

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LAZER YÜZEY DESENLEME PARAMETRELERİNİN ULTRA-YÜKSEK
MOLEKÜLER AĞIRLIKLIL POLİETİLEN YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK
PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Tufan ÇAVRAR

TEMMUZ 2022

TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LAZER YÜZEY DESENLEME PARAMETRELERİNİN ULTRA-YÜKSEK
MOLEKÜLER AĞIRLIKLİ POLİETİLEN YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK
PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Tufan ÇAVRAR

ORCID:

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 06 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 07 / 2022

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömer Necati CORA

ORCID :

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Yüzey desenleme yöntemleri birçok endüstri dalında malzemelere farklı özellikler kazandırma amaçlı kullanılmıştır. Yüzey desenleme işlemlerinin bazıları; korozyon direncini arttırma, kimyasallara karşı direnç sağlama, su-yağ itici özellik kazandırma ve sürtünme veya aşınmayı azaltıcı etki oluşturma gibi uygulamalar olmuştur. Yüksek lisans tezi kapsamında; yüzey desenleme yöntemleri içerisinde femtosaniye lazer yüzey desenleme yöntemi kullanımı ile biyoyumlu ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UYMAPE) dikdörtgen blok parçanın yüzeyinde mikro çukurlar oluşturularak bu yüzeylerin biyoyumlu Ti6Al4V plaka malzemesine karşı tribolojik özellikleri test edilmiştir.

Yüksek lisans tez danışmanım Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden lisans yıllarımdaki hocam Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya, Makine Mühendisliği Bölüm Başkan Yardımcısı Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ'a, Arş. Gör. Doğan ACAR'a, Yaşar SERT'e, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür ve akademik personeline, IPG Photonics Türkiye biriminde bulunan Hakan Demir bey'e, Koç Üniversitesi Yüzey Teknolojileri Araştırma Merkezi (KUYTAM) bünyesindeki Dr. Yağız Morova'ya, Çekya da bulunan HiLASE araştırma ve geliştirme merkezindeki Jan Brajer'e ve Çek Teknik Üniversitesi (CVUT)'nde numunelerin lazer desenleme sürecini yürüten Tomas PRİMUS'a bizlerle yürüttükleri iş birlikleri ve nezaketleri sebebi ile her birine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca farklı türdeki UYMAPE numune malzemelerini tarafımıza gönderen Ortoplastics Inc.(İngiltere) firmasına, numunelerin hazırlanmasında kullanılan kesit takım uçları için Karakoç Kalıp Metal Form San. Tic. A.Ş.'ye, talaşlı imalat sürecinde bizlere destek olan KTÜ Makine Mühendisli personeli Levent DEMİR'e, bilgi paylaşımları ile desteklerini eksik etmeyen Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Dekan Yardımcısı Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ'a, Tarım ve Orman Bakanlığına bağlı Su Ürünleri Merkez Araştırma Enstitüsü'nden Dr. Esen Alp ERBAY'a, mikroskop analiz imkanlarını paylaşmaları nedeniyle KTÜ Orman Fakültesi öğretim üyeleri Prof. Dr. Bedri SERDAR'a, Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU'na ve yine aynı bölümdeki Arş. Gör. Murat ÖZTÜRK'e, teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, hedeflerime ulaşmam konusunda bana destek ve gösterdikleri sevgi ile her an yanımda hissettiğim aileme sonsuz teşekkür ederim.

Tufan ÇAVRAR

Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "LAZER YÜZEY DESENLEME PARAMETRELERİNİN ULTRA-YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLIL POLİETİLEN YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ömer Necati CORA'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, deneysel işlemlerin bir kısmının işlenmesi için yurt içi ve yurt dışından hizmet alımı yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/07/2022

Tufan ÇAVRAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.2.1. Lazer Yüzey Desenleme Yöntemi.....	4
1.2.2. Yüzey Temas Açısı	13
1.2.3. Kalça Protezi ve UYMAPE'nin Önemi	16
1.2.4. İmplant Bağlantılarında Triboloji.....	20
1.2.5. UYMAPE İçin Lazer Yüzey Desenleme Uygulamaları.....	30
1.3. Tezin Kapsamı ve Literatüre Katkısı.....	41
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	43
2.1. Nanosaniye Lazer ile Desenleme İşlemi	45
2.2. Femtosaniye (120 fs atımlı) Lazer Desenleme İşlemi.....	46
2.2.1. GUR 1020 PE Numune İçin Desenleme Parametreleri.....	48
2.2.2. GUR 1020 XL Numune İçin Desenleme Parametreleri	48
2.3. Femtosaniye (270 fs atımlı) Lazer Desenleme İşlemi.....	49

2.3.1.	Farklı Desenleme Parametreleri ile Yapılan Deneysel Çalışmalar	51
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	62
3.1.	Nanosaniye (Fiber) Lazer Yüzey Desenleme Sonuçları	62
3.2.	Femtosaniye (120 fs atımlı) Lazer Yüzey Desenleme Sonuçları	64
3.2.1.	GUR 1020 PE Numunesi Deney Sonuçları.....	64
3.2.2.	GUR 1020 XL Numunesi Deney Sonuçları	67
3.3.	Femtosaniye (270 fs atımlı) Lazer Yüzey Desenleme Sonuçları	70
3.3.1.	GUR 1020 PE Numunesi Desenleme Sonuçları	70
3.3.2.	GUR 1020 EXL Numunesi Desenleme Sonuçları	73
3.3.3.	GUR 1020 XL Numunesi Desenleme Sonuçları.....	76
3.4.	Temas Açısı Ölçümleri.....	80
3.5.	UYMAPE Sürtünme Katsayısı Ölçümleri	82
3.6.	Tribolojik Test Sonrası Numune Yüzeylerinin İncelenmesi	92
3.6.1.	GUR 1020 PE Numune Yüzeylerin İncelenmesi	92
3.6.2.	GUR 1020 EXL Numune Yüzeylerin İncelenmesi	94
3.6.3.	GUR 1020 XL Numune Yüzeylerin İncelenmesi	96
3.7.	Aşıma Faktörü Hesabı	98
3.8.	Taguchi Deney Tasarımına Göre Sonuçların İrdelenmesi	100
3.8.1.	GUR 1020 PE Numuneleri İçin Taguchi Analiz Sonuçları	100
3.8.2.	GUR 1020 EXL Numuneleri İçin Taguchi Analiz Sonuçları	105
3.8.3.	GUR 1020 XL Numuneleri İçin Taguchi Analiz Sonuçları.....	108
4.	SONUÇLAR	114
4.1.	Fiber ve Femtosaniye Lazer Desenleme Yüzey Sonuçlarının İrdelenmesi.....	114
4.2.	Tribolojik Test Sonuçlarının İrdelenmesi.....	115
5.	ÖNERİLER	117
6.	KAYNAKLAR.....	120

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

LAZER YÜZEY DESENLEME PARAMETRELERİNİN ULTRA-YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLI POLİETİLEN YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tufan ÇAVRAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ömer Necati CORA
2022, 132 Sayfa

Yüzey desenleme yöntemleri birçok endüstri dalında malzemelere; yağlayıcılık, hidrofobiklik, sürtünme ve aşınmayı azaltıcı etkiler oluşturma gibi farklı özellikler kazandırmak için kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında kalça implant bağlantılarındaki sürtünmenin dolayısı ile aşınma etkilerinin oluşturduğu yüzey hasarı ve sınırlı ömür gibi olumsuzlukların azaltılması amaçlanmıştır. Kalça protezi içerisinde eş çalışan parçalar arasında yer alan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen yüzeylerine nanosaniye lazer ve femtosaniye lazerler ile desenlemeler yapılarak tribolojik testler ile sürtünme ve aşınma değerleri hesaplanmıştır. Tribolojik deney kapsamında 3 farklı malzeme kullanılmış ve bu malzemeler çapraz bağlı polietilen olan GUR 1020 XL (ÇUYMAPE), çapraz bağlı vitamin E katkılı polietilen olan GUR 1020 EXL (VE-ÇUYMAPE) ve standart polietilen (UYMAPE)'dir. Malzemelerin sürtünme katsayıları incelendiğinde VE-ÇUYMAPE en düşük sürtünme katsayısına ve aşınmaya karşı en dirençli olduğu tespit edilmiştir. Test edilen 3 farklı mikro-çukur alan desen yoğunluğu (%5, %10 ve %15) değerlerinden en düşük sürtünme katsayısı %10 alan desen yoğunluğuna sahip olan numunelerde ortaya çıkmıştır. Desenli UYMAPE, desensiz versiyonları ile karşılaştırıldığında malzemenin aşınmaya karşı direnci yaklaşık %20 oranında olmuştur. Ayrıca malzeme grupları için alan desen yoğunluğu aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: KTÜ-BAP-FYL-2021-9631.

Anahtar Kelimeler: Lazer yüzey desenleme işlemi, Biyotriboloji, UYMAPE, Kalça protezi, Femtosaniye lazer, Aşınma, Ti6Al4V, Vitamin E katkısı.

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LASER SURFACE TEXTURING
PARAMETERS ON THE TRIBOLOGICAL PERFORMANCES OF ULTRA-HIGH
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE SURFACES

Tufan ÇAVRAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Ömer Necati CORA
2022, 132 Pages

Surface texturing methods are applied to materials in many industries; It is used to provide different properties such as lubricity, hydrophobicity, friction and wear-reducing effects. Within the scope of this study, it is aimed to reduce the negative effects such as surface damage and limited life caused by the friction in the hip implant connections and therefore the wear effects. Friction and wear values were calculated by tribological tests by making patterns with nanosecond laser and femtosecond lasers on the ultra-high molecular weight polyethylene surfaces, which are among the co-working parts in the hip prosthesis. Within the scope of the tribological experiment, 3 different materials were used and these materials are cross-linked polyethylene GUR 1020 XL (UHMWPE), cross-linked vitamin E added polyethylene GUR 1020 EXL (UHMWPE EXL) and standard polyethylene (UHMWPE). When the friction coefficients of the materials were examined, it was determined that UHMWPE EXL had the lowest friction coefficient and the most resistant to wear. Among the 3 different micro dimple areal densities (5%, 10% and 15%) tested, the lowest friction coefficient appears at 10%. Compared to the patterned UHMWPE, the wear resistance of the material is approximately 20% when compared to its unpatterned versions. In addition, it has been determined that the area density for material groups is the most effective factor on wear.

This work was supported by Scientific Research Project Coordination unit of Karadeniz Technical University. Project number: KTU-BAP-FYL-2021-9631"

Key Words: Laser surface texturing, Biotribology, UYMAPE, Hip replacement, Femtosecond laser, Wear, GUR 1020, Ti6Al4V. Vitamin E addition.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Lazerin optik gücü (W) ve zaman (s) grafiği (solda); lazer ışınının atım genişliği veya atım süresi (Pulse Duration) (sağda) (Viskup, 2016).....	6
Şekil 2. Uzun ışın atımlı lazerlerin malzeme üzerindeki etkisi (solda), kısa ışın atımlı lazerlerin (sağda) malzeme üzerindeki etkisi (Lorusso vd., 2008).	7
Şekil 3. Femtosaniye ışın atımlı lazer cihazının optik iç detayı (URL-3, 2021).	8
Şekil 4. Lazerin cihaz endüstrideki kullanım yerleri; (a) malzeme yüzeyinde dekoratif (dünya haritası) çalışmalarda lazer desenleme kullanımı (URL-4, 2019); (b) CO ₂ lazer ile metal parça delme işlemi (URL-5, 2020); (c) göz korneasının yeniden şekillendirilmede ve görme kusurlarını giderilmede kullanılan excimer lazer (URL-6, 2021); (d) polipropilen malzeme yüzey desenleme işlemi için kullanılan femtosaniye lazer cihazı (Guarnaccio vd., 2021); (e) kalıp üretiminde lazer sisteminin kullanımı (URL-7, 2019); (f) metal malzeme kesim veya işlemede fiber lazer kullanımı (URL-8 2021); (g) ultra-kısa ışın atımlı lazer ile hidrofobik yapının oluşturulması (URL-9, 2019); (h) su tutucu veya kovucu yapı oluşturmada pikosaniye lazer kullanımı (URL-10, 2020).....	9
Şekil 5. Tipik bir lazer desenleme sistem şematiği ve desen görseli (Wang vd., 2021).....	10
Şekil 6. Farklı ölçülerde lazer desenlenmiş Ti yüzeyi SEM görüntüleri: (a) 150 µm; (b) 200 µm; (c) 250 µm; (d) 300 µm (Wang vd., 2021).....	10
Şekil 7. (a) Dört ışınlı DLIP lazer desenleme işlemi; (b) hesaplanmış girişim deseni; (c) numune yüzeyinde oluşturulmuş desen; (d) büyük desenleme alanı ve verimlilik elde etmek için kaydırılmış odak sistemi; (e) İşaretli kısımda ışın çapı D ve girişim alanı çapı l olan girişim bölgesi (Hauschwitz vd., 2021).	11
Şekil 8. Lazer desenli malzeme yüzeyine damlatılmış 8 µl su damlasının görüntüsü (solda) ve 2 mJ atım enerjisi kullanılarak desenli alan (sağda) (Hauschwitz vd., 2021).....	12
Şekil 9. Malzeme yüzeyindeki temas açısını belirleyen parametreler (URL-11, 2022).....	13
Şekil 10. Katı bir yüzey ve üzerindeki sıvı moleküller arasındaki kohezyon kuvvetleri (Yoon vd., 2014; URL-12, 2022).....	14
Şekil 11. UYMAPE yüzeylerde temas açısı ölçüm görüntüleri; (a) işlem görmemiş UYMAPE (temas açısı 71°), (b) karbon kaplı işlem görmemiş UYMAPE (temas açısı 81.9°), (c) 1064 nm (temas açısı 71.7°), (d) 532 nm (temas açısı 56.2°), (e) 355 nm (temas açısı 54.8°) (Riveiro vd., 2014).	15
Şekil 12. İnsan vücudundaki leğen kemiği ile femur başı ayak bağlantısı (Allen ve Raeymaekers, 2021).	19
Şekil 13. İnsan vücudundaki seramik femur (uyluk kemiği) başı ve seramik asetabular ara yüzey ekli kalça protez bağlantısı (URL-15, 2021).	19
Şekil 14. Kalça protezinin montaj görseli (a) ve kalça protez elemanlarının içerik detayları (b) (URL-16, 2022).	20
Şekil 15. Pim (PEEK/UYMAPE) - disk (Ti6Al4V) triboloji düzeneği (Sandeep Kumar vd., 2020).....	29

Şekil 16. CoCr plaka üzerinde oluşturulmuş lazer yüzey desenleri; (a) Çizgi, (b) Ağ, (c) Çıkıntı ve (d) Çukur deseni (Alvarez-Vera vd., 2021).	32
Şekil 17. Alvarez-Vera vd. (2021), çalışmalarında CoCr malzeme üzerinde oluşturulmuş lazer desenli numunelerin çevrim sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri	33
Şekil 18. Kare formda (solda) ve dikdörtgen formda (sağda) desenli numunenin 3 boyutlu yüzey görüntüsü ve desen derinlik-genişlik grafiği (Hussain vd., 2019).....	35
Şekil 19. Farklı malzemeler üzerinde oluşturulmuş lazer yüzey desenleri (a) Fiberglas; (b) Naylon poliamid; (c) UYMAPE ve (d) PMMA malzemeleri üzerinde oluşturulmuş pikosaniye atımlı ve 400 µm çizgi adımlı lazer desenleme hatları (Gedvilas ve Raciukaitis, 2005).	37
Şekil 20. Polietilen malzeme yüzeyinde oluşturulan lazer desenleme işlemi ve işlem sonucunda oluşan mikro-çukurlar (dimples) ve kanallar (grooves) (Riveiro vd., 2018).....	39
Şekil 21. Lazer yüzey desenlemede ve tribolojik testlerde kullanılacak UYMAPE numunenin ölçüleri.....	44
Şekil 22. Nanosaniye lazer cihazı ve lazer desenleme işlem anı (IPG Photonics, İstanbul).....	45
Şekil 23. Lazer yüzey desen ölçüleri ve desen geometrisi	46
Şekil 24. Koç Üniversitesi KUYTAM’da bulunan 120 fs ışın atımlı µFab femtosaniye lazer sistemi (URL-19, 2021).	47
Şekil 25. GUR 1020 PE numune üzerinde oluşturulacak %2 alan desen yoğunluklu 160 adet mikro-çukur desene ait ölçüler (150 µm mikro-çukur çapı, 75 µm mikro-çukur derinlik)	48
Şekil 26. GUR 1020 XL numune üzerinde oluşturulacak %8 alan desen yoğunluklu 160 adet mikro-çukur desene ait ölçüler (300 µm mikro-çukur çapı, 150 µm mikro-çukur derinlik).....	49
Şekil 27. HiLASE Çekya’da bulunan 270 fs ışın atımlı femtosaniye lazer cihazı (URL-9, 2022).	50
Şekil 28. Kullanılan 3 farklı UYMAPE grubu numuneleri; (a) GUR 1020 PE; (b) vitamin E takviyeli ve gama ışınlı GUR 1020 EXL; (c) Gama ışınlı GUR 1020 XL.....	51
Şekil 29. 30 µm mikro-çukur derinliği, 40 µm mikro-çukur çapı ve 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranlarındaki desenleme boyutları.....	52
Şekil 30. 40 µm mikro-çukur derinliği, 100 µm mikro-çukur çapı ve 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranlarındaki desenleme boyutları.....	52
Şekil 31. 50 µm mikro-çukur derinliği, 150 µm mikro-çukur çapı ve 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranlarındaki desenleme boyutları.....	53
Şekil 32. 1000x büyütme yapabilen metal mikroskobu	54
Şekil 33. Nanofocus temassız konfokal mikroskop	54
Şekil 34. Dataphysics marka OCA serisi temas açılı ölçüm cihazı	55
Şekil 35. (a) Su damlasının şırınga iğnesinden damlama anı; (b) su damlasının yüzeye temas etme ve yüzeyde yayılması.....	55
Şekil 36. Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü malzeme bilimleri laboratuvarında bulunan blok-disk tribolojik test cihazı	58
Şekil 37. Aşınma test cihazının önden kesit görünümü	58

Şekil 38. Ti6Al4V malzemenin test cihazı üzerindeki çelik disk parça üzerine montajı.....	59
Şekil 39. Tribolojik test sistemi elemanları	60
Şekil 40. Fiber (IR) lazerin yeşil renkli GUR 1020 PE malzeme üzerinde oluşturulmaya çalışılan desen ve lazer ışının yüzeyde oluşturduğu tepkimenin yakınlaştırılmış görüntüsü	62
Şekil 41. Fiber (IR) lazerin beyaz renkli GUR 1020 PE malzeme üzerinde oluşturulmaya çalışılan desen ve lazer ışının yüzeyde oluşturduğu tepkimenin yakınlaştırılmış görüntüsü	63
Şekil 42. UV lazer deneme işlemi (yüzey ergimesi gözlendi)	63
Şekil 43. UV lazer çukur oluşturma denemesi (yüzeyde kabarma oluşması) ve lazer ışının yüzeyde oluşturduğu tepkimenin yakınlaştırılmış kamera görüntüsü	64
Şekil 44. (a) GUR 1020 PE numune, (b) malzeme üzerinde oluşturulan lazer desenleme işlemi ve (c) optik mikroskop altındaki görüntüsü	65
Şekil 45. GUR 1020 PE numunenin lazer deseneleme sonrası temassız optik profilometre analizi	66
Şekil 46. GUR 1020 PE numunenin temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik ve çap analizi	66
Şekil 47. GUR 1020 PE numunenin temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur adım analizi	67
Şekil 48. (a) GUR 1020 XL numune, (b) malzeme üzerinde oluşturulan lazer desenleme işleminin optik mikroskop görseli	68
Şekil 49. GUR 1020 XL numunenin temassız optik profilometre analizi.....	68
Şekil 50. GUR 1020 XL numunenin temassız optik profilometre kullanımı ile mikro-çukur çap ve derinlik analizi.....	69
Şekil 51. GUR 1020 XL numunenin temassız optik profilometre kullanımı ile mikro-çukur adım analizi	69
Şekil 52. GUR 1020 PE 3 no'lu numune üzerinde oluşturulan lazer desenleme sonrası mikro-çukur görüntüsü.....	71
Şekil 53. GUR 1020 PE 3 no'lu deney numunesi üzerindeki temassız optik profilometre analizi	71
Şekil 54. GUR 1020 PE 3 no'lu parçanın temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik, çap ve adım analizi.....	72
Şekil 55. GUR 1020 EXL 6 no'lu numune üzerindeki lazer desenli mikro-çukur yapıları.....	74
Şekil 56. GUR 1020 EXL 6 no'lu parçanın temassız optik profilometre analizi	74
Şekil 57. GUR 1020 EXL 6 no'lu numunenin temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik, çap ve adım analizi.....	75
Şekil 58. GUR 1020 XL 7 no'lu numune üzerinde oluşturulan lazer desenli mikro-çukur görseli	77
Şekil 59. GUR 1020 XL 7 no'lu parçanın temassız optik profilometre analizi.....	77
Şekil 60. GUR 1020 XL 7 no'lu parçanın temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik, çap ve adım analizi.....	78
Şekil 61. UYMAPE numuneler için istenilen lazer desenleme mikro-çukur derinlik değeri (mavi renkte) ve desenleme sonrası numunelerin mikro-çukur derinlik değerlerin (gri, sarı ve kırmızı) karşılaştırılması.....	79

Şekil 62. GUR 1020 EXL numunesinin 2 no'lu deneyine ait su damlası temas açısı ölçüm veri ekranı.....	80
Şekil 63. UYMAPE numune grupları üzerine oluşan temas açısı değerleri	82
Şekil 64. 1 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	83
Şekil 65. 2 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	84
Şekil 66. 3 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	84
Şekil 67. 4 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	85
Şekil 68. 5 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	85
Şekil 69. 6 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	86
Şekil 70. 7 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	86
Şekil 71. 8 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	87
Şekil 72. 9 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	87
Şekil 73. Desensiz 10 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	88
Şekil 74. Desenli GUR 1020 EXL ile desensiz versiyonuna ait sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği	88
Şekil 75. GUR 1020 XL desenli numunesinin mikro-çukur çaplarına bağlı sürtünme katsayısı değerleri.....	90
Şekil 76. GUR 1020 EXL desenli numunesinin mikro-çukur çaplarına bağlı sürtünme katsayısı değerleri.....	91
Şekil 77. GUR 1020 PE desenli numunesinin mikro-çukur çaplarına bağlı sürtünme katsayısı değerleri.....	91
Şekil 78. GUR 1020 PE 3 no'lu deney numunesi üzerindeki tribolojik test sonrası aşınmış mikro-çukur görüntüsü.....	92
Şekil 79. GUR 1020 PE 3 no'lu deney numunesinin tribolojik test sonrası temassız profilometre analizi	93
Şekil 80. GUR 1020 PE 3 no'lu numunenin tribolojik test sonrası temassız profilometre ile alınan mikro-çukur çap ve adım analizi	93
Şekil 81. GUR 1020 EXL 6 no'lu deney numunesi üzerindeki tribolojik test sonrası aşınmış mikro-çukur görüntüsü.....	94
Şekil 82. GUR 1020 EXL 6 no'lu deney numunesinin tribolojik test sonrası temassız profilometre analizi.....	95
Şekil 83. GUR 1020 EXL 6 no'lu deneyin tribolojik test sonrası temassız profilometre ile alınan mikro-çukur çap ve adım analizi	95
Şekil 84. GUR 1020 XL 7 no'lu deney numunesinin tribolojik test sonrası aşınmış mikro-çukur görüntüsü	96
Şekil 85. GUR 1020 XL 7 no'lu deneyin üzerindeki tribolojik test sonrası temassız profilometre analizi	97
Şekil 86. GUR 1020 XL 7 no'lu deneyin tribolojik test sonrası temassız profilometre ile alınan mikro-çukur çap ve adım analizi	97
Şekil 87. Triboloji testi sonrası 3 farklı malzeme grubu için hesaplanan spesifik aşınma hızları	99
Şekil 88. GUR 1020 PE malzemesinin ortalama S/G oranları etki grafiği	102
Şekil 89. GUR 1020 PE malzemesinin ortalamalar için etki grafiği.....	103

Şekil 90. GUR 1020 EXL numuneleri için ortalama S/G oranları etki grafiği	106
Şekil 91. GUR 1020 EXL malzemesinin ortalamalar için etki grafiği.....	107
Şekil 92. GUR 1020 XL numuneleri için ortalama S/G oranları etki grafiği.....	109
Şekil 93. GUR 1020 EXL malzemesinin ortalamalar için etki grafiği.....	110
Şekil 94. T testi excel veri giriş ekranı	112
Şekil 95. CoCrMo plaka döküm çalışması	118
Şekil 96. 3 boyutlu yazıcı ile CoCrWMo plaka üretim çalışması	119



TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Literatürde kullanılan lazerler ve uygulama alanları.....	8
Tablo 2. Yüzey morfolojik yapısına göre temas açısının sınıflandırılması.....	14
Tablo 3. UYMAPE'ye ait mekanik özellikler (Kurtz, 2004).....	18
Tablo 4. Kare ve dikdörtgen malzemenin desenleme işlem parametreleri (Hussain vd., 2019).....	34
Tablo 5. Malzemeler üzerinde kullanılmış lazer cihaz çeşitleri	40
Tablo 6. Fiber (nanosaniye lazer) lazer parametreleri	46
Tablo 7. 3 farklı malzemenin lazer desenleme işlemi için parametreler	51
Tablo 8. Sürtünme deneylerinde kullanılan faktörler, seviyeleri ve serbestlik dereceleri	56
Tablo 9. L ₉ (3 ²) serisine göre düzenlenmiş deney faktörleri ve UYMAPE malzemeleri	57
Tablo 10. Ti6Al4V (ELI) alaşımına ait malzemeler ve kimyasal bileşim oranları (URL-23, 2022).....	59
Tablo 11. GUR 1020 PE için istenilen değerler ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çap, derinlik ve mikro-çukur adım değerleri	73
Tablo 12. GUR 1020 EXL için istenilen değerler ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çapı, derinlik ve adım değerleri	76
Tablo 13. GUR 1020 XL için istenilen değerler ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çap, derinlik ve adım değerleri	79
Tablo 14. GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL UYMAPE numunelerinin mikro-çukur çapı/adım oranları ve temas açısı ölçüm değerleri tablosu	81
Tablo 15. Blok-disk testine tabi tutulan numune gruplarının sürtünme katsayısı değerleri.....	89
Tablo 16. GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL malzemelerine ait spesifik aşınma hızları	98
Tablo 17. GUR 1020 PE numuneleri için deney faktörlerine bağlı hacim kayıp ve S/G oranları	101
Tablo 18. GUR 1020 PE numuneleri için faktör seviyelerinin S/G oranları, Delta ve Rank değerleri	102
Tablo 19. GUR 1020 PE numuneleri için aşınma hacim kaybı Anova varyans analizi	104
Tablo 20. GUR 1020 EXL numuneleri için deney faktörlerine bağlı hacim kayıp ve S/G oranları	105
Tablo 21. GUR 1020 EXL numuneleri için faktör seviyelerinin S/G oranları, Delta ve Rank değerleri.....	106
Tablo 22. GUR 1020 EXL numuneleri için aşınma hacim kaybı Anova varyans analizi	107
Tablo 23. GUR 1020 XL numuneleri için deney faktörlerine bağlı hacim kayıp ve S/G oranları	108

Tablo 24. GUR 1020 XL numuneleri için faktor seviyelerinin S/G oranları, Delta ve Rank değerleri	109
Tablo 25. GUR 1020 XL numuneleri için aşınma hacim kaybı Anova varyans analizi	110
Tablo 26. 3 farklı numune gruplarının blok-disk test sonuçlarına ait sürtünme katsayısı değerleri.....	111
Tablo 27. Desenli ve desensiz grupların anlamlılık değerleri	113



SEMBOLLER DİZİNİ

a-C:H	: Amorf karbon-hidrojen
fs	: Femtosaniye [10^{-15} saniye]
g/mol	: Gram / Mol
mJ	: Mili joule
nm	: Nanometre [10^{-6} metre]
ns	: Nanosaniye [10^{-9} saniye]
ps	: Pikosaniye [10^{-12} saniye]
Ra	: Aritmetik ortalama pürüzlülük değeri [μm]
Rz	: Yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki düşey mesafe [μm]
v/v	: Hacimce 100 birim çözeltilerde bulunan çözünenin hacimce oranı
w/v	: Hacimde ağırlıkça yüzde
θ	: Temas açısı [$^{\circ}$]
μJ	: Mikro joule
μm	: Mikrometre [10^{-9} metre]

Kısaltmalar

BSA	: Sığır serum albumini (Bovine Serum Albumin)
CA	: Temas açısı / Contact Angle [$^{\circ}$]
CH ₂	: Metilen
CNC	: Bilgisayarlı nümerik kontrol
CoCr	: Kobalt-krom
CoCrMo	: Kobalt-krom-molibden
CoCrWNi	: Kobalt-krom-tungsten-nikel

CVUT	: ek Teknik Üniversitesi (Czech Technical University)
DLC	: Elmas benzeri karbon (Elmasın bazı tipik özelliklerini gösteren bir amorf karbon malzemesi sınıfı)
DLIP	: Doğrudan lazer desenleme (Direct Laser Interference Patterning)
EBM	: Elektron demeti eritme (Electron Beam Melting)
ECM	: Elektrokimyasal işleme
EDM	: Elektrik deşarj makinası
EDTA	: Etilen diamin tetra asetik asit
ELI	: Aşırı düşük ara yer (Extra-Low Interstitial)
GUR 1020 EXL	: Vitamin E takviyeli ve gama ışınlı sıkıştırma kalıplı polietilen (VE-ÇUYMAPE / UHMWPE EXL)
GUR 1020 PE	: Standartn sıkıştırma kalıplı (UYMAPE / UHMWPE)
GUR 1020 XL	: Gama ışınlı sıkıştırma kalıplı (ÇUYMAPE / UHMWPE XL)
HiLASE	: Yüksek teknoloji lazer araştırma merkezi (Hi-tech laser research center)
HSFL	: Yüksek frekanslı LIPSS
HXLPE	: Yüksek apraz bağlı polietilen
IR Marker	: İnfared lazer
KGW	: Potasyum gadolinyum tungstat
kGy	: İyonlaştırıcı radyasyonun, maddenin birim kütlesinde soğurduğu 1 Joule'lk enerji miktarı
KrF	: Kripton florür
KUYTAM	: Koç Üniversitesi Yüzey Teknolojileri Araştırma Merkezi
LIPSS	: Lazer kaynaklı periyodik yüzey yapısı (Laser-Induced Periodic Surface Structures)

LSFL	: Düşük frekanslı LIPSS
mM	: Mili mol
MtCO ₂	: Metrik ton karbondioksit eşdeğeri
Nd:YAG	: Neodim katkılı itriyum alüminyum granat; Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂ (Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet)
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PEEK	: Polietereterketon
PIRAC	:Toz daldırma reaksiyon destekli kaplama (Powder Immersion Reaction Assisted Coating)
PP	: Polipropilen
SBF	: Simüle vücut sıvısı (Simulated Body Fluid)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
THP	: Kalça protezi (Total Hip Replacement)
UYMAPE	: Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (Ultra High Molecular Weight Polyethylene : UHMWPE)
UV Marker	: Ultraviyole lazer
VEHXLPE	: Vitamin E eklenmiş ve çapraz bağlı polietilen
XeCL	: Ksenon monoklorür
Yb: KGW	: İterbiyum katkılı potasyum gadolinyum tungstat (Ytterbium-doped Potassium Gadolinium Tungstate)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Doğadaki bütün cisimler bir yüzey desenine ve profiline sahiptir. Malzeme yüzeyindeki doku veya desensel özellikler o malzemenin çevre ile etkileşimini belirlemektedir. Teknik olarak ifade edilirse desen (texture) farklı yöntemler ile yüzeyde elde edilen düzensizlikler, çıkıntılar veya mikro-çukur olarak ifade edilmektedir. Literatürde yüzey üzerinde mikro boyutlarda yapılan desenleme işlemleri farklı şekillerde adlandırılmıştır. Mikro çukur/oyuk/kuyu (micro cavity, micro dimple, micro well), yağ cebi (lubricant pocket) bu tanımlardan sadece birkaçıdır.

Dünyada elektronik, otomotiv, havacılık, yüzey şekillendirme teknolojileri ve medikal alanındaki rekabetin ve yeni ürün geliştirme ihtiyacının artması bu ürünlerin performanslarının, fonksiyonlarının ve ömürlerinin artırılması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Yüzey desenleme yöntemleri birçok endüstri dalında malzemelere üstün özellikler kazandırmak için kullanılmıştır. Bu özelliklere örnek olarak, yüzeyde su, yağ, buhar kovuculuk (kendi kendini temizleme) veya tersi olarak ıslatma kabiliyetini artırma, tutunmayı kolaylaştırma (sürtünmeyi artırma), sürtünme ve aşınmayı azaltma, korozyon direncini artırma, kimyasallara karşı dirençli olma, yağlayıcılık, anti-bakteriyel özellik kazandırma, vb. verilebilir. Bu nedenle yüzey desenleme işlemleri; modern teknoloji, bilim ve mühendislikte giderek daha önemli bir rol kazanmaktadır (Wojciechowski vd., 2017).

Tez kapsamında güncel bir araştırma konusu olan kalça ve diz implant bağlantılarındaki sürtünmenin dolayısı ile aşınma etkilerinin oluşturduğu yüzey hasarının azaltılması ve böylece kullanım ömürünün artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla tipik bir kalça protezinde eş çalışan parçalar arasında yer alan Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UYMAPE)/(Ultra High Molecular Weight Polyethylene: UYMAPE) malzemeden üretilen numunelerin; fiber/nanosaniye ve femtosaniye lazer cihazları ile farklı yüzey desenlemeleri ve tribolojik testleri gerçekleştirilmiştir. Optimum lazer proses parametreleri ile bu parametrelere bağlı olarak malzeme üzerinde oluşturulan mikro-çukur yapıların uygunluğu, kullanılan lazer türünün ilgili malzeme üzerindeki etkisi ve oluşturulan çukur formlarının tribolojik etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu işlem için biyomedikal

alanda özellikle kalça ve diz protezi implant içerisinde yağlayıcı olarak yaygın kullanılan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen grubuna ait 3 farklı malzeme; GUR 1020 PE (standart polietilen/UYMAPE), GUR 1020 XL (75 kGy iyonlaştırıcı gama ışın radyasyonlu ve çapraz bağlı polietilen/ÇUYMAPE) ve GUR 1020 EXL (vitamin E Takviyeli 75 kGy iyonlaştırıcı gama ışın radyasyonlu ve çapraz bağlı (cross-linked) polietilen/VE-ÇUYMAPE) malzemeleri kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar, blok-disk (blok-on-disc) triboloji test cihazı, blok şeklindeki UYMAPE numuneleri ve karşı yüzey olarak Ti6Al4V plakaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polimer esaslı olan malzemeler üzerinde lazer yüzey desenleme işlemi ile 40 µm, 100 µm, 150 µm, 300 µm ve 600 µm çaplarındaki mikro-çukurların oluşturulması farklı özelliğe sahip olan lazer cihazları ile yapılması planlanmıştır. Yüzey desenlemedeki mikro-çukur çapı, derinlik ve alan desen yoğunluğu gibi farklı parametrelerin kombinasyonlarının tribolojik performansları rapor edilmiştir. Mikro-çukur yapılarının belirlenmesinde literatürde var olan çalışmalardan faydalanılmıştır (Nishimura vd., 1993; Young vd., 1998; Sağbaş, 2013). Deneysel testlerin sonrasında ilgili aşınma ve sürtünme katsayısı grafikleri çizilip irdelenmiştir. Ayrıca, aşınma hacimlerinin analizleri ve regresyon deklemleri Minitab 19 yazılım programı ile hesaplanmıştır.

Deneysel çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri laboratuvarında bulunan blok-disk triboloji test cihazı ve test edilen numunelerin yüzey görüntüleri için aynı birimdeki optik mikroskop ve profilometre cihazları kullanılmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Yüzey desenleme işlemleri günümüzde çok farklı amaçlar için (örneğin; sürtünme/aşınma azaltma, kendi kendini temizleme, su/yağ kovar yüzeylerin eldesinde, yüzeyde tutunmayı arttırmada, dekoratif amaçlı vb.) kullanılmıştır. Bu tür yüzeylere en bilinen örnek, nilüfer çiçeğinin yüzeyinde su tanelerinin tutunamamasıdır. Bu özellikten esinlenerek geliştirilen yüzeyler su kovucu (hydrophobic) veya yağ itici (oleophobic) olarak adlandırılmıştır. Lazer yüzey desenleme işlemi fiziksel veya kimyasal yöntemlerle oluşturulan mikro/nano boyutlu oyuklar, çıkıntılar veya kanallar ile yüzeylerde hidrofobiklik sağlamak ve bakterilerin yüzeye tutunmasının önüne geçilmektedir. (Wojciechowski vd., 2017, Neinhuis ve Barthlott, 1997, H. Zhang vd., 2016).

Rosenkranz vd. (2021), kuru sürtünme koşulları, karışık sürtünme ortamı veya tam film hidrodinamik yağlama altındaki desenli yüzeylerin sürtünme davranışını incelemişler ve yüzey desenlemenin aşınmaya karşı performansını arttırdığını rapor etmişlerdir. Aşınma durumu üzerinde olumlu bir etki bulmuşlardır. Adatepe vd. (2011), çelik-alüminyumdan yapılmış uçak motoru yatak malzemesi yüzeyinde oluşturulan mikro desenli yapıların sürtünme katsayısına etkilerini araştırmışlar ve çevresel olarak oluşturulan mikro çukurların sürtünme katsayısını azalttığını belirtmişlerdir. Lu ve Wood, (2020), literatürde son yirmi yılda yapılan desenleme çalışmalarının desenleme yapılmış yüzeyler üzerine yapılan çalışmaların neredeyse %100'ünde olumlu sonuçlar elde edildiğini ve desenleme çalışmalarının olumlu sonuçlar verdiğini incelemişlerdir.

Holmberg ve Erdemir, (2017), genel olarak dünyadaki enerji tüketiminin %23'ünün (119×10^{18} J) tribolojik temas çifti yüzeyleri üzerinden gerçekleştiğini belirtmektedirler. Bu miktarın %20'si sürtünmeyi yenmek için harcanırken, %3'ü (16×10^{18} J) aşınan parçaların yenilenmesi ve onarılması için harcanmıştır. Malzeme, yüzey ve yağlama teknolojilerindeki gelişmeler ile sürtünme ve aşınma kaynaklı enerji kayıplarının kısa vadede (8 yıl) %18, uzun vadede (15 yıl) ise %40 oranında azaltılabileceği öngörülmektedir. Öte yandan, ileri triboloji teknolojilerinin devreye girmesiyle sadece Avrupa'da atmosfere 1.460 Mt CO₂ daha az salınım yapılması ve kısa vadede 450 milyar Euro tasarruf edilebilmesi mümkündür.

Yüzey desenleme işlemi, eş çalışan kayar sistemlerde, makine bileşenlerinde, şanzıman sistemlerinde, içten yanmalı motor silindirlere ve mekanik salmastralarda büyük önem taşımaktadır (Rosenkranz vd., 2019; He vd., 2022; Arumugaprabu vd., 2018). Endüstrideki uygulamaların yanısıra, diz ve kalça protezi, diş implantı gibi medikal uygulamalarda da sürtünme, aşınma ve yüzey gerilimi gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılan desenleme işlemi gerçekleştirilmektedir (Aziz vd., 2020; Sedlaček vd., 2017).

Yüzey desenleme için literatürde birçok yöntem rapor edilmiştir. Lazer ile yüzey desenleme, elektrik deşarjlı desenleme, elektrokimyasal yöntem, odaklanmış iyon ışını yöntemi, kimyasal yöntemler gibi çeşitli üretim teknikleri ve yöntemleri ile mikro ve nano yüzey desenleri üretmek mümkündür. Her tekniğin esneklik, kullanılabilirlik, hassasiyet, maliyet (ilk yatırım, işleme, sarf malzeme, bakım) ve işleme hızı gibi bazı avantaj ve dezavantajları vardır (Arslan vd., 2016).

Yüzey desenleme yöntemleri (Arslan vd., 2016) tarafından aşağıdaki gibi kategorize edilmiştir;

- Lazer yüzey desenleme

- Kimyasal aşındırma
- Sol-jel işleme
- Mikro Elektrik Deşarj İşleme (Micro Electro Discharge Machining: Micro-EDM)
- Elektrokimyasal İşleme (Electro-chemical Machining: ECM)
- Bilgisayarlı Nümerik Kontrol (Computer numerical control: CNC) ile işleme
- Ultrasonik yöntemler
- Odaklanmış iyon ışını işleme yöntemi
- Vibro-mekanik desenleme

Bu yöntemler arasında işleme hızı ve maliyetin etkinliği, çevre kirliliği oluşturmaması, yüksek derecede boyutsal kararlılık sağlaması nedeniyle lazer yüzey desenleme yöntemi öne çıkmaktadır. Diğer malzeme işleme teknikleri ile karşılaştırıldığında, lazer yüzey desenleme (Laser Surface Texturing: LST); üstün esnekliği, hassasiyeti ve verimliliği nedeniyle son 10 yıldır büyük önem kazanmıştır (Wojciechowski vd., 2017; Shivakoti vd., 2021). Desenleme ile yüzeyde milimetreden (mm) nanometreye (nm) kadar farklı desenler oluşturulabilmektedir (Mandal vd., 2022).

1.2.1. Lazer Yüzey Desenleme Yöntemi

Lazer (uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonu /Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: LASER), ışığın uyarılmış radyasyon ile yükseltilmesini sağlayan bir optik düzenek olarak tanımlanmıştır. Lazer desenleme çalışmalarında femtosaniye (fs), pikosaniye (ps) ve nanosaniye (ns) ışın atımlı lazerler kullanılmaktadır. LST'nin diğer yöntemlere göre verimli, kompakt yapı, temassız bir üretim yöntemi olması, desenleme alanı için daha geniş alanlara etki etmesi ve maliyet açısından uygun olması nedeniyle öne çıktığı görülmektedir (Riveiro vd., 2018; Vorobyev ve Guo, 2015). Yöntemin kullanıldığı uygulamalara örnek olarak; sürtünme azaltma amaçlı hidrodinamik yataklar, içten yanmalı motorlar, biyoyumlu yüzeylerin imalatı, hidrofobik yüzeylerin üretimi vb. verilebilir. Öte yandan, lazerle yüzey desenleme yöntemi ile üretilen yüzeyler bakteri/mantar ve alglerin yüzeye tutunmalarının ve gelişmelerinin büyük oranda engellendiği; biyolojik sıvıların yüzey ıslatma kabiliyetinin iyileştiği, kemik içi implant uygulamalarında kemik yüzeyine tutunmanın arttığı, kumlama ile yapılan yüzey işlemlerine göre hücrelerin yüzeyde belirli bir doğrultuda çoğalmalarını sağlamada daha iyi yönlendirme sağladığı bildirilmiştir

(Holmberg ve Erdemir, 2017; Ellinas vd., 2021; Yuan vd., 2022; Nagpal vd., 2022; Khan vd., 2021).

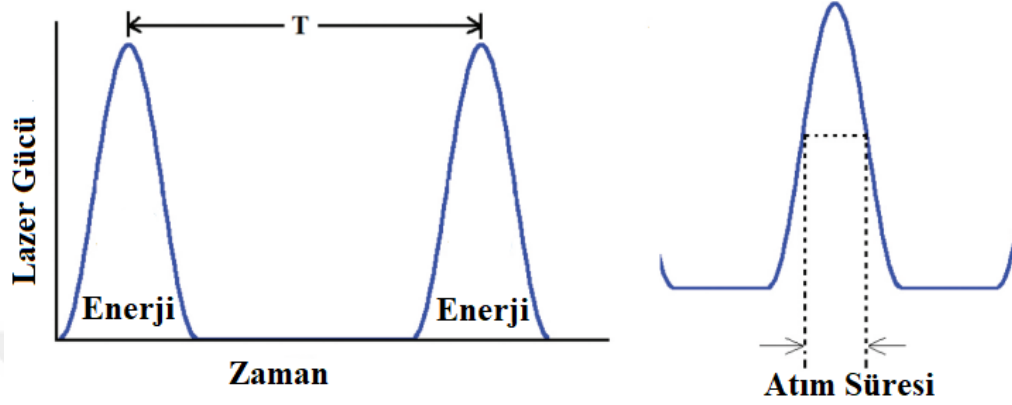
Biyomedikal alanında insan vücudunda diz ve kalça protez (Total Hip Replacement: THP, Total Hip Arthroplasty: THA)'lerde yaygın olarak UYMAPE polimer malzemesi kullanılmıştır. Genel özelliği ise yüksek yağlama performansına sahip ve sağlık açısından canlı vücudu ile uyumlu polietilen grubu bir malzeme olmasıdır (Riveiro vd., 2014). Riveiro vd. (2018), tarafından lazer esaslı yöntemlerle çeşitli çalışmalar yapılarak polimerlerin yüzeylerinde oluşturulmuş desenin, biyomedikal bir polimer olan ve klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan UYMAPE üzerinde biyolojik etkisi ile ilgili çalışmalar halen devam ettiği ve biyoyumlu yapılarda lazer desenleme işlemi için çok fazla araştırma gerektiren bir alan haline geldiğini tespit etmişlerdir. Mao vd. (2020), metallere seramiklere ve polimerlere kadar çeşitli malzemelerin tribolojik performansını geliştirme de genellikle UYMAPE polietilen malzeme üzerinde çalışma yapmışlardır.

Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilenin tribolojik performansını iyileştirmek için yüzeyde yapılacak desenleme işlemi, polietilen malzemenin yüksek eriyik viskozitesi nedeniyle sorunlu bir duruma neden olabilmektedir (Hussain vd., 2019). Bu nedenle son zamanlarda nanosaniye, pikosaniye ve femtosaniye lazer desenleme yaklaşımları; yüzey modifikasyonu, farklı şekil ve boyutlarda desenlerin oluşturulması ve davranışlarının incelenmesi açısından bu tip lazerlerin kullanımı yaygınlaşmıştır (Kumar vd., 2021).

Mühendislik ve biyomedikal malzemelerin tribolojik performansının iyileştirilmesinde LST'nin mevcut yapısına ve kullanılan teknik parametrelerinin bilgisine sahip olmak önemli olmuştur (Hsu vd., 2021). Lazer desenleme için kullanılan bazı temel parametreler aşağıda (Şekil 1) verilmektedir.

- Dalga boyu (Wavelength): Lazer ışın dalga deseni için tekrarlanan lazer ışınları arasındaki mesafe
- Darbe(atım) süresi (Pulse Duration): Lazer sistemlerinin güvenliğini ve etkinliğini artırabilen dört parametreden biri ve genellikle ışın atım genişliği olarak da adlandırılan atım süresi (bir cihazın bir desen alanına vermesi gereken enerji için geçen süre)
- Lazer gücü (Laser Power): Lazer ışını tarafından iletilen birim zaman başına ışık enerjisi
- Frekans/etki (tekrarlama) süresi (Frequency/Repetition Rate): Lazer cihazı üzerinden çok kısa ve yüksek frekanslı darbeler(atımlar) gönderilmesi ve

gönderilen atımın geri dönüş sinyallerinin gelme süresi (gönderilen bir atım sinyalinin başlangıcından iletilen ikinci sinyal başlangıcına kadar geçen süre) (URL-1, 2022; Farkas vd., 2013).

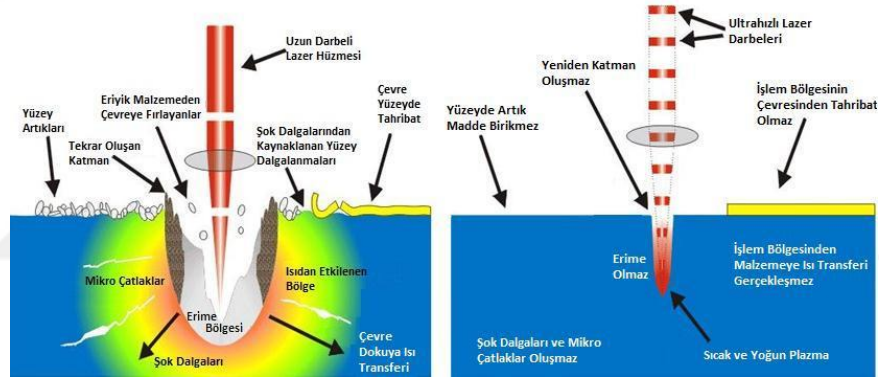


Şekil 1. Lazerin optik gücü (W) ve zaman (s) grafiği (solda); lazer ışınının atım genişliği veya atım süresi (Pulse Duration) (sağda) (Viskup, 2016).

Literatürde hem polimer hem de metalik esaslı yüzeylere lazer yüzey desenleme işlemi uygulanmış birçok araştırma bulunmuştur. Yüzey deseni oluşturmak için en çok kullanılan yöntemin lazer işleme olduğu görülmektedir. Lazer yüzey desenleme için CO₂, Nd: YAG (neodim katkılı itriyum alüminyum granat: Nd: YAG), KrF (Kripton Florür) excimer, XeCl (Ksenon Monoklorür) excimer, pikosaniye ve femtosaniye lazerler kullanılmıştır (Fernández-Pradas vd., 2012; Lorusso vd., 2008; Riveiro vd., 2014; Torrisi vd., 2010; Velardi vd., 2010; Wahab vd., 2016; Wang vd., 2018). Pikosaniye ve femtosaniye ultra hızlı lazerler, yüzey deseni oluşturmak için en çok kullanılan lazer sistemleri olmuştur (Wang vd., 2018).

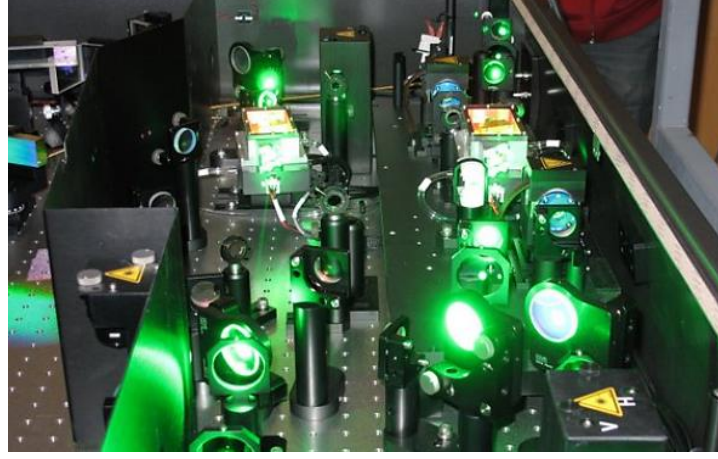
Romano vd. (2019), lazer cihazlarının kritik desenleme etkilerini ve uzun-kısa ışın atımlarının etkilerinin araştırmışlardır. Genellikle ultra hızlı kısa ışın atımlı (ultrafast- short pulse laser) femtosaniye lazer, kısa ışın atımlı (short-pulse laser) pikosaniye lazer ve uzun ışın atımlı (long-pulse laser) nanosaniye lazer sistemleri olmakta ve malzeme üzerinde sadece odak noktasında çok yüksek hassasiyette desenleme işlemlere izin vermektedirler. Kısa atım sürelerinde ve büyük anlık ışın uygulamaları ile doğrudan lazer ışını işlem yapılacak kısma etki etmektedir. Etkileşen bölgenin malzemede erime, bozulma veya hasarına izin vermeden odak noktasının çevresine neredeyse sıfır hasar ile desenleme işlemini yapılabilmektedir (Şekil 2).

Femtosaniye lazerlerde, ultra kısa lazer atım süresi yüksek kaliteli ve hassas malzeme işleme üretmek için kullanılmıştır. Ultra kısa atım süresi yalnızca elektronlarla etkileşime girebilmekte ve lazer atımının malzemelerle etkileşimi sırasında ısı iletiminin sınırlı olduğunu bilinmektedir. Buna karşılık, malzeme üzerinde nanosaniye atım süreli ışınlama, malzemenin yüzeyi sürekli olarak ısınmasına yol açmıştır. Lazer atım enerjisi daha sonra ısı iletimi ile lazer nokta boyutunun dışındaki bir alana yayılması ile ışınlanan hedefin kaynamasına veya buharlaşmasına neden olabilmekte ve kontrol edilemeyen bir eriyik tabakasının üretilmesine yol açabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı lazer atım süresi, lazer ablasyon işleminde önemli bir parametre olmaktadır. Malzemelerin ablasyonu için uzun atım süresi (nanosaniye lazer) ve ultra kısa lazer atım süresi (femtosaniye-pikosaniye lazer) arasında oldukça büyük farklılıkların olduğu sonucuna varılmıştır (Viskup, 2016).



Şekil 2. Uzun ışın atımlı lazerlerin malzeme üzerindeki etkisi (solda), kısa ışın atımlı lazerlerin (sağda) malzeme üzerindeki etkisi (Lorusso vd., 2008).

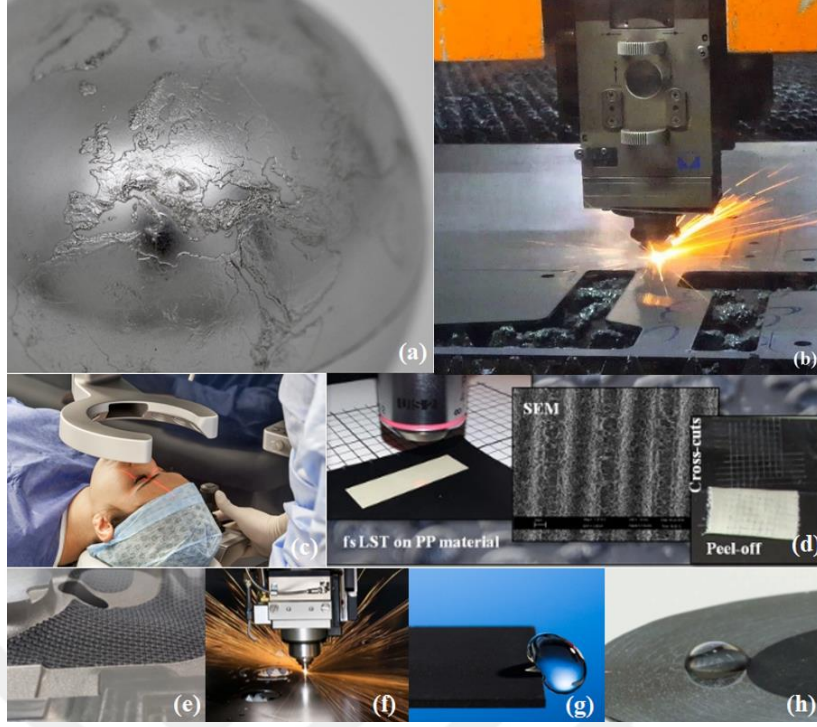
Femtosaniye atımlı lazer makinesinin optik iç detayı Şekil 3'te verilmektedir. Light Conversion (Vilnius, Litvanya) şirket envanterinde bulunan femtosaniye lazer parametreleri; 190 fs ve 20 ps arası ayarlanabilir ışın darbe(atım) süresi, 2 mJ maksimum atım enerjisi ve 80 W maksimum çıkış gücü değerlerine sahiptir (URL-2, 2021). Ayrıca, birçok farklı alanlarda kullanılan lazer cihazlarının uygulama alanlarına ait detaylar Tablo 1 ve Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 3. Femtosaniye ışın atımlı lazer cihazının optik iç detayı (URL-3, 2021).

Tablo 1. Literatürde kullanılan lazerler ve uygulama alanları

Lazer Çeşitleri	Uygulama Alanları	Referanslar
Fiber Lazer	Savunma ve otomotiv sanayisi, talaşlı imalat sektörü, metal yüzey işleme ve paslanmaz çelik malzeme	(Ta vd., 2016; Teleginski vd., 2014)
CO ₂ Lazer	Metal kesme, plastik kaynak, Hastelloy C276 ve UYMAPE malzeme yüzeyi	(Nagpal vd., 2022; Ta vd., 2016; Teleginski vd., 2014)
Excimer Lazer	Kesme ve delme işlemleri, UYMAPE ve PEEK malzeme	(Riveiro vd., 2018)
Nd: YAG / Nanosaniye Lazer	Bakır, AISI 316L, X6Cr17, Ti6Al4V, UYMAPE, 316L ve paslanmaz çelik malzeme yüzeyi	(Nagpal vd., 2022; Patel vd., 2018; Rafieazad vd., 2018; Shum vd., 2013; Xia vd., 2019; Yılbaş vd., 2014; Yılbaş ve Ali, 2016; Yuan vd., 2022)
Pikosaniye Lazer	UYMAPE, seramik, metalik alaşımlar, fiberglas, UYMAPE, PMMA, AISI 316L çelik ve PEEK malzeme yüzeyi	(Aizawa, 2019; Chun vd., 2016; Costil vd., 2014; Gedvilas ve Raciukaitis, 2005; Nagpal vd., 2022; Raciukaitis ve Gedvilas, 2005)
Femtosaniye Lazer	Bakır, UYMAPE, CoCrMo, Titanyum alaşım, 100Cr6 Çelik, seramik ve metalik alaşım yüzeyi	(Ahsan vd., 2013; Costil vd., 2014; Hauschwitz vd., 2021; Long vd., 2015; Nagpal vd., 2022; Wang, 2020)

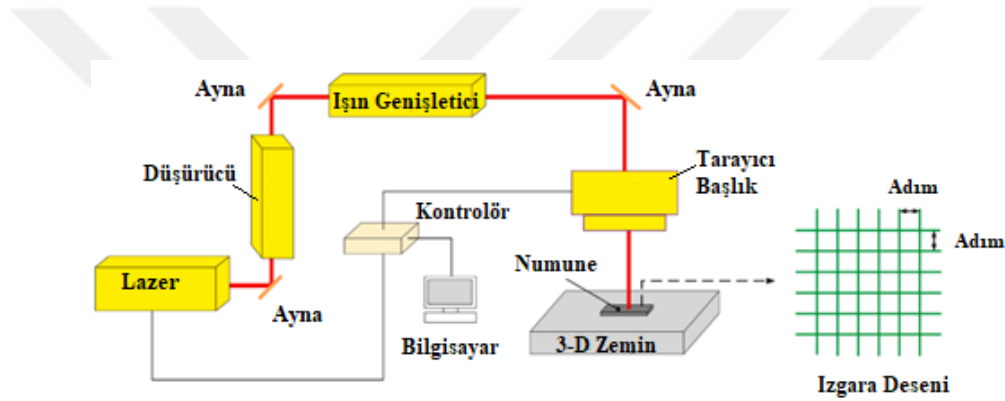


Şekil 4. Lazerin cihaz endüstrideki kullanım yerleri; (a) malzeme yüzeyinde dekoratif (dünya haritası) çalışmalarda lazer desenleme kullanımı (URL-4, 2019); (b) CO₂ lazer ile metal parça delme işlemi (URL-5, 2020); (c) göz korneasının yeniden şekillendirilmede ve görme kusurlarını giderilmede kullanılan excimer lazer (URL-6, 2021); (d) polipropilen malzeme yüzey desenleme işlemi için kullanılan femtosaniye lazer cihazı (Guarnaccio vd., 2021); (e) kalıp üretiminde lazer sisteminin kullanımı (URL-7, 2019); (f) metal malzeme kesim veya işlemede fiber lazer kullanımı (URL-8 2021); (g) ultra-kısa ışın atımlı lazer ile hidrofobik yapının oluşturulması (URL-9, 2019); (h) su tutucu veya kovucu yapı oluşturmada pikosaniye lazer kullanımı (URL-10, 2020).

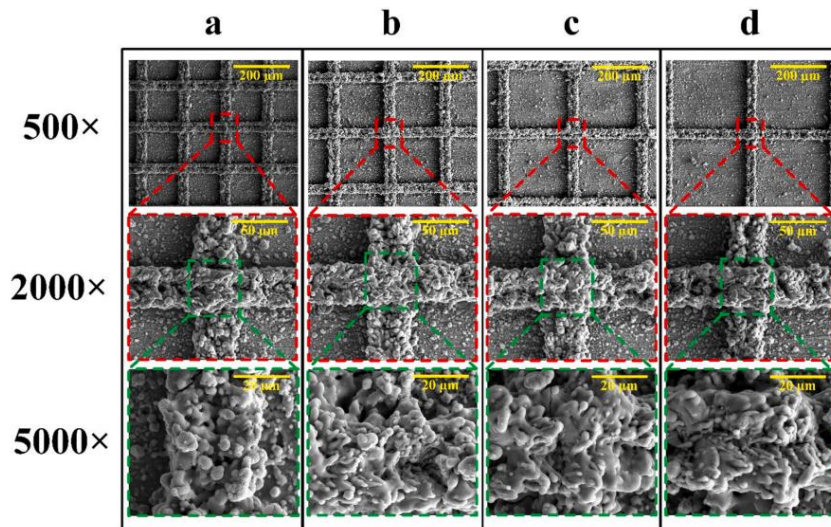
Mühendislik uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, eliptik desenlerin yüksek yük taşıma performansı sağladığı ve üretimlerinin daha uygun maliyetli olduğu belirtilmektedir. İmplant malzemesi üzerine yakın zamanda yapılan bir çalışma; X/Y tarayıcı, odaklama lensi ve nanosaniye fiber lazeri içermektedir. Dalga boyu 1064 nm, çıkış gücü 10 W, tekrarlama hızı 20 kHz ve atım süresi 50 ns (IPG, Brubach, Almanya) olan lazer cihazı, inconel 718 nikel alaşım malzemesi üzerinde çizgi veya ızgara desenli süperhidrofobik yüzeyler oluşturularak nanosaniye lazer cihazı sayesinde ile başarılı sonuçlar alınmıştır (Yang vd., 2019). Kaymalı yataklara uygulanan yüzey desenleme

işlemlerinde şekil, geometri ve desen yoğunluğunun tribolojik performans üzerinde önemli rol oynadığını ifade edilmektedir (Qiu vd., 2013).

Wang vd. (2021), yaptıkları çalışmada, %99.6 saflıkta ticari titanyum (Ti) levha malzeme yüzeyinde kirleticileri gidermek için art arda aseton, etanol ve deiyonize su ile ultrasonik olarak temizleyerek lazer yüzey desenleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. 355 nm UV lazer ile (AWAVE, Advanced Optowave) desenleme işlemi gerçekleştirilmiş ve elde edilen yüzeyler Şekil 5'te verilmiştir. Işın atım süresi 20 ns, tekrarlama hızı 30 kHz, ortalama lazer gücü 14.7 W ve atım enerjisi 0.5 mJ olarak kullanmıştır. Şekil 6'da Ti malzeme yüzeylerinin farklı desen ölçülerindeki taramalı elektron mikroskop (Scanning Electron Microscope: SEM) görüntüleri verilmiştir.

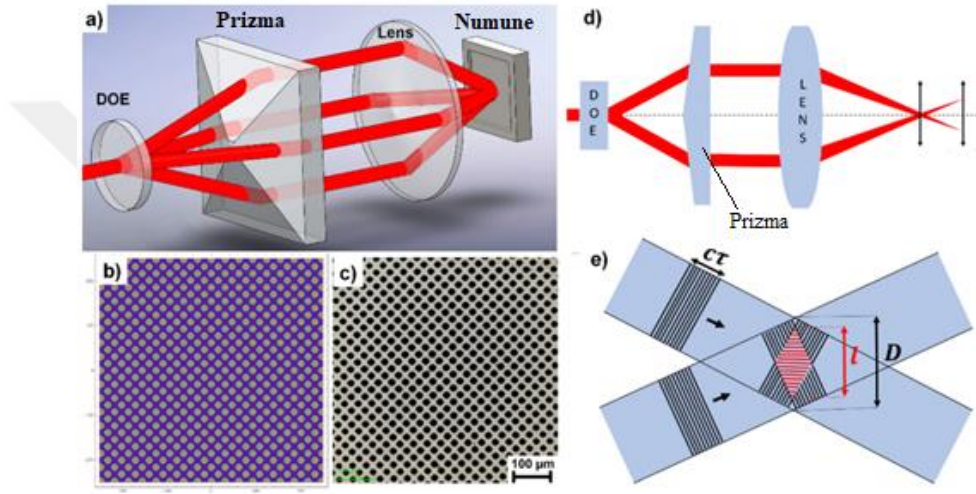


Şekil 5. Tipik bir lazer desenleme sistem şematığı ve desen görseli (Wang vd., 2021).



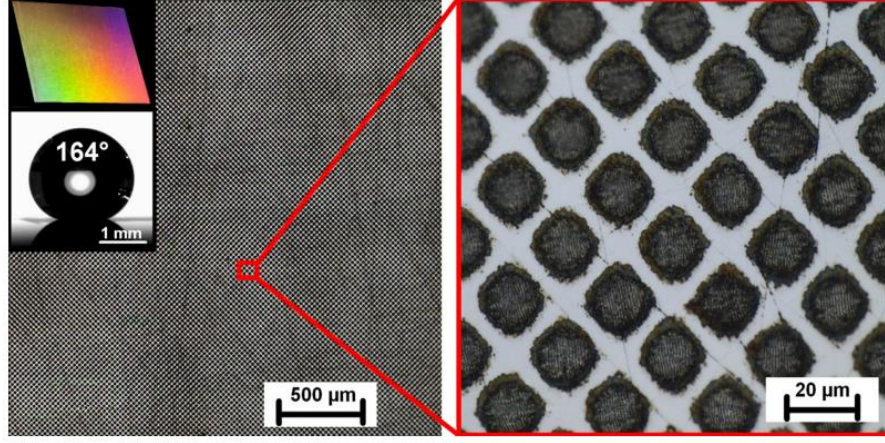
Şekil 6. Farklı ölçülerde lazer desenli Ti yüzeyi SEM görüntüleri: (a) 150 µm; (b) 200 µm; (c) 250 µm; (d) 300 µm (Wang vd., 2021).

Doğrudan lazer desenleme (Direct laser interference patterning: DLIP) kullanılarak AISI 316L çeliğinin yüzeyinde lazer ışınları ile aynı anda binlerce noktada desenlemeler oluşturulmuştur. Hauschwitz vd. (2021), 1030 nm dalga boyunda, 3 mJ'e kadar atım enerjisi olan ve 1.7 ps (pikosaniye) atımlı lazer sistemi kullanmışlardır. Lazer ışını, bir prizma ile hizalanan ve Şekil 7'de gösterildiği gibi numune yüzeyinde girişim deseni oluşturmak için mercekle tarafından arka arkaya dört ışının malzeme yüzeyine gönderilmesi ile desenli yapılar oluşturulmuştur (Hauschwitz vd., 2021).



Şekil 7. (a) Dört ışınlı DLIP lazer desenleme işlemi; (b) hesaplanmış girişim deseni; (c) numune yüzeyinde oluşturulmuş desen; (d) büyük desenleme alanı ve verimlilik elde etmek için kaydırılmış odak sistemi; (e) İşaretleli kısımda ışın çapı D ve girişim alanı çapı l olan girişim bölgesi (Hauschwitz vd., 2021).

Kullanılan lazer sistemi ve pikosaniye ışınları ile çelik yüzey üzerinde aynı anda çok sayıda mikro-çukurlu yapı üretilmiştir. Sistemde kullanılan odak düzlemini kaydırarak, daha fazla kırınım ile önemli düzeyde işlevsel yüzey üretilebilmektedir. HSFL (yüksek uzay frekanslı LIPSS) ve LSFL (düşük uzaysal frekanslı LIPSS) içeren yüzeyler üretmek için lazer sistemi ile geniş bir alan üzerinde desenler oluşturulmuştur. Bir LSFL örneği üzerindeki su damlasının ve lazer desen formunun görüntüsü Şekil 8'de verilmektedir.



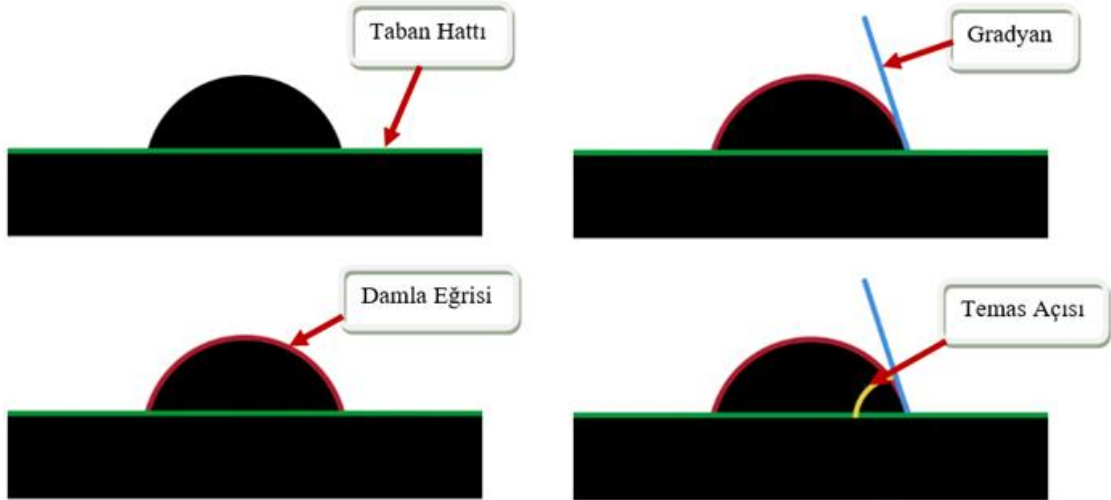
Şekil 8. Lazer desenli malzeme yüzeyine damlatılmış 8 μ l su damlasının görüntüsü (solda) ve 2 mJ atım enerjisi kullanılarak desenli alan (sağda) (Hauschwitz vd., 2021).

Dorner-Reisel vd. (2020), biyomedikal alanda kullanılan kobalt krom molibden (CoCrMo) malzemesi üzerinde biriktirilen amorf karbon-hidrojen (a-C:H) olarak da adlandırılan hidrojene elmas benzeri karbon plakanın, krom nitür ve amorf karbon-hidrojen (CrN + a-C:H) kaplı bilyeye karşı sürtünme davranışını iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu amaçla, CoCrMo (Ra: 0.55 μ m) 30 dakika boyunca ultrasonik cihazda etanol içinde kimyasal olarak temizlenmiştir. Ardından, desenleme işlemi femtosaniye (PHAROS 15-1000-PP) (Light Conversion, Litvanya) lazer sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu sistem, 1028 nm dalga boyunda, 220 fs süreli lineer polarize lazer atımları sağlayan iterbiyum katkılı potasyum gadolinyum tungstat Yb: KGW (Ytterbium-doped Potassium Gadolinium Tungstate: Yb: KGW) tabanlı bir lazer sistemini içermektedir. 220 fs atım süresine sahip ultra kısa atım lazer ışını, a-C:H kaplı tıbbi sınıf CoCrMo plaka üzerinde 5.09 ± 0.41 μ m ortalama çukur derinliği oluşturmuştur. Ultra-kısa lazer atımları ile hidrojene elmas benzeri karbon kaplamaların lazerle desenlenmesi, lazer çukur kenarlarında sadece küçük bir bölgenin grafitleşmesine sebep olmuştur. Bu da yöntemin, malzeme yüzeyinde yanık etkisi olmadan olumlu yönde malzemeye kazandırdığı avantaj olarak belirtilmiştir (Dorner-Reisel vd., 2020).

1.2.2. Yüzey Temas Açısı

Yüzey ıslanabilirliği ile yakından ilgili olan yüzey yapısının (nano/mikro seviyedeki pürüzlülük) ve malzemenin üzerine düşen sıvının yüzey temas açısı hidrofobiklik için oldukça önemlidir. Islanabilirlik terimi, bir yüzeyin sıvının etkileşimine tepki verme şeklini ifade etmekte ve ıslanabilirlik, katı yüzeylerin önemli bir özelliği olmuştur (Law, 2014). Katı yüzeylerin ıslanabilirliği için en önemli parametre, serbest yüzey enerjisinin bir sonucu olan temas açısı θ 'dir (Romano vd., 2019). Şekil 9'da bir temas açısının yüzeye düşen su veya yağ damlası üzerinden nasıl belirlenebileceği açıklayan parametreler verilmektedir. Burada genel olarak; ıslanabilirlik, temas açısı (Contact Angle: CA) ile ayırt edilmektedir (Law, 2014).

Su kovucu yüzeyin elde edilmesi, statik temas açısının "sabit damla" yöntemiyle ölçümü ile kontrol edilmektedir. Örneğin, nilüfer yaprağı üzerinde ölçülen 162° lik temas açısı, karşılaştırılan diğer bitkiler arasında en yüksek temas açısı değeridir. Su veya yağ sıvı akışkan olduğundan, damlacıklar yüzeye yayılırsa yüzey hidrofilik, tam tersi olarak damlacıklar yuvarlak veya yuvarlağa yakın halde kalırsa hidrofobik davranış sergiler (Ensikat vd., 2011).



Şekil 9. Malzeme yüzeyindeki temas açısını belirleyen parametreler (URL-11, 2022).

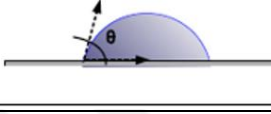
Yüzeye damlayan sıvıların temas açısının sayısal değerlerine bakıldığında;

- 150° 'den büyük su temas açısına sahip yüzeyler genellikle süperhidrofobik,

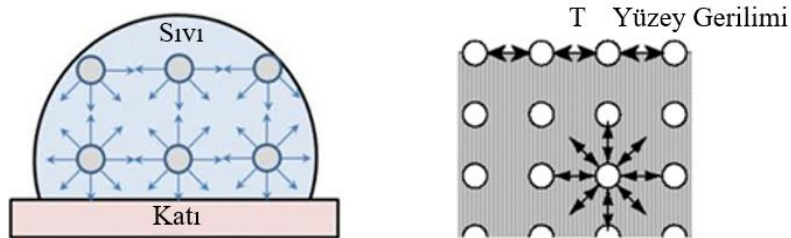
- Temas açısı 90° 'den büyük ise hidrofobik,
- 90° 'den az temas açısına sahip yüzeyler ise hidrofilik
- Yaklaşık 0° ise süperhidrofilik,

olarak sınıflandırılmakta ve bu sınıflandırma ayrıca Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Yüzey morfolojik yapısına göre temas açısının sınıflandırılması

Yüzey	Temas Açısı	Şekil
Süperhidrofobik	$> 150^\circ$	
Hidrofobik	$> 90^\circ$	
Hidrofilik	$< 90^\circ$	
Süperhidrofilik	$\sim 0^\circ$	

Temas açısı ile ilgili olarak diğer bir önemli parametre ise yüzey gerilimidir. Sıvı içindeki bir molekül komşu moleküller tarafından her yönde eşit kuvvetle çekilirken, sıvı yüzeyindeki bir molekül sadece altındaki moleküllerin etkisiyle içe doğru çekilmekte ve bunun sonucunda sıvı yüzeyi gergin bir zar (Şekil 10) şeklini almıştır (Erayman ve Korkmaz, 2017).

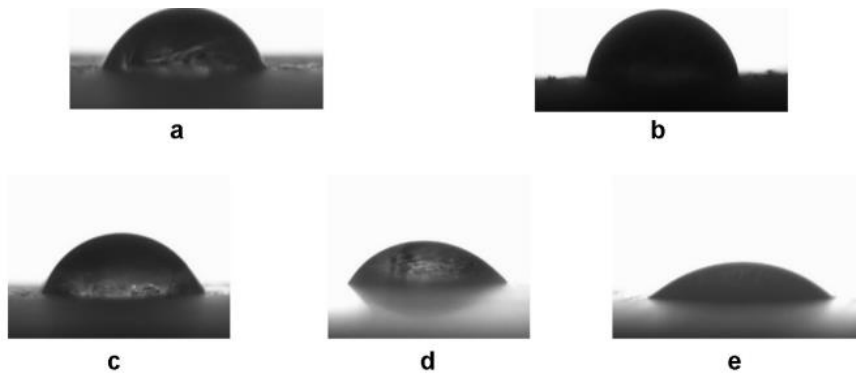


Şekil 10. Katı bir yüzey ve üzerindeki sıvı moleküller arasındaki kohezyon kuvvetleri (Yoon vd., 2014; URL-12, 2022).

Aynı şekilde molekülleri yüzeye çeken kuvvetler de etkili olduğu için aralarındaki mesafe hafifçe açılır ve sıvı yüzeyindeki moleküller arasındaki ortalama mesafe, sıvıdaki ortalama mesafeden daha fazladır. Bu mesafe artışının oluşturduğu gerilim, sıvının yüzey gerilimidir. Sıvı yüzey, görünmez bir zarla kaplanmış gibi davranmıştır. C276 alaşımı üzerinde hidrofobik yüzey elde etmek ve sürtünme karakteristiklerini değiştirmek için yüksek basınçlı azot gazı ortamında lazer kullanılmış ve bu yöntemle yüzeyde oluşturulan mikro yapıların yüzeyin hidrofobik özelliğini belirgin derecede arttırdığı gösterilmiştir (Yılbaş ve Ali, 2016).

Riveiro vd. (2014), polimerik biyomalzemeler üzerinde lazer yüzey desenleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün genel olarak arttığını ve bunun sonucunda temas açısının desensiz duruma göre azaldığını bildirmiştir. Sarbada ve Shin (2017), Ti safir femtosaniye lazer (dalga boyu 800 nm, ışın atım süresi 100 fs, atım tekrarlama hızı 1 kHz) desenleme işleminden sonra yüzeye polidimetilsiloksan (PDMS) ince film eklenmesi ile bakır malzeme yüzeyinde temas açısını 165° olarak elde etmişlerdir. Nayak vd. (2013), PDMS ve Ti safir lazer kullanarak yaptıkları çalışmada ise 154° temas açısı elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, UYMAPE malzemesi üzerinde nanosaniye lazer ışın atımları altında farklı lazer dalga boylarının (1064, 532 ve 355 nm) UYMAPE numunelerinin yüzey modifikasyonu üzerindeki temas açısı sonuçlarını görmek için yapılmıştır (Riveiro vd., 2014). Farklı koşullarda yapılan lazer desenli yüzeylerin yüzeyinde su damlasının oluşturduğu temas açılarının ölçümü Şekil 11'de verilmektedir. En yüksek temas açısı karbon kaplı işlem görmemiş UYMAPE yüzeyinde ortaya çıkmıştır.



Şekil 11. UYMAPE yüzeylerde temas açısı ölçüm görüntüleri; (a) işlem görmemiş UYMAPE (temas açısı 71°), (b) karbon kaplı işlem görmemiş UYMAPE (temas açısı 81.9°), (c) 1064 nm (temas açısı 71.7°), (d) 532 nm (temas açısı 56.2°), (e) 355 nm (temas açısı 54.8°) (Riveiro vd., 2014).

1.2.3. Kalça Protezi ve UYMAPE'nin Önemi

Kalça implant tedavisi (kalça artroplastisi), günümüzde en başarılı ortopedik müdahalelerden biri olarak kabul edilmektedir. En erken kaydedilen kalça protezi girişimleri 1891'de Almanya'da gerçekleştirilmiştir (Knight vd., 2011). Modern kalça protezinin babası olarak bilinen İngiliz ortopedi cerrahı Profesör Sir John Charnley (1911-82), kalça implant çalışmalarından ilk başarılı operasyonu gerçekleştiren mucit ve yetenekli bir bilim adamıdır (Jackson, 2011). Ayrıca, modern kalça protezine öncülük etmiş ve prensipte bugün kullanılan protezlerin temelini oluşturmuştur (URL-13, 2022).

Medikal implant endüstrisi Dünya da giderek pazar büyüklüğü artan bir endüstri dalıdır. Artan yaşlı nüfus ve eklem rahatsızlıkları nedeniyle implantlar (kalça eklem implantları, diz implantları, omurga implantları vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Birleşmiş Milletler'in yayınladığı verilere göre dünya nüfusunun %13'ü 60 yaş üstü insanlardan oluşmakta ve bu oran her yıl %3 artmaktadır (Patil vd., 2020) (Czerniec ve Zubrzycki, 2021).

Her yıl dünya çapında bir milyondan fazla kalça ve diz ameliyatı gerçekleştirilerek hastalar için daha iyi yaşam kalitesi sağlanmaktadır. Yaşlanan nüfus ve artan obezite oranları nedeniyle bu ameliyatların önümüzdeki yıllarda artan bir seyirde devam etmesi beklenmektedir. Yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde 2005'ten 2030'a kadar diz protezlerinin (Total disc arthroplasty / TDA) %673 artarak 3.5 milyona, kalça protezlerinin (Total Hip Replacement: THP veya Total Hip Arthroplasty: THA) ise %174 artarak 572.000'e çıkması beklenmektedir (Barber vd., 2021; Khanna vd., 2017).

İngiltere'de her 10 kişiden birinde yaşamları boyunca diz protezine ihtiyaç duyacağı (Evans vd., 2021), Amerika Birleşik Devletleri'nde 2017 ve 2018 yıllarında kalça ve diz protezi vaka sayısının 1.2 milyon civarında olması ve vaka sayısının her geçen yıl artması (Cohen vd., 2021; Feng vd., 2021) konunun önemini ortaya koymaktadır. Amerika'da 2021 yılında ise 2020 yılına kıyasla %18.3'lük bir artış ile 2.4 milyon kalça ve diz ameliyatı yapılmıştır. Türkiye'de ise yılda 100.000 civarında kalça ve diz protezi cerrahi ameliyatı yapılmıştır (URL-14, 2022). Osteoartrit (eklem kireçlenmesi)'nin Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Birleşik Krallık, Fransa ve Avustralya gibi gelişmiş ülkelerin gayri safi milli hasılasının %1-2.5'ini oluşturduğu bilinmektedir (Salis vd., 2022).

Kalça ve diz implant uygulamalarda kullanılan malzeme türleri (polimerler, metaller, seramikler gibi) arasındaki implant bağlantılarında protez malzemelerinden önemli bir tanesi

olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen malzemesi, tıp alanında giderek artan bir şekilde tercih edilmektedir (Patil vd., 2020). Kalça veya diz eklemlerinin nominal çalışmasını yerine getiremeyecek durumlarda, canlı vücuduna yapılacak tıbbi ameliyatlara ile UYMAPE ve diğer protez malzemelerinin ömrünün uzun olması yönündeki çalışmaları içermektedir. Kalça protezi imalatında teflon, polyester, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, PMMA (Polimetil Metakrilat), paslanmaz çelik, CoCrMo, Ti6Al4V ve seramik olmak üzere farklı tür temel malzeme grupları kullanılmıştır. Femur başı malzemesi olarak genellikle paslanmaz çelik, CoCrMo ve zirkonya türü seramik malzemeler, asetabular ara yüzey malzemesi olarak ise UYMAPE ve alümina malzemeler kullanılmıştır (Barbour vd., 1999; Bhawe vd., 2022; Sağbaş, 2013).

UYMAPE sahip olduğu mükemmel biyouyumluluk özelliği, aşınmaya karşı yüksek direnç gösterme, kimyasal kararlılığı, vücut sıvısı ortamlarındaki kolay uyumluluğu, kendinden yağlayıcılığı, yük sönmeme özelliği ve düşük sürtünme katsayısı ile ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen son 30 yılda en çok kullanılan asetabular ara yüzey malzemesi olmaktadır (Hirwani vd., 2022; Sağbaş, 2013). İlâveten, UYMAPE malzemesi düşük aşınma hızı (0.15-0.2 mm/yıl) ve yüksek kristalli bir yapıya sahip olmasının verdiği avantajlar ile çeşitli uygulamada kullanılan medikal malzeme olmuştur (Patil vd., 2020). UYMAPE, endüstriyel uygulamalarda sulu veya yağlamalı yatakların çalışma ortamlarında sürtünme ve aşınma ya karşı olumlu sonuçlar verdiği bilinmektedir (Nagpal vd., 2022; Mandal vd., 2022; Kumar vd., 2021).

Grand View Research tarafından yapılan bir araştırmaya göre, UYMAPE pazar talebinin 2015-2024 arasında 60.9 kilotondan 204.8 kilotona çıkması beklenmektedir. Öte yandan, aşınma kalıntılarına, gama ışınlarına ve radyasyona maruz kalındığında serbest radikal oluşumunun neden olduğu oksidatif bozulma, UYMAPE implantlarda gözlenen bazı kritik problemlerdir. Bu problemler, UYMAPE'nin özelliklerini geliştirmek için farklı yenilikçi metodolojiler kullanılarak çözülmeye çalışılmışlardır (Patil vd., 2020; Fernández-Pradas vd., 2012). Hussain vd. (2019), ortopedik alanda yapılan implantın başarısızlığı, hareketli parçalar arasında oluşan aşınma partiküllerinden kaynaklandığını rapor etmişlerdir. UYMAPE'nin aşınması en aza indirilerek bu durumun ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Tribolojik performansı artırmak ve aşınmayı azaltmak için; malzemenin kristallik yüzdesi, çapraz bağlama veya fiber takviyesinin yanı sıra mikro kanal, mikro çukur, geometriler vb. dahil olmak üzere birçok yöntem kullanılmıştır.

Yüzeyde oluşturulan desenlemeler mikro tornalama ile yapılabileceği gibi, daha hassas ve hızlı bir teknik olan lazer yüzey desenleme işlemi ile de yapılabilmektedir. Lazer desenleme işlemi ayrıca yüzey pürüzlülüğünde ve ıslanabilirlikte çokça avantajlı olduğu tespit edilmektedir (Hussain vd., 2019; Sağbaş ve Durakbaşa, 2014). Hussain vd. (2019), UYMAPE yüzeyler üzerinde farklı desen formlarında oluşturulan tasarımların yüzey sıcaklığını, sürtünme katsayısını ve aşınmasını doğrudan etkileyip azaltabileceğini gösteren çalışmalar yapmışlardır.

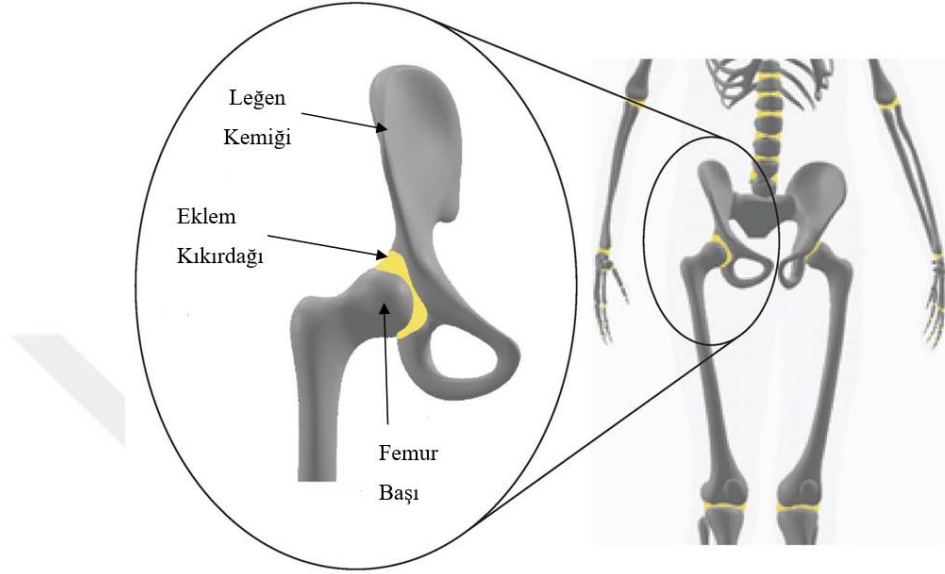
İmplantların mevcut ömrü 15 yıl civarı olduğu ve yüzey deseni oluşturmanın implantın tribolojik performansını ve dolayısıyla ömrünü arttırdığı iyileştirdiği bilinmektedir. Yüzey deseni olarak oluşturulan çukurlar, sınır yağlama koşullarındaki aşınma kalıntılarını hapsedebilmekte, temas alanını ve yapışmayı azaltarak aşınmayı azaltıcı etki oluşturmuştur (Ghosh ve Abanteriba, 2016). UYMAPE malzemenin teknik özellikleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. UYMAPE'ye ait mekanik özellikler (Kurtz, 2004).

	Yoğunluk (g/cm ³)	Maksimum Çekme Mukavemeti (MPa)	Kristallik Derecesi (%)	Çekme Uzaması (%)	Poisson Oranı	Erime Noktası (°C)
Değerler	0.932-0.935	21-28	39-75	350-525	0.46	125- 138

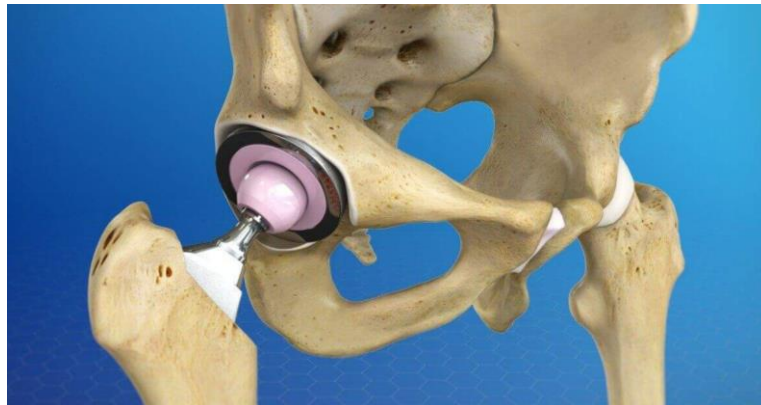
Allen ve Raeymaekers, (2021), yaptıkları çalışmada çapraz bağlama yöntemleriyle mukavemeti ve sertliği arttırılan UYMAPE'nin aşınmayı azaltıcı etkisini tespit etmişler ve yüzeydeki oksidasyon etkilerinin malzemenin kırılma ve yorulma direncini azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, malzeme de önemli ölçüde daha düşük aşınma ve daha yüksek oksidasyon direnci sergilemek için UYMAPE malzemesine E vitamini gibi antioksidan katkı maddeleri eklenerek VE-UYMAPE ve yüksek çapraz bağlı polietilen ÇUYMAPE oluşturarak çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarda kullanılan malzemenin kaynaklı olumsuzluklar ise örneğin; yüksek maliyetleri, uzun süreli klinik deneylerin olmaması ve hem kanda hem de idrarda tespit edilen metal iyonlarının (kobalt, krom ve titanyum) salınması metal-metal eklemleri için dez avantaj olarak sayılabilmektedir. Metal-polietilen bağlantılarında da bu iyonların anormal seviyeleri gözlenmiş ancak bu varyasyonlar çok daha düşük düzeyde rapor edilmiştir (Schwartzmann vd., 2012).

UYMAPE, kalça protezi içerisinde asetabular baş kısmın iç kısmında asetabular ara yüzey olarak görev yapmakta ve leğen kemiği ile femur başının bağlandığı noktaya (Şekil 12) cerrahi operasyon ile implant bağlantısı yerleştirilmektedir.



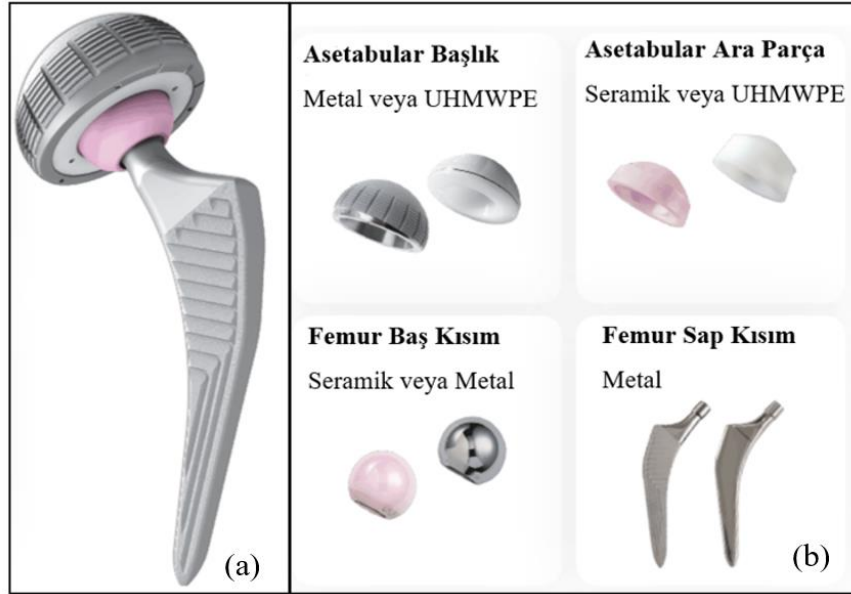
Şekil 12. İnsan vücudundaki leğen kemiği ile femur başı ayak bağlantısı (Allen ve Raeymaekers, 2021).

Kalça protezinde kullanılan seramik femur başı ve seramik asetabular ara yüzey eklenmiş kalça protez bağlantı örneği Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. İnsan vücudundaki seramik femur (uyluk kemiği) başı ve seramik asetabular ara yüzey ekli kalça protez bağlantısı (URL-15, 2021).

Kalça protezi ameliyatlarında kullanılan çeşitli seramik, polietilen ve metal parçaların montaj görünümü ve detayları Şekil 14'te verilmektedir.



Şekil 14. Kalça protezinin montaj görseli (a) ve kalça protez elemanlarının içerik detayları (b) (URL-16, 2022).

1.2.4. İmplant Bağlantılarında Triboloji

Biyotriboloji, insan veya hayvan vücudundaki etkileşimli yüzeylerin sürtünmesi, aşınması ve yağlanması ile ilgili bilim dalıdır. Mühendislik açısından, uzun ömürlü yapay etkileşimli yüzey parçalarının geliştirilmesi için, doğal sistemlerin ve kalça eklemlerinin biyotribolojik koşullar altındaki çalışma koşullarının iyi anlaşılması gerekmektedir. İnsan vücudunda 300'den fazla eklem bulunmaktadır. Eklem kıkırdağı, kemik, eklem sıvısı, bağlar, tendonlar ve dokular gibi birçok elemanlar doğal bir sinoviyal sıvılı eklem ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Sinoviyal sıvı, eklem boşluğunu doldurarak eklemli kemik yüzeylerini ayırmakta ve hem sıvı filmi hem de sınır yağlama rejimi altında çalışmaktadır (Darji, 2016; Liu vd., 2003).

Amerikan Ulusal Sağlık Enstitüsü biyomateryalleri “vücudun herhangi bir dokusunu, organını veya işlevini korumak veya iyileştirmek için herhangi bir süre boyunca kullanılabilen, kısmen veya tamamen artıran veya değiştiren herhangi bir madde” olarak

tanımlamıştır. Quinn vd. (2020), kalça protez (Total Hip Replacement/THP veya Total Hip Arthroplasty/THA) prosedürünü; hastalıklı kemiği değiştirmek veya taklit etmek için hasarlı bölgeye biyomateryal yerleştirilmesini içermesi şeklinde tanımlamışlardır. Kalça implant değişimine ihtiyaç duyan genç hastalar, protezlerinin elli yıl veya daha fazla dayanmasını beklemektedirler. Hastaların yalnızca %58'inin kalça protezinin 25 yıl sürmesini bekleyebileceği bilinmektedir. İkincil revizyon ameliyatları maliyetli olmasının yanı sıra nispeten düşük bir başarı oranı ve hastalar için ağırlı bir tedavi süreci olmaktadır (Mahmud vd., 2021).

Kalça eklemi insan vücudun da diz eklemine yanında daha çok yük taşıyan diğer bir eklemdir. Bu eklem, leğen kemiğinin ve bacağın birleştiği yerde bir tür soket ve mafsallı bir bağlantı görevi üstlenmektedir. Koşma ve atlama gibi birçok fiziksel aktivite sırasında daha yüksek tekrarlayan kuvvetleri de içeren bir yapıya sahiptir. Geçmişte birçok protez materyali geliştirilmiş, ancak bunlardan sadece birkaçı başarılı olmuştur. Kalça protez malzemesi için öne çıkan kriterler, iyi mekanik özelliklere ve iyi biyouyumluluğa sahip gözenekli kaplanmış yüzeylerin oluşturulmasıdır. Modern kalça ve diz protezlerinde aşınma kalıntılarının oluşması temel problemlerden biridir. Ayrıca, aşınma parçacıkları vücut içindeki hücreler üzerinde olumsuz reaksiyonlar gösterebilmektedir. Gözenekli metaller ve seramik polimer kompozitler gibi ileri tıbbi sınıf malzemeler, kalça protezinin ömrünün arttırılması adına ümit vadetmektedir (Das ve Chakraborti, 2018).

Ameliyatın karmaşıklığına ve kullanılan cerrahi tekniğe bağlı olarak, kalça implantı operasyonlarının ABD'deki maliyeti 31.000 - 45.000 ABD doları arasında değişmektedir. (URL-17, 2022). Kalça protezi, hastaların sadece kronik ağrısını azaltmamakta, aynı zamanda hareketliliklerini de geliştirerek yardımcı olmaktadır (Quinn vd., 2020).

Kalça protezi ameliyatı, hastalıklı eklemine bir kalça eklemi ile değiştirilmesini içermektedir. Ameliyat sırasında hasarlı femur başı ve asetabular ara parça çıkarılmakta ve yapay elemanlarla değiştirilmektedir. Protez, bir asetabular baş kısım, asetabular ara parça, metal femur gövde elemanı ve femur metal başlıktan oluşmuştur. Asetabular kap, doğal asetabuların iç kısmına monte edilmekte çoğu zaman içinde yağlayıcı polietilen veya seramikten yapılmış asetabular ara parça olarak görev yapmaktadır (Czerniec ve Zubrzycki, 2021).

Ortopedik implantlar, normal aktivite sırasında yüksek düzeyde mekanik gerilmeye, aşınmaya ve yorulmaya maruz kalan ve yük taşıyan eklemlerin işlevini eski haline getirmek için tasarlanmıştır. Merola ve Affatato (2019), Ti6Al4V, CoCrMo, paslanmaz çelik, özel

yüksek mukavemetli alaşımlar, alümina, zirkonya, zirkonya ile sertleştirilmiş alümina, PMMA, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ve seramikler ortopedik implantların imalatında en yaygın olarak kullanılan malzemeler olduğunu araştırmışlardır. Kobalt krom (CoCr) bazlı alaşımlar, biyomedikal uygulamalar için en yaygın olarak kullanılan alaşımlardandır. Krom, korozyon direncine katkı sağlarken demir, molibden veya tungsten gibi diğer elementlerin az miktarda eklenmesi ile yüksek sıcaklık özellikleri geliştirilebilmekte ve aşınma direncini arttırmaktadır. İmplant uygulamaları için kullanılan CoCr alaşımları arasında; CoCrMo (ASTM F75), CoCrMo (ASTM F799), kobalt-krom-tungsten-nikel CoCrWNI (ASTM F90) ve kobalt-nikel-krom (CoNiCr) bulunmaktadır. Öte yandan, implantlarda alaşımsız Ti (ASTM F67) ve alaşımlı Ti6Al4V (ASTM F136) malzemeler kullanılmaktadır.

Hareketli eklem olarak bilinen kalça bağlantısı, içerisinde sinovial sıvı olarak adlandırılan ve yağlayıcılık görevi üstlenen biyolojik sıvı ile sahip olduğu yuva geometrisi sayesinde vücut ağırlığının 8 katına kadar dinamik yükleri taşıyabilmektedir. Özellikle yaşlı bireylerde ortaya çıkan kemik erimeleri, iltihaplanmaları veya benzer hastalıklarda kalça protezi yüksek oranda olumlu sonuçlar vermesi sebebi ile çokça tercih edilen bir yöntemdir. İmplantların ömürlerinin sınırlı olması, hastaların ikincil operasyonlara gereksinim duymamaları için vücutta bulunan asetabular baş kısım, femur başı ve asetabular ara yüzey gibi elemanların ömür ve dayanıklılıklarının geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu da bağlantı yüzeylerinin biyotribolojik davranışlarının incelenmesi ve doğru bir şekilde anlaşılmasını gerektirmektedir (Sağbaş, 2013).

Kalça implantları, yürüme gibi uzun süreli, yüksek yüklemeli aktiviteler sırasında sürtünme nedeniyle ısınmaktadır. Çevresindeki yumuşak ve sert dokulardaki termal hasar ve sinoviyal sıvının bozulması implantın gevşemesine sebep olabilmektedir. Sürtünme kaynaklı ısının kalça implantların üzerindeki zararlı etkisi göz ardı edilemez bir durumdur. Bu yüzden düşük sürtünmeli implant malzemelerinin kullanımı ve iyileştirilmesi önemli bir husustur (Bergmann vd., 2001). Eklem değişikliklerinden sonra implantlar biyomekanik fonksiyonları çok iyi yerine getirmektedirler. Fakat, aşınmanın bir sonucu olarak toksik metal iyonları, istenmeyen implant gevşemesini tetikleyen birleşik sürtünme ve korozyonun etkisi insan vücudunu etkileyebilmektedir (Leksycki vd., 2022). Metalik iyonlar, vücudun idrarına ve kanına girerek çözünür metal tuzları oluşturmaktadır. Genellikle nikel vücuttan idrar yoluyla hızla atılırken CoCr vücutta uzun süre kalmakta, hatta krom vücudun konak dokularında kalabilmektedir (Das ve Chakraborti, 2018).

UYMAPE'nin aşınma kalıntıları, aseptik gevşemeye ve implant başarısızlığına neden olan olumsuz doku reaksiyonlarına ve üçüncü cisim aşınma hasarlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, özellikle genç ve daha aktif hastalarda implant ömrünü uzatmak için düşük sürtünme katsayısına ve üçüncü cisim aşınma direncine sahip malzemeler geliştirilmelidir. Kalça eklemlerinin yüzeylerindeki sürtünme katsayısı; eklem malzeme çiftlerine, eklem parçalarının geometrisine, yağlama durumuna ve yüklemeye göre değişmektedir. Kalça eklemi malzemelerin aşınma davranışının ve sürtünme faktörünün belirlenmesi gibi tribolojik değerlendirmeler yapmak için disk üzerinde pim (pin-on-disc), disk üzerinde bilye (ball-on-disc) ve plaka üzerine pim (pin-on-plate) gibi geleneksel tribolojik test yöntemleri kullanılmaktadır (Darji, 2016).

Polimerlerin zincir yapısının gama ışıması ile çapraz bağlı hale getirilmesi, gelişmiş aşınma direnci elde etmek için çok iyi bir yöntemdir. Çapraz bağlama işlemi UYMAPE'nin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ortaya koyulmaktadır (Merola ve Affatato, 2019). UYMAPE'ye E vitamini (bir tür antioksidan) ve yüksek düzeyde çapraz bağlanmalar eklenerek UYMAPE güçlendirilip implantların kullanım ömründe, aşınma direncinde ve tokluğunda artış elde edilmektedir. Gama ışıması yoluyla polimer çapraz bağlama, aşınma direncini artırmak için iyi bilinen bir çözümdür, ancak kaçınılmaz olarak polimer oksidasyonuna yol açmaktadır. Oksidasyon durumunu engellemek için Vitamin E katkılı UYMAPE malzemeler üretilmektedir. Geleneksel UYMAPE'ye ait yüksek oranda çapraz bağlı polietilen (HXLPE) kullanarak, UYMAPE ile karşılaştırıldığında, HXLPE'nin %40 azaltılmış aşınma hızına sahip olduğunu ortaya çıkmaktadır. Vitamin E eklenmiş ve çapraz bağlı polietilen olan VEHLPE (VE-ÇUYMAPE) daha az aşınma göstermektedir. Nanotakviyelerin eklenmesi, daha uzun ömürlü ve daha iyi yeteneklere sahip yeni ileri teknoloji biyo malzemeler ortaya çıkarmaktadır (Singh ve Verma, 2021).

Tribolojik olarak eş çalışan iki malzemenin yüzey desen tasarımı, malzemenin sıcaklık dağılımını, performans davranışlarını ve hizmet ömrünü etkilemektedir. Dong vd. (2007) tarafından dikdörtgen desenin etkisini incelemek için çelik bilye ile karşılıklı (reciprocating) kaydırılan UYMAPE asetabular ara yüzey elemanı üzerinde tribolojik testler gerçekleştirilmiştir. Yüzeyinde gözenek bulunmayan asetabular ara parça kullanarak sürtünme yüzeyinde ortaya çıkabilecek sıcaklık artışı ve aşınma miktarı ölçülmüştür. Yapılan çalışmada 100 N yük altında 325 dakika boyunca karşılıklı kaydırmalı (reciprocating) harekete maruz kalan bağlantı elemanlarındaki sıcaklık artışı asetabular kabın dış kısmından yüzeye 1 mm kalıncaya kadar açılan 1 mm çapındaki deliğe yerleştirilen

ıslı çift (termokupl) ile ölçülmüştür. Çalışma sonunda teorik modelleme ile deneysel çalışma sonuçları örtüşmüş ve kısa süreli deneylerde meydana gelen aşınmanın ihmal edilebilecek kadar az olduğunu belirtilmiştir. Bunun yanında çok uzun çalışma sürelerinde bağlantılarda meydana gelebilecek sıcaklık artışının ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin servis ömrünü etkileyeceği rapor edilmiştir.

Çapraz bağlama ile elde edilen UYMAPE malzemesinde radyasyon dozunun artırılması ile aşınma miktarının %98 oranında azaldığı bilinmektedir. Ayrıca, malzemenin mekanik özelliklerinde örneğin kopma dayanımında %41.3 ve akma dayanımında ise %5 oranında düşüş gözlemlenmiştir (Muratoğlu vd., 1999). Diğer bir kalça aşınma testinde, UYMAPE'nin aşınma miktarının ÇUYMAPE'den %47 oranında daha yüksek olduğunu bildirilmiştir (Bragdon vd., 2003).

Baykal vd. (2010), UYMAPE, ÇUYMAPE ve VE-ÇUYMAPE malzemelerinin aşınma davranışlarını pim-disk aşınma testiyle incelemişlerdir. En yüksek aşınma faktörünün UYMAPE numunelerde olduğunu, bunu VE-ÇUYMAPE, ÇUYMAPE numunelerinin takip ettiğini belirtmişlerdir. Çapraz bağlı numunelerin aşınma dayanımının daha yüksek olması, yapıya eklenen vitamin E'nin çapraz bağ etkinliğini düşürdüğünden VE-ÇUYMAPE'nin aşınma direncinin ÇUYMAPE'nin aşınma direncinden daha düşük elde edilmiştir.

Z. Lu ve McKellop, (1997) tarafından yağlayıcı olarak sığır serumunun kullanıldığı kalça simülasyonu aşınma testinde, UYMAPE'ye karşı metal veya seramikten yapılmış femoral başında bulunan başlıklar ile meydana gelen sürtünme sonucunda oluşan ısı, proteinlerin yağlayıcıdan çökmesine neden olmuştur. Protein çökme hızı, yağlayıcının ortalama sıcaklığından ziyade, kayma sırasında yatak yüzeylerindeki maksimum kararlı sıcaklığa bağlı olmuştur. Bu çalışma da GUR 415 ile asetabular ara parçalara gömülü bir dizi termokupl kullanarak yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir. Protezler 2030 N maksimum kuvvete sahip bir Paul tipi fizyolojik yük profili altında test edilmiştir. Yağlayıcının kararlı durum sıcaklıkları zirkonya bilyeler için 38 °C, kobalt-krom için 36 °C ve alümina için 33 °C değerlerinde elde edilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada sığır buzağı serumu (Bovine Calf Serum: BCS, Biochrom GmbH, Berlin, Almanya) deiyonize su ilave edilerek uygun protein konsantrasyonuna seyreltilmiştir. Diz ve omuz eklem implantlarında 20 g/L ve kalça eklem implantlarda için 30 g/L protein kullanılmıştır. Toplamda 1.85 g/L sodyum azid (NaN₃) ve 5.85 g/L etilen

diamin tetra asetik asit (EDTA) anti-mikrobiyolojik reaktifler yağlayıcıya eklenmektedir (Wonerow vd., 2021).

İmplant içerisindeki ısınmalar; yatak malzemelerinin aşınma, yorulma ve oksidatif bozunma oranını etkilemektedir. Yüzey deseninin, CoCrMo femoral başlığa karşı çalışan desenli E vitaminli ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen asetabular bileşenin sürtünme ve sıcaklık artışı üzerindeki etkisi literatürde araştırılmıştır. Farklı yükleme koşulları (200 – 1500 N) altında yatak yüzeyleri arasındaki sıcaklık artışı ölçülmüştür. Testler, 5 ml %25 sığır buzağı serumu (Sigma-Aldrich bovine serum) yağlama koşulunda 11000 çevrim boyunca gerçekleştirilmiştir. Bakteriyel kontaminasyonu önlemek için yağlayıcıya %0.3 sodyum azid ve 5 mM EDTA eklenmiştir. Desenli numune çiftlerinde desensizlere oranla daha düşük sıcaklık artışı ölçülmüştür (Sağbaş ve Durakbaşa, 2013a, 2014a, 2013b).

Protez eklemlerin aşınma testinde, optimal yağlayıcı protein konsantrasyonu önemli bir parametredir. Sığır buzağı serumu bazlı yağlayıcının protein konsantrasyonunun, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin CoCr'ye karşı aşınma üzerindeki etkisi, UYMAPE pim-disk ile deneysel olarak incelenmiştir. Aşınma faktörü önce artan konsantrasyonla birlikte artmıştı, 10-20 mg/ml arasında zirveye ulaşmış ve sonra yavaş yavaş azalmıştır. Konsantrasyonun 20 mg/ml'nin altında olmasının aşınma üzerinde olumsuz durumlar ortaya çıkardığı tespit edilmiştir. Testler, buzağı serumu bazlı bir yağlayıcının protein konsantrasyonunun, yüzeyi parlatılmış CoCr'a karşı gama ışınli polietilenin aşınma hızı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. 10^6 çevrimden sonra UYMAPE üzerinde önemli ölçüde aşınma ölçülmüştür. Sonuç olarak, en yaygın malzeme kombinasyonu olan UYMAPE'ye karşı gerçekçi bir kalça aşınma simülasyonu oluşturmak için çok kullanılan buzağı serumu bazlı yağlayıcı protein konsantrasyonunun 20 mg/ml'nin altında olmaması gerektiği anlaşılmıştır (Saikko, 2003).

Kalça eklemi modelinde baş kısım olarak kullanılan CoCr alaşımı, yüksek mekanik mukavemet ve kırılma tokluğu nedeniyle güvenilirlik olmakla birlikte uzun vadede metal artıkları üretme, iltihaplanmaya ve periprostetik dokunun kararmasına neden olan metal iyonlarını serbest bırakma eğilimindedir. Öte yandan, Ti ve CoCr alaşımları ile karşılaştırıldığında, 110 GPa'lık elastisite modülü ile kemik-implant ara yüzeyinde fizyolojik olarak daha düzgün bir gerilme dağılımı sağlamıştır (Khanna vd., 2017). Medikal alanda titanyum parçaların imalatı, ikinci dünya savaşının sona ermesini takiben önemli ölçüde ilerlemiştir. Titanyum endüstrisinde en popüler titanyum alaşımı Ti6Al4V'dır (Mahmud vd., 2021).

Boampong vd. (2003), Ti6Al4V alaşımı en biyoyumlu malzemeler arasında olduğunu ve bu alaşımların, mükemmel yorulma mukavemetine, iyi korozyon direncine, düşük yoğunluk ve elastik modülüne, mükemmel şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik kombinasyonlarına sahip olması nedeniyle son yıllarda implant eklem değiştirmelerinde oldukça artan bir kullanıma sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Ti6Al4V, kullanılan diğer metalik biyomalzemelerle karşılaştırıldığında, (örneğin paslanmaz çelik ve kobalt krom alaşımları) daha az sertliğe sahiptirler ve bu nedenle, gerilmeye bağlı olarak kemik içi erime oranını azaltmada teorik avantaja sahiptir. Ayrıca, Ti6Al4V implant malzemesinin yüzeyi, anotlama ile titanyum oksit (TiO₂) kaplı yüzeylerin korozyona ve mikro hareketlere karşı direnç gösterme yeteneğini de arttırmıştır (Boyer vd., 2008).

Önceleri yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımından alüminyum iyonlarının salınması bazı dez avantajları beraberinde getirmiştir. Alüminyum, alzheimer gibi hastalıkların başlangıcı ile ilişkilendirilmiş ve aşırı vanadyum konsantrasyonlarından dolayı hücrelerde sitotoksikite olabileceği tespit etmişlerdir. Bu endişeler, elementer iyonların salınımını önleyen elmas benzeri karbon (DLC) film kaplanarak önlenmektedir. (Bezuidenhout vd., 2015). İlaveten, alüminyum ve vanadyum iyonlarının vücut sıvısında çözünmesi ve Ti6Al4V'de aşınma sırasında metali dış etkilerden koruyan tabaka (pasivasyon tabaka)'sının bozulması sonucu herhangi bir toksik etki olasılığı konusunda halen endişeler mevcuttur (S. Paital ve Dahotre, 2008; S. R. Paital ve Dahotre, 2009).

Gerçekleştirilen bir dizi klinik ve deneysel aşınma çalışmasında, implant eklemlerin femoral bileşenlerinin kayan yüzeyleri Ti6Al4V'den yapıldığında, aşınmanın çevreleyen dokuda siyah lekelenmeye ve eklemlerin bozulmasına yol açtığı tespit edilmektedir. N⁺ iyonlarının eklenmesi, biyomateryal yüzey modifikasyonları implant eklem bileşenlerinin aşınma direncinin artırılmasına yönelik başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Boampong vd., 2003).

Wilches vd. (2008), yaptıkları çalışmada 6,35 mm çapında UYMAPE plaka ile aşırı düşük ara yerler (Extra-Low Interstitial / ELI) alaşımlı Ti6Al4V (ASTM F136) ve ASTM F138 paslanmaz çeliğinden yapılmış pimler kullanılmışlardır. Aşınma testleri sığır serumu ile temas yüzeylerinin yağlanmasına izin veren modifiye edilmiş bir pin-disk aşınma test cihazında makinesinde gerçekleştirilmiştir. Pimler ve plakalar arasındaki bağlı kayma hızı 0.58 m/s, uygulanan normal yükler sırasıyla 177, 531, 1060 ve 1767 kPa'lık ortalama temas basınçlarına karşılık gelen 5, 15, 30 ve 50 N olacak şekilde seçilmiştir. Çalışılan tüm temas çiftleri için toplam test süresi 7 saat ve ortam sıcaklığı 25 °C olarak rapor edilmiştir. Belirli

koşullar altında metal-polimer çiftlerindeki en önemli aşınma mekanizması, polimerin metalik yüzeye yapışması ve ardından polimerin alt yüzeyindeki bozulmalar olarak belirtilmiştir. Sürtünme katsayısı daima 0.04'ten düşük olarak elde edilmiştir (Wilches vd., 2008).

Cerrahi alanda kullanılan metallere olan Ti6Al4V alaşımı, biyouyumluluk, sertlik ve yorulma özelliklerinin en iyi kombinasyonuna sahip olmasının yanında aşınma direnci 316L paslanmaz çelik ve CoCrMo alaşımlarından daha düşüktür. Ti6Al4V'yi sert bir titanyum nitrid (TiN) tabakasıyla kaplamak, aşınma davranışını iyileştirmek için umut verici stratejilerden birisi olmuştur. TiN toz daldırma reaksiyon destekli kaplı (Powder Immersion Reaction Assisted Coating / PIRAC) Ti6Al4V alaşımı, bir kalça simülöründe test edilmiştir. Birkaç hafta içinde 1 milyon yürüme döngüsü (1 yıllık klinik kullanıma karşılık gelmektedir) üretebilen bu testler klinik kullanımda karşılaşılan koşulları tam olarak yansıtmaya da halihazırda yaygın olarak kullanılan testlerle karşılaştırıldığında yeni malzemelerin tribolojik davranışlarını tahmin etmede faydalı olmuştur. Gutmanas ve Gotman, (2004) tarafından gerçekleştirilen bit çalışmada PIRAC nitridlenmiş femur başı, kalça simülasyon testinde UYMAPE kaplarına karşı test edilmiştir. Testlerde Ti6Al4V alaşımından yapılmış 32 mm çaplı küresel başlıklar ve 32 mm iç çapa ve 50 mm dış çapa sahip UYMAPE asetabular polietilen ara yüzey kullanmışlardır. Ti6Al4V başları üzerindeki TiN PIRAC kaplamasının, femoral bileşenin mekanik özelliklerinden ödün vermeden kalça protezlerinin aşınmasını en aza indirebileceğini göstermiştir.

Leksycki vd. (2022), Ti6Al4V alaşımı ve UYMAPE kombinasyonunu içeren deneyde, yağlayıcı olarak saf su ve simüle vücut sıvısı (Simulated Body Fluid / SBF) kullanmışlardır. SBF sıvı çözeltisinin pH'ı 7.2-7.4 aralığındadır. SBF varlığında yapılan in vitro çalışmalar, metal yüzeyinde apatit tabakasının oluşmasına neden olabilmekte ve kemikleri bağlama yeteneğini etkileyen bir faktör olarak kabul edilmektedir. Tribolojik testler sırasında, yağlayıcı 30 damla/dakika hızında beslenmiş, bu da (insan vücudunda olduğu gibi) yoğun olmayan sürekli yağlama sağlamıştır. 0.5 m/s'lik bir kayma hızı ile dönen Ti6Al4V titanyum alaşımlı disk ve karşı blok malzeme UYMAPE üzerine sabit bir 500 N yük ve 30 dakikalık test sürecince uygulanmıştır. Test sonunda UYMAPE üzerinde aşınma, yapışma ve erime gibi durumlar farkedilirken titanyum alaşımında ise aşınma gözlemlenmemiştir (Leksycki vd., 2022).

Barber vd. (2021), ASTM F648 standartlarına uygun UYMAPE plaka ile CoCrMo ve Ti6Al4V ELI (Grade 23) pimleri (4.2 mm çapa ve 40 mm uzunlukta pim) kullanarak aşınma

testlerini gerçekleştirmişlerdir. Tüm metal pimler çeşitleri, 30 dakikalık sterilizasyon ve 20 dakikalık kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Aşınma Testi Anton Paar (SCF7) tarafından üretilen yerleşik bir triboloji cihazı ile gerçekleştirilmiştir. UYMAPE'ye karşı CoCrMo ve UYMAPE'ye karşı Ti6Al4V olarak 2 farklı aşınma testi yapılmıştır. 48 N, 36 N ve 24 N sabit normal kuvvet altında ve bu kuvvetler sırasıyla 3.46 MPa, 2.60 MPa ve 1.73 MPa'lık temas basıncına karşılık gelmektedir. 132 mm/s hız dönme hızı ile 11.4 km'lik bir mesafe için boyunca testler yapılmıştır. Yağlayıcı, %25 FBS, 20 mM EDTA ve %0.1 w/v (hacimce ağırlıkça yüzde) sodyum azitten (Sigma Aldrich) oluşmakta ve steril bir 0.2 µm filtreden süzülerek kullanılmıştır (Barber vd., 2021).

Belhamdi vd. (2022) tarafından ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ile elektron demeti eritme (Electron Beam Melting: EBM) ile titanyum-alüminyum-vanadyum alaşım (Ti6Al4V) pimi arasındaki mekanik aşınma davranışı incelemişlerdir. Tribolojik testte, aşınma direncini artırmak için UYMAPE matrisine saf ve oksitlenmiş grafit dolgu maddeleri eklenerek ve kuru ortamda çeşitli yağlama ortamlarının damıtılmış su (DW), simüle edilmiş eklem sıvısı (SSF) ve doğal sığır serumu (NBS) etkisi altında aşınma etkilerini araştırmışlardır. Polimer cerrahi implant uygulamaları için kullanılan malzemenin aynısı olan Ti6Al4V alaşımından yapılmış bir pim, dönen UYMAPE disk üzerine yerleştirilmiştir. 30 N'luk bir yük, 60 devir/dakika'lık kayma hızı ve her ölçüm için 180 dakikalık test süresi ile testler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, biyomedikal UYMAPE ile Ti6Al4V pimi ile temas altında tribolojik testte yağlayıcıların etkisi incelenmiştir. Yağlama sıvılarının aşınma etkisini azaltan etki; Kuru > DW > SSF ≥ NBS gibi sonuçlar rapor edilmiştir.

Sandeep vd. (2020), sürtünme ve aşınma testini triboloji test cihazında bir pim ve disk ile gerçekleştirmişlerdir. Pim-disk triboloji cihazında Şekil 15'te gösterilen PEEK numuneleri (8×8×32 mm³ dikdörtgen) ve Ti6Al4V (30 mm çapında 10 mm kalınlık) diske dögüsel bir hareket uygulanmıştır.



Şekil 15. Pim (PEEK/UYMAPE) - disk (Ti6Al4V) triboloji düzeneği (Sandeep Kumar vd., 2020).

Diz protezinde minimum aşınma hızına sahip UYMAPE'ye yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi pim-disk cihazı kullanılmıştır (Sandeep vd., 2020).

Yüzeyde desenli yapı oluşturularak yapılmış aşınma testi çalışmasında, CoCr malzemesine karşı dairesel, üçgensel, kare ve dikdörtgen desenli UYMAPE polietilen üzerindeki çıkıntı sayısı alan desen yoğunluğu ve çıkıntı çapının optimum değerini belirlemek olmuştur. Çıkıntı yarıçapı 20 μm 'den başlanarak 100 μm değerine kadar ve ayrıca çıkıntı sayısı alan desen yoğunluk oranı %4 ten başlanarak %40 değerlerine kadar farklı kombinasyonlarda desenleme yapılmıştır. Testler numerik analiz ile yapılmış ve alan desen yoğunluğunun, çukur yarıçapının ve derinlik etkisinin yük taşıma kapasitesi üzerinde bariz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Göz önünde bulundurulan çıkıntı desenlerinin her biri için optimum değerler; 40 μm < çıkıntı çapı < 90 μm , 4.8 μm < çıkıntı derinliği < 14.4 μm ve %12 < alan desen yoğunluğu < %36 aralığında olduğu bulunmuştur (Y. L. Zhang vd., 2015). Baena vd. (2015), çelik malzeme üzerinde ise %5-15'lik alan desen yoğunluğunun sürtünmeyi azaltmada etkili olduğunu bulmuşlardır.

Dougherty vd. (2015), çelik malzeme kullanarak yapılmış tribolojik sürtünme katsayısı testinde, UYMAPE üzerine mikro işleme yöntem ile 100, 200 ve 400 μm çap değerlerindeki mikro-çukurlar açılarak mikro-çukur çaplarının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi pim-disk cihazı yardımıyla incelemiştirlerdir. 4 N ve 10 N'luk kuvvetlerin

oluşturduğu sırasıyla 44.36 MPa ve 60.1 MPa'lık yüzey basınçlarının etkisi ile sinovial yağlayıcı sıvı kullanılarak deneyler yapılmıştır. 10 N'luk yük altında 30 mm/s'lik hız referans alınarak sonuçlar iredelendiğinde en yüksek sürtünme katsayı değeri desensiz UYMAPE numunesi çıkmış ve sırası ile sürtünme katsayısı düşmektedir; 400 µm, 100 µm ve en düşük sürtünme katsayısına sahip 200 µm çapına sahip numune grubunda rapor edilmiştir.

Roy vd. (2015), seramikten yapılmış kalça protezi uygulamasında mikro çukurlu yüzey dokularının tribolojik etkisi üzerinde yapılan çalışma kapsamında mikro-çukur çap etkisinin ve mikro-çukur adım değerlerinin sürtünme katsayısındaki değişimlerini incelemişlerdir. Dikdörtgen seramik malzeme üzerinde oluşturulan 300 µm ve 400 µm mikro-çukurların yapılması için CNC mikro delme makinesi kullanılmıştır. Dikdörtgen seramik Al₂O₃ parça (15 mm × 15 mm × 6 mm) üzerinde oluşturulan mikro-çukurların, seramik silindirik Al₂O₃ pim (6.35 mm mikro-çukur çapı)'lerin tekrarlı hareketi (reciprocating) altında teste tabi tutulmuştur. Triboloji testi TR 283 Serisi, DUCOM cihazı, yağlayıcı olarak %25 sığır serumu (HyClone Fetal Bovine Serum) ve tüm numuneler tekrarlı üç kere yapılarak deneyler tamamlanmıştır. Her test 180 dakika zaman almakta, dönme hızı 20, 40, 60, ve 80 mm/s hızlarındaki tekrarlı hareket ile 10, 15 ve 20 N'luk yükler altında ortalama 200 MPa basınçta deneyler tamamlanmıştır. Sonuç olarak aynı çap değerlerinde oluşturulmuş desenlemeler için alan desen yoğunluk miktarı arttıkça sürtünme katsayısında düşüş tespit edilmektedir.

1.2.5. UYMAPE İçin Lazer Yüzey Desenleme Uygulamaları

Biyomedikal alanda UYMAPE malzeme üzerine, adından çokça söz ettiren fiber lazerler, nanosaniye lazerler, pikosaniye lazerler ve femtosaniye lazerler ile yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır (Borjali, 2018; Hussain vd., 2019; Khan vd., 2021).

UYMAPE; yüksek atım dayanımı, sünekliği ve fizyolojik sıvılarla temasta stabilitesi nedeniyle biyomedikal uygulamalarda, özellikle kalça protezi veya diz protezleri alanında yaygın olarak kullanılan sentetik bir polimer olduğu bilinmektedir. Deneyde farklı lazer dalga boylarının (1064, 532 ve 355 nm) UYMAPE numunelerinin yüzey modifikasyonu üzerindeki sonuçlarını görmek için yapılmıştır (Riveiro vd., 2014). Deneylerde 80 mm × 80 mm × 1.2 mm levhalar ve Ra 2.3 µm başlangıç ortalama yüzey pürüzlülüğü olan numuneler kullanılmıştır. Lazer yüzey işleme deneyleri Nd: YVO₄ (Rofin-Sinar PowerLine E) diyotu

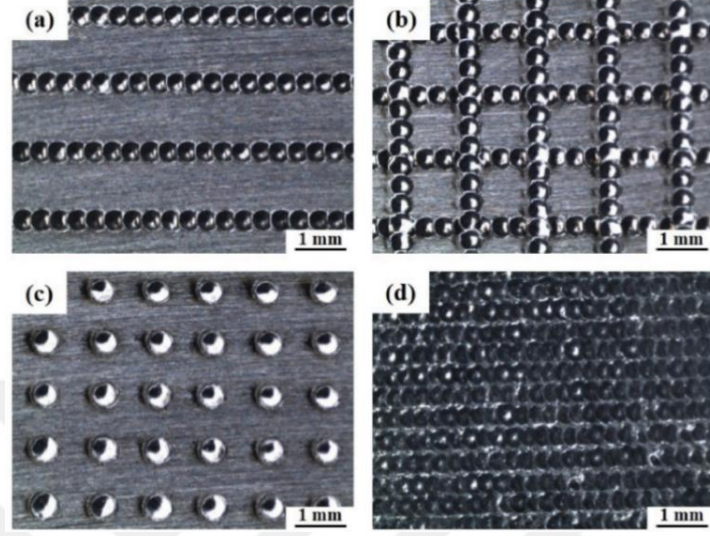
kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 20 kHz frekans değeri ve atım süresi 10 ns olarak deneyler yapılmıştır. Lazer ışını farklı lensler kullanılarak odaklanmıştır. Bunlar; sırasıyla 211, 235 ve 365 mm odak uzunluklu lenslerden oluşmuştur. Karbon bazlı kaplamalar, düşük sürtünme katsayıları veya yüksek korozyon direnci ile iyi uyumlulukları nedeniyle implantlar üzerinde yapılmış bir çalışmadır. Lakin implantlarda kullanılmaya uygun herhangi bir malzeme üzerindeki tedaviyi doğrulamak için hücre çalışmaları, hayvanlar üzerinde çalışmalar ve gerçek klinik çalışmalar gerekli olmaktadır (Riveiro vd., 2014).

Farklı desenleme parametreleri koşullarında UYMAPE ve çelik malzemeler için desenleme işlemlerinin etkileri karşılaştırılmıştır. UYMAPE polietilen malzeme için oluşturulan desenli yapılar sayesinde sürtünme etkisinin etkin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Yüzeydeki desen oranı %16-30 aralığında olduğunda UYMAPE yüzeyinde tribolojik performansın artırılmasında daha da etkili sonuçlar elde edilmektedir (B. Zhang vd., 2013).

Desenleme işlemleri içerisinde lazer desenleme işlemleri kullanılarak kemikte malzeme birikimini engellemek ve bakteriyel yapışmayı önlemede kullanılan yeni bir teknik olmuştur. Lazer yüzey modifikasyonu (desenleme), geleneksel mekanik/kimyasal yöntemlere göre çeşitli çekici özelliklere sahip ve yüksek tekrarlanabilirlik ile çok daha hızlı bir oranda gerçekleşmektedir. Bu nitelikler, lazer sistemleri ile yüzey desenlemesi ve modifikasyonu için ticari olarak uygun bir platform olmasını sağlamıştır. Ti6Al4V'nin 1064 nm dalga boyunda ve 200W gücünde fiber lazer sistemi kullanarak yüzey desenlemesi ile bakteriyel yapışmasını azaltıcı etki oluşturmuştur (Quinn vd., 2020).

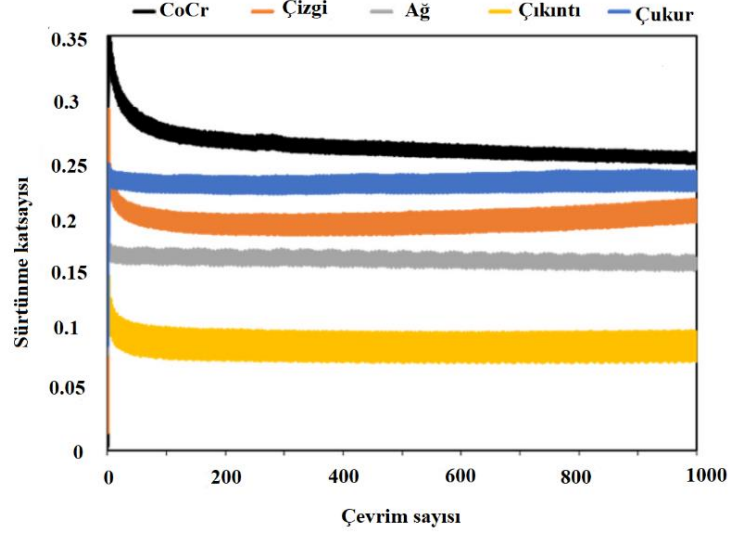
Alvarez-Vera vd. (2021), kobalt bazlı alaşımların aşınma, korozyon ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı kalça implantları gibi tıbbi alanlarda yaygın olarak kullanıldıklarının tespiti üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Protez implantların metal-metal temas bölgelerindeki yüzeysel aşınma ve aseptik gevşemesiyle sonuçlanan iyon metalik salınımı ile implantın gevşemesi gibi problemlerin ortaya çıktığı rapor edilmektedir. CoCr bileşeninin polietilen ile kullanıldığı protez bağlantılarında; polietilenden kaynaklı aşınma kalıntılarının neden olduğu mekanik hasarlar ile malzeme ömrü azalabilmektedir. 1064 nm dalga boyunda Nd: YAG lazer (7.5 kW maksimum pik güce sahip bir HTS ORLASER) kullanılarak LST yöntemiyle mikro desenli CoCr alaşımlı disklerin mekanik özelliklerini, mikro yapısını ve tribolojik performansını UYMAPE polietilen implant malzemesine karşı test ederek belirlemişlerdir. Şekil 16'da gösterildiği gibi yağlı aşınma

testleri altında CoCr diskler üzerinde çizgi, ağ, çıkıntı ve çukur desenleri dahil olmak üzere farklı lazer yüzey mikro desenleri yapılmıştır (Alvarez-Vera vd., 2021).



Şekil 16. CoCr plaka üzerinde oluşturulmuş lazer yüzey desenleri; (a) Çizgi, (b) Ağ, (c) Çıkıntı ve (d) Çukur deseni (Alvarez-Vera vd., 2021).

Desensiz CoCr diskleri karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Test için 20 g/L'lik bir nihai konsantrasyon elde edilene kadar deiyonize steril su içinde seyreltilerek oluşturulan fetal sığır serumu (FBS) (S1650 Biowest, Fransa) yağlayıcı sıvı kullanılmıştır. UYMAPE'den yapılmış pim numunelere karşı test edilen farklı yapılarda desenli CoCr disklerin sürtünme katsayıları her bir desenli CoCr üzerinden deney boyunca ölçülmüştür. Tribolojik testler, 1000 çevrimde, dönüş hızı 50 d/dk olacak şekilde ve 1.0 MPa'lık bir temas basıncına karşılık gelen 10 N'luk normal yük altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçların tekrarlanabilirliğini doğrulamak için tribolojik testlerin iki tekrarı yapılmış, her test sırasında sürtünme katsayısı değerleri kaydedilmiştir (Şekil 17) (Alvarez-Vera vd., 2021).



Şekil 17. Alvarez-Vera vd. (2021), çalışmalarında CoCr malzeme üzerinde oluşturulmuş lazer desenli numunelerin çevrim sayısına bağlı sürtünme katsayısı değişimleri

UYMAPE pimlerinin temas basıncının neden olduğu sürtünme katsayısı değerinin önemli ölçüde değişmesi, yüzeyde lazer cihazı ile desenler oluşturulması ile bağdaşmıştır. Hidrodinamik yağlama rejimi üzerindeki LST desenlerinin etkisi ile aşınma hızı ve sürtünme katsayısı, UYMAPE pimlerinin aşınmasını ve yüzey hasarını azaltmıştır. Ayrıca, çizgi, ağ, çıkıntı ve çukur formlarındaki desenlemelerin çevrim sayısındaki sürtünme katsayıları değerleri karşılaştırıldığında; sürtünme katsayısı en büyük olandan başlanarak sürtünme katsayısı en küçüğe doğru sıralanmıştır; desensiz CoCr, çukur desenli, çizgi desenli, ağ desenli, çıkıntı desenli olacak şekilde sonuçlar rapor edilmektedir (Alvarez-Vera vd., 2021).

CoCrMo ile yapılmış diğer bir çalışmada ise yüzey ıslanabilirliği ve sürtünme katsayısının tespiti ile ilgili olmakta ve Ti6Al4V pim kullanılarak, lazer desenli CoCrMo disk malzemesi üzerinde aşınma ve sürtünme testi gerçekleştirilmiştir. Desen boyutları 50 μm çap / kenar uzunluğundan ve desen adımı ise 100 μm değerinden başlanarak 150 μm çap ve 300 μm adım değerleri arasında desenleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kullanılan lazer sisteminin özelliği Q switch 1061 nm dalga boylu, 80 mW lazer gücüne sahip ve frekansı 60 kHz olan diot lazer kullanılmıştır. Yapılacak desenler karesel, üçgensel ve dairesel formda olmuştur. Lazer desenleme öncesi CoCr alaşım ultrasonik banyoda kalıntı kirleticileri uzaklaştırmak için 3 kez 10 dakika boyunca aseton ile temizlenmektedir. Testler 0.24 MPa temas basıncı altında 5 Hz. frekansta ve 2 mg/ml lik hazırlanmış Bovine serum yağlayıcısı ile her test 30 dakika olacak şekilde testler yapılmış ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

En yüksek sürtünme katsayısı değeri sırası ile desensiz, üçgen desenli, kare desenli ve en düşük sürtünme katsayısı ise dairesel formda desenli CoCr da ortaya çıkmıştır (Qin vd., 2013). Ayrıca yüzey ıslanabilirliğine bakıldığında yüzeye damlatılan 5 µl su damlasının temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Temas açısı büyük olan; süper hidrofobikliğe dairesel formda desenli numune yakın olmuştur. Yüzeyde oluşturduğu temas açısına bağlı sürtünme katsayısı değerleri için; temas açısı düşük olan her bir numune grubunun sürtünme katsayısı da düşük çıkmıştır (Qin vd., 2013).

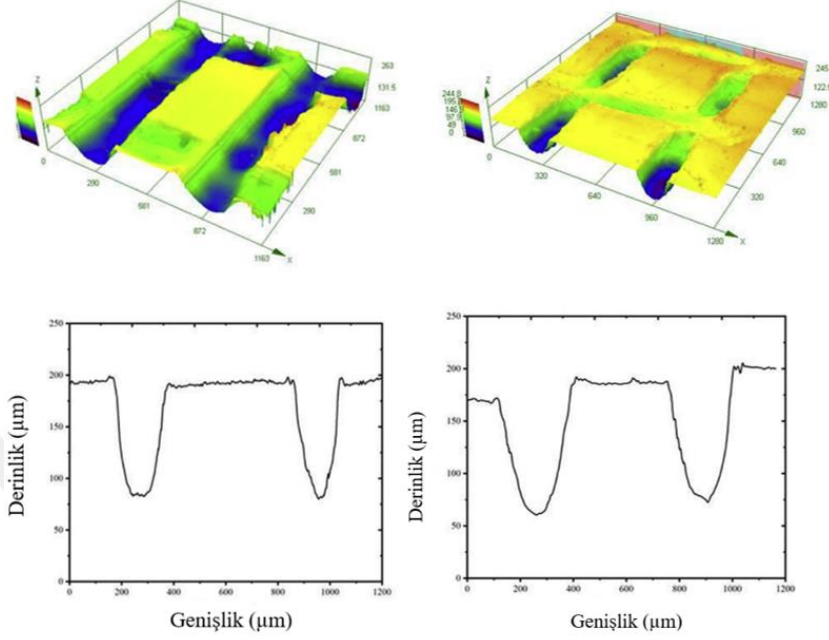
Karbon kaplamalı polietilen malzemelerin malzeme yüzeyine farklı lazer dalga boylarında (1064 nm, 532 nm ve 355 nm) atım verilerek, lazer (LSM, Model QC-F20, Çin) ile desenleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Lazerin dalga boyları; 355 nm ve 532 nm'deki sonuçlar incelenmiştir. Karbon kaplamalı lazer desenleme yönteminin yüzey pürüzlülüğü koşullarını iyileştirmek için uygun olduğu bulunmuştur (Shivakoti vd., 2021). Polietilen yüzeyinin alüminyum folyo ile kaplanması ile lazer desenleme sonrası malzeme üzerindeki eriyik viskozitesini daha iyi kontrol etmede avantaj sağladığı tespit edilmiştir (Hussain vd., 2019).

Hussain vd. (2019), UYMAPE üzerinde dairesel desenlemeler ile yüzeyde formlar oluşturmuşlardır. Ayrıca; desensiz, kare ve üçgen gibi farklı geometriler oluşturarak malzemenin sürtünme özelliklerini test etmişlerdir. Sığır serum albumini (Bovine Serum Albumin / BSA) yağlayıcı ile sürtünme performansını araştırılmıştır. Tribolojik testler, bir tribometre (UMT-2, CETR Corporation-Ltd) kullanılarak UYMAPE diski üzerinde seramik topun ileri geri hareket ettirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. UYMAPE malzemesinin yüzeyine 9.5 mm çapında seramik top 20 N kuvvetle kaydırılarak uygulanmıştır. Testler oda sıcaklığında yapılmıştır. Malzeme üzerindeki kare ve dikdörtgen desenlemeler için; oluşturulacak kanal genişlik değerleri, desen adım değerleri ve yüzde alan desen yoğunluğu gibi işlem değerleri Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Kare ve dikdörtgen malzemenin desenleme işlem parametreleri (Hussain vd., 2019).

Parametre	Karesel Desen	Dikdörtgen Desen
Kanal Genişliği	200 µm	250 µm
Desen Adımı	700 µm	650 µm- 850 µm
Alan desen yoğunluğu (%)	51.0	43.4

Kare ve dikdörtgen desenine ait derinlik ve genişlik grafiği ile yüzeyin 3 boyutlu yapısı Şekil 18'de gösterilmektedir.



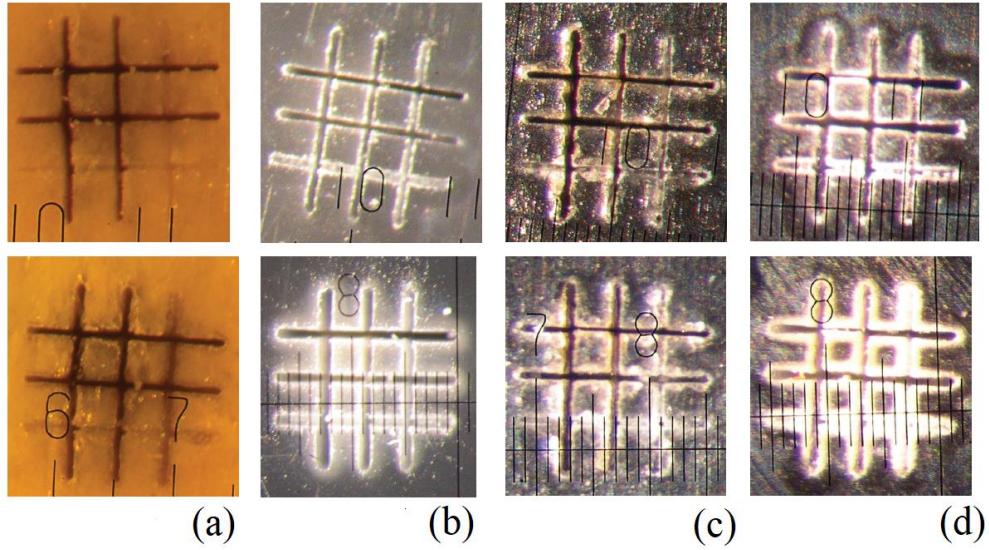
Şekil 18. Kare formda (solda) ve dikdörtgen formda (sağda) desenli numunenin 3 boyutlu yüzey görüntüsü ve desen derinlik-genişlik grafiği (Hussain vd., 2019).

Lazer ışınının numune üzerindeki erime etkisini en aza indirmek için UYMAPE numuneleri üzerinde damıtılmış su tabakası oluşturulmuş ve lazer desenleme işlemi yapılmıştır. Bu durumda erime oluşmuş ve olumsuz sonuçlar alınmıştır. Buradaki ana problem, UYMAPE'nin yüksek erime viskozitesine sahip olmasıydı. Donmuş numuneler üzerinde de deneme yapılmış ve yine olumsuz sonuçlar alınmıştır. Başka bir durumda, ışın atımının saçılmasını azaltmak için yüzeyde alüminyum folyo kullanılmış ve böylece kare ve dikdörtgen desen yapıları ergime durumu olmadan üretilebilmiştir. Ayrıca desenli yüzeyin sürtünme katsayısı, desensiz yüzeye göre daha düşük çıkmıştır (Hussain vd., 2019).

Mühendislik çalışmalarında polimerler, metal alaşımlarına kıyasla yüksek performans-ağırlık oranları ve düşük maliyetleri nedeniyle endüstrinin birçok alanında kullanılmıştır. Lutey ve Moroni (2020), polietilen (PE) numuneleri üzerinde 1064 nm dalga boyunda, 160 nm odak uzaklığı ve 60 µm odak nokta boyutu parametreleri ile fiber lazer desenleme için nanosaniye atımlı lazer kullanmışlardır. Polimerin lazerle işlenmesi,

biyolojik tıp alanında kullanılacak uygulamalar için düşük güç gerektirdiğinden yüksek verim ve nispeten düşük maliyetle yapılabileceğini göstermektedirler (Lutey ve Moroni, 2020). Zhang vd. (2013), literatürde çok farklı aralıklarla uygulanan parametrelerin birbirinden farklı sonuçlar verdiğini fark etmişlerdir. UYMAPE malzemesinin yüzeyine alan desen yoğunlukları %5 ile %40 arasında değişen desenlemeler yapılmış ve bunların aşınma performansına etkileri incelenmiştir. 15 µm derinliğinde ve 50 µm çapında (çap/derinlik oranı: 3.33) yüzey deseni oluşturulmuştur. Tribolojik testler sonucunda %16-30 aralığındaki desen yoğunluğu, sürtünmeyi azaltmış ve aşınma kaybını minimuma indirmiştir.

Pikosaniye lazer ışını atımlarının polimerler üzerinde hassas ve istenilen boyut toleranslarında mikro-çukurlar açabildiği bilinmektedir. Polimerlerin mikro delme ve kesme işlemleri 355 ve 266 nm dalga boylarındaki ışınlar atan lazer ile gerçekleştirilmektedir (Gedvilas ve Raciukaitis, 2005). Lazer, harmonik ışın üreten iletim sistemi, odaklama kafası ve X, Y ve Z eksenlerindeki hareketleri de içeren hassas bir cihaz ile yapılmıştır. Bu deneyde 60 ps süreli atım yapabilen 1064 nm dalga boyunda ve 250 Hz tekrarlama hızında PL2241 (Expla) pikosaniye lazer kullanmışlardır. Malzeme yüzeyinde pikosaniye lazer kullanımı ile desenleme yapılmış 266 nm'nin 355 nm dalga boyuna kıyasla iyi işleme kalitesi ve daha yüksek ablasyon (yakma) oranı sağladığını bulmuşlardır (Şekil 19). Pikosaniye atımlı lazer sisteminin UV lazer etkisinin, çeşitli teknik uygulamalar için polimerlerin mikro işlem fabrikasyonunda uygulanabilir olduğu kanıtlanmış ve ayrıca pikosaniye lazerler, polimerlerin işlenmesinde excimer (nanosaniye) lazerlere kıyasla çok iyi ve güvenilir bir alternatif lazer cihazı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 19. Farklı malzemeler üzerinde oluşturulmuş lazer yüzey desenleri (a) Fibreglas; (b) Naylon poliamid; (c) UYMAPE ve (d) PMMA malzemeleri üzerinde oluşturulmuş pikosaniye atımlı ve 400 μm çizgi adımlı lazer desenleme hatları (Gedvilas ve Raciukaitis, 2005).

Mikrometre (μm) aralığındaki boyutlara sahip periyodik desenler oluşturmak için kullanılan bir başka lazer desenleme yöntemi ise Doğrudan lazer girişimli desenleme (Direct Laser Interference Patterning/DLIP). İki veya daha fazla lazer ışınının üst üste binmesiyle lazer ışını atımları ile oluşturulmuştur (Alamri vd., 2019). Gachot vd. (2017), DLIP yöntemi, nanometre cinsinden derinlik veya genişlik değerlerinin desenlenmesinde nano, piko veya femtosaniye lazerlere kıyasla daha hassas ve küçük boyutlu desenlemeler oluşturulmuştur. Ayrıca DLIP lazer ile desenleme işlem süresi çok kısa sürmekte ve cam yüzeylerde DLIP lazer desenleme çalışmalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Wang (2020), pikosaniye lazer desenleme işlemi ile polietereterketon (PEEK) yüzeylerinin tribolojik yüzey özellikleri üzerindeki mühendislik mikro yapıları araştırmıştır. 25 ve 50 μm çapındaki oyukların oluşturulması için pikosaniye lazer kullanılarak PEEK plaka numuneleri üzerinde desenleme yapmıştır. Kuru temaslarda tasarlanan mikro yapıların tribolojik özelliklerini değerlendirmek için 0.9 N ve 3 N yüklemeler ile PEEK üzerinde sürtünme ve aşınma testleri yapılmıştır. Tribolojik testler için GCr15 (100Cr6 rulman çeliği) bilye malzemesi ile desenlenecek PEEK, mekanik kuvvetlere karşı güçlü direnci ve aşınmaya karşı direncinin yanı sıra kendi kendini yağlama özelliği nedeniyle seçilmektedir. 50 mJ/cm^2 düşen lazer enerjisi, 400 kHz lazer frekansı ve lazer atım süresi ise 10 pikosaniye (ps) olarak ayarlanmıştır. 50 μm çapında dairesel çukurlara sahip desenli PEEK plaka

numunelerine karşı kayan GCr15 bilyesi, sabit bir sürtünme eğrisi katsayısı ortaya çıkarmış ve test koşulları altında daha az aşınma miktarları elde edilmiştir (Wang, 2020).

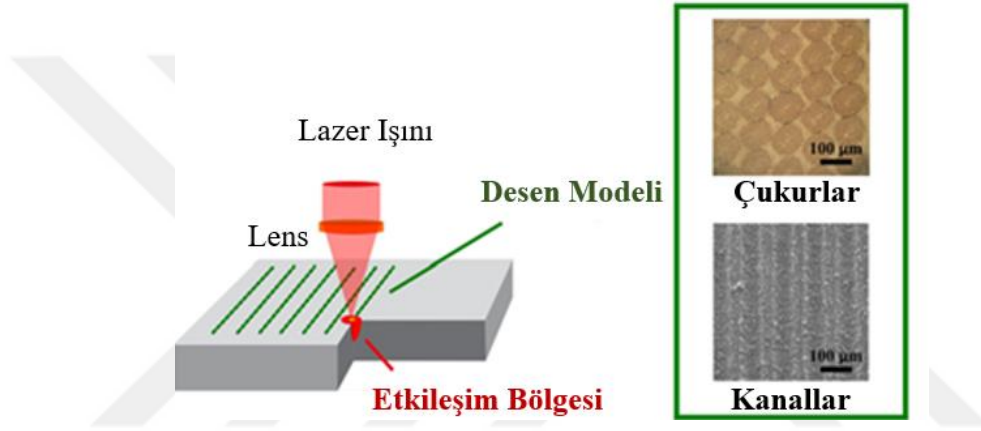
Başka bir çalışmada, UYMAPE numunelerinin yüzeyi 1 kHz tekrarlama hızında 450 fs atım yapabilen 1027 nm dalga boyuna sahip bir lazer ile desenlenmiştir (Fernández-Pradas vd., 2012). Bu amaçla, 20 mm çapında, 3 mm kalınlığında ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0.45 μm olan UYMAPE (GUR 1050) diskleri, minimum 0.5 μm artımlı hareket ve 0.1 m/sn maksimum hız ile 3 eksen hareketli desenleme cihazına yerleştirilmiştir. Böylece, UYMAPE yüzeyi boyunca sıkı bir şekilde odaklanmış bir IR femtosaniye lazer ışınının etkisini incelemişlerdir. UYMAPE'nin yüzey bileşiminin, lazer desenlemeden sonra neredeyse etkilenmediğini bildirmişlerdir.

Riveiro vd. (2018), UYMAPE termoplastik yüzey üzerine pikosaniye lazer atımlarıyla (PALS, Prague Asterix Laser System, Çekya) desenleme yapıldığında farklı sonuçlar ortaya çıktığını göstermişlerdir. Çalışmada yüksek enerjili (240 J'ye kadar), 400 ps atım süreli ve 438 nm dalga boyuna sahip bir lazer cihazı kullanılmıştır. Desensiz UYMAPE'ye kıyasla desen yapılarında ve malzemenin kimyasında önemli değişiklikler ortaya çıktığı anlaşılmıştır.

Biyoiimplantların tribolojik performansını iyileştirmek için literatürde farklı yüzey desenleme prosedürleri denenmiştir. 200 μm kenar uzunluğu, 8 ila 10 μm arası derinlik, %10 alan desen yoğunluğu ve üçgen modelleme ile deneyler yapılmıştır (Shen vd., 2021). Shen vd. (2021), yüksek oranda termal etkilerden kaçınmak için femtosaniye lazer sistemi kullanılarak CoCrMo diskler üzerinde 30 mm çapında mikro desenler ve 10 mm yükseklik oluşturmuşlardır. Lazer kaynağı, 190 fs atım genişliğine, 10 kHz tekrarlama frekansına ve ayrıca 10 mW lazer gücüne ayarlanmıştır. Sonrasında tribolojik testler 3.18 MPa'lık bir temas basıncı sağlayan 10 N'lik bir ağırlık altında 63.7 devir/dakika disk dönüş hızında (ki bu değer normal yürüme hızı ile uyumlu 40 mm/sn kayma hızına denk gelmekte) gerçekleştirilmiştir. Kalça protez eklem testlerindeki yağlayıcı için sinoviyal eklemlerdeki durumun benzerliğinin sağlanmasında sığır serumu (B9433, Sigma-Aldrich) kullanılmıştır (Shen vd., 2021). Desenli yapıya sahip biyoiimplantların, tribolojik performansı iyileştirmede en etkili yöntem olduğu ve standart numunelere kıyasla sürtünme katsayısında %50 ve aşınma hızında yaklaşık %45 azalma gösterdiğini belirlemişlerdir. Üstün tribolojik performans için dikkate alınması gereken temel desen değerleri dizisi en önemliden başlanarak; alan desen yoğunluğu, boyut, geometri, derinlik ve dağılım olarak elde edilmiştir. Bu nedenle biyoiimplantlarda kullanılan UYMAPE malzemesinin yüzey deseni

için alan desen yoğunluğu en etkili faktör olmuş ve bu faktör için en iyi seviye değeri %10 olarak belirlenmiştir. Örnek bir diğer sayısal çalışma ile açıklınsa; dairesel oyukların optimum geometrilerinin çaplarının 50 μm ve derinliklerinin de 7.2 μm arasında olması (Çap/derinlik oranı: 6.94) ve %20 yüzey deseni yoğunluğunda en etkin tribolojik performans elde edildiği belirtilmiştir (Zhang vd., 2015).

Lazer sistemi kullanılarak polimer malzeme üzerinde yapılan örnek bir desenleme çalışması aşağıda (Şekil 20) verilmektedir. Çalışmada çukurlu ve kanallı yapılan oluşturulmuştur.



Şekil 20. Polietilen malzeme yüzeyinde oluşturulan lazer desenleme işlemi ve işlem sonucunda oluşan mikro-çukurlar (dimples) ve kanallar (grooves) (Riveiro vd., 2018).

Kalça ve diz protezlerinde (total hip replacement, total knee arthroplasty) yüksek aşınmaya karşı gösterdiği performansı nedeniyle tercih edilen UYMAPE'nin dezavantajı ise düşük sertlik ve anti-sünme özelliği nedeniyle kullanım ömrü yeterli olmama gibi problemler ortaya çıkarmıştır (Wang vd., 2010). Bunun için polimer içine karbon fiber katılması, çapraz bağlı (cross-linked) XL-UYMAPE kullanımı gibi çözümler geliştirilmiştir. Ancak, UYMAPE'den aşınma sonucu kopan parçaların sebep olduğu sterilizasyon probleminin kalça protezinin kullanım ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu rapor edilmiştir (Sato vd., 2012). Kalça implantlarında kullanılan farklı malzeme gruplarındaki lazer cihaz çeşitlerinin desenleme parametrelerini de içeren tablolar aşağıda Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Malzemeler üzerinde kullanılmış lazer cihaz çeşitleri

Malzeme	Dalga Boyu (nm)	Işın Atım Süresi	Frekans (kHz)	Lazer Cihazı	Referanslar
UYMAPE	1027	450 fs	1	Yb:KYW Femtosaniye	(Fernández-Pradas vd., 2012; Riveiro vd., 2018)
UYMAPE	266, 355	60 ps	0.250	Pikosaniye lazer - PL2241 (Ekspla)	(Gedvilas ve Raciukaitis, 2005; Raciukaitis ve Gedvilas, 2005)
Magnezyum alaşımı	532	1.2 ns	20 - 300	IPG Photonics (YLPG-5, IPG Photonics, Oxford, MA, ABD)	(Furlan vd., 2016)
AISI 316L Çelik	1030	1.7 ps	1	HiLASE Perla B lazer sistemi	(Hauschwitz vd., 2021)
Ti6Al4V	1064	Katı ışın lazer	3.5	Nd:YAG nanosaniye	(Kashyap ve Ramkumar, 2021)
CoCrMo	1028	220 fs	200	Femtosaniye lazer, PHAROS 15-1000-PP (Light Conversion, Litvanya)	(Dorner-Reisel vd., 2020)

Lazerle yüzey desenleme sonucu yüzeyde oluşturulan mikro boyutlu oyukların (micro-dimple) veya diğer adıyla yağ ceplerinin (lubricant pocket) sürtünmeyi azalttığı literatürde yer almaktadır (URL-18, 2021). Yüzeyde lazer cihazı ile oluşturulacak mikro-çukur yapıların toplam alanının yüzey alanına oranı, alan desen yoğunluğu ile ifade edilmektedir. Bunun için aşağıdaki denklem kullanılmıştır (Denklem 1).

$$S = \frac{\pi d^2 \times Q}{K \times L} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Burada: K ve L desenli yüzey alanına ait uzunluk ve genişlik değerleri (μm), d mikro-çukur çapını (μm), Q mikro-çukur adet sayısı ve S ise alan desen yoğunluğunu (%) temsil etmektedir.

1.3. Tezin Kapsamı ve Literatüre Katkısı

Kalça ve diz protezlerinin günümüzde ve gelecekte oldukça rağbet görecektir bir sağlık alanı olacağı bilinmektedir. Birçok olumlu ve başarılı çalışmalar ile protez ameliyatları yapılmakta ve insanlar hayata eskisi gibi kazandırılmıştır. Fakat her ne kadar yeni ve teknolojik bir ürün kullanılsa bile kullanım süresi geçtikçe üründe deformasyonlar ve bozulmaların olacağı aşikardır. Bu duruma binaen, protezin genelde en çok aşınan kısmı femur başı ve bu baş kısmın karşısında bulunan leğen kemiğine bağlı olan asetabular baş kısım içerisindeki polietilen UYMAPE malzemenin uzun ömürlü kullanımlar sonucunda yağlayıcılık özelliğini kaybetmesi ve yüzeyde oluşacak mikro partiküller ile sürtünme etkisinin ve sıcaklığın artması gibi olumsuzluklar oluşabilmektedir. Bu gibi istenmeyen yüzey durumları için literatürdeki araştırmalara bakıldığında birçok olumlu sonuçlar alınsa da ömür ve pratiklik açısından ideal bir kombinasyon ve tasarım üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Konu kapsamında yapılan literatür araştırmasında Ti6Al4V biyoyumlu femur başı malzemesine karşı kullanılan yağlayıcılığı yüksek UYMAPE numunesi yüzeyinde oluşturulmuş dairesel mikro-çukur formunda lazer desenleme işleminin eksikliği ve UYMAPE malzemesine karşı sürtünme ve aşınma testlerinin yetersiz olduğunun tespiti yapılmıştır. UYMAPE materyalinin alan desen yoğunluğu için en etkili faktör optimum geometrisi 50 μm mikro-çukur çapı ve bu faktör için en iyi seviye değeri %10 değerinin var olduğu literatürden anlaşılmıştır. Fakat ilgili çalışmalar ve literatür çalışmalarında farklı tip UYMAPE kullanımına yer verilmediği görülmektedir.

Gelişmekte olan medikal sektörü için malzeme performansı açısından ele alan çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında 40 μm , 100 μm ve 150 μm mikro-çukur çaplarının, %5, %10 ve %15 alan desen yoğunluk oranlarının ve 3 farklı malzeme parametrelerin sürtünme ve aşınma performansı üzerindeki etkisinin sistematik bir şekilde incelenmesi, kendi içlerinde karşılaştırılması ve Ti6Al4V biyoyumlu alaşımın yüzeyinde aşınma etkilerinin var olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Deneyleer için Ti6Al4V (Grade 23)'un tercih edilmesinin en temel sebebi; daha az malzeme sertliğine sahip olmaları ve bu nedenle stres miktarına bağlı olarak kemik içi erime oranını azaltmada teorik avantaja sahip olmasıdır. Ti6Al4V malzemesinden iyonların salınmasında Alzheimer gibi hastalıklar ortaya çıkabilmektedir lakin titanyum oksit (TiO₂) ile kaplanmış yüzeylerde bu durumlar minimize edilebilmektedir. Literatürde tercih edilen CoCrMo alaşımının bu çalışma kapsamında tercih edilmemesinin sebebi ise tezin amacının UYMAPE numuneler üzerindeki mikro-çukur parametrelerinin tespiti ve Ti6Al4V'nin CoCrMo gibi benzer bazı mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Ayrıca kobalt krom insan vcdunda idrar içerisinde iyonlarının da bulunabiliyor olması bizlerin çalışmasını titanyum malzememe üzerine odaklamıştır.

Literatürde yapılmış çalışmalarda genellikle kare ve dikdörtgen şeklinde desenlemelerin yapıldığı ve günlük hayatta bakıldığında kalça protezleri için standart UYMAPE, apraz bağlı (ÇUYMAPE), vitamin e takviyeli (VE-UYMAPE) ve çapraz bağlı-vitamin E takviyeli (VE-ÇUYMAPE) malzemeleri gibi kullanımı yaygın malzemeler üzerindeki çalışmaların eksikliği göze çarpmaktadır. Halbuki uygulamada bakıldığında, lazer desenlemelerin farklı malzeme türleriyle ve farklı desen oranları kullanarak kıyaslanabilir olacağı düşünülmüştür. Ancak, literatürde bu değişkenlerin çalışmalara dahil edilmediği göze çarpmıştır.

Ayrıca bu çalışmada kalça ve diz protezleri içerisinde bulunan yağlayıcı olarak görev alan UYMAPE malzemenin ve türevlerinin yüzey desenleme yöntemlerinden en hassas ve pratik olanı lazer yüzey desenleme yöntemi ile malzeme yüzeylerinin mikro-çukur desen formları ile sürtünme katsayısının ve dolayısıyla aşınmanın azaltılması amaçlanmıştır. UYMAPE malzemenin yüzeyinde oluşturulacak olan mikro ölçekteki çukurların farklı lazer tipleri ile desenlenebilirliği, hangi tip lazer cihazının polietilen için daha güvenilir, verimli olduğu tespit edilmiştir. Son olarak da yüzeyde oluşturulmuş olan mikro-çukurların insan vcdundaki durumuna benzer bir yağlayıcı ile tribolojik blok-disk triboloji testlerinin yapılması ve temaslı yüzeylerde çalışan bu malzemelerin kullanım ömürlerinin arttırılması üzerindeki etkisinin sistematik bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır.

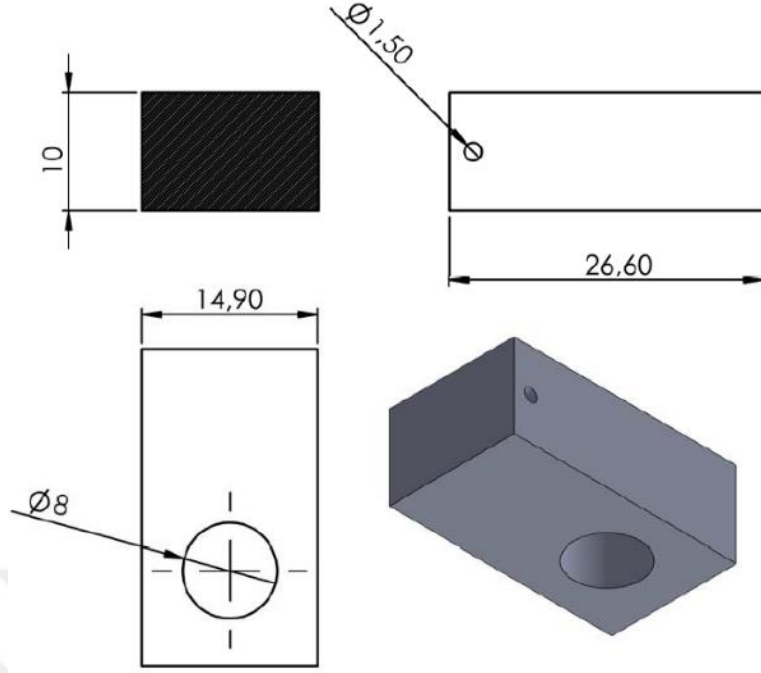
Deneysel alışmalar sonrasında elde edilecek bilgi ve uygulama deneyiminin biyomedikal sektörün ihtiyaç duyacağı ve ülkemizin öncelikli alanları arasında yer alan tıbbi alanda yüksek katma değerli protez ürünlerinin imalatı ve performanslarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürde eksikliği ifade edilen UYMAPE malzeme üzerinde, lazer yüzey desenleme işlemleri için kullanılan bazı lazer cihazlarının yüzeyde oluşturduğu yanık etkisi, kalça protezlerinde asetabular ara yüzey malzemesi olarak kullanılan polietilenin sürtünme katsayısının düşürülmesi, hangi tip lazer sisteminin ideal bir yaklaşım sergilediğini ve kullanılan 3 çeşit UYMAPE yağlayıcı malzemenin hangisinin uzun ömürlü olacağını etkilerin derinlemesine anlaşılması ve test edilen malzeme grupları üzerinden optimum yüzey desen parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen UYMAPE'ler, İngiltere'de bulunan ve ortopedik implant malzemeleri üreten Orthoplastics firması ile bilgi paylaşımının akabinde firma tarafından ücretsiz olarak gönderilmiştir. Temin edilen polietilen esaslı malzemeler; ticari olarak GUR 1020 PE, GUR 1020 XL ile GUR 1020 EXL şeklinde adlandırılmaktadır. Tez kapsamında biyomedikal uygulamalarda yoğunlukla kullanılan bu 3 farklı çeşit UYMAPE üzerine literatürde de bahsedildiği üzere malzeme yüzeyinde oluşturulacak desenlemelerin sürtünme ve aşınma için olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasında yüzey desenleme yöntemlerinden lazer yüzey desenleme yönteminin kullanımı planlanmıştır.

Testler için kullanılacak blok-disk düzeneğinin blok numune yerleştirme yerine malzemenin boyutsal anlamda uygunluğu açısından Orthoplastics şirketinden tedarik edilen UYMAPE numuneleri, öncelikle Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Talaşlı İmalat Laboratuvarında frezeleme ve tornalama işlemleri yapılarak 10 mm × 14.9 mm × 26.6 mm boyutlarına getirilmiştir (Şekil 21). Lazer desenleme işlemine tabi tutulan yüzey 14.9 mm × 10 mm'lik bir yüzey alanına sahiptir.



Şekil 21. Lazer yüzey desenlemede ve tribolojik testlerde kullanılacak UYMAPE numunenin ölçüleri

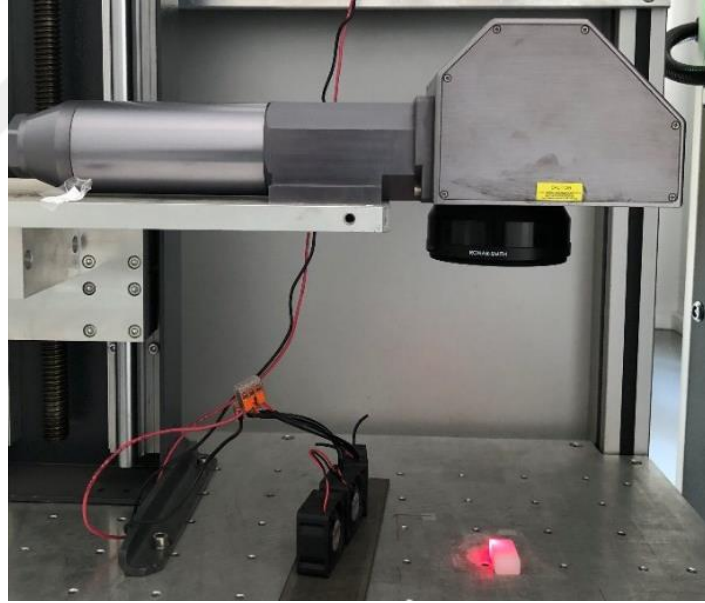
Talaşlı imalatta, numunelerin boyutsal olarak istenilen ebatlara getirildikten sonra çalışmanın esas kısmını oluşturan lazer desenleme işlemleri için 3 farklı lazer desenleme denemesi farklı kurum/üniversite araştırma birimleri imkanları ile (IPG Photonics-İstanbul, KUYTAM-Koç Üniversitesi, HiLASE/CVUT-Çekya) gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, UYMAPE malzemelerin yüzeylerinin nanosaniye lazer desenlemenin yapılması ile başlanmıştır. Ardından, Koç Üniversitesi Yüzey Teknolojileri Araştırma Merkezi'nde (KUYTAM) bulunan femtosaniye lazer sistemleri kullanılarak desenleme işlemleri yapılmış ve en son olarak Çekya'da bulunan HiLASE (Yüksek Teknoloji Lazer Araştırma Merkezi/Hi-tech Laser Research Center) araştırma merkezinde femtosaniye lazer sistemi ile UYMAPE polietilen grubu numunelerin desenleme işlemleri yapılmıştır.

Taguchi tarafından geliştirilmiş olan ve kendi adını da vermiş olduğu deney tasarım yöntemi, deneysel işlemlerin gerçekleştirilmesinde çalışmalara oldukça verimli sonuçlar sunmuştur. Bu yöntemin amacı, ulaşılmaması gereken değer için değişkenliklerin azaltılmasıdır. Bu sayede deney sayılarını önemli ölçüde azaltmak mümkün olmuştur (Hussain vd., 2020). Desenleme işlemi deney tasarımında ise Minitab 19 yazılımı Taguchi analizi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında lazer desenleme ve tribolojik testler gerçekleştirilmiş ve numunelere ait sürtünme katsayıları ve aşınma miktarları belirlenmiştir.

UYMAPE polimer numuneleri için aşınma hacimleri hesaplanarak veriler yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Faktörler için sinyal/gürültü (S/G) yani Ortalama/Standart sapma oranları, faktörlerin ANOVA analizleri, güvenilirlik değerleri ve etkileşim grafikleri ile deneysel tasarım değerlendirilmiştir. Analiz %95 güven seviyesinde ve S/G oranı etki grafiklerinden "en küçük en iyi" S/G kalite karakteristiği seçilmiştir.

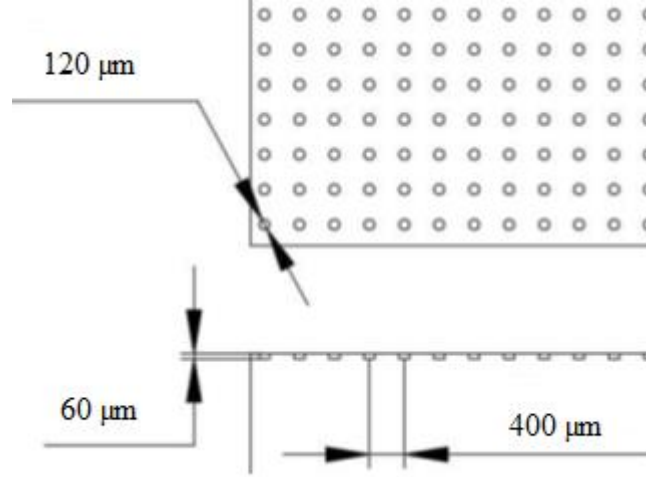
2.1. Nanosaniye Lazer ile Desenleme İşlemi

Standart GUR 1020 PE numunesi üzerine yapılması planlanmış lazer desenleme işlemi için İstanbul'da bulunan IPG Photonics firmasına UYMAPE numuneleri gönderilmiştir. Desenleme işlemi firma bünyesinde bulunan nanosaniye ışın atımlı fiber lazer ile (Şekil 22) ile yapılmıştır.



Şekil 22. Nanosaniye lazer cihazı ve lazer desenleme işlem anı (IPG Photonics, İstanbul)

Lazer desenlemedeki yüzey desen ölçüleri ve desen geometrisi Şekil 23'te verilmektedir. İstenilen desen boyutları; mikro-çukur çapı 120 μm , mikro-çukur adımı 400 μm , mikro-çukur derinliği ise 60 μm ve mikro-çukur alan desen yoğunluğu %7 olacak şekilde desenleme işleminin yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 23. Lazer yüzey desen ölçüleri ve desen geometrisi

IPG Photonics bünyesinde yapılmış desenlemeler için kullanılan lazer parametreleri Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Fiber (nanosaniye lazer) lazer parametreleri

Numune	UYMAPE
Dalga boyu	1064 nm (50W IR Marker), 355 nm (3W UV Marker)
Atım süresi	10 ns
Frekans	20 kHz

UYMAPE malzeme üzerine lazer sistemi ile desenleme yapılmış ve bu desenleme sonuçlarına ait görsel ve çıkarımlar bulgular ve irdeleme kısmında ilgili başlık altında verilmektedir.

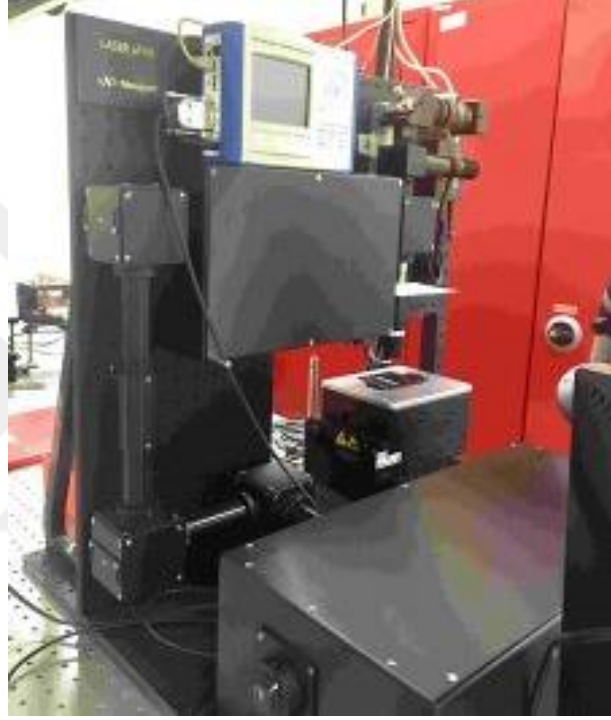
2.2. Femtosaniye (120 fs atımlı) Lazer Desenleme İşlemi

İkincil lazer desenleme adımı olan femtosaniye desenleme işlemi için İstanbul Koç Üniversitesi Yüzey Teknolojileri Araştırma Merkezi (KUYTAM) bünyesinde bulunan

femtosaniye lazer (Şekil 24) ile mevcut elimizdeki polimer esaslı UYMAPE'nin işlenmesi için birlikte bir çalışma yürütülmüştür.

Lazer desenlemede kullanılan UYMAPE malzemelerin detay bilgileri aşağıda verilmektedir.

- UYMAPE (GUR 1020 PE)
- ÇUYMAPE (GUR 1020 XL)



Şekil 24. Koç Üniversitesi KUYTAM'da bulunan 120 fs ışın atımlı μ Fab femtosaniye lazer sistemi (URL-19, 2021).

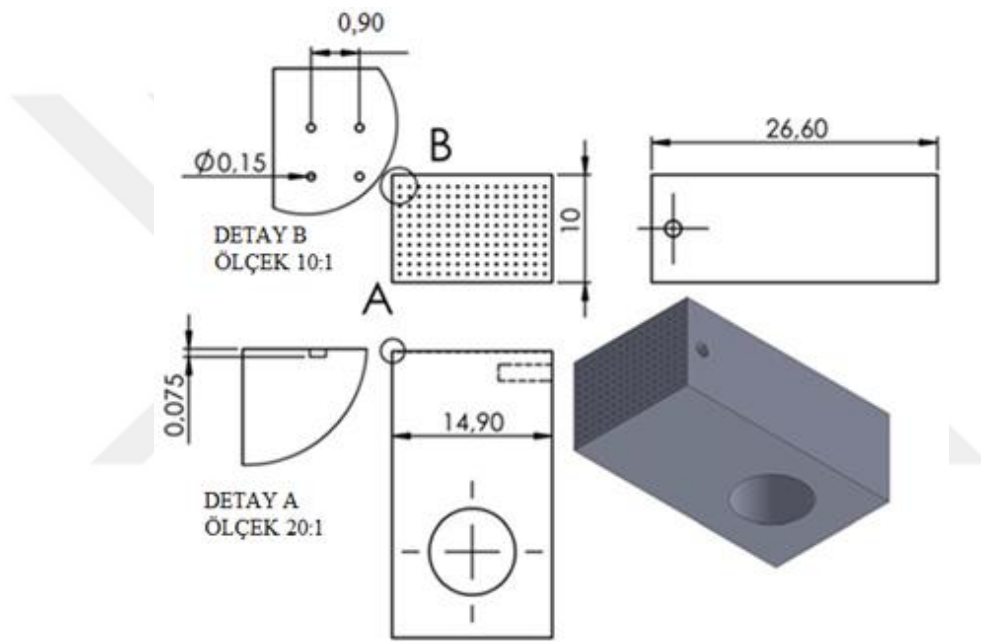
Femtosaniye lazer makinasının uygulama alanları, cihazın özellikleri ve test parametreleri aşağıda verilmiştir:

- Malzeme (cam, polimer, metal, yarı iletken vb.) işleme
- Bilgisayar kontrollü 3D hareket
- Maksimum tabla (x,y-eksenleri): 300 mm/sn
- Lazer kaynağı dalga boyutu: 800 nm
- Lazer tekrarlama hızı (repetition rate): 1 kHz
- Lazer ışın atım süresi (pulse duration): 120 fs

- Tarama hızı (scan rate): 200 $\mu\text{m}/\text{sn}$

2.2.1. GUR 1020 PE Numune İçin Desenleme Parametreleri

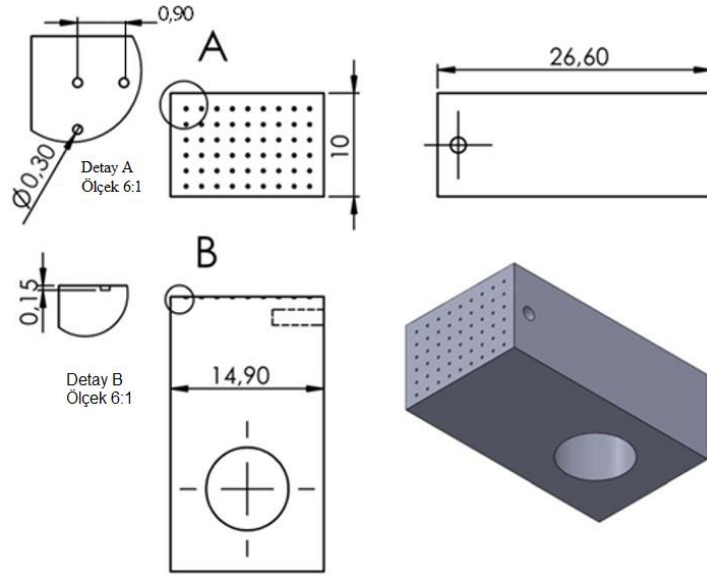
Deneysel çalışma için kullanılan GUR 1020 PE numune yüzeyine lazer ile yapılan desenlemeye ait ölçüler; alan desen yoğunluğu %2, mikro-çukur çapı 150 μm , derinlik 75 μm , mikro-çukur adımı 900 μm şeklindedir (Şekil 25).



Şekil 25. GUR 1020 PE numune üzerinde oluşturulacak %2 alan desen yoğunluklu 160 adet mikro-çukur desene ait ölçüler (150 μm mikro-çukur çapı, 75 μm mikro-çukur derinlik)

2.2.2. GUR 1020 XL Numune İçin Desenleme Parametreleri

Deneysel çalışma için kullanılan GUR 1020 XL numunesi için alan desen yoğunluğu %8, mikro-çukur çapı 300 μm , derinlik 150 μm ve mikro-çukur adımı 900 μm olacak şekilde desenleme işlemi planlanmıştır. Yapılması planlanmış desenlemeye ait teknik ölçüler Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. GUR 1020 XL numune üzerinde oluşturulacak %8 alan desen yoğunluklu 160 adet mikro-çukur desene ait ölçüler (300 μm mikro-çukur çapı, 150 μm mikro-çukur derinlik)

2.3. Femtosaniye (270 fs atımlı) Lazer Desenleme İşlemi

KUYTAM bünyesinde yapmış olduğumuz desenlemelerden farklı mikro-çukur dağılım oranlarında, mikro-çukur çap değerlerinde ve en önemlisi yüksek lazer atımlı lazer kullanımı ile oluşturulması hedeflenen desenlemeler HiLASE Araştırma Merkezi'nde (Çekya) bulunan ultra-kısa lazer ışını atımlı (ultra-short pulse laser) femtosaniye lazer cihazı (Şekil 27) kullanılmıştır.

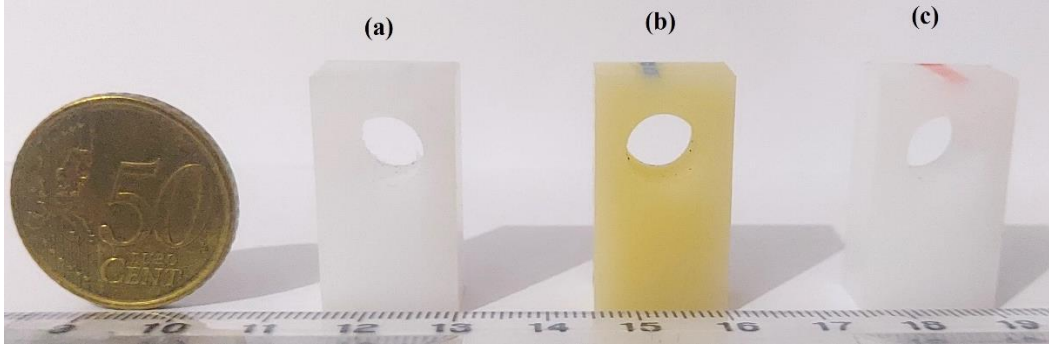


Şekil 27. HiLASE Çekya'da bulunan 270 fs ışın atımlı femtosaniye lazer cihazı (URL-9, 2022).

HiLASE enstitüsünde kullanılan CARBIDE CB-3-40W (Light Conversion, Litvanya) femtosaniye lazer parametreleri aşağıda verilmektedir;

- Dalga boyu: 343 nm
- Tekrarlama oranı: 200 kHz
- Nokta çapı: 20 μm
- Atım süresi: 270 fs
- Tarama hızı: 100 mm/s
- Ortalama güç: 0.1 W
- Akı: 0.32 J/cm²

270 fs lazer desenleme için 3 farklı (GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL) UYMAPE malzeme kullanılmıştır. UYMAPE malzemeler, İngiltere'den Ortoplastik Medikal plastikler ve ileri üretim yapan firma (Orthoplastics Ltd, Lancashire, İngiltere)'dan tedarik edildi (URL-20, 2021). Desenleme işlemine tabi tutulacak 3 farklı numune grubuna ait örnekler Şekil 28'de verilmektedir.



Şekil 28. Kullanılan 3 farklı UYMAPE grubu numuneleri; (a) GUR 1020 PE; (b) vitamin E takviyeli ve gama ışınli GUR 1020 EXL; (c) Gama ışınli GUR 1020 XL

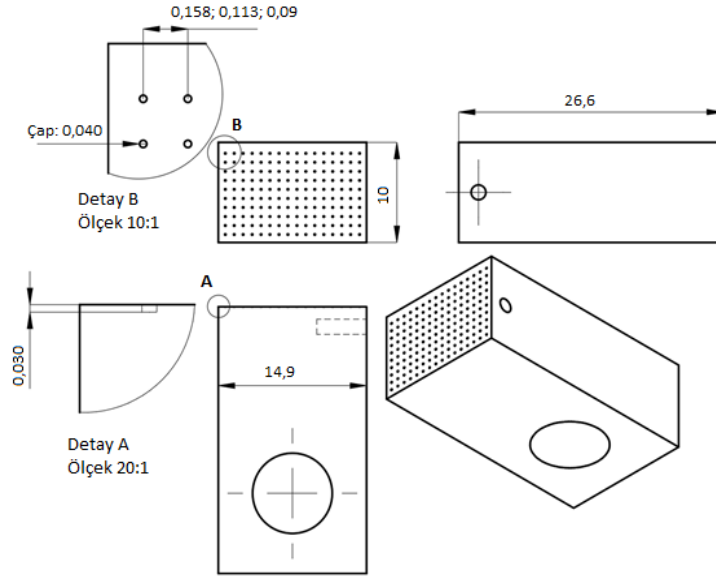
2.3.1. Farklı Desenleme Parametreleri ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

3 farklı mikro-çukur çapı, derinlik ve alan desen yoğunluğu ile 3 farklı malzeme grubu üzerinde lazer desenleme planlanmıştır. Herbir UYMAPE grubu için lazer desenleme parametreleri Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 7. 3 farklı malzemenin lazer desenleme işlemi için parametreler

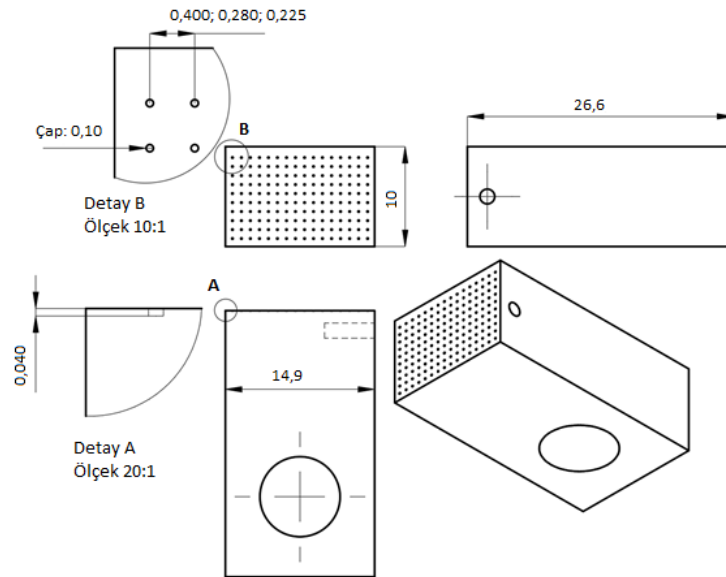
Deney No:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mikro-çukur Çapı (μm)	40	100	150	40	100	150	40	100	150
Alan desen yoğunluğu (%)	5	5	5	10	10	10	15	15	15
Derinlik (μm)	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Mikro-çukur Adımı (merkezden merkeze) (μm)	158	400	600	113	280	410	90	225	340

30 μm mikro-çukur derinliği için 40 μm mikro-çukur çapında, 3 farklı (%5, %10 ve %15) alan desen yoğunluk oranlarındaki ve 3 farklı malzeme grubuna ait boyutlar Şekil 29'da verilmektedir.



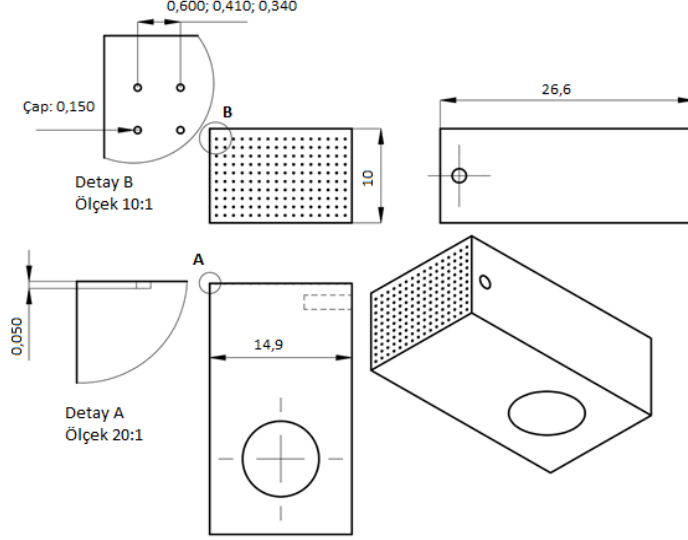
Şekil 29. 30 μm mikro-çukur derinliği, 40 μm mikro-çukur çapı ve 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranlarındaki desenleme boyutları

40 μm mikro-çukur derinliği için 100 μm mikro-çukur çapında, 3 farklı (%5, %10 ve %15) alan desen yoğunluk oranlarında ve 3 farklı malzeme grubuna ait teknik detaylar Şekil 30'da verilmektedir.



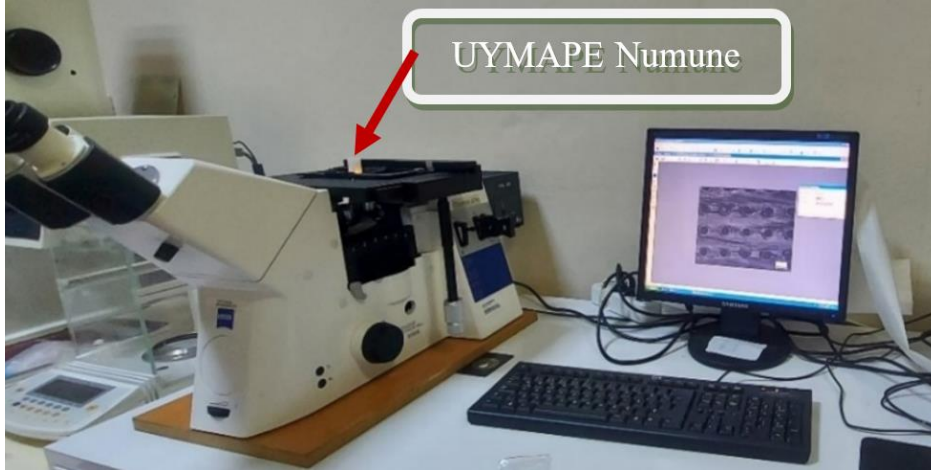
Şekil 30. 40 μm mikro-çukur derinliği, 100 μm mikro-çukur çapı ve 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranlarındaki desenleme boyutları

50 μm mikro-çukur derinliği için 150 μm mikro-çukur çapında, 3 farklı (%5, %10 ve %15) alan desen yoğunluk oranlarında ve 3 farklı malzeme grubuna ait teknik detaylar Şekil 31'de verilmektedir.

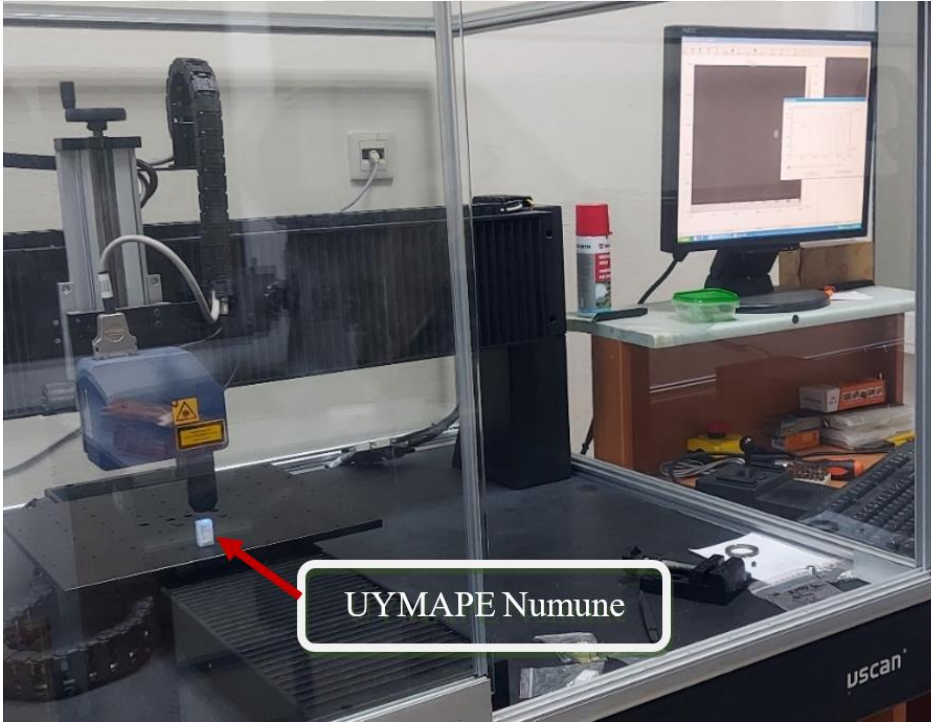


Şekil 31. 50 μm mikro-çukur derinliği, 150 μm mikro-çukur çapı ve 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranlarındaki desenleme boyutları

Lazer desenleme işlemleri gerçekleştirildikten sonra numuneler üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan optik mikroskop (Şekil 32) ve profilometre cihazı ile (Şekil 33) mikro-çukur derinliği, mikro-çukur çapı ve mikro-çukur adım kontrolü yapılmıştır.



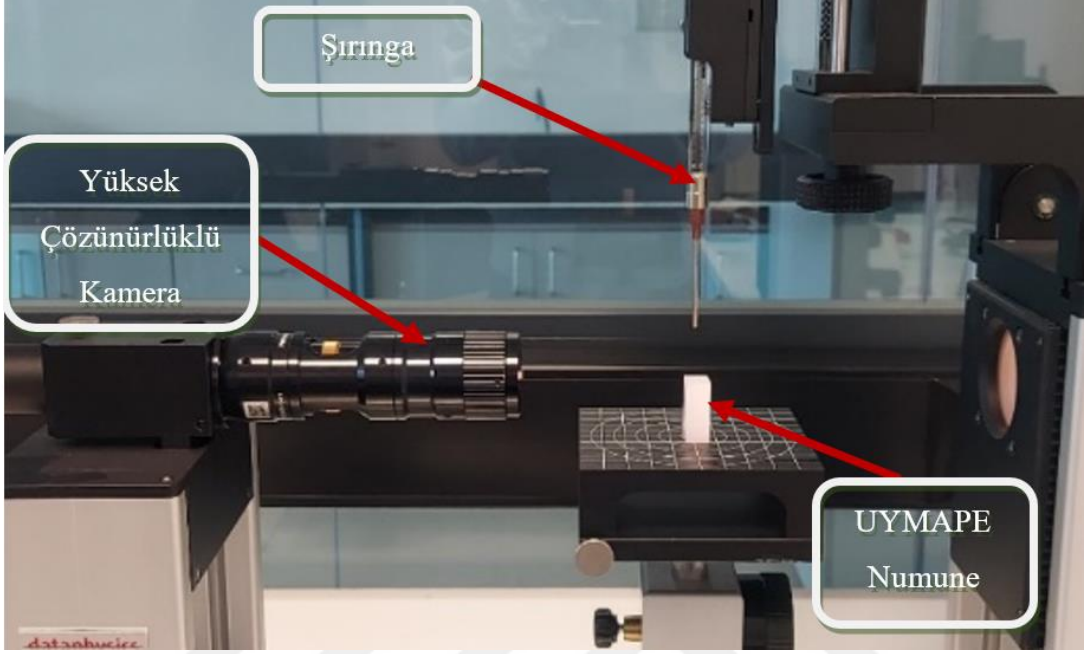
Şekil 32. 1000x büyütme yapabilen metal mikroskobu



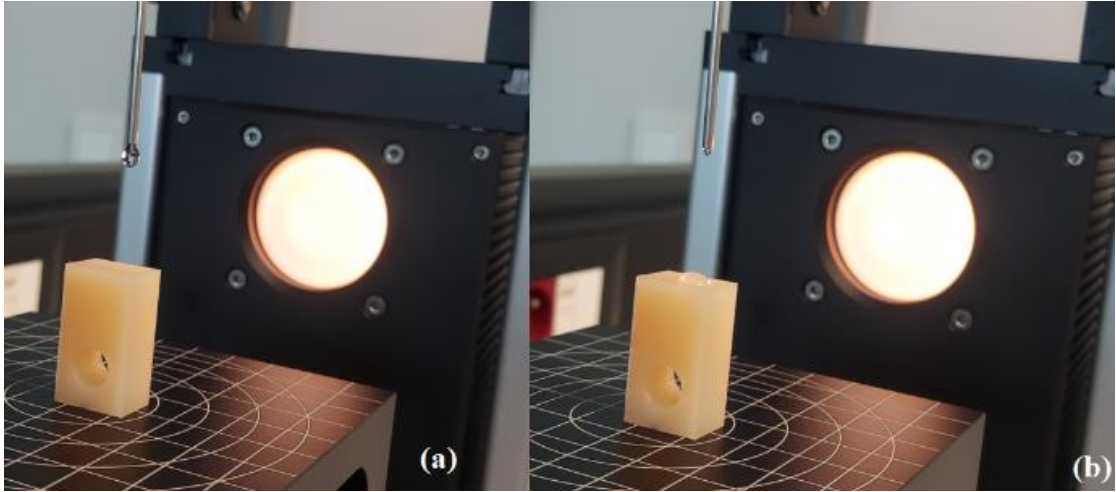
Şekil 33. Nanofocus temassız konfokal mikroskop

Lazer desenleme işlemi görmüş numune grupları üzerinde Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı'na bağlı Su Ürünleri Merkez Araştırma Enstitüsü'nde (Trabzon) bulunan Dataphysics marka OCA serisi (Şekil 34) temas açısı ölçüm cihazıyla ölçümler alınmıştır. Ayarlanabilir damla hacimli şırınga içerisinde damlayan 2 μ L su damlasının

damlama anı Şekil 35 (a)'da ve yüzeye temas ettiği durumu gösteren an ise Şekil 35 (b)'de verilmektedir.



Şekil 34. Dataphysics marka OCA serisi temas açısı ölçüm cihazı



Şekil 35. (a) Su damlasının şırınga iğnesinden damlama anı; (b) su damlasının yüzeye temas etme ve yüzeyde yayılması

Bu çalışma kapsamında blok-disk aşınma testi için; desenlem alan desen yoğunluk oranı, mikro-çukur derinliği, mikro-çukur çapı değişken faktörler, kuvvet ve kayma hızı ise

sabit faktörler olmak üzere beş faktör seçilmiştir. Her bir değişken faktör için üç seviye belirlenmiştir. Bunlar, 3 farklı mikro-çukur çapı (40, 100, ve 150 μm), 3 farklı derinlik (30, 40, ve 50 μm), 3 farklı alan desen yoğunluk (%5, %10 ve %15) oranları olmuştur. Bu faktörler 3 farklı malzeme grubu için test edilmiştir. Her bir testte temas yükü değeri 150 N ve kayma hızı 1.5 m/s olacak şekilde seçilmiştir. İlgili deney faktörleri ve seviyeleri Tablo 8'de verilmektedir. Çalışmalardaki parametreler belirlenirken literatür çalışmaları referans alınmıştır (Wang ve Essner, 2001).

Numunelerinin yüzeylerinden lazer işlem sonrası profilometre cihazı ile ölçülen değerler ile istenilen değerler karşılaştırıldığında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum grafiksel olarak üç grup numune için irdeleme ve bulgular kısmında (3.3 başlığı altında Şekil 61) açıklanmıştır. 3 farklı malzeme grubu üzerinde yapılmış lazer desenleme işlem sonrasında aynı çap değerlerindeki derinlik mikron değerleri karşılaştırıldığında istenilen değerlere göre yüksek oranlarda sapmalar meydana gelmektedir. Bu yüzden Taguchi yönteminde kullanılacak değişken faktör sayısı mikro-çukur çapı ve alan desen oranı olarak ikiye indirilmiştir.

Tablo 8. Sürtünme deneylerinde kullanılan faktörler, seviyeleri ve serbestlik dereceleri

SEVİYELER	Değişken Faktörler		Sabit Faktörler	
	Mikro-çukur Çapı (μm)	Yoğunluk (%)	Kuvvet (N)	Kayma Hızı(m/s)
1	40	5	150	1.5
2	100	10	150	1.5
3	150	15	150	1.5
Serbestlik Dereceleri	3-1 = 2	3-1 = 2		

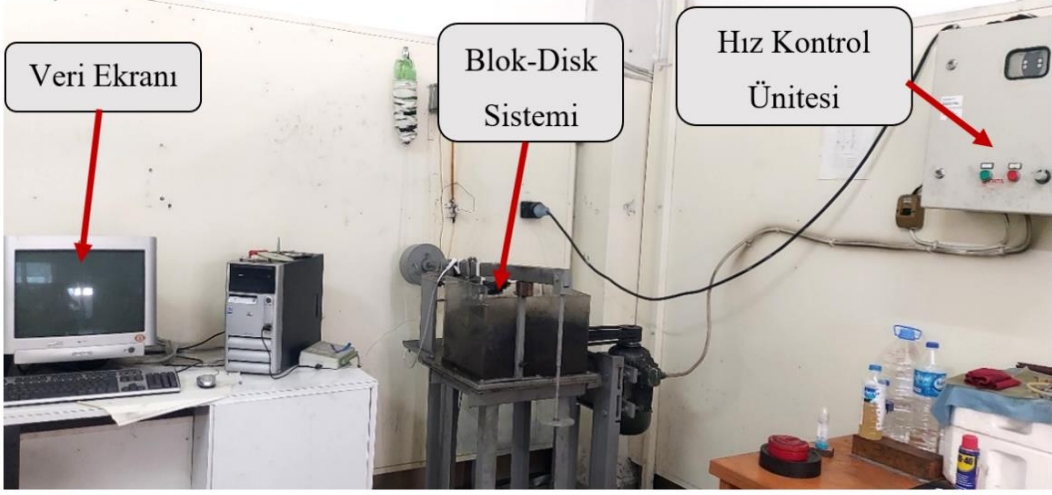
Tablo 8'den görüldüğü gibi 2 değişken faktör, 3 seviyeli olarak ölçülmüştür. Serbestlik derecesi hesaplama işlemi yaparken ilgili faktörün seviyesinin 1 eksiği alınıp faktör serbestlik derecesi elde edilmiştir. Tüm faktörler için hesapladıktan sonra hepsinin toplamına 1 ekleyip toplam serbestlik derecesi elde edilmektedir. Bu durumda tribolojik testler için Taguchi'nin $L_9(3^2)$ serisinin uygun olduğu görülmüştür. L_9 tasarım matrisi Tablo 9'da verilmektedir.

Tablo 9. L₉ (3²) serisine göre düzenlenmiş deney faktörleri ve UYMAPE malzemeleri

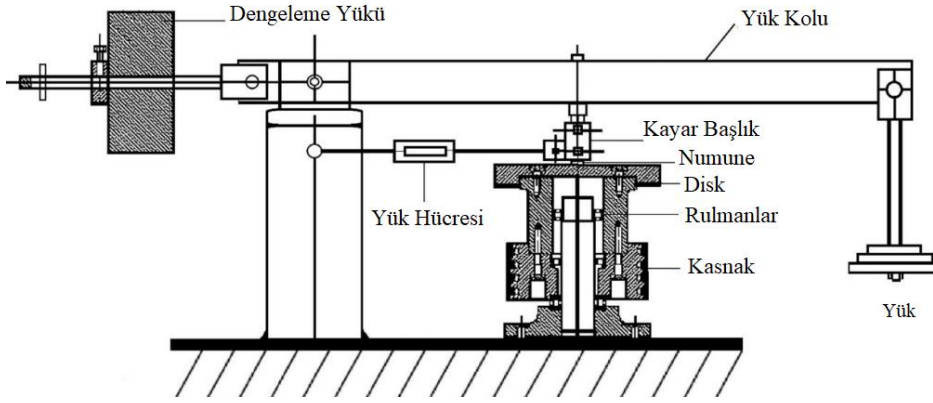
Deney No	Mikro-çukur Çapı (µm)	Alan desen yoğunluğu (%)	Numuneler		
1	40	5	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
2	100	5	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
3	150	5	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
4	40	10	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
5	100	10	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
6	150	10	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
7	40	15	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
8	100	15	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
9	150	15	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL

UYMAPE malzemenin blok-disk testleri için Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri Laboratuvarı'nda bulunan blok-disk tribolojik test cihazı (Şekil 36) kullanılmıştır. Aşınma test cihazının teknik görüntüsü Şekil 37'de verilmektedir. Sistem; disk, blok (numune), termoçift deliği ve elemanı, yükleme sistemi (yük), sürtünme kuvveti ve sıcaklık ölçüm sistemi, destek, denge ağırlığı, kayar kızak ve yük hücresinden oluşmuştur.

Test cihazı; ayarlanabilir frekans değerinde dönebilen SAE 1045 çelik disk elemanı üzerine montajını yapılan ve boyutları 156 × 156 × 0.67 mm ebatlarında Ti6Al4V aşındırıcı disk plaka, plaka üzerinde test edilecek blok numune, numuneye bağlı termokupl bağlantı teli ve döner plaka üzerine damlayan yağlayıcıdan oluşmaktadır. Yağlayıcı olarak, literatürde bovine (fetal sığır) serum olarak bilinen sıvı kullanılmıştır.



Şekil 36. Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü malzeme bilimleri laboratuvarında bulunan blok-disk tribolojik test cihazı



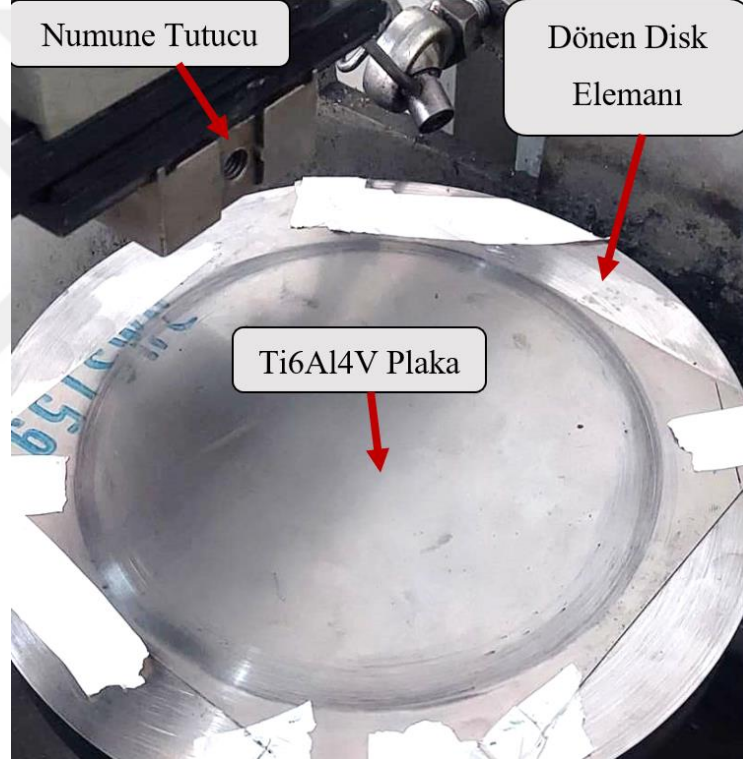
Şekil 37. Aşınma test cihazının önden kesit görünümü

UYMAPE numunelerine karşı teste tutulan plaka malzemesi, Ti6Al4V (ELI) alaşımı olup, ASTM F136 standartlarındaki yoğunluğu 4430 kg/m^3 , Ergime noktası $1604\text{-}1660 \text{ }^\circ\text{C}$ arası, sertlik değeri 35 HRC, çekme mukavemeti 860 MPa ve akma gerilmesi 790 MPa olarak belirtilmektedir. Ti6Al4V malzemesinin kimyasal içeriği Tablo 10'da verilmektedir (Wilches vd., 2008; URL-21, 2022; URL-22, 2022).

Tablo 10. Ti6Al4V (ELI) alaşımına ait malzemeler ve kimyasal bileşim oranları (URL-23, 2022).

Alaşım	Kimyasal bileşimi % (ağırlıkça)							
	C	N	H	Fe	O	Al	V	Ti
Ti6Al4V (ELI)	0.03	0.01	0.03	0.1	0.1	6	4	89.73

Ti6Al4V plakanın, test cihazı üzerindeki çelik disk parça üzerine montajı (Şekil 38) yapıştırma teknikleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

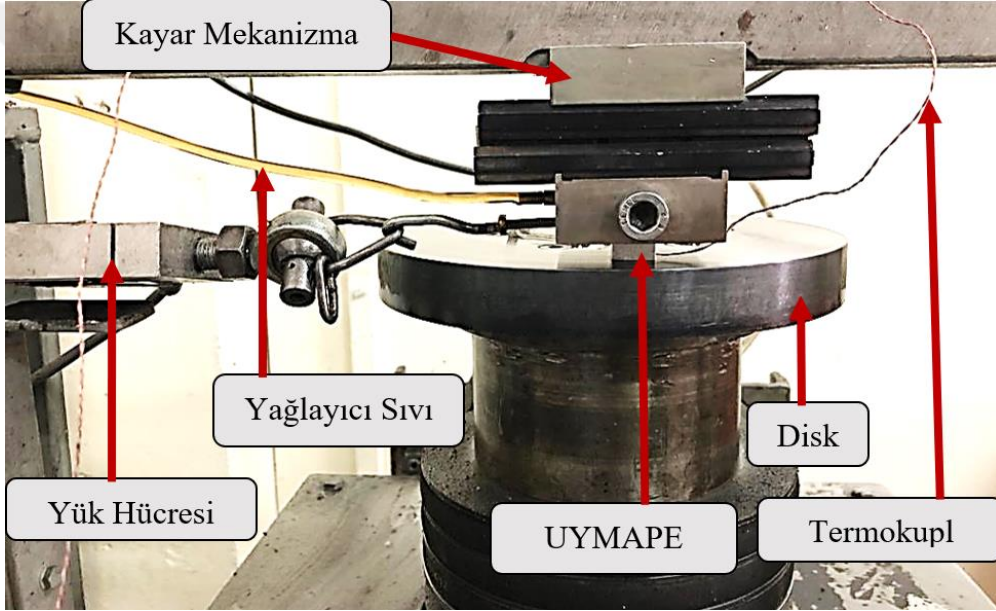


Şekil 38. Ti6Al4V malzemenin test cihazı üzerindeki çelik disk parça üzerine montajı

Ti6Al4V plakanın yüzey pürüzlülük değeri, deney öncesi ve her bir malzeme grubunun deneyleri sonrası ölçülmüştür. Plaka için başlangıç yüzey pürüzlülük değeri (Ra) 0.176 μm olarak ölçülmüştür. Tribolojik testler, 3000 m kayma mesafesi (7200 çevrim) için 150 N (1 MPa) yük altında, 1.5 ms^{-1} değerindeki tek kayma hızında ve her bir test 40 dakika

sürecek şekilde gerçekleştirilmiş; toplamda 30 (test planına ilaveten karşılaştırma amacı ile 3'er adet her bir numune grubundan desensiz ve 27 adet desenli numune) test yapılmıştır.

Deney başlangıcından önce termokupl (bakır ve nikel) elemanının ve yük hücresinin kalibrasyonu yapılmıştır. Sürtünme kuvveti bir yük hücresi ile ölçülmüş ve sürtünme katsayısı, sürtünme kuvvetinin normal yüke oranı ile hesaplanmıştır. Deneyler sırasında aşınma numunelerinin sıcaklığı, Şekil 39'da gösterildiği gibi tribolojik test sistemi, temas yüzeylerinden 1.5 mm uzakta bulunan bir bakır-nikel termokupl tel, yağlayıcı sıvı yol hattı, disk elemanı, yük hücresi ve UYMAPE'nin bağlı bulunduğu kayar mekanizmasından oluşmaktadır.



Şekil 39. Tribolojik test sistemi elemanları

Deney öncesi ve sonrasında UYMAPE numuneler ultrasonik banyoda 25 °C sıcaklıkta, ilk olarak 10 dakika saf su içerisinde, ardından 20 dakika etil alkol çözeltisinde, son olarak 10 dakika saf su içerisinde temizlenmiştir. Ardından numuneler kurutulmuştur. Her testten önce numuneler 0.01 mg hassasiyette bir terazi kullanılarak tartılmıştır. Plaka yüzeyi, her testten önce yüzey kirleticilerini gidermek için organik çözücülerle ilk olarak saf su ile, ardından asetilen ile ve son olarak da yine saf su ile temizlenmiştir. Deney boyunca insan vücudundaki kalça protez yağlayıcı ortamı yansıtmak için ISO 14242 standardına ve literatürde yapılan benzer çalışmalara göre hazırlanan hacimce %25 sığır serumu (bovine

fetal serum), %75 saf su ve bakteriyel kontaminasyonu önlemek için 2.34 gr 5 miliMolar EDTA kullanılmıştır (Kaddick ve Wimmer, 2001; Wilches vd., 2008; URL-24, 2022; URL-25, 2022).

Literatürde yapılmış çalışmaların ışığında, yapılacak deneyler boyunca dakikada akan 5 damlanın hacmi 0.30 cm^3 olacak şekilde hesaplanmış ve toplam 30 deney için kayıplar ile birlikte 0.4 litrelik bovine serum yağlayıcı karışım hazırlanmıştır (Boampong vd., 2003; Harsha ve Joyce, 2011; Sağbaş ve Durakbaşa, 2013a; Tipper vd., 1999; Ünal ve Mimaroglu, 2015; Yao vd., 2003).

Deney sonrası numuneler tekrar ultrasonik banyoda 10 dakika saf su içerisinde, ardından 20 dakika etil alkol çözeltisinde, son olarak tekrar 10 dakika saf su içerisinde yıkanarak temizlenmiştir. Ardından, 3 boyutlu yüzey profilleri ve ağırlık kayıplarının kontrolü için de hassas tartım ölçümleri alınmıştır.

Blok-disk triboloji testi sonrası UYMAPE numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınmaların hesaplanması için testten sonra tartılmış ve numunelerin ağırlıklarının değişimleri hesaplanmıştır. Her deney numunesi en az 3 kez tekrarlı tartılarak ortalamaları alınmıştır.

Yoğunluğu bilinen UYMAPE numunenin hacim kaybı (mm^3), numunenin ağırlık değişiminin (gr) öz kütlesine (gr/mm^3) oranı ile hesaplanmıştır.

Hesaplanan hacim kaybı değeri kullanılarak Denklem 2'de yerine yazılıp spesifik aşınma hızı (Specific Wear Rate: $\text{SWR} / [\text{mm}^3 \times (\text{N} \times \text{m})^{-1} \times 10^{-7}]$) hesaplanmıştır.

$$\text{SWR} = \frac{V}{F \cdot S} \quad (2)$$

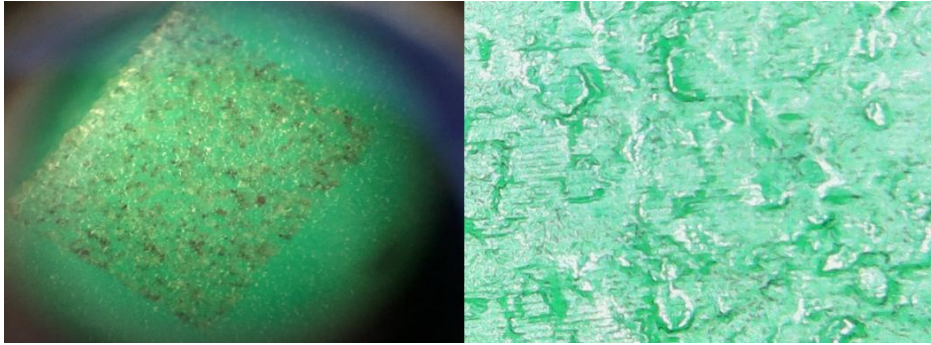
Burada; V hacim kayıp değeri (mm^3), F numuneye uygulanan normal kuvvet değeri (N) ve S ise numunenin deney süresi boyunca aldığı yol değeri (m) dir (Kavimani vd., 2017).

3. BULGULAR VE İRDELEME

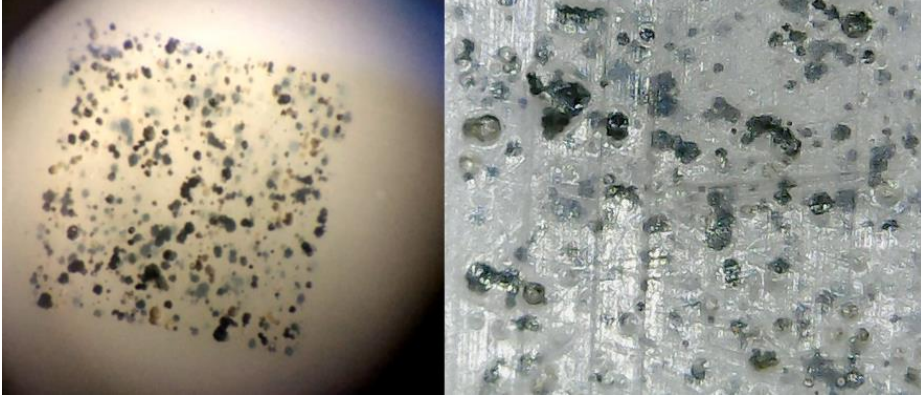
Bu kapsamda elde edilen bulgular ve irdelemeler ayrı bölümler halinde aşağıda bahsedilmiştir. UYMAPE malzeme grupları üzerinde nanosaniye ve femtosaniye lazer yüzey desenleme işlemleri gerçekleştirilmiş ve istenilen yüzey değerleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen lazer desenleme işlemlerinin yüzeyde yanık etkisi oluşturup oluşturmadığının ve sürtünme-aşınma testleri ile aşınma miktarları ve sürtünme katsayılarındaki değişimlerin tespiti ve irdelemesi yapılmıştır.

3.1. Nanosaniye (Fiber) Lazer Yüzey Desenleme Sonuçları

Fiber lazer / Integrated marker (IR) ve Ultraviyole (UV) lazerler ile yapılan proseslerde olumsuz sonuçlar gözlemlenmiş ve IR Marker ile yapılan proseste lazer ışını parça yüzeyine etki etmeden alt katmana geçip orada tepkime oluşturmuştur. Yeşil renkli ticari UYMAPE malzeme üzerindeki Fiber (IR) lazer desenlemesinin ve yakınlaştırılmış yüksek çözünürlüklü kamera altındaki görüntüsü Şekil 40'ta ve beyaz renkteki numunenin görüntüsü ise Şekil 41'de verilmektedir. Lazer ışını yüzeye etki etmekte fakat genel olarak alt katmanda oluşan tepkimelerden kaynaklı yanık etkisi göstermektedir.



Şekil 40. Fiber (IR) lazerin yeşil renkli GUR 1020 PE malzeme üzerinde oluşturulmaya çalışılan desen ve lazer ışının yüzeyde oluşturduğu tepkimenin yakınlaştırılmış görüntüsü

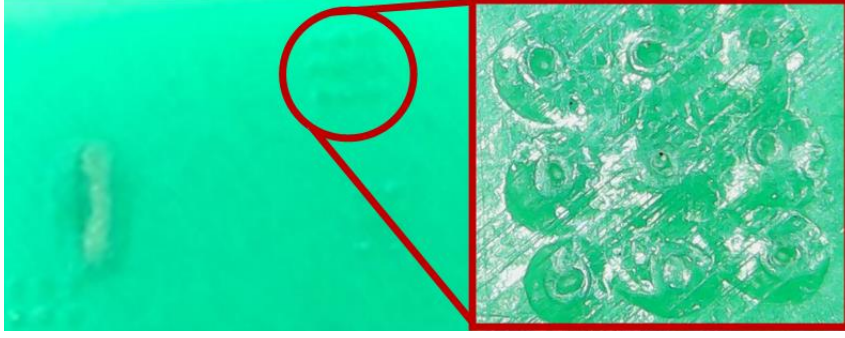


Şekil 41. Fiber (IR) lazerin beyaz renkli GUR 1020 PE malzeme üzerinde oluşturulmaya çalışılan desen ve lazer ışının yüzeyde oluşturduğu tepkimenin yakınlaştırılmış görüntüsü

UV Marker kullanılarak yapılan desenleme işleminde ise yüzeyde genel olarak ergime etkileri görülmektedir (Şekil 42). Ayrıca, çukur oluşturacak şekilde lazer desenleme yüzeyde kabarma durumları meydana gelmiş ve bu oluşan kabarma durumunun görüntüleri ile Şekil 43'te verilmiştir.



Şekil 42. UV lazer deneme işlemi (yüzey ergimesi gözlemlendi)

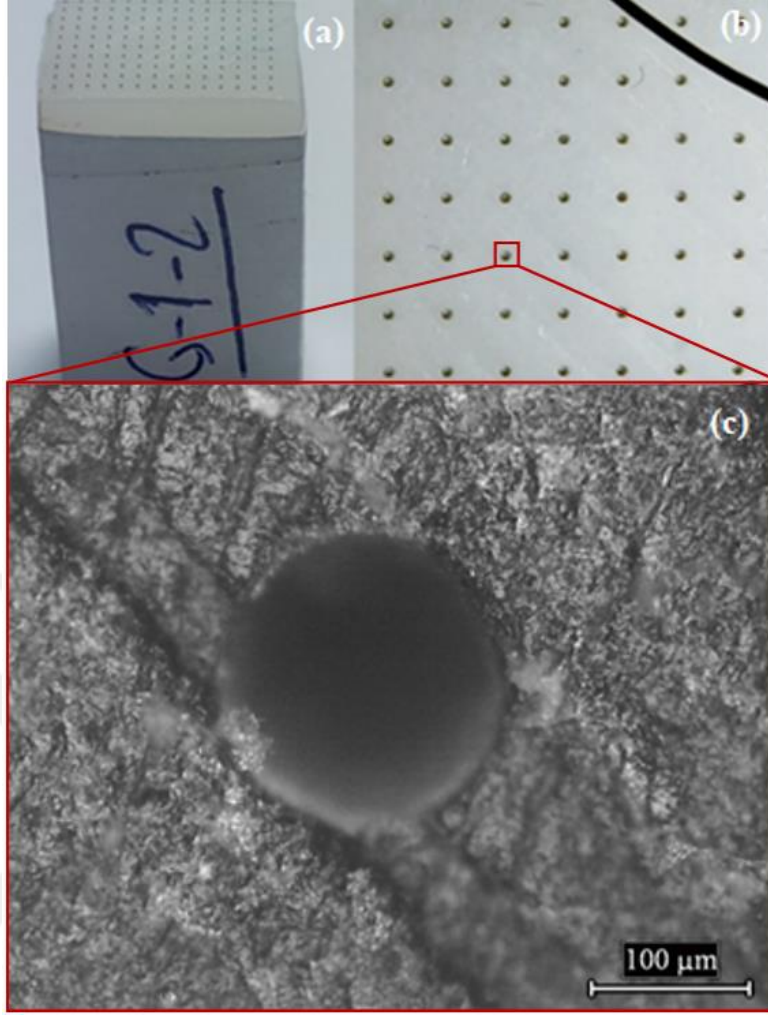


Şekil 43. UV lazer çukur oluşturma denemesi (yüzeyde kabarma oluşması) ve lazer ışının yüzeyde oluşturduğu tepkimenin yakınlaştırılmış kamera görüntüsü

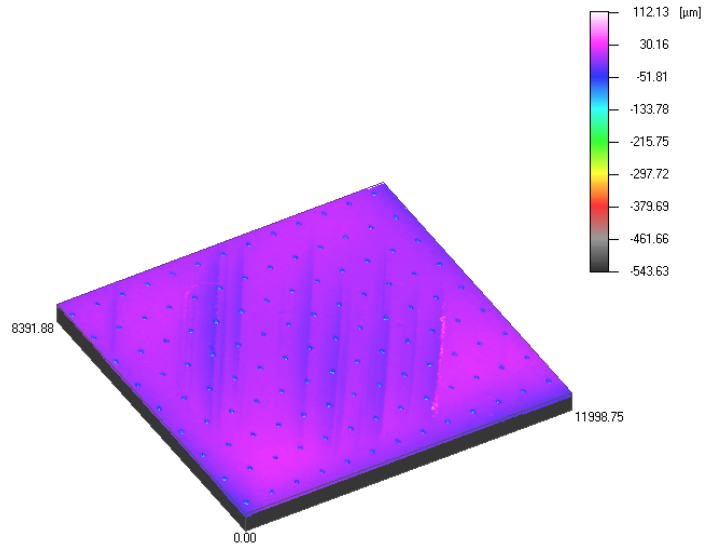
3.2. Femtosaniye (120 fs atımlı) Lazer Yüzey Desenleme Sonuçları

3.2.1. GUR 1020 PE Numunesi Deney Sonuçları

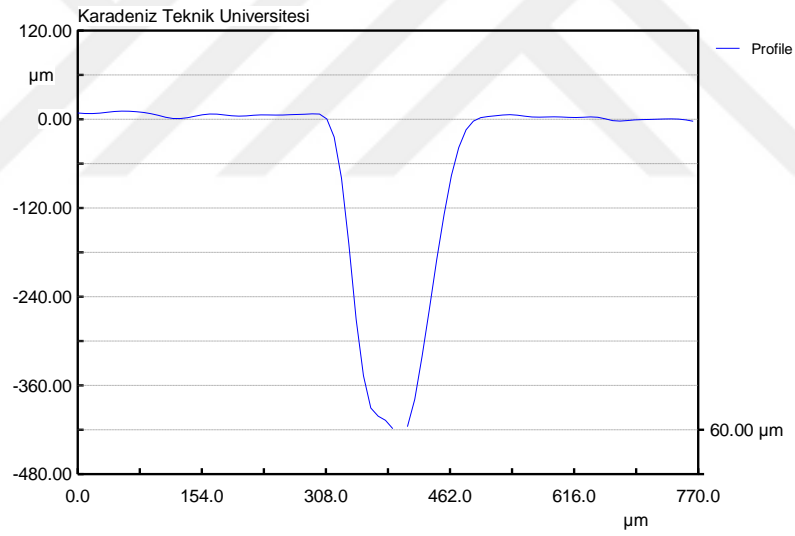
Femtosaniye lazer cihazı ile GUR 1020 PE numune üzerinde yapılan deneysel çalışmada yanık ve erime durumları gözlemlenmemiş, istenilen mikro-çukur derinliği, mikro-çukur çapı ve desen adımı değerlerine yakın sonuçlar alınmıştır (Şekil 44). GUR 1020 PE numune desenlemesine ait görselde numune yüzeyindeki diğer mikro-çukur formlarının da benzer yapıda oldukları optik görüntülerle tespit edilmiştir. Desenli numunenin orta noktasına yakın bölgeden deliğe ait optik görüntü alınmış ve aşağıda verilmiştir. Lazer desenleme işlemine tabi tutulmuş GUR 1020 PE numunenin optik profilometre altındaki görseli (Şekil 45), mikro-çukur çap, derinlik (Şekil 46) ve adım analiz grafiği (Şekil 47) aşağıda verilmektedir.



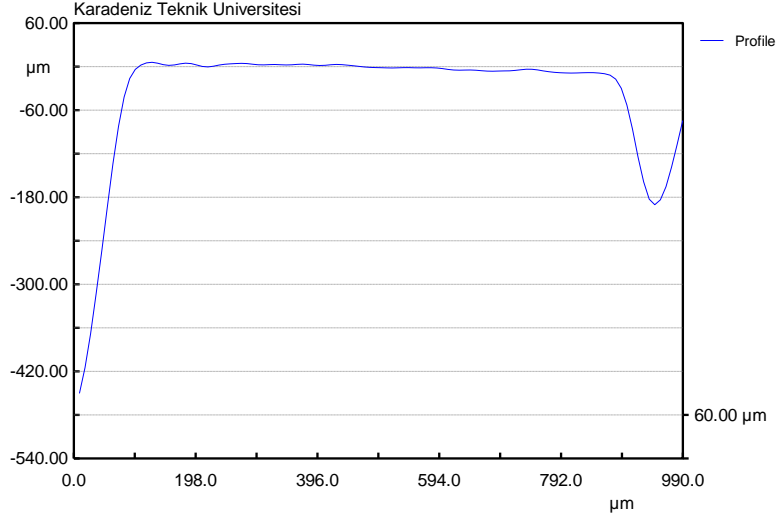
Şekil 44. (a) GUR 1020 PE numune, (b) malzeme üzerinde oluşturulan lazer desenleme işlemi ve (c) optik mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 45. GUR 1020 PE numunenin lazer deseneleme sonrası temassız optik profilometre analizi



Şekil 46. GUR 1020 PE numunenin temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik ve çap analizi



Şekil 47. GUR 1020 PE numunenin temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur adım analizi

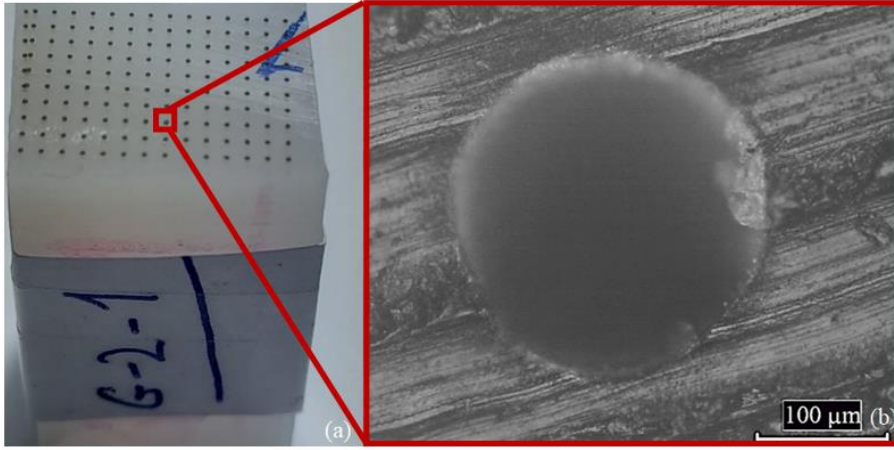
GUR 1020 PE numune için elde edilmek istenilen boyutlar; mikro-çukur çapı 150 µm, derinlik 75 µm, mikro-çukur adımı 900 µm'dur. Desenleme sonrası mikro-çukur çapı, adım ve derinlik için alınan veriler profilometre cihazı ve optik mikroskop üzerinden alınan grafiksel ve görsel veriler ışığında en az 3 farklı mikro-çukur üzerinden ölçülmüş ve ortalamaları alınarak; mikro-çukur çapı 159 µm, mikro-çukur adımı 920 µm ve mikro-çukur derinliği 420 µm değerleri elde edilmiştir.

Parametre değerlerine bakıldığında desenleme için istenilen verilere yakın mikro-çukur çapı ve mikro-çukur adımı sonuçları elde edilmiştir.

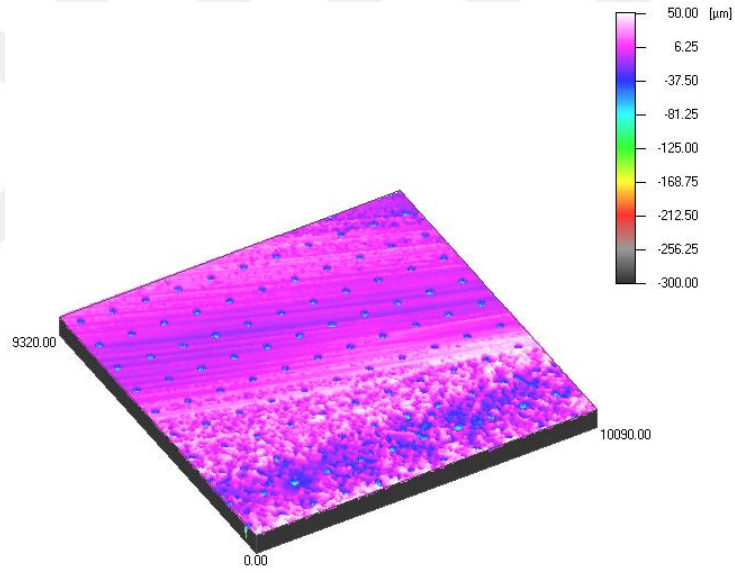
3.2.2. GUR 1020 XL Numunesi Deney Sonuçları

Femtosaniye lazer ile özel üretim olan ve Orthoplastics şirketinden temin edilen UYMAPE için yapılan deneysel çalışmada malzeme yüzeyinde herhangi bir yanık etkisi gözlemlenmemiş ve lazer desenleme işleminden olumlu sonuçlar alınmıştır.

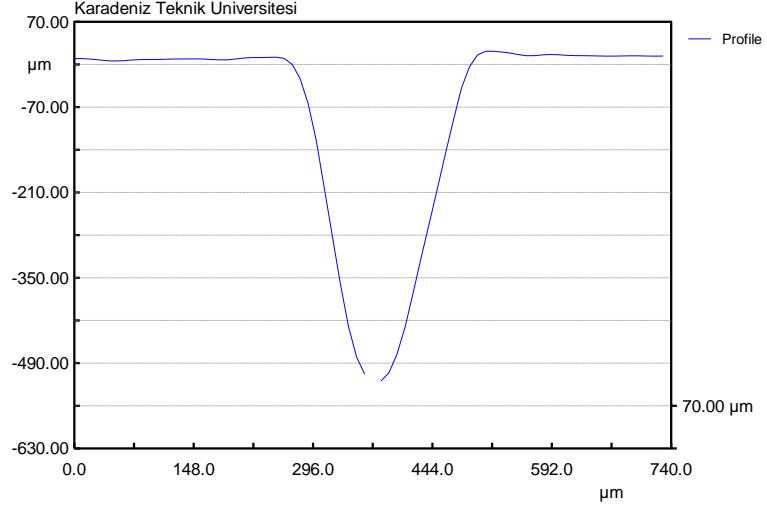
G-2-1 kodlu ilk GUR 1020 XL numunenin desenlemesine ait optik mikroskop altındaki yüzey görüntüsü (Şekil 48), analizi (Şekil 49) ve yüzey profil mikro-çukur çapı, derinlik ve adım analiz grafiği (Şekil 50 ve Şekil 51) aşağıda verilmiştir.



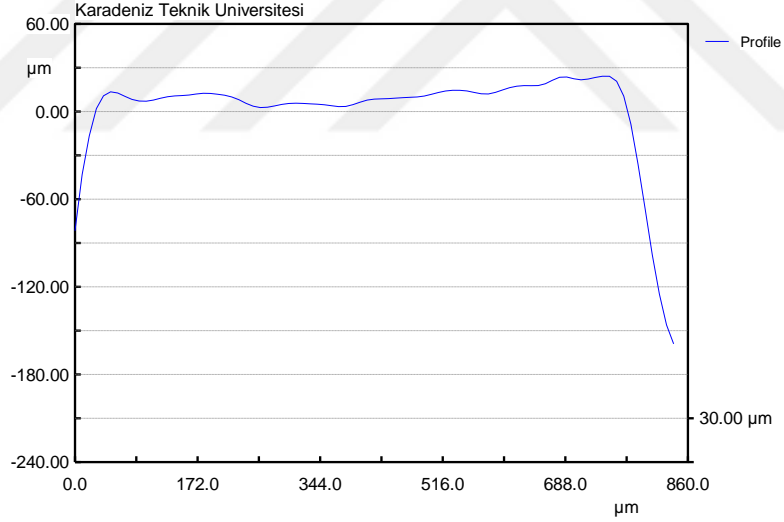
Şekil 48. (a) GUR 1020 XL numune, (b) malzeme üzerinde oluşturulan lazer desenleme işleminin optik mikroskop görseli



Şekil 49. GUR 1020 XL numunenin temassız optik profilometre analizi



Şekil 50. GUR 1020 XL numunenin temassız optik profilometre kullanımı ile mikro-çukur çap ve derinlik analizi



Şekil 51. GUR 1020 XL numunenin temassız optik profilometre kullanımı ile mikro-çukur adım analizi

GUR 1020 XL numune için lazer desenleme çalışmasında istenilen değerler; mikro-çukur çapı $300 \mu\text{m}$, derinlik $150 \mu\text{m}$ ve mikro-çukur adımı $900 \mu\text{m}$ 'dur. Desenleme sonrası mikro-çukur çapı, adım ve derinlik için alınan veriler profilometre cihazı ve optik mikroskop üzerinden alınan grafiksel ve görsel veriler ışığında en az 3 farklı mikro-çukur üzerinden

ölçülmüş ve ortalamaları alınarak; mikro-çukur çapı 250 µm, mikro-çukur adımı 950 µm ve mikro-çukur derinliği 510 µm değerleri elde edilmiştir.

Değerlere bakıldığında desenleme için istenilen mikro-çukur çapı, mikro-çukur derinliği ve mikro-çukur adım değerlerinden; mikro-çukur çap değeri ve mikro-çukur adımı istenilen değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir.

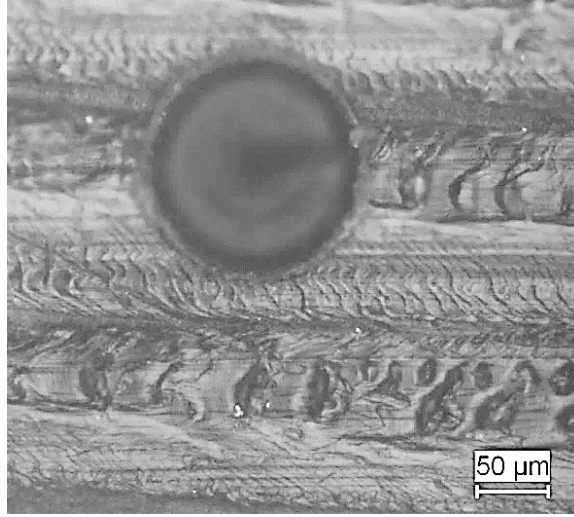
Sonuç olarak 120 fs atımlı femtosaniye lazer işlemi ile yapılan çalışmada UYMAPE numunelerde istenilen mikro-çukur derinliğinde tutarsızlıklar söz konusu olmuştur. Bu tutarsızlıkların giderilmesi için daha hassas yüzey desenleme yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

3.3. Femtosaniye (270 fs atımlı) Lazer Yüzey Desenleme Sonuçları

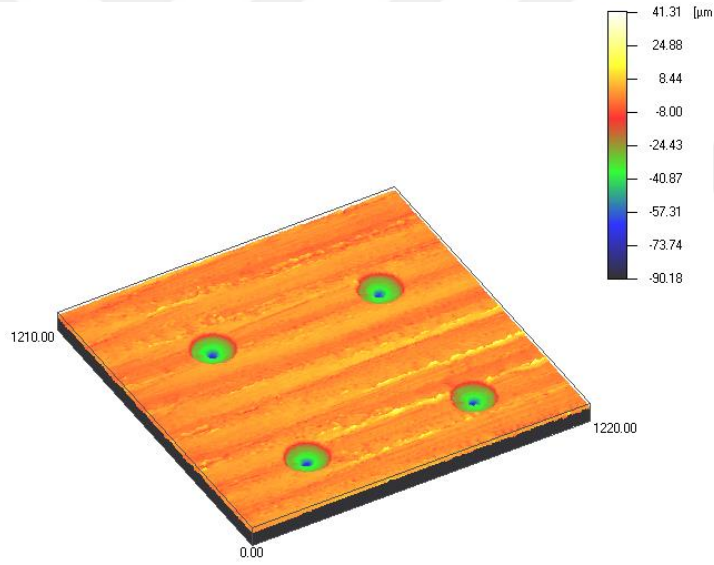
120 fs atımlı lazer ile gerçekleştirilen denemelerde özellikle çukur derinliğinde istenen değerlere göre önemli sapmalar meydana geldiğinden farklı bir lazer ile yeni bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 3 farklı UYMAPE malzemesi Çekya'daki HiLASE araştırma merkezine gönderilmiş ve aşağıda detayları verilen desenleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. GUR 1020 PE Numunesi Desenleme Sonuçları

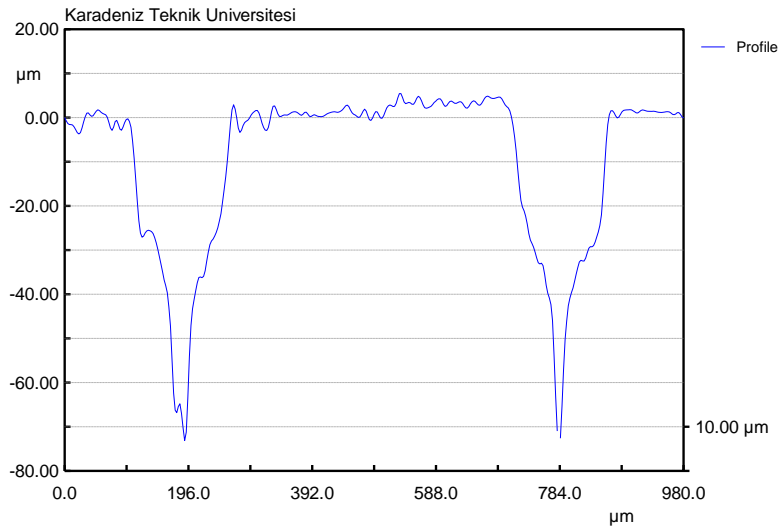
GUR 1020 PE numune grubunda bulunan ve tribolojik testler için kullanılacak 9 farklı deney numunesi içerisinde 3 no'lu numune örneği alınıp ilgili optik mikro-çukur görüntüsü (Şekil 52) ve profilometre (Şekil 53 ve Şekil 54) verileri aşağıda verilmektedir.



Şekil 52. GUR 1020 PE 3 no'lu numune üzerinde oluşturulan lazer desenleme sonrası mikro-çukur görüntüsü



Şekil 53. GUR 1020 PE 3 no'lu deney numunesi üzerindeki temassız optik profilometre analizi



Şekil 54. GUR 1020 PE 3 no'lu parçanın temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik, çap ve adım analizi

GUR 1020 PE 3 no'lu numune için istenilen değerler; mikro-çukur çapı 150 µm, derinlik 50 µm, mikro-çukur adımı 600 µm olmuştur. Grafikler üzerinden alınan ölçekli sonuçlara göre lazer ile desenleme sonrası profilometre cihazı ile; mikro-çukur çapı 155 µm, mikro-çukur adımı 575 µm ve mikro-çukur derinliği 73 µm olarak ölçülmüştür.

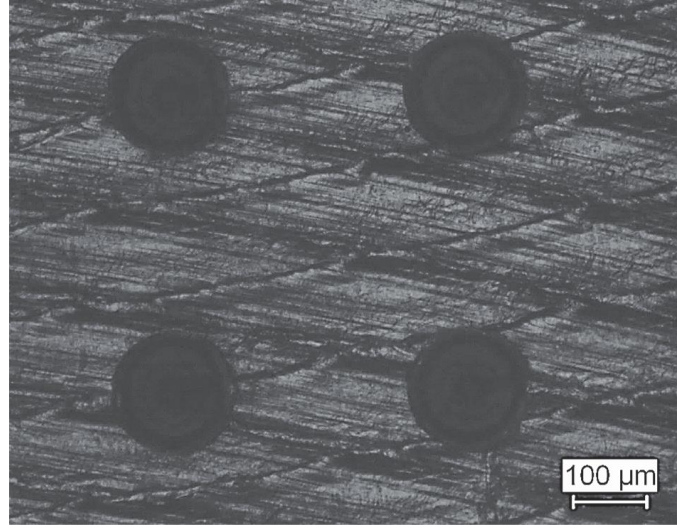
GUR 1020 PE numuneleri üzerinden istenilen ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çapı, derinlik ve mikro-çukur adımı değerleri 9 adet numuneyi de içerecek şekilde aşağıda Tablo 11'de verilmektedir. Veriler incelendiğinde, mikro-çukur derinliğinin değişim miktarı (ortalama %23.5); mikro-çukur çapı ve adım değişim değerlerinden (ortalama %2) fazla olduğu için mikro-çukur derinlik değeri göz ardı edilerek yapılacak triboloji testleri Taguchi analizinde değişim miktarları daha az olan mikro-çukur çapı ve adım parametreleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 11. GUR 1020 PE için istenilen değerler ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çap, derinlik ve mikro-çukur adım değerleri

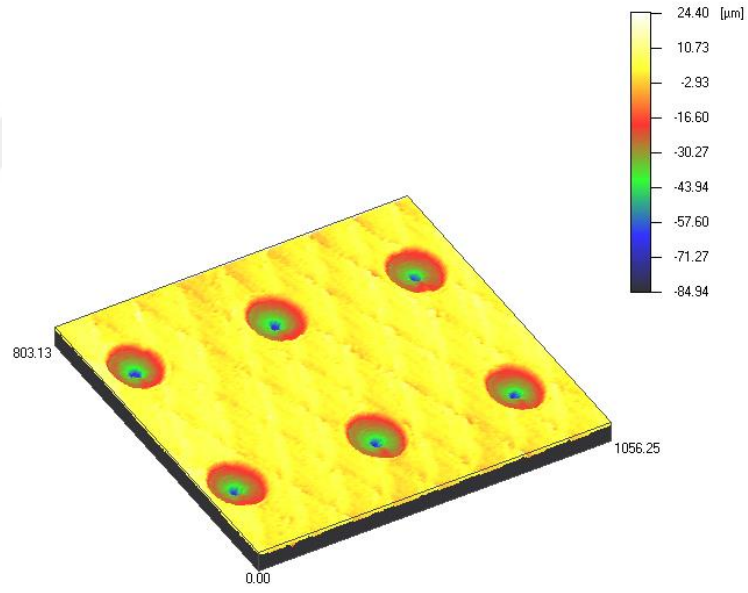
Deney No	İstenilen Mikro-çukur Çapı (µm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Çapı (µm)	İstenilen Mikro-çukur Derinliği (µm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Derinliği (µm)	İstenilen Mikro-çukur Adımı (µm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Adımı (µm)
1	40	39.5	30	28	158	145
2	100	105	40	52	400	390
3	150	155	50	73	600	575
4	40	37	30	26	113	110
5	100	98	40	46.5	280	275
6	150	153	50	71	410	398
7	40	39	30	25.5	90	85
8	100	94	40	52.8	225	217.6
9	150	155	50	69.9	340	328

3.3.2. GUR 1020 EXL Numunesi Desenleme Sonuçları

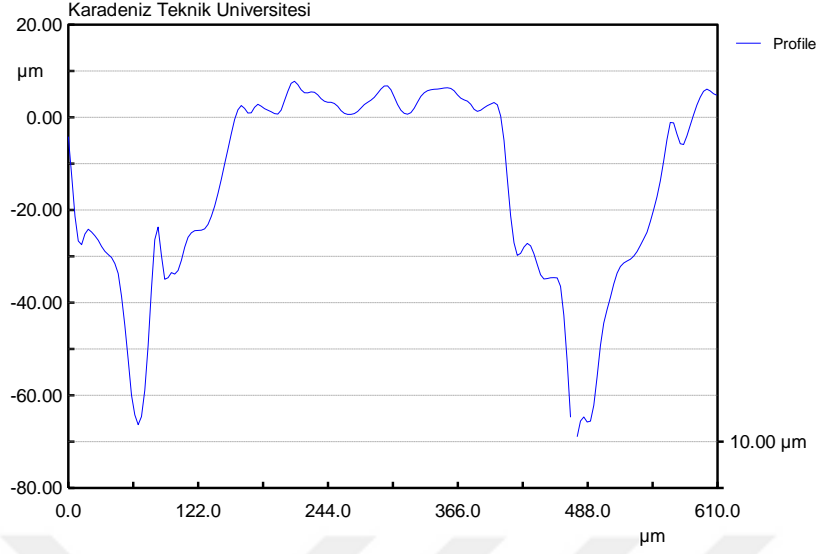
GUR 1020 EXL numune grubunda bulunan ve tribolojik testler için kullanılacak deney numuneleri içerisinde 6 no'lu numune örneği alınıp ilgili optik görseli (Şekil 55) ve profilometre verileri (Şekil 56 ve Şekil 57) aşağıda verilmektedir.



Şekil 55. GUR 1020 EXL 6 no'lu numune üzerindeki lazer desenli mikro-çukur yapıları



Şekil 56. GUR 1020 EXL 6 no'lu parçanın temassız optik profilometre analizi



Şekil 57. GUR 1020 EXL 6 no'lu numunenin temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik, çap ve adım analizi

GUR 1020 EXL UYMAPE 6 no'lu numune için istenilen değerler; mikro-çukur çapı 150 μm , derinlik 50 μm ve mikro-çukur adımı 410 μm olmaktadır.

Grafikler üzerinden alınan ölçekli sonuçlara göre lazer desenleme sonrası profilometre cihazı ile; mikro-çukur çapı 153 μm , mikro-çukur adımı 386 μm ve mikro-çukur derinliği 67.4 μm olarak ölçülmüştür.

Lazer desenleme sonrası veriler incelendiğinde, mikro-çukur derinliğinin değişim miktarı (ortalama %21); mikro-çukur çapı ve adım değişim değerlerinden (ortalama %4) fazla olmaktadır.

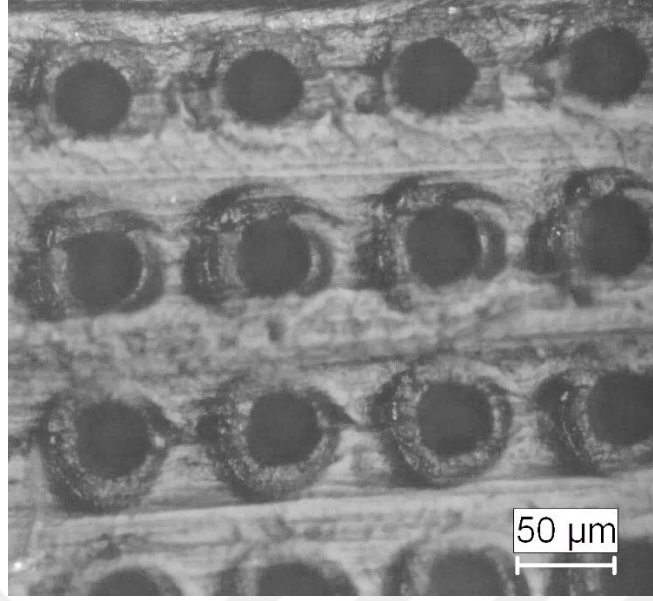
GUR 1020 EXL numuneleri üzerinden istenilen ve lazer desenleme sonrası elde edilen ölçülen mikro-çukur çapı, derinlik ve mikro-çukur adım değerleri 9 numuneyi de içerecek şekilde aşağıda Tablo 12'de verilmektedir.

Tablo 12. GUR 1020 EXL için istenilen değerler ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çapı, derinlik ve adım değerleri

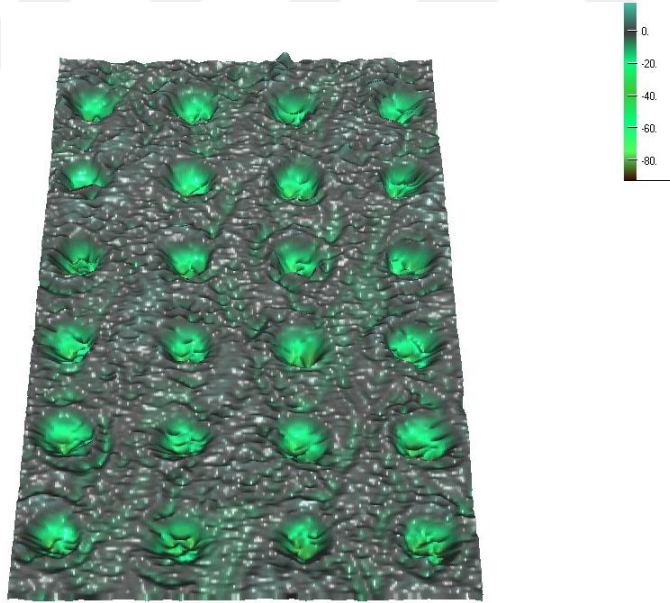
Deney No	İstenilen Mikro-çukur Çapı (µm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Çapı (µm)	İstenilen Mikro-çukur Derinliği (µm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Derinliği (µm)	İstenilen Mikro-çukur Adımı (µm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Adımı (µm)
1	40	39.8	30	39.5	158	143.1
2	100	104	40	44.5	400	375
3	150	152.5	50	56.8	600	559
4	40	38.5	30	51	113	107.5
5	100	104.3	40	50	280	271.5
6	150	153	50	67.4	410	386
7	40	40.5	30	42.3	90	84
8	100	107	40	22.3	225	218
9	150	157	50	61.5	340	327

3.3.3. GUR 1020 XL Numunesi Desenleme Sonuçları

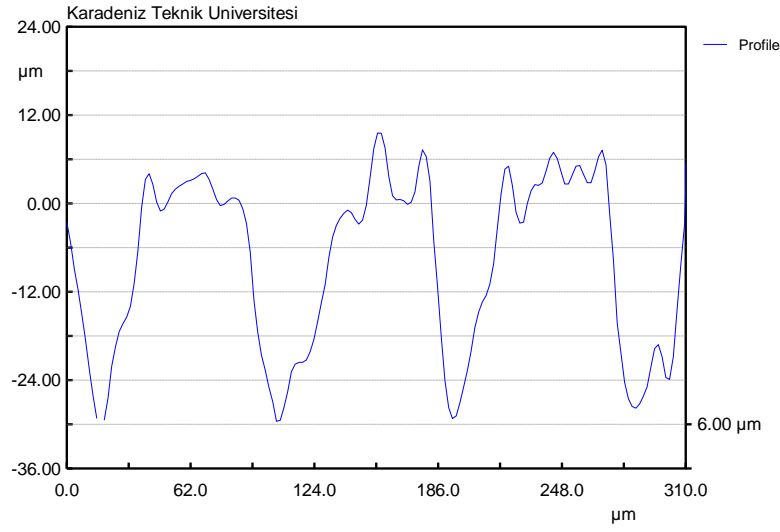
GUR 1020 XL numune grubunda bulunan ve tribolojik testler için kullanılacak deney numuneleri içerisinde 7 no'lu numune örneği alınıp ilgili optik görseli (Şekil 58) ve profilometre verileri (Şekil 59 ve Şekil 60) aşağıda verilmektedir.



Şekil 58. GUR 1020 XL 7 no'lu numune üzerinde oluşturulan lazer desenli mikro-çukur görseli



Şekil 59. GUR 1020 XL 7 no'lu parçanın temassız optik profilometre analizi



Şekil 60. GUR 1020 XL 7 no'lu parçanın temassız optik profilometre ile alınan mikro-çukur derinlik, çap ve adım analizi

GUR 1020 XL 7 no'lu numune için istenilen değerler; mikro-çukur çapı 40 µm, derinlik 30 µm, mikro-çukur adımı 90 µm'dur.

Grafikler üzerinden alınan ölçekli sonuçlara göre lazer desenleme sonrası profilometre cihazı ile; mikro-çukur çapı 38 µm, mikro-çukur adımı 85 µm ve mikro-çukur derinliği 28.2 µm ortalama değerleri ölçülmüştür.

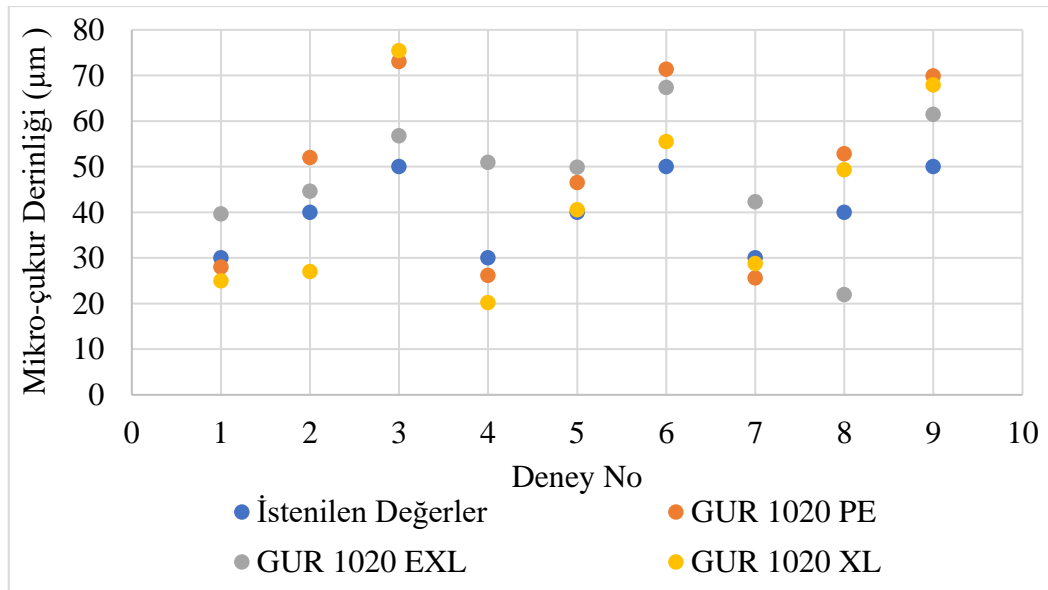
Lazer desenleme sonrası veriler incelendiğinde, mikro-çukur derinliğinin değişim miktarı (ortalama %8); mikro-çukur çapı ve adım değişim değerlerinden (ortalama %5) fazla olduğu anlaşılmıştır.

GUR 1020 XL numuneleri üzerinden istenilen ve lazer desenleme sonrası ölçülen mikro-çukur çapı, derinlik ve mikro-çukur adımı değerleri tüm 9 adet numuneyi de içerecek şekilde aşağıda Tablo 13'te verilmektedir.

Tablo 13. GUR 1020 XL için istenilen değerler ve lazer desenleme sonrası elde edilen mikro-çukur çap, derinlik ve adım değerleri

Deney No	İstenilen Mikro-çukur Çapı (μm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Çapı (μm)	İstenilen Mikro-çukur Derinliği (μm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Derinliği (μm)	İstenilen Mikro-çukur Adımı (μm)	Lazer İşlem Sonrası Mikro-çukur Adımı (μm)
1	40	37.7	30	25	158	146.9
2	100	106	40	27	400	370
3	150	160	50	75.5	600	572
4	40	38	30	20.2	113	106.8
5	100	108.6	40	40.6	280	267
6	150	155.7	50	55.5	410	382
7	40	38	30	28.8	90	85
8	100	107	40	49.3	225	214
9	150	160	50	68	340	323

Lazer desenleme sonrası tablolar üzerindeki tüm numuneler için sayısal veriler incelendiğinde, istenilen mikro-çukur derinlik parametre değeri ortalama %30 oranındaki değişimi nedeniyle mikro-çukur faktörü triboloji testleri için göz ardı edilmiştir (Şekil 61).

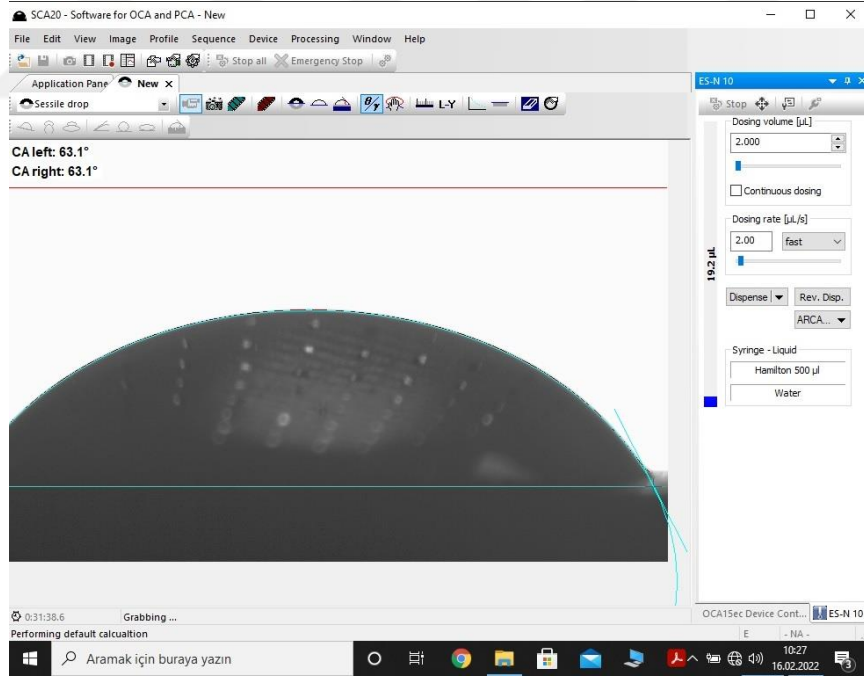


Şekil 61. UYMAPE numuneler için istenilen lazer desenleme mikro-çukur derinlik değeri (mavi renkte) ve desenleme sonrası numunelerin mikro-çukur derinlik değerlerin (gri, sarı ve kırmızı) karşılaştırılması

3.4. Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı malzemelerin yüzey ile etkileşiminin bir parçasını oluşturduğu bilinmektedir. Bu başlık altında 270 femtosaniye atım süresine sahip lazer ile yüzeyleri desenli olan numune gruplarının yüzeylerinden su temas açısı ölçümleri alınmıştır. Numuneler içerisinde 1, 2 ve 3 deney no'lu UYMAPE numunelerin sürtünme katsayısının belirlenmesi hedeflenmiştir. GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL numune gruplarının lazer desenleme sonrası oluşan değerler referans alınıp temas açısı ölçümleri hesaplanmıştır.

Su damlasının malzeme yüzeyine teması sırasında numune yüzeyinden; taban hattı, gradyan ve damla eğrisinin formunu ekrandan yakalanan veriler sayesinde alınmıştır. Ortaya çıkan sağ ve sol temas açısı değerlerinin ortalamaları ile gerçek temas açısı değeri tespit edilmektedir. Örnek olarak sadece GUR 1020 EXL numunesinin 2 no'lu deneyine ait su damlası temas açısının hesaplandığı ekran görüntüsü (Şekil 62) aşağıda verilmektedir.



Şekil 62. GUR 1020 EXL numunesinin 2 no'lu deneyine ait su damlası temas açısı ölçüm veri ekranı

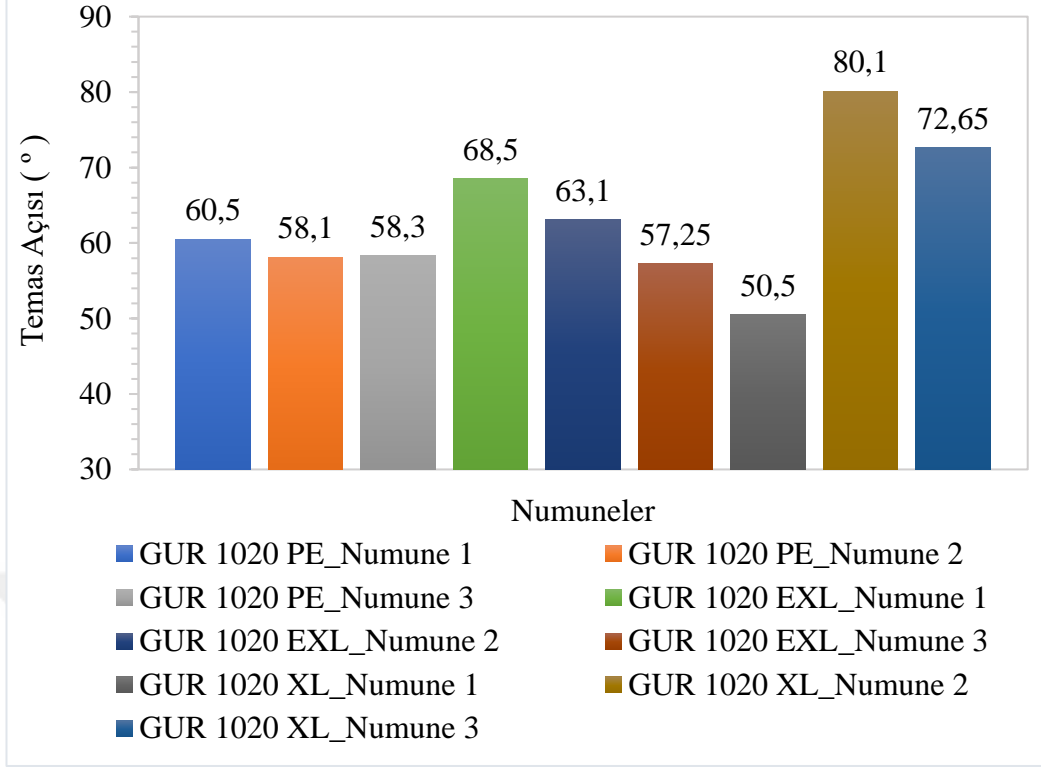
UYMAPE malzeme gruplarımız GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL'e ait alan desen yoğunluk oranı %5 olmak üzere her UYMAPE malzeme grubundan ilk 3

sıradaki numunelerden triboloji testi öncesi temas açısı ölçümleri alınmıştır. Ölçümlere ait mikro-çukur çap/adım değerlerinin ve temas açısı değerlerinin bulunduğu tablo aşağıda verilmektedir (Tablo 14).

Tablo 14. GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL UYMAPE numunelerinin mikro-çukur çapı/adım oranları ve temas açısı ölçüm değerleri tablosu

Malzeme / Numune No	Mikro- çukur Çapı (μm)	Mikro- çukur Desen Oranı (%)	Mikro- çukur Adımı (μm)	Mikro- çukur Çap/Mikro- çukur Adımı	Temas Açısı Değeri ($^{\circ}$)	
GUR 1020 PE	1	39.5	5	145	0.272	60.5
	2	105	5	390	0.269	58.1
	3	155	5	575	0.270	58.3
GUR 1020 EXL	1	39.8	5	143.1	0.278	68.5
	2	104	5	375	0.277	63.1
	3	152.5	5	559	0.273	57.25
GUR 1020 XL	1	37.7	5	146.9	0.257	50.5
	2	106	5	370	0.286	80.1
	3	160	5	572	0.280	72.65

Literatürde yüzeye düşen su damlasının oluşturduğu temas açısının mikro-çukurların ve çıkıntı yüzeylerin yapısına bağlı olduğu bilinmektedir (Telecka vd., 2018). Su damlasının temas açısı; çap değerinin adım değerine oranı ile ortaya çıkan değer artışı, suyun temas açısının sayısal değeri arttırdığı (Şekil 63) bu çalışmada da tespit edilmiştir.



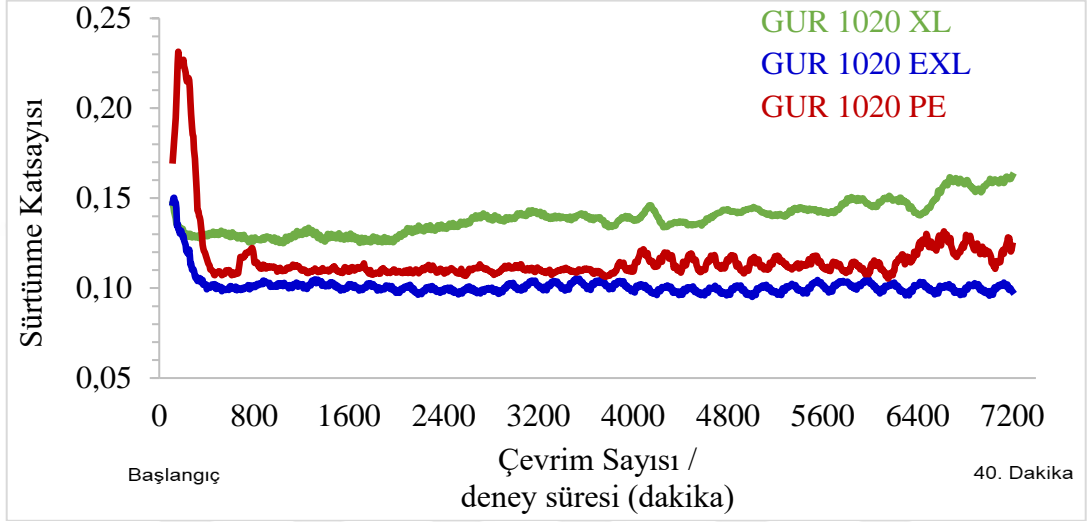
Şekil 63. UYMAPE numune grupları üzerine oluşan temas açısı değerleri

GUR 1020 PE UYMAPE numunesine bakıldığında mikro-çukur çapı / desen adımı değeri yüksek olan 1 no'lu numune yüzeyinde yüksek su temas açısı elde edilmiştir. Diğer iki numune grubunda ise literatürdeki durumları yansıtan sonuçlar ile benzer temas açısı ölçüm sonuçlarına ulaşılmıştır. Fakat femtosaniye lazer desenleme işlemi ile oluşturulan mikro-çukur yapılarının temas açısı üzerinde kayda değer bir etki ortaya çıkarmadığı Şekil 63'te verilmiş sonuçlar üzerinden anlaşılmaktadır. Delik çapının artışı farklı numune gruplarında kıyaslanabilir olmayan bir trend sergilemiştir.

3.5. UYMAPE Sürtünme Katsayısı Ölçümleri

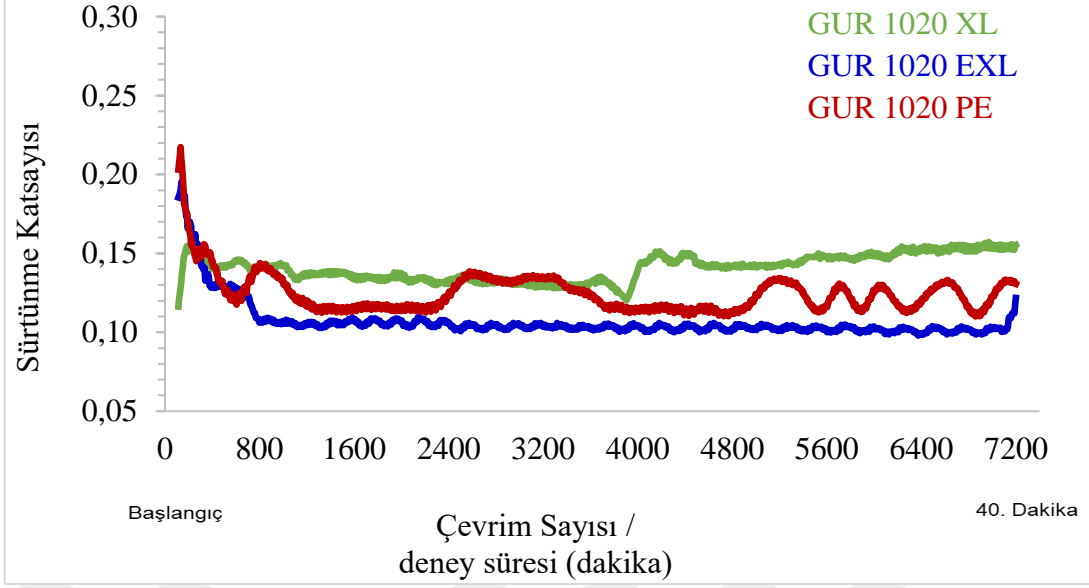
Blok-disk tribolojik test düzeneğinde teste tabi tutulmuş Ti6Al4V disk malzemesine karşı kullanılacak UYMAPE malzeme çeşitleri için numune gruplarının ve yüzeyde oluşturulmuş mikro-çukur çap ve alan desen yoğunluğunun malzemenin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin kıyaslanabilmesi amacıyla GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL malzeme gruplarına ait 9 desenli ve bir desensiz grubu içeren sonuçlar her bir deney şartı için ayrı ayrı grafikler halinde verilmiştir. Aşağıda çevrim sayılarına bağlı sürtünme katsayısı grafikleri yukarıdaki Tablo 15'te verilen deney sırasına göre (Şekil 64 ila Şekil 73 arasında) verilmektedir.



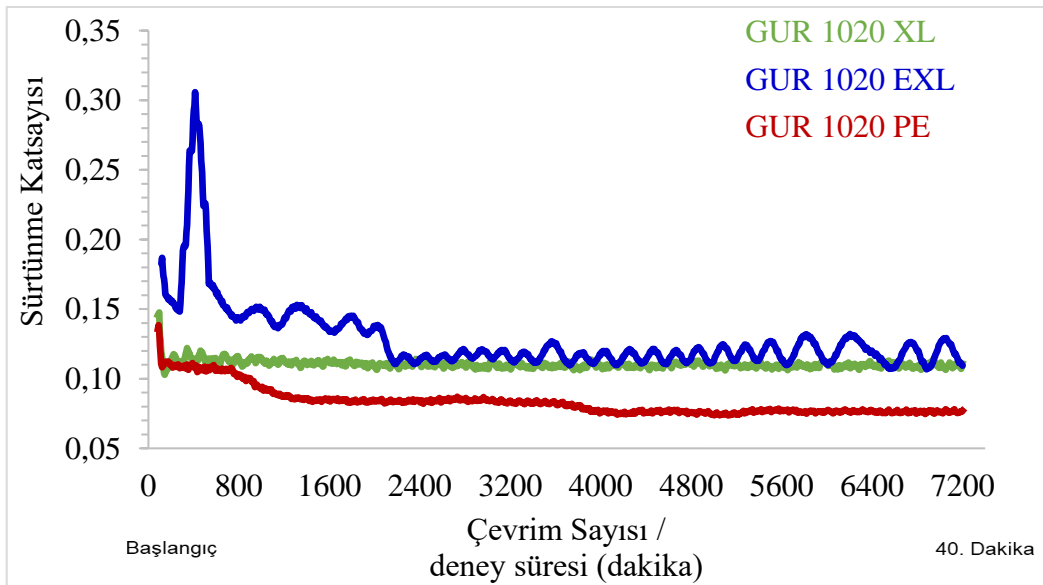
Şekil 64. 1 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

1 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 64), GUR 1020 PE polietilen numunesinin başlangıçta artış eğiliminde ve zaman geçtikçe (yaklaşık 300 çevrim anında) sürtünme katsayısı azalış eğilimine doğru seyretmektedir. Deney sonuna doğru bazı numunelerin sürtünme katsayılarında dalgalanmalar ortaya çıkmıştır.



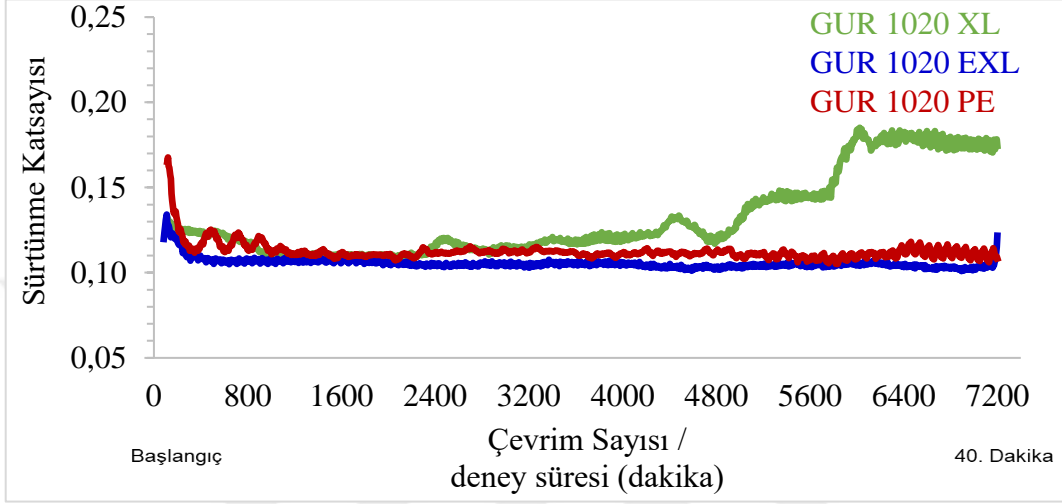
Şekil 65. 2 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

2 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 65), GUR 1020 XL polietilen numunesinin başlangıçtan itibaren artan bir sürtünme değerine sahip olmakta fakat zaman geçtikçe (yaklaşık 400 çevrim anında) sürtünme katsayısı azalış eğilimine doğru seyretmektedir. GUR 1020 PE ve GUR 1020 EXL numuneleri için başlangıçta numunenin yüzeye teması anında yüksek sürtünme katsayı değerlerine ulaşılması başlangıç anında yağlayıcılığın etkin olmaması şeklinde yorumlanmıştır.



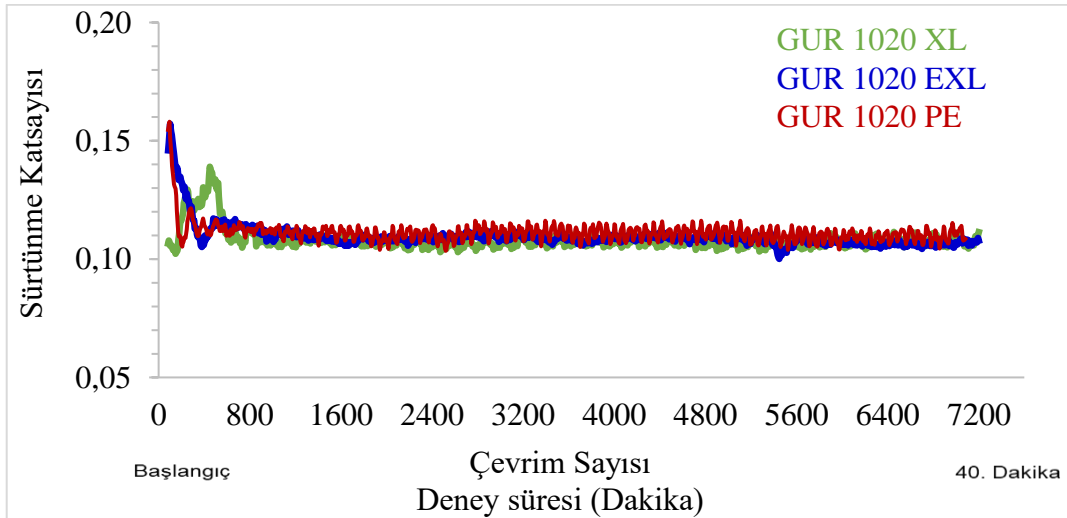
Şekil 66. 3 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

3 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 66), GUR 1020 EXL polietilen numunesinin başlangıçtan itibaren aşırı artan bir sürtünme değerine sahip olmakta ve zaman geçtikçe (yaklaşık 600 çevrim anında) sürtünme katsayısı azalış eğilimine ve kararlı hale doğru seyretmektedir.



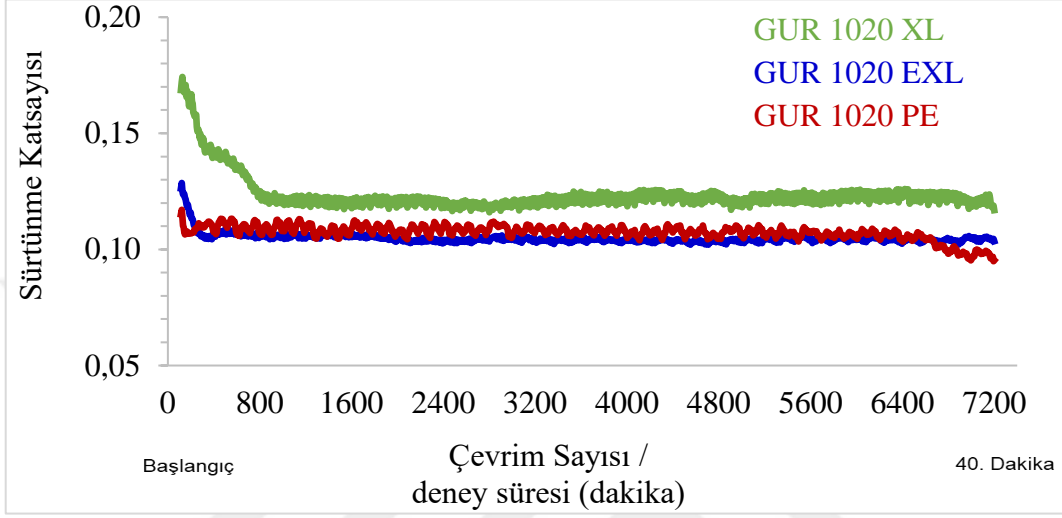
Şekil 67. 4 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

4 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 67), GUR 1020 XL polietilen numunesinin çevrim sayısı 5000 değerine ulaştıktan sonra test düzeneğindeki debinin düzensizleşmesi sebebi ile sürtünme katsayısı değerinde istenmeyen artış olmuştur.



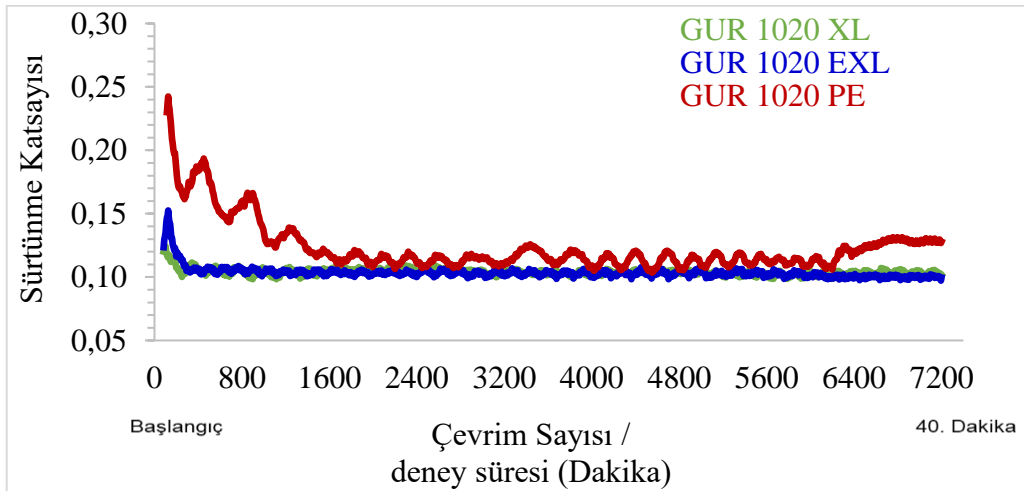
Şekil 68. 5 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

5 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 68), GUR 1020 XL, GUR 1020 PE ve GUR 1020 EXL polietilen numunelerinin başlangıçta yüzeye ani temas olduğundan, yüksek sürtünme katsayı değerlerine sahip olmuştur ve deney sonuna doğru kararlı değerlere gelmektedir.



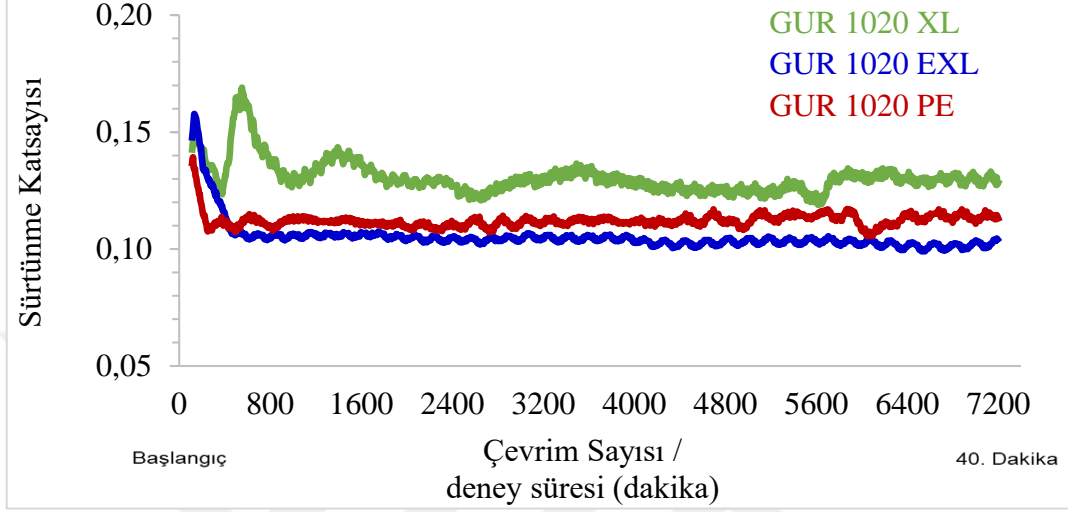
Şekil 69. 6 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

6 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 69), GUR 1020 XL, GUR 1020 PE ve GUR 1020 EXL polietilen numunelerinin başlangıçtaki ani temas sonucu sürtünme katsayısı yüksek çıkmış ve 800 çevrim sayısından sonra kararlı hale gelmektedir.



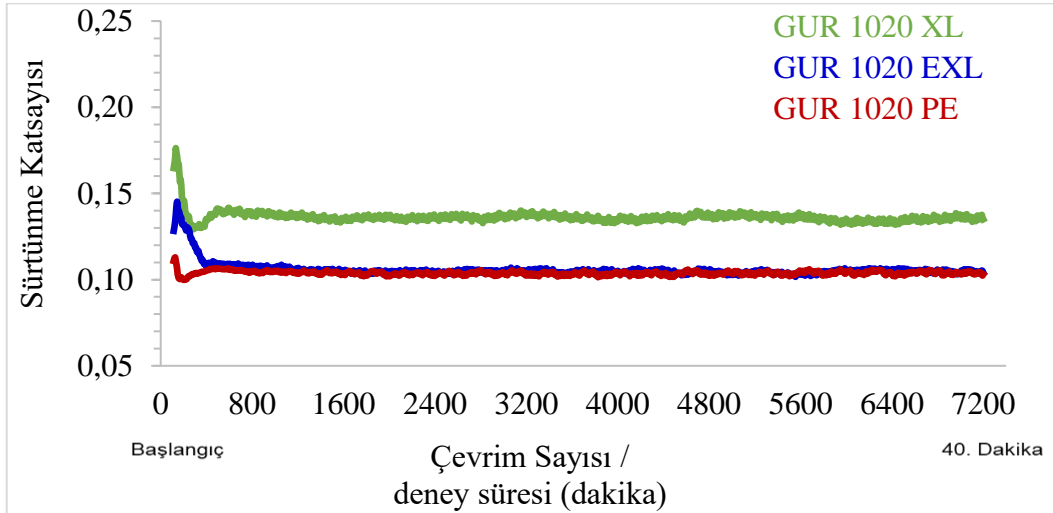
Şekil 70. 7 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

7 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 70), GUR 1020 XL ve GUR 1020 EXL polietilen numunelerinin deney sonuna doğru benzer sürtünme katsayı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



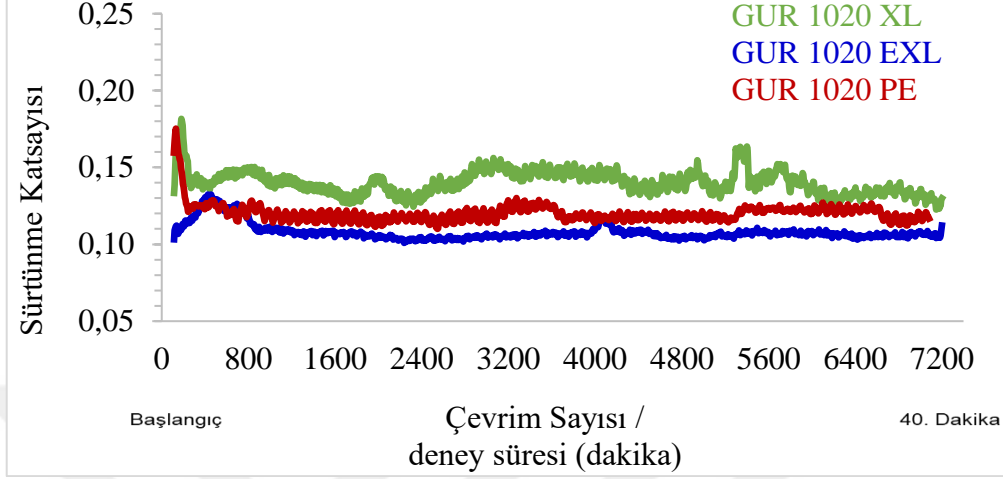
Şekil 71. 8 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

8 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 71), GUR 1020 XL numune grubunda diğerlerine göre daha yüksek sürtünme değerleri elde edilmiştir.



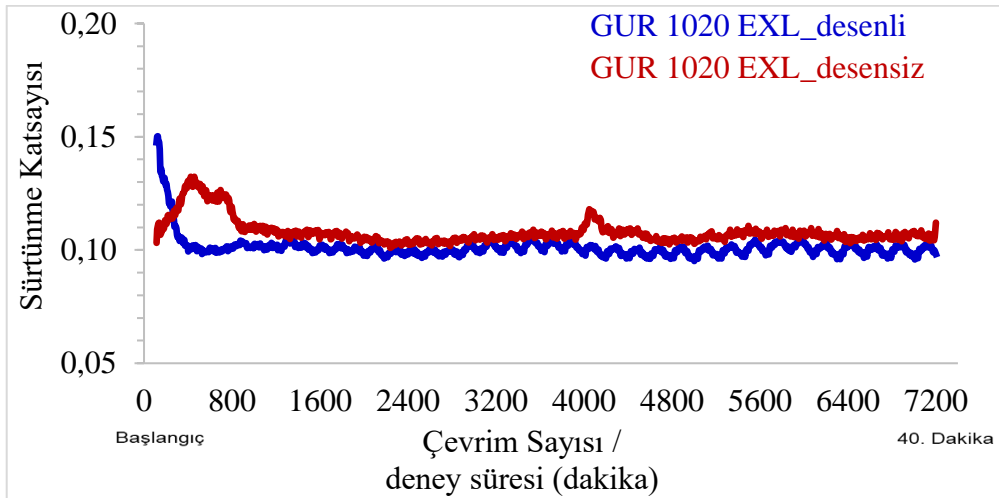
Şekil 72. 9 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

9 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 72), GUR 1020 XL numune grubunda diğerlerinden yüksek sürtünme değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 73. Desensiz 10 no'lu deney grubu için sürtünme katsayısı- çevrim sayısı grafiği

10 no'lu deney grubuna ait grafikte (Şekil 73), GUR 1020 XL numunesinde sürtünme katsayılarındaki ani değişimlerin muhtemel sebebi, UYMAPE numune ile Ti6Al4V disk elemanı arasına kopan aşındırıcı parçacıkların girmiş olmasıdır. Ayrıca karşılaştıma amacı ile, GUR 1020 EXL desenli numunesi ile GUR 1020 EXL desensiz numunesinin sürtünme katsayıları-çevrim sayısı üzerinde oluşturdukları etki aşağıda Şekil 74'te verilmektedir.



Şekil 74. Desenli GUR 1020 EXL ile desensiz versiyonuna ait sürtünme katsayısı-çevrim sayısı grafiği

Şekil 74'te, desenli GUR 1020 EXL (1 no'lu) ile desensiz versiyonu karşılaştırıldığında sürtünme katsayısı için lazer desenleme işlemi olumlu sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL numune gruplarının her biri için gerçekleştirilmiş olan 9 farklı deneysel sonuçlara ait yüzey sürtünme katsayısı değerleri aşağıda (Tablo 15) verilmektedir.

Tablo 15. Blok-disk testine tabi tutulan numune gruplarının sürtünme katsayısı değerleri

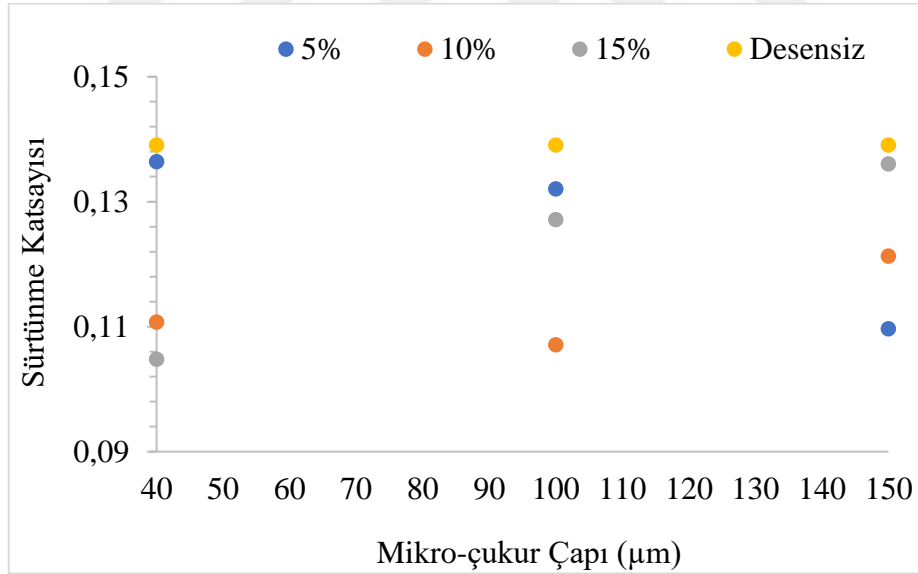
Deney No	Mikro- çukur Çapı (μm)	Mikro- çukur alan desen yoğunluğu (%)	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
1	40	5	0.1098	0.1005	0.1364
2	100	5	0.1148	0.1043	0.1320
3	150	5	0.0777	0.1163	0.1096
4	40	10	0.1095	0.1037	0.1107
5	100	10	0.1109	0.1064	0.1071
6	150	10	0.1086	0.1042	0.1213
7	40	15	0.1140	0.1031	0.1048
8	100	15	0.1112	0.1046	0.1271
9	150	15	0.1034	0.1048	0.1360
10 (Desensiz)	-	-	0.1200	0.1069	0.1391

Mevcut karşılaştırmalar göz önüne alındığında; GUR 1020 EXL numune grubundaki test verilerinde sürtünme katsayısının diğer malzemelerden daha düşük olduğu görülmektedir. Ardından GUR 1020 PE malzemesi gelmektedir. En yüksek sürtünme katsayısı ise GUR 1020 XL numunelerinde ölçülmektedir. Tüm numelere ait sonuçların ortalamaları alınarak en düşük sürtünme katsayısını veren mikro-çukur çapı ve alan desen yoğunluk oran değeri; 150 μm mikro-çukur çapı ve %10 alan desen yoğunluk değeridir. Nitekim literatürdeki bir çalışmada da tribolojik performans için ideal seviye değeri %10 olmuştur (Shen vd. 2021). Ayrıca, 3 farklı polietilen numunelerin sürtünme katsayıları gözeneksiz numunelere oranla yaklaşık olarak ortalama %12'lere varan daha düşük değerler elde edilmiştir.

Roy vd. (2015), mikro-çukur çap ve mikro-çukur adım değerlerinin sürtünme katsayısındaki değişimlerinin tribolojik etkisi üzerinde yaptıkları çalışmada; aynı çap değerlerinde oluşturulmuş desenlemeler için yoğunluk miktarı arttıkça sürtünme katsayısında düşüş tespit edilmekte ve aynı yoğunluk değerlerindeki desenli numunelerden mikro-çukur çap değeri arttıkça sürtünme katsayısı değerinde yine benzer azalmalar gözlemlenmiştir. UYMAPE numunelerin sürtünme katsayılarının gözeneksiz numunelere oranla %42 daha düşük olduğunu belirtilmiştir (Sağbaş, 2013).

Literatürden de yola çıkılarak numunelerin mikro-çukur desen değerlerinin karşılaştırılması amacı ile 3 farklı mikro-çukur alan desen yoğunluk değeri ve mikro-çukur çap değerlerinin sürtünme katsayısı üzerindeki değişimlerinin gösteren grafikler aşağıda verilmekte ve yorumlanmıştır.

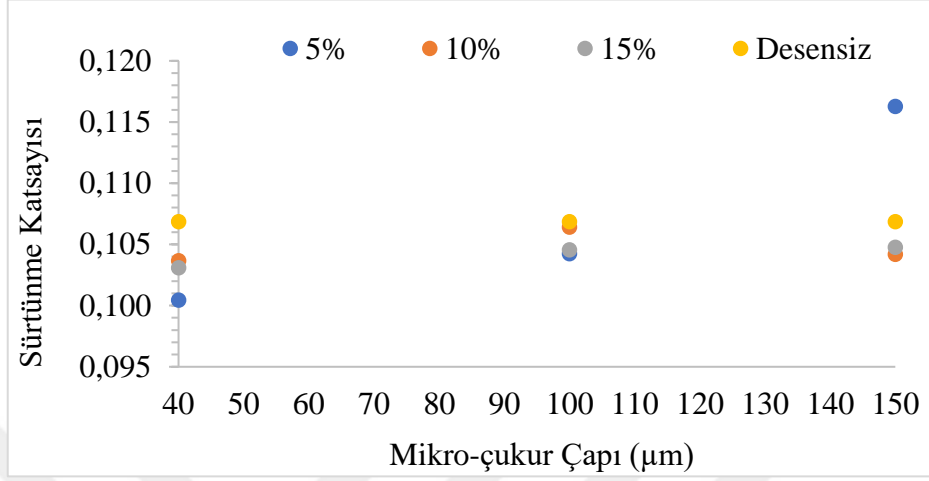
Grafikler GUR 1020 XL (Şekil 75), GUR 1020 EXL (Şekil 76) ve GUR 1020 PE (Şekil 77) için 3 ayrı grafik halinde ve desensiz numuneleri de içerecek şekilde oluşturmakta ve sonuçları sebepleri ile her birinin altında detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 75. GUR 1020 XL desenli numunesinin mikro-çukur çaplarına bağlı sürtünme katsayısı değerleri

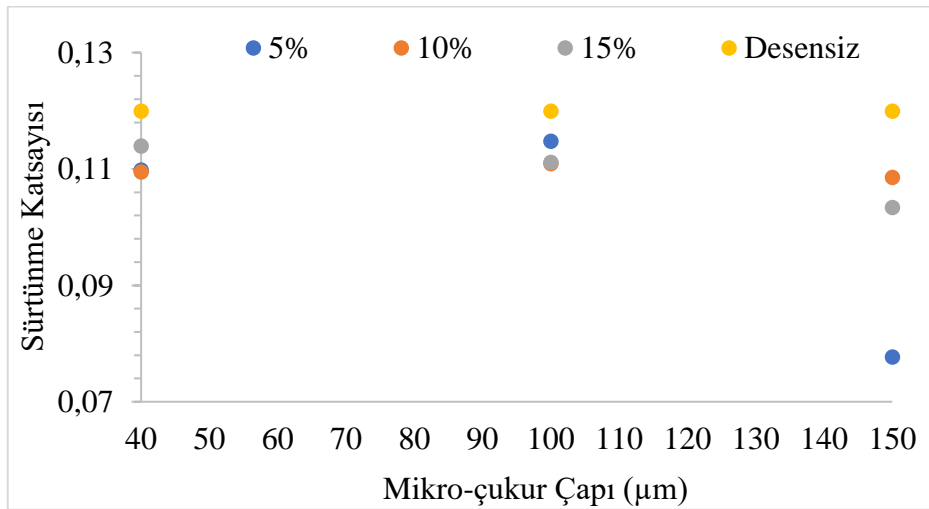
%5 yoğunluk değerine sahip numunelerde mikro-çukur çapının artışı sürtünme katsayısını azaltıcı yönde etkin bir değer oluşturmakta ve 150 µm mikro-çukur çapı değerinde en düşük sürtünme katsayısı değerine ulaşılmıştır. %10 ve %15 desen

yoğunluğuna sahip desenli numunelere bakıldığında sürtünme katsayısında kararlı bir durum görülmemektedir (Şekil 75).



Şekil 76. GUR 1020 EXL desenli numunesinin mikro-çukur çaplarına bağlı sürtünme katsayısı değerleri

Genel olarak desenli numunelere bakıldığında 40 µm çap değerinde en düşük sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir (Şekil 76).



Şekil 77. GUR 1020 PE desenli numunesinin mikro-çukur çaplarına bağlı sürtünme katsayısı değerleri

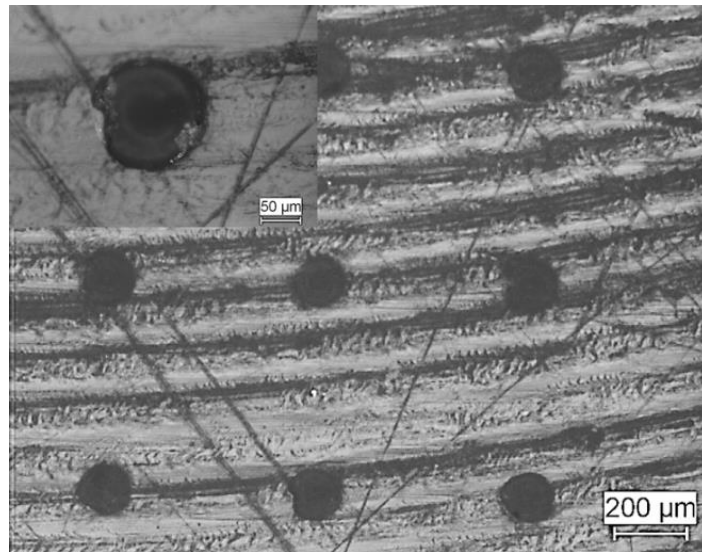
%5 yoğunluk değerine sahip numunelerde mikro-çukur çapının artışı sürtünme katsayısında azaltıcı yönde etki oluşturmuştur. %5 yoğunluk değerine sahip numunelerde 150 µm mikro-çukur çapı değerinde en düşük sürtünme katsayısı değerine ulaşılmıştır.

%10 ve %15 desen yoğunluğu ile desenli numunelerde mikro-çukur çap değeri arttığında sürtünme katsayısı azalış yönünde seyretmektedir. 150 µm mikro-çukur çapı değerinde en düşük sürtünme katsayısı değerine ulaşılmış olup bu sonuçlar literatür ile uyumludur (Şekil 77).

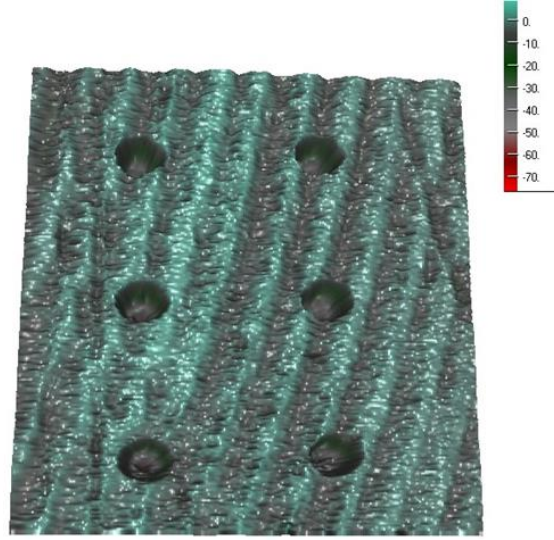
3.6. Tribolojik Test Sonrası Numune Yüzeylerinin İncelenmesi

3.6.1. GUR 1020 PE Numune Yüzeylerin İncelenmesi

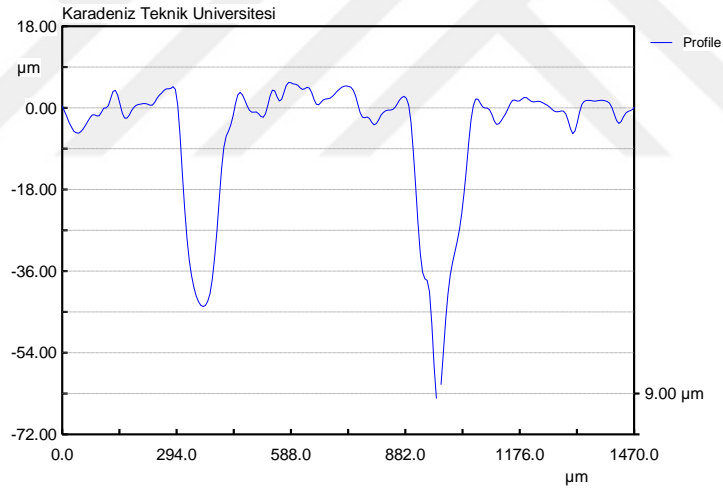
Bu kısımda 270 femtosaniye (fs) lazer kullanarak GUR 1020 PE numune üzerinde yapılan sürtünme katsayısının belirlenmesini içeren blok-disk testlerinden sonra numune gruplarında aşınma ve/veya yüzeydeki mikro-çukurların yapısının değişimlerini gösteren görsel ve sayısal değerler incelenmiştir. GUR 1020 PE numune grubunda bulunan ve sürtünme katsayısı testlerinden sonra 9 farklı deney numunesi içerisinde 3 no'lu numune örneği alınıp ilgili optik mikro-çukur görüntüsü (Şekil 78) ve profilometre (Şekil 79 ve Şekil 80) verileri aşağıda verilmektedir.



Şekil 78. GUR 1020 PE 3 no'lu deney numunesi üzerindeki tribolojik test sonrası aşınmış mikro-çukur görüntüsü



Şekil 79. GUR 1020 PE 3 no'lu deney numunesinin tribolojik test sonrası temassız profilometre analizi



Şekil 80. GUR 1020 PE 3 no'lu numunenin tribolojik test sonrası temassız profilometre ile alınan mikro-çukur çap ve adım analizi

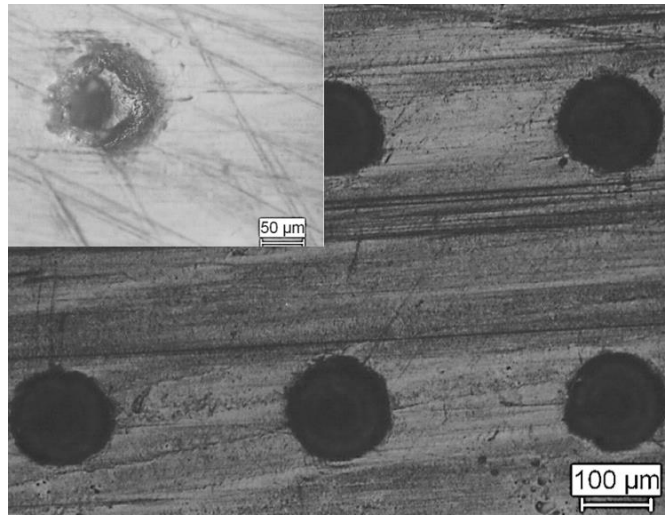
GUR 1020 PE 3 no'lu numune için lazer desenleme sonrası oluşan değerler; mikro-çukur çapı $155 \mu\text{m}$ ve mikro-çukur adımını $575 \mu\text{m}$ 'dir. Blok-disk triboloji testi sonrasında UYMAPE'nin yüzey yapısı optik mikroskop ve profilometre ile incelenerek yüzeyde hasar veya aşınma gibi etkilerin varlığının olup olmadığının tespiti yapılmıştır. Değerler en az 3

farklı mikro-çukur üzerinden ortalamaları alınarak mikro-çukur çapı 142 μm ve mikro-çukur adımı 562 μm ölçülmüştür.

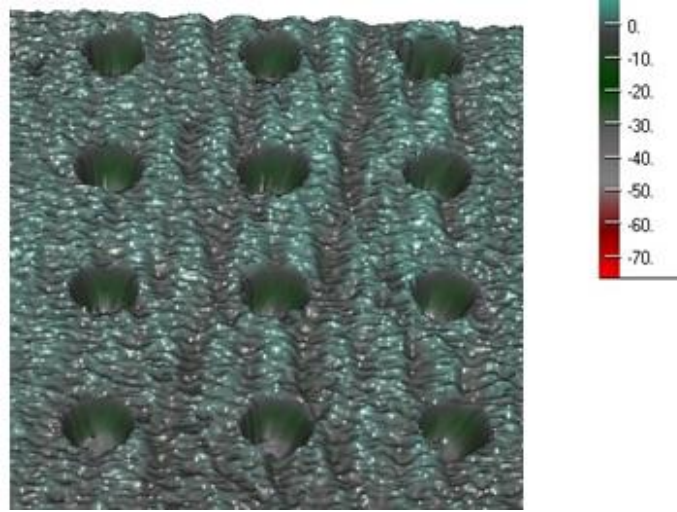
Buradan yola çıkarak bulunan tüm deneysel çalışma değerlerine optik cihazlar altında mikro-çukurlara bakıldığında yüzeyde az miktarda aşınma veya bozulmaların olduğu gözlemlenmektedir. Benzer davranışlar diğer teste tabi tutulmuş deney numune grupları yüzeylerinde de gözle görünür olmaktadır. GUR 1020 PE numune gruplarındaki tüm deney no'ları için triboloji testi sonrasında yüzeyden mikro-çukur çap ve adım sonuç değerleri aldığımızda, test öncesi değerlerden farklı değerler elde edilmektedir. Mikro-çukur çapı üzerinde %41'lere varan değişimler ve mikro-çukur adım parametresi üzerindeki değişimler ise ortalama %2 civarında olmuştur.

3.6.2. GUR 1020 EXL Numune Yüzeylerin İncelenmesi

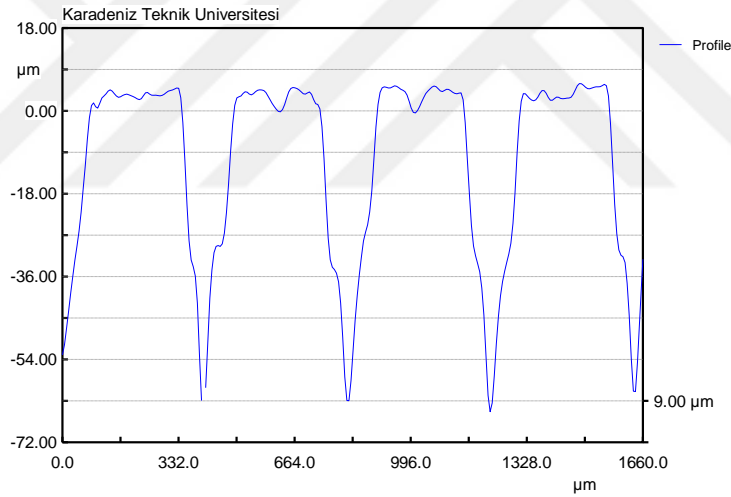
270 femtosaniye (fs) lazer kullanarak GUR 1020 EXL ile yapılan sürtünme katsayısının belirlenmesini içeren blok-disk testlerinden sonra aşınma ve/veya yüzeydeki mikro-çukurların yapısının değişimlerinin gösteren görsel ve sayısal değerler incelenmiştir. GUR 1020 EXL numune grubunda bulunan ve sürtünme katsayısı testlerinden sonra 9 farklı deney numunesi içerisinde 6 no'lu numune örneği alınıp ilgili optik mikro-çukur görüntüsü (Şekil 81) ve profilometre (Şekil 82 ve Şekil 83) verileri aşağıda verilmektedir.



Şekil 81. GUR 1020 EXL 6 no'lu deney numunesi üzerindeki tribolojik test sonrası aşınmış mikro-çukur görüntüsü



Şekil 82. GUR 1020 EXL 6 no'lu deney numunesinin tribolojik test sonrası temassız profilometre analizi



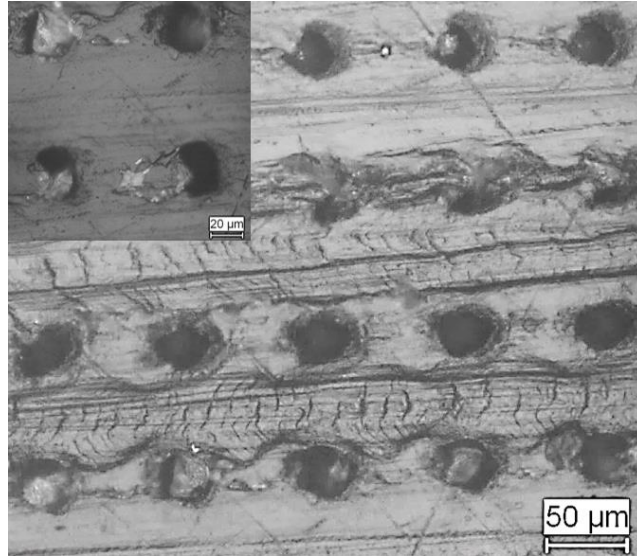
Şekil 83. GUR 1020 EXL 6 no'lu deneyin tribolojik test sonrası temassız profilometre ile alınan mikro-çukur çap ve adım analizi

GUR 1020 EXL 6 no'lu numune için lazer desenleme sonrası oluşan değerler; mikro-çukur çapı $153 \mu\text{m}$ ve mikro-çukur adımı $386 \mu\text{m}$ 'dur. Blok-disk triboloji testi sonrasında UYMAPE'nin yüzey yapısı optik mikroskop ve profilometre ile incelenerek yüzeyde hasar veya aşınma gibi etkilerin varlığının olup olmadığının tespiti yapılmıştır. Değerler en az 3 farklı mikro-çukur üzerinden ölçülmüş ve ortalamaları alınarak; mikro-çukur çapı $145 \mu\text{m}$ ve mikro-çukur adımı $390 \mu\text{m}$ değerleri ölçülmüştür.

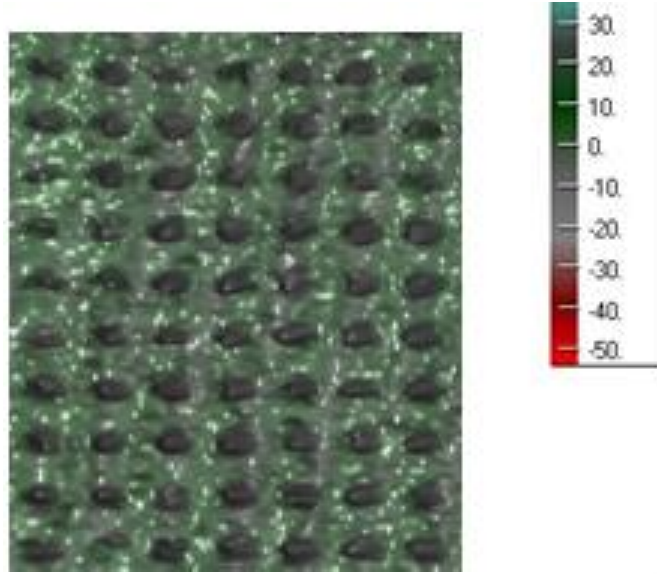
Optik cihazlar ile mikro-çukur yapısı incelendiğinde yüzeyde aşınma ve/veya bozulmaların olduğu gözlemlenmektedir. Benzer durumlar diğer deney testlerde de görülmektedir. GUR 1020 EXL numune gruplarındaki diğer tüm deney no'ları için triboloji testi sonrasında yüzeyden mikro-çukur çap ve adım sonuç değerleri aldığımızda, test öncesi değerlerden farklı değerler elde edilmiştir. Mikro-çukur çapı üzerinde %36'lara varan değişimler ve mikro-çukur adım parametresi üzerindeki değişimler ise ortalama %1.7 olmaktadır.

3.6.3. GUR 1020 XL Numune Yüzeylerin İncelenmesi

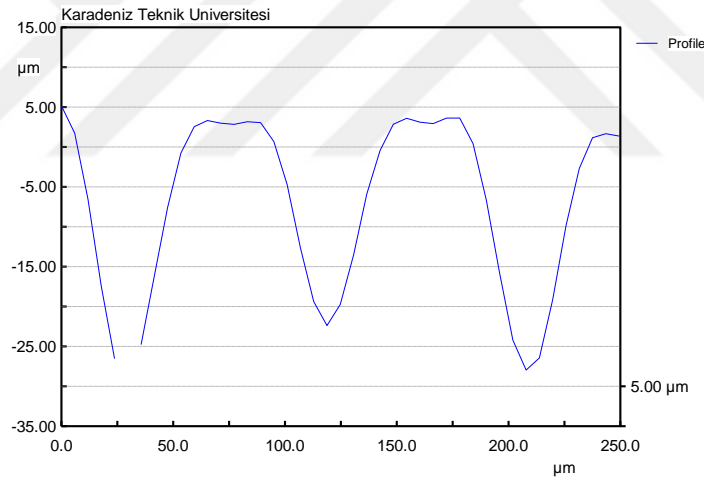
Burada, 270 femtosaniye (fs) lazer ile GUR 1020 XL için yapılan sürtünme katsayısının belirlenmesini içeren blok-disk testlerinden sonra aşınma ve/veya yüzeydeki mikro-çukurların yapısının değişimlerinin gösteren görsel ve sayısal değerler incelenmiştir. GUR 1020 XL numune grubunda bulunan ve sürtünme katsayısı testlerinden sonra elimizde olan 9 farklı deney numunesi içerisinde 7 no'lu deney numunesi alınıp ilgili optik mikro-çukur görüntüsü (Şekil 84) ve profilometre (Şekil 85 ve Şekil 86) verileri aşağıda verilmektedir.



Şekil 84. GUR 1020 XL 7 no'lu deney numunesinin tribolojik test sonrası aşınmış mikro-çukur görüntüsü



Şekil 85. GUR 1020 XL 7 no'lu deneyin tribolojik test sonrası temassız profilometre analizi



Şekil 86. GUR 1020 XL 7 no'lu deneyin tribolojik test sonrası temassız profilometre ile alınan mikro-çukur çap ve adım analizi

GUR 1020 XL 7 no'lu numune için lazer desenleme sonrası oluşan değerler; mikro-çukur çapı $38 \mu\text{m}$ ve mikro-çukur adımı $85 \mu\text{m}$ 'dur. Blok-disk triboloji testi sonrasında UYMAPE'nin yüzey yapısı optik mikroskop ve profilometre ile incelenerek yüzeyde hasar veya aşınma gibi etkilerin olup olmadığının tespiti yapılmıştır.

Değerler en az 3 farklı mikro-çukur üzerinden ortalamaları alınarak; mikro-çukur çapı $31 \mu\text{m}$ ve mikro-çukur adımı $84 \mu\text{m}$ değerleri ölçülmüştür.

Optik cihazlar ile mikro-çukurlerin yapısı incelendiğinde yüzeyde aşınma ve bozulmaların olduğu gözlemlenmektedir. Benzer davranışlar diğer deney numaralarındaki testlerde de oluşmuştur. GUR 1020 XL numune gruplarındaki diğer tüm deney no'ları için triboloji testi sonrasında yüzeyden mikro-çukur çap ve adım sonuç değerleri aldığımızda, test öncesi değerlerden farklı değerler elde edilmektedir. Mikro-çukur çapı üzerinde %26'lara varan değişimler ve mikro-çukur adım parametresi üzerindeki değişimler ise ortalama %1.6 hesaplanmıştır.

3.7. Aşınma Faktörü Hesabı

İmplant eklemleri için kullanılan UYMAPE, uygulamalarda yüzeylerde ve yağlı çalışan ortamda aşınma kalıntıları oluşturduğu literatürde rapor edilmiştir. UYMAPE aşınma kalıntılarının çevre dokularla olumsuz reaksiyonları nedeniyle, UYMAPE bağlantılarının ömrü genellikle 15-20 yıl arası sınırlı kalmaktadır. Aşınma, yüzeyden malzeme kaldırma işlemi olduğundan dolayı yüzey desenleme yöntemlerinin uzun vadeli etkisinin daha fazla araştırılması gerekmektedir (Baena vd., 2015).

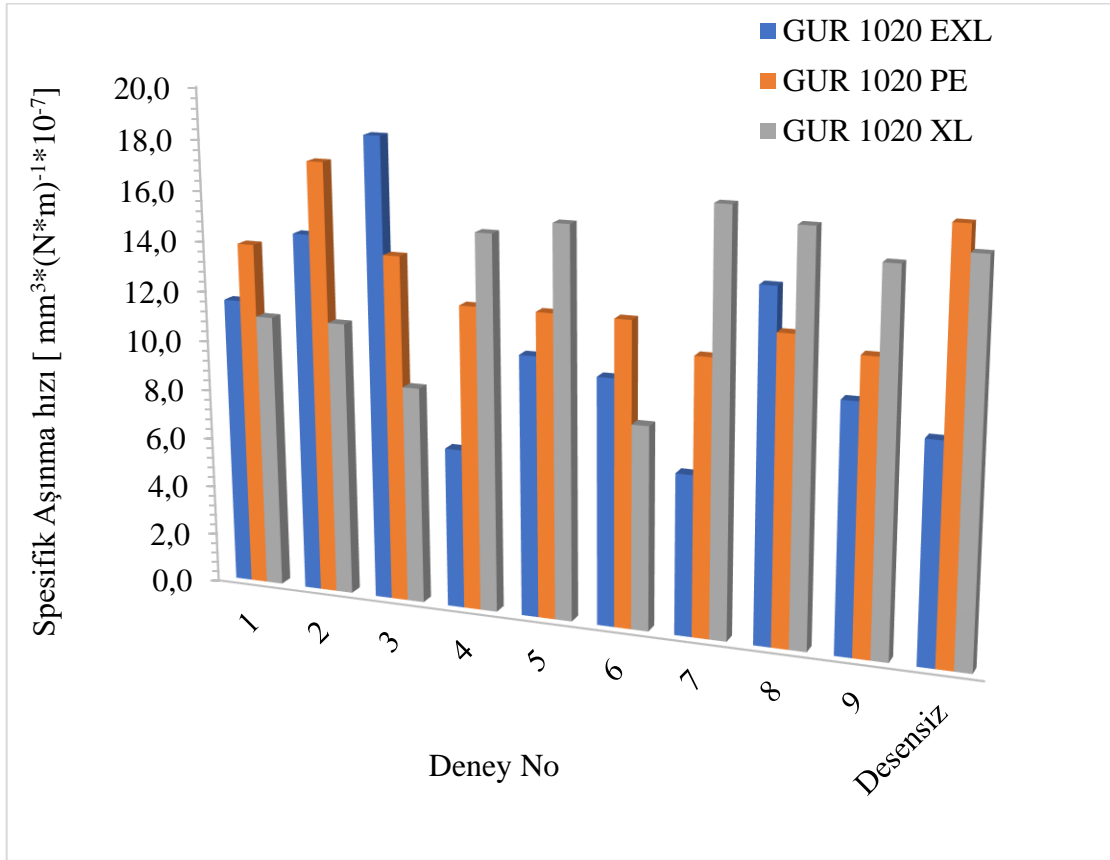
Literatürden de anlaşılacağı üzere yıllar boyu UYMAPE implant malzemesinin aşınmasını minimize eden yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımların içerisinde UYMAPE malzeme içerisine farklı malzeme katkıları veya çapraz bağlama yöntemlerinin uygulanmasının yanı sıra malzeme yüzeyinde desenli yapıların oluşturulmasını da içermektedir. GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL UYMAPE triboloji testlerine tabi tutulan 9 adet deneyi ve desensizi de içeren ilgili formülle hesaplanmış spesifik aşınma hızları Tablo 16'da ve grafiği ise Şekil 87'de verilmektedir.

Tablo 16. GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL malzemelerine ait spesifik aşınma hızları

Deney No	Mikro-çukur Çapı (µm)	Mikro-çukur alan desen yoğunluğu (%)	Spesifik Aşınma hızı (mm ³ x (N x m) ⁻¹ x 10 ⁻⁷)		
			GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
1	40	5	13.86	11.57	11.00
2	100	5	17.30	14.43	11.00
3	150	5	13.86	18.44	8.71

Tablo 16'nın devamı

4	40	10	12.14	6.41	15.01
5	100	10	12.14	10.42	15.58
6	150	10	12.14	9.85	8.13
7	40	15	11.00	6.41	16.72
8	100	15	12.14	13.86	16.15
9	150	15	11.57	9.85	15.01
10 (Desensiz)	0	0	16.61	8.71	15.58



Şekil 87. Triboloji testi sonrası 3 farklı malzeme grubu için hesaplanan spesifik aşınma hızları

UYMAPE'nin aşınma özelliklerini iyileştirmek için mikro ölçekli 40 µm derinliğinde ve farklı çaplarda (0.3 mm ve 1 mm) ve farklı alan desen yoğunluklarında (%5, %10 ve %20) dairesel şekilli desenli UYMAPE'nin farklı çaplarda ve mikro-çukur yoğunluklarında yağlanmış koşullar altında aşınma performansı incelenmiş ve desen yoğunluğunun ve çapının aşınma hızı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Küçük çaplı

ve yüksek mikro-çukur yoğunluğuna sahip malzemelerin düşük aşınma hızına sahip olduğu bulunmuştur (Tan vd., 2018).

Sakoda vd. (2006), UYMAPE ile vitamin E katkılı UYMAPE numunenin deney düzeneği altında aşınma davranışlarını araştırmışlar ve vitamin E katkılı UYMAPE'nin aşınma miktarının yaklaşık olarak %30 oranında daha az olduğu çalışmayı yapmışlardır.

GUR 1020 PE, GUR 1020 XL ve GUR 1020 EXL numuneleri üzerinde malzemelerin aşınma etkilerine bakıldığında, desenli ÇUYMAPE ve desenli UYMAPE; desensiz versiyonları ile karşılaştırıldığında malzemenin aşınma miktarları yaklaşık olarak %20 oranında daha düşük hesaplanmıştır. Malzeme yüzeyinde mikro-çukurlu yapı oluşturmak aşınma miktarlarının azaltılmasına neden olmuştur. Ayrıca, çapraz bağlı vitamin E katkılı UYMAPE numunelerin aşınma dayanımı en yüksek olmuştur. Buna karşın desenli ÇUYMAPE'nin aşınma direnci ve UYMAPE'in aşınma dirençleri arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Vitamin E katkısı eklemek UYMAPE'nin aşınma direncini yaklaşık %14 oranında arttırdığı ortaya çıkarmıştır.

Spesifik aşınma hızı-deney no grafiğine bakıldığında; GUR 1020 PE numunesi için alan desen yoğunluğu arttıkça aşınma hızında azalma olmakta ve ideal etkin değerler %15 mikro-çukur alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapı değerinde orataya çıkmaktadır. GUR 1020 EXL için en ideal koşul %10 alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapı ve GUR 1020 XL numune grubunda ise ideal koşul %5 alan desen yoğunluğu ve 150 µm mikro-çukur çapı değeridir.

Yapılan deneysel çalışmada daha düşük sürtünme katsayılarının, aşınmayı önemli ölçüde azalttığına derinden inanılmıştır. Bu durum implantların hizmet ömrünün uzamasına ve genel aşınma sürecini yavaşlatabilmektedir. Uzun süreli aşınma testi ve klinik çalışmalar ile yüzey desenleme uygulanması milyonlarca hastanın yaşam kalitesini iyileştirecek ve revizyon operasyonlarıyla ilişkili maliyetlerde de azalmalar meydana getirecektir.

3.8. Taguchi Deney Tasarımına Göre Sonuçların İrdelenmesi

3.8.1. GUR 1020 PE Numuneleri İçin Taguchi Analiz Sonuçları

Aşınma sonucu malzemenin hacim kayıpları için kontrol faktörlerinin her kombinasyonu deney tasarımında ölçülmüştür ve kontrol faktörlerinin optimizasyonunda

S/G (Sinyal/Gürültü) oranları Minitab 19 programı ile hesaplanmıştır. S/G oranı Taguchi deney tasarımı metodunda en ideal kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve belirlenmesinde kullanılan ölçüt; ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (G) oranı olmuştur. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü de ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil etmektedir. Hacim kaybının minimum olarak belirlenmesi, kalça implant maliyetleri ve polietilenin ömrü açısından büyük bir öneme sahiptir.

Taguchi'nin L9 deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen hacim kayıp değerleri ile hesaplanan S/G oranları, Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. GUR 1020 PE numuneleri için deney faktörlerine bağlı hacim kayıp ve S/G oranları

Deney Faktörleri				
Deney No	Mikro- çukur alan desen yoğunluğu (%)	Mikro-çukur çapı (μm)	Hacim kaybı (mm^3)	S/G oranı
1	5	40	0.624	4.096
2	5	100	0.778	2.180
3	5	150	0.624	4.096
4	10	40	0.546	5.256
5	10	100	0.546	5.256
6	10	150	0.546	5.256
7	15	40	0.495	6.108
8	15	100	0.546	5.256
9	15	150	0.521	5.663

Analizlerde, hacim kayıplarının kontrol faktörlerinin etkisi (mikro-çukur alan desen yoğunluğu ve mikro-çukur çapı) Tablo 18'de verilmiştir. Kontrol faktörlerine ait optimum seviyelerin belirlenmesinde Taguchi yöntemiyle oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmıştır. Taguchi teknikleri kullanılarak oluşturulan tablodaki en büyük S/G değerleri o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi ifade etmektedir.

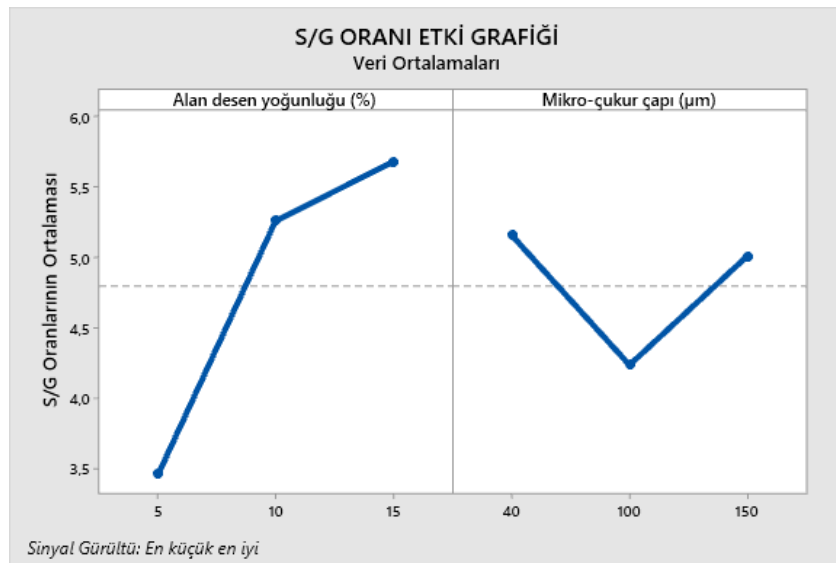
Tablo 18. GUR 1020 PE numuneleri için faktör seviyelerinin S/G oranları, Delta ve Rank değerleri

Seviyeler	Alan desen yoğunluğu (%)	Mikro-çukur çapı (μm)
1	3.458	5.153
2	5.256	4.231
3	5.676	5.005
Delta	2.218	0.923
Rank	1	2

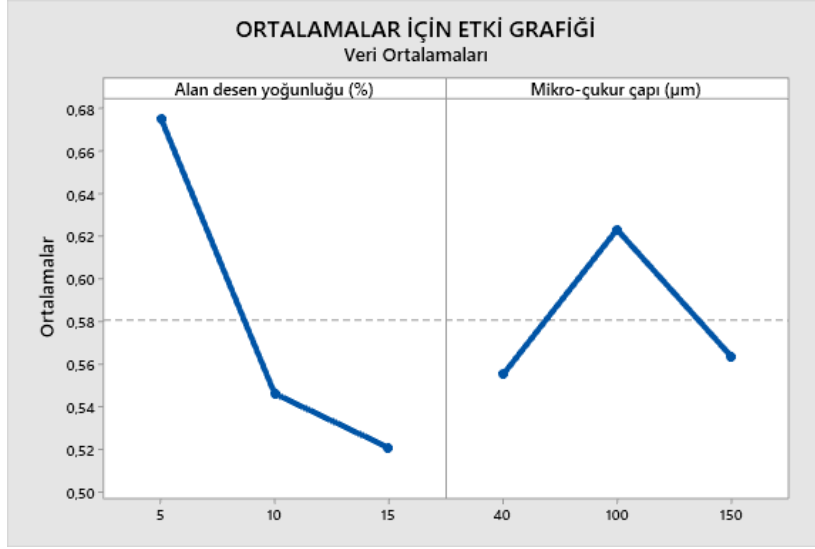
Faktör seviyeleri incelenirken S/G oranlarının en büyük ve en küçük değerlerinin farkı delta ve delta değeri en büyük olan faktörün etki değeri de yüksek olmuştur. Rank satırı ise faktörlerin etki değerlerinin sıralaması olarak ifade edilmektedir. Etki eden faktörlere bakıldığında alan desen yoğunluğu en etkin parametre olarak ortaya çıkmıştır.

S/G oranları ve seviyelerine bakıldığında; alan desen yoğunluğu için 3. seviyedeki S/G oranı 5.676 olmakta ve bu değer %15 değere karşılık gelmektedir. Mikro-çukur çapı için bakıldığında 1. seviyeye karşılık gelen 5.153 S/G oranına sahip 40 μm değerindeki mikro-çukur çapı için ideal sonuçları vermiştir.

Taguchi yöntemiyle elde edilen kontrol faktörlerinin etkilerini gösteren S/G oranları etki grafiği (Şekil 88) ve UYMAPE malzemesinin ortalamalar için etki grafiği (Şekil 89) aşağıda verilmiştir.



Şekil 88. GUR 1020 PE malzemesinin ortalama S/G oranları etki grafiği



Şekil 89. GUR 1020 PE malzemesinin ortalamalar için etki grafiği

GUR 1020 PE numunelerinin S/G oranı etki grafiklerinden "en küçük en iyi" S/G kalite karakteristiği dikkate alındığında, Şekil 89'da ortalamalar için verilmiş etki grafiğinden yüksek olan faktör seviyesi değeri en iyi değer olarak ortaya çıkmaktadır.

2 faktör (alan desen yoğunluğu ve mikro-çukur çapı) için bakıldığında GUR 1020 PE numuneleri için aşınma hacim kayıplarını en aza indirebilmek için optimum deney şartlarındaki aşınma hacim kayıplarının en düşük değerde ölçülmesi beklenmektedir.

Deney tasarımında kullanılan tüm kontrol faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimlerinin belirlenmesinde ve elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği tespitinde Anova yöntemi kullanılmıştır. Tablo 19'da aşınma için Anova sonuçları görülmektedir. Her bir değişkenin sonuçlar üzerindeki anlamlılık düzeyini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi, kareler toplamı, kareler ortalaması, F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Anova'daki kontrol faktörlerinin etkisi F değerlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenir. F değeri en büyük olan faktör, sonuca en fazla etki eden faktördür.

Tablo 19. GUR 1020 PE numuneleri için aşınma hacim kaybı Anova varyans analizi

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F değeri	P Değeri	Katkı (etki) Oranı (%)
Alan desen yoğunluğu (%)	2	0.0413	0.0206	9.38	0.031	70.70
Mikro-çukur çapı (µm)	2	0.0083	0.0042	1.89	0.265	14.22
Hata	4	0.0088	0.0022			15.08
Toplam	8	0.0584				100.00

Anova sonuçlarına göre aşınmaya etki eden en önemli parametre %70.70 oran ile alan desen yoğunluğu faktörüdür. Anova sonuçlarına göre aşınma hacim kaybına etki eden diğer bir kontrol faktörü % 14.22 ile mikro-çukur çapı olmuştur. Analiz hesaplanmasında oluşan hata %15.08 etki oranında kalmıştır. Varyans analiz sonuçları incelendiğinde güvenilirlik oranı yaklaşık %85 çıkmıştır.

Doğrulama deneyleri yapıldığında GUR 1020 PE numuneleri için aşınma hacim kaybı optimum deney şartları %15 alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapı değeri olduğu belirlenmiştir. Program kullanılarak tahmin edilen aşınma hacim kayıp değeri 0.4950 mm³ olmuştur. Deneysel çalışma sonrasındaki aşınma hacim kaybı değeri de 0.4950 mm³ olarak ölçülmüştür. Bu veriler ile taguchi tasarım matrisinde elde edilen mükemmel değerler olduğu ve deneysel sonuçlar ile uyumluluğu olduğu bilinmektedir.

GUR 1020 PE numuneleri için ideal şartları sağlayan %15 alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapı değeri için regresyon denklemi aşağıda verilmiştir (Denklem 3).

$$PE = 0.7243 - 0.01547 \times AI + 0.000114 \times MÇ \quad (3)$$

Burada; PE: GUR 1020 PE hacim kaybı (mm^3), AL: alan desen yoğunluk değeri (%) ve MÇ: mikro-çukur çap değeri (μm) değerlerini ifade etmektedir.

3.8.2. GUR 1020 EXL Numuneleri İçin Taguchi Analiz Sonuçları

Taguchi'nin L9 deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen hacim kayıp değerleri ile hesaplanan S/G oranları, Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. GUR 1020 EXL numuneleri için deney faktörlerine bağlı hacim kayıp ve S/G oranları

Deney faktörleri				
Deney no	Mikro-çukur alan desen yoğunluğu (%)	Mikro-çukur çapı (μm)	Hacim kaybı (mm^3)	S/G oranı
1	5	40	0.521	5.663
2	5	100	0.649	3.755
3	5	150	0.830	1.618
4	10	40	0.289	10.782
5	10	100	0.469	6.577
6	10	150	0.443	7.072
7	15	40	0.289	10.782
8	15	100	0.624	4.096
9	15	150	0.443	7.072

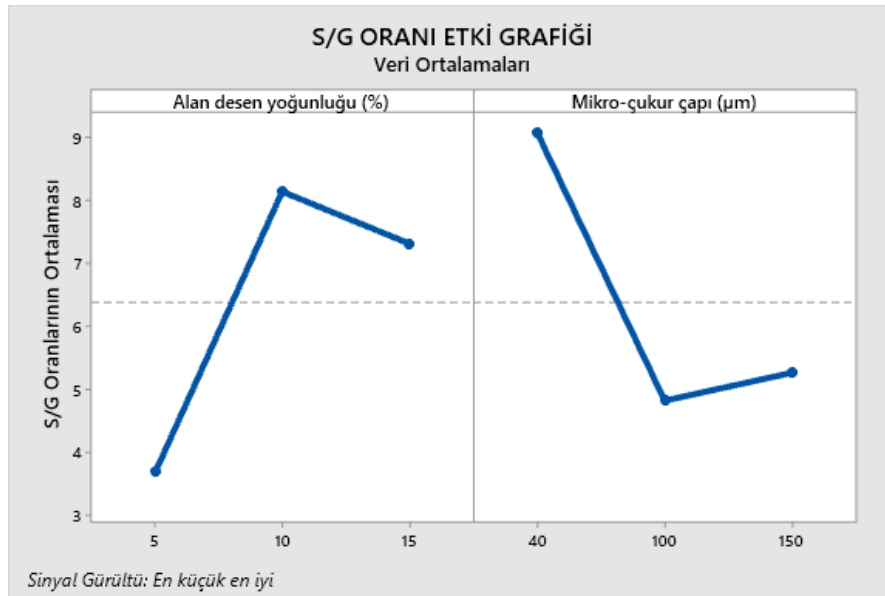
Analizlerde, hacim kayıplarının kontrol faktörlerinin etkisi (Mikro-çukur alan desen yoğunluğu ve mikro-çukur çapı), Tablo 21'de verilmiştir. Kontrol faktörlerine ait optimum seviyelerin belirlenmesinde Taguchi yöntemiyle oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmıştır. Taguchi teknikleri kullanılarak oluşturulan tablodaki en büyük S/G değerleri o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi ifade etmektedir.

Tablo 21. GUR 1020 EXL numuneleri için faktör seviyelerinin S/G oranları, Delta ve Rank değerleri

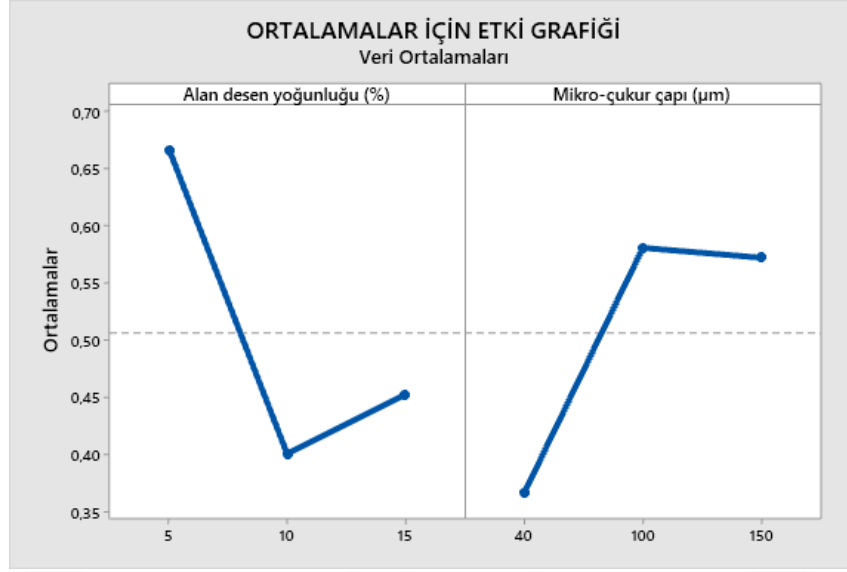
Seviyeler	Alan desen yoğunluğu (%)	Mikro-çukur çapı (μm)
1	3.679	9.076
2	8.144	4.809
3	7.317	5.254
Delta	4.465	4.266
Rank	1	2

S/G oranları ve seviyelerine bakıldığında; alan desen yoğunluğu için 2. seviyedeki S/G oranı 8.144 olmakta ve bu değer %10 değere karşılık gelmektedir. Mikro-çukur çapı için bakıldığında 1. seviyeye karşılık gelen 9.076 S/G oranına sahip 40 μm değerindeki mikro-çukur çapı için optimum değere sahip olmuştur. Etki eden faktörlere bakıldığında alan desen yoğunluğu en etkin parametre olarak ortaya çıkmıştır.

Taguchi yöntemiyle elde edilen kontrol faktörlerinin etkilerini gösteren S/G oranları (Şekil 90), VE-ÇUYMAPE malzemesinin ortalamalar için etki grafiği (Şekil 91) ve Tablo 22'de aşınma için Anova sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 90. GUR 1020 EXL numuneleri için ortalama S/G oranları etki grafiği



Şekil 91. GUR 1020 EXL malzemesinin ortalamalar için etki grafiği

Tablo 22. GUR 1020 EXL numuneleri için aşınma hacim kaybı Anova varyans analizi

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
Alan desen yoğunluğu (%)	2	0.1197	0.0598	6.83	0.051	49.24
Mikro-çukur çapı (µm)	2	0.0883	0.0442	5.04	0.081	36.33
Hata	4	0.0351	0.0088			14.42
Toplam	8	0.2431				100.00

Anova sonuçlarına göre aşınmaya etki eden en önemli parametre %49.27 oran ile alan desen yoğunluğu faktörüdür. Anova sonuçlarına göre aşınma hacim kaybına etki eden diğer bir kontrol faktörü %36.33 ile mikro-çukur çapı olmuştur. Analiz hesaplanmasında oluşan hata %14.42 etki oranında kalmıştır. Varyans analiz sonuçları incelendiğinde güvenilirlik oranı yaklaşık %85 çıkmıştır.

Doğrulama deneyleri yapıldığında GUR 1020 EXL numuneleri için aşınma hacim kaybı optimum deney şartları %10 alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapı değeri olduğu belirlenmiştir. Program kullanılarak tahmin edilen aşınma hacim kayıp değeri 0.2603

mm³ olmuştur. Deneysel çalışma sonrasındaki aşınma hacim kaybı değeri de 0.2890 mm³ olarak ölçülmüştür. Bu veriler ile taguchi tasarım matrisinde mükemmel değerlere yakın deneysel sonuçlar ile uyumluluğu olduğu bilinmektedir.

GUR 1020 EXL numunesi için ideal şartları sağlayan %10 alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapı değeri için regresyon denklemi aşağıda verilmiştir (Denklem 4).

$$EXL = 0.535 - 0.0215 \times AL + 0.001926 \times MÇ \quad (4)$$

Burada; EXL: GUR 1020 EXL hacim kaybı (mm³), AL: alan desen yoğunluk değeri (%) ve MÇ: mikro-çukur çap değeri (µm) değerlerini ifade etmektedir.

3.8.3. GUR 1020 XL Numuneleri İçin Taguchi Analiz Sonuçları

Taguchi'nin L9 deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen hacim kayıp değerleri ile hesaplanan S/G oranları, Tablo 23'de verilmiştir.

Tablo 23. GUR 1020 XL numuneleri için deney faktörlerine bağlı hacim kayıp ve S/G oranları

Deney No	Deney Faktörleri			
	Mikro-çukur alan desen yoğunluğu (%)	Mikro-çukur çapı (µm)	Hacim kaybı (mm ³)	S/G oranı
1	5	40	0.495	6.108
2	5	100	0.495	6.108
3	5	150	0.392	8.134
4	10	40	0.675	3.414
5	10	100	0.701	3.086
6	10	150	0.366	8.730
7	15	40	0.753	2.464
8	15	100	0.727	2.769
9	15	150	0.675	3.414

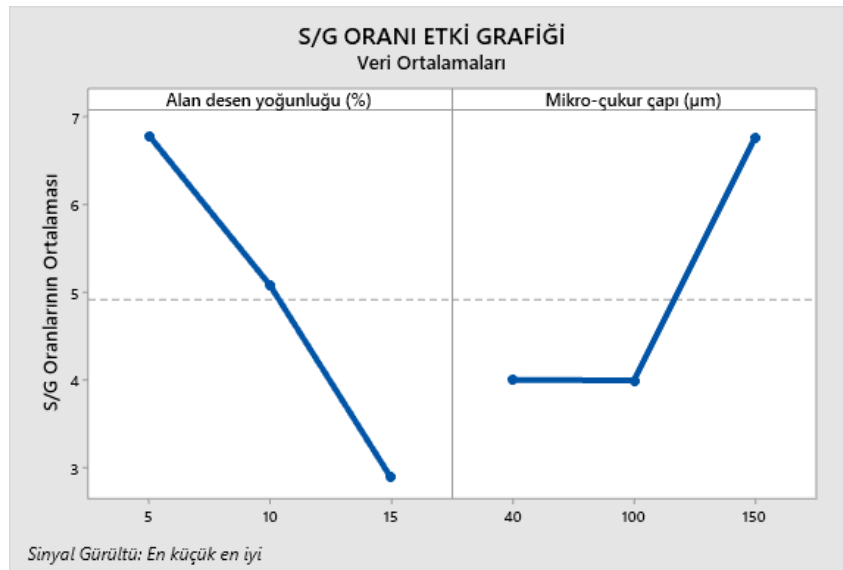
Analizlerde, hacim kayıplarının kontrol faktörlerinin etkisi (Mikro-çukur alan desen yoğunluğu ve mikro-çukur çapı), Tablo 24'te verilmiştir.

Tablo 24. GUR 1020 XL numuneleri için faktor seviyelerinin S/G oranları, Delta ve Rank değerleri

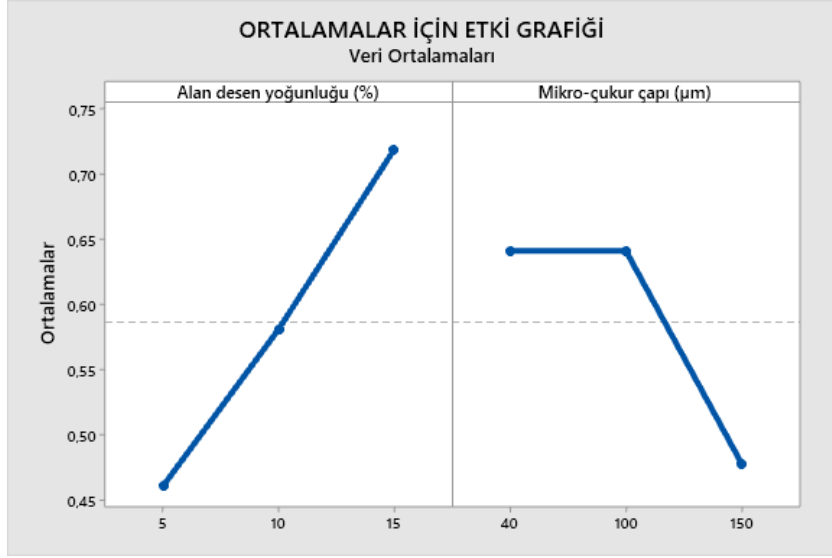
Seviyeler	Alan desen yoğunluğu (%)	Mikro-çukur çapı (µm)
1	6.783	3.995
2	5.077	3.988
3	2.882	6.760
Delta	3.901	2.772
Rank	1	2

S/G oranları ve seviyelerine bakıldığında; alan desen yoğunluğu için 1. seviyedeki S/G oranı 6.783 olmakta ve bu değer %5 değere karşılık gelmektedir. Mikro-çukur çapı için bakıldığında 3. seviyeye karşılık gelen 6.760 S/G oranına sahip 150 µm değerindeki mikro-çukur çapı için optimum değere sahip olmuştur.

Taguchi yöntemiyle elde edilen kontrol faktörlerinin etkilerini gösteren S/G oranları (Şekil 92), ÇUYMAPE malzemesinin ortalamalar için etki grafiği (Şekil 93) ve Tablo 25'te aşınma için Anova sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 92. GUR 1020 XL numuneleri için ortalama S/G oranları etki grafiği



Şekil 93. GUR 1020 EXL malzemesinin ortalamalar için etki grafiği

Tablo 25. GUR 1020 XL numuneleri için aşınma hacim kaybı Anova varyans analizi

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F değeri	P Değeri	Katkı (etki) Oranı (%)
Alan desen yoğunluğu (%)	2	0.0997	0.0499	7.58	0.044	55.29
Mikro-çukur çapı (µm)	2	0.0534	0.0267	4.05	0.109	29.74
Hata	4	0.0263	0.0066			14.68
Toplam	8	0.1794				100.00

Anova sonuçlarına göre aşınmaya etki eden en önemli parametre %49.27 oran ile alan desen yoğunluğu faktörüdür. Anova sonuçlarına göre aşınma hacim kaybına etki eden diğer bir kontrol faktörü %36.33 ile mikro-çukur çapı olmuştur. Analiz hesaplanmasında oluşan hata %14.42 etki oranında kalmıştır. Varyans analiz sonuçları incelendiğinde güvenilirlik oranı yaklaşık %85 çıkmıştır.

Doğrulama deneyleri yapıldığında GUR 1020 XL numuneleri için aşınma hacim kaybı optimum deney şartları %5 alan desen yoğunluğu ve 150 µm mikro-çukur çapı değeri olduğu belirlenmiştir. Program kullanılarak tahmin edilen aşınma hacim kayıp değeri 0.3518 mm³

olmuştur. Deneysel çalışma sonrasındaki aşınma hacim kaybı değeri de 0.3920 mm^3 olarak ölçülmüştür. Bu veriler ile taguchi tasarım matrisinde mükemmel değerlere yakın deneysel sonuçlar ile uyumluluğu olduğu ortaya çıkmıştır.

GUR 1020 XL numuneleri için ideal şartları sağlayan %5 alan desen yoğunluğu ve $150 \mu\text{m}$ mikro-çukur çapı değeri için regresyon denklemi aşağıda verilmiştir (Denklem 5).

$$XL = 0.4677 + 0.02577 \times AL - 0.001436 \times MÇ \quad (5)$$

Burada; XL: GUR 1020 XL hacim kaybı (mm^3), AL: alan desen yoğunluk değeri (%) ve MÇ: mikro-çukur çap değeri (μm) değerlerini ifade etmektedir.

Tek yönlü (One-way) ANOVA testi ya da varyans analizi, bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığının test edilmesinde kullanılan bir araçtır (URL-26, 2022; Refugio vd., 2018, Gül vd., 2021). T-testi biyoistatistik analizlerinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Veri toplama ve araştırmanın tasarımı sırasında da grupları birbiriyle karşılaştırmak için t-testine sık sık başvurmakta ve herhangi bir istatistik programına ihtiyaç duymaksızın, sadece Microsoft Excel kullanarak yapılabilişliği söz konusu olmuştur. T-testi, iki grup arasındaki ortalama farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını ve ölçülen iki grup arasında gözlenen farkın gerçek olup olmadığını tespit etmektedir. İlgili sürtünme katsayısı MS Excel verileri aşağıdaki Tablo 26'da verilmektedir.

Tablo 26. 3 farklı numune gruplarının blok-disk test sonuçlarına ait sürtünme katsayısı değerleri

Deney No	Sürtünme Katsayısı		
	GUR 1020 PE	GUR 1020 EXL	GUR 1020 XL
1	0.1098	0.1005	0.1364
2	0.1148	0.1043	0.1320
3	0.0777	0.1163	0.1096
4	0.1095	0.1037	0.1107
5	0.1109	0.1064	0.1071

Tablo 26'nın devamı

6	0.1086	0.1042	0.1213
7	0.1140	0.1031	0.1048
8	0.1112	0.1046	0.1271
9	0.1034	0.1048	0.1360
10 (Desensiz)	0.1200	0.1069	0.1391

Gruplar belirlenerek ilgili T testi her bir desenli ve tek desensiz numuneleri içerecek şekilde uygulanmıştır. Dizi1 ile ifade edilen kısım desenli numuneye ait 1 no'lu ve 3 farklı sürtünme katsayı değerine sahip GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL numunelerinin değerlerini içermektedir (Şekil 94). Dizi2 kısmı ise desensiz aynı tür numune gruplarının sürtünme katsayılarını içermektedir. Yazı_say seçeneğine 1 ya da 2 sayılarından birisi girilmiştir. Eğer açık bir şekilde desenli ya da desensiz değerlerinin diğerinden yüksek olması gerektiğini düşünüyorsak o zaman tek taraflı t-testi uygulayacağız, bu durumda Yazı_say kısmına 1 girilmiştir. Bir sonraki seçenek Tür, yani hangi tip t-testi yapacağımız. Genellikle Excel eşli t-testi için 1, eş varyanslı bağımsız 2 değişkenli t-testi için 2, ve eş varyans varsayımı olmadan bağımsız 2 değişken t-testi için de 3 seçeneğini kullanılmıştır. Bu kısımda eşli t-testi yaptığımız için Tür kısmına 1 girilmektedir (URL-27, 2022).

Fonksiyon Bağımsız Değişkenleri ? X

TTEST

Dizi1 D6:F6 = {0,109847841924399;0,1004528854700

Dizi2 D15:F15 = {0,119982858695652;0,10685161581...

Yazı_say 1 = 1

Tür 1 = 1

= 0,048175323

Bu işlem Excel 2007 ve öncesiyle uyumluluk amacıyla kullanılabilir. Bir t-Test için olasılığı verir.

Dizi1 ilk veri kümesi.

Formül sonucu = 0,048175323

[Fonksiyon yardımı](#) Tamam İptal

Şekil 94. T testi excel veri giriş ekranı

T testi komutunu girdiğimiz hücrede şu anda 0.04817 sayısını görüyoruz. Bu sayı 0.05'ten küçük olduğu için t-testi desenli ve desensiz arasında anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir.

Numune gruplarının hepsine bakıldığında bazı desenli numunelerin anlamlı bir etki oluşturduğu bazılarının ise anlamlılıkları 0.05 değerine yakın çıkmıştır. İlgili tüm desenli ve desensiz grupların anlamlılık hesap sonuçları aşağıda verilmektedir (Tablo 27).

Tablo 27. Desenli ve desensiz grupların anlamlılık değerleri

Numune No'ları	Anlamlılık Değerleri (P)
1 ve 10	0,048
2 ve 10	0,031
3 ve 10	0,157
4 ve 10	0,101
5 ve 10	0,140
6 ve 10	0,068
7 ve 10	0,137
8 ve 10	0,057
9 ve 10	0,131

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kalça protezlerinde yoğun olarak kullanılan UYMAPE yağlayıcı ve yatak görevi gören polietilen malzemelerin farklı tip lazer sistemleri kullanılarak yüzeyinde desenler oluşturulması ve UYMAPE elemanın üzerindeki desen yapılarının sürtünme katsayısına ve aşınma hızına etkisinin incelenmesini içermektedir. İlk olarak fiber ve femto saniye lazer sistemleri ile UYMAPE polietilen numunelerin desenleme işlemi incelenmiş ve ardından temas açısı değerleri ölçülüp literatür ile kıyaslanması yapılmıştır. Ardından, UYMAPE grupların triboloji testini blok-disk düzeneğinde biyo uyumluluğu yüksek olan Ti6Al4V disk elemanına karşı UYMAPE malzemenin bovine serum yağlayıcısı altında triboloji testleri yapılmıştır. Son olarak ilgili sürtünme katsayısı ve aşınma hızı grafikler çizilip, yorumlanıp ve aşınma durumları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen önemli sonuçlar ayrı bölümler halinde aşağıda özetlenmektedir:

4.1. Fiber ve Femtosaniye Lazer Desenleme Yüzey Sonuçlarının İrdelenmesi

- Fiber lazer / Integrated marker (IR) ve Ultraviyole (UV) lazerler ile Standart GUR 1020 PE UYMAPE üzerinde yapılan lazer desenleme işlemlerinde istenilen boyutlar hassas bir şekilde elde edilememiştir. IR Marker ile yapılan çalışmada lazer ışını parça yüzeyine etki etmeden alt kısma geçip alt katmanda oluşan tepkimelerden kaynaklı yanık etkisi göstermektedir.
- UV Marker da ise yüzeyde genel olarak ergime etkileri görülmektedir. Ayrıca, çukur/mikro-çukur oluşturacak şekilde atış yapıldı fakat yüzeyde kabarma durumları meydana gelmektedir.
- 120 femtosaniye (fs) μ Fab lazer ile GUR 1020 PE ve GUR 1020 XL üzerinde yapılmış desenlemelerde yanık etkisi gözlemlenmemiştir. Ancak boyut ölçümlerinde özellikle derinlik değerlerinde aşırı farklılıklar ve malzeme işlemlerinden kaynaklı tutarsızlıklar söz konusu olmuştur.

- 270 femtosaniye lazer ile yapılmış olan 3 farklı (GUR 1020 PE, GUR 1020 EXL ve GUR 1020 XL) numuneler üzerindeki çalışmada yanık etkisi olmadan istenilen mikro-çukur çapı ve mikro-çukur adım değerlere yüksek oranlarda yakın verilere ulaşılmıştır.
- Femtosaniye lazer ile yapılmış desenli UYMAPE numuneler üzerinden alınmış temas açısı ölçümlerine bakıldığında; yüzeylerdeki mikro-çukur çapının, mikro-çukur adımına oranı fazla olan numune grubunda temas açısı da yüksek çıkmıştır. Ayrıca en yüksek temas açısı değerleri ortalama olarak GUR 1020 XL numunesinde oluşmuştur.

4.2. Tribolojik Test Sonuçlarının İrdelenmesi

- GUR 1020 EXL polietilen malzememin sürtünme katsayısının diğer malzemelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmektedir. GUR 1020 PE ve GUR 1020 XL numuneleri yüksek sürtünme katsayısı değerlerine sahip olmuştur. En yüksek sürtünme katsayısı GUR 1020 XL'de elde edilmiştir.
- GUR 1020 XL UYMAPE için; 40 μm mikro-çukur çapı değerlerinde oluşturulmuş desenlemeler için yoğunluk miktarı arttıkça sürtünme katsayısında düşüş meydana gelmiş olması literatürdeki çalışmaları yansıtan sonuçları bizlere vermektedir. %5 yoğunluk değerine sahip numunelerde mikro-çukur çapının artışı sürtünme katsayısını azaltıcı yönde etkin bir değer oluşturmakta ve 150 μm mikro-çukur çapı değerinde en düşük sürtünme katsayısı değerine ulaşılmıştır. %10 ve %15 desen yoğunluğuna sahip desenli numunelere bakıldığında sürtünme katsayısında kararlı bir durum görülmemektedir.
- GUR 1020 EXL sonuçlarına bakıldığında; %15 desen yoğunluğu ile desenli numunelerde 400 μm mikro-çukur çap değerinde en düşük sürtünme katsayısı değeri elde edilmektedir. Genel olarak desenli numunelere bakıldığında ise 40 μm çap değerinde en düşük sürtünme katsayısı değeri elde edilmektedir.
- GUR 1020 PE'de; %5, %10 ve %15 desen yoğunluk değerine sahip numunelere bakıldığında mikro-çukur çap değeri arttığında sürtünme katsayısı azalış yönünde seyretmekte ve bu sonuçlar mevcut literatürü doğrular niteliktedir.

- Çalışmada en düşük sürtünme katsayısı değerine sahip numune grubu olan GUR 1020 EXL numunesinin aşınma faktörüne bakıldığında en düşük çıkmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı değerine sahip olan GUR 1020 XL numunenin yukarıdaki aşınma faktörü grafiği incelendiğinde düşük aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- UYMAPE numunelerin sürtünme katsayıları desensiz numunelere oranla yaklaşık olarak ortalama %12'lere varan daha düşük değerler elde edilmektedir.
- GUR 1020 PE, GUR 1020 XL ve GUR 1020 EXL numuneleri üzerinde malzemelerin aşınma etkilerine bakıldığında, desenli ÇUYMAPE ve desenli UYMAPE; desensiz versiyonları ile karşılaştırıldığında malzemenin aşınma miktarları yaklaşık olarak %20 oranında daha düşük olmuştur. Malzeme yüzeyinde mikro-çukurlu yapı oluşturmak aşınma miktarlarının azaltılmasına neden olmuştur. Ayrıca, çapraz bağlı vitamin E katkılı UYMAPE numunelerin aşınma dayanımı en yüksek olmuştur. Buna karşın desenli ÇUYMAPE'nin aşınma direnci ve UYMAPE'in aşınma dirençleri arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Vitamin E katkısı eklemek UYMAPE'nin aşınma direncini yaklaşık %14 oranında arttırdığı ortaya çıkarmıştır.
- Spesifik aşınma hızı deney no grafiğine bakıldığında; GUR 1020 PE numunesi için alan desen yoğunluğu artıkça aşınma hızında azalma olmuştur. İdeal etkin değerler %15 mikro-çukur alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çapıdır. GUR 1020 EXL için en ideal koşul %10 alan desen yoğunluğu ve 40 µm mikro-çukur çap değeridir. GUR 1020 XL numune grubunda ise ideal koşul %5 alan desen yoğunluğu ve 150 µm mikro-çukur çap değeridir.

5. ÖNERİLER

1. UYMAPE, kalça ve diz implant çalışmalarında kendi kendini yağlayan, düşük sürtünmeli, biyouyumlu ve talep gören asetabular ara yüzey malzemesi olmuştur. Eklem yüzeyleri arasındaki sürtünme ve aşınma kalıntılarının oluşumu nedeniyle yağlayıcılık açısından temas noktalarında problemler yapılar ve o bölgelerde malzeme birikmesi oluşturabilmektedir. Bu problemin giderilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilerek aşınmanın olumsuz etkilerini azaltılabilmektedir.
2. Çalışma, kalça protez eklemlerinin performansını artırmak için UYMAPE üzerinde kare, dikdörtgen çıkıntılı veya girintili desen yapıları, pramit veya eliptik gibi farklı geometriler oluşturularak malzeme yüzeylerinde desen formları oluşturmak, triboloji deneylerinde sürtünme katsayısı ve aşınma faktörü değerlerinin düşürülmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
3. Malzeme yüzeyine alüminyum folyo ile yapılan fiber lazer sonuçları olumsuz sonuçlanmıştır. Desenleme işlemini piko saniye lazer ile malzeme yüzeyine ekstra olarak alüminyum katmanlar dahil edilerek olumlu sonuçlar alınabilmektedir.
4. Malzemenin nano veya fiber işlemler için yanık etkisi oluşmaması ve UYMAPE malzemenin lazer dalga boylarına karşı büyük şeffaflığı nedeniyle, numuneler herhangi bir lazer işleminden önce karbon biyo uyumlu bir malzeme olması nedeni ile karbon kaplanma işlemine tabi tutulabilir ve daha sonra yüzeyin biyo uyumluluğu değişmeden kalmasını sağlamak için lazer işlemlerinden sonra, yapışmamış karbon tozunu çıkarmada numunelerin yüzeyi etanol içinde ultrasonik işleme temizleme yapılarak sorunlar giderilmelidir.
5. Çapraz bağlı ve vitamin E katkılı VE-ÇUYMAPE (GUR 1020 EXL) numunelerin aşınma dayanımı daha yüksek olmasından dolayı ileriki süreçlerde yapılması planlanan implant endüstrisindeki çalışmaların bu polietilen grubu üzerinde sürtünme ve aşınma azaltıcı etkilerin oluşturulması önemli bir hedef noktası olarak görülmektedir.
6. Lazer sisteminin kazandırdığı avantajlar göz önüne alındığında pikosaniye lazer kullanımı ile maliyeti az çalışmaların yapılması düşünülmektedir.

7. Deneysel sisteminin tasarımında yapılacak yenilikler olarak CoCrMo aşındırıcı plaka kullanılarak polietilen üzerinde yeni nesil çalışmalar gerçek değerlere yakın sonuçların ve uygun mikro-çukur tasarımı ile ideal lazer desenleme işleme cihazı seçilmesi ile yeni nesil malzemelerde yüksek oranda olumlu sonuçların alınabileceği düşünülmektedir.
8. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, yüksek atım direnci, sünekliği ve fizyolojik sıvılarla temasta kararlılığı nedeniyle biyomedikal uygulamalar için kullanılan sentetik bir polimer ve bu malzeme kalça veya diz protezleri gibi insan ortopedik implantlar da önemli ölçüde kullanılmasından dolayı sağlık alanındaki çalışmalara özellikle yağlayıcılık çalışmalarına daha da fazlaca önem verilmelidir.

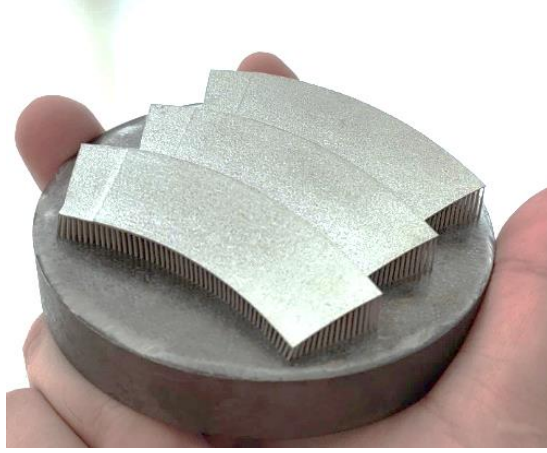
Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar;

- Tez çalışması kapsamında gerçek çalışmalara temel teşkil etmesi amacı ile; CoCrMo ve UYMAPE'nin birbirlerine karşı testlerinin yapılması hedeflenmiştir (Şekil 95). Bu çalışmanın devamlılığı ve 1450 °C civarı indüksiyon fırını veya o sıcaklıklarda ergimeyi sağlayan işlemler ile ilgili disk elemanının üretimi gerçekleştirilmesi düşünülmektedir.



Şekil 95. CoCrMo plaka döküm çalışması

KTÜ (Karadeniz Teknik Üniversitesi/Trabzon) bünyesinde bulunan 3 boyutlu yazıcı ile CoCrWMo numune (Şekil 96) üretimi kapsamında çalışmalar devam etmekte ve deneysel çalışmaların yapılması öngörülmektedir.



Şekil 96. 3 boyutlu yazıcı ile CoCrWMo plaka üretim çalışması

6. KAYNAKLAR

- Ahsan, Md. S., Dewanda, F., Lee, M. S., Sekita, H. ve Sumiyoshi, T., 2013. Formation of superhydrophobic soda-lime glass surface using femtosecond laser pulses, Applied Surface Science, 265, 784-789.
- Adatepe, H., Bıyıkhoğlu, A. ve Sofuoğlu, H., 2011. An experimental investigation on frictional behavior of statically loaded micro-grooved journal bearing, Tribology International, 44(12), 1942–1948.
- Aizawa, T., 2019. Pico- and Femtosecond Laser Micromachining for Surface Texturing, (T. I. E.-Z. S. E.-I. Stanimirović, Ed.; p. Ch. 2), IntechOpen.
- Alamri, S., Fraggelakis, F., Kunze, T., Krupop, B., Mincuzzi, G., Kling, R. ve Lasagni, A. F., 2019. On the Interplay of DLIP and LIPSS Upon Ultra-Short Laser Pulse Irradiation, In Materials, 12, 7.
- Allen, Q. ve Raeymaekers, B., 2021. Surface texturing of prosthetic hip implant bearing surfaces: a review, Journal of Tribology, 143, 4.
- Alvarez-Vera, M., Ortega, J. A., Ortega-Ramos, I. A., Hdz-García, H. M., Muñoz-Arroyo, R., Díaz-Guillén, J. C., Acevedo-Dávila, J. L. ve Hernández-Rodríguez, M. A. L., 2021. Tribological and microstructural characterization of laser microtextured CoCr alloy tested against UYMAPE for biomedical applications, Wear, 477, 203819.
- Arslan, A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Mufti, R. A., Mosarof, M. H., Khuong, L. S. ve Quazi, M. M., 2016. Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: a review, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 41, 6, 447–481.
- Arumugaprabu, V., Ko, T. J., Kumaran, T., Kurniawan, R. ve Uthayakumar, M., 2018. A brief review on importance of surface texturing in materials to improve the tribological performance, Reviews on Advanced Materials Science, 53, 1, 40–48.
- Aziz, R., Haq, M. I. U. ve Raina, A., 2020. Effect of surface texturing on friction behaviour of 3D printed polylactic acid (PLA), Polymer Testing, 85, 106434.
- Baena, J. C., Wu, J. ve Peng, Z., 2015. Wear Performance of UYMAPE and Reinforced UYMAPE Composites in Arthroplasty Applications: A Review, In Lubricants, 3, 2.
- Barber, H., Kelly, C. N., Abar, B., Allen, N., Adams, S. B. ve Gall, K., 2021. Rotational Wear and Friction of Ti-6Al-4V and CoCrMo against Polyethylene and Polycarbonate Urethane, Biotribology, 26, 100167.

- Barbour, P. S. M., Stone, M. H., ve Fisher, J., 1999. A study of the wear resistance of three types of clinically applied UYMAPE for total replacement hip prostheses, Biomaterials, 20, 22, 2101–2106.
- Baykal, D., Siskey, R. ve Kurtz, S. M., 2010. Tribological studies of highly crosslinked and vitamin-E Blended UYMAPE, In Presented at the 56th Annu Mtg Orthop Res Soc, 7–10, New Orleans.
- Belhamdi, H., Kouini, B., Grasso, A., Scolaro, C., Sili, A. ve Visco, A., 2022. Tribological behavior of biomedical grade UYMAPE with graphite-based fillers against EBM-Ti6Al4V pin under various lubricating conditions, Journal of Applied Polymer Science, 139, 23, 52313.
- Bergmann, G., Graichen, F., Rohlmann, A., Verdonschot, N. ve Van Lenthe, G. H., 2001. Frictional heating of total hip implants, Part 1: measurements in patients, Journal of Biomechanics, 34, 4, 421–428.
- Bezuidenhout, M. B., Dimitrov, D. M., van Staden, A. D., Oosthuizen, G. A. ve Dicks, L. M. T., 2015. Titanium-Based Hip Stems with Drug Delivery Functionality through Additive Manufacturing, BioMed Research International, 2015, 134093.
- Bhawe, A. K., Shah, K. M., Somani, S., Shenoy B, S., Bhat N, S., Zuber, M. ve Chethan, K. N., 2022. Static structural analysis of the effect of change in femoral head sizes used in Total Hip Arthroplasty using finite element method, Cogent Engineering, 9, 1, 2027080.
- Boampong, D., Green, S. ve Unsworth, A., 2003. N+ ion implantation of Ti6Al4V alloy and UYMAPE for total joint replacement application, Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics (JABB), 1, 164–167.
- Borjali, A., 2018. A Patterned Microtexture to Reduce Polyethylene Wear in Metal on Polyethylene Bearings, with Application in Prosthetic Hip Implants, The University of Utah.
- Boyer, P., Lazennec, Jean Yves, Poupon, J., Rousseau, M.-A., Ravaud, P. ve Catonné, Y., 2008. Clinical and biological assessment of cemented titanium femoral stems: An 11-year experience, International Orthopaedics, 33, 1209–1215.
- Bragdon, C. R., Jasty, M., Muratoglu, O. K., O'Connor, D. O. ve Harris, W. H., 2003. Third-body wear of highly cross-linked polyethylene in a hip simulator, The Journal of Arthroplasty, 18, 5, 553–561.
- Chun, D.-M., Ngo, C.-V. ve Lee, K.-M., 2016. Fast fabrication of superhydrophobic metallic surface using nanosecond laser texturing and low-temperature annealing, CIRP Annals, 65, 1, 519–522.
- Cohen, S. A., Cohen, L. E., Tijerina, J. D., Bouz, G., Lefebvre, R., Stevanovic, M. ve Heckmann, N. D., 2021. Google trends as a tool for evaluating public interest in total

- knee arthroplasty and total hip arthroplasty, Journal of Clinical and Translational Research, 7, 4, 456–466.
- Costil, S., Lamraoui, A., Langlade, C., Heintz, O. ve Oltra, R., 2014. Surface modifications induced by pulsed-laser texturing—Influence of laser impact on the surface properties, Applied Surface Science, 288, 542–549.
- Czerniec, M. ve Zubrzycki, J., 2021. Study of Contact Pressures in Total Hip Replacement, Advances in Science and Technology, Research Journal, 15, 2.
- Darji, B. S. E.-P. H., 2016. Biotribology of Artificial Hip Joints (p. Ch. 6), IntechOpen.
- Das, S. S. ve Chakraborti, P., 2018. Development of Biomaterial for Total Hip Joint Replacement, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 377, 12177.
- Dong, G.-N., Hua, M., Li, J. ve Chuah, K. B., 2007. Temperature field and wear prediction for UYMAPE acetabular cup with assumed rectangular surface texture, Materials and Design, 28, 9, 2402–2416.
- Dorner-Reisel, A., Engel, A., Schürer, C., Svoboda, S. ve Weißmantel, S., 2020. Tribological behaviour of femtosecond laser micro-patterned hydrogenated DLC in dry and hyaluronic gel lubricated conditions, Surface and Coatings Technology, 399, 126082.
- Dougherty, P. S. M., Srivastava, G., Onler, R., Ozdoganlar, O. B. ve Higgs, C. F., 2015. Lubrication Enhancement for UYMAPE Sliding Contacts through Surface Texturing, Tribology Transactions, 58, 1, 79–86.
- Ellinas, K., Dimitrakellis, P., Sarkiris, P. ve Gogolides, E., 2021. A review of fabrication methods, properties and applications of superhydrophobic metals, Processes, 9, 4, 666.
- Ensikat, H. J., Ditsche-Kuru, P., Neinhuis, C. ve Barthlott, W., 2011. Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf, Beilstein Journal of Nanotechnology, 2, 1, 152–161.
- Erayman, Y., ve Korkmaz, Y., 2017. Modification of superhydrophobic textile surfaces with sol-gel method by using nonfluorinated compounds, Tekstil ve Mühendis, 24, 41–52.
- Evans, J. T., Mouchti, S., Blom, A. W., Wilkinson, J. M., Whitehouse, M. R., Beswick, A. ve Judge, A., 2021. Obesity and revision surgery, mortality, and patient-reported outcomes after primary knee replacement surgery in the National Joint Registry: A UK cohort study, PLOS Medicine, 18, 7, 1003704.
- Farkas, J. P., Hoopman, J. E. ve Kenkel, J. M., 2013. Five parameters you must understand to master control of your laser/light-based devices, Aesthetic Surgery Journal, 33, 7, 1059–1064.

- Feng, B., Zhu, W., Bian, Y.-Y., Chang, X., Cheng, K.-Y. ve Weng, X.-S., 2021. China artificial joint annual data report, Chinese Medical Journal, 134, 6.
- Fernández-Pradas, J. M., Naranjo-León, S., Morenza, J. L. ve Serra, P., 2012. Surface modification of UYMAPE with infrared femtosecond laser, Applied Surface Science, 258, 23, 9256–9259.
- Furlan, V., Biondi, M., Demir, A. G., Pariani, G., Bianco, A. ve Previtali, B., 2016. Direct laser texturing using two-beam interference patterning on biodegradable magnesium alloy, International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 1, 182.
- Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S. M. ve Costa, H. L., 2017. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement, Wear, 372–373, 21–41.
- Gedvilas, M. ve Raciukaitis, G., 2005. Investigation of UV picosecond laser ablation of polymers, Workshop on Laser Applications in Europe, 61570T.
- Ghosh, S. ve Abanteriba, S., 2016. Status of surface modification techniques for artificial hip implants, Science and Technology of Advanced Materials, 17, 1, 715–735.
- Guarnaccio, A., Belviso, C., Montano, P., Toschi, F., Orlando, S., Ciaccio, G., Ferreri, S., Trevisan, D., Mollica, D., Parisi, G. P., Dolce, P., Bellucci, A., de Stefanis, A., Trucchi, D. M., Valentini, V., Santagata, A., Cavalcante, F., Lettino, A., Medici, L. ve Lambertini, V. G., 2021. Femtosecond laser surface texturing of polypropylene copolymer for automotive paint applications, Surface and Coatings Technology, 406, 126727.
- Gutmanas, E. ve Gotman, I., 2004. PIRAC Ti nitride coated Ti–6Al–4V head against UYMAPE acetabular cup–hip wear simulator study, 18th European Conference on Biomaterials, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 15.
- Gül F., Dilipak H. ve Ymanoğlu O., 2021. Kriyojenik işlem yapılmış soğuk iş takım çeliklerinin abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi ve istatistiksel analizi, Politeknik Dergisi, 24(3): 1129-1135.
- Harsha, A. P. ve Joyce, T. J., 2011. Challenges associated with using bovine serum in wear testing orthopaedic biopolymers, Journal of Engineering in Medicine, 225, 10, 948–958.
- Hauschwitz, P., Jochcová, D., Jagdheesh, R., Rostohar, D., Brajer, J., Kopeček, J., Cimrman, M., Smrž, M., Mocek, T. ve Lucianetti, A., 2021. Towards rapid large-scale LIPSS fabrication by 4-beam ps DLIP, Optics and Laser Technology, 133, 106532.
- He, Y., Fu, Y., Wang, H. ve Yang, J., 2022. Enhancing anti-stick-slip performance by laser surface texturing on sliding guideway surface. Journal of Manufacturing Processes, 75, 1089–1099.
- Hirwani, J. K., Nishimura, R., Shinmori, H., Morita, T., Sawae, Y. ve Sinha, S. K., 2022. Epoxy (SU-8) polymer composites with Ultra-high molecular weight polyethylene

- and Hyaluronic acid fillers for hip prosthetic implant application, Tribology International, 167, 107399.
- Holmberg, K. ve Erdemir, A., 2017. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, Friction, 5, 3, 263–284.
- Hsu, C.-J., Stratmann, A., Medina, S., Jacobs, G., Mücklich, F. ve Gachot, C., 2021. Does laser surface texturing really have a negative impact on the fatigue lifetime of mechanical components?, Friction, 9, 6, 1766–1775.
- Hussain, M., Sufyan, M., Abbas, N., Ahmad, H., Joyia, F. M., Noman, M., Ahsan, M. M., Raza, M. N., Razaq, A. ve Zulqernain, M., 2019. Influence of laser processing conditions for texturing on ultra-high-molecular-weight-polyethylene (UYMAPE) surface, Case Studies in Thermal Engineering, 14, 100491.
- Hussain, O., Saleem, S. S. ve Ahmad, B., 2020. Friction and wear performance evaluation of UHMWPE using Taguchi based grey approach: A study on the influence of load and bio-serum lubrication, Materials Chemistry and Physics, 239, 121918.
- Jackson, J., 2011. Father of the modern hip replacement: Professor Sir John Charnley (1911–82), Journal of Medical Biography, 19, 4, 151–156.
- Kaddick, C. ve Wimmer, M. A., 2001. Hip Simulator Wear Testing According to the Newly Introduced Standard ISO 14242, Journal of Engineering in Medicine, 215, 429–442.
- Kashyap, V. ve Ramkumar, P., 2021. Comparing Wettability and Frictional Performance of Laser Micro-machined Discrete and Continuous Textures, Recent Advances in Mechanical Engineering, 185–192.
- Kavimani, V., Soorya Prakash, K. ve Thankachan, T., 2017. Surface characterization and specific wear rate prediction of r-GO/AZ31 composite under dry sliding wear condition, Surfaces and Interfaces, 6, 143–153.
- Khan, S. A., Boltaev, G. S., Iqbal, M., Kim, V., Ganeev, R. A. ve Alnaser, A. S., 2021. Ultrafast fiber laser-induced fabrication of superhydrophobic and self-cleaning metal surfaces, Applied Surface Science, 542, 148560.
- Khanna, R., Ong, J. L., Oral, E. ve Narayan, R. J., 2017. Progress in Wear Resistant Materials for Total Hip Arthroplasty, In Coatings, 7, 7, 99.
- Knight, S. R., Aujla, R. ve Biswas, S. P., 2011. Total Hip Arthroplasty - over 100 years of operative history, Orthopedic Reviews, 3(2), e16.
- Kumar, V., Verma, R., Kango, S. ve Sharma, V. S., 2021. Recent progresses and applications in laser-based surface texturing systems, Materials Today Communications, 26, 101736.
- Kurtz, S. M., 2004. The UYMAPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement, Elsevier, London.

- Law, K.-Y., 2014. Definitions for Hydrophilicity, Hydrophobicity, and Superhydrophobicity: Getting the Basics Right, The Journal of Physical Chemistry Letters, 5, 4, 686–688.
- Leksycki, K., Feldshtein, E., Maruda, R. W., Khanna, N., Królczyk, G. M. ve Pruncu, C. I., 2022. An insight into the effect surface morphology, processing, and lubricating conditions on tribological properties of Ti6Al4V and UYMAPE pairs, Tribology International, 170, 107504.
- Liu, F., Jin, Z., Grigoris, P., Hirt, F. ve Rieker, C., 2003. Contact mechanics of metal-on-metal hip implants employing a metallic cup with a UYMAPE backing, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine, 217, 207–213.
- Long, J., Fan, P., Gong, D., Jiang, D., Zhang, H., Li, L. ve Zhong, M., 2015. Superhydrophobic Surfaces Fabricated by Femtosecond Laser with Tunable Water Adhesion: From Lotus Leaf to Rose Petal, ACS Applied Materials and Interfaces, 7, 18, 9858–9865.
- Lorusso, A., Nassisi, V., Paladini, F., Torrisi, L., Visco, A. M. ve Campo, N., 2008. Comparison of the laser effects induced on ultra-high-molecular-weight polyethylene, Radiation Effects and Defects in Solids, 163, 4–6, 435–440.
- Lu, P. ve Wood, R. J. K., 2020. Tribological performance of surface texturing in mechanical applications—a review, Surface Topography: Metrology and Properties, 8, 4, 43001.
- Lu, Z. ve McKellop, H., 1997. Frictional heating of bearing materials tested in a hip joint wear simulator, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 211, 1, 101–108.
- Lutey, A. H. A. ve Moroni, F., 2020. Pulsed laser texturing for improved adhesive-bonded polyethylene (PE) joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 102, 102676.
- Mahmud, A., Huynh, T., Zhou, L., Hyer, H., Mehta, A., Imholte, D. D., Woolstenhulme, N. E., Wachs, D. M. ve Sohn, Y., 2021. Mechanical Behavior Assessment of Ti-6Al-4V ELI Alloy Produced by Laser Powder Bed Fusion, In Metals, 11, 11, 1671.
- Mandal, V., Sharma, S., Singh, S. S. ve Ramkumar, J., 2022. Laser Surface Texturing in Powder Bed Fusion: Numerical Simulation and Experimental Characterization, Metals and Materials International, 28, 1, 181–196.
- Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y. ve Menezes, P. L., 2020. Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review, Journal of Manufacturing Processes, 53, 153–173.
- Merola, M. Ve Affatato, S., 2019. Materials for Hip Prostheses: A Review of Wear and Loading Considerations, In Materials, 12, 3, 495.

- Muratoğlu, O. K., Bragdon, C. R., O'Connor, D. O., Jasty, M., Harris, W. H., Gul, R. ve McGarry, F., 1999. Unified wear model for highly crosslinked ultra-high molecular weight polyethylenes (UYMAPE), Biomaterials, 20, 16, 1463–1470.
- Nagpal, J., Rana, R., Lal, R., Singari, R. M. ve Kumar, H., 2022. A brief review on various effects of surface texturing using lasers on the tool inserts, Materials Today: Proceedings, 56, 6, 3803-3812.
- Nayak, B. K., Caffrey, P. O., Speck, C. R. ve Gupta, M. C., 2013. Superhydrophobic surfaces by replication of micro/nano-structures fabricated by ultrafast-laser-microtexturing, Applied Surface Science, 266, 27–32.
- Nečas, D., Usami, H., Niimi, T., Sawae, Y., Křupka, I. ve Hartl, M., 2020. Running-in friction of hip joint replacements can be significantly reduced: The effect of surface-textured acetabular cup, Friction, 8, 6, 1137–1152.
- Neinhuis, C. ve Barthlott, W., 1997. Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces, Annals of Botany, 79, 6, 667-677.
- Nishimura, I., Yuhta, T., Ikubo, K., Shimooka, T., Murabayashi, S. ve Mitamura, Y., 1993. Modification of the frictional surfaces of artificial joints, ASAIO Journal, 39, 3, M762-6.
- Paital, S. ve Dahotre, N., 2008. Review of laser based biomimetic and bioactive Ca-P coatings, Materials Science and Technology, 24, 1144–1161.
- Paital, S. R. ve Dahotre, N. B., 2009. Calcium phosphate coatings for bio-implant applications: Materials, performance factors, and methodologies, Materials Science and Engineering, 66, 1, 1–70.
- Patel, D. S., Singh, A., Balani, K. ve Ramkumar, J., 2018. Topographical effects of laser surface texturing on various time-dependent wetting regimes in Ti6Al4V, Surface and Coatings Technology, 349, 816–829.
- Patil, N. A., Njuguna, J. ve Kandasubramanian, B., 2020. UYMAPE for biomedical applications: Performance and functionalization, European Polymer Journal, 125, 109529.
- Qin, L., Lin, P., Zhang, Y., Dong, G. ve Zeng, Q., 2013. Influence of surface wettability on the tribological properties of laser textured Co–Cr–Mo alloy in aqueous bovine serum albumin solution, Applied Surface Science, 268, 79–86.
- Qiu, M., Minson, B. R. ve Raeymaekers, B., 2013. The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings, Tribology International, 67, 278–288.
- Quinn, J., McFadden, R., Chan, C.-W. ve Carson, L., 2020. Titanium for Orthopedic Applications: An Overview of Surface Modification to Improve Biocompatibility and Prevent Bacterial Biofilm Formation, IScience, 23, 11, 101745.

- Raciukaitis, G. ve Gedvilas, M., 2005. Processing of polymers by UV picosecond lasers, Congress Proceedings, 191–199.
- Rafieezad, M., Jaffer, J. A., Cui, C., Duan, X. ve Nasiri, A., 2018. Nanosecond Laser Fabrication of Hydrophobic Stainless Steel Surfaces: The Impact on Microstructure and Corrosion Resistance, *In Materials*, 11, 9, 1577.
- Refugio, C., Elsa, M., Bulado, I. ve Lazalita, E., 2018. TEACHING ONE-WAY ANALYSIS OF VARIANCE (ANOVA) THROUGH MINITAB.
- Riveiro, A., Soto, R., Del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., Quintero, F., Lusquiños, F. ve Pou, J., 2014. Laser surface modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UYMAPE) for biomedical applications, *Applied Surface Science*, 302, 236–242.
- Riveiro, A., Maçon, A. L. B., del Val, J., Comesaña, R. ve Pou, J., 2018. Laser surface texturing of polymers for biomedical applications, *Frontiers in Physics*, 6, 16.
- Romano, J.-M., Gulcur, M., Garcia-Giron, A., Martinez-Solanas, E., Whiteside, B. R. ve Dimov, S. S., 2019. Mechanical durability of hydrophobic surfaces fabricated by injection moulding of laser-induced textures, *Applied Surface Science*, 476, 850–860.
- Rosenkranz, A., Costa, H. L., Profito, F., Gachot, C., Medina, S. ve Dini, D., 2019. Influence of surface texturing on hydrodynamic friction in plane converging bearings-An experimental and numerical approach, *Tribology International*, 134, 190–204.
- Rosenkranz, A., Costa, H. L., Baykara, M. Z. ve Martini, A., 2021. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear—a review, *Tribology International*, 155, 106792.
- Roy, T., Choudhury, D., Ghosh, S., bin Mamat, A. ve Pinguan-Murphy, B., 2015. Improved friction and wear performance of micro dimpled ceramic-on-ceramic interface for hip joint arthroplasty, *Ceramics International*, 41, 1, 681–690.
- Sağbaşı, B., 2013. Kalça protezlerinde sürtünmeye bağlı olarak değişim gösteren fiziksel büyüklüklerin ve geometrik özelliklerin ölçüm, analiz ve metrolojik değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sağbaşı, B. ve Durakbaşı, M. N., 2013a. Effect of surface patterning on frictional heating of vitamin E blended UYMAPE, *Wear*, 303, 1, 313–320.
- Sağbaşı, B. ve Durakbaşı, N., 2013b. Evaluating Frictional Temperature Rise in Sliding Surface of Artificial Hip Joint Materials with Different Loading Conditions, *Acta Physica Polonica A*, 123, 453–455.

- Sağbaşı, B. ve Durakbaşı, M. N., 2014. Measurement and theoretical determination of frictional temperature rise between sliding surfaces of artificial hip joints, Measurement, 51, 411–419.
- Saikko, V., 2003. Effect of Lubricant Protein Concentration on the Wear of UltraHigh Molecular Weight Polyethylene Sliding Against a CoCr Counterface, Journal of Tribology-Transactions of The Asme, 125, 3, 638-642.
- Sakoda, H., Nono, D., Kuramoto, K., Suzuki, M., Moriya, H. ve Tomita, N., 2006. Superior wear resistance of vitamin E added UYMAPE tested on knee joint simulator, 52nd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, 19–22.
- Salis, Z., Sainsbury, A., I. Keen, H., Gallego, B. ve Jin, X., 2022. Weight loss is associated with reduced risk of knee and hip replacement: a survival analysis using Osteoarthritis Initiative data, International Journal of Obesity, 46, 874–884.
- Sandeep Kumar, Y., Rajeswara Rao, K. V. S. ve Sunil R., Y., 2020. Investigation of Wear Behavior of Biopolymers for Total Knee Replacements Through Invitro Experimentation, International Journal of Engineering, 33, 8, 1560–1566.
- Sarbada, S. ve Shin, Y. C., 2017. Superhydrophobic contoured surfaces created on metal and polymer using a femtosecond laser, Applied Surface Science, 405, 465–475.
- Sato, T., Nakashima, Y., Akiyama, M., Yamamoto, T., Mawatari, T., Itokawa, T., Ohishi, M., Motomura, G., Hirata, M. ve Iwamoto, Y., 2012. Wear resistant performance of highly cross-linked and annealed ultra-high molecular weight polyethylene against ceramic heads in total hip arthroplasty, Journal of Orthopaedic Research, 30, 12, 2031–2037.
- Schwartzmann, C., Boschini, L., Zilles Gonçalves, R., Yépez, A. ve Spinelli, L. de F., 2012. New bearing surfaces in total hip replacement, Revista Brasileira de Ortopedia, 47, 154–159.
- Sedlaček, M., Podgornik, B., Ramalho, A. ve Česnik, D., 2017. Influence of geometry and the sequence of surface texturing process on tribological properties, Tribology International, 115, 268–273.
- Shen, G., Zhang, J., Kang, C. ve Fang, F., 2021. Study on surface texture patterns for improving tribological performance of bioimplants, Surface and Coatings Technology, 422, 127567.
- Shivakoti, I., Kibria, G., Cep, R., Pradhan, B. B. ve Sharma, A., 2021. Laser surface texturing for biomedical applications: A Review, Coatings, 11, 2, 124.
- Shum, P. W., Zhou, Z. F. ve Li, K. Y., 2013. To increase the hydrophobicity and wear resistance of diamond-like carbon coatings by surface texturing using laser ablation process, Thin Solid Films, 544, 472–476.

- Siddiqi, A., Levine, B. R. ve Springer, B. D., 2022. Highlights of the 2021 American Joint Replacement Registry Annual Report, Arthroplasty Today, 13, 205–207.
- Singh, D. ve Verma, R., 2021. A critical review on ultra high molecular weight polyethylene (UYMAPE) for prosthesis and implant functions, E3S Web of Conferences, 309, 1018.
- Ta, V. D., Dunn, A., Wasley, T. J., Li, J., Kay, R. W., Stringer, J., Smith, P. J., Esenturk, E., Connaughton, C. ve Shephard, J. D., 2016. Laser textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition, Applied Surface Science, 365, 153–159.
- Tan, M., Liza, S., Mohd Zulkifli, N. W. ve Masjuki, H. H., 2018. Fabrication and wear characterization of dimple textured on the surface of UYMAPE, Proceedings of Asia International Conference on Tribology, 482-483.
- Telecka, A., Li, T., Ndoni, S. ve Taboryski, R., 2018. Nanotextured Si surfaces derived from block-copolymer self-assembly with superhydrophobic, superhydrophilic, or superamphiphobic properties, RSC Advances, 8, 4204–4213.
- Teleginski, V., Chagas, D. C., Costa de Oliveira, A. C., Santos, J. C. G., Azevedo, J. F., Riva, R. ve de Vasconcelos, G., 2014. Yb: fiber laser surface texturing of stainless steel substrate, with MCrAlY deposition and CO₂ laser treatment, Surface and Coatings Technology, 260, 251–259.
- Tipper, J. L., Firkins, P. J., Ingham, E., Fisher, J., Stone, M. H. ve Farrar, R., 1999. Quantitative analysis of the wear and wear debris from low and high carbon content cobalt chrome alloys used in metal on metal total hip replacements, Journal of Materials Science. Materials in Medicine, 10, 6, 353–362.
- Torrise, L., Visco, A., Campo, N. ve Caridi, F., 2010. Pulsed laser treatments of polyethylene films, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions With Materials and Atoms, 268, 3117–3121.
- Ünal, H. ve Mimaroglu, A., 2015. Tribological Performance of Medical Grade UYMAPE Polymer at Egg Albumen Lubricated Condition, Manufacturing Science and Technology, 3, 106–110.
- Velardi, L., Lorusso, A., Paladini, F., Siciliano, M. v, di Giulio, M., Rainò, A. ve Nassisi, V., 2010. Modification of polymer characteristics by laser and ion beam, Radiation Effects and Defects in Solids, 165, 6–10, 637–642.
- Viskup, A. H. H. E.-R., 2016. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution (p. Ch. 12), IntechOpen.
- Vorobyev, A. Y. ve Guo, C., 2015. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses, In Journal of Applied Physics, 117, 33103.

- Wahab, J. A., Ghazali, M. J., Yusoff, W. M. W. ve Sajuri, Z., 2016. Enhancing material performance through laser surface texturing: A review, Transactions of the IMF, 94, 4, 193–198.
- Wang, A. ve Essner, A., 2001. Three-body wear of UYMAPE acetabular cups by PMMA particles against CoCr, alumina and zirconia heads in a hip joint simulator, Wear, 250, 212–216.
- Wang, M., 2020. The tribological performance of engineered micro-surface topography by picosecond laser on PEEK, Industrial Lubrication and Tribology, 72, 1, 172–179.
- Wang, Q., Wang, H., Zhu, Z., Xiang, N., Wang, Z. ve Sun, G., 2021. Switchable wettability control of titanium via facile nanosecond laser-based surface texturing, Surfaces and Interfaces, 24, 101122.
- Wang, S. B., Ni, Z. F. ve Ge, S. R., 2010. Tribological Behavior of Irritation Cross-Linked UYMAPE under Dry Sliding, Advanced Materials Research, 97–101, 605–609.
- Wang, X., Zheng, H., Wan, Y., Feng, W. ve Lam, Y. C., 2018. Picosecond laser surface texturing of a stainless steel substrate for wettability control, Engineering, 4, 6, 816–821.
- Wilches, L. v, Uribe, J. A. ve Toro, A., 2008. Wear of materials used for artificial joints in total hip replacements, Wear, 265, 1, 143–149.
- Wojciechowski, Ł., Kubiak, K. ve Mathia, T., 2017. Impact of morphological furrows as lubricant reservoir on creation of oleophilic and oleophobic behaviour of metallic surfaces in scuffing, Tribology International, 116, 320-328.
- Wonerow, T., Uhler, M., Nuppenau, J., Kretzer, J. P. ve Mantwill, F., 2021. Rheologic Behavior of Bovine Calf Serum, In Materials, 14, 10, 2538.
- Xia, Z., Xiao, Y., Yang, Z., Li, L., Wang, S., Liu, X. ve Tian, Y., 2019. Droplet Impact on the Super-Hydrophobic Surface with Micro-Pillar Arrays Fabricated by Hybrid Laser Ablation and Silanization Process, In Materials, 12, 5, 765.
- Yang, Z., Tian, Y., Zhao, Y. ve Yang, C., 2019. Study on the Fabrication of Super-Hydrophobic Surface on Inconel Alloy via Nanosecond Laser Ablation, Materials 12, 2, 278.
- Yao, J. Q., Laurent, M. P., Johnson, T. S., Blanchard, C. R. ve Crowninshield, R. D., 2003. The influences of lubricant and material on polymer/CoCr sliding friction, Wear, 255, 1, 780–784.
- Yılbaş, B. S., Khaled, M., Abu-Dheir, N., Al-Aqeeli, N., Said, S. A. M., Ahmed, A. O. M., Varanasi, K. K. ve Toumi, Y. K., 2014. Wetting and other physical characteristics of polycarbonate surface textured using laser ablation, Applied Surface Science, 320, 21–29.

- Yılbaş, B. S. ve Ali, H., 2016. Laser texturing of Hastelloy C276 alloy surface for improved hydrophobicity and friction coefficient, Optics and Lasers in Engineering, 78, 140–147.
- Yoon, Y., Kim, D. ve Lee, J.-B., 2014. Hierarchical micro/nano structures for super-hydrophobic surfaces and super-lyophobic surface against liquid metal, Micro and Nano Systems Letters, 2, 1, 3.
- Young, S. K., Lotito, M. A. ve Keller, T. S., 1998. Friction reduction in total joint arthroplasty, 42nd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, Atlanta, GA, Wear, 222, 1, 29–37.
- Yuan, S., Lin, N., Wang, W., Zhang, H., Liu, Z., Yu, Y., Zeng, Q. ve Wu, Y., 2022. Correlation between surface textural parameter and tribological behaviour of four metal materials with laser surface texturing (LST), Applied Surface Science, 152410.
- Zhang, B., Huang, W., Wang, J. ve Wang, X., 2013. Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UYMAPE, Tribology International, 65, 138–145.
- Zhang, H., Hua, M., Dong, G., Zhang, D. ve Chin, K.-S., 2016. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing, Tribology International, 93, 583–592.
- Zhang, Y. L., Zhang, X. G. ve Matsoukas, G., 2015. Numerical study of surface texturing for improving tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene, Biosurface and Biotribology, 1, 4, 270–277.
- URL-1, <https://bit.ly/3MgYmFf> Key Parameters of a Laser System. 3 Mart 2022.
- URL-2, <https://lightcon.com/product/carbide-femtosecond-lasers/> CARBIDE Lasers. 26 Ağustos 2021.
- URL-3, <http://physics.bu.edu/femtospec/> Ultra-Fast Laser Spectroscopy. 12 Aralık 2021.
- URL-4, <https://www.lightmotif.nl/texturing> LASER MICRO-TEXTURING. 15 Kasım 2019.
- URL-5, <https://124.im/bYcs> CO2 Lazer Kesim, 30 Temmuz 2020.
- URL-6, <https://bit.ly/3H3jeiz> Excimer Lazer. 9 Şubat 2021
- URL-7, Laser Texturing, Ablation, & 3D Laser Texturing | St. Paul Engraving (stpaulengraving.com) Laser Texturing. 14 Ekim 2019.
- URL-8, <https://www.fiberlazerkesim.net/tr/fiber-lazer-kesim-calisma-prensibi/> FİBER LAZER KESİM ÇALIŞMA PRENSİBİ. 7 Mart 2021.
- URL-9, <https://ww0077.rochester.edu/newscenter/superhydrophobic-metals-85592/> Laser-generated surface structures create extremely water-repellent metals. 15 Mayıs 2019.

- URL-10, <https://www.microrelleus.com/> Microrelleus. 27 Haziran 2020.
- URL-11, <https://www.ossila.com/pages/contact-angle-theory-measurement> Contact Angle: A Guide to Theory and Measurement. 2 Şubat 2022.
- URL-12, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/surten.html> Cohesion and Surface Tension. 14 Mart 2022.
- URL-13, <https://buxtonosteopathy.co.uk/blog/hip-replacements-brief-history/> Hip Replacements: A Brief History. 5 Haziran 2022.
- URL-14, <https://bit.ly/3xbNHWS> Yeditepe Üniversitesi Hastanesi. 7 Nisan 2022.
- URL-15, <https://regenio.com/total-joint-replacement-procedure-prevention-recovery-cost/> TOTAL HIP REPLACEMENT. 24 Ocak 2021.
- URL-16, <https://www.medacta.com/EN/hip-replacement> HIP REPLACEMENT. 16 Ocak 2022.
- URL-17, <https://www.ojrca.com/2021/06/the-facts-about-hip-replacement-cost/> The Facts About Hip Replacement Cost. 6 Haziran 2022.
- URL-18, Surface Texturing for Friction Control (energy.gov) Surface Texturing for Friction Control. 26 Kasım 2021.
- URL-19, <https://kuytam.ku.edu.tr/infrastructure-and-services/infrastructure/> Infrastructure. 15 Ekim 2021.
- URL-20, <https://www.orthoplastics.com/products> Product List. 8 Mayıs 2021.
- URL-21, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9365> Grade 23 Ti 6Al 4V ELI Alloy (UNS R56401). 2 Mayıs 2022.
- URL-22, Titanium Ti-6Al-4V ELI (Grade 23), Annealed (matweb.com) Titanium Ti-6Al-4V ELI (Grade 23), Annealed. 25 Şubat 2022.
- URL-23, [Arcam-Ti6Al4V-ELI-Titanium-Alloy.pdf](#) (cbmwales.co.uk) Ti6Al4V ELI Titanium Alloy. 18 Şubat 2022.
- URL-24, <https://124.im/vycU> Hip simulator test ISO 14242-1. 5 Mayıs 2022.
- URL-25, <https://bit.ly/3xk3yUx> ISO STANDARD ISO 14242-1:2002. 16 Şubat 2022.
- URL-26, <https://istatistikhocam.com/anova-testi-nedir-ve-nasil-yapilir/> Varyans Analizi / ANOVA Testi. 2 Haziran 2022.
- URL-27, <https://tezverianaliz.com/biyostatistik-dershanesi/excelde-t-testi-nasil-yapilir/> Excel'de T-testi Nasıl Yapılır. 3 Haziran 2022.

ÖZGEÇMİŞ

Tufan ÇAVRAR Lise öğrenimini yine Trabzon'da Cumhuriyet Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Tufan ÇAVRAR aynı zamanda Erasmus AB+ öğrenci değişim programı kapsamında 6 ay Çek Cumhuriyeti Liberec Teknik Üniversitesi (Technical University of Liberec)'nde yüksek lisans eğitimi almış ve iyi derecede İngilizce ve başlangıç seviyesinde Çekçe ve Almanca bilmektedir.