



Experimental comparison of flow peening GOV and abrasive flow machining AFM processes on Ti-6Al-4V aviation material

Kürşad Göv^{1*}, Murat Kalak²

¹Department of Aerospace Engineering, Faculty of Aerospace, Gaziantep University, 27310, Gaziantep, Türkiye

²Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering and Architectural, Erzurum Technical University, 25050, Erzurum, Türkiye

Highlights:

- Newly developed surface finishing processed based on AFM and shot peening
- Comparison of surface improvements cut by electrical discharge machining (EDM)
- Chipless surface finishing by GOV process contrary to AFM

Keywords:

- GOV process
- AFM
- Aerospace material (Ti-6Al-4V)
- White layer
- Surface roughness

Article Info:

Research Article

Received: 06.03.2023

Accepted: 09.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1261067

Correspondence:

Author: Kürşad Göv
e-mail: gov@gantep.edu.tr
phone: +90 342 360 1200

Graphical/Tabular Abstract

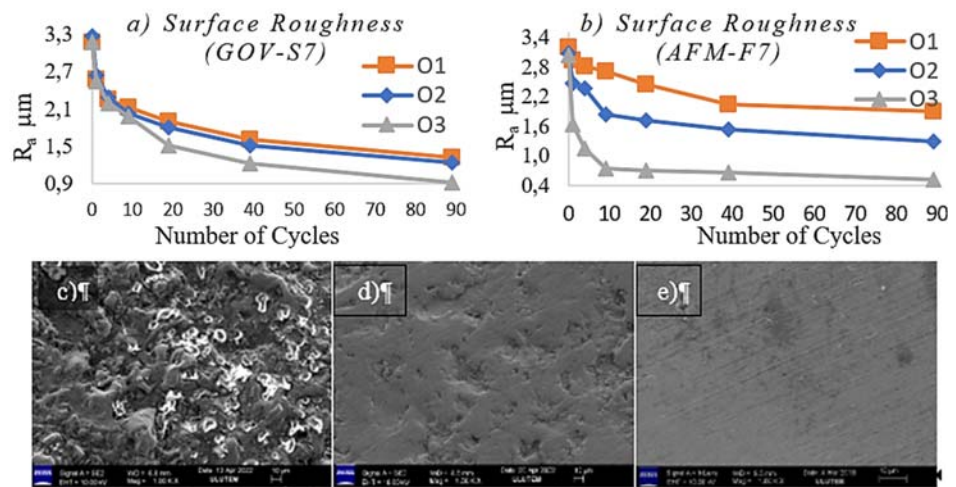


Figure A. Values of R_a performed with S7 and F7 mesh sizes (A and B), EDM surface (c), surface treatment in the GOV process (d) and AFM (e)

Purpose: In this study compares the performance parameters of the GOV (flow peening) process, developed based on the abrasive flow machining (AFM) and shot peening processes, with the AFM process. The aim of the study is to increase the surface quality of Ti-6Al-4V with AFM and GOV processes.

Theory and Methods: By bringing the advantages of surface quality of AFM and strength improvement of the shot peening process together, GOV (flow peening) process has been developed. By adding steel balls of specified grain sizes to polymeric material in percentage of 15, 30 and 45 respectively, media is prepared as volumetric for GOV process. For AFM process, by adding abrasives (silicon carbide) of three mesh size to polymeric material in percentage of 20, 40 and 60, media is prepared as massic. In total, 9 media ratios were prepared for each process. Through the surface of Ti-6Al-4V, these prepared medias are forced in two directions under high pressure. As a result of the pre-liminary studies, the number of process cycles were determined as 1, 4, 9, 19, 39 and 89.

Results: In this study, GOV and AFM process were applied to Ti-6Al-4V workpiece and following findings were obtained:

The best surface roughness R_a value was decreased from 3.17 μm to 0.92 μm by GOV process and from 3.03 to 0.53 by AFM process. The material removal was obtained 3.7 mg by GOV process and 1989.15 mg (Figure A) by AFM process from the workpiece surface which was supported by the SEM images. Materials removal amount equals to undesired white layer formed due to nature of EDM. It is verified that white layer was removed with no excess chip removal and surface roughness was decreased by GOV process contrary to AFM.

Conclusion: GOV process combines the surface improvement by decreasing surface roughness and almost removing undesired white layer (a detrimental result of metal cutting operation) without excess chip removal contrary to AFM. The material removal obtained by the GOV process removing only the white layer from the material surface by breaking method compared to the AFM process. The GOV process can be used to improve surface quality without any excess chip removal.



Akışla dövme GOV ve aşındırıcı macunla işleme AMİ proseslerinin Ti-6Al-4V havacılık malzemesinde deneysel kıyaslanması

Kürşad Göv^{1*}, Murat Kalak²

1Gaziantep Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye
2Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Elektro erozyon işleme ile (EEİ) kesilen Ti-6Al-4V iş parçalarının yüzey iyileştirmelerinin kıyaslanması
- Aşındırıcı macun ile işleme (AMİ) ve bilyeli dövme dayalı yeni geliştirilmiş yüzey bitirme işlemi
- AMİ prosesinin aksine akışla dövme (GOV) işlemiyle talaşsız yüzey bitirme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.03.2023

Kabul: 09.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1261067

Anahtar Kelimeler:

GOV proses,
aşındırıcı macun ile işleme
(AMİ),
havacılık malzemesi (Ti-6Al-
4V), beyaz katman,
yüzey pürüzlülüğü (Ra)

ÖZ

Ti-6Al-4V malzemesi sahip olduğu yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık mukavemeti ve mükemmel korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay sektöründen medikal sektörüne kadar nitelikli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçak türbin kanatçığı, uçak yapısal bileşenleri ve roket motoru gibi geniş kullanım alanına rağmen işlenmesi, üretilmesi ve yüzey iyileştirilmesi geleneksel yöntemler ile zor bir malzemedir. Bu ve benzeri işlenmesi zor malzemelerin istenilen yüzey kalitesini elde etmek için aşındırıcı macunla işleme (AMİ) ve bilyeli dövme işlemleri gibi geleneksel olmayan yüzey işleme yöntemleri kullanılmaktadır. AMİ prosesinin yüzey bitirme ve bilyeli dövme işleminin basma yönünde artık gerilme oluşturma kabiliyetlerinin birleştirilmesi ile yeni geliştirilen akışla dövme (GOV) prosesi, elektriksel tel erozyonla kesilerek hazırlanmış Ti-6Al-4V malzemesinde deneysel kıyaslamalı çalışılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalitesi, malzeme kaldırma miktarı ve beyaz katman tabakasının kalınlığını değerlendirmek için GOV ve AMİ işlem parametrelerinin, malzeme yüzeyi üzerindeki etkileri incelenmiştir. GOV prosesinde en iyi yüzey pürüzlülüğü R_a 0,92 μm ve malzeme kaldırma miktarı 3,6 mg olarak, AMİ işleminde ise bu değerler R_a = 0,53 μm ve 1989,15 mg olarak elde edilmiştir. GOV işlemi, daha az talaş kaldırarak yüzey kalitesini iyileştirirken, AMİ işlemi çok daha fazla talaş kaldırarak GOV işlemindeki yüzey kalitesine ulaşmaktadır.

Experimental comparison of flow peening GOV and abrasive flow machining AFM processes on Ti-6Al-4V aviation material

HIGHLIGHTS

- Comparison of surface improvements of Ti-6Al-4V workpieces cut by electrical discharge machining (EDM)
- Newly developed surface finishing processes based on abrasive flow machining (AFM) and shot peening
- Chipless surface finishing by flow peening (GOV) process contrary to AFM

Article Info

Research Article

Received: 06.03.2023

Accepted: 09.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1261067

Keywords:

GOV process,
abrasive flow machining
(AFM),
aerospace material (Ti-6Al-
4V), white layer,
surface roughness (Ra)

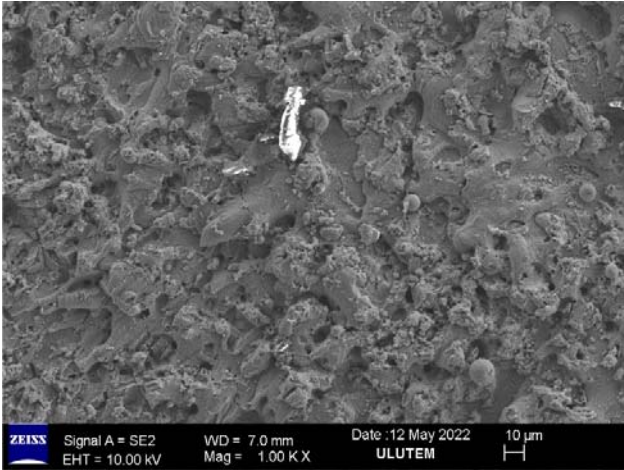
ABSTRACT

Ti-6Al-4V finds place from aerospace applications to medical industry due to its superior mechanical features such as high strength, low density, high temperature strength and excellent corrosion resistance. Despite its wide usage applications such as aircraft turbine blades, aircraft structural components and rocket engines, it is a difficult material to machine, manufacture and surface treatment with traditional methods. Non-traditional finishing and surface treatment methods namely abrasive flow machining (AFM) and shot peening processes are applied to obtain desired surface quality for Ti-6Al-4V and difficult to cut materials. The newly developed flow peening (GOV) process, which has the surface finishing capability of the AFM and the compressive residual stress generation capability of the shot peening process together, has been experimentally compared in Ti-6Al-4V workpieces pre-prepared by wire electric discharge cutting machine. The effects of GOV and AFM process parameters on material surfaces were investigated to evaluate the surface roughness, surface quality, material removal amount and white layer thickness. The best surface roughness value, R_a was obtained 0.92 μm and the highest amount of chip removed from the surface was 3.6 mg by GOV process while these values were 0.53 μm and 1989.15 mg by AFM. While the GOV process improves the surface quality by removing less amount of chip, the AFM process reaches approximate surface quality of GOV process by removing excess chip.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *gov@gantep.edu.tr, murat.kalak@erzurum.edu.tr / Tel: +90 342 360 1200

1. Giriş (Introduction)

Teknolojideki gelişmeler, endüstriyel ve akademik alandaki uygulamalar için yeni araştırmaları beraberinde getirmiştir. Yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık mukavemeti ve mükemmel korozyon direncine sahip yüksek performanslı malzemelere olan talebin artması [1-4], geleneksel olmayan imalat ve yüzey işleme yöntemlerinin geliştirilmesi için yeni araştırma faaliyetlerini gerektirmektedir. Havacılık, uzay, denizcilik ve tıp endüstrileri çoğunlukla bu araştırma faaliyetlerine odaklanmaktadır. Günümüzde yüksek mukavemete sahip olan Ti-6Al-4V alaşım malzemesi türbin kanatları, roket motorları ve uzay araçları gibi havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır [5-7]. Ti-6Al-4V malzemesi zayıf termal iletkenliği [8], işleme sırasında yüzeyde sıcaklık artışı [9], kesici takımında kullanımında yüksek aşınma [10, 11] ve ayrıca yüksek sertlik gibi olumsuz özellikleri bu malzemenin geleneksel yöntemler ile işlenmesini zorlaştırmaktadır [12, 13]. İmalat yöntemi, malzemelerin mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [14]. Titanyum ve İnkoneel gibi kesilmesi zor malzemelerin işlenmesinde ileri imalat yöntemlerinden elektro erozyon ile işleme (EEİ) metodu yaygın kullanılmaktadır [15-17]. EEİ di-elektrik bir sıvı ortamında, elektrot ve iş parçası arasında ardışık şekilde tekrar eden elektrik boşalımı neticesinde malzeme yüzeyinden mikro talaş kaldırılma yöntemidir [18-20]. Talaş kaldırma, elektrotun iş parçasına teması olmadan kıvılcım ile gerçekleşmektedir [21-23]. EEİ metodu ile işleme sırasında çok kısa bir süre içerisinde yüksek sıcaklık (7000°C-12000°C) açığa çıkmaktadır [24]. Bu ani sıcaklık artışı ile iş parçası yüzeyi erimekte ve sonrasında ani soğuma ile yeniden katılaşmaktadır [25]. Bu ani ısı değişimi iş parçası yüzeyinde istenilmeyen mikro çatlaklar, kraterler ve kabarcıklar ihtiva eden beyaz görünüme sahip kırılğan bir yapı oluşturmaktadır (Şekil 1) [26, 27]. Bu beyaz tabaka üzerinde bulunan mikro çatlaklar, malzeme yüzeyinden iç tabakalara doğru ilerleyerek ana malzemede çatlaklar oluşturmakta ve malzemenin mukavemetinin düşmesine ve servis ömrünün azalmasına sebep olmaktadır [28]. Bu nedenle yüzey bitirme yöntemleri ile beyaz katman tabakası giderilerek malzemenin yüzey kalitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir [18, 29-31].



Şekil 1. EEİ sonrası Ti-6Al-4V yüzeyinde oluşan beyaz tabaka (White layer formed on the surface of Ti-6Al-4V after EDM)

Yüzey bitirme işlemlerinde mikro çatlaklar [32] ve mikro çatlaklarında bulunduğu beyaz katman tabakası yüzeyden kaldırılarak çatlak ilerlemesi ve çentik etkisi ortadan kaldırılmaktadır [33]. İmalat sanayinde üretimin son aşaması olarak bilinen geleneksel yüzey bitirme işlemleri lebleme, honlama, taşlama ve benzeri proseslerdir

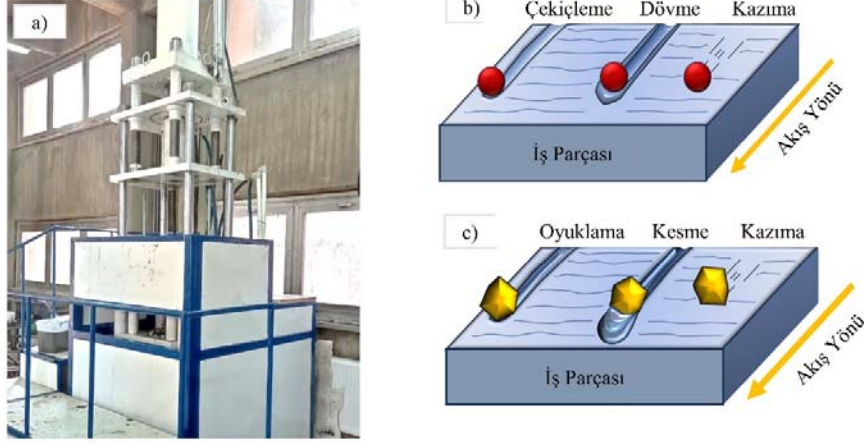
[34]. AMİ işlemi, dünyada ve ülkemizde yakın tarihlerde kullanılmaya başlanılan ileri yüzey bitirme yöntemlerinden biridir [35-38]. Ekstrüzyon honlama işlemi olarak da adlandırılan bu işlem, taşıyıcı polimere eklenen aşındırıcı parçacıkların yüksek basınç altında iş parçası yüzeyine uygulanması ve yüzey boyunca akması ile mikro ölçekli talaş kaldırma prensibine dayanmaktadır [39, 40]. AMİ işlemi, diğer geleneksel yüzey bitirme işlemlerinden farklı olarak ulaşılmaya zor yüzeyler ve karmaşık geometriler için uygundur [41]. Bu işlem, istenen yüzey kalitesini elde etmek için aynı yüzey üzerinden aşındırıcı macunun belirlenen çevrim sayısından basınçlı akıtılarak gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre AMİ ile elde edilen yüzey kalitesinin geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir [42]. Bilyeli dövme gibi diğer geleneksel tekniklerinde ise yüzey ve yüzey altı katmanlarında artık basma gerilmeleri oluşturularak yüzey mukavemeti artırılmaktadır [43, 44]. Bilyeli dövme, makine elemanları için en sık uygulanan yüzey mukavemetini artırma işlemlerinden biridir. Yüksek hızla yüzeye fırlatılan farklı boyuttaki bilyeler, yüzeyde küresel ezilmelere neden olmaktadır [45, 46] ve aynı zamanda yüzeyin üzerinde ve hemen altında bir nano-tanecik (nano-grain) tabakası oluşturarak iş parçası yüzeyinde basma tipinde artık gerilme oluşumuna sebep olmaktadır [47, 48]. Bu süreçte yüzeye doğru bombardımana tutulan yüzlerce bilye aynı anda yüzeye rastgele çarpması sonucu yüzeyde rastgele gamzeler (dimple) şeklinde oyuklar oluşturmakta ve yüzey pürüzlülüğünde bozulmalara sebep olmaktadır [49]. Basma yönünde elde edilen yüksek miktardaki artık gerilme nedeniyle de malzemenin dayanımında önemli bir miktarda artış meydana gelirken [50, 51], yüzey kalitesinin düşmesiyle malzemenin yorulma ömrü ve nispeten mukavemeti azalmaktadır [52]. Alt yüzeyde basma artık gerilmeleri nedeniyle oluşan mukavemet artışı, yüzey pürüzlülüğü nedeniyle oluşan mukavemet azalmasından daha fazla olduğundan, bilyeli dövme işlemi malzemenin yorulma ömrünün artmasına neden olmaktadır [53]. Bu değerlendirmelere göre, AMİ prosesinin yüzey bitirme kabiliyeti ile bilyeli dövme işleminin basma tipinde artık gerilme oluşturma kabiliyeti GOV proses [54] olarak adlandırılan tek bir proseste birleştirilmiştir [55-59]. Bu işlemde AMİ için kullanılan polimerik taşıyıcıya çelik bilyeler ilave edilerek hazırlanan macun, yüksek basınç altında malzemelerin yüzeyinden akıtılarak yüzey iyileştirilmesi gerçekleştirilmektedir. AMİ işleminde ise keskin kenarlı aşındırıcılar kullanılmaktadır. AMİ metodunun mikro işleme özelliği sayesinde beyaz tabakanın yanı sıra malzemenin alt yüzeyleri ve ana malzemeden de talaş kaldırılmaktadır. Ancak GOV prosesinde talaşlı imalat yerine ana malzeme ve alt yüzeyler malzeme yüzeyinden kaldırılmadan, sert ve kırılğan olan beyaz katman tabakası kırılarak malzeme yüzeyinden uzaklaştırılmaktadır. Şekil 2'de deneyler sırasında kullanılan AMİ tezgâhı verilmiştir. GOV işlemi basınçlı uygulanan macundaki çelik bilyeler marifetiyle yüzey kalitesini iyileştirirken, AMİ işleminde yüzeyden mikro talaş kaldırılarak yüzey iyileştirilmektedir (Şekil 2b).

Bu çalışmada, havacılık ve diğer birçok alanda kullanılan Ti-6Al-4V malzemesine AMİ ve GOV prosesleri deneysel olarak çalışılmış ve sonuçları kıyaslamalı ortaya konulmuştur. Kıyaslanan deney parametreleri; yüzey pürüzlülüğü, malzeme kaldırma, beyaz katman kalınlığı olarak belirlenmiş ve yüzey incelemeleri için SEM görüntüleri kullanılmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

2.1. Aşındırıcı Macunlar (Abrasive Medias)

Deneylerde kullanılan macunlar her iki yöntem için de en önemli parametredir. AMİ metodunda polimerik taşıyıcı malzeme içerisinde çeşitli aşındırıcı tipleri (silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al₂O₃), bor karbür (B₄C) ve elmas tozları) eklenerek istenilen



Şekil 2. a) GOV işlem tezgâhı b) GOV işleminde çelik bilyelerle, c) AMİ işleminde aşındırıcılarla yüzey bitirme (a) GOV setup, b) surface finishing with steel balls in GOV process, c) with abrasives in AFM process) [60]

oranlarda AMİ macunları elde edilebilmektedir. GOV proses için polimerik taşıyıcı malzeme içerisine istenilen oranda ve farklı tane boyutundaki çelik bilyeler karıştırılarak deney macunu elde edilmektedir. Bu deneysel çalışmada AMİ işlemi için silisyum karbür (SiC) aşındırıcı tipi tercih edilmiştir. Polimerik malzemeye, 400, 240 ve 180 elek boyutlarında silisyum karbürler (Tablo 1) eklenerek kütleli olarak %20, %40 ve %60 oranlarında, toplamda dokuz farklı çeşit AMİ deney macunu çalışma için hazırlanmıştır.

GOV proses işleminde, bilyeli dövme işlemi için piyasada bulunan 170 (0,4 mm), 280 (0,7 mm) ve 390 (1,0 mm) tane boyutlarındaki (Tablo 2) çelik bilyeler polimerik malzemeye eklenerek, %15, %30 ve %45 hacimsel oranlarında toplamda dokuz çeşit GOV proses macunu çalışma için hazırlanmıştır. Çelik bilyelerin öz kütlesi, AMİ aşındırıcısından çok yüksektir. Kütleli olarak yapılan karışımda %25'lik bir oran sonucu elde edilen macun analiz edilmiş ve bilyelerin hacim içindeki yoğunluğu %2,8 olduğu görülmüştür. Bu durum akış esnasında bilyelerin yüzeye temasının oldukça seyrek ve işlem performansının da zayıf olmasına sebep olduğu için, AMİ işleminden farklı olarak GOV proste macun hazırlanırken kütleli oran yerine hacimsel oran kullanılmıştır. GOV proses uygulaması için %15, 30 ve 45'lik hacimsel oranlardaki macun karışımları belirlenmiştir.

Tablo 1. Silisyum karbürlerin tane ve elek boyutları (Grain and mesh sizes of silicium carbide)

Standart (FEPA)	Tane boyutu (μm)	Elek boyutu	Kısaltma
F400	8-32	400	F3
F240	28-70	240	F5
F180	53-90	180	F7

Tablo 2. Çelik bilyelerin tane ve elek boyutları (Grain and mesh sizes of steel balls)

Standart (SAE)	Tane boyutu (μm)	Elek boyutu	Kısaltma
S3	400	170	S3
S5	700	280	S5
S7	1000	390	S7

2.2. İş Parçaları (Workpiece Materials)

Mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay sanayisinde sıklıkla kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tel erozyon işleme ile 5x10x20 mm ebatlarında hizmet alımı ile iş parçaları hazırlanmıştır (Şekil 3). Ti-

6Al-4V malzemesinin kimyasal bileşimi, Tablo 3'de verilmiştir. Numunelerin deneyler öncesi markalama ile numaralandırılma yapılmıştır.



Şekil 3. Ti-6Al-4V iş parçası (5x10x20 mm) (Workpiece of Ti-6Al-4V(5x10x20mm))

Tablo 3. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %) (Chemical composition of Ti-6Al-4V in wt. %) [61]

Element	Fe	O	N	C	H	Al	V	Ti
Maksimum	0,25	0,2	0,05	0,08	0,015	6	4	Denge

Numune sayıları ve ölçüleri GOV proses ve AMİ metodu için numune tutucu geometrisine göre belirlenmiştir. Numunelerin ağırlık, yüzey pürüzlülük ve beyaz katman kalınlığı değerleri GOV ve AMİ işlemlerinden önce ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Numuneleri deneyler sırasında sabitlemek için çoklu numune tutucusu kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın güvenilirliğini sağlamak için belirlenen işlem döngüsü sayısına ulaşan numune çıkarılarak yerine atıl numuneler yerleştirilmiştir.

2.3. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Yazar tarafından 2011 yılında tasarımı ve üretimi yapılarak, patenti alınmış olan iki yönlü AMİ makinesi deneysel çalışmalarda GOV prosesi için de adapte edilerek kullanılmıştır. Düzenek iki adet ana hidrolik piston, çene açma-kapama hareketi için 4 yardımcı piston, üst ve alt macun haznesi silindirleri, macun viskozitesini sabit tutmak için bir soğutma ünitesi, çalışma kontrolü için kullanılan bir elektronik kontrol paneli, bir hidrolik üniteden ve çoklu numune tutucusundan oluşmaktadır.

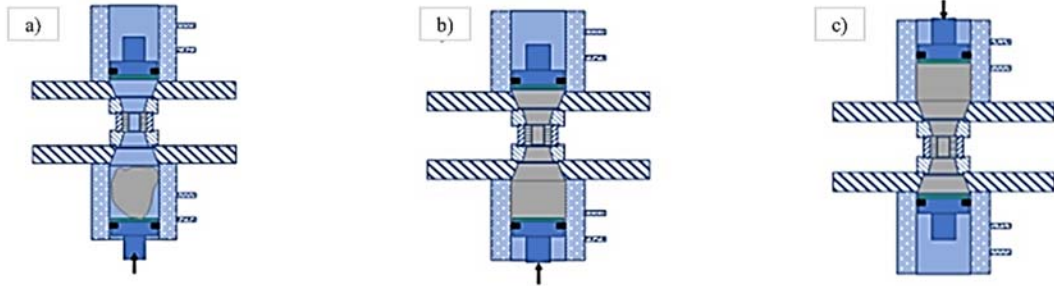
2.4. Deneysel Prosedürü (Experimental Procedure)

Deneysel çalışmada, macunlar düzeneğin alt kısmında bulunan silindirik haznesine doldurularak tek yönlü ve çift yönlü olarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 4 (a)'da gösterildiği gibi çoklu numune tutucusu çenelerin kenetlenmesiyle sabitlendikten sonra işlem, alt macun haznesi silindirikte başlatılır. Daha sonra Şekil 4b'de gösterildiği gibi macun, numunelerin yüzeyinden yüksek basınç altında alttaki macun haznesinden üstteki macun haznesine doğru akıtılır. Son olarak üst silindirik macun haznesinden, alt silindirik macun haznesine doğru hareket eder (Şekil 4c). Bu yukarı ve aşağı hareket, bir tam çevrim olarak adlandırılır. Yapılan ön çalışmalar sonucunda işlem çevrim sayıları 1, 4, 9, 19, 39 ve 89 olarak belirlenmiştir. AMİ ve GOV proseslerinde her döngü sayısı için, tek bir numune kullanılmıştır.

GOV proses işlemi için macunda kullanılan 0,4, 0,7 ve 1,0 mm bilye boyutları deneysel prosedürde sırasıyla S3, S5 ve S7 olarak belirlenmiştir. Ayrıca polimerik taşıyıcıya çelik bilyelerin eklenmesiyle elde edilen %15, %30 ve %45 hacimsel oranları sırasıyla O1, O2 ve O3 olarak belirlenmiştir. Deneylere önce %15 macun oranı ile başlanmış, daha sonra %30 macun oranı ile devam edilmiştir. Sırayla 9 farklı macun oranı (S3O1, S3O2, S3O3, S5O1, S5O2, S5O3, S7O1, S7O2, S7O3) Tablo 4'te gösterilmiştir.

S5O2, S5O3, S7O1, S7O2, S7O3), Tablo 4'te gösterildiği gibi deneylerde kullanılmıştır. AMİ işlemi çalışmaları için silisyum karbür aşındırıcılar polimerik malzemeye eklenerek elde edilen macun, AMİ düzeneğinin alt silindirik macun haznesine yerleştirilir. Ti-6Al-4V alaşım numuneleri, iş parçası tutucusuna yerleştirilerek, yüksek basınç altında çalışacak şekilde döngülere başlatılır. Ön çalışmalar sonucu belirlenen döngü sayıları GOV proses ile aynıdır (1, 4, 9, 19, 39 ve 89). Döngü sayısını tamamlayan numune, tutucudan çıkarılır. Deneyin sağlıklı bir şekilde devam edebilmesi için çıkarılan numune yerine atıl durumdaki bir numune yerleştirilir. Polimerik malzemeye 3 farklı tane (elek) boyutunda (400, 240 ve 180) silisyum karbürler eklenerek, toplamda 9 farklı macun oranı elde edilmiştir. Her numune belirlenen macun oranı ve döngü sayısında deneysel çalışmaya tabi tutulmuştur. Belirlenen döngü sayılarında çalışılmıştır.

AMİ metodu işlemi için macunda kullanılan 400, 240 ve 180 elek boyutları deneysel prosedürde sırasıyla F3, F5 ve F7 olarak belirlenmiştir. Ayrıca polimerik malzemeye silisyum karbürlerin eklenmesiyle elde edilen %20, %40 ve %60 kütleli macun oranları sırasıyla O1, O2 ve O3 olarak belirlenmiştir. Deneylere önce %20 macun oranı ile başlanmış ve diğerleri ile devam edilmiştir. Sırayla 9 farklı macun oranı (F3O1, F3O2, F3O3, F5O1, F5O2, F5O3, F7O1, F7O2, F7O3) Tablo 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Bir tam çevrimin döngüsü (a), (b) ve (c) (One complete cycle (a), (b) and (c))

Tablo 4. GOV proses deney planı ve numunelerin sayısı (GOV process experimental layout and number of specimens)

	Çelik Bilye Boyutu (mm)	Macun Oranları	Deneysel İsmi	Döngü Sayısı	Toplam Numune
Ti-6Al-4V için GOV proses	S3 (0,4)	O1 (%15)	S3O1	1,4,9,19,39,89	6
		O2 (%30)	S3O2	1,4,9,19,39,89	6
		O3 (%45)	S3O3	1,4,9,19,39,89	6
	S5 (0,7)	O1 (%15)	S5O1	1,4,9,19,39,89	6
		O2 (%30)	S5O2	1,4,9,19,39,89	6
		O3 (%45)	S5O3	1,4,9,19,39,89	6
	S7 (1,0)	O1 (%15)	S7O1	1,4,9,19,39,89	6
		O2 (%30)	S7O2	1,4,9,19,39,89	6
		O3 (%45)	S7O3	1,4,9,19,39,89	6
Total					54

Tablo 5. AMİ proses deney planı ve numunelerin sayısı (AFM process experimental layout and number of specimens)

	Tane Boyutu	Macun Oranları	Deneysel İsmi	Döngü Sayısı	Toplam Numune
Ti-6Al-4V için AMİ proses	F3 (400)	O1 (%20)	F3O1	1,4,9,19,39,89	6
		O2 (%40)	F3O2	1,4,9,19,39,89	6
		O3 (%60)	F3O3	1,4,9,19,39,89	6
	F5 (240)	O1 (%20)	F5O1	1,4,9,19,39,89	6
		O2 (%40)	F5O2	1,4,9,19,39,89	6
		O3 (%60)	F5O3	1,4,9,19,39,89	6
	F7 (180)	O1 (%20)	F7O1	1,4,9,19,39,89	6
		O2 (%40)	F7O2	1,4,9,19,39,89	6
		O3 (%60)	F7O3	1,4,9,19,39,89	6
Total					54

Macun, malzemenin yüzeyinden geçerken yüksek basınç ve sürtünmenin etkisiyle sürekli ısınma eğilimi göstermektedir. Bu durum macunun viskozitesinin düşmesine neden olmakta ve proses performansını olumsuz etkilemektedir. Macun viskozitesini 10 PaS 'ta tutmak için soğutma ünitesi marifetiyle macun sıcaklığı 14°C'de tutulmuştur. Deneysel çalışmada macun basıncı 6 MPa ve proses hızı ise 6 l/dk olarak sabit tutulmuştur. Önceki çalışmalar [58] dikkate alınarak döngü sayısı en fazla 89 olarak belirlenmiştir.

İki proste de iş parçaları her işlem döngüsü tamamlandıktan sonra tutucudan çıkarılmıştır. Deney tamamlandıktan sonra numuneler etil alkol ve basınçlı hava ile temizlenerek ölçüm aşamasına hazır hale getirilmiştir. Her bir numune, 0,1 mg hassasiyete sahip bir Shimadzu Aux 220 hassas terazi kullanılarak yüzeyden kaldırılan malzeme miktarının karşılaştırılması için GOV ve AMİ işlemlerinden önce ve sonra tartılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü R_a , ölçümleri, macun akış yönüne dik olarak 1,0 mm aralıkla ve 0,8 mm cut-off uzunluğu ile Mitutoyo SJ 401 profil ölçer ile ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerinin ortalaması hesaplanmış ve sonuçların karşılaştırılması için grafiksel olarak verilmiştir. Yüzey kalitesi incelemelerinde ZEISS gemini field emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

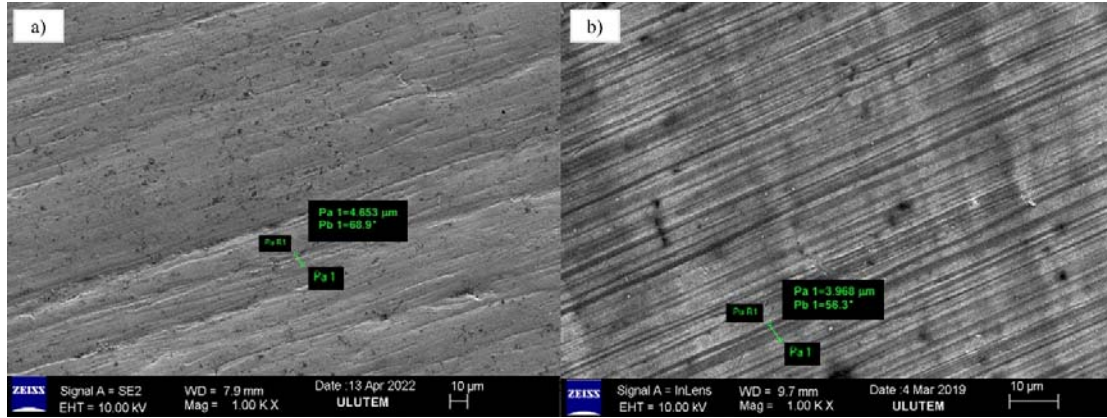
3.1. Yüzey İncelemeleri (Surface Observations)

Bu çalışmalarda temel amaç Ti-6Al-4V malzemesi yüzeyindeki beyaz katmanın (Şekil 1) iş parçası yüzeyinden kaldırılarak, GOV ve AMİ işlemleri ile pürüzsüz ve daha kaliteli yüzeyler elde etmektir. Daha

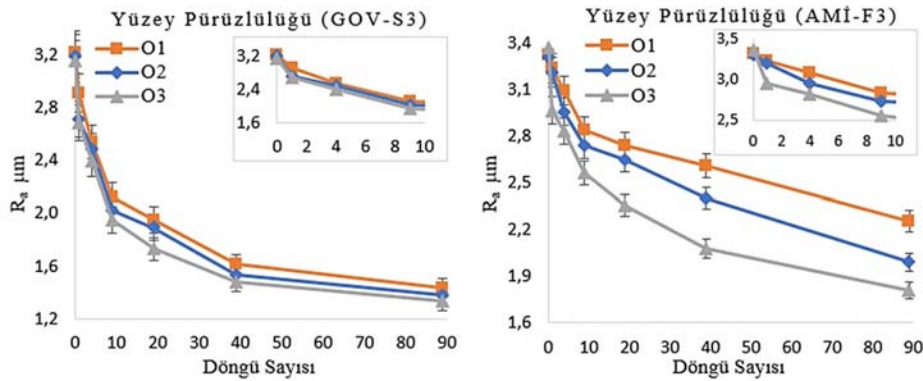
sonra bu iki metodun sonuçlarını birbiriyle karşılaştırarak, yüzey bitirme proseslerinde yeni bulgulara ulaşmaktır. Genel değerlendirmeler dikkate alındığında döngü sayısı arttıkça numunelerin yüzeyindeki beyaz katmanın kaldırılmasıyla daha düzgün yüzey elde edildiği görülmektedir. GOV ve AMİ proseslerinin kıyaslanması için belirlenen tane boylarının gerçekçi ve kabul edilebilir olması için ön denemelerden elde edilen SEM görüntüleri incelenmiştir. Farklı tane boyutlarına sahip aşındırıcı ve çelik bilyelerin iş parçası yüzeyinde oluşturdukları işleme patikaları ve bu patikaların genişlikleri karşılaştırılarak aşındırıcı ve çelik bilye tane ölçülerine karar verilmiştir. Bu bağlamda, S7 bilye boyutu deneyleri sonucunda yüzeyler incelendiğinde, çelik bilyeler Ti-6Al-4V malzemenin yüzeyinde Şekil 5a'daki SEM görüntüsünde görüldüğü üzere 4,653 μm genişliğinde temas yüzeyi (contact area) oluşturmuştur. AMİ işleminde, F7 tane boyutlu deneylerinde kullanılan silisyum karbür aşındırıcılar ise malzeme yüzeyinde 3,968 μm genişliğinde işlem temas yüzeyi oluşturmuştur Şekil 5b. Deneysel olarak elde edilen bilgilere dayanarak, GOV prosesindeki S7 tane boyutuyla gerçekleştirilen deneyleri, AMİ prosesindeki F7 tane boyutları ile gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla mukayese etmek uygun olacağı değerlendirilmiştir. S3 ve S5 tane boyutlarını sırasıyla F3 ve F5 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırılabileceği kanaatine varılmıştır.

3.1.1. S3 ve F3 tane boyutları deneyleri (Experiments of S3 and F3 mesh sizes)

Yüzey pürüzlülüğü R_a değeri, S3O1 ve F3O1 macun oranları için Şekil 6'de görüldüğü gibi sırasıyla GOV proses işleminden önce 3,22 μm ve AMİ prosesinden önce 3,32 μm olarak ölçülmüştür. 89 GOV



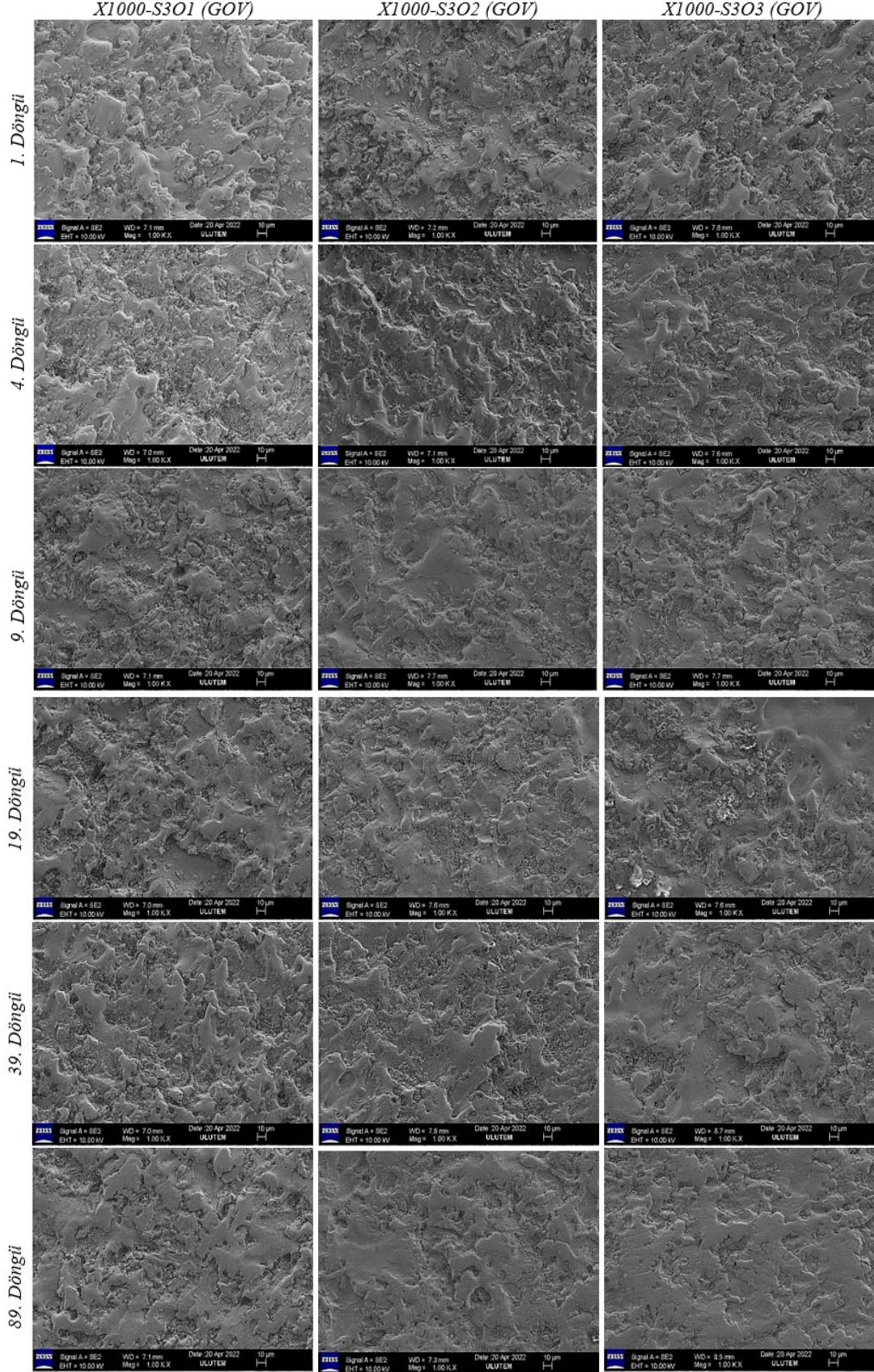
Şekil 5. a) S7 bilye ve b) F7 aşındırıcı tane boyutlarının temas yüzeyleri (Contact areas of S7 ball (a) and F7 abrasive mesh size (b))



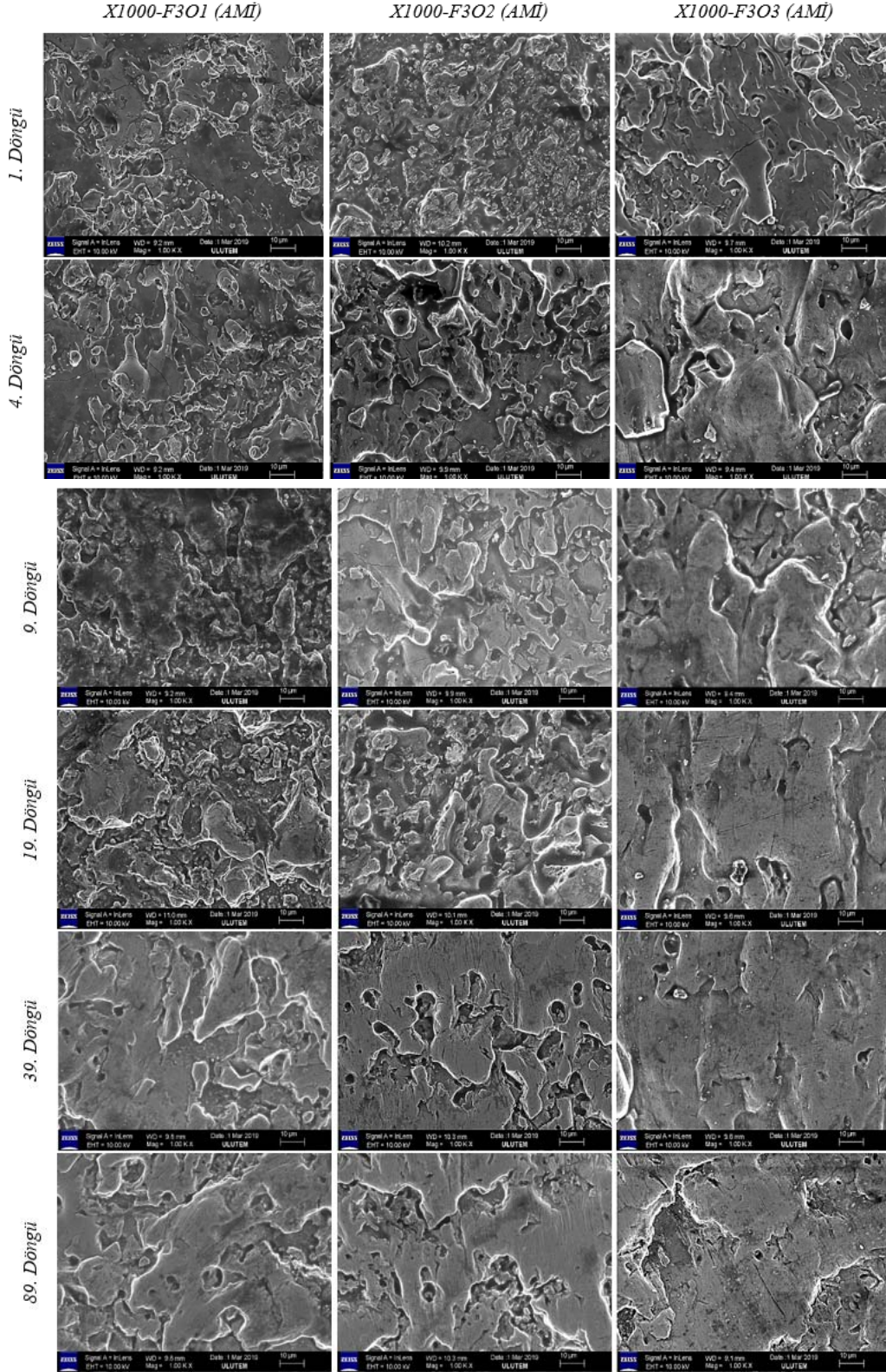
Şekil 6. S3 ve F3 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen R_a değerleri (Values of R_a performed with S3 and F3 mesh sizes)

ve AMİ işlem döngüsü sonucunda yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 1,43 µm ve 2,26 µm olarak ölçülmüştür. İki prosenin SEM görüntülerinde (Şekil 7 ve Şekil 8) 89 döngü sonunda beyaz tabakanın

tam olarak kaldırmadığı, sadece beyaz tabakanın piklerinin kaldırdığı görülmektedir. S3 bilye ve F3 aşındırıcı boyutları bu çalışmada kullanılan en küçük ve ince tane boyutlarına sahip



Şekil 7. GOV prosesi sonrası S3 bilye boyutunun O1, O2, O3 oranları için SEM görüntüleri (SEM images of S3 ball size for O1, O2, O3 ratios after GOV process)



Şekil 8. AMİ proses sonrası F3 aşındırıcı boyutunun O1, O2, O3 oranları için SEM görüntüleri (SEM images of F3 abrasive size for O1, O2, O3 ratios after AFM process)

olduğundan, S3O1 ve F3O1 macun oranlarında gerçekleştirilen deneylerde beyaz tabakanın yüzeyden tamamen uzaklaştırılması için

döngü sayısı artırılarak deneylere devam edilmesi gerekmektedir. Aynı deneyler GOV prosesinde S3O2 ve S3O3, AMİ prosesinde

F3O2 ve F3O3 macun oranları için tekrarlanmıştır. 89 işlem döngü sayısında S3O2 ve F3O2 macun oranları için yüzey pürüzlülüğü, R_a değerleri sırasıyla 1,38 μm ve 1,99 μm olarak elde edilmiştir. Bu macun oranları, 89 işlem döngüsünde beyaz katman tamamen yüzeyden uzaklaştırılmamıştır. Fakat macun konsantrasyonu arttığı için S3O1 ve F3O1 macun oranlarında elde edilen yüzey pürüzlüklerinden daha kaliteli yüzeyler elde edilmiştir (Şekil 7 ve Şekil 8). S3O3 macun oranı deneyinde yüzey pürüzlülüğü R_a değeri 89 işlem döngüsü sonunda 3,15 μm 'den 1,33 μm 'ye düşmüştür. AMİ prosesinde ise F3O3 macun oranı deneylerinde yüzey pürüzlülüğü R_a değeri 89 işlem döngüsü sonunda 3,37 μm 'den 1,81 μm 'ye düşmüştür. S3 ve F3 deney setlerinde en iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri bu deneyler sonucunda elde edilmiştir. Beyaz katman, S3O3 ve F3O3 için artan macun konsantrasyonu nedeniyle diğer macun oranlarına (S3O1, S3O2, F3O1 ve F3O2) kıyasla 19 işlem döngüsünde pikleri kaldırılmıştır. S3 ve F3 deney setleri için, S3O3 ve F3O3 macun oranları diğerlerine göre yüzey pürüzlülüğünde en iyi performansı göstermiştir. Şekil 6'de GOV proses için ilk 9 işlem döngüsüne kadar ve AMİ prosesinde ilk 39 işlem döngüsüne kadar yüzey pürüzlülük değerinde keskin düşüş yani yüzey kalitesinde artış elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 7 ve Şekil 8'da sunulan S3 ve F3 numunelerinden alınan SEM görüntüleri 89 işlem döngüsünde beyaz tabakanın piklerinin tamamen ortadan kaldırıldığı görülmüştür.

3.1.2. S5 ve F5 tane boyutları deneyleri (Experiments of S5 and F5 mesh sizes)

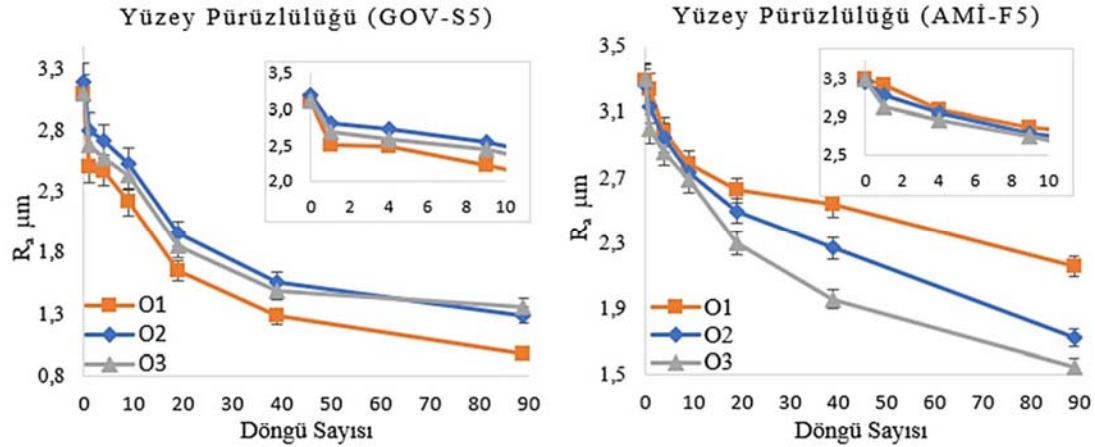
Ti-6Al-4V malzemesi için S3 ve F3 deney setleri tamamlandıktan sonra S5 deney setleri (S5O1, S5O2 ve S5O3) ve F5 deney setleri (F5O1, F5O2 ve F5O3) için çalışmalara devam edilmiştir. S5 ve F5 tane boyutları, S3 ve F3 tane boyutlarından daha büyük ve kabadır. Bu nedenle beyaz katman tabakası daha erken kaldırıldığı için yüzey pürüzlülük değerlerinde önceki deneylere göre daha hızlı ve etkili gerçekleşmiştir. 89 işlem döngüsü sonucunda S5O2 ve S5O3 macun oranlarında sırasıyla 1,29 μm ve 1,36 μm yüzey pürüzlülük R_a değerleri elde edilirken, S5O1 macun oranında 0,98 μm değerinde en düşük yüzey pürüzlülük değeri GOV proses için ölçülmüştür (Şekil 9). AMİ prosesi için 89 işlem döngüsü sonunda F5O1 ve F5O2 macun oranlarında sırasıyla 2,16 μm ve 1,72 μm yüzey pürüzlülük R_a değerleri ölçülürken, F5O3 macun oranında 1,55 μm değerinde en düşük yüzey pürüzlülük R_a değeri elde edilmiştir (Şekil 9). S5 deney setlerinin tüm deneysel sonuçları dikkate alındığında, 89 işlem döngüsünde SEM görüntülerinde verilen S5O1 macun oranı için yüzey pürüzlülüğünün 3,11 μm 'den 0,98 μm 'ye azalması ile en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir (Şekil 10). Bu macun oranının (%15) S5 deney setleri için en uygun olduğu görülmektedir. AMİ prosesinde 89

işlem döngüsü sonunda F5O3 macun oranı için yüzey pürüzlülüğünün 3,30 μm 'den 1,55 μm 'ye azalması ile en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Şekil 11'de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde bu yüzeyin en iyi yüzey kalitesine sahip olduğunu desteklemektedir. AMİ prosesi için ise F5O3 macun oranının (%60) F5 deney setleri için en uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

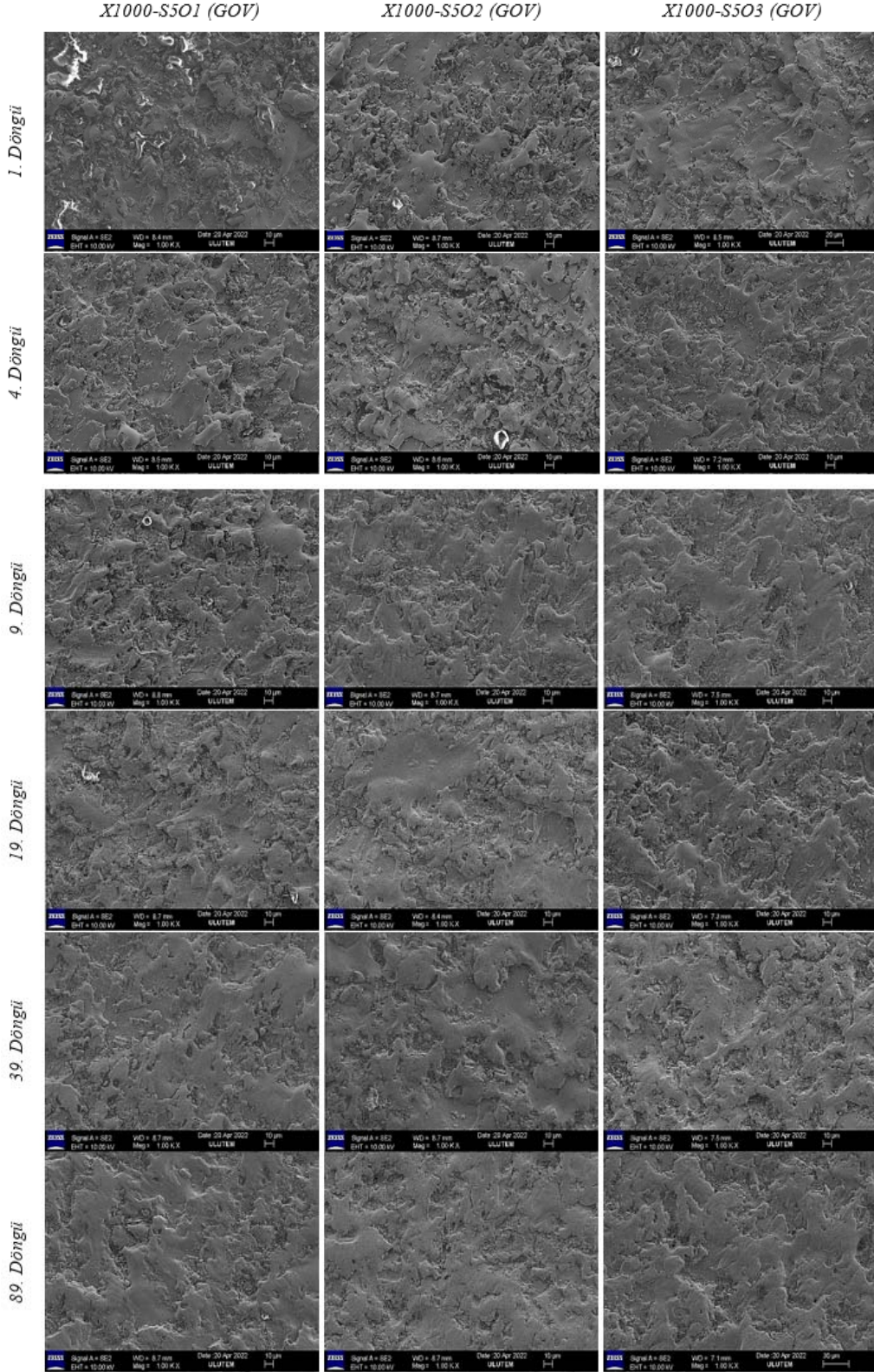
Deney sonuçları, Şekil 9'de gösterildiği gibi GOV prosesinde ilk 19 işlem döngüsüne kadar yüzey pürüzlülük R_a değerinin keskin bir şekilde düştüğünü göstermektedir fakat AMİ prosesinde sürekli malzeme yüzeyinden talaş kaldırıldığından bu keskin düşüş döngü sayısı arttıkça azalarak devam etmektedir. Bunun sonucunda yüzey kalitesi artırılmak istenen malzemenin fazla döngü sayılarında tolerans dışına çıkması olasıdır. Bu durum GOV prosesinde, AMİ işlemine göre yüzeyden sadece beyaz katmanın kırılarak uzaklaştırılması şeklinde gerçekleştiği için döngü sayısının artması malzemenin formunda değişiklik meydana getirmemektedir. Malzeme yüzeyindeki beyaz katman tabakası, GOV ve AMİ proseslerinde işlem döngü sayısı arttıkça kademeli olarak malzeme yüzeyinden kaldırılmıştır.

3.1.3. S7 ve F7 tane boyutları deneyleri (Experiments of S7 and F7 mesh sizes)

Tane boyutu 1,0 mm olan en büyük çelik bilyeler (S7) (Tablo 2) ve en iri tane boyutuna sahip aşındırıcılar (F7) (Tablo 1) GOV ve AMİ deney setlerinde farklı oranlarda kullanılmıştır. S7O1, S7O2 ve S7O3 için sırasıyla hacimsel olarak %15, %30 ve %45 macun oranları ve F7O1, F7O2 ve F7O3 için sırasıyla kütleli olarak %20, %40 ve %60 macun oranları hazırlanmıştır. GOV prosesinde elde edilen deneysel sonuçlara göre Ti-6Al-4V malzemesi için en iyi yüzey pürüzlülüğü R_a değerinin (Şekil 12) 89 işlem döngüsü sonunda S7O3 için %45 macun oranında elde edilmiştir. S7O3 deney seti için en düşük yüzey pürüzlülük değeri 0,92 μm iken, S7O1 ve S7O2 deneyleri için sırasıyla 1,32 μm ve 1,24 μm yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. GOV prosesi ile gerçekleştirilen tüm deneysel sonuçlar göz önüne alındığında, 89 işlem döngüsü sonunda S7O3 macun oranında elde edilen değer (0,92 μm) yüzey kalitesinde en iyi değerdir. Şekil 13'de malzeme yüzeyinden alınan SEM görüntüsü bu değer için en iyi yüzey kalitesine sahip olduğu desteklemektedir. S7O3 macun oranı yüzey kalitesi iyileştirmede en iyi seçim olduğunu göstermektedir. AMİ F7 deney setlerinde ise F7O3 (%60) macun oranında en iyi yüzey pürüzlülük R_a değeri elde edilmiştir. Bu deneye başlamadan önce R_a değeri 3,03 μm iken, 89 işlem döngüsü sonunda bu değer 0,53 μm olarak elde edilmiştir (Şekil 12). GOV prosesi deneyleri ve AMİ



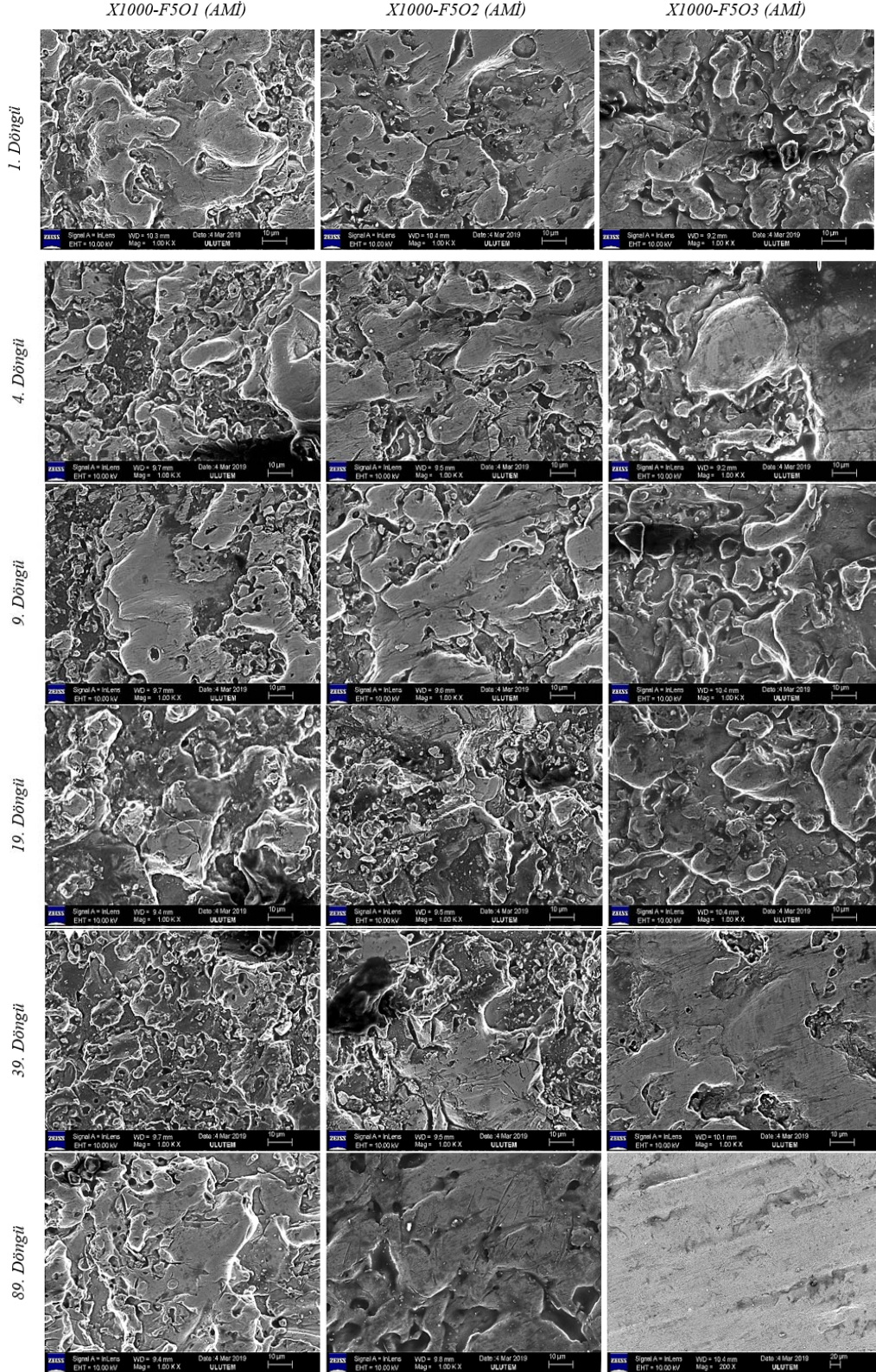
Şekil 9. S5 ve F5 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen R_a değerleri (Values of R_a performed with S5 and F5 mesh sizes)



Şekil 10. GOV proses sonrası S5 bile boyutunun O1, O2, O3 oranları için SEM görüntüleri (SEM images of S5 ball size for O1, O2, O3 ratios after GOV process)

prosesinin diğer aşındırıcı tane boyutları (F3 ve F5) ile kıyaslandığında ilk 9 AMİ işlem döngüsünde yüzey pürüzlülüğü

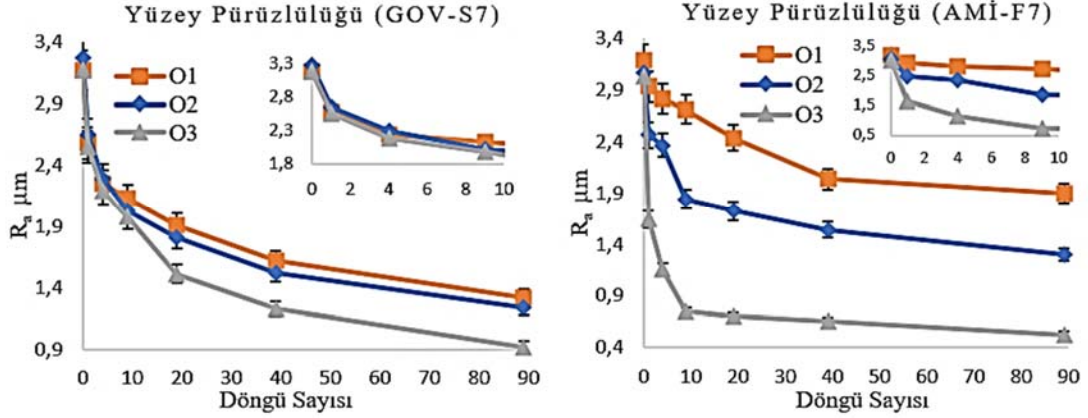
değerinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu sonuç, macun içerisinde bulunan en iri tane boyutuna sahip aşındırıcının yüksek oranda



Şekil 11. AMİ proses sonrası F5 aşındırıcı boyutunun O1, O2, O3 oranları için SEM görüntüleri (SEM images of F5 abrasive size for O1, O2, O3 ratios after AFM process)

konsantrasyonunun bir sonucudur. Bu macun oranı ilk 9 işlem döngüsünde yüzeyde bulunan beyaz katman tabakasını kaldırmıştır

(Şekil 14). Daha sonraki devam eden işlem döngülerinde yoğun aşındırıcı oranı nedeniyle malzeme yüzeyi ve silisyum karbür



Şekil 12. S7 ve F7 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen R_a değerleri (Values of R_a performed with S7 and F7 mesh sizes)

taneçikleri arasında temas yüzeyi artmaya başlayarak malzeme yüzeyinde macun akış yönünde işleme izleri oluşturmaya başlamıştır (Şekil 14). AMİ prosesinin yüzeyden kaldırdığı talaş miktarı GOV prosesiyle kıyaslanmayacak derecede fazla olmasından (Şekil 19) dolayı yüzeydeki bu işleme çizgileri GOV prosesinde çok daha az gözlemlenmiştir.

3.2. Malzeme Kaldırma (MK) (Material Removal (MR))

SEM görüntüsünden beyaz katman kalınlığı yaklaşık $9,5 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 16a) ve beyaz katman ağırlığı GOV işleminden önce S7O3 macun oranı için Eş. 1'de verilen formülle [59, 60] teorik olarak (Şekil 15) hesaplandığında karşılık gelen ağırlık $5,896 \text{ mg}$ 'dir. Daha sonra 89 işlem döngüsünden sonra beyaz katman kalınlığını ölçmek için SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 16b'de verilen bu görüntülerden yaklaşık $3,18 \mu\text{m}$ beyaz tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Bu, beyaz tabakanın yüzeyden tamamen uzaklaştırılması için $1,973 \text{ mg}$ talaş gerektiği anlamına gelir. Bu durum, Şekil 16b'deki SEM görüntüsünden ölçülen $1,973 \text{ mg}$ ile malzeme yüzeyinden kaldırılan $3,6 \text{ mg}$ 'in (Şekil 19) toplanmasıyla doğrulanmıştır. Bu üç değer, yaklaşık % 6'lık bir sapma ile deneysel ve teorik olarak birbirini doğrulamıştır. Beyaz tabakanın işlem toleransları ve yüzeydeki sabit olmayan kalınlığı dikkate alındığında bu fark kabul edilebilir görülmüştür.

$$\rho_{Ti-6Al-4V} = \frac{m}{V}$$

$$t_{\text{beyaz katman}} = \frac{m}{\rho_{Ti-6Al-4V}}$$

$$\rho_{Ti-6Al-4V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{m * 10^{-6} (kg)}{h * 10^{-3} m * l * 10^{-3} m * t * 10^{-6} m}$$

Beyaz katman kalınlığı (t) = $9,5 \mu\text{m}$,
 $h_{\text{numune}} = 10 \text{ mm}$, $l_{\text{işlenen yüzey}} = 14 \text{ mm}$,

$$\rho_{Ti-6Al-4V} = 4420 \frac{kg}{m^3}$$

$$kg \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{m * 10^{-6} (kg)}{10 * 10^{-3} m * 14 * 10^{-3} m * 10 * 10^{-6} m} \quad m = 5,896 \text{ mg} \quad (1)$$

Ağırlık ölçümleri, işlem döngüleri öncesi ve sonrasında $100 \mu\text{g}$ hassasiyete sahip hassas terazi (Shimadzu Aux 220) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GOV prosesinde malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş miktarı mikro seviyelerde gerçekleşmiştir. Bundan dolayı numunelerin GOV işlemi öncesi ve sonrası ağırlıkları arasındaki fark Eş. 2'de verilen formül ile hesaplanmıştır. MK değerleri mg olarak verilmiştir ve değerlerin daha iyi anlaşılabilmesi için takip eden şekillerde grafiksel düzen içerisinde gösterilmiştir. AMİ prosesinde

ise malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş miktarı GOV prosesine göre çok daha fazla miktarda gerçekleşmiştir. Gov prosesinde olduğu gibi, AMİ işlemi öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları arasındaki fark Eş. 1'de gösterilen malzeme kaldırma (MK) formülü ile hesaplanmıştır. Daha sonra bu değerler yorumlanmak üzere şekiller ile gösterilmiştir. Performans parametrelerine göre MK sonuçları aşağıda kıyaslanarak tartışılmıştır.

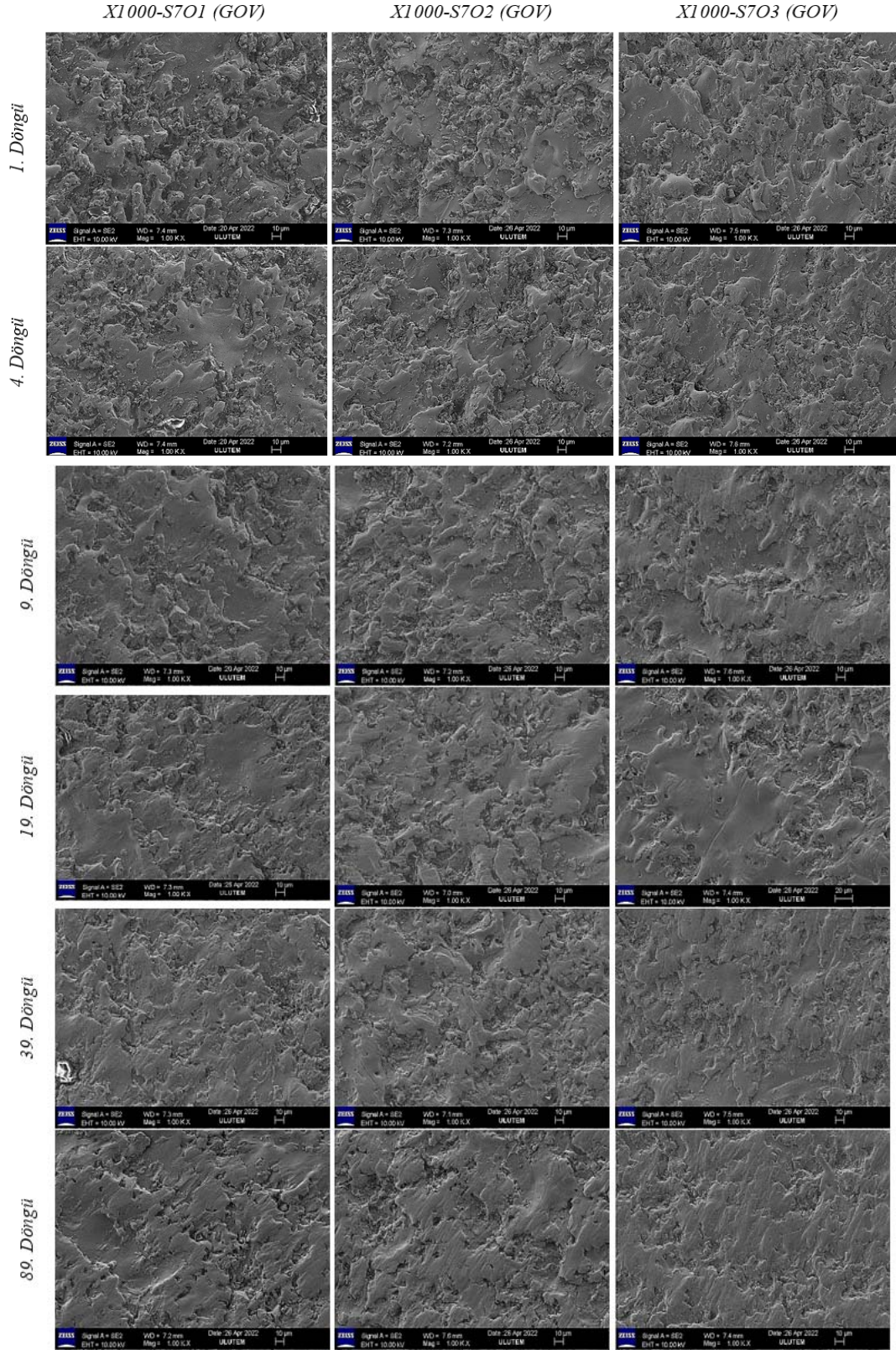
$$MK = \text{ilk ağırlık} - \text{son ağırlık (işlem döngü sonrası ağırlık)} (mg) \quad (2)$$

3.2.1. S3 ve F3 tane boyutları deneyleri (Experiments of S3 and F3 mesh sizes)

S3 ve F3 deney setleri için MK değerleri Şekil 17'de verilmiştir. GOV ve AMİ proseslerinde artan işlem döngü sayısı ve macun oranı ile birlikte malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş miktarında artış görülmektedir. GOV prosesinde mikro ölçekte talaş kaldırma miktarı her üç macun oranında (S3O1, S3O2 ve S3O3) 9 işlem döngüsüne kadar hemen hemen aynı oranda olmasına rağmen, 19, 39 ve 89 döngü sonunda S3O2 ve S3O3 için MK, S3O1 macun oranına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu MK değerleri S3 deney setleri için beyaz tabakayı ifade ettiğini söylemek mümkündür (Şekil 7). Çünkü S3O3 macun oranında 89 döngü sonunda diğer malzeme yüzeylerine göre daha pürüzsüz numune yüzeyi elde edilmiştir. Bu deney setlerinde, Şekil 17'den görüldüğü gibi beyaz tabaka tamamen kaldırılamamıştır. AMİ prosesinde GOV prosese göre malzeme yüzeyinden çok daha fazla talaş kaldırılmıştır. MK her üç macun oranında (F3O1, F3O2 ve F3O3) ilk 39 işlem döngüsüne kadar hemen hemen aynı oranda olmasına rağmen, 89 döngü sonunda F3O3, F3O2 ve F3O1 macun oranlarına göre arttığı gerçekleştirilen çalışma [18] ile kıyaslanması neticesiyle gözlemlenmiştir.

3.2.2. S5 ve F5 tane boyutları deneyleri (Experiments of S5 and F5 mesh sizes)

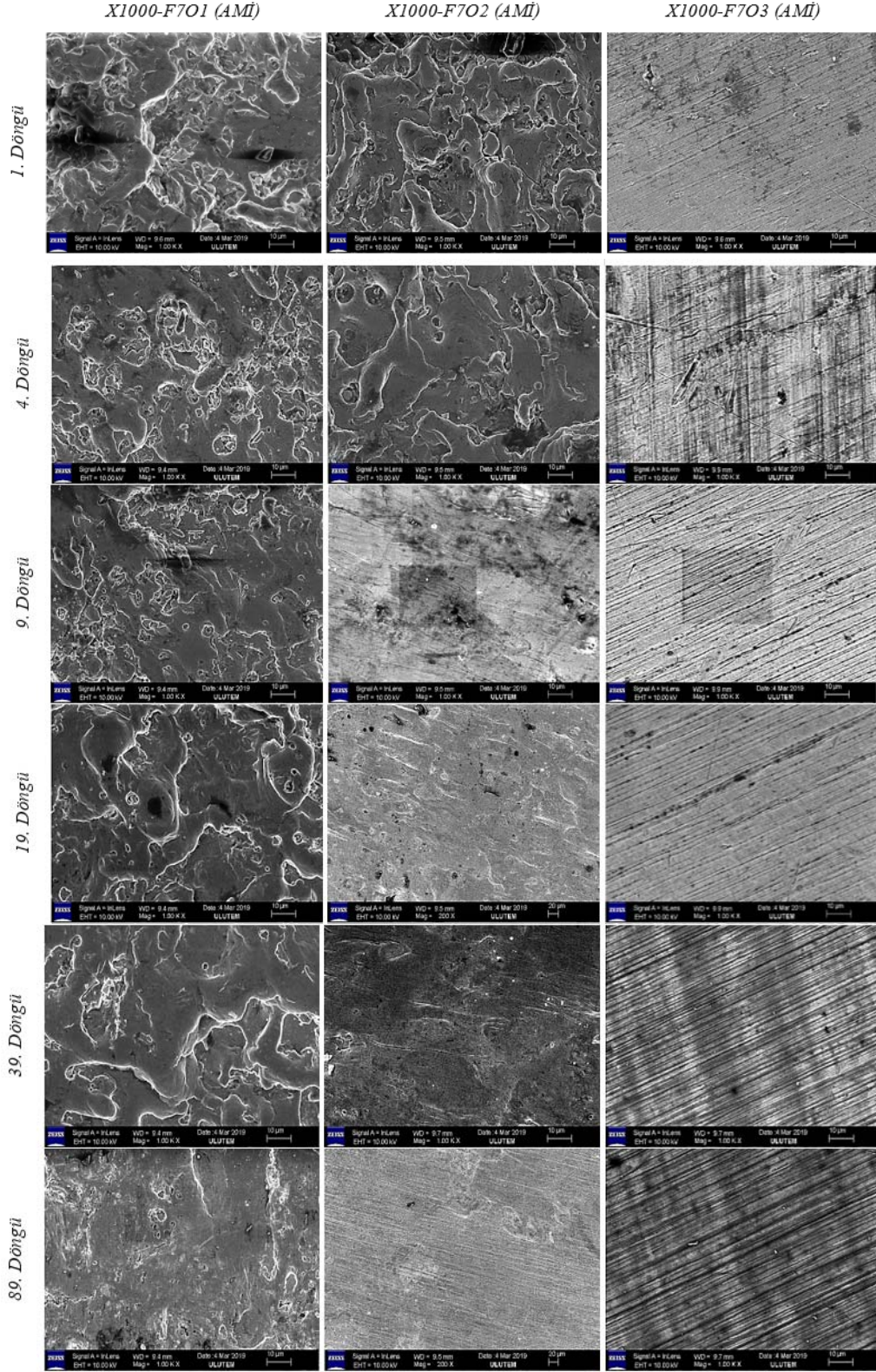
S5 ve F5 deney setleri ile gerçekleştirilen MK değerleri, tüm macun oranları için Şekil 18'te verilmiştir. Normal olarak, diğer bilye ve aşındırıcı tane boyutlarıyla yapılan deneylere benzer şekilde, işlem döngü sayısı arttıkça malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş miktarı artış göstermiştir. GOV prosesinde yüzeyden kaldırılan malzeme miktarının diğer küçük bilye tane boyutu olan S3'ten daha yüksek olması beklenirken, elde edilen MK değerleri incelendiğinde öngörülen artış gerçekleşmemiştir. Bu durumun nedeni çelik bilyeler ile malzeme yüzeyi arasındaki temas alanının S3'e göre daha küçük olması ile açıklanabilir. Sonuç olarak macun içerisindeki bilye tane boyutu arttığı halde talaş kaldırma miktarı S5O2 ve S5O3 macun oranlarında artış göstermemiştir. S5O1 için talaş kaldırma miktarı



Şekil 13. GOV prosesi sonrası S7 bilye boyutunun O1, O2, O3 oranları için SEM görüntüleri (SEM images of S7 ball size for O1, O2, O3 ratios after GOV process)

S3O1'e göre artış (Şekil 17) göstermiştir. Bu artış yüzeyden kaldırılan beyaz katman tabakası ile ilgilidir. 0,98 μm yüzey pürüzlülük değeri

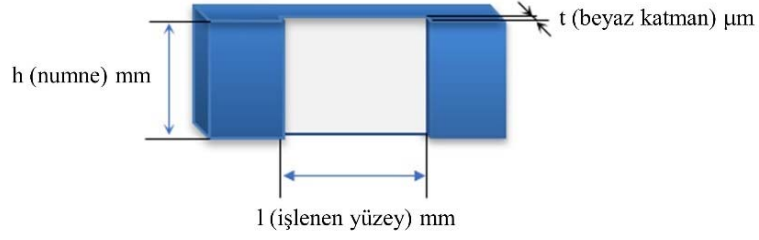
yüzeyden ölçülerek, önemli bir yüzey iyileştirmesi elde edilmiştir (Şekil 10). AMİ işleminde beklenildiği üzere, artan aşındırıcı tane



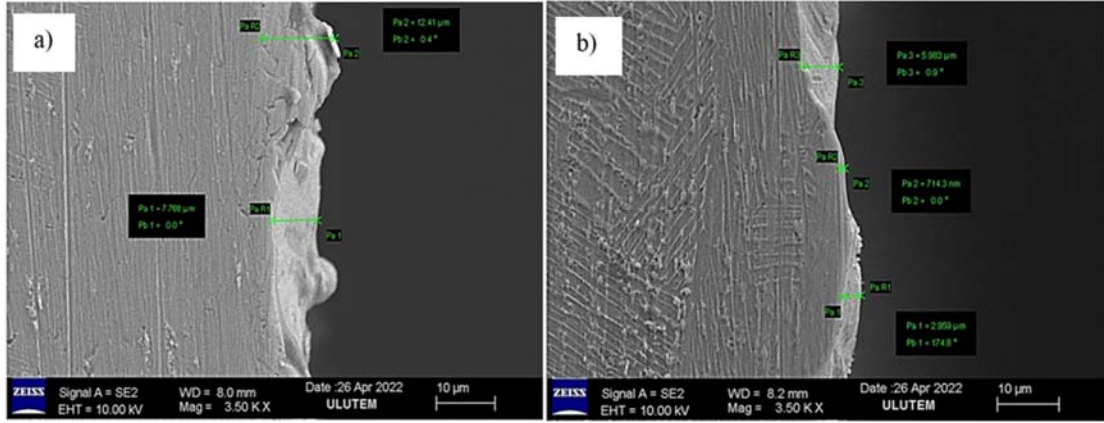
Şekil 14. AMİ proses sonrası F7 aşındırıcı boyutunun O1, O2, O3 oranları için SEM görüntüleri (SEM images of F7 abrasive size for O1, O2, O3 ratios after AFM process)

boyutu ile hem F3 hem de S5 deney setlerine göre yüzeyden daha fazla malzeme kaldırılmıştır. Artan aşındırıcı boyutu ve konsantrasyonu malzeme yüzeyinden beyaz katman tabakasını daha

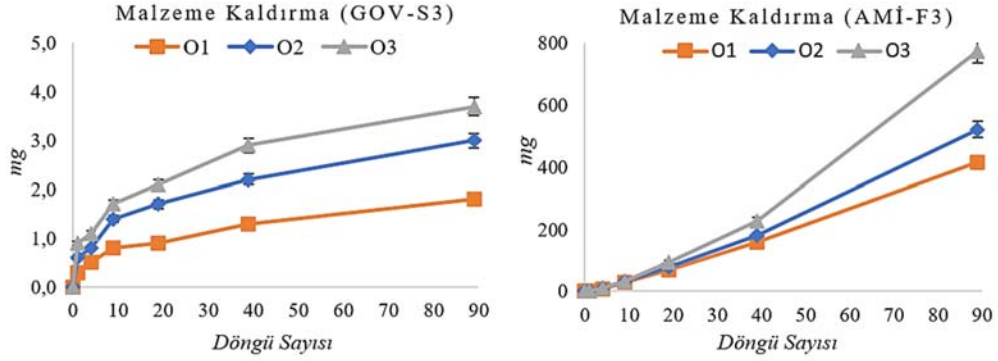
hızlı bir şekilde kaldırılmasına neden olduğu Şekil 11’de verilmiş ve literatürdeki gerçekleştirilen çalışma [29] ile kıyaslandığında aynı karakterde olduğu gözlemlenmiştir.



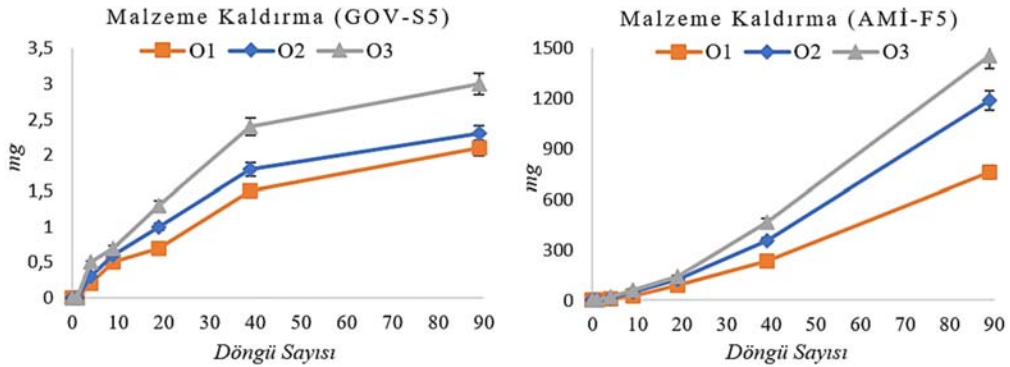
Şekil 15. Ti-6Al-4V üzerinde bulunan beyaz katman (The white layer located on the Ti-6Al-4V)



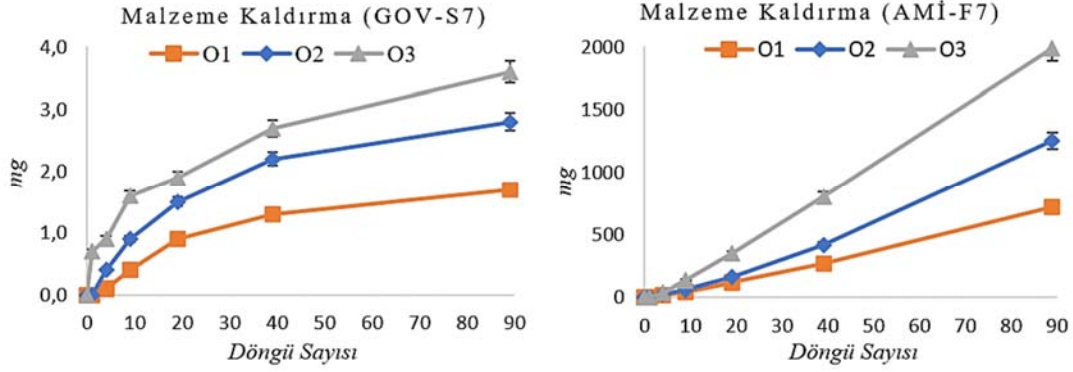
Şekil 16. GOV işleminden (a) önce ve (b) sonra Ti-6Al-4V yüzeyleri (SEM görüntüsü) (Ti-6Al-4V surfaces before (a) and after (b) the GOV process (SEM image))



Şekil 17. S3 ve F3 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen MK değerleri (Values of MR performed with S3 and F3 mesh sizes)



Şekil 18. S5 ve F5 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen MK değerleri (Values of MR performed with S5 and F5 mesh sizes)



Şekil 19. S7 ve F7 tane boyutlarıyla gerçekleştirilen MK değerleri (Values of MR performed with S7 and F7 mesh sizes)

3.2.3. S7 ve F7 tane boyutları deneyleri (Experiments of S7 and F7 mesh sizes)

S7 ve F7 deney setlerinin MK sonuçları Şekil 19'de verilmiştir. GOV prosesi deneyleri içerisinde S7 en büyük tane boyutuna sahiptir. Malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş miktarı incelendiğinde S3 ve S5 deney setlerine sonuçları ile hemen hemen aynıdır. Bu noktadan hareketle GOV prosesinin mikro düzeyde yüzeyden malzeme kaldırarak düzgün yüzeyler ürettiği kolaylıkla anlaşılmaktadır. S7O1 için deneyin her adımında malzeme yüzeyinden mikro düzeyde talaş kaldırma yapıldığı görülmektedir. AMİ prosesinde ise aşındırıcı tane boyutunun artmasıyla yüzeyden kaldırılan talaş miktarı artmıştır. F7O3 macun oranında artan konsantrasyonun sonucu olarak en fazla talaş kaldırımı ve beyaz katman tabakasının en hızlı şekilde kaldırılması gerçekleşmiştir. Şekil 14'de verilen SEM görüntüleri ile gerçekleştirilen çalışma [33] ile sonuçları birlikte değerlendirildiğinde MK değerlerini desteklemektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Karşılaştırmalı deneysel çalışma neticesinde elde edilen bulgular sonuçlarda verilmiş ve tartışılmıştır bu tartışmalar neticesinde aşağıdaki yargılara varılmıştır;

- Deneysel çalışmalarda, GOV prosesinde en iyi yüzey pürüzlülüğü R_a değeri S7O3 macun oranında 89 işlem döngü sonucunda 0,92 μm olarak, AMİ işleminde ise F7O3 macun oranında 89 işlem döngü sonucunda 0,53 μm olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, daha büyük tane boyutlarının GOV ve AMİ sürecinde Ti-6Al-4V malzemesi için daha iyi yüzey kalitesi elde edildiğini göstermektedir.
- GOV prosesinde AMİ işlemine göre malzeme yüzeyinden fazla talaş kaldırma olmaksızın yalnızca beyaz katman tabakasının kaldırılması şeklinde mikro seviyede talaş kaldırılmıştır.
- Teorik MK hesaplamaları, GOV prosesinin deneysel çalışmaları ile kanıtlanmıştır (hesaplanan beyaz katman tabakası MK = 5,8 mg, deneysel olarak çıkarılan malzeme = 3,6 mg). GOV prosesinde işlem döngü sayısı arttıkça, genellikle ilk 9 işlem döngülerinde yüzey pürüzlülüğü R_a değeri keskin bir şekilde azalmaktadır. Buna karşın mikro işleme özelliğine sahip AMİ prosesinde ise ilk 39 işlem döngüsü sonuna kadar keskin düşüş devam etmektedir.
- Yüzey incelemelerinde (SEM görüntüleri), beyaz tabaka kaldırma işlemini ve yüzey modifikasyonunun AMİ işleminin yanı sıra GOV işlemiyle de yapılabileceğini göstermektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülük ölçümleri ile SEM görüntüleri birbirini doğrulamaktadır. İşlem döngüsü sayısı ve macun oranı konsantrasyonu arttığında, tüm deney setleri için MK değerleri artmıştır.

- Ancak GOV işleminde beklenenin aksine bilye tane boyutu büyüdükçe talaş kaldırma miktarı artış göstermemektedir. S3O3 macun oranında yüzeyden kaldırılan malzeme miktarı 3,7 mg iken S5O3 ve S7O3 macun oranları için sırasıyla 3,0 mg ve 3,6 mg olarak elde edilmiştir. AMİ prosesinde ise F3O3 macun oranında yüzeyden malzeme uzaklaştırma miktarı 774,30 mg iken F5O3 ve F7O3 macun oranları için sırasıyla 1455,15 mg ve 1989,15 mg olarak elde edilmiştir. S7'nin en büyük bilye boyutu, daha küçük bilye boyutlarına (S3 ve S5) kıyasla bilye ile yüzey arasındaki en küçük temas yüzeyi nedeniyle yüzeyden fazla miktarda talaş kaldırımı gerçekleşmemiştir.

Geleneksel olmayan yüzey bitirme işlemi olarak önerilen ve yeni geliştirilen GOV prosesi deneysel olarak incelenmiş ve AMİ prosesi ile karşılaştırılarak avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Yeni geliştirilen GOV prosesinin AMİ prosesi kadar başarı sağlaması öngörülmekte ve farklı malzemeler için çalışmaların devam ettirilmesinin önü açılmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Henriques V.A., Titanium production for aerospace applications, Journal of aerospace technology and management, 1 (1), 7-17, 2009.
2. Arif M., Asif M., Ahmed I., Advanced composite material for aerospace application—A review, Int. J. Eng. Manuf. Sci, 7 (2), 393-409, 2017.
3. Smith R., Lewi G., Yates D., Development and application of nickel alloys in aerospace engineering, Aircraft engineering and aerospace technology, 73 (2), 138-147, 2001.
4. Ergene B., Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (1), 469-484, 2022.
5. Inagaki I., Takechi T., Shirai Y., Ariyasu N., Application and features of titanium for the aerospace industry, Nippon steel & sumitomo metal technical report, 106 (106), 22-27, 2014.
6. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C., Titanium alloys for aerospace applications, Advanced engineering materials, 5 (6), 419-427, 2003.
7. Singh P., Pungotra H., Kalsi N.S., On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications, Materials Today: Proceedings, 4 (8), 8971-8982, 2017.
8. Liu S., Shin Y.C., Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, Materials & Design, 164 (1), 107552, 2019.
9. Narutaki N., Murakoshi A., Motonishi S., Takeyama H., Study on machining of titanium alloys, CIRP Annals, 32 (1), 65-69, 1983.
10. Khatri A., Jahan M.P., Investigating tool wear mechanisms in machining of Ti-6Al-4V in flood coolant, dry and MQL conditions, Procedia Manufacturing, 26, 434-445, 2018.
11. Yi S., Li J., Zhu J., Wang X., Mo J., Ding S., Investigation of machining Ti-6Al-4V with graphene oxide nanofluids: Tool wear,

- cutting forces and cutting vibration, *Journal of Manufacturing Processes*, 49 (1), 35-49, 2020.
12. ÇELİK Y.H., KILIÇKAP E., Titanium alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6 (1), 163-175, 2018.
 13. Vasanth S., Muthuramalingam T., Vinothkumar P., Geethapriyan T., Murali G., Performance analysis of process parameters on machining titanium (Ti-6Al-4V) alloy using abrasive water jet machining process, *Procedia CIRP*, 46, 139-142, 2016.
 14. Ergene B., Yalçın B., Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced with fused deposition modeling (FDM), *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 201-217, 2023.
 15. Eyercioglu O., Gov K., The effect of magnesium content on drilling of Al-Mg-Ti alloy by hole electrical discharge machining process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235 (1-2), 125-133, 2021.
 16. Prasad A.R., Ramji K., Datta G., An experimental study of wire EDM on Ti-6Al-4V alloy, *Procedia materials science*, 5 (1), 2567-2576, 2014.
 17. Dabade U.A., Karidkar S.S., Analysis of Response Variables in WEDM of Inconel 718 Using Taguchi Technique, *Procedia CIRP*, 41, 886-891, 2016.
 18. Göv K., Soydan O., Eyercioglu Ö., Improving the surface quality of Ti-6Al-4V alloy produced by electrical discharge machining with abrasive flow machining, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1159-1170, 2020.
 19. Haşçalık A., Çaydaş U., Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Applied surface science*, 253 (22), 9007-9016, 2007.
 20. Haşçalık A., Çaydaş U., A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG, *Journal of Materials Processing Technology*, 190 (1-3), 173-180, 2007.
 21. Çoğun C., Kocabaş B., Özgedik A., Experimental and theoretical investigation of workpiece surface profiles in electrical discharge machining (EDM) *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 19 (1), 2004.
 22. Świercz R., Oniszczyk-Świercz D., Dąbrowski L., Electrical discharge machining of difficult to cut materials, *Archive of Mechanical Engineering*, 65 (4), 461-476, 2018.
 23. Ho K., Newman S., State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (13), 1287-1300, 2003.
 24. Gov K., The effects of the dielectric liquid temperature on the hole geometries drilled by electro erosion, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1255-1262, 2017.
 25. Rao P.S., Ramji K., Satyanarayana B., Experimental Investigation and Optimization of Wire EDM Parameters for Surface Roughness, MRR and White Layer in Machining of Aluminium Alloy, *Procedia Materials Science*, 5 (1), 2197-2206, 2014.
 26. Manjaiah M., Narendranath S., Basavarajappa S., A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 36 (2), 89-111, 2014.
 27. Ekmekci B., Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM), *Applied Surface Science*, 253 (23), 9234-9240, 2007.
 28. Bayram A., Uğuz A., Ula M., Effects of microstructure and notches on the mechanical properties of dual-phase steels, *Materials characterization*, 43 (4), 259-269, 1999.
 29. Gov K., Eyercioglu O., Effects of abrasive types on the surface integrity of abrasive-flow-machined surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232 (6), 1044-1053, 2018.
 30. Liao Y., Huang J., Chen Y., A study to achieve a fine surface finish in Wire-EDM, *Journal of materials processing technology*, 149 (1-3), 165-171, 2004.
 31. Maleki E., Unal O., Kashyzadeh K.R., Bagherifard S., Guagliano M., A systematic study on the effects of shot peening on a mild carbon steel: Microstructure, mechanical properties, and axial fatigue strength of smooth and notched specimens, *Applied Surface Science Advances*, 4 (1), 100071, 2021.
 32. Singh S., Shan H., Kumar P., Experimental studies on mechanism of material removal in abrasive flow machining process, *Materials and Manufacturing Processes*, 23 (7), 714-718, 2008.
 33. SOYDAN O., Kürşad G., EYERCİOĞLU Ö., Surface Finishing of Aerospace Materials, *El-Cezeri*, 7 (2), 700-709, 2020.
 34. Melkote S., Liang S., Özel T., Jawahir I.S., Stephenson D.A., Wang B., 100th Anniversary Issue of the Manufacturing Engineering Division Paper A Review of Advances in Modeling of Conventional Machining Processes: From Merchant to the Present, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 144 (11), 2022.
 35. Kumar S.S., Hiremath S.S., A Review on Abrasive Flow Machining (AFM), *Procedia Technology*, 25, 1297-1304, 2016.
 36. Rhoades L., Abrasive flow machining: a case study, *Journal of Materials Processing Technology*, 28 (1), 107-116, 1991.
 37. Jain R.K., Jain V.K., Dixit P.M., Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 (12), 1903-1923, 1999.
 38. Dixit N., Sharma V., Kumar P., Research trends in abrasive flow machining: A systematic review, *Journal of Manufacturing Processes*, 64 (1), 1434-1461, 2021.
 39. Li J., Zhu Z., Hu J., Zhou Z., Zhang X., Zhao W., Particle collision-based abrasive flow mechanisms in precision machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110 (7-8), 1819-1831, 2020.
 40. Munhoz M.R., Dias L.G., Breganon R., Ribeiro F.S.F., de Souza Gonçalves J.F., Hashimoto E.M., da Silva Júnior C.E., Analysis of the surface roughness obtained by the abrasive flow machining process using an abrasive paste with oiticica oil, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (11-12), 5061-5070, 2020.
 41. Jain R.K., Jain V.K., Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41 (12), 1689-1704, 2001.
 42. Jain V.K., Adsul S.G., Experimental Investigations into Abrasive Flow Machining (AFM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (7), 1003-1021, 2000.
 43. Karademir I., Celik M.B., Husem F., Maleki E., Amanov A., Unal O., Effects of constrained groove pressing, severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on microstructure and mechanical behavior of S500MC high strength low alloy automotive steel, *Applied Surface Science*, 538 (1), 147935, 2021.
 44. Maleki E., Farrahi G.H., Reza Kashyzadeh K., Unal O., Gugaliano M., Bagherifard S., Effects of conventional and severe shot peening on residual stress and fatigue strength of steel AISI 1060 and residual stress relaxation due to fatigue loading: Experimental and numerical simulation, *Metals and Materials International*, 27 (10), 2575-2591, 2021.
 45. Iswanto P.T., Malau V., Priyambodo B.H., Wibowo T.N., Amin N., Effect of shot-peening on hardness and pitting corrosion rate on load-bearing implant material AISI 304. in *Materials Science Forum*. 2017: Trans Tech Publ.
 46. Unal O., Optimization of shot peening parameters by response surface methodology, *Surface and Coatings Technology*, 305, 99-109, 2016.
 47. Ortiz A., Tian J., Villegas J., Shaw L., Liaw P., Interrogation of the microstructure and residual stress of a nickel-base alloy subjected to surface severe plastic deformation, *Acta Materialia*, 56 (3), 413-426, 2008.
 48. Unal O., Varol R., Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening, *Applied Surface Science*, 290, 40-47, 2014.
 49. Maleki E., Unal O., Shot peening process effects on metallurgical and mechanical properties of 316 L steel via: experimental and neural network modeling, *Metals and Materials International*, 27 (2), 262-276, 2021.
 50. Cai D., Nie P., Shan J., Liu W., Yao M., Gao Y., Precipitation and residual stress relaxation kinetics in shot-peened Inconel 718, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15 (5), 614-617, 2006.
 51. Park J.-S., Yildizli K., Demir E., Dawson P.R., Miller M.P., Non-destructive characterization of subsurface residual stress fields and correlation with microstructural conditions in a shot-peened inconel component, *Experimental Mechanics*, 58, 1389-1406, 2018.
 52. Ghorashi M.S., Farrahi G.H., Movahhedy M.R., Effect of severe shot peening on the fatigue life of the laser-cladded Inconel 718 specimens, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104 (5-8), 2619-2631, 2019.
 53. Karahan B., Ince U., Bilya Püskürtmenin (Shot Peening) Teknik-Teknolojideki Yolculuğu ve Soğuk Dövme Prosesine Adaptasyonu, *Derin Ekim*, 74, 90, 2015.

54. Göv K., Turkish Patent and Trademark Office, 2018-GE-570594 Flow Peening (GOV) Process. 2018.
55. Göv K., Şahin B., Kalak M., Koca M.S., investigation of material removal rate for inconel 718 as aerospace material by flow peening gov process, in Int. Conf. Mater. Eng. Technol. (TICMET'21), 256, 2021.
56. Göv K., Şahin B., Surface Observation of Inconel 718 Treated By Flow Peening Gov Process, in The International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'21). 2021.
57. Göv K., Kalak M., Koca M.S., Doğan N.F., investigation of surface roughness for inconel 718 as aerospace material by flow peening (gov) process, in Int. Conf. Mater. Eng. Technol. (TICMET'21), 84-87, 2021.
58. Göv K., Göv İ., Şahin B., Kalak M., Koca M.S., Doğan A., Application of Flow Peening GOV Process on Inconel From Aerospace Materials, in Int. Conf. Mater. Eng. Technol. (TICMET'21), 266, 2021.
59. Kalak M., Sahin B., Gov I., Dogan A., Gov K., Application of GOV (Flow Peening) Process to Improve Surface Quality of Ti-6Al-4V of Aerospace Material International Journal of Surface Science and Engineering, 2023.
60. Sahin B., Gov I., Kalak M., Koca M.S., Gov K., Surface Treatment of AISI 304 Stainless sSteel by GOV (Flow Peening) Process, Arabian Journal for Science and Engineering, 2023.
61. MatWeb. Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed Bar. Available from: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=10d463eb3d3d4ff48fc57e0ad1037434&ckck=1>.