



EKLEMELİ İMALAT VE GELENEKSEL YÖNTEMLE İMAL EDİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLI MALZEMENİN ABRAZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Elif Nur SELÇUK^{1*}, Ertuğrul DURAK¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Ti6Al4V, Eklemeli İmalat, Ada Tarama, Izgara Tarama, Sürtünme, Aşınma.</i>	<p>Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemleri ile arzulanılan mekanik özelliğe sahip malzemeler üretilmektedir. Eİ yöntemi birçok farklı üretim tekniklerinden oluşmaktadır. Bu üretim tekniklerinde istenilen mekanik özellikte malzeme üretebilmek için birçok parametre bulunmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının ısıl direnci, dayanımı, esnekliği, tokluğu, işlenebilirliği, kaynak edilebilirliği, korozyon direnci ve biyoyumluluğu yüksek olduğu için kullanım alanları oldukça fazladır. Geleneksel yöntemle üretilen bu malzemelerin kullanıldığı alandaki tüm mekanik özellikleri karşılması zordur. Bu yüzden Eİ yöntemi ile aynı malzemeye farklı işleme teknikleri uygulanarak kullanılmak istenilen alana uygun Titanyum alaşımı üretilmektedir. Fakat bu malzemelerde kullanılan yere bağlı olarak uygulanan yük, çevre şartları veya hareket tipi ile aşınmalar meydana gelebilmektedir. Aşınma tiplerinden en önemlilerinden biri de abrazif aşınmadır. Bu çalışmada, geleneksel yöntem (GY) ve eklemeli imalat yöntemi (Eİ) iki farklı tarama stratejisi (ada tarama EİAT, ızgara tarama EİIT) ile imal edilen Ti alaşımlarının (EİATTi/EİITTi/GYTİ) abrazif aşınma davranışları incelenmiştir. Abrazif aşınma deneyleri için aşındırıcı olarak P800A zımpara kullanılmış ve μ_{ort} değerlerinin birbirine çok yakın değerde olduğu görülmüştür. Tüm numunelerin (GYTi-P800A, EİATTi-P800A ve EİITTi-P800A) ortalama sürtünme katsayıları (μ_{ort}) dikkate alındığında, EİATTi numunesinde GYTİ numunesine göre yüzde 2.45 artarken, EİITTi numunesinde yüzde 1.16 artış görülmüştür. Aynı sırayla aşınma oranları ise yüzde 64 ve yüzde 51 oranlarında artmıştır. P800A-GYTİ çiftinde en düşük aşınma oranı değeri bulunmuştur. En yüksek aşınma direnci gösteren numune GYTİ alaşımıdır. P800A zımpara ile yapılan tüm testlerdeki Ti alaşımlarında şiddetli aşınma meydana gelmiştir.</p>

INVESTIGATION OF ABRASIVE WEAR PROPERTIES OF THE TITANIUM ALLOY MATERIAL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING AND CONVENTIONAL METHOD

Keywords	Abstract
<i>Ti6Al4V, Additive Manufacturing, Island Scanning, Grill Scanning, Friction, Wear.</i>	<p>With Additive Manufacturing (AM) methods, materials with desired mechanical properties can be produced. The AM method consists of many different production techniques. There are many parameters to produce materials with the desired mechanical properties. Titanium alloys have high thermal resistance, strength, flexibility, toughness, machinability, weldability, corrosion resistance and biocompatibility. To meet all the mechanical properties in the area in which they are used. Therefore, Titanium alloy suitable for the desired area can be produced by applying different processing techniques to the same material with the AM method. However, depending on the place used in these materials, wear may occur with the applied load, environmental conditions or movement type. One of the most important wear types is abrasive wear. In this study, the abrasive wear behavior of Ti alloys (AMISTi/AMGSTi/CMTi) produced with two different scanning strategies by CM and AM were investigated. Abrasive P800A sandpaper was used for the abrasive wear tests and it was seen that the average of the friction coefficients (μ_{ave}) values were very close to each other. When the values of the μ_{ave} of all samples</p>

* İlgili yazar / Corresponding author: d2040102268@ogr.sdu.edu.tr, +90-246-211-1236

(CMTi-P800A, AMISTi-P800A and AMGSTi-P800A) are taken into account, an increase of 2.45 percent was observed in the AMISTi sample compared to the CMTi sample, while an increase of 1.16 percent was observed in the AMGSTi sample. In the same order, wear rates increased by 64 percent and 51 percent. The lowest wear rate value was found in the P800A-CMTi couple. It is the CMTi alloy of the sample with the highest wear resistance. Severe wear occurred on Ti alloys in all tests with P800A abrasive.

Alıntı / Cite

Selçuk, E.N., Durak, E., (2023). Eklemeli İmalat ve Geleneksel Yöntemle İmal Edilmiş Titanyum Alaşım Malzemenin Abrasif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(2), 659-668.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E.N. Selçuk, 0000-0003-3799-4304

E. Durak, 0000-0001-6957-3796

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date

17.08.2022

Revizyon Tarihi / Revision Date

07.02.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date

01.03.2023

Yayın Tarihi / Published Date

28.06.2023

INVESTIGATION OF ABRASIVE WEAR PROPERTIES OF THE TITANIUM ALLOY MATERIAL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING AND CONVENTIONAL METHOD

Elif Nur Selçuk^{1†}, Ertuğrul Durak¹

¹Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Türkiye

Highlights

- When the average friction coefficients (μ_{ave}) of all samples (CMTi-P800A, AMISTi-P800A and AMGSTi-P800A) are taken into account, an increase of 2.45 percent was observed in the AMISTi sample compared to the CMTi sample, while an increase of 1.16 percent was observed in the AMGSTi sample. In the same order, wear rates increased by 64 percent and 51 percent.
- The lowest wear rate value was found in the P800A-CMTi pair.
- The sample with the highest wear resistance is CMTi alloy.

Purpose and Scope

The aim of this study is to examine the wear behavior of titanium alloys produced by different methods.

Design/methodology/approach

The Pin on Disc Wear Test Rig was used in the study for determining friction and wear properties. The values affecting wear such as roughness and mass loss of the samples were measured. The wear properties of the samples were investigated by pin-on-disc tests. In addition, the traces formed after wear with SEM images draw attention.

Findings

The average friction coefficients (μ_{ort}) results of all samples (CMTi-P800A, AMISTi-P800A and AMGSTi-P800A) are 0.775, 0.794, 0.784, respectively. In the same order, the wear rates are 1.064×10^{-2} , 1.748×10^{-2} , 1.612×10^{-2} . Average mass losses are 18.92 mg, 20.31 mg, 20.35 mg. The calculated K factors are 2.7×10^{-2} , 5.2×10^{-2} , 4.8×10^{-2} in the same order. Severe wear occurred in all samples as expected.

Research limitations/implications

In this study, abrasive wear properties were experimentally investigated experimentally in a pin-on-disc device at a constant load of 15 N and a speed of 60 rpm using sandpaper.

Practical implications

The ability to produce personalized medical parts with additive manufacturing is the most important advantage of this new production technique. With this study, from time to time, abrasive wear can be seen in these environments due to reasons such as scaling, wear particles, etc. between the prosthesis and the opposite bone surface. For this reason, the abrasive wear properties of the material produced with additive manufacturing were investigated. In the future, abrasive wear characteristics should be examined in human joint fluid media.

Social Implications

It can be beneficial in terms of using wear-resistant materials in areas such as aviation, space, biomedicine.

Originality

To determine the wear characteristics of titanium alloys with different mechanical properties with the change of production parameters.

1. Giriş (Introduction)

İmalat yöntemleri Dördüncü Sanayi Devriminin gelişmesiyle alışılmış imalat yöntemi ve alışılmamış imalat yöntemi olarak iki grupta toplanmaktadır. Talaşlı ve talaşsız imalat alışılmış imalat yöntemleridir. Talaşla malzeme kaybının önlemek, birçok malzemenin talaşlı işlemede zorlukların olması, maliyetin artmasından dolayı talaşsız imalat yöntemi tercih edilmektedir. Talaşsız imalat yöntemi döküm, dövme, plastik şekil verme, toz metalürjisi, kaynaklı imalat olarak sıralanabilir. Sıcaklık değişimlerinden dolayı malzemede oluşan iç gerilimler talaşsız imalat yöntemlerinin dezavantajıdır (Pereira vd., 2019). Havacılık, uzay endüstrisindeki talepler, pahalı malzemelerin üretimindeki problemlerden dolayı yeni imalat yöntemleri ortaya çıkmaktadır. Bu imalat yöntemlerinden

[†] İlgili yazar / Corresponding author: d2040102268@ogr.sdu.edu.tr, +90-246-211-1236

alışılmamış imalat yönteminde (Eİ) çeşitli enerji türlerinin dar bir alanda odaklanması ve denetlenmesi ile malzeme işlenmektedir. Ham malzemeyi etkin kullanma, olağanüstü küçük boyutlarda ve karmaşık geometri yapılarının üretimi, hızla parasal kaynağa dönüşebilmesi, verilerin işleme mekanizmasına aktarımının kolay olması, hassas malzemelerin işlenebilmesi, dayanımlı malzemelerin imalatı, çevre dostu olması gibi özellikler bu imalatın en önemli avantajlarından sayılmaktadır. Titanyum alaşımlarının (Ti6Al4V) ısıl direncinin yüksek olmasından ve bu malzemelerin geleneksel yöntemle üretiminin pahalı ve zor olmasından dolayı Eİ yöntemi ile üretilmektedir. Savunma, havacılık, uzay, kalıpcılık, kimyasal, sağlık, deniz endüstrileri, otomotiv sektörlerindeki firmalar karmaşık yapıdaki pahalı malzemelerin üretiminde bu yöntem tercih edilmektedir (Atzeni ve Salmi, 2012; Çelik ve Özkan, 2017; Özkan, 2019) . Stereolitografi (SLA), Ergiterek Yığıma ile Modelleme (FDM), Üç Boyutlu Yazıcı (3DP), Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS), Seçmeli Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işınlı Ergitme (EBM) en yaygın kullanılan Eİ yöntemleridir.

SLM ile imalat yönteminde giriş ve çıkış parametrelerinin değişmesiyle farklı mekanik özellikte malzemeler üretilebilmektedir. Bu parametrelerden giriş parametrelerindeki lazer gücü, tarama mesafesi, tarama gücü, tarama stratejisi, katman kalınlığı, imalat atmosferi, toz karakteristiği önemli değişkenlerdir. Ayrıca çıkış parametresi de ürünün sertliği, bağıl yoğunluğu, yüzey düzgünlüğü, pürüzlüğü, mukavemeti, şekil ve boyut ölçü hassasiyeti vb. şeklinde sıralamak mümkündür. Tarama stratejisi tarama deseni olarak adlandırılmaktadır ve ada, ızgara, çizgisel, açısal tarama gibi çeşitleri vardır. Numunenin arakesitindeki karesel boşlukların belirli bir sıraya göre ergitilmesi ile ada tarama deseni oluşmaktadır. Bu desendeki tüm bölgeler belirlenen lazer gücü, lazer hızı ve tarama mesafesinde rastgele ergitilmektedir. Izgara tarama stratejisinde ise önce kartezyen koordinatta bir ekseninde daha sonra ise diğer ekseninde ergitilerek desen oluşturulmaktadır (Özsoy, 2016; Özsoy ve Duman; 2017; Delikanlı, 2017).

Bu çalışmada (Selçuk, 2019), Eİ yöntemlerinden SLM yöntemi ile iki farklı tarama metodu (ada, ızgara) ve geleneksel yöntemle imal edilmiş Ti alaşımlarının aşınma davranışları aşındırıcı P800A zımparası kullanılarak incelenmiştir. Abrazif aşınma ve sürtünme özellikleri ile söz konusu bu malzemelerin daha uygun olup olmayacağı konusunda elde edilen bulgular yorumlanmış ve öneriler sunulmuştur. Makalenin 2.bölümünde literatür özeti verilmiştir. 3.bölümde deneyde kullanılan materyaller ve yöntemler detaylıca anlatılmıştır. 4.bölümde ise, elde edilen sonuçlar grafik, şekil ve tablolarla özetlenmiştir. 5. bölümde ise sonuçlar literatürle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

1980'lerin başından itibaren kullanılmaya başlayan Eİ teknolojisi sağlık alanında hastaya özel cihazların doku mühendisliğinde yapı iskelesi ve ilaç dağıtım sistemi olarak kullanılmıştır. Bu alanda kulak kepçesi, aynalı sağlıklı pelvis, asetabular kap, poliüretan malzemeden yapılmış dokular, protez ve ortezler, diş parçalarının imalatı gibi organ ve doku yerine kullanılacak malzeme üretmek için çalışmalar yapılmaktadır (Gebhardt vd., 2010; Melchels vd. 2011; Upex vd., 2017; Aydın vd., 2019; Javaid vd., 2020). Ti6Al4V alaşımı genellikle kalça, diz protezlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca bu alaşım uzay mekiğinin yakıt deposu, uçak çerçeveleri, helikopter rotor bıçakları, gaz türbinleri motor parçaları, disk fren rotorları, uydu itici tankı gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Ayrıca uzay, havacılık gibi alanlarda karmaşık geometrilerdeki küçük parçaların üretimi ve sağlık alanında kişiye özellik kavramının öneminden dolayı Eİ kullanımı tercih edilmektedir (Anil Kumar vd., 2021; Sreeshva vd., 2021; Segu vd., 2021; Bacak vd., 2021) .

Aşınma, iki farklı bileşen arasındaki bağıl hareketler gibi mekanik işlemler nedeniyle bir makinenin başka bir bileşeninden kaynaklanan sürtünme nedeniyle birim zamanda malzemenin kaldırılması veya tahribatı olarak tanımlamak mümkündür. Aşınma, yüzeyin üretim prosedürüne ve geometrisine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebilir. Ayrıca malzemenin mekanik özellikleri ve karakteristikleri gibi farklı faktörler de aşınma varyasyonunu azaltmaya yardımcı olabilmektedir. Buna göre aşınmayı hafif aşınma ve şiddetli aşınma olarak iki farklı aşınma tipine ayrılabilir. Hasara uğrayıp kırılmış dış yüzey pürüzsüz ve aşınma kalıntısı bakımından küçük olduğunda hafif aşınma, daha büyük aşınma kalıntıları ise şiddetli aşınma olarak yorumlanır. Bunlar çıplak gözle görülebilir. Malzeme muhtemelen aşınma olgusunu farklı şekillerde deneyimleyebilir. En önemli aşınma mekanizmaları olarak adhezif, abrazif, erozyon, yorulma, fretting, oksidatif vb.. sıralanabilir. Abrazyon aşınma mekanizmasında, malzemenin yüzeylerden yer değiştirmesi gözlemlenebilir ve bu da her iki yüzeyde de bir kanal, çizik, oluk oluşmasına neden olmaktadır. Bu mekanizma, aşındırıcının sertliği, rijitliği, boyutu ve geometrisi gibi birçok unsura göre değişiklik göstermektedir. Abrazif aşınma şu şekilde görülebilir:

- i. Sert bir yüzeyin daha yumuşak olandan uzaklaştırdığı ve yüzeyde aşındırıcı iz bıraktığı 2 gövdeli abrazif aşınma,
- ii. Sert bir parçacığın iki kayabilir yüzey arasında sıkışıp kaldığı ve yüzeylerden birinde veya her ikisinde aşındırıcı iz bıraktığı 3 gövdeli abrazif aşınma. Abrazif aşınmanın önemli özelliklerinden biri sertliktir.

Sertlik, aşındırıcı aşınma oranını kontrol etmede bir şekilde çok önemli bir rol oynar.

Deneyel çalışmalar bir malzemenin sertliği arttıkça abrasif aşınma oranının azalacağını göstermektedir. Birçok malzeme için, abrazif aşınma oranı aynı zamanda partikülün boyutuna da bağlıdır (Kumar vd., 2021).

Kalıcı diz, kalça implantlarında kullanılan titanyum alaşımlarının zamanla aşındığı bilinmektedir. Vücut sıvısı ile temasa giren implantların aşınma hızları artmaktadır. Bazen aşınan implantlarda gevşeme de görülebilmektedir. Bu da insan sağlığı açısından tehlikeli olabilmektedir. Malzeme seçimi, eklemdeki yağlama durumu, hareket şekilleri, implant tasarımı gibi faktörler aşınma süresini ve boyutunu etkilemektedir (Güner ve Meran, 2020). Metal alaşımları vücut sıvısı içerisinde bulunan çeşitli iyonlar, mineraller ve proteinlerle etkileşime girerek korozyon ve metal iyonizasyonuna uğramaktadır. Bunun sonucunda ise polietilen bileşen kullanım ömründen erken aşınmaya maruz kalmaktadır (Bahçe vd, 2017). Bu yüzden implantlarda kullanılan malzemelerin aşınma özelliklerinin incelenmesi ve aşınma süresini arttırmaya yönelik çalışmaların yapılması önemlidir.

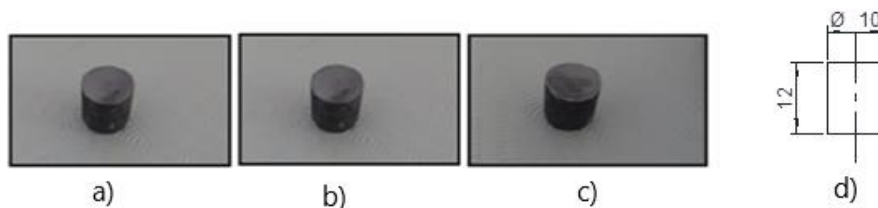
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Sunulan çalışmada, kalça protezlerinde kullanılması amacıyla ada tarama (EİATTi) ızgara tarama (EİİTTi) yöntemi ve geleneksel yöntemle (GYTi) imal edilen üç farklı mekanik özelliğe sahip Ti6Al4V kullanılmıştır. Bu malzemelerin abrazif aşınma özelliklerini belirlemek amacıyla aşındırıcı olarak P800A zımpara kullanılarak aşındırma yapılmış ve aşınma-pürüzlülük durumları incelenmiştir. Deneyler SDÜ Makine Mühendisliği Triboloji laboratuvarında yapılmış ve Pim Disk Aşınma Test Cihazında (PDATC) gerçekleştirilmiştir. Deneyler $25 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerin kütleleri ise deneylerden önce ve sonra 0,0001g hassas terazi ile ölçülmüştür. Aşınmadan dolayı meydana gelen kütle kayıpları elde edilerek ve her numune için özgül aşınma oranına ulaşılmıştır. Aynı zamanda tüm deney numunelerinin deneylerden önce ve sonra yüzey pürüzlülükleri de ölçülmüştür. Titanyum alaşımlarının SDÜ Yenilikçi Teknolojiler Araştırma ve Uygulama Merkezinde (YETEM) yüzey topografyaları fotoğrafları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Optik Mikroskop ile incelenmiştir. GYTi, EİATTi, EİİTTi alaşımları torna tezgâhında talaşlı imalatla istenilen boyutlara (çap 10 mm, boy 12 mm) getirilmiştir (Şekil 1). Daha sonra yüzey parlatma işlemi 300 d^{-1} kayma hızında zımpara (800, 1000, 1500, 2000) ile parlatılmıştır. Numuneler hegzanda (n-Hexan, Merck KGaA, I244167 532, 1.04367.2500, saflık derecesi ($gc \geq 9.0$)) 15 dakika süre ile temizlendikten sonra sıcak hava püskürtülerek kurutulmuştur. Ayrıca daha doğru sonuçlar alabilmek ve deney sayılarını arttırmak için test numunelerinin alt ve üst yüzeyleri ile testler yapılmıştır, böylelikle bir numuneden iki deney yapılmıştır. Numunelerin bir yüzeyinde deneyler 3 kere tekrarlanmıştır. Bu işlemi yapabilmek için deney sonrası yüzeylere parlatma işlemi uygulanmıştır. Tablo 1’de kullanılan numunelerin teknik ve mekanik özellikleri verilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan numunelerin mekanik özellikleri
(Mechanical properties of used samples) (Kayacan vd., 2018)

NUMUNE	YOĞUNLUK (gr/cm ³)	ÇEKME DAYANIMI (MPa)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (MPa)	SERTLİK N/mm ²
GYTi	4,50	860	110	3800
EİATTi	4,41	1100	101	5700
EİİTTi	4,40	1100	101	5230

TIME TR200 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında herhangi bir yağ, sıvı kullanılmadan (kuru koşullar) numunelerin deney öncesinde ve sonrasında yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Numunelerin aritmetik ortalama pürüzlülüğü Ra, 10 nokta pürüzlük (en yüksek 5 pürüz tepesi, en düşük 5 pürüz tepesi) ortalama değeri Rz, en yüksek pürüz tepesi Rt değerleri μm olarak yüzeyin 5 farklı bölgesinden ölçülmüştür. Daha sonra ortalamaları hesaplanmıştır. Elde edilen deney öncesi ve sonrası sonuçlar grafikler olarak sunulmuştur. Abrazif aşınma deneyleri PDATC’de 15 N yük, 60 d^{-1} (0.084 m/s), ortalama 30 mm çapında dairesel bir yörünge üzerinde ve 100 m kayma katetme mesafesinde, 20 dakika test süresinde yapılmıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan numuneler a) EİATTi b) GYTi c) EİİTTi d) Numune ölçüleri

(Samples used in the experiments a) AMiSTi b) CMTi c) AMGSTi d) Specimen dimensions)

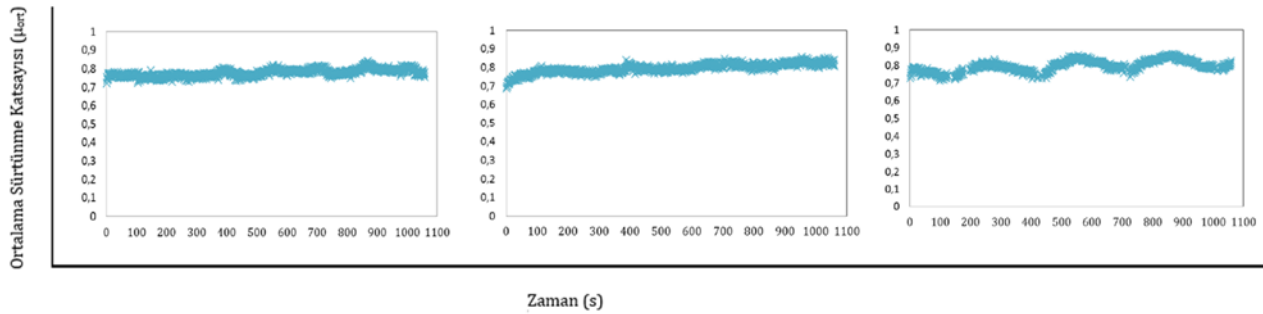
4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Ti alaşımları-P800A ile yapılan deneyler sonucunda numunelerin ortalama sürtünme katsayıları, pürüzlülük değerleri, kütle kayıpları, aşınma oranları, K faktörü ve sertlik oranları hesaplanmıştır. Ayrıca SEM görüntüleri de incelenmiştir.

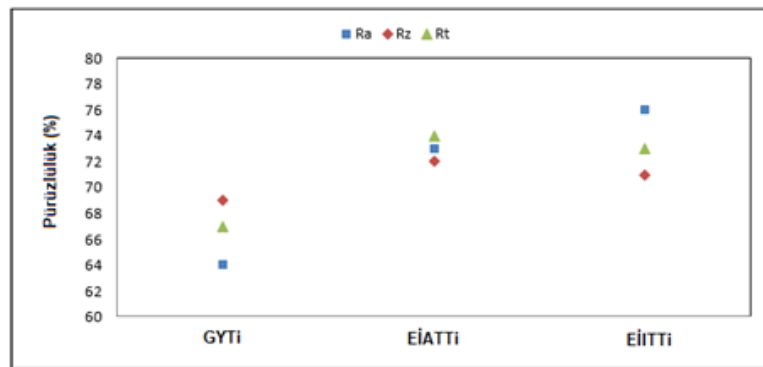
Aşınma ana malzemenin kristal-kafes tipi, büyüklüğü, şekil değişimi, Elastisite (Young) modülü sertliği, yüzey düzgünlük kalitesi, vb., karşı malzemenin de bulunduğu ortamın sıcaklığı, nem, atmosfer, vb., çalışma şartlar temas basıncı, yüzey hızı, kayma mesafesi, vb.. bağlı olarak farklı aşınma türleri oluşabilmektedir. Aşınma, yüzeylerden parçacık ayrılması olarak görülmekte ve fiziksel, kimyasal ve erime şeklinde ortaya çıkmaktadır (Bhushan, 2000; Ma vd., 2017).

Abrazif aşınma deneylerinde GYTi'li numunelerin $\mu_{ort}=0.774$, EİATTi'li numunelerin $\mu_{ort}=0.794$ ve EİİTTi'li numunelerin $\mu_{ort}=0.789$ olarak bulunmuştur. Şekil 2'de görüldüğü üzere EİATTi ve EİİTTi numunelerine ait μ_{ort} değerleri birbirine çok yakın değerdedir.

GYTi'li numunelerinin Ra değerlerinde %64.05, Rz değerlerinde %69.47 ve Rt değerlerinde ise %67.89 oranında artış görülmüştür. EİATTi'li numunelerin ise Ra değerlerinde %73.71 oranında, Rz değerlerinde %72.68 oranında ve Rt değerlerinde ise %74.54 oranında artış dikkati çekmiştir. EİİTTi'li numunelerin Ra değerlerinde %76.59 oranında, Rz değerlerinde ise %71.60 oranında ve Rt değerlerinde ise %73,54 oranında artış görülmektedir. Tüm numunelerin aşınma sonrası pürüzlülük değerlerinde önemli derecede artış vardır. Pürüzlülükteki artış en çok EİİTTi alaşımında meydana gelmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Tüm numunelerin (sırasıyla GYTi, EİATTi, EİİTTi) zamana bağlı ortalama sürtünme katsayısı (Time dependent average friction coefficient of all samples (respectively CMTi, AMiSTi, AMGSTi))



Şekil 3. Tüm numunelerin pürüzlülük değerleri (Roughness values of all samples)

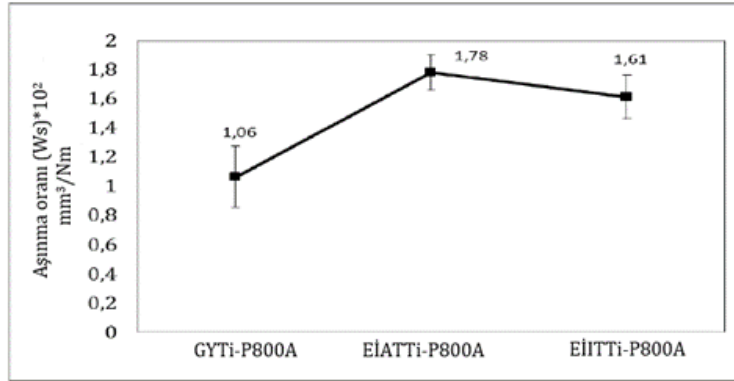
Aşınan malzemelerin farklı sertliklerde olması nedeni ile aşınma oranı Denklem 1 ile hesaplanabilmektedir. Çalışma şartları ve malzemenin tipine bağlı olarak aşınma oranı 10^{-15} ile 10^{-1} mm^3/Nm arasında değer alabilmektedir. Bu nedenle aşınmanın kontrolü için çalışma koşulları ve malzeme seçimi son derece önemlidir (Grum, 2009; Kragelsky ve Alisin, 2016; Ameen, 2017).

$$Ws = \frac{V \cdot H}{F \cdot L} \quad (1)$$

Burada; W_s aşınma oranı, V aşınan hacim, H malzemenin yüzey sertliği, parçaya F uygulanan yük, L test süresince alınan kayma yolunun uzunluğudur. Birim mesafe ve birim kuvvete karşı gelen aşınma hacmi ise özgül aşınma oranıdır (w_s). Bu oran benzer malzemeler arasındaki temas durumlarında kullanılmaktadır ve malzeme ve sürtünme koşullarına bağlı olarak 10^{-9} ve 10^{-2} mm^3/Nm aralığında değerler almaktadır. Denklem 2 ve 3'te ise özgül aşınma oranı hesabı verilmiştir. Tüm numunelerin aşınma oranı değerleri hesaplanmış ve Şekil 4'te gösterilmektedir.

$$w_s = \frac{W_s}{H} \quad (2)$$

$$w_s = \frac{V}{F*L} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right) \quad (3)$$



Şekil 4. Tüm numunelerin aşınma oranı değerleri (Wear rate values of all samples)

Aşınma katsayısı (K sabiti) ise Archard aşınma sabiti olarak bilinmektedir ve ilk olarak 1953 yılında J.F. Archard bu sabiti ifade etmiştir. Holm/Archard yasası olarak da ifade edilen denklemde K faktörü Denklem 4'te verilmiştir.

$$K = \frac{3*V*H}{F*L} \quad (4)$$

K faktörüne bağlı olarak 3 çeşit aşınma rejimi belirtilmektedir. Aşınma-yük ilişkisini gösteren bu mekanizmada K faktörü; 10^{-2} - 10^{-4} arasında ise şiddetli aşınma, 10^{-4} - 10^{-6} arasında ise orta aşınma, 10^{-6} - 10^{-8} arasında ise parlatma aşınması olarak isimlendirilmektedir (Öncü, 2019).

Abrazif aşınma değerlendirilmelerinde yüzey sertlikleri de önemli faktör olduğu için sertlik oranları da hesaplanmıştır. Bu oranı (Sertlik oranı (r)) hesaplayabilmek için denklem 5 kullanılmıştır. Sertlik oranı (r) kritik değer altında kaldığı zaman (r_{c1}) (yaklaşık 0.6) abrazif aşınma ortaya çıkmaktadır (Kato ve Adachi, 2000).

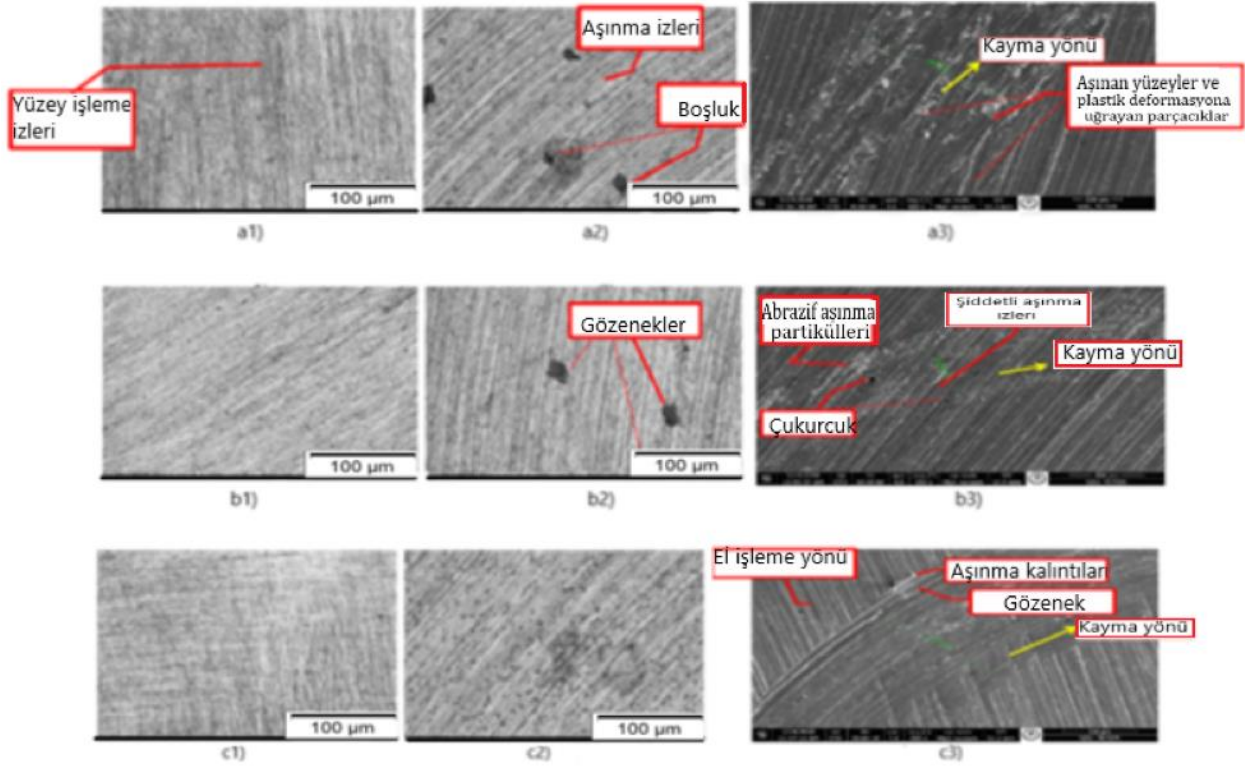
$$r = \frac{\text{Aşınmış malzemenin sertliği}}{\text{Aşındırıcı malzemenin sertliği}} \quad (5)$$

Tüm numunelerin K faktörü ve sertlik oranları hesaplanmış ve bulunan sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Numunelerin K faktörü ve sertlik oranı (K factor and hardness ratio of samples)

Numune	K faktörü	Sertlik oranı(r)
GYTi	$2.7*10^{-2}$	0.12
EİATTi	$5.2*10^{-2}$	0.19
EİİTTi	$4.8*10^{-2}$	0.17

GYTi, EİATTi, EİİTTi numuneleri ile yapılan deneylerin sonucuna göre, GYTi numunesinde daha az aşınma olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre tüm numunelerin aşınma direnci yönünden birbirine yakın özellikte olduğu, GYTi'nin az da olsa daha iyi bir aşınma direnci gösterdiği görülmektedir. K değerlerine bakıldığı zaman, tüm numunelerin şiddetli aşınma bölgesindedir ve GYTi numunesinde K faktörünün diğer numunelere göre daha küçük değerdedir. Archard denklemi incelendiğinde, aşınma oranı ve K faktörü sertlik ile doğru orantılıyken, kütle kaybı ile ters orantılı olduğu rahatlıkla görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, tüm numunelerde K faktörü, sertlik ve kütle kaybı doğru orantılı çıkmıştır. Bunun nedeni, tüm numunelerin yoğunluklarının farklı olmasıdır. Aşındırıcı P800A zımpara ile yapılan numunelerin abrazif aşınma yüzeylerinin optik ve SEM görüntüleri Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Ti alaşımları-P800A çiftindeki tüm titanyum alaşımlarının optik ve SEM görüntüleri a1-3) GYTİ b1-3) EİATTİ c1-3) EİİTTİ (Optical and SEM images of all titanium alloys in the Ti alloys-P800A pair a1-3)CMTİ b1-3)AMİSTİ c1-3)AMGSTİ)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, üç farklı özellikteki titanyum alaşımlarının kuru koşullarda P800A zımpara ile abrazyif aşınma davranışları test edilmiştir. GYTİ-P800A, EİATTİ-P800A ve EİİTTİ-P800A çiftleri ile yapılan deneylerde yüzeylerin frezelemesi, kaba tornalanması işlemine benzer görünüme sahip olup yüzey pürüzlülük değerlerinde deney başlangıcına göre büyük artışlar meydana gelmiştir. EİİTTİ alaşımında en yüksek ve GYTİ alaşımında ise en düşük pürüzlülük artışı elde edilmiştir. Tüm numunelerin (GYTİ-P800A, EİATTİ-P800A ve EİİTTİ-P800A) ortalama sürtünme katsayıları (μ_{ort}) sonuçları sırasıyla 0.775, 0.794, 0.784'dir. Aynı sırayla aşınma oranları ise (W_s) 1.064×10^{-2} , 1.748×10^{-2} , 1.612×10^{-2} 'dir. Ortalama kütle kayıpları ise 18.92 mg, 20.31mg, 20.35 mg'dir. Hesaplanan K faktörleri ise yine aynı sırayla 2.7×10^{-2} , 5.2×10^{-2} , 4.8×10^{-2} 'dir. K faktörü aşınma türü hakkında bilgi vermektedir. Deney sonuçlarına göre bulunan değerler 10^{-2} – 10^{-4} arasında olduğu için aşınmanın şiddetli aşınma gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sertlik oranı ise sırasıyla 0.12, 0.19, 0.17 bulunmuştur. Bu değerler de tüm numunelerde abrazyif aşınma meydana geldiğini göstermektedir. Tüm testlerden elde edilen sonuçlara göre en yüksek aşınma direnci gösteren numune GYTİ'li numunelerdedir. Tüm numunelerin (GYTİ P800A, EİATTİ-P800A ve EİİTTİ-P800A) şiddetli aşınma bölgesinde olduğu ve EİİTTİ-P800A çiftindeki EİİTTİ'li numunelerin yüzeyinde abrazyif aşınma sonucu SEM görüntülerinde aşınma izleri, aşınma çizikleri daha yoğun olduğu dikkat çekmektedir.

Seçici lazer eritmede (SLM), işlem parametreleri, örneğin lazer gücü, tarama alanı ve tarama hızı gibi, parça özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. SLM işlemi sırasında mikro yapıları aktif olarak kontrol ederek aşınma direncini arttırmak önemlidir (Yang, vd., 2019). Seçici Lazer Eritme (SLM) teknolojisi ile eklemeli olarak üretilen parçaların kalitesi ve tarama stratejileri arasında önemli bir ilişki gösterilmiştir. Bu nedenle, yüksek hizmet gereksinimleri olan uygulamalarda SLM teknolojisini desteklemek için tarama stratejisinin etkisinin derinlemesine incelenmesi, üretim süreci için büyük değer taşımaktadır (Giganto, vd., 2022).Tarama stratejilerinin SLM yapıları 316L paslanmaz çeliğin mikro yapısı, tane büyümesi, tane boyutu ve dolayısıyla mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, mikrosertlik, tarama stratejisinin dikdörtgen bir desenle uygulanmasıyla iyileştirildiğini göstermektedir(Song, vd., 2020).

Sonuç olarak aynı malzemeden farklı tekniklerle numune üretilmesi ile farklı mekanik ve tribolojik özellikte malzemeler elde edilebilmektedir. Yapılacak yeni çalışmalarda tarama açıları, tarama desenleri gibi birçok giriş parametreleri değiştirilerek hem mekanik hem de tribolojik olarak yeni malzemeler ortaya çıkabilmektedir. Havacılık, uzay, biyomedikal alanlarda kullanılan parçaların geleneksel yöntemlerle imalatı zor olduğu için Eİ yöntemi tercih edilebilir ve hem mekanik açıdan hem de tribolojik yönden daha uygun malzeme uzay, havacılık, biyomedikal gibi önemli alanlarda kullanılabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. (No conflict of interest was declared by the authors.)

Kaynaklar (References)

- Ameen, N.H., (2017). Soya Yağı Ve Kullanılmış Kızartma Yağı Yağ Asiti Metil Esterleri Karışımlarının Sınır Yağlama Şartlarında Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s.
- Anil Kumar, V., Gupta, R.K., Prasad, M., Narayana Murty, S.V.S., (2021). Recent Advances In Processing Of Titanium Alloys And Titanium Aluminides For Space Applications: A Review. *J Mater Res* 36:689–716.
- Atzeni, E., Salmi, A. (2012). Economics Of Additive Manufacturing For End-Usable Metal Parts. *Int J Adv Manuf Technol* 62:1147–1155. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>.
- Aydin, H.S., Gümüş, Ö.Y., Küçük, İ., (2019). Eriyik Yığıma Modellemesi Esaslı Üç Boyutlu (3B) Eklemeli Üretim Tekniği Kullanılarak Poliüretan Malzemeden Bir Yapay İnsan Kulak Kepçesi Üretimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg 23:666–672. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.540029>.
- Bacak, S., Varol Özkavak, H., Tath, M., (2021). FDM Yöntemi İle Üretilen PLA Numunelerin Çekme Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 209-216.
- Bahçe, E., Aslan, A. K. , Güler, M. S. , Çakır, N. & Emir, E. (2017). Kalça Protezinin Aşınma Özellikleri Üzerinde Çoklu Tabakalı Kaplanmasının Etkilerinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Nümerik Analizi . *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* , 7 (2) , 201-214 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/orudubtd/issue/33029/367261>
- Bhushan, B., (2000). *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. CRC press. Volume One, Principles of Tribology, 1728 s.
- Çelik, K. Özkan, A., (2017). Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim Ve Onarım Uygulamaları. *Düzce Üniversitesi, Bilim Ve Teknoloji Derg* 5:107–121.
- Delikanlı, Y.E., (2017). Özel Geometriyle Pürüzlendirilmiş ve Hafifletilmiş Kalça İmplantının Tasarımı ve Lazer Sinterleme Yöntemi İle İmalatı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 186 s.
- Gebhardt, A. Schmidt, F.M. Hötter, J.S. Sokalla, V. Sokalla, P., (2010). Additive Manufacturing By Selective Laser Melting The Realizer Desktop Machine And Its Application For The Dental Industry. *Phys Procedia* 5:543–549. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.082>.
- Giganto, S., Martínez-Pellitero, M., Barreiro, J., Leo, P., Castro-Sastre, A., (2022), Impact of the laser scanning strategy on the quality of 17-4PH stainless steel parts manufactured by selective laser melting, *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2022, Pages 2734–2747, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.040>.
- Grum, J., (2009). Book Review: *Modern Tribology Handbook, Volume One: Principles of Tribology and Volume Two: Materials, Coatings, and Industrial Applications* edited by Bharat Bhushan. *Int J Microstruct Mater Prop* 4:388–390.
- Güner, A.T., Meran, C., (2020). Ortopedik implantlarda kullanılan biyomalzemeler. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 26(1), 54-67.
- Javaid, M., Haleem, A., (2020). 3D Printed Tissue And Organ Using Additive Manufacturing: An overview. *Clin Epidemiol Glob Health* 8:586–594. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2019.12.008>.
- Kato, K. Adachi, K., (2000). Wear Mechanisms. In: *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*. CRC press, pp 273–300.
- Kayacan, M.C., Delikanlı, Y.E., Duman, B., Özsoy, K., (2018). Ti6Al4V Toz Alaşımı Kullanılarak SLS İle Üretilen Geçişli (Değişken) Gözenekli Numunelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendis Mimar Fakültesi Derg* 33.
- Kragelsky, I.V. Alisin, V., (2016). *Friction Wear Lubrication: Tribology Handbook*. Vol:3, ISBN 0-08.027591-5.
- Kumar, A., Choudhary, A. Tiwari, A., James, C., Kumar, H., Arora, P.K., Khan, S.A., (2021). An Investigation On Wear Characteristics Of Additive Manufacturing Materials, *Materials Today: Proceedings* 47, 3654–3660.
- Ma C, Andani MT, Qin H, Moghaddam, N.S. Ibrahim, H. Jahadakbar, A. Amerinatanz, A. Ren, Z. Zhang, H. Doll, G.L. Dong, Y. Elahinia, M. Ye, C., (2017). Improving Surface Finish And Wear Resistance Of Additive Manufactured Nickel-Titanium By Ultrasonic Nano-Crystal Surface Modification. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2017.06.038>.
- Melchels, F.P.W. Domingos, M.A.N. Klein, T.J. Malda, J. Bartolo P.J. Huttmacher D.W. (2011). Additive Manufacturing of Tissues and Organs. *Prog Polym Sci* 37:1079–1104. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007>.
- Öncü, G., (2019). Atık Bitkisel Yağ Metil Esterlerinin Yağlama Yağı Olarak Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 158 s.
- Özkan, D.Ç., (2019). Hızlı Prototipleme Teknolojisinin Gelişimi, Çeşitleri Ve İmalat Sektöründe Sağladığı Avantajlar. *Mühendis Ve Makina Güncel*, Aralık 2019, www.mmo.org.tr.
- Özsoy, K. Duman, B., (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği (Usability Of Additive Manufacturing (Three Dimensional Printing) Technologies In Education), 1:36–48.
- Özsoy, K., (2016). Lazer Ergitme Yöntemi İle Kişiyi Özel Hafifletilmiş Gerçek Kafatası Parçası İmplant İmalatı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 178 s.
- Pereira, T., Kennedy, J.V., Potgieter, J., (2019). A Comparison Of Traditional Manufacturing Vs Additive Manufacturing, The Best Method For The Job. *Procedia Manuf* 30:11–18. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>.
- Segu, D.Z. Wang, L.L. Hwang, P. Kang, S.W., (2021). Experimental Characterization Of Friction And Wear Behavior Of Textured Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) For Enhanced Tribological Performance. *Mater Res Express* 8:085008.
- Selçuk, E. N., (2019). Eklemeli İmalat Ve Geleneksel Yöntem İle İmal Edilmiş Titanyum Alaşımli Biyomedikal Malzemenin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 134 s.
- Song, Y., Sun, Q., Guo, K., Wang, X., Liu, J., Sun, J., (2020), Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical

- behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 793,2020,139879,ISSN 0921-5093,<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139879>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509320309515>)
- Sreesha, R.B. Kumar, D. Chandraker, S. Agrawal, A., (2021). Room Temperature Sliding Wear Behavior of Ti6Al4V: A Review. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, p 040041.
- Upex, P. Jouffroy, P. Riouallon, G., (2017). Application Of 3D Printing For Treating Fractures of Both Columns of The Acetabulum: Benefit of Pre-Contouring Plates On The Mirrored Healthy Pelvis. *Orthop Traumatol Surg Res* 103:331–334. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2016.11.021>.
- Yang, Y., Zhu, Y., Yang, H., (2019). Enhancing wear resistance using selective laser melting (SLM): Influence of scanning strategy. *Jurnal Tribologi* 23, pp.113-124.