



## Lazerle metal toz ergitme prosesinde kalıntı gerilmelerin mikro girinti tekniği ile incelenmesi

Evren Yasa<sup>1</sup> , Özgür Poyraz<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Inconel 625 parçalarının toz yatak füzyon katkılı imalatı
- Farklı yükler kullanarak mikrosertlik testi ve optik mikroskop kullanarak inceleme
- Kalan stres tespiti ve önceki çalışmalarla kıyaslama

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 09.09.2020  
Kabul: 13.12.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.792584

### Anahtar Kelimeler:

Toz yatağında lazerle eklemeli (katmanlı) imalat, inconel 625, kalıntı gerilmeler, mikro girinti

### ÖZET

Toz yatağında lazerle eklemeli (katmanlı) imalat ile metal malzemeden fonksiyonel parça üretimi yaygınlaşmakta ve geniş malzeme spektrumu sayesinde çok sayıda endüstri tarafından tercih edilmektedir. Bununla beraber konvansiyonel imalat yöntemlerine göre daha az olgunlaşmış olan Lazerle Metal Toz Ergitme (LAM) prosesi açısından aşılması gereken bazı kısıtlamalar söz konusudur. Yüksek ergime-katılma hızına sahip prosesteki temel problemlerden biri kalıntı (artık) gerilmelerdir. Farklı sayıdaki kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri arasında, mikro girinti tekniği yeni yatırım ihtiyacı olmaması açısından avantajlıdır. Bu makalede LAM prosesi ile üretilmiş, bir nikel süperalaşımı olan ve havacılıkta yaygın olarak kullanılan Inconel 625 malzemedeki kalıntı gerilmeleri mikro girinti tekniği ile tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerin, literatürde aynı teknik ile incelenmiş diğer nikel süperalaşımına uyumlu olduğu görülmüştür.

## Investigation of residual stresses by micro indentation in selective laser melting

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

- Powder bed fusion additive manufacturing of Inconel 625 parts
- Microhardness testing using different loads and investigation using optical microscope
- Residual stress identification and benchmarking with previous studies

### Article Info

Research Article  
Received: 09.09.2020  
Accepted: 13.12.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.792584

### Keywords:

Laser powder bed fusion, inconel 625, residual stresses, micro indentation

### ABSTRACT

Selective Laser Melting (SLM) of functional parts production from metals are becoming widespread and are preferred by many industries thanks to their wide material portfolio. However, there are still challenges that need to be overcome for the emerging SLM process which is relatively immature in comparison to conventional manufacturing methods. One of the main challenges for the process is the high melting-solidification rate resulting in residual stresses. Among the different number of residual stress measurement techniques, micro indentation has the advantage of not requiring new investments. In this article, residual stresses of SLMed Inconel 625, which is a nickel superalloy widely used in aerospace, were investigated by the micro indentation technique. The values obtained were found to be compatible with other nickel superalloy studies available in the literature.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat ASTM F2792.429494 -1 standardına göre nesnelerin 3B (3 boyutlu) model verisinden, genelde üst üste dizilen katmanlar halinde malzemelerin birleştirilmesi metodu olarak tanımlanmaktadır [1]. Benzer şekilde uluslararası standartlarda toz yatağında füzyon grubu altında sınıflandırılan Lazerle Metal Toz Ergitme (LAM) ile metal malzemelerden fonksiyonel parça üretimi yaygınlaşmakta ve geniş malzeme portföyü sayesinde çok sayıda endüstri tarafından tercih edilmektedir. Eklemeli imalat teknolojileri üzerine yapılan araştırmaların son yıllarda artarak devam etmesinin temel sebebi, bu teknolojilerin konvansiyonel imalat yöntemlerine kıyasla tasarım ve imalat aşamalarında sunduğu çok sayıda avantajı olmasıdır [2]. Bunlara verilebilecek örnekler arasında tasarım serbestliği, topoloji optimizasyonu veya hücresel (kafes) yapılar sayesinde ağırlık azaltımı, daha az talaş kaldırma gereksinimi olan yarı mamuller ile malzeme tasarrufu, enjeksiyon, döküm veya şekil verme operasyonlarındaki özel takım/kalıp ihtiyacının ortadan kaldırılması bulunmaktadır. Bununla beraber yeni geliştirilen ve yaygınlaşan teknolojilerin daha fazla sektör ve endüstri tarafından kabul görebilmesi için hala üstesinden gelinmesi gereken zorluklar bulunmaktadır. Bu zorlukları aşmak için yapılan araştırmalarda toz yatağında eklemeli imalat ile üretilmiş malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, ortaya çıkan parçalardaki ikincil işlemler gereksinimlerinin azaltılması, parçaların eklemeli imalat sonucunda nominal değerlere yakın ölçülerde ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü ile üretilmesi, parçalardaki kalıntı (artık) gerilmelerin en aza indirgenmesi gibi çok farklı amaçlar güdülmektedir.

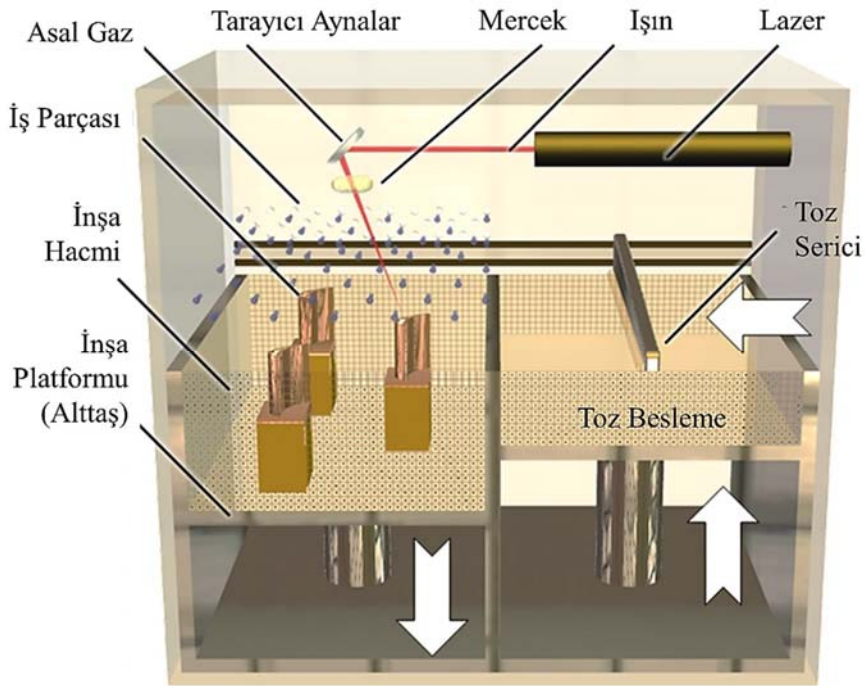
### 1.1. Lazerle Metal Toz Ergitme (Laser Powder Bed Fusion)

Uluslararası standartlara göre farklı gruplar altında incelenen eklemeli imalat yöntemlerinin ortak aşamaları çoğunlukla aynıdır ve sırası ile parçanın 3 boyutlu (3B) geometrisinin oluşturulması, model dosyasının gerekli formata çevrilmesi, proses öncesi iş hazırlığı, inşa, proses sonrası tezgahtan uzaklaştırma ve ikincil işlemleri içermektedir .

Lazerle metal eklemeli imalat prosesi farklı tezgah sağlayıcılarına sahiptir ve bu sebeple literatürde SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) ve Laser Cusing gibi ticari isimlerle de yer almaktadır [3]. Söz konusu yöntemde özelleşmiş olarak prosesin gerçekleştirilmesi sırasında bir inşa platformu üzerine toz serici vasıtası ile serilen metal tozları, tarayıcı aynalar tarafından yönlendirilmiş lazer ışını ile olması gereken kesit geometrisinde taranmaktadır (Şekil 1). Taranmış bölgedeki metal tozları önce erir ve sonra katılarak parçanın ilgili katmanını oluşturur. Daha sonra inşa platformu bir katman kalınlığına eşdeğer olarak aşağı yönde hareket eder ve bir önceki adımda yapılan işlemler tekrarlanır. Bütün çevrim, imalat sonunda parçanın sahip olması gereken toplam yükseklik elde edilene kadar yinelenir ve bu sayede parça inşa platformu üzerine imal edilmiş olur.

### 1.2. Kalıntı Gerilmeler ve Ölçüm Yöntemleri (Residual Stresses and Measurement Techniques)

Kalıntı (artık) gerilmeler bir malzeme ve/veya iş parçasında gerçekleştirilen bir imalat veya prosesi takiben, dış



Şekil 1. Toz yatağında lazerle eklemeli imalat (Laser powder bed fusion) [3]

yüklemeler veya değişkenlikler ortadan kalktıktan sonra da varlıklarını sürdüren gerilmeler olarak tanımlanmaktadır [4]. Söz konusu gerilmeler malzemelerin veya parçaların özelliklerini olumsuz şekilde etkilemekte ve yorulma ömründe azalma, gevrek kırılma, korozyon direncinde düşme, çarpılma ve ölçüsel dalgalanmalar gibi pek çok riski beraberinde getirmektedir [5]. Farklı şekillerde sınıflandırılabilen kalıntı gerilmelerde ilk olarak gerilmenin ölçüğü dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda Tip-I makro ölçek, Tip-II mikro (tane seviyesi) ölçek ve Tip-III atomik ölçekteki kalıntı gerilmeleri dikkate alan ölçek bazlı bir sınıflandırma yapılmaktadır. İkinci sınıflandırmada ise kalıntı gerilmeyi oluşturan sebepler belirleyici olmaktadır. Buna göre mekanik, termal ve fiziko-kimyasal sebepler kalıntı gerilmelere yol açabilir [4]. Bunlar arasından mekanik sebepli kalıntı gerilmeler çoğunlukla makro ölçekte görülmekte ve derin çekme, talaşlı imalat, taşlama gibi imalatlar sırasında homojen olmayan şekil değiştirmeye bağlı olarak oluşmaktadır [6]. Yine makro ölçekte olumsuz etkiler gösteren termal sebepli gerilmeler de ısının kullanıldığı imalat yöntemleri ve ısı işlemler sonucundaki homojen olmayan ısıma, soğuma ve hızlı sıcaklık değişimlerine bağlı ortaya çıkmaktadır [4]. Son olarak hem makro hem de mikro ölçekte etkili olan fiziko-kimyasal sebepli kalıntı gerilmeler ilgili reaksiyonlardan sonra görülen hacim değişimi, faz değişimi ve çökeltme olayları ile malzemeyi etkilemektedir [7]. Toz yatağında lazerle eklemeli imalat yönteminde de görülen ergime ve katılaşmalar hem faz değişimlerini hem de homojen olmayan sıcaklık değişimlerini beraberinde getirmekte ve bunlara ek olarak görülen termal genleşmelerle kalıntı gerilmelere yol açmaktadır [8]. Bu kalıntı gerilmeler malzeme performansına olumsuz etkilerinin yanında iş parçalarının

inşa platformundan ayrılması sonrasında çarpılma veya deformasyona sebebiyet vermektedir [9].

Kalıntı gerilme ölçümü için literatürde uygulanan pek çok yöntem bulunmaktadır. Geçmişten günümüze kadar uygulanan farklı yöntemlerde ölçüm derinliği ile ölçümün tahribatlı veya tahribatsız olma durumu dikkate alınmaktadır. Bunlara ek olarak, uygulanacak yöntemin seçim aşamasında kullanılacak geometri, ihtiyaç duyulan veriler ve ekipman maliyetleri değerlendirilmektedir. Tablo 1’de kalıntı gerilme ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması görülmektedir [11].

Lazerle Metal Toz Ergitme prosesi sonucunda ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin incelenmesinde, literatürde kabul görmüş yöntemler arasında daha çok makro ölçekte delik delme ve kanal açma (çatlak ilerleme) ile mikro ölçekte X-ışını kırınımı yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [12]. Buradaki kalıntı gerilmelerin, özellikle prosesin gerçekleştirildiği katman düzlemindeki durumunun belirlenmesi için mikro yöntemlere başvurulmaktadır. Makro yöntemler ise parça üst düzleminde, parça hacminin içerisine doğru derinlik boyunca değişimin tespitinde faydalıdır. Bunlara ek olarak, özellikle farklı proses parametrelerinin kalıntı gerilmelere olan etkisinin deformasyon üzerinden karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirebilen köprü eğriliği yöntemi (bridge curvature method) de uygulanmaktadır [9].

Bu çalışmada son yıllarda Lazerle Metal Toz Ergitme prosesi ile imal edilmiş parçalara uygulanmaya başlanan [13], düşük ekipman maliyetlerinin yanında metallere seramiklere geniş bir malzeme çeşidi açısından uygun olan [14], ve

**Tablo 1.** Kalıntı gerilme ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması (Benchmarking of residual stress measurement methods) [11]

Yöntem	Gerilme Tipi	Nüfuziyet	Geometri	Ölçme Hızı	Tahribat Durumu	Ekipman Maliyeti
Tabaka Kaldırma		0,01-0,5 mm	Düz	Hızlı	Tahribatlı	Düşük
Delik Delme		0,25 mm Delik çapı	Düz ve karmaşık	Orta	Yarı Tahribatlı	Düşük
Halka Çekirdek		0,1-6 mm	Düz ve karmaşık	Orta	Yarı Tahribatlı	Düşük
Kanal Açma	Makro	150 mm	Düz ve karmaşık	Orta	Yarı Tahribatlı	Düşük
Kesit Profil Ölçümü		-	Düz ve karmaşık	Hızlı	Tahribatlı	Düşük
Tüp Yarma		-	İnce cidarlı tüp	Hızlı	Tahribatlı	Düşük
İnce Kesitlere Ayırma		8-100 mm	Belirli durumlar	Orta	Tahribatlı	Düşük
X-ışını Kırınımı		<50 mm (Al) <5 mm (Ti)	İşin engeli olmayan	Yavaş		Orta
Şiddetli X-ışını Kırınımı	Mikro ve Makro	50 mm (Al) 1-2 mm (Diğer malzemeler)	Önemli değil	Orta	Tahribatsız	Yüksek
Nötron Kırınımı		200 mm (Al) 25 mm (Fe) 4 mm (Ti)	Önemli değil	Çok yavaş		Yüksek

gerekli numune hazırlama işlemleri ile karmaşık geometrilere de uyarlanabilen tahrifatlı mikro girinti (indentasyon) yöntemi ile yapılan deney ve analizler sunulmaktadır. Larsson, Al4120-14 hadde malzemenin kullanıldığı çalışmada Vickers ucu ile aynı açıya sahip konik uç kullanarak girinti testleri gerçekleştirmiş ve burada tespit ettiği kalıntı gerilmeleri nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır [15]. Ahn vd., malzeme özellikleri her ekseninde simetri göstermeyen durumları temsil etmesi için kama şeklinde bir uç tasarlamış ve bunu farklı çelik alaşımlarına (SCM4, S45C, SKD11) uygulayarak Knoop girinti yöntemi ile karşılaştırmış ve kama uçların sonuçlarında derinliğe bağlı değişim görüldüğünü ortaya koymuştur [16]. Pham ve Kim, iki farklı yapısal çelik alaşımı (SS400, SM490) için yaptıkları çalışmalarında daha düşük derinliklerin incelenebildiği nano girinti tekniğini kullanmış ve buradan elde ettikleri değerler ve tersine analizlerle, kalıntı gerilme, pekleşme üssü, ve farklı malzeme özelliklerine ait hesaplamalar raporlamışlardır [17]. Breumier vd., tek kristal bakır malzemeyi incelerken küresel uç ile girinti oluşturulan Brinell sertlik sistemini kullanmış ve elde ettikleri sonuçları elektron geri saçılım kırınımı (electron backscatter diffraction) ile karşılaştırarak farklı kristal oryantasyonlarındaki kalıntı gerilmeleri irdelemiştir [18]. Zhang vd. de, benzer şekilde küresel ucla yaptıkları girinti testleri sonuçlarını kullanarak analitik analizler yapmış ve bunları pekleşme üssünün Holloman modeline yakınsaması ile elde edilen nümerik analizlerle karşılaştırmıştır [19]. Güncel literatürdeki çalışmalardan da görüleceği üzere, mikro girinti yöntemi ile kalıntı gerilmelerin tespiti farklı teknikler kullanılarak, farklı yöntemlerle imal edilen malzemelere uygulanmıştır ve gerek diğer testler gerekse nümerik analizlerle karşılaştırmaları yapılmıştır. Buna ek olarak, önceki paragraflarda belirtilen nedenlerle kalıntı gerilmelerin görüldüğü LAM ile imal edilmiş ürünler için araştırma ihtiyacı devam etmektedir. Bu makalede havacılıkta ve savunma sanayinde sıkça kullanılan bir nikel süperalaşımı olan Inconel 625 (UNS N06625) toz malzeme kullanılarak LAM ile imal edilmiş numunelere

mikrosertlik incelemeleri gerçekleştirilmiş, ve hesaplamalı malzeme mühendisliği uygulamalarından elde edilen malzeme verileri ile kalıntı gerilme değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerin, literatürde aynı teknik ile incelenmiş diğer nikel süperalaşımınla uyumlu olduğu görülmüştür [13]. Makale içeriğinde sırası ile deneysel çalışmalar, malzeme özelliklerinin eldesi ve kalıntı gerilmelerin mikro girinti hesaplanması açıklanmaktadır. Makale sonunda ise, bu çalışmada elde edilen veriler literatürdeki yakın malzemelerle karşılaştırılmış ve ileriki araştırma gereksinimlerine vurgu yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

Materyal ve yöntem bölümü içerisinde sırası ile kullanılan ham malzeme, proses ve üretilen numunelere ait bilgiler sunulmakta, ihtiyaç duyulan malzeme özelliklerinin elde edilmesi anlatılmakta ve mikro girinti yöntemi ile kalıntı gerilmelerin hesaplanması açıklanmaktadır.

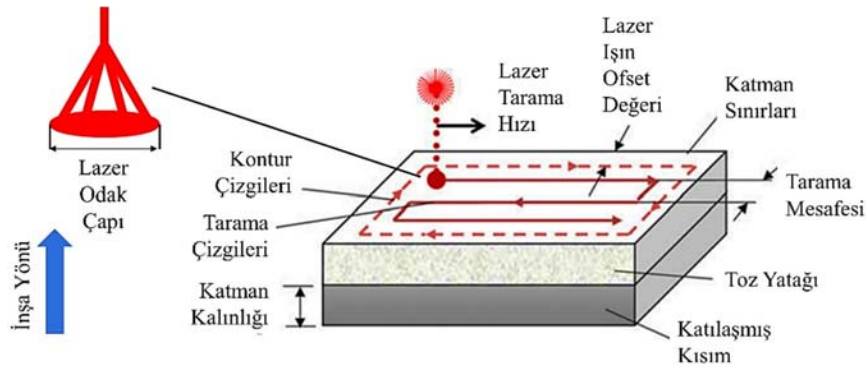
### 2.1. Numunelerin Toz Yatağında Lazerle Eklemeli İmalatı (Laser Powder Bed Additive Manufacturing of Samples)

Makalede kullanılan numuneler Tablo 2’de kimyasal kompozisyonu verilen Inconel 625 nikel alaşımı (ticari ismiyle IN625) toz malzemeden üretilmiştir. Toz boyutu Gaussian bir dağılım göstermektedir ve sırası ile D10 10 µm, D50 30 µm ve D100 50 µm boyut aralıklarında toz parçacıklarını içermektedir. Numune boyutları en 50 mm, boy 50 mm ve yükseklik 10 mm olarak seçilmiştir.

LAM proses parametreleri, yoğunluğu en yüksek seviyede tutacak şekilde optimize edilmiştir. Kullanılan proses parametreleri ile elde edilen porozite değeri 0,1%’den küçüktür. 40 µm katman kalınlığı için yaklaşık 2,7 J/mm<sup>2</sup> bir yüzeyel enerji girdisi (Lazer gücü / (Tarama hızı x Tarama mesafesi)) sağlanmıştır. Proses parametrelerin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmektedir [3].

**Tablo 2.** IN625 toz malzemenin kimyasal kompozisyonu (IN625 Chemical Composition) [20]

Kimyasal kompozisyon (%)											
Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Ti	Al	Co	C	Ta	Si, Mn	P, S
Balans	20-23	8-10	3,1-4,1	≤5	≤0,4	≤0,4	≤0,1	≤0,1	≤0,05	≤0,5	≤0,01



**Şekil 2.** Toz yatağında lazerle eklemeli imalat proses parametreleri (Process parameters) [3]

Numuneler, eklemeli imalattan sonra tel erozyon ile inşa platformundan ayrılmış, daha sonra mikrosertlik ölçümlerinin kolay yapılabilmesi için iki eşit parçaya (en 50 mm, boy 25 mm, yükseklik 10 mm) bölünmüştür. Parçaların sertlik ölçümü yapılacak üst yüzeyleri standartlara uygun biçimde zımpara ile parlatılarak numune hazırlama işlemleri tamamlanmıştır.

## 2.2. Kalıntı Gerilmelerin Mikro Girinti Yöntemi ile Hesaplanması

(Estimation of Residual Stresses by Indentation)

Girinti veya indentasyon (indentation) teknikleri malzemelerin özelliklerinin ve yoğunlukla da sertliklerinin tespitinde kullanılan yöntemlerdir. Malzemelerin sabit bir basma kuvveti altında şekil değiştirmeye karşı dirençlerinin ölçütü olan sertlik özelliği, farklı ölçeklerde uygulanabilen girinti teknikleri ile tespit edilmektedir. Makro, mikro ve nano ölçeklerinde uygulanan girinti teknikleri konunun öncüsü araştırmacıların isimleri ile anılmaktadır ve yaygın olarak kullanılanlar arasında Brinell, Vickers, Meyer, Rockwell, Shore, IHRD, Knoop ve Buchholz bulunmaktadır [21]. Mikro girinti tekniği diğerlerinden uygulanan yük ve derinlik ile ayrılmaktadır ve bu kapsamda 2N yükten az olan mikron seviyesinde derinliğe sahip tespitler mikro girinti tekniği ile yapılmaktadır. Mikro girinti ile sertlik tespitinde en yaygın olan iki teknik Vickers ve Knoop teknikleridir [21]. Her iki teknikte de belirli bir tepe açısı ile sivri geometriye sahip uçlar sabit yük altında, belirli bir sürede, belirli bir derinliğe kadar ana malzemeye batırılarak sertlik değerleri tespit edilir. Ana malzemenin elastik-mükemmel plastik davranış sergilediği bir durumda, sert elmadan yapılan piramit şeklindeki Vickers ucun ana malzemeye batırılması sonucu oluşan izin, piramidin girinti yaptığı derinlikteki nominal kesiti ile birebir aynı olması beklenmektedir. Fakat geçmişte söz konusu davranışa çok yakın bir davranış sergileyen 8009 serisi alüminyum malzeme ile yapılan bir çalışmada, kesitte nominal duruma kıyasla bir farklılık olduğu ve kalıntı gerilmeler gibi olası etkenlerin ancak kesitin optik yöntemlerle detaylı incelenmesi sonucunda anlaşılabilceği raporlanmıştır [22]. Buna ek olarak deneyler sonucunda görülebilecek içeri batma (Sink-in) veya dışarı yığılma (Pile-up) gibi durumların da gerçek kesit alanını etkilediği ve ilgili sonuçların yorumlanmasını zorlaştırdığı ortaya konmuştur.

Yine öncül olarak yapılan ve bu sebeple konunun basitçe anlaşılmasına katkıda bulunmayı hedefleyen bir araştırmada,

benzer malzeme davranışı esas alınmış (pekleşme ihmal edilmiş), elastik modülün akma gerilmesi ve Poisson oranı ile bağıntısından girinti durumu 3 seviyede sınıflandırılmıştır. Mühendislikte kullanılan metal alaşımların büyük bir çoğunluğu 3. seviye içerisinde değerlendirilmiş ve girinti ile temas eden bölgede plastik deformasyonun baskın olduğu sonucuna varılmıştır [23]. Pekleşmenin de dâhil edildiği çalışmalarda ise mikro girinti tekniği ile tespit edilen sertlik değeri akma gerilmesi ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Buna göre  $H$  ile belirtilen sertlik değeri  $C$  ile belirtilen bir sabit ve  $\sigma_y$  ile belirtilen akma gerilmesi değerlerinin çarpımından elde edilmektedir. Buradaki  $C$  sabit değerinin ifade ettiği büyüklük, farklı malzemelerle yapılan ve piramit şekilli ucun kullanıldığı Vickers mikrosertlik deneyleri için elasto-plastik deformasyonun bittiği sınıra kadar olan gerinme değeridir [24] (Şekil 3).

Bu durumda akma gerilmesi ve mikrosertlik ilişkisi aşağıdaki Eş. 1 ile ifade edilebilir.

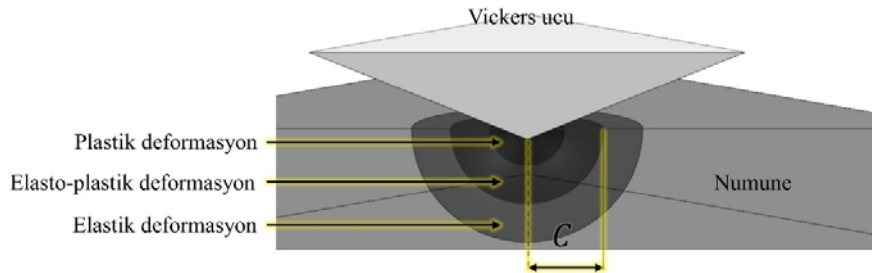
$$H = C\sigma_y \quad (1)$$

Kalıntı gerilmelerin mikro girinti yöntemi ile hesaplanması ilk olarak Carlsson ve Larsson tarafından geliştirilmiş ve soğuk haddelenmiş Al 4120-14 alüminyum alaşımında uygulanmıştır [25, 26]. Carlsson ve Larsson [25] burada görülen sonuçtan yola çıkmış ve Tabor [24] tarafından tespit edilen sertlik ve akma gerilmesi ilişkisini de kullanarak kendi kuramlarını geliştirmiştir. Yoğunlukla şekil değiştirme sertleşmesine uğrayan metal malzemeler dikkate alındığında, akma gerilmesi efektif plastik gerinme değerine bağlı olarak değişmekte ve bu sebeple  $\sigma(\epsilon_{repr})$  ifadesi ile temsil edilmektedir (Eş. 2).

$$H = C\sigma(\epsilon_{repr}) \quad (2)$$

Kalıntı gerilmelerin sistemde var olduğu kabulü ile efektif plastik gerinmenin, başlangıç gerinmesi ( $\epsilon_{repr}$ ) ve kalıntı gerinmelerin ( $\epsilon_{res}$ ) toplamı şeklinde yazılması mümkündür. Buradaki başlangıç gerinmesi standarda göre yapılan ve piramit uç kullanılan Vickers mikrosertlik deneyleri için ortalama 0,08 olarak ölçülmüştür [24]. Aktarılan bilgiler Eş. 2'de yerine konulduğunda, gerilme ve mikrosertlik ilişkisi için Eş. 3 ile verilen ifadelere ulaşılmaktadır.

$$H = C\sigma(\epsilon_{repr} + \epsilon_{res}) \quad (3)$$



Şekil 3. Vickers mikrosertlik testi sonucunda deformasyon bölgeleri (Types of deformations following to Vickers indentation tests)

Eş. 3'te  $\varepsilon_{res}$  kalıntı gerinme ve  $\sigma(\varepsilon_{res})$  kalıntı gerinmeye bağlı gerilme değerleridir. Efektif plastik gerinme değerinin kalıntı gerinmeye eşit kabul edildiği durumda  $\sigma(\varepsilon_{res})$  değeri akma gerilmesine eşit olmaktadır. Bu kapsamda yapılacak hesaplamalarda sabit bir akma gerilmesi yerine tek eksenli çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinme eğrisinden hesaplanan bünye denklemi (üstel yasa) kullanımının daha hassas sonuçlar verdiği raporlanmaktadır [26]. Bu durumda iki değişken arasındaki ilişki Eş. 4 ile gösterilmektedir.

$$\sigma(\varepsilon_{res}) = \sigma_0 \varepsilon_{res}^n \quad (4)$$

Eş. 4'te iki değer arasındaki ilişkiyi belirleyen  $\sigma_0$  ve  $n$  değerleri denklemdeki sabitler olup belirli hızlarda yapılan çekme deneyinden veri toplayarak elde edilebilir.  $n$  sabiti, şekil değiştirmeye bağlı pekleşmeyi temsil etmektedir ve güç yasası (ing. Power Law) olarak da adlandırılan model için  $n$  sabitinin 0 ile 1 arasında değerler alması, iç bükey formda bir eğrinin yakınsayabilmesi için önemlidir. Bu modelde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus eğrinin, eksen sisteminin merkezindeki eğiminin çok dik olması sebebi ile sonsuza yakınsayarak hatalara sebep olma riskidir. Bu risk sebebi ile düşük gerilme değerleri için tercih edilmez ve elastik bölgenin ötesinde kullanılır. Bununla beraber söz konusu model pekleşme bölgesi için uygulandığından [27], bu modele ait gerilme-gerinme verilerinin kullanımı çekme dayanımına kadar olan bölgede sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada malzeme özelliklerinin deneysel olarak elde edilmesine alternatif bir yöntem kullanılmıştır ve JMatPro® hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı ile oda sıcaklığındaki gerilme-gerinme değerleri elde edilmiştir. Açılımı Java Tabanlı Malzeme Özellikleri (ing. Java Based Material Properties) olan JMatPro® yazılımı, çoğunlukla metalik alaşımların, termodinamik enerji ilkesine dayanarak ve belirli veri tabanları referans alınarak, malzeme özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılır. Bu makale kapsamında yapılan hesaplama için öncelikle yazılıma Inconel 625 alaşımının Tablo 2'de verilen kompozisyonu girilmiştir. Daha sonra kompozisyona bağlı olarak alaşımın fazları yazılım algoritması tarafından belirlenmiştir. Belirlenen fazlar ve özelliklere bağlı olarak dayanım hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve oda sıcaklığında gerçek

gerilme-gerinme değerleri tespit edilmiştir. Gerilme MPa cinsinden gerinme ise birimsiz olarak elde edilmiştir. Belirlenen gerinme değerleri, en düşüğe elastik bölgenin üstünde kalacak bir gerilmeye karşılık gelen değer ile filtrelenmiş ve en yüksekte ise 1 gerinme limitini aşmayacak değerler seçilmiştir. Daha sonra elde edilen değerlere sabit çarpanlı bir üstel fonksiyon atanmış ve yakınsama R<sup>2</sup> değeri 0,999 elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen değerlere sabit çarpanlı bir üstel fonksiyon atanmış ve yakınsama R<sup>2</sup> değeri 0,999 elde edilmiştir. Şekil 4'te IN625 malzemenin gerilme-gerinme eğrisi ve güç yasası görülmektedir.

Mikrosertlik ve kalıntı gerilme-gerinme değerlerine ait bir ilişkinin tanımlanmasından sonra, test sonrası ortaya çıkan girinti geometrisi ile öncekilerin bağlantısı kurulmalıdır. Burada öncelikle kalıntı gerilmelere bağlı olarak mikro girintinin şekillenebilme kabiliyeti esas alınmış ve bu gerçek alanın nominal alana bölünmesi ile bulunabilecek  $c^2$  ifadesi ile temsil edilmiştir (Eş. 5). Nominal alan Vickers ucunun kesiti dikkate alınarak basitçe eşkenar dörtgenin alanı olarak bulunmaktadır. Gerçek alan değeri ise girinti izinin ışık mikroskobu ile çekilen fotoğraflarından elde edilebilir. Alanın Vickers mikrosertlik yönteminde tespit edilmesinin bir yolu da testte uygulanan yük değerinin  $P$  sertlik değerine bölünmesidir (Eş. 6). Aktarılan alanlar kullanılarak ulaşılabilecek  $c^2$  değeri Eş. 5 ve Eş. 6 ile belirlenmektedir.

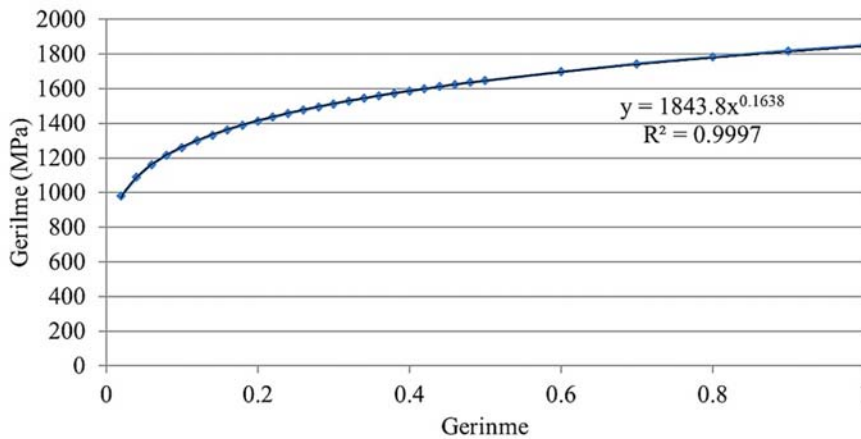
$$c^2 = A_{real}/A_{nom} \quad (5)$$

$$H = P/A_{nom} \quad (6)$$

Bu aşamaya kadar açıklanmış olan eşitlikler esas alındığında, Eş. 3 ile Eş. 6 eşitliğin her iki tarafı birbirine eşitlenebilir. Bunun sonrasında kalıntı gerinmeler  $\varepsilon_{res}$  eşitliğin ilk tarafında toplanı takdirde aşağıda verilen (7) numaralı ifadeye ulaşılabilecektir.

$$\varepsilon_{res} = (P/C\sigma_0 A_{nom})^{1/n} - \varepsilon_{repr} \quad (7)$$

Eş. 5'te görülen  $c^2$  değerine referans niteliğinde bir değere ihtiyaç vardır ve bu değerde kalıntı gerilmelerin olmadığı kabul edilir.  $c^2(\sigma_{res} = 0)$  veya kısaca  $c_0^2$  olarak ifade edilen



Şekil 4. Inconel 625 malzemenin gerilme-gerinme eğrisi ve güç yasası (Calculated stress-strain power law for Inconel 625)

bu değer kalıntı gerilmelerin olmaması ve sonuçta gerçek alan ile nominal alanın eşit olması sebebi ile 1 olarak alınır.  $c^2$  değeri ile tanımlanan mikro girintinin şekillenebilme kabiliyeti, kalıntı gerilmeler dışında elastik özelliklerle de desteklenmelidir ve bu aşamada Johnson [28] tarafından deneysel çalışmalarla desteklenen ilk korelasyon esas alınmış, sonrasında elastik-mükemmel plastik, düzgün akma ve düzensiz akma gösteren çeşitli malzeme gruplarında bu korelasyon geliştirilerek  $c^2$  değerinin kalıntı gerilmeler ve akma gerilmesi ile ilişkisi aşağıdaki Eş. 8 görüldüğü şekilde tespit edilmiştir [25].

$$c^2 = c_0^2 - 0,32 \ln(1 + \sigma_{res}/\sigma(\epsilon_{res})) \quad (8)$$

Eş. 8'de görülen 0,32 katsayısı, korelasyonu yapılan değerlerin yer aldığı logaritmik bir grafikte yakınsaması yapılan doğrusal fonksiyonun eğimini vermektedir. Bu Eş. 8'de  $\sigma_{res}$  ifadesi yalnız bırakıldığında aşağıda verilen Eş. 9 ortaya çıkmaktadır.

$$\sigma_{res} = \sigma(\epsilon_{res})[e^{(c_0^2 - c^2)/0,32} - 1] \quad (9)$$

Son olarak Eş. 9'daki  $\epsilon_{res}$  ifadesi yerine Eş. 7 konulduğunda ve nominal alan için geometrik hesaplama, kenar uzunlukları ( $L_1$  ve  $L_2$ ) açısından iliştilendiğinde aşağıda (10) numara ile ifade edilen nihai kalıntı gerilme hesaplama formülü elde edilmektedir.

$$\sigma_{res} = \left\{ [8P/C\sigma_0 + (L_1 + L_2)^2]^{1/n} - \epsilon_{repr} \right\}^n \left\{ e^{[c_0^2 - 8A_{real}/(L_1 + L_2)^2]} - 1 \right\} \quad (10)$$

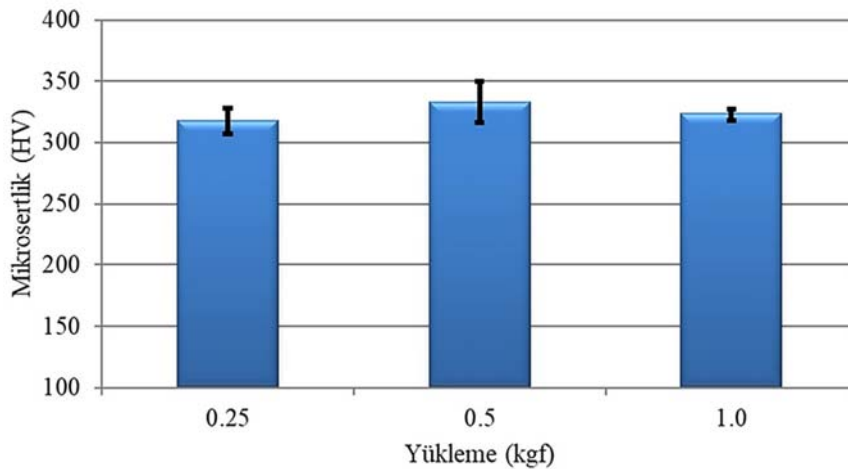
### 2.3. Mikro Girinti Yöntemi ile Test ve Ölçümler. (Measurements Using Micro Indentation Technique.)

Bu makale kapsamında kullanılacak hesaplama yönteminin uygulanması için Bölüm 2.1'de aktarıldığı üzere numunelerin Lazerle Metal Toz Ergitme ile ikincil işlemlerin gerçekleştirilmesi sonrasında mikrosertlik testleri icra

edilmiştir. Mikrosertlik testleri Şekil 2'deki şemada gösterildiği üzere en 50 mm, boy 50 mm ve yükseklik 10 mm olan prizmatik bir numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm bölgeleri belirlenirken Lazerle Metal Toz Ergitme prosesi sonucunda ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin oluşumu dikkate alınmış ve Bölüm 1.2'de de aktarıldığı üzere, özellikle aynı katman düzlemi üzerinde, lazer tarama stratejisine, yoluna ve enerji girdisine bağlı olarak, ani yükselen ve alçalan termal değişim büyüklüklerinin kalıntı gerilmelere etki ettiği değerlendirilmiştir. Bu etkiden kaynaklanan bölgesel ölçüm farklarını en aza indirmek ve seçilen yüzeyde ortalama durumu tespit edebilmek hedeflenmiştir. Buna göre inşa yönüne dik ve prizmatik numune üst yüzeyinde (en 50 mm ve boy 50 mm), köşegen boyunca, köşelere yakın ikişer noktadan ölçümler alınmıştır.

Mikrosertlik testlerinde yükleme değeri olarak sırası ile 0,25 kgf, 0,5 kgf ve 1 kgf olarak 3 seviyede uygulanmıştır. 2 eşit parçaya bölünmüş numuneler üzerinde 2 farklı bölgeye test uygulanmış ve toplamda 12 değer elde edilerek tekrarlanabilirliği ispatlanmıştır (Şekil 5). Tüm yükleme koşulları için ortalama hata oranının 3%'ün altında olduğu deney sonuçları Şekil 5'te görülmektedir.

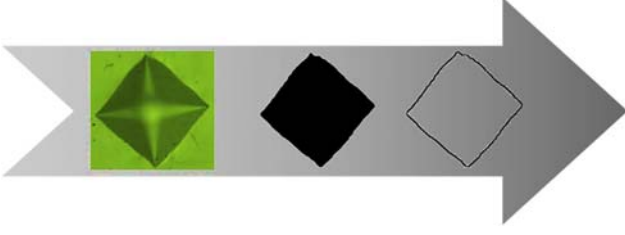
Mikrosertlik değerlerini takiben ışık mikroskobu ile görüntüleri alınan izlerin gerçek alanları ölçülmüştür. Bu amaçlar jpeg (joint photographic experts group) formatında alınan görüntüler WinTopo yazılımına yüklenmiştir. Yüklenen görüntülere sırası ile gri ölçek, karışıklık ve eşik değeri (thresholding) uygulanarak görüntülerdeki arka plan hassas bir şekilde kaldırılmış ve sadece girinti izi bırakılmıştır. Son olarak dış konturundan vektörize edilen görüntülerin iç bölgesinden gerçek alan hesaplanmıştır. Şekil 6'da mikrosertlik iz görüntülerinin vektörizasyonu için temel adımlar görülmektedir. Farklı deneylerde ölçülen alanlardan her yükleme koşulu için ortalama değerler elde edilmiş ve sırası ile 0,25kgf için 0,01714 mm<sup>2</sup>, 0,5 kgf için 0,02647 mm<sup>2</sup> ve 1,0 kgf için 0,0377 mm<sup>2</sup> sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu alanlara denk gelen Vickers uç girinti derinlik değerleri de



Şekil 5. Farklı yükleme değerleri için standart varyasyonlarla birlikte ortalama mikrosertlik değerleri  
(Average microhardness values with standard deviations for different loading scenarios)



CAD (Computer Aided Design) yazılımlarından sırası ile 0,007 mm, 0,011 mm ve 0,015 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 6.** Mikrosertlik iz görüntülerinin vektörizasyonu (Vectorization of micro indentation photos)

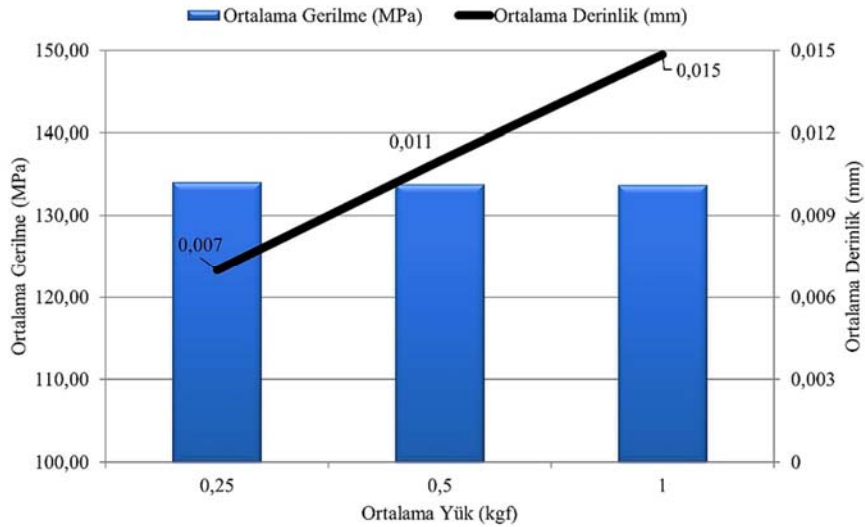
Gerçek alan değerleri ( $A_{real}$ ), yüklemeye değerleri ( $P$ ), Bölüm 2.2’de anlatılan güç yasası gerilme sabiti ( $\sigma_0$ ) ile üs değerleri ( $n$ ) ve Bölüm 2.3’te verilen sertlik sabiti ( $C$ ) ve başlangıç gerinmesi ( $\epsilon_{repr}$ ) değerleri Eş. 10’da yerlerine konularak kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır.

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

Şekil 7’de, LAM ile üretilmiş IN625 numunelerin, mikro girinti ile hesaplanan kalıntı gerilmeleri, yüklemeye ve derinliğe bağlı olarak verilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, yüklemeye değerindeki değişim mikro girinti derinlik değerinde doğrusal eğilime yakın bir artış oluşturmaktadır. Buna göre yüklemeye değeri 0,25kgf’tan 0,5 kgf’a çıktığında derinlik değerinde de iki kata yakın bir artış görülmekte ve 0,007 mm’den 0,011 mm’ye çıkmaktadır. Buna karşın kalıntı gerilme değerlerinde daha az bir değişim olduğu gözlemlenmektedir. Hesaplama yönteminde de görüleceği üzere bu değişimin yüklemeye bağlı olması beklenmemektedir. Çünkü yüklemeye arttığında derinlik artmakta ve derinliğe bağlı olarak da iz alanı genişlemektedir. Dolayısı ile (10) eşitliği denkleme göre yüklemeye değeri ile derinliğe bağlı genişleyen alanın birbirini

yaklaşık olarak nötrleştirmesi olasıdır. Bu durumda kalıntı gerilmelerdeki minör azalmanın sebebi toz yatağında lazerle eklemeli imalatın doğası ile açıklanabilir. Eklemeli imalat ile üretilen yapılar, katman katman inşa edildikleri için, gerek bilimsel çalışmalarda gerekse konu ile ilgili standartlarda anizotropik malzeme davranışları ve özellikleri ile vurgulanmaktadır [29]. Bu kapsamda gerek çekme, gerek sertlik, gerek kalıntı gerilmeler ve gerekse diğer mekanik testlerde numune hazırlama süreçlerinin, tespit edilmesi istenen büyüklüğe uygun yürütülmesi gerekmektedir. Yine aynı standartlar [29] tarafından belirtilen diğer bir husus da raporlamanın da anizotropik özelliklere uygun şekilde yapılmasıdır. Sunulan bu çalışmadaki ölçüm ve raporlamalara da toz yatağında lazerle eklemeli imalatın doğasına uygun olarak yapılmıştır. Literatürdeki diğer araştırmalarla karşılaştırılabilirliği açısından parça üst yüzeyine odaklanılan bu çalışmada, Bölüm 2.1’den de görüleceği üzere 40  $\mu$ m katman kalınlığı ile inşa edilen iki parça numunenin farklı bölgelerindeki kalıntı gerilmeler arasındaki değişkenlik, 0,005 mm - 0,015 mm derinlikleri içerisinde tutarlı bir seviyededir ki, aynı katman kalınlığı içerisinde, aynı parametreler ve aynı tarama stratejisinde üretilen numuneler için tutarsızlık beklenmemektedir.

LAM prosesi sebebi ile oluşan kalıntı gerilmeler üzerine öncül çalışmalar gerçekleştiren araştırmacılara göre, ilgili proses sonucunda oluşan kalıntı gerilmeler parça üst yüzeyinde basma gerilmesi olarak ortaya çıkmakta ve derinlik arttıkça çekme gerilmesine dönüşmektedir [30]. İnşa platformundan kesilmemiş parçalarda ise en sonunda yine basma gerilmesine dönüşme görülebilir. Bunun temel sebebi olarak parça üst yüzeylerine yaklaştıkça ısıtılan malzemelerin termal genleşme baskılarına maruz kalması ve fakat altında bitişik olduğu parçanın engellemesi ile bunların iç plastik gerilmelere dönüşmesidir. Parçanın inşa platformunda ayrılması durumunda bu gerilmelerin gevşeyerek kendilerini şekil değiştirmeye (deformasyona) dönüştürmesi muhtemel olsa da tamamen



**Şekil 7.** Kalıntı gerilmelerin yüklemeye ve derinliğe bağlı değişimi (Variation of residual stresses depending on loading and depth)

sıfırlanamamaktadır ve bunun için ısı işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. AISI 316L paslanmaz çelik malzeme ile yapılan ve kalıntı gerilme ölçümlerinin çatlak ilerleme ile X-ışını kırınımı yöntemleri kullanılarak yapıldığı çalışmada, parça üst yüzeyindeki değerlerin tarama stratejisine bağlı olarak 50-150 MPa arasında değiştiği görülmektedir [30]. Yine Inconel 718 malzeme ile yapılan ve nümerik modellemelerin mikro girinti ile doğrulandığı bir kalıntı gerilme çalışmasında parça üst yüzeyinde 80-110 MPa arasında değişen değerler elde edilmiştir [13]. Son olarak Inconel 625 malzeme ile yapılan, farklı proses parametreleri uygulanan (lazer gücü 125 W, lazer tarama hızı 500 mm/s, tarama mesafesi 0,10 mm ve katman kalınlığı 0,03 mm) ve nötron kırınımı ile ölçüm gerçekleştirilen bir çalışmada kalıntı gerilmelerin parça üst yüzeyinde, ölçüm tarama yönüne göre 150-275 MPa arasında değiştiği raporlanmaktadır [31]. Özellikle ilgili çalışmada kullanılan yüzeysel enerji girdisi 2,5 J/mm<sup>2</sup> değerindedir ve aynı malzemenin mikro girinti tekniği ile incelendiği bu çalışmadaki 2,7 J/mm<sup>2</sup> değerine oldukça yakındır. Son çalışmada basma gerilmesi olarak elde edilen değerlerin parça üst yüzeyinden derinlere indikçe azaldığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede Lazerle Metal Toz Ergitme prosesi ile üretilmiş IN625 parçalarda oluşan kalıntı gerilmeler, yaygın olarak bulunan ve/veya yatırım maliyeti nispeten düşük olan ekipmanların kullanıldığı mikro girinti tekniği ile tespit edilmiştir. Kimyasal kompozisyonu belirli limitler içerisinde olan malzeme için numune üretim parametreleri, eklemeli imalat sonucunda ulaşılacak yoğunluk değerinin, aynı malzemeden konvansiyonel imalat yöntemleri ile üretilmiş muadillerinin 99,9% seviyesine ulaşacak şekilde optimize edilmiştir. Daha sonra ikincil işlemler ve Vickers mikrosertlik testine tabi tutulan malzeme için, yüklem ve iz alanı değerleri ölçülmüş, akma özellikleri hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımları ile çıkartılmış ve mikro girinti denklemleri ile kalıntı gerilme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler ve söz konusu değerlerin derinliğe bağlı değişimleri, literatürde daha önceden farklı yöntemlerle yapılan paslanmaz çelik ve nikel süperalaşımlara kıyaslanabilir sonuçlar ortaya koymuştur. Özellikle inşa platformundan ayrılan numunelerde dikkate değer bir kalıntı gerilme gevşemesi tespit edilmiş, buna rağmen 100-150 MPa arasında basma gerilmesi görülmüştür. Gerilme değerinin derinliğe bağlı azalma eğilimi belirgin bir seviyededir. Bu çalışmanın devamındaki araştırmalarda yöntem aynı malzemenin farklı proses parametrelerine, farklı malzemelere veya farklı metal eklemeli imalat teknolojileri ile üretilmiş yöntemlere uygulanabilir ve ayrıca proses modelleme çalışmalarının doğrulanmasında kullanılması planlanmaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın yazarları, malzeme verilerinin hesaplanmasında kullanılan yazılıma ulaşım imkânı

sağlayan ONATUS Öngörü Teknolojileri Firması'na teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ASTM, I. ASTM F2792-10: Standard terminology for additive manufacturing Technologies, ASTM International, 2010.
2. Yasa, E., Kruth, J. P., Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting, *Procedia Engineering*, 19, 389-395, 2011.
3. Poyraz O., Kushan 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), 699-711, 2018.
4. Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T., Grant, P. V., A Review of Residual Stress Measurement Methods, *Measurement of Residual Stress in Components*, NPL Report, UK, 2002.
5. Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y. Olabi, A. G., Methods of measuring residual stresses in components, *Materials & Design*, 35, 572-588, 2012.
6. Evans, E. B., Residual stresses in processing, *Encyclopedia of Materials Science & Engineering*, 6, 4183-4188, 1986.
7. Littmann, W. E., Measurement and significance of residual macrostress in steel, *SAE 793A, Proc. of the Automatic Eng. Cong.*, 13-17, 1964.
8. Poyraz, Ö., Kuşhan, M. C., Residual Stress-induced Distortions in Laser Powder Bed Additive Manufacturing of Nickel-based Superalloys, *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 65 (6), 2019.
9. Kruth, J. P., Deckers, J., Yasa, E., Wauthlé, R., Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method, *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226 (6), 980-991, 2012.
10. Guo, J., Fu, H., Pan, B., Kang, R., Recent Progress of Residual Stress Measurement Methods: A Review, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019.
11. 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
12. Kuşhan, M. C., Poyraz, Ö., Uzunonat, Y., Orak, S., Systematical Review on the Numerical Simulations Of Laser Powder Bed Additive Manufacturing, *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 36 (4), 2018
13. Wang, X., Chou, Y. K., A method to estimate residual stress in metal parts made by Selective Laser Melting, In *ASME 2015 international mechanical engineering congress and exposition*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015.

14. Tandon, R., Indentation Based Techniques to Measure Residual Stresses in Engineering Ceramics, (No. SAND2013-4342C), Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2013.
15. Larsson, P. L., On the influence of elastic deformation for residual stress determination by sharp indentation testing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (8), 3854-3860, 2017.
16. Ahn, H. J., Kim, J. H., Xu, H., Lee, J., Kim, J. Y., Kim, Y. C., Kwon, D., Directionality of residual stress evaluated by instrumented indentation testing using wedge indenter, *Metals and Materials International*, 23 (3), 465-472, 2017.
17. Pham, T. H., Kim, S. E., Determination of equi-biaxial residual stress and plastic properties in structural steel using instrumented indentation, *Materials Science and Engineering: A*, 688, 352-363, 2017.
18. Breumier, S., Villani, A., Maurice, C., Lévesque, M., Kermouche, G., Effect of crystal orientation on indentation-induced residual stress field: Simulation and experimental validation, *Materials & Design*, 169, 107659, 2019.
19. Zhang, T., Guo, J., Wang, W., A strain-pattern-based spherical indentation method for simultaneous uniaxial tensile residual stress and flow property determination, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 0309324720921305, 2020.
20. EOS material datasheet for Nickel Alloy IN625.
21. Broitman, E., Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview, *Tribology Letters*, 65 (1), 23, 2017.
22. Tsui, T. Y., Oliver, W. C., Pharr, G. M., Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy, *Journal of Materials Research*, 11 (3), 752-759, 1996.
23. Johnson, K. L., The correlation of indentation experiments, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 18 (2), 115-126, 1970.
24. Tabor, D., The physical meaning of indentation and scratch hardness, *British Journal of Applied Physics* 7.5 (1956), 159, 1956.
25. Carlsson, S., Larsson, P. L., On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part I: theoretical and numerical analysis, *Acta Materialia*, 49 (12), 2179-2191, 2001.
26. Carlsson, S., and Larsson, P. L. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part II: experimental investigation, *Acta Materialia*, 49 (12), 2193-2203, 2001.
27. Arasaratnam, P., Sivakumaran, K. S., Tait, M. J., True stress-true strain models for structural steel elements, *ISRN Civil Engineering*, 2011.
28. Johnson, K.L., The correlation of indentation experiments, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 18 (2), 115-126, 1970.
29. ASTM International. F3122-14 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2014. doi: <https://doi.org/10.1520/F3122-14>.
30. Mercelis, P., Kruth, J. P., Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid prototyping journal*, 2006.
31. An, K., Yuan, L., Dial, L., Spinelli, I., Stoica, A. D., Gao, Y., Neutron residual stress measurement and numerical modeling in a curved thin-walled structure by laser powder bed fusion additive manufacturing, *Materials & design*, 135, 122-132, 2017.

