SLM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AlSi10Mg ALAŞIMININ YÜZEY KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Arif Lütfi Özsoy[a], Çağrı Vakkas Yıldırım[b], Murat Sarıkaya[c], Şenol Şirin[d] ve Turgay Kıvak[e]

a, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri/TÜRKİYE, avsararfltf1996@gmail.com
b, Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Kayseri/TÜRKİYE, cvyildirim@erciyes.edu.tr
c, Sinop Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Sinop/TÜRKİYE, msarikaya@sinop.edu.tr
d, Düzce Üniversitesi Gümüşova MYO Makine ve Metal Tekn. Bölümü, Düzce/TÜRKİYE, senolsirin@duzce.edu.tr
e, Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/TÜRKİYE, turgaykivak@duzce.edu.tr

Özet

Eklemeli imalat teknolojisi, geleneksel imalat tekniklerine göre işlenmesi zor ve maliyetli olan karmaşık geometrili parçaların üretiminde önemli gelişmeler sunmaktadır. Buna karşın, çıktı kalitesinin yeterli olup olmadığı sorusu araştırmacıların zihnini meşgul etmektedir. Bu çalışmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının farklı işleme parametreleri kullanılarak frezelendiği bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Böylece, SLM yöntemi kullanılarak yapılan üretim sonrası yüzey kalitesi ile klasik işleme sonrası yüzey kalitesi kıyaslanmıştır. Dahası, işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini göstermek için üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı soğutma/yağlama yöntemi klasik işleme parametresi olarak seçilmiştir. Böylece, farklı parametrelerin yüzey kalitesi üzerindeki etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. Yüzey kalitesinin analiz edilmesi esnasında ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), yüzeylere ait 3D topoğrafya haritaları çıktı olarak kabul edilmiştir. Deney tasarımı esnasında Taguchi L_9 dikey dizini kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli İmalat, NanoMQL, Yüzey kalitesi

IMPROVING THE SURFACE QUALITY OF AlSi10Mg ALLOY PRODUCED BY SLM METHOD

Abstract

Additive manufacturing technology offers significant improvements in the production of parts with complex geometry, which are difficult and costly to process, when compared to conventional manufacturing techniques. On the other hand, the question of whether the output quality is sufficient or not occupies the minds of researchers. In this study, a series of experiments were carried out in which the AlSi10Mg alloy produced by the Selective Laser Melting (SLM) method was milled using different machining parameters. Thus, the post-production surface quality using the SLM method and the conventional post-processing surface quality were compared. Moreover, three different cutting speeds, three different feeds and three different cooling/lubrication methods were chosen as conventional machining parameters to show the effect of machining parameters on the surface quality. Thus, it is aimed to see the effect of different parameters on the surface quality. During the analysis of the surface quality, the average surface roughness (Ra), 3D topography maps were accepted as output. Taguchi L9 vertical array was used during the experimental design.

Keywords: Additive Manufacturing, NanoMQL, Surface quality.

1 Giriş

Eklemeli imalat teknolojisi, kompleks geometriye sahip parçaların bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak modellenmesinden sonra katman katman malzeme eklenerek üretildiği yeni nesil bir üretim yöntemidir [1]. Geleneksel yöntemlere göre, talaş kaldırma, kalıplama, dolu malzemelerden nihai ürün elde etme gibi zaman ve maliyet açısından sorun teşkil edebilecek birçok ek prosedürü ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle, otomotiv ve havacılık gibi kritik sektörler başta olmak üzere birçok sektörde kullanımı giderek artmaktadır [2]. Genel bir üretim

teknolojisinin adı olan eklemeli imalatın birçok yöntemi bulunmaktadır. Bunların en önemlilerinden biri olan SLM yöntemi, lazer ışınını kullanarak haznesinde yer alan tozların ergitilmesi ve CAD dosyası halindeki profilin katman katman malzeme eklenerek üretilmesi prensibine göre çalışmaktadır [3]. SLM yöntemi yeni bir imalat yöntemi olması nedeniyle birçok avantajı olduğu gibi dezavantajları da bünyesinde barındırmaktadır. Örneğin, yüzey kalitesi henüz klasik imalat yöntemiyle elde edilen yüzey kalitesi seviyesine ulaşamamıştır [4]. Bununla ilgili literatürde birçok çalışma da yer almaktadır. Örneğin; Lizzul ve ark. [5] SLM ile üretilen numunelerde yüzey pürüzlülük değerinin oldukça yüksek olduğunu söylemişlerdir. Khaliq ve ark. [6] SLM ile üretilen numunelerin yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olduğunu söylemişler ve yüzey kalitesini artırmak için mikro frezeleme yapmışlardır. Khorasani ve diğ. [7] SLM ile üretilen titanyum numunelerde yüzey kalitesinin düşük olduğunu söylemişler ve iyileştirme için ikincil bir imalat prosesi kullanmışlardır. Liu ve ark. [8] SLM ile üretilen numunelerde yüzey kalitesinin düşük olduğunu söylemişler ve iyileştirmek için ikincil bir proses olarak kumlama yöntemini tercih etmişlerdir. Araştırmacılar, bu ikincil prosesin sonunda yüzey pürüzlülüğünün %80 azalma gösterdiğini söylemişlerdir. SLM yöntemiyle üretilen ve havacılık-uzay çalışmalarında tercih edilen malzemelerden biri de AlSi10Mg alaşımıdır [9].

AlSi10Mg alaşımı, yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyi mekanik özellikleri, hafifliği, yüksek korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle havacılık ve otomotiv sektöründeki üreticilerin yoğun başvurduğu malzemelerden biridir [10]. Bu sektörlerde kullanılan malzemeler için yüzey kalitesi önemli bir parametredir. Literatür özetinde de görüldüğü üzere SLM ile üretilen malzemelerin yüzey kalitesi henüz istenilen seviyede değildir. Bu nedenle, alışılmış veya alışılmamış imalat yöntemlerini ikincil bir proses olarak kullanmak ve böylece yüzey kalitesinin artırılması şu an için çıkar yol olarak görülmektedir. Bu çalışmada da ikincil proses olarak frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, klasik işlemede yüzey kalitesini artırmak için başvurulan yöntemlerden biri de kesme sıvısı kullanımıdır. Ancak, klasik kesme sıvılarının çevre, çalışan sağlığı ve üretim maliyetleri üzerindeki olumsuz etkisi artık bilinen bir durumdur. Bu nedenle araştırmacılar alternatif soğutma/yağlama yöntemlerinin arayışına girmişlerdir. Bu alternatiflerden biri de minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemidir. MMY sisteminin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini gösteren birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Örneğin; Çaydaş ve diğ. [11] çalışmalarında AISI 52100 rulman çeliğini tornalamışlar ve kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar deneyler esnasında kuru ve MMY işleme şartının çıktılar üzerindeki etkisine de bakmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar MMY sisteminin yüzey kalitesini iyileştirdiğini iddia etmişlerdir. Kurşuncu ve Yaraş [12] AISI O2 çeliğini frezelerken kuru ve MMY şartlarını karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarını inceleyen araştırmacılar MMY sisteminin yüzey kalitesi üzerinde iyileştirme sağladığını söylemişlerdir.

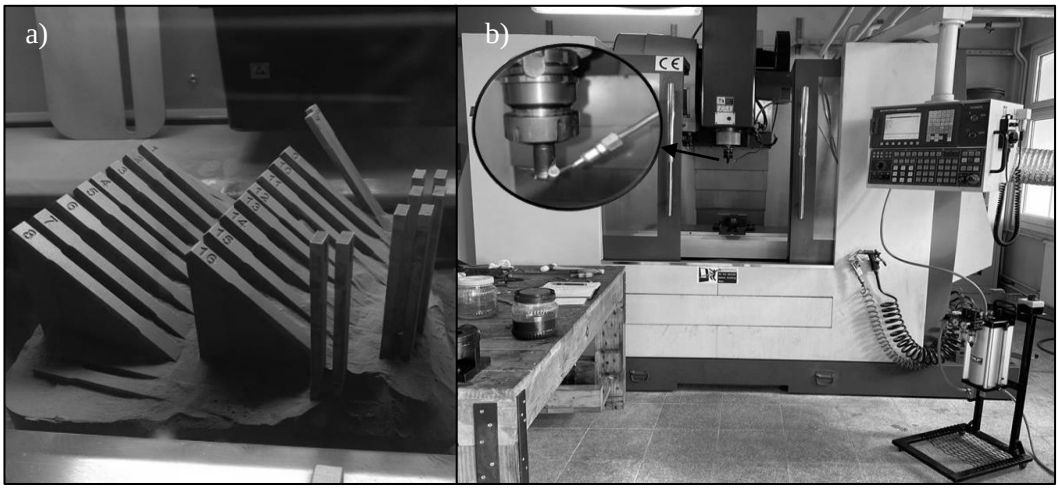
Yukarıda verilen literatür özetlerinde de görüldüğü üzere, eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey kalitesi henüz istenilen seviyede değildir. Yüzey kalitesini iyileştirmek için bazı araştırmacılar ikincil bir prosesin etkili olabileceğini iddia etmişlerdir. Bu çalışmada da benzer bir düşüncenin ürünü olarak, SLM yöntemiyle elde edilen numuneler frezeleme işlemine tabi tutulmuş ve yüzey kalitelerindeki değişim incelenmiştir. Dahası, işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için üç kesme hızı, üç ilerleme ve üç işleme şartının giriş parametresi olarak kullanıldığı bir dizi deney yapılmıştır. Zamandan ve maliyetten tasarruf edebilmek için deney sayısı azaltılmış ve bunun için Taguchi L_9 dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Çalışmaya ait malzeme, metot ve sonuçların analizi aşağıda başlıklar halinde detaylı olarak verilmiştir.

2 Materyal ve Metot

Deneylerde SLM yöntemi aracılığıyla üretilen AlSi10Mg alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Deney numunelerinin üretilmesi için 400W Ytterbium (Yb) fiber tek-lazer sistemine sahip ve Concept Laser firmasına ait M2 CUSING eklemeli imalat makinesi kullanılmıştır. Numunelerin üretimi Ar (Argon) gazı atmosferinde yapılmıştır. Deney numunesine ait SLM parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Frezeleme deneylerinde kesici takım ve takım tutucu olarak Sandvik firmasından temin edilen R300-1032-KL H13A kaplamasız karbür kesici uç ve R300-025A20-10M kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Frezeleme deneyleri esnasında maksimum devir sayısı 10000 dev/dak olan DELTA SEIKI CNC-1050 A marka CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. SLM numunelerinin üretimi ve frezeleme deneylerine ait görüntüler Şekil 1'de sunulmuştur.

Parametre	Değerler
Lazer Gücü (W)	370
Tarama Hızı (mm/s)	1400
Tarama Mesafesi (mm)	0.112
Spot Genişliği (µm)	190
Katman Kalınlığı (µm)	50

Tablo 1: AlSi10Mg alaşımının üretilmesi için kullanılan SLM parametreleri.



Şekil 1: a) SLM yöntemiyle deney numunelerinin üretimi, b) frezeleme deneylerine ait görüntü

Farklı işleme koşullarının test edildiği deneylerin gerçekleştirilmesi esnasında kuru, saf MMY ve nano MMY sistemi işleme şartı olarak kullanılmıştır. MMY sistemi olarak SKF firmasına ait Vario model yağlayıcı sistem kullanılmıştır. Kesme yağı olarak yine SKF firmasına ait mineral esaslı kesme yağı kullanılmıştır. Nano MMY sisteminde katı yağlayıcı olarak molibden disülfür (MoS_2) hacimce %0.6 oranında eklenmiştir. MoS_2 katkı maddesine ait teknik özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Nanoakışkan hazırlanırken ilk etapta, kesme yağının içerisine eklenmiştir ve topaklanmayı önlemek için basit bir karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra Daihan marka ve HS-100D modeline sahip mekanik karıştırıcı ile 750 rpm hızında 1 saat karıştırılmıştır. Son aşamada ise manyetik bir karıştırıcı olan Termal marka ve N11151M modeline sahip manyetik karıştırıcı ile 1500 rpm'de 2 saat karıştırılmış ve hazır hale getirilmiştir. Çökelme olmaması için karışımlar bekletilmeden kullanılmıştır.

Renk	Siyah
Ortalama Çap (nm)	80
Saflık (%)	99.90
Yoğunluk (g/cm^3)	4.80

Tablo 2: MoS_2 katı yağlayıcıya ait teknik özellikler.

Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi için Mahr Marsurf PS 10 taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi ISO 4287 standardına uygun olarak yapılmıştır. İşleme yönünde baştan, ortadan ve sondan olmak üzere üç ölçüm yapılmış ve bunların ortalaması alınarak Ra değeri kaydedilmiştir. Ayrıca, yüzeylerin 3D yüzey topoğrafyası alınarak pürüzlülük ve dalgalılıkların üç boyutlu analizi yapılmıştır. Bu işlem esnasında Phase View optik profilometre kullanılmıştır.

3 Deney Tasarımı

SLM yöntemiyle üretilen deney numunelerinin frezelenmesi esnasında zaman ve maliyeti düşürmek adına Taguchi L_9 dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Frezeleme deneylerine ait işleme parametreleri Tablo 3'te

sunulmuştur. Sabit değerlerin belirlenmesinde literatür bilgisi, araştırmacıların önceki çalışmaları ve ön deneyler etkili olmuştur.

MMY Kesme Yağı	Siyah
Soğutma/Yağlama Şartları	Kuru, Saf MMY, Nano MMY
Debi (ml/h)	75
Basınç (bar)	8
İlerleme, f (mm/dev)	0.05-0.15-0.25
Kesme Hızı, Vc (m/dak)	200-300-400
Kesme Derinliği, (mm)	0.5

Tablo 3: Frezeleme işlemine ait deney parametreleri.

Bu çalışmada, frezeleme deneyleri sonrasında elde edilen Ra değerleri için optimizasyon işlemi yapılmıştır. Deneylerin sonunda en küçük ortalama yüzey pürüzlülüğü istendiğinden Taguchi'nin S/N değerlerini tanımlamak için kullandığı kriterlerden biri olan "en küçük en iyi" yaklaşımı kullanılmış ve Eşitlik 1'deki formül ile hesaplanmıştır.

$$SIN = -10.\log\left\{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y^n\right\} \quad (1)$$

4 Deney Sonuçlarının Analizi

SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının frezelenmesi sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve bunlara ait S/N oranları Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 5'te ise faktörlere ait S/N yanıt tablosu verilmiştir. Tablo 5'e göre her girdi faktörünün en yüksek değeri ilgili faktöre ait optimum sonucu veren seviyeyi göstermektedir. Ayrıca, ortalama yüzey pürüzlülüğüne ait S/N değerleri grafiği Şekil 2'de verilmiştir.

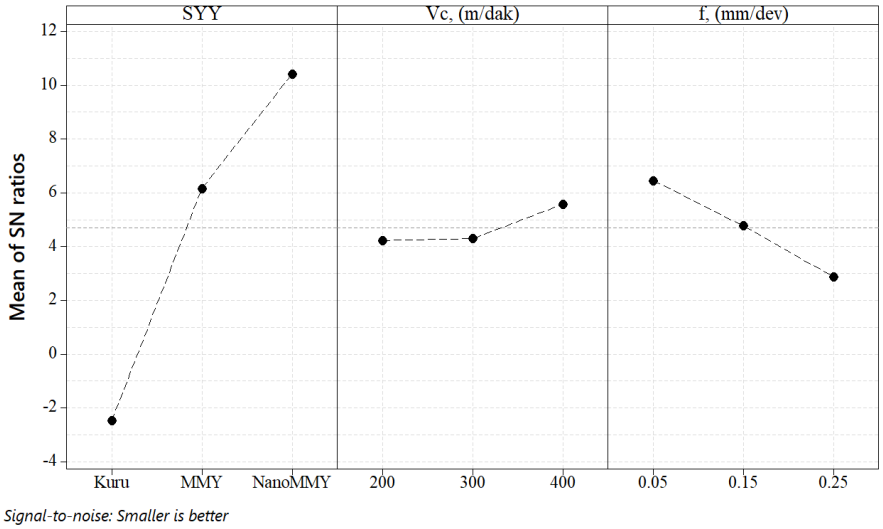
Deney No	**SYY**	**Kesme Hızı** ***Vc, (m/dak)***	**İlerleme** ***f, (mm/dev)***	**Ra** ***(µm)***	**S/N Oranı** ***(dB)***
1	Kuru	200	0.05	1.247	-1.9173
2	Kuru	300	0.15	1.529	-3.6881
3	Kuru	400	0.25	1.231	-1.8052
4	MMY	200	0.15	0.428	7.3711
5	MMY	300	0.25	0.691	3.2104
6	MMY	400	0.05	0.402	7.9155
7	Nano MMY	200	0.25	0.434	7.2502
8	Nano MMY	300	0.05	0.214	13.3917
9	Nano MMY	400	0.15	0.294	10.6331

Tablo 4: Deney sonuçları ve S/N değerleri.

Seviyeler	**SYY**	**Kesme Hızı** ***Vc, (m/dak)***	**İlerleme** ***f, (mm/dev)***
Seviye 1	-2.470	4.235	**6.463**
Seviye 2	6.166	4.305	4.772
Seviye 3	**10.425**	**5.581**	2.885
Delta	12.895	1.346	3.578

Tablo 5: Deney sonuçlarına ait S/N yanıtları.

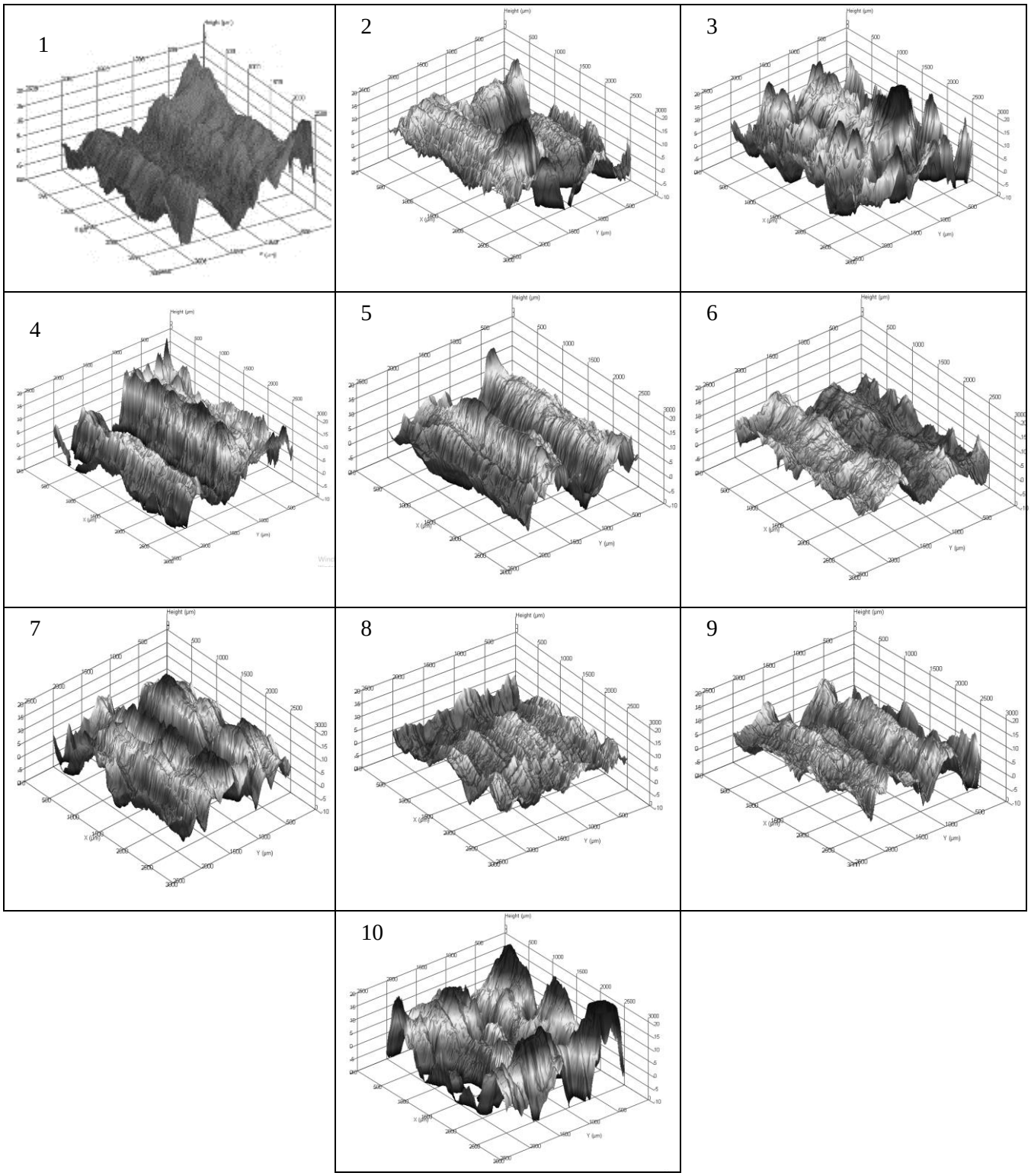
Tablo 5 ve Şekil 2 incelendiğinde optimum sonucu veren parametre grubunun nano MMY sistemi, 400 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme değeri olduğu görülmektir. Frezeleme öncesi numunenin Ra değeri 2.341 µm olarak ölçülmüştür. Optimum değeri veren parametre grubu ile yapılan frezeleme deneyi sonucunda Ra değeri 0.2 µm seviyesine kadar iyileştirilmiştir. Bu durum ikincil işlemin gerekliliği noktasında önemli kanıtlar sunmaktadır.



Şekil 2: Ortalama yüzey pürüzlülüğü için S/N oranları ortalama değerleri.

Frezeleme işlemindeki parametre grubunu kendi içinde değerlendirmek gerekirse, soğutma yağlama yönteminde en iyi sonucu nano MMY sisteminin verdiği görülmektedir. Kesme sıvısının kullanılması ile takım-talaş-iş parçası arayüzeylerinde sürtünmenin azaldığı ve buna bağlı olarak kesmenin efektif hale geldiği bilinen bir durumdur. Burada da benzer bir etkinin olduğu düşünülmektedir. Bir başka durum ise kesme hızının artması ile yüzey kalitesinin iyileşmesidir. Kesme hızının artması kesme bölgesinde ısının artması ile ilişkilendirilmektedir. Kesme bölgesindeki ısının artması ile kesme bölgesinin yumuşadığı ve buna bağlı olarak daha rahat bir kesme yaptığı düşünülmektedir. Kesici takımın kesme kabiliyeti devam ettiği sürece bu durum olumlu sonuçlar doğurabilmektedir. Şekil 2'de verilen bir diğer bilgi ise en düşük ilerleme değerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu vermesidir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ilerlemenin bir fonksiyonudur ve ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı bilinen bir durumdur [13]. Bu çalışmadaki sonuç da bu durumla ilişkilendirilmiştir. Şekil 3'te frezeleme yapılmış ve yapılmamış numunelere ait 3D yüzey topoğrafyası verilmiştir. 3D yüzey topoğrafyalarında ölçek -10 ile 20 µm arasında sabit tutulmuştur. Şekil 3'teki dizilim Tablo 4'teki deney sıralamasına göre yapılmıştır. 10 numaralı grafik frezeleme işlemine tabi tutulmamış, SLM sonrası Ra ölçüm sonucunu vermektedir.

Şekil 3 incelendiğinde, 3D yüzey topoğrafyası Tablo 4'te verilen deney sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği görülmektedir. 3D yüzey topoğrafyasındaki tepe ve vadi şekilleri Ra değerlerini destekler niteliktedir. Frezeleme işlemi ile yüzey pürüzlülük değerinde iyileşme olduğu açıktır. İşleme parametreleri açısından değerlendirme yapıldığında ise, ölçüm sonuçları ile paralelliğin devam ettiği görülmektedir. Kuru işlemede derin vadiler ve yüksek tepeler göze çarparken kesme sıvısının kullanılmasıyla birlikte düzensiz farklılıklar azalmış ve daha düzenli bir hale gelmiştir. Nano MMY sisteminin kullanılmasıyla beraber tepe-vadi farkının daha düşük olduğu yüzeyler elde edilmiştir. Özellikle 8 numaralı deneyde (NanoMMY, 300 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme) daha düz bir yüzey elde edilmiştir. Bu da işleme parametrelerinin etkinliğini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 3: Frezelenmiş ve frezelenmemiş yüzeylere ait 3D topoğrafya haritaları.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının üretim sonrası ve frezeleme sonrası yüzey pürüzlülük değerleri araştırılmıştır. Çalışmaya ait sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- SLM ile üretilen deney numunelerinin yüzey kalitesi frezeleme operasyonu ve parametrelerinin değişimine bağlı olarak gelişmiştir.

- Kesme sıvısının devreye girmesiyle birlikte yüzey kalitesi gelişim göstermiştir ve soğutma/yağlama yöntemi açısından en iyi sonucu nano katkı maddesinin kullanıldığı nanoMMY yöntemi vermiştir.
- Kesme hızının artması ile yüzey kalitesi gelişmiştir.
- İlerlemenin artması ortalama yüzey pürüzlülük değerinin de artmasına neden olmuştur. Bu çalışma özelinde, ilerleme açısından en iyi Ra değerini 0.05 mm/dev ilerleme değeri vermiştir.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünde optimum sonucu nanoMMY, 400 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme kombinasyonu vermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje kodu: FYL-2021-10915)

6 Kaynakça

[1] Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., Kruth, J. P., 2012, "Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting", Physics Procedia, vol. 39, pp. 439-446.
[2] Karabulut, Y., Tascioglu, E., Kaynak, Y., 2019, "Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing", Optik, vol. 221, pp. 163907.
[3] Boschetto, A., Bottini, L., 2019, "Manufacturability of non-assembly joints fabricated in AlSi10Mg by selective laser melting", Journal of Manufacturing Processes, vol. 37, pp. 425-437.
[4] Karabulut, Y., Kaynak, Y., 2020, "Drilling process and resulting surface properties of Inconel 718 alloy fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing", Procedia CIRP, vol. 87, pp. 355-359.
[5] Lizzul, L., Sorgato, M., Bertolini, R., Ghiotti, A., Bruschi, S., 2020, "Influence of additive manufacturing-induced anisotropy on tool wear in end milling of Ti6Al4V", Tribology International, vol. 146, pp. 106200.
[6] Khaliq, W., Zhang, C., Jamil, M., Khan, A. M., 2020, "Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti–6Al–4V under dry and MQL conditions", Tribology International, vol. 151, pp. 106408.
[7] Khorasani, A. M., Gibson, I., Goldberg, M., Littlefair, G., 2018, "A comprehensive study on surface quality in 5-axis milling of SLM Ti-6Al-4V spherical components", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 94(9), pp. 3765-3784.
[8] Liu, A., Chua, C. K., Leong, K. F., 2010, "Properties of test coupons fabricated by selective laser melting", In Key Engineering Materials vol. 447, pp. 780-784.
[9] Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., Everitt, N. M., 2016, "The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment", Materials Science and Engineering: A, vol. 667, pp. 139-146.
[10] Mfusi, B. J., Mathe, N. R., Tshabalala, L. C., Popoola, P. A., 2019, "The effect of stress relief on the mechanical and fatigue properties of additively manufactured AlSi10Mg parts", Metals, vol. 9(11), pp. 1216.
[11] Çaydaş, U., Kuncan, O., Çelik, M., 2017, "AISI 52100 rulman çeliğinin işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve sıcaklık kriterlerine göre araştırılması", Politeknik Dergisi, cilt 20, sayı 2, ss. 409-417.
[12] Kursuncu, B., Yaraş, A., 2017, "AISI O2 çeliğinin frezelenmesinde minimum miktarda yağlama (MQL) sisteminin kesme performansına etkisi", Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, cilt 5, sayı 2, ss. 125-128.
[13] Öndin, O., Kıvak, T., Sarıkaya, M., Yıldırım, Ç. V., 2020, "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel", Tribology International, vol. 148, pp. 106323.