KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KALIP YÜZEY DOKUSUNUN SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİSİ

ÖMER EMRE UÇAKKUŞ

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KALIP YÜZEY DOKUSUNUN SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİSİ

ÖMER EMRE UÇAKKUŞ

Prof. Dr. Adalet ZEREN		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI		
Jüri Üyesi,	**Düzce Üniversitesi**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ARMAĞAN		
Jüri Üyesi,	**İstanbul Medeniyet Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 27.06.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Ulus Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından 2021-02 no'lu proje ve Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Birimi FDK-2022-3002 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ömer Emre Uçakkuş

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
☒ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
☐ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Ömer Emre Uçakkuş

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Teknoloji gelişimi ile ihtiyaçların evrilmesi, buna paralel olarak enerji tüketiminin artmasından ve enerji kaynaklarının giderek azalmasından dolayı yeni kaynak arayışlarının yanı sıra mevcut sistemlerin de verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir. Mevcut sistemlerde verimi düşüren en büyük etkenlerden biri ise karşılıklı hareket eden sistemlerde parçalar arasında meydana gelen sürtünmedir. Sac metal şekillendirme proseslerinde nihai parçayı elde etmek için sürtünme gerekli olan bir parametredir; ancak sürtünmeye bağlı aşınmanın olumsuz etkilerini azaltmak, şekillendirme için gerekli olan enerjiyi azaltmak ve parça kalitesini arttırmak için sürtünmenin olabildiğince kontrol altına alınması gerekmektedir. Sürtünme ise birden fazla yöntemle (yeni nesil malzeme, yüzey kaplama, yağlama, yüzey dokusu oluşturma vb.) kontrol altına alınabilir. Yapılan literatür araştırmalarında, sac metal şekillendirme kalıplarında sürtünmeyi azaltmak için genellikle kalıplar için ısıl işlem ve kaplama; şekillendirme sürecinde ise yağlama ve proses parametre optimizasyonu konuları üzerine çalışmalar görülmüştür. Çalışmamız ise son zamanlarda dikkatleri üzerine çeken, sürtünmeyi kontrol edebilecek inovatif bir yaklaşım olan kalıp yüzey dokusu oluşturma uygulamaları üzerinedir. Yüzey dokusu kuru ve sıvı sürtünme durumlarında gerçek temas alanının azalmasını sağlayarak sürtünmeyi ve sürtünmeye bağlı aşınma etkilerini azaltmaktadır. Dokular hem yüzeyden kopan mikro-parçaları tutarak tuzak görevi görür hem de yağ rezervi gibi davranarak şekillendirme esnasında arayüzeye yağ besleyerek ek yağlama etkisi oluşturur. Yüzey dokusu oluşturma hemen hemen bütün endüstriyel uygulamaların tribolojik performansına olan katkılarından dolayı her geçen gün dikkatleri üzerine çekerek tribolojik sistemlerde tercih edilen bir uygulama haline gelmiştir.

Çalışmada, sac şekillendirme proseslerinden özellikle hafifleştirme kapsamında yeni nesil malzemelerin kullanılmaya başlanmasıyla aşırı yüklenmelerin meydana geldiği derin çekme prosesine odaklanılmıştır. Literatür araştırmalarında, derin çekme prosesinde sac metal ve kalıp arasında meydana gelen etkileşimi özellikle doku oluşturarak birebir inceleyen çalışmaların yok denecek kadar az olması, temel odak noktasını oluşturmuştur. Öncelikle tribo çiftler arasındaki etkileşimi simüle edebilecek test cihazı tasarımına ve sonrasında doku oluşturma süreçlerine odaklanılmıştır. Tasarlanıp devreye alınan tasarım tescili ve faydalı model tescili alınan test cihazı, üretim şartlarında zımbanın sac metale baskısının başlamasıyla sac metal ve dişi kalıp/pot çemberi yüzeyleri arasında meydana gelen tribolojik etkileşim simüle edebilmektedir. Doku oluşturmanın tribolojik performansa etkisini incelemek için bilyalı dövme, lazer işleme ve kimyasal aşındırma yöntemleri ile farklı geometri ve ölçülerde dokular oluşturulmuştur. Dokular yüzeylerden belirlenen grupların kardeşlerine (ikizlerine) fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile derin çekme kalıplarında yaygın olarak kullanılan geleneksel ve yeni nesil kaplama türleri uygulanmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız düz yüzeye sahip kalıp parçasının kuru ve sıvı sürtünme şartlarında test cihazı ile yapılan testlerinden elde edilen sonuçları referans değer olarak alınmıştır. Dokulu numunelerin test sonuçları ise düz yüzey test sonuçları ile karşılaştırılarak sürtünme durumunun gelişimi incelenmiştir. Kaplamasız ve üç farklı tipteki kaplamalı yüzeylerdeki kuru sürtünme durumunda temas alanının azalması ve dokuların aşınan parçaları tutması durumları; sıvı sürtünme durumunda ise kuru sürtünme durumuna ek olarak dokuların yağ rezervi görevi görmesi durumları incelenerek sürtünme katsayısına etkileri tartışılmıştır. Kupon kalıp numuneleri üzerinden elde edilen

sonuçlara göre en ideal doku geometrisi ve ölçüsü derin çekme kalıbına uygulanarak kuru ve sıvı sürtünme durumunda üretilen parçaların geometrileri ve şekillendirme esnasında presin tükettiği enerji miktarları karşılaştırılmıştır.

Yazar, doktora sürecinin ilk gününden tez savunmaya kadar olan bütün süreçte değerli tecrübelerinin paylaşımından ve teknik/manevi desteklerinden dolayı tez danışmanı Prof. Dr. Adalet ZEREN Hanım'a; tribolojik test cihazı tasarımı, doku araştırma ve numune üretimi süreçlerinde değerli fikirleri ile mentörleri Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK Bey'e ve Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK Bey'e; tez izleme sürecinde tecrübesiyle sürecin gelişimine katkıda bulunan Prof. Dr. Fehmi Erzincanlı Bey'e sonsuz teşekkürlerini sunar.

Yazar, parça tasarımı, kalıp tasarımı ve simülasyon çalışmalarında birlikte çalıştıkları Yavuz GÖKKUŞ Bey'e ve Yasin DOĞAN Bey'e; test çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Araştırma Görevlisi Pelin Özzaim Hanım'a, Doç. Dr. Sinan Fidan Bey'e, Makine Yüksek Mühendisi Caner YALÇIN Bey'e, Makine Yüksek Mühendisi Rabia EDİS Hanım'a ve Makine Yüksek Mühendisi Reyhan CEYLAN Hanım'a; doktora tezi projesi kapsamında fikrin oluşmasından projelendirilmesine kadar bütün süreçte Ar-Ge Merkezini sürekli destekleyen Ulus Metal Sanayi ve Tic. A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Ragıp TUNALILAR Bey'e ve ailesine, Genel Müdürü Ahmet Turan GÜVEN Bey'e, Üretim Direktörü Yiğit YURDAKUL Bey'e ve kendisinin nezdinde bütün çalışanlara sonsuz teşekkürlerini sunar.

Yazar, projeye maddi katkılarından dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine; simülasyon çalışmaları için Netform Mühendislik firmasından Mert AYGEN Bey'e; yüzey dokusu oluşturma süreçlerinde IPG firmasından Hakan Demir Bey'e, DKET firmasından Kaan GEDİK Bey'e, Lazermark firmasından Mert BARAN ve Barış KAN Bey'e, Voestalpine firmasından Muhammed ŞEN Bey'e ve Rözmaş Çelik (PHI Metal) firmasından İlker DEMİR Bey'e, Osman ÖZCAN Bey'e, Yunus BAYRAKCI Bey'e ve Cihan GÜRBÜZ Bey'e; kaplama süreçlerinde KAPCO firmasından Mehmet Fatih ERİŞ Bey'e, Titanit firmasından Cihan ERDEM Bey'e ve Voestalpine firmasından Muhammet ŞEN Bey'e teşekkürlerini sunar.

Yazar, yüksek lisans ve doktora sürecinde kendilerine ayırması gereken vakitlerde bile çalışmalarına ayırmasını anlayışla karşılayan sürekli destek olan değerli eşi Deniz Hanım'a ve çocukları Deniz Emre'ye ve Ömer Ege'ye; ayrıca hayatının her döneminde destekçisi olan, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanında olan, cesaretlendiren ve bu günlere getiren annesi ve babasına sonsuz teşekkürlerini sunar.

Haziran – 2024 Ömer Emre UÇAKKUŞ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ÖZET xii
ABSTRACT xiii
1. GİRİŞ 1
2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME 4
2.1. Derin Çekme 5
2.2. Derin Çekme Prosesi Tribolojisi 7
2.2.1. Sürtünme 8
2.2.2. Aşınma 10
2.2.3. Yağlama 11
2.3. Derin Çekme Prosesini Etkileyen Parametreler 12
2.4. Derin Çekme Prosesinde Meydana Gelen Kusurlar 12
3. KALIP YÜZEY DOKUSU 15
3.1. Kalıp Yüzey Dokusu Oluşturma Yöntemleri 17
3.1.1. Aşındırıcı Jet Mikro-İşleme (AJM) 18
3.1.2. Kumlama ve Bilyalı Dövme ile Yüzey Dokusu Oluşturma 18
3.1.3. Lazer İşleme ile Yüzey Dokusu Oluşturma (LST) 19
3.1.4. Mikroelektrik Deşarjlı İşleme ile Yüzey Dokusu Oluşturma 20
3.1.5. CNC Ultrasonik İşleme ile Yüzey Dokusu Oluşturma (USM) 21
3.1.6. Kimyasal Aşındırma Yöntemi ile Yüzey Dokusu Oluşturma 22
3.1.7. Elektrokimyasal İşleme Yöntemi Yüzey Dokusu Oluşturma 22
3.1.8. Odaklanmış İyon Işını ile Yüzey Dokusu Oluşturma (FIB) 23
3.1.9. Vibromekanik Yöntem ile Yüzey Dokusu Oluşturma (VMT) 23
3.1.10. Mikro Taşlama ile Yüzey Dokusu Oluşturma 24
3.2. Literatür Araştırması 24
4. MALZEME VE YÖNTEM 39
4.1. Malzeme ve Hazırlama Teknikleri 39
4.2. Numunelere Yüzey Dokusu Oluşturma 40
4.2.1. Bilyalı Dövme ile Oluşturulan Yüzey Dokuları 40
4.2.2. Kimyasal Aşındırma ile Oluşturulan Yüzey Dokuları 42
4.2.3. Lazer İşleme ile Oluşturulan Yüzey Dokuları 43
4.3. PVD Kaplama 45
4.4. Test Cihazı Tasarımı 45
4.5. Deney Numunesi Tasarımı 47
4.6. Testler 49
4.6.1. Pürüzlülük Ölçümleri 49
4.6.2. Sürtünme Testleri 49
4.6.3. Kontak Açısı Ölçümleri 53
4.6.4. Profilometre Ölçümleri 54
4.6.5. Kaplama Yapışma (Adhezyon) Ölçümü 54

5. TEST VE ANALİZ SONUÇLARI 56
5.1. Dokusuz Referans Numunelerin Test Sonuçları 56
5.2. Bilyalı Dövme ile Oluşturulan Dokulu Numunelerin Test Sonuçları 57
5.3. Kimyasal Aşındırma ile Oluşturulan Numunelerin Test Sonuçları.....68
5.3.1. Kimyasal Grup-1.....68
5.3.2. Kimyasal Grup-2.....74
5.4. Lazer İşleme ile Oluşturulan Numunelerin Test Sonuçları 76
5.5. Seri Üretimi Yapılacak Ticari Ürün Üretimi.....82
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 85
KAYNAKLAR.....92
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....97
ÖZGEÇMİŞ.....101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sac metal şekillendirme yöntemleri a) kesme, b) bükme c) derin çekme 4
Şekil 2.2. Derin çekme işlemleri a) saf çekme, b) ütüleme 5
Şekil 2.3. Derin çekmeye etki eden parametrelerin gösterimi a) iki farklı zımba pozisyonu, b) farklı bölgelerdeki stres ve uzama gösterimleri 6
Şekil 2.4. Sac metal şekillendirme işlemine etki eden faktörler 7
Şekil 2.5. Derin çekme işlemi tribolojik sistem bileşenleri 8
Şekil 2.6. Katı cisimler arası sürtünme mekanizmaları 9
Şekil 2.7. Stribeck eğrisi 9
Şekil 2.8. Aşınma türleri ve mekanizmaları 10
Şekil 2.9. Derin çekme işleminde önemli değişkenler 12
Şekil 2.10. Derin çekme prosesinde çeşitli hata modları 13
Şekil 3.1. Doku geometrileri ve parametreleri tanımı 16
Şekil 3.2. Yüzey dokusu oluşturma yöntemleri 17
Şekil 3.3. Aşındırıcı Jet Mikro-İşleme yöntemi 18
Şekil 3.4. Kumlama yöntemi 19
Şekil 3.5. Lazer yüzey dokusu yöntemi 20
Şekil 3.6. EDM yüzey dokusu yöntemi 21
Şekil 3.7. a) CNC ultrasonik b) döner CNC Ultrasonik işleme 21
Şekil 3.8. a) photolithography yöntemi b) aşındırma prosesi 22
Şekil 3.9. Maskeli ECM yöntemi 23
Şekil 3.10. VMT yöntemi 23
Şekil 3.11. a) 2000'den bugüne tribolojik yüzey dokusu üzerine yayınlanan makale sayısı b) farklı bölgelerin katkıları c) uygulama alanları 24
Şekil 3.12. Ilgın ve söğüt ağaçlarının yüzey morfolojileri: a) Ilgın ağacı, b) ılgın ağacının gövdesindeki oluklar c)çıkıntılar d) söğüt ağacı; e) gövdesi f) dal yüzeyi 27
Şekil 3.13. Ilgın ve söğüt ağaçları dal kabuklarının erezyon ağırlık kayıp oranları 28
Şekil 3.14. Ilgın ağacı biyonik modelleri a)düz b)kare c)V d)U e)dışbükey 28
Şekil 3.15. Biyonik modellerin aşınma oranları 29
Şekil 3.16. Dört farklı model görselleri 30
Şekil 3.17. Dokulu ve dokusuz yüzeylerin aşınma mekanizmaları 31
Şekil 3.18. a) farklı dokuların kontak arayüzleri, b) 5N COF sonuçları, c) 20N COF sonuçları 32
Şekil 3.19. a) yatay-H, b) dikey-V doku, c) COF sonuçları 34
Şekil 3.20. a) dikey lineer, b) yatay lineer, c) paralel mesh, d) yatay küre, e) 45° küre dokular 35
Şekil 3.21. Ortalama hacim kaybı ve sürtünme katsayısı grafikleri 36
Şekil 3.22. a) düz kalıp, b) üçgen dokulu kalıp 37
Şekil 3.23. a) test düzeneği, b) kayma süresine göre, c) kayma hızına göre, d) ortalama COF değerleri 38
Şekil 4.1. a) Bilyalı dövme prosesi metodu b) yüzey dokusu c) I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi d) II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi 40
Şekil 4.2. a) Örtücülük incelemesi b) almen testi 41

Şekil 4.3. Proses sonrası elek analiz sonuçları 42
Şekil 4.4. Dokuların stereo mikroskop görüntüleri a)dairesel, b)kare - DKET..... 42
Şekil 4.5. Dokuların stereo mikroskop görüntüleri a) paralel, b) dik – Voestalpine 43
Şekil 4.6. Lazer dokuların CAD modelleri..... 44
Şekil 4.7. a) Test cihazı görseli, b) test cihazı bileşenleri 46
Şekil 4.8. Derin çekme prosesinde baskı altındaki sacın a) pot plakası ile kalıp arasındaki hareketi b) pot plakası ile kalıp arasındaki hareketinin test cihazı üzerindeki simülasyonu..... 47
Şekil 4.9. Deney numunesi (ticari ürün) teknik özellikleri..... 47
Şekil 4.10. a)Autoform şekillendirme simülasyon sonucu, b) FLD diyagramı..... 48
Şekil 4.11. Test cihazı yeterlilik analizi a)10'lu test b)orta 4'lü test grubu 50
Şekil 4.12. Ortalama COF_k a) ana parametrelerin etkileri, b) parametre etkileşimleri 51
Şekil 4.13. a) kuru sürtünme, b) sıvı sürtünme durumu 52
Şekil 4.14. Sürtünme kuvveti yol grafiği..... 52
Şekil 4.15. a) Kontak açısı ölçüm cihazı b) numune üzerinde uygulama 53
Şekil 4.16. 3D Temassız profilometre 54
Şekil 4.17. Kaplama yapışma skalası 55
Şekil 5.1. Düz yüzey numuneler kuru ve sıvı sürtünme durumları a) sürtünme enerjisi, b) kinetik sürtünme katsayısı grafikleri 56
Şekil 5.2. Düz yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri..... 57
Şekil 5.3. SPSTI dokulu kaplamasız yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri 59
Şekil 5.4. SPSTI dokulu CT1 kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri..... 61
Şekil 5.5. SPSTII dokulu kaplamasız yüzey yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri 64
Şekil 5.6. SPSTII dokulu CT1 kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri..... 66
Şekil 5.7. Bilyalı dövme sürtünme test sonuçları a) kaplamasız, b) kaplamalı kuru sürtünme, c) kaplamasız, d) kaplamalı sıvı sürtünme 67
Şekil 5.8. Kimyasal dokulu grup-1 kaplamasız test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme 68
Şekil 5.9. Kuru sürtünme durumunda düz ve dokulu yüzeyler kuvvet yol grafiği..... 69
Şekil 5.10. Kimyasal dokulu grup-1 kaplamasız yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri 69
Şekil 5.11. Kimyasal dokulu grup-1 test öncesi ve sonrası dokulu numunelerin a)Ra, b)Rt, c)Rq, d)Rz, e)Rp sonuçları..... 71
Şekil 5.12. DKET-Dairesel dokular test öncesi ve sonrası yüzey durumları 73
Şekil 5.13. DKET-Kare dokular test öncesi ve sonrası yüzey durumları..... 73
Şekil 5.14. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamasız test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme 74
Şekil 5.15. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamasız yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri..... 75

Şekil 5.16. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamalı test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme 76
Şekil 5.17. Kimyasal dokulu grup-2 CV1 kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri..... 76
Şekil 5.18. Lazer işleme dokulu kaplamasız test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme 78
Şekil 5.19. LST dokulu kaplamasız kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri 79
Şekil 5.20. a)lineer dokulu dişi kalıp, b)doku CMM tarama sonucu, c)doku profilometre tarama sonuçları..... 83
Şekil 5.21. Enerji analizatörü pres panosuna bağlantısı 83
Şekil 5.22. Düz ve dokulu kalıplarda üretilen ürünlerin hidrolik pres güç zaman grafiği..... 84
Şekil 5.23. I.faz üretilen parçaların kesit görüntüleri 84

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Derin çekme prosesinde karşılaşılan kusurlar ve olası sebepleri 14
Tablo 3.1. Yüzey doku oluşturma yöntemlerinin karşılaştırılması 25
Tablo 3.2. Dokulu yüzeylerin fonksiyonları ve uygulama alanları 26
Tablo 4.1. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin kimyasal bileşenleri 39
Tablo 4.2. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin mekanik özellikleri 40
Tablo 4.3. Bilyalı dövme süreleri 41
Tablo 4.4. Kullanılan bilyaların özellikleri 41
Tablo 4.5. Kimyasal aşındırma ile açılan dokuların ölçüsel değerleri - DKET 42
Tablo 4.6. Kimyasal aşındırma ile açılan dokuların ölçüsel değerleri - Voestalpine 43
Tablo 4.7. Lazer işleme ile açılan dokuların ölçüsel değerleri 44
Tablo 4.8. PVD kaplama türlerinin katalog değerleri 45
Tablo 4.9. Deney numunesi teknik bilgileri ve teorik hesaplamaları 48
Tablo 5.1. Düz yüzey sürtünme test sonuçları 56
Tablo 5.2. I nolu proseste oluşturulan yüzey dokulu kaplamasız numunelerin test sonuçları 58
Tablo 5.3. I nolu proseste oluşturulan CT1(Moldex Extra) kaplamalı yüzey dokulu numunelerin sürtünme test sonuçları 60
Tablo 5.4. II nolu proseste oluşturulan kaplamasız dokuların sürtünme test sonuçları 63
Tablo 5.5. II nolu proseste oluşturulan CT1(Moldex Extra) kaplamalı dokuların sürtünme test sonuçları 63
Tablo 5.6. Numunelere ait kontak açısı, Almen yüksekliği ve test öncesi-sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları 67
Tablo 5.7. Kimyasal dokulu grup-1 numunelerin test sonuçları 68
Tablo 5.8. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamasız numunelerin test sonuçları 74
Tablo 5.9. Kimyasal dokulu grup-2 CV1 kaplamalı numunelerin test sonuçları 75
Tablo 5.10. Lazer işleme dokulu kaplamasız numunelerin test sonuçları 77
Tablo 5.11. Lazer işleme dokulu kaplamalı numunelerin test sonuçları 77
Tablo 5.12. 50 çevrim sürtünme test sonuçları 81
Tablo 5.13. Ortak sonuç tablosu 82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_d : Yüzey dokusu alanı
$a_{hücre}$: Yüzey dokulu hücre alanı
c : Kalıp boşluğu (mm)
cSt : Kinematik viskozite (0,01 cm^2/sn)
C : Karbon
Cr : Krom
D_i : Açınım çapı (mm)
E : Elastisite Modülü (MPa)
E_S : Sürtünme enerjisi (N.mm)
F_N : Normal yük (N)
F_S : Sürtünme kuvveti (N)
h_o : Yağ filmi kalınlığı
h_d : Doku derinliği
Mn : Mangan
Mo : Molibden
N : Azot
P : Fosfor
p^1 : Basınç (MPa)
Pd : Pot çemberi baskısı (ton)
R : Normal anizotropi
Ra : Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
Rd : Kalıp yarıçapı (mm)
Rdc : Kalıp köşe yarıçapı (mm)
R_m : Çekme gerilmesi (N/mm^2)
R_p : Akma gerilmesi (N/mm^2)
Rp : Zımba yarıçapı (mm)
Rpc : Zımba köşe yarıçapı (mm)
S : Kükürt
Si : Silisyum
Ti : Titanyum
t_o : Sac kalınlığı (mm)
V : Vanadyum
v^1 : Yatay Hız, Zımba hızı (mm/sn)
β : Çekme oranı (-)
βo : Çekme oranı limiti (-)
μ : Sürtünme katsayısı (-)
η : Viskozite

Kısaltmalar

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
AJM : Abrasive Jet Machining (Abrasif Jet İşleme)
ASTM : American Society for Testing Materials (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu)
CET : Chemical Etching Texturing (Kimyasal Aşındırma Doku)
COF : Coefficient of Friction (Sürtünme Katsayısı)

COF_S	: Statik sürtünme katsayısı
COF_K	: Kinetik sürtünme katsayısı
CrN	: Krom nitrür
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
ECM	: Electrochemical Machining (Elektrokimyasal İşleme)
EDM	: Micro-electric Discharge Machining (Mikroelektrik Boşaltma İşleme)
EN	: Europeane Norm (Avrupa Standardı)
FIB	: Focused Ion Beam (Odaklanmış İyon Işını)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
K	: Kuru Test Durumu
LST	: Laser Surface Texturing (Lazer Yüzey Dokusu)
MEMs	: Micro Electro Mechanical Systems (Mikroelektro-Mekanik Sistemler)
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SBST	: Shot Blasting Surface Texturing (Kumlama Yüzey Dokusu)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
SPST	: Shot Peening Surface Texturing (Bilyalı Dövme Yüzey Dokusu)
ST	: Surface Texture (Yüzey Dokusu)
TiAlCN	: Titanyum alüminyum karbo nitrür
TiCN	: Titanyum karbo nitrür
USM	: CNC Ultrasonic Machining (CNC Ultrasonik İşleme)
VMT	: Vibromechanical Texturing (Mekanik Titreşimli Doku)
Y	: Yağlı Test Durumu

KALIP YÜZEY DOKUSUNUN SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, derin çekme kalıbı yüzeyine oluşturulan yüzey dokusunun, doku geometrisinin ve ölçülerinin sac şekillendirme prosesi tribolojik özelliklerine katkısının incelenmesi amaçlanmıştır. Derin çekme prosesinde sac metal ile kalıp arasındaki etkileşimi simüle edebilecek sürtünme, aşınma ve çizik testleri yapabilen test cihazı tasarlanarak devreye alınmıştır. 1.2379 kalıp malzemesinin üzerine bilyalı dövme, lazer işleme ve kimyasal aşındırma yüzey dokusu oluşturma yöntemleri ile farklı geometrilerde (düz, kare, daire, üçgen ve elips) ve ölçülerde dokular oluşturulmuştur. Belirlenen grupların yüzeylerine üç farklı grup (TiAlCN, TiCN ve CrN) olacak şekilde fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplama uygulanmıştır. DD13 sac malzeme ile düz ve doku açılmış yüzeye sahip kaplamasız ve kaplamalı 1.2379 soğuk iş takım çeliği arasında kuru ve sıvı sürtünme durumlarında sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Düz yüzeylerde elde edilen test sonuçları referans değer olarak seçilmiştir. Dokulu yüzeylerin test sonuçları ise referans değerler ile karşılaştırılarak gelişim durumları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Kaplamasız yüzeylerde kuru sürtünme durumunda sürtünme katsayısı kimyasal aşındırma yöntemi ile oluşturulan dikey lineer dokulu “CSTV1” numunesinde düz yüzeye göre %55 oranında düşük çıkmıştır. Kaplamasız yüzeylerde sıvı sürtünme durumunda ise bilyalı dövmeli dokulu “SPSTI-N2” numunesinde %60 oranında düşük çıkmıştır. Kaplamalı yüzeylerde kuru sürtünme durumunda sürtünme katsayısı lazer yöntemiyle oluşturulmuş üçgen dokulu “LST6-T1” numunesinde düz yüzeye göre %21 oranında düşük çıkmıştır. Kaplamalı yüzeylerde sıvı sürtünme durumunda ise lazer yöntemiyle oluşturulmuş üçgen dokulu “LST8-T1” numunesinde %54 oranında düşük çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin Çekme, Kalıp Yüzey Dokusu, Sac Metal Şekillendirme, Triboloji.

THE EFFECTS OF TOOL SURFACE TEXTURE ON SHEET METAL FORMING

ABSTRACT

In this thesis study, it is aimed to examine the contribution of the surface texture, texture geometries and dimensions created on the deep drawing tool surface to the tribological properties of the sheet metal forming process. A testing device capable of performing friction, abrasion and scratch tests that can simulate the interaction between sheet metal and tool in the deep drawing process has been designed and put into operation. Textures in different geometries (flat, square, circle, triangle and ellipse) and sizes were created on the 1.2379 tool material by shot peening, laser and chemical etching surface texture creation methods. Three different groups (TiAlCN, TiCN and CrN) were coated on the surfaces of the determined groups by physical vapor deposition method. Friction tests were carried out in dry and liquid friction conditions between DD13 sheet material and uncoated and coated 1.2379 cold work tool steel with a smooth and textured surface. Test results obtained on flat surfaces were chosen as reference values. Test results of textured surfaces were compared with reference values and their development status was examined and the results were evaluated. In case of dry friction on uncoated surfaces, the friction coefficient was 55% lower in the vertical linear textured "CSTV1" sample created by chemical etching method compared to the flat surface. In case of liquid friction on uncoated surfaces, it was 60% lower in the shot-peened textured "SPSTI-N2" sample. In case of dry friction on coated surfaces, the friction coefficient was 21% lower in the triangular textured "LST6-T1" sample created by laser method compared to the flat surface. In case of liquid friction on coated surfaces, it was lower by 54% in the triangular textured "LST8-T1" sample created by laser method.

Keywords: Deep Drawing, Tool Surface Texturing, Sheet Metal Forming, Tribology.

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir ekonomik güce sahip olabilmek, ihracat oranını ve rekabeti arttırmak için firmalar geleneksel satış stratejilerinin aksine hammadde, proses ve diğer süreç maliyetlerini kontrol altında tutarak sürekli gelişimi sağlamak zorundalardır. Bu kapsamda hammadde fire oranlarının azaltılması, net/brüt hammadde oranı yüksek ürünlerin tasarlanması ve proses verimliliklerinin arttırılması gerekmektedir. Diğer yandan doğal kaynakların tüketiminin hızlı bir şekilde artması, buna bağlı olarak firmaların kurumsal/ürün karbon ayakizi skorları ve sınırda karbon düzenleme mekanizmasına tabi olmasından dolayı, firmalar sürdürülebilir kaynak arayışları ve yenilikçi prosesler üzerine çalışmalar yapmaktadır. Gelişen teknoloji ile sac şekillendirme proseslerinin daha ulaşılabilir olması ve sac malzemenin dayanaım-ağırlık oranı avantajlarından dolayı, sac şekillendirme prosesleri başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektör için hammadde ve proses maliyetlerinin en iyileştirilmesi konusunda önem arz etmektedir. Ayrıca otomotiv sektöründe elektrikli araç bataryasının içten yanmalı motora kıyasla getirmiş olduğu ek ağırlığın kompanze edilebilmesi için farklı üretim yöntemleri ile üretilen parçaların hafifleştirme kapsamında sac parçalara, mevcut sac parçaların hammaddeleri ise yüksek dayanımlı hammaddelere dönüşümü yönünde tasarım iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

Geleneksel sac metal malzemelerde düşük karbonlu sac malzemeler yerine yüksek dayanımlı sac malzemelerin kullanımı durumunda ise şekillendirme kuvveti alışılagelmiş seviyelerin aksine yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu kuvvetler sonucunda, kalıp ile sac metal arasında aşırı sürtünme kuvveti ve yüksek gerilmeler meydana gelmektedir. Sürtünme, şekillendirme için gerekli bir faktör olsa da yüksek ve kontrol edilemez seviyelere çıkması sac şekillendirme kalıplarında aşınmanın hızlanmasına ve aşınıp yüzeyden kopan mikron boyuttaki parçacıkların ara yüzeye girmesi kaynaklı nihai ürün kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı sac metal şekillendirme kalıplarında sürtünmenin ve sürtünmeye bağlı aşınmanın azaltılması yeni yapılacak araştırmalarda krıtik bir konu haline gelmiştir. Hem kalıp ömrünü arttırmak hem de sürdürülebilir kaliteli ürün elde etmek için sürtünme azaltma çalışmaları kapsamında, genellikle yeni nesil kalıp malzemeleri, ısıl işlem optimizasyonu, yeni nesil kaplamalar ve yağlayıcı optimizasyonu gibi seçenekler üzerinde çalışılmaktadır. Yapılan literatür

araştırmasında ise son yıllarda kesici takımdan, elektronik devrelere kadar farklı alanlarda farklı amaçlar ile yüzey dokusu üzerine yapılan çalışmalara rastlanılmıştır. Yüzey dokusu özellikle karşılıklı temas halinde çalışan uygulamalar özelinde yorumlanacak olur ise gerçek temas alanını azaltması nedeni ile hem kuru hem sıvı sürtünme durumunda sürtünme katsayısını azaltır ve yüzeyden kopan aşınma parçacıklarını hapsederek aşınma direncini arttırır. Benzer şekilde, sıvı sürtünme durumunda ise dokular yağ rezervi görevi görerek hareketin şekline bağlı olarak hidrostatik ve hidrodinamik yağlama etkisi yaparak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır.

Bu çalışma kapsamında, kalıp yüzey dokusunun (surface texture) sac metal şekillendirme tribolojisine etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Kalıp yüzeylerine yüzey dokusu oluşturarak kuru ve sıvı sürtünme durumlarında sürtünme katsayısının düşürülmesi ve aşınma dayanımının arttırılması hedeflenmiştir. Yüzey doku oluşturmanın, tribolojinin hemen her alanında pozitif katkılar getirdiği bilinmektedir. Bu konuda yüzlerce referans çalışma bulunmaktadır. Fakat sac şekillendirme proseslerindeki kalıplar incelendiğinde kalıp yüzeylerinde doku oluşturmak suretiyle gerek sürtünme katsayısının düşürülmesi, gerek aşınma dayanımının iyileştirilmesi, gerekse kalıp/sac temasındaki gerçek alanın yöne bağlı şekillendirilmesi ve gerçek basıncın değiştirilebilmesi, aşınma ürünlerinin daha fonksiyonel bir şekilde yüzeyden uzaklaştırılabilmesi, yağlama yapılması durumunda mikronize boyutlardaki kanallarda artan yağ basıncı sayesinde daha efektif yağlama basıncının oluşturulması vb. mekanizmalar ile sac şekillendirme üzerine literatürde yok denecek kadar az çalışma olması dikkat çekmiştir.

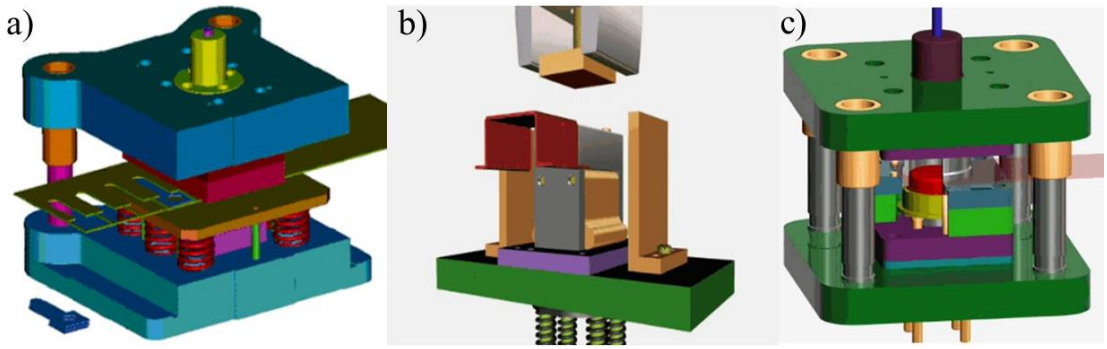
Tez kapsamında, literatürdeki bu boşluk üzerine odaklanarak kalıp yüzey dokusunun derin çekme prosesi tribolojik performansına etkisi üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Tribolojik testleri gerçekleştirmek için derin çekme prosesinde kalıp ve sac metal triboçiftleri arasındaki etkileşimi birebir simüle edebilecek tribolojik test cihazı tasarlanıp devreye alınmıştır. Ayrıca test cihazının tasarım ve faydalı model tescili alınmıştır. Tribolojik testlerde kullanılmak üzere telerezyon prosesi ile derin çekme prosesinde yaygın olarak kullanılan 40 mm x 60 mm x 10 mm ölçülerinde ısıl işlem uygulanmış soğuk iş takım çeliği 1.2379 kalıp malzemesi ile düşük karbonlu 20 mm x 20 mm x 5 mm ölçülerinde sac metal DD13 malzemesi hazırlanmıştır. Kalıp malzemesi

üzerine bilyalı dövme, kimyasal aşındırma ve lazer işleme doku açma yöntemleri ile farklı ölçü ve geometrilerde dokular açılmıştır. Oluşturulan dokuların seçilen belirli bir gubuna ise fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile üç farklı özelliklerde kaplama uygulanmıştır. Kaplamalar, derin çekme prosesinde yaygın olarak uygulanan geleneksel kaplama türleri ve yeni nesil kaplama türleri şeklinde seçilmiştir. Karşılaştırmalar genel olarak kendi kaplama türüne göre yapılmıştır; ancak şekillendirme enerjisini optimum seviyelere getirebilecek şartları tespit etmek için yeni nesil kaplama ile diğer kaplanmış dokulu gruplar karşılaştırılarak yorum yapılmıştır. Tribo çiftler arasında meydana gelen sürtünme enerjileri ve sürtünme katsayıları kuvvetölçer üzerinden alınan değerler ile hesaplanmıştır. Dokusuz düz kaplamasız ve kaplamalı kalıp malzemesinin kuru ve sıvı sürtünme durumunda yapılan tribolojik testleri dokulu gruplar için referans alınarak dokulu yüzeylerin düz yüzeye göre sürtünme enerjisi ve sürtünme katsayısı gelişimi incelenmiştir. En kararlı sonucun elde edildiği doku ise derin çekme kalıbına uygulanarak düz kalıp ile yapılan üretime göre parça kalitesi ve şekillendirme enerji miktarları karşılaştırılmıştır.

Yukarıda belirtildiği gibi yüzey dokusu oluşturmanın sac şekillendirme süreci içerisinde getireceği katkıların belirlenmesi ve yüzey dokusu oluşturmanın ve yüzey dokusuna ilişkin parametrelerin kantitatif bir şekilde sac şekillendirme tribolojisi ve sac şekillendirme prosesine katkısının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME

Sac şekillendirme terimi genellikle şekilsiz veya basit geometriye sahip olan belirli bir malzemenin şekil, boyut, doğruluk ve tolerans olarak tanımlanmış karmaşık geometriye sahip bir parçaya dönüştürüldüğü bir grup imalat yöntemini ifade eder. Sac metal ürünlerin kullanımına olan ilgi Sanayi Devrimi döneminde artmıştır. Abkant pres ve montaj hattı gibi yeni icatların geliştirilmesiyle daha kaliteli parçalar üretilmiştir. Günümüzde ise üretim sektörlerinin sürdürülebilirlik kapsamında düşük karbon ayak izine sahip ürünler üretme zorunluluğundan dolayı, büyük bir ivme ile gelişimini sürdüren bu yönteme olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu kapsamda pazar eğilimlerinin odak noktası maliyet azaltma, parça birleştirme, fonksiyonel entegrasyon ve boyutsal doğruluk konularıdır. Bunların temel sebebi ise düşük maliyetli ve yüksek katma değerli ürünlere ilginin artmasıdır. Özellikle otomotiv sektöründe geometrik olarak daha karmaşık parçaların ve montaj maliyetini azaltan daha büyük modüllerin kullanılmasının yanı sıra, parça birleştirme yoluyla maliyetin ve araç ağırlığının azaltılmasına sürekli bir odaklanma vardır (elektrikli araçların gelişimi). Bu durum ise ana sanayilerin rekabetçi ve teknolojik bilgi birikimi olan tedarikçilerine kaynak ayırmasını sağlamaktadır. Sac şekillendirme prosesinin yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı, parça ile kalıp arasındaki tribolojik etkileşimlerden üretim teknolojilerine kadar olan alanda teknolojik bilgi birikimine sahip olan firmalar pazarda lider konuma gelebilecektir (Welo ve Chinesta, 2007).



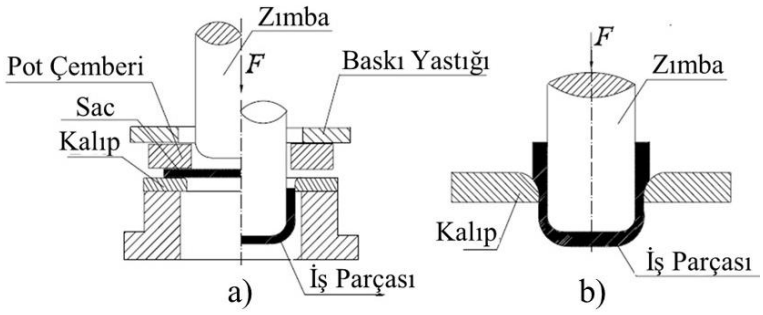
Şekil 2.1. Sac metal şekillendirme yöntemleri a) kesme, b) bükme c) derin çekme (URL-1)

Şekil 2.1'de birkaç örneği verildiği üzere sac metal şekillendirme yöntemleri sırasıyla kesme, bükme, derin çekme, gererek şekillendirme, sıvama, patlamayla şekillendirme, elektro-hidrolik şekillendirme, elektro-manyetik şekillendirme gibi örneklendirilebilir.

Parçanın özelliğine göre tek bir yöntem ile basit parça elde edilebileceği gibi bu yöntemlerin birkaç tanesinin ardışık kullanılması ile de karmaşık parçalar elde edilebilir. Sac metal parçalar, dayanım ağırlık oranının yüksek olması, yüksek boyut hassasiyeti, yüzey özellikleri ve düşük üretim maliyetleri gibi avantajlarından dolayı ticari açıdan beyaz eşya, otomotiv, havacılık gibi sektörlerde büyük öneme sahiptir. Sac metal şekillendirme proseslerinin performansı, sac metal şekillendirme prosesi tipinin özelliklerine, kalıp malzemesine, kalıp/sac arayüzündeki tribolojik koşullara, plastik deformasyon miktarına ve bitmiş ürün gereksinimlerine bağlıdır.

2.1. Derin Çekme

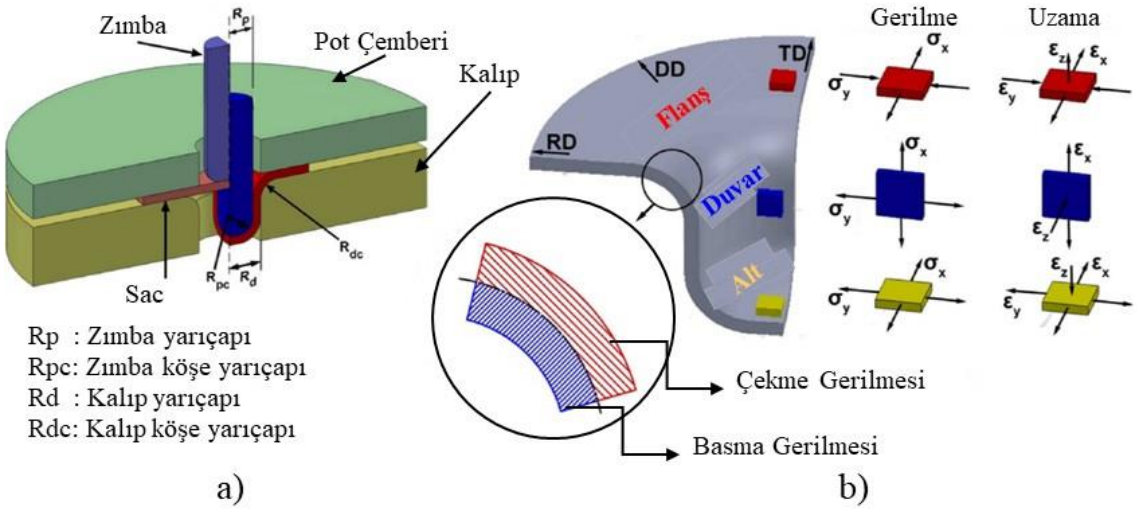
Derin çekme yöntemi, pot çemberi ve dişi kalıp arasında belirli bir yük altında konumlandırılan sac metalin bir zımba (erkek kalıp) ile akma mukavemetinin üstünde bir kuvvet ile plastik şekillendirilmesi temeline dayanan bir sac şekillendirme yöntemidir. Bu işlemle, diğer yöntemlere göre daha az proses adımı kullanarak en az hurda oranı ile nihai ürünü üretmek mümkündür. Derin çekme işlemi için özel yöntemlerin geliştirilmesi, özellikle otomotiv ve uçak endüstrilerindeki genel teknolojik gelişmelere paralel olmuştur. Ayrıca bu prosesin, elektrik ve elektronik endüstrilerindeki çok küçük parçalardan, endüstrinin diğer dallarındaki birkaç metrelik boyutlara kadar, diğer ürünler için farklı şekil ve boyutlarda parçaların üretiminde geniş bir uygulaması vardır.



Şekil 2.2. Derin çekme işlemleri a) saf çekme, b) ütüleme (Boljanovic, 2004)

Derin çekme prosesi, Şekil 2.2.a'da gösterildiği üzere sac kalınlığında azalma olmaksızın saf çekme ve Şekil 2.2.b'de gösterildiği üzere sac malzemesinin kalınlığını azaltarak ütüleme olmak üzere temelde iki çeşittir. Derin çekme prosesinin hızlı çevrim süresinin yanı sıra proseste karmaşık eksenel simetrik geometriler ve bazı eksenel simetrik olmayan geometriler, nispeten teknik olmayan işçilik kullanılarak birkaç işlemle üretilebilir.

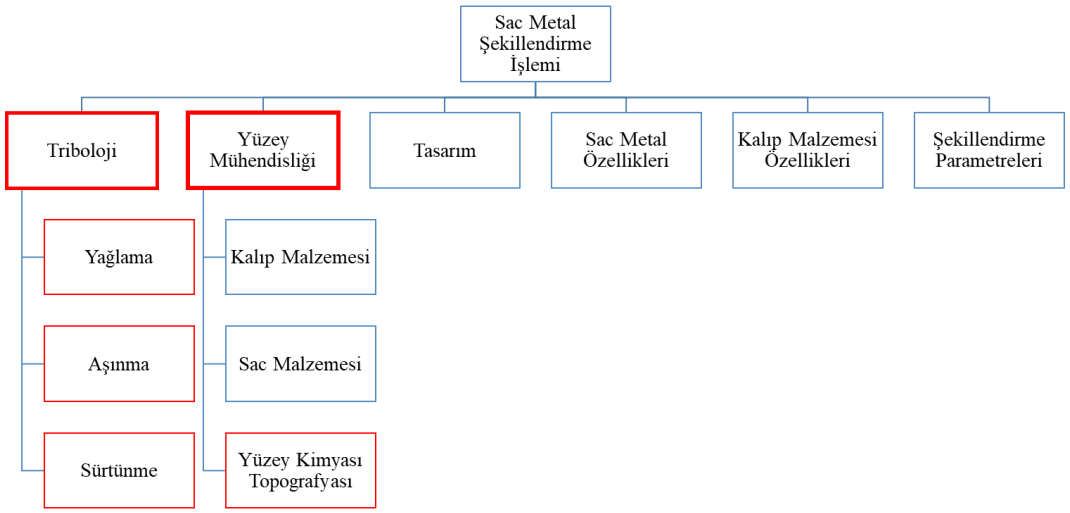
Fonksiyonel açıdan bakıldığında, derin çekme metal şekillendirme prosesinde, yüksek mukavemetli ve hafif parçaların yanı sıra diğer bazı imalat prosesleriyle elde edilemeyen geometriler de üretilir. Yöntem ayrıca sac metalin şekillendirilebilirlik özelliğini incelemek için de temel bir test görevi görür (Boljanovic, 2004).



Şekil 2.3. Derin çekmeye etki eden parametrelerin gösterimi a) iki farklı zımba pozisyonu, b) farklı bölgelerdeki stres ve uzama gösterimleri (Singh ve diğ., 2018)

Şekil 2.3.a'da derin çekme prosesinde etkili olan temel ölçüsel parametreler tanımlanmıştır. Şekil 2.3.b'de ise parça üzerindeki stres ve birim uzamalara yer verilmiştir. Derin çekme anında parça üzerinde meydana gelen gerilme ve uzamaların istenilen seviyede olması uniform bir malzeme akışı ile kaliteli bir ürün elde edilmesini sağlamaktadır. "-z" yönünde hareket eden zımbanın saca temas etmesiyle şekillendirme işlemi başlamaktadır. Pot çemberi ve kalıp arasında pot baskısıyla tutulan sac, zımbanın saca baskısının devam etmesiyle kalıp içine akarak şekillenmeye devam eder. Pot baskısının az/fazla olması, zımba hızı, zımba radiusu, kalıp boşluğu gibi parametreler nihai parçanın kalitesine doğrudan etmektedir. Özellikle yüksek mukavemetli sac malzemelerin kullanılması durumunda, alışılagelmiş gerilmelere göre aşırı gerilmeler oluşmaktadır. Aşırı gerilmeler sonrası kalıpta ve parçada ortaya çıkabilecek kusurları önlemek için, derin çekme prosesinin Şekil 2.4'te gösterildiği gibi sistematik olarak incelenmesi gerekmektedir. Tasarım, şekillendirme parametreleri, sac metal ve kalıp malzemesi özelliklerinin kontrol edilebildiği durumlarda sistemin performansıın arttırılması için triboloji ve yüzey mühendisliği konularının ayrıca değerlendirilerek konular üzerinde detaylı çalışılması gerekmektedir (Singh ve diğ., 2018). Bu proseste,

üretim şartlarında tribolojik özelliklerin ölçülmesi zor olduğundan sac metal ile kalıp arasındaki etkileşimi simüle eden gerilim altında bükme, şerit çekme, pin-on disk, ring on disk gibi farklı test yöntemleri geliştirilmiştir (Makhkamov, 2017).

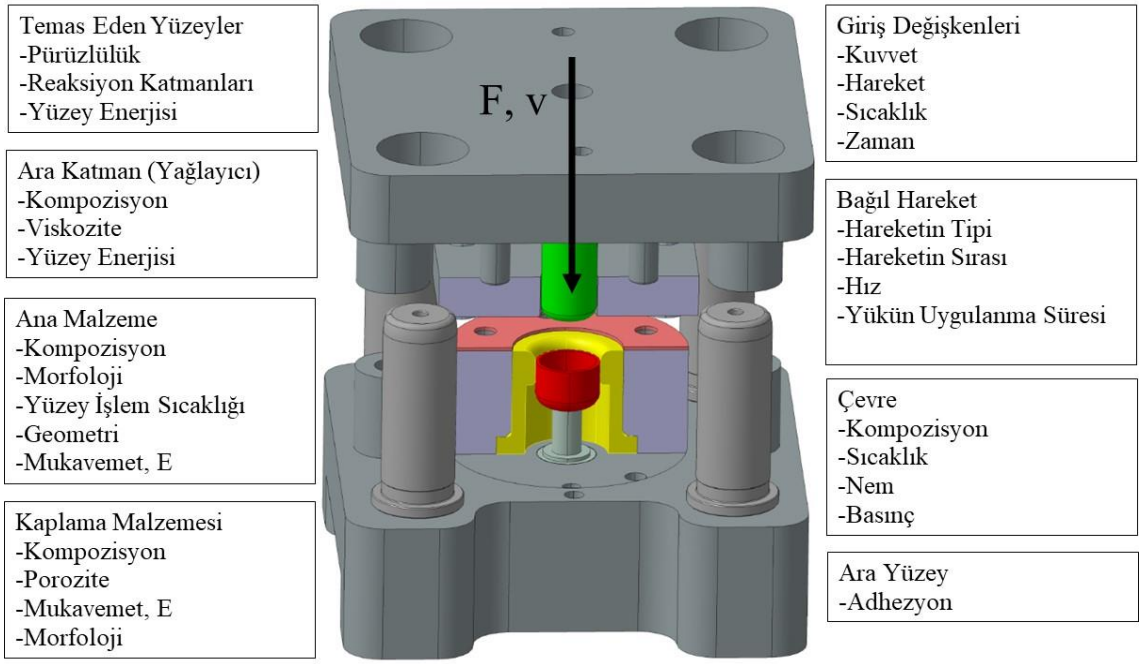


Şekil 2.4. Sac metal şekillendirme işlemine etki eden faktörler (Makhkamov, 2017)

2.2. Derin Çekme Prosesi Tribolojisi

Triboloji, karşılıklı hareket eden etkileşim halinde olan yüzeyler arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlama durumunu inceleyen bir bilim dalıdır. Tribolojide hedef sürtünmeyi ve sürtünmeye bağlı aşınma durumunu yağlayıcı ve/veya diğer inovatif yöntemler kullanarak en aza indirmektir. Bu şekilde ard arda binlerce parça üretimi sonrası, sürtünmenin ve sürtünmeye bağlı aşınma durumunun kontrol edilmesiyle yüzeyden malzeme kayıpları en aza indirilerek ürün kalitesi ve sistemin ömrü arttırılmaktadır.

Şekil 2.5'te temas eden yüzeyler, ara yağlayıcı katman, kaplama malzemesi, ara yüzey, giriş değişkenleri ve çevre koşulları gibi derin çekme prosesini etkileyen ana konular ve alt parametreleri belirtilmiştir. Sistemin tribolojik performansını arttırmak için uygun yağlayıcı kullanımı, nano kaplamalar ve kalıp yüzey dokusu oluşturma gibi inovatif yöntemler üzerine çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Özellikle kalıp yüzey dokusunun kuru ve sıvı sürtünme çalışma durumundaki katkılarından dolayı bu işlem son zamanlarda dikkatleri üzerine çekmektedir (Çetin, 2021).

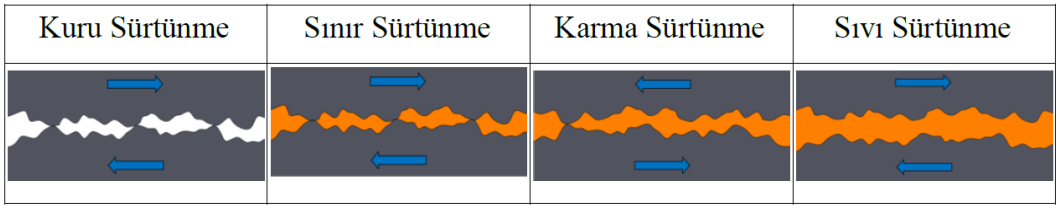


Şekil 2.5. Derin çekme işlemi tribolojik sistem bileşenleri (Yılmaz, 2020)

2.2.1. Sürtünme

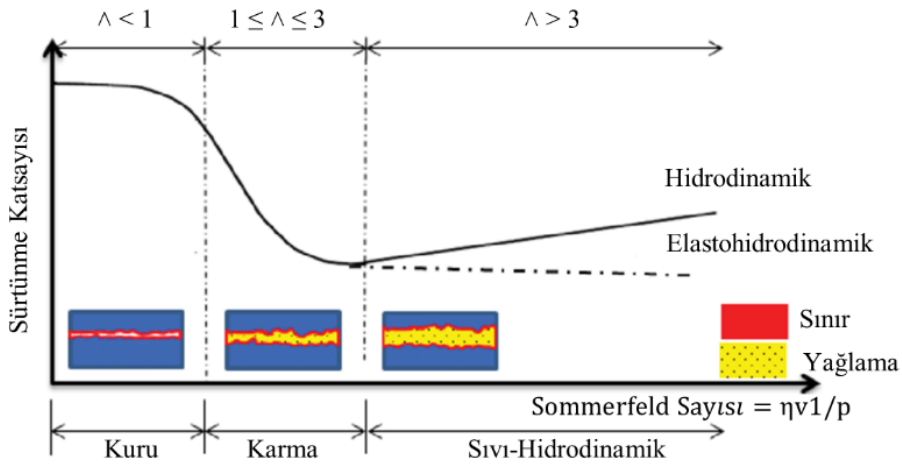
Sürtünme, karşılıklı etkileşim halinde bulunan yüzeylerin harekete karşı koyduğu direnç olarak ifade edilmektedir. Hareketten hemen önceki durumda yük altında gerçek temas alanından dolayı yüzeyler arasındaki adhezyon sonucu teması yenmek için uygulanan kuvvete statik sürtünme kuvveti; birbirleri ile göreceli olarak kayma, yuvarlanma gibi hareketleri boyunca oluşan direnç ise kinetik sürtünme kuvveti olarak ifade edilmektedir. Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı temas anındaki yüzeylerin bulunduğu çevre şartları, test koşulları, yüzey sertlikleri, tanecik boyutu, kristal yapı ve yüzey enerjisi gibi birçok parametreye bağlıdır. Örneğin vakum altında, yüzeyle etkileşime girerek oksidasyon tabakası oluşturacak bir atmosfer olmadığından dolayı temas noktalarındaki yüksek adhezyon kuvvetleri yüksek sürtünmeye neden olurken, normal atmosfer şartlarında aynı malzemelerde yüzeyde oluşabilecek ince oksidasyon tabakaları sürtünmenin azaltılmasını sağlamaktadır. Yüzeyler sürtünmeyi iki yönden etkiler. Fiziksel olarak, gerçek temas alanını, yüzey zorlanmalarını etkiler; yağ ceplerini ve yağ akışını belirler. Kimyasal olarak etkileşim ise kimyasal uygunluk, kayma mukavemeti, viskozite ve ıslanabilirlik örnek olarak verilebilir.

Sürtünme, yüzeyler arasında yağlayıcı olup olmamasına, hareketin durumuna ve karakteristiğine göre akışkan sürtünmesi, molekül sürtünmesi ve katı cisimler arası sürtünme olarak sınıflandırılır. Bir cismin sıvı veya gaz ortamda yapmış olduğu hareket sonrası meydana gelen sürtünmeye akışkan sürtünmesi; plastik şekil değiştirme esnasında moleküller arasında meydana gelen sürtünmeye mokekül sürtünmesi olarak adlandırılır. Katı cisimler arasındaki sürtünme ise Şekil 2.6'da gösterildiği üzere yağlayıcının kullanılmadığı kuru sürtünme, yağlayıcının kullandıldığı sıvı sürtünme, iki durum arasında kalan sınır ve karma sürtünme olmak üzere sınıflandırılır (Çetin, 2021; Nilsson, 2021).



Şekil 2.6. Katı cisimler arası sürtünme mekanizmaları (Çetin, 2021)

Sürtünme durumunda yağlama rejimi genellikle Şekil 2.7'de gösterilen Stribeck eğrisi ile gösterilir. "y" ekseni sürtünme katsayısını "x" ekseni ise Sommerfeld Sayısını ifade eder. η, v^1 ve p^1 sırasıyla viskozite, kayma hızı ve basınçtır (Makhkamov, 2017; Shirzadegan ve diğ., 2015).



Şekil 2.7. Stribeck eğrisi (Shirzadegan ve diğ., 2015)

Sac metal kalıp yüzeyleri arasında istenilen şekli alabilmesi için yüzeyler arasında sürtünme meydana gelmesi gerekmektedir. Sürtünme, gerekli olan bir parametre olsa da

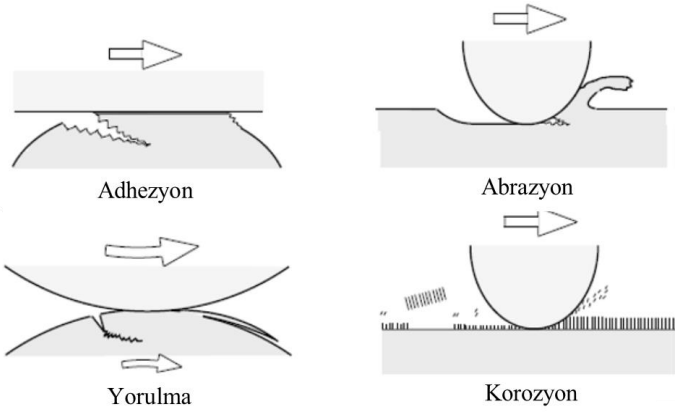
olabildiğince düşük seviyede tutulmalıdır. Triboloji biliminde temel amaç sürtünmeyi azaltmak ya da yok etmek değil kontrol altında tutmaktır.

Sürtünme direncini etkileyen parametreler:

- Yüzeyler arası aşınan parçalar ve çevre kaynaklı kirleticiler,
- Yüzeylerin birbirlerine göre sertliği,
- Yük ve/veya hareket türü miktarı,
- Temas alanı, sıcaklık ve yağlayıcı,
- Malzemelerin mikroyapısı ve morfolojisi,
- Yüzeylerin kinematiği; hereketin yönü ve hızın büyüklüğü,
- Yüzey topografyası.

2.2.2. Aşınma

Aşınma, temas halindeki cisimlerin hareketleri sürecinde mekanik ve/veya kimyasal etkileşimlerden dolayı zaman içinde karşıt çiftlerin malzeme kaybı olarak tanımlanır. Tasarım problemleri, standart dışı parametreler, çevre şartları, korozyon vb. etkenler aşınmayı tetikler ve hızlandırır. Aşınan parçalar özellikle kapalı sistemlerde yüzeyden uzaklaştırılamıyor ise zamanla karşılıklı parçaların yüzeyine yapışarak aşınma hızını arttırır. Yüzeyden kopan parçalar ile sistem standardın dışına çıkarak sistemin verimini düşürmekte ve ürün kalitesini azaltmaktadır. Aşınmanın olumsuz etkilerini engellemek için çalışma basıncı, hızı, çevre şartları, yüzey pürüzlülükleri, karşılıklı çalışan malzemelerin sertlik durumları, yağlayıcı kullanımı, yüzey kaplama ve doku oluşturma gibi yöntemler dikkate alınmalıdır (Yılmaz, 2020).



Şekil 2.8. Aşınma türleri ve mekanizmaları (Çetin, 2021)

DIN 50320 standardında dört çeşit aşınma türü vardır. Adhezyon aşınması, temas halindeki yüzeylerin hareket esnasında yüzey pürüzlülüklerinden dolayı temas noktalarında serbest parça kopması ya da yumuşak yüzeyden kopan parçanın sert yüzeye yapışmasıdır. Abrazyon aşınması, sertlik ve pürüzlülük farkının çok olduğu durumlarda gerçekleşir. Yük altında sert malzeme yumuşak malzeme yüzeyine batarak yüzeyde deformasyona neden olur. Sertlik farkından oluşan bu aşınmaya iki gövdeli abrasif aşınma denir. Yüzeyler arasında sert aşındırıcı partiküllerin kayma ve yuvarlanma hareketi söz konusu ise bu türe üç cisimli abrasif aşınma denir. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi aşınmanın diğer türleri ise erezyon, titreşim(fretting) ve kimyasal aşınmadır (Yılmaz, 2020; Çetin, 2021).

2.2.3. Yağlama

Yağlayıcı seçimi ve uygulaması çeşitli koşullara bağlıdır ve üç farklı bakış açısıyla değerlendirilmelidir:

- Yağlama durumu ve şekillendirmeye uygunluğu,
- Şekillendirme sırasındaki davranışı,
- Korozyon önleme yeteneği ve işlem sonrası yağlayıcının yüzeyden çıkarılması durumu.

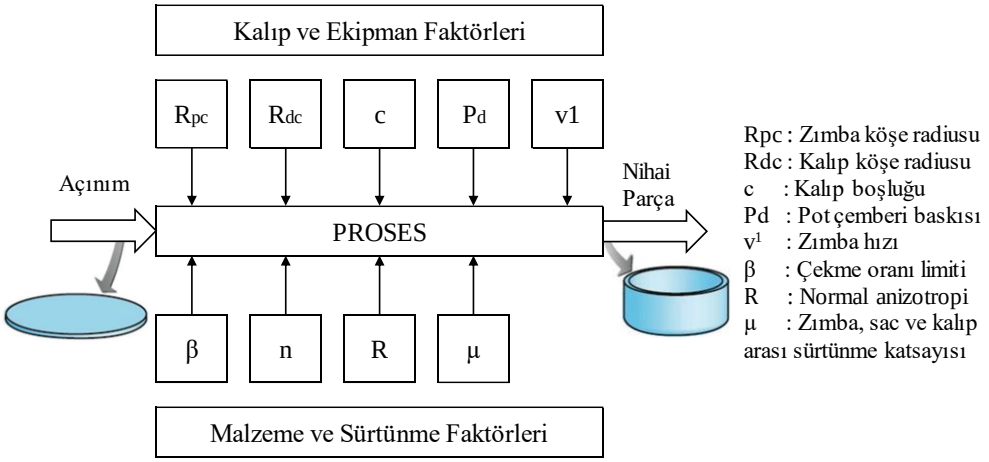
Metal şekillendirme işlemlerinde dört grup yağlayıcı kullanılır:

- Sürekli bir film oluşturan ve hidrodinamik bir yağlamayı destekleyen hafif mineral yağlardan sentetik greslere kadar geniş bir viskozite aralığına sahip sıvılar,
- Kalıp ve iş parçası ile kimyasal olarak reaksiyona giren, çok ince filmler oluşturan ve sınır yağlaması oluşturan uygun bileşimlere sahip emülsiyonlar,
- Temas arayüzünde bileşik katmanlar oluşturmak için kalıp ve iş parçasıyla reaksiyona giren aşırı basınçlar için katkı maddeleri içeren organik malzemeler,
- Kalıp ve iş parçası yüzeylerini ayırmak için kullanılan grafit, cam, bor nitrür ve molibden disülfür gibi katılar (Nilsson, 2012).

Derin çekme prosesi için seçilecek yağın içeriği, yağlayıcı uygulama metodu, viskozitesi, istenilen film kalınlığı, korozyon kontrolü, temizlik metodu, diğer yağlar ile uyumu, çevre güvenliği ve geri dönüşümü konularına dikkat edilmelidir (Makhkamov, 2017).

2.3. Derin Çekme Prosesini Etkileyen Parametreler

Derin çekme prosesini etkileyen parametreler kalıp, ekipman, malzeme ve sürtünme faktörleri şeklinde sınıflandırılır. Değişkenler, tekil olarak basit görünse de birçok değişkenin birbirleri ile etkileşimi incelendiğinde küçük bir değişiklik diğerleri ile olan etkileşimi büyük oranda etkileyerek nihai parçanın hasar görmesine neden olabilir. Şekil 2.9'da belirtilen değişkenlerden en önemlileri kalıp geometrisi, pot çemberi baskısı, malzeme özellikleri ve yüzeyler arasındaki sürtünmenin özelliği ve seviyesidir (Gowtham ve diğ., 2012; Özdilli ve Erdin, 2018; Boljanovic, 2004).

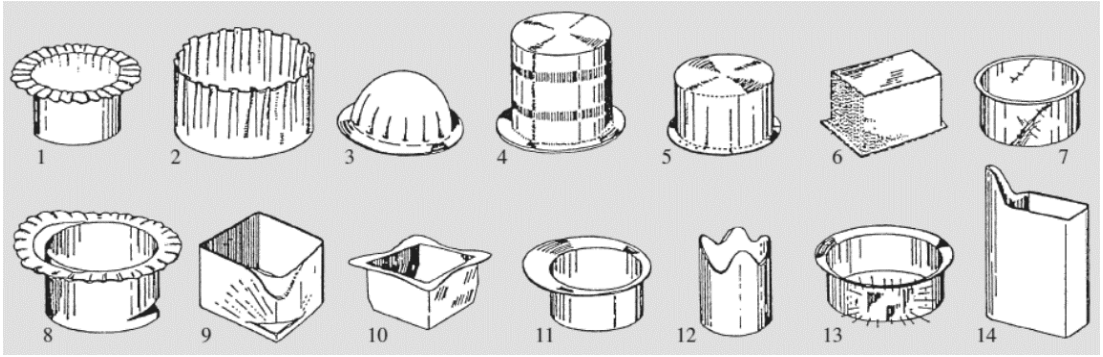


Şekil 2.9. Derin çekme işleminde önemli değişkenler (Boljanovic, 2004)

2.4. Derin Çekme Prosesinde Meydana Gelen Kusurlar

Şekil 2.10'da derin çekme prosesinde meydana gelebilecek hata modları sırasıyla flanşta buruşma(kırışma), duvarda buruşma, parça buruşması, halkasal baskılar, izler, portakallanma, Lüder bantları, tabanda kırılma, köşede kırılma, katlanma (10, 11 ve 12) ve köşe katlanmasıdır (13, 14) şeklinde verilmiştir. Yırtılma ve boyun verme bölgesel uzama farklılığı kaynaklı çekme kararsızlığından meydana gelmektedir. Buruşma yırtılmanın aksine bası gerilmelerinden dolayı meydana gelmektedir. Parça üzerinde oluşan yüksek bası gerilimi nedeniyle yüzeyde buruşma meydana gelir. Buruşmayı engellemek için yöntemlerden bir tanesi pot çemberi kullanmaktır. Diğer bir yöntem ise süzdürme kanalı kullanmaktır. Derin çekme prosesinde meydana gelen diğer hata modlarına ait kök sebepler Tablo 2.1'de detaylı şekilde verilmiştir. Hatalar tekil olabileceği gibi aynı anda birden fazla hata ortaya çıkabilir. Bu durumda sistemin

tribolojik olarak incelenerek temel kök sebebe ulaşılmalıdır (Decrozant-Triquenaux ve diğ., 2021; Yalçın, 2010).



Şekil 2.10. Derin çekme prosesinde çeşitli hata modları (Yalçın, 2010)

Şekillendirme süreci, pot çemberi ve dişi kalıp arasında konumlanan sac malzemeye zımbanın teması ile başlar. Zımbanın saca kuvvet uygulama esnasında sac malzeme zımba ve dişi kalıbın radius bölgeleri arasında akarak zımba hareketinin bitiminde nihai şeklini alır. Normal hesaplamalara göre ve/veya simülasyon sonuçlarına göre her iki radiuse dikkat edilmez ise eğer parça hasar görebilmektedir. Derin çekme oranına dikkat edilmediği durumda sacın yırtılacağı; pot baskısının yetersiz olması durumunda ise flanşta buruşmaların meydana geleceği aşikardır. Buruşan flanş bölgesinin dişi kalıp bölgesine akmasıyla duvarda da kırışma meydana gelir. Benzer şekilde çekme boşluğunun fazla olduğu durumlarda da duvarda kırışma meydana gelir. Malzemenin ölçülerinde serbestlik olduğu durumlarda malzeme çapı ve kalınlığı arttırılarak buruşmalar önlenebilir. Pot çemberi baskısının fazla olduğu durumda hem şekillendirme kuvveti artar hem de kalıp ile pot arasında akamayan sac malzeme yırtılır. Kalıp köşe radiusu(yarıçapı-R_{dc}) küçüldükçe şekillendirme kuvveti artar ve keskin bir köşede akmaya çalışan sac malzeme üzerinde de gerilme izleri oluşur (Zaid, 2016; Bal, 2007; Gowtham ve diğ., 2012; Edis, 2022). Derin çekme prosesinde kolay şekillendirilebilir sünek ve geri yaylanma oranı düşük olan malzemeler seçilse de son zamanlarda hafifleştirme kapsamında yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı şekillendirme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Sac metal ile kalıp arasında oluşan aşırı yüklenmeler ise yukarıda bahsedilen hataların oluşum sürecini hızlandırarak aşınma hızını da arttırmaktadır. Yüksek mukavemetli yeni nesil malzemelerin kullanılmasının yanı sıra geleneksel sac metal malzemelerinin kullanılması durumunda dahi derin

çekmede zorlayıcı geometrilere sahip parçaların üretilmesiyle bahsedilen hataların oluşumunun önlenmesi için prosesin tribolojik performansını arttıracak çalışmalara odaklanılmalıdır. En önemlisi ise kalıp tasarımı aşamasında ısıl işlem, kaplama ve doku oluşturma durumlarının birlikte etkileşiminin incelenmesi gerekmektedir.

Tablo 2.1. Derin çekme prosesinde karşılaşılan kusurlar ve olası sebepleri (Decrozant-Triquenaux ve diğ., 2021; Yalçın, 2010)

Olası Hata	Kök Sebep
Buruşma	Uygun ve homojen olmayan pot çemberi kuvveti Pot çemberi yüzeyi uygun değil Sac metalin malzemesi uygun değil Büyük kalıp radiusu Çekme boşluğunun büyük olması Sac yüzeyinin kirli veya çapaklı olması
Sacda Yırtılma veya Kırılma	Aşırı pot çemberi kuvveti Küçük kalıp radiusu Küçük zımba radiusu Pres hızının yüksek olması Derin çekme oranının yüksek olması Sac metalin malzemesi uygun değil Uygunsuz veya eksik yağlama Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması Çekme boşluğunun çok küçük olması Kompenetler üzerinde oluşan çizik veya çentikler Sacın akışını önleyen keskin köşeler
Kulaklanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması Sac malzemenin kalıp içerisine uygun yerleştirilmemesi Uygunsuz yağlama
Parça Kenarlarında Yırtılma veya Dalgalanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması Fazla yağlama Büyük kalıp radiusu Homojen olmayan pot çemberi kuvveti Kalıp kenarlarının dışa esnemesi
Parçanın Dip Kısımlarında Pürüzlenme	Sac malzeme kalitesi Pot çemberi kuvvetinin yetersiz olması Pot çemberi üzerinde yağ birikmesi Hava çıkışının olmaması Parçadaki uygunsuz esneme

3. KALIP YÜZEY DOKUSU

Sürtünme ve aşınma, mekanik sistemlerin tribolojik performansını değerlendirmek için önemli etkenlerdendir. Uygulamalara konu yüzey kalitesi, her iki özelliği doğrudan etkilemekte önemli rol oynamaktadır. Yüzey kalitesini arttırmak için yüzey modifikasyonları üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalardan bir tanesi de yüzey dokusu oluşturmaktır. Yüzey dokusu, iyi tanımlanmış aynı özellikteki girinti ve çıkıntı geometrilerinin yüzeye oluşturulma işlemidir. Yüzey dokusu ile pürüzlülüğü kolaylıkla ayırt edebiliriz. Doku, yüzey boyunca tanımlanmış sıralı şekillerden oluşur; pürüzlülük ise karakterize edilemez, rastgele oluşur. Yüzey üzerine açılmış dokular ile temas halindeki yüzeylerin gerçek temas alanı azalmaktadır. Temas alanının azalması, hem kuru hem de sınır yağlama durumlarında sürtünme kuvvetini düz yüzeye oranla azaltmaktadır. Ayrıca yüzeylerden aşınma sonucu ayrılan parçalar veya dışarıdan sisteme giren yabancı parçalar dokular tarafından tutularak üç gövdeli abrasif aşınma durumu engellenir. Böylelikle sürtünme azalır, sistemin ömrü artar. Özellikle sıvı yağlama durumunda dokular yağ rezervi görevi görerek hem yük taşıma kapasitesini arttırır hem de sürtünmeyi azaltır. Yüzey dokusunun etkisi, sınır ve karma yağlama durumlarında çok önemli iken hidrodinamik yağlama durumunda yüzeyler birbirinden ayrıldığından dolayı küçük boyutlardaki dokuların etkisi olmadığı düşünülmektedir. Bu nedenle hidrodinamik yağlama durumlarında doku ölçülerine dikkat edilmelidir (Has, 2020).

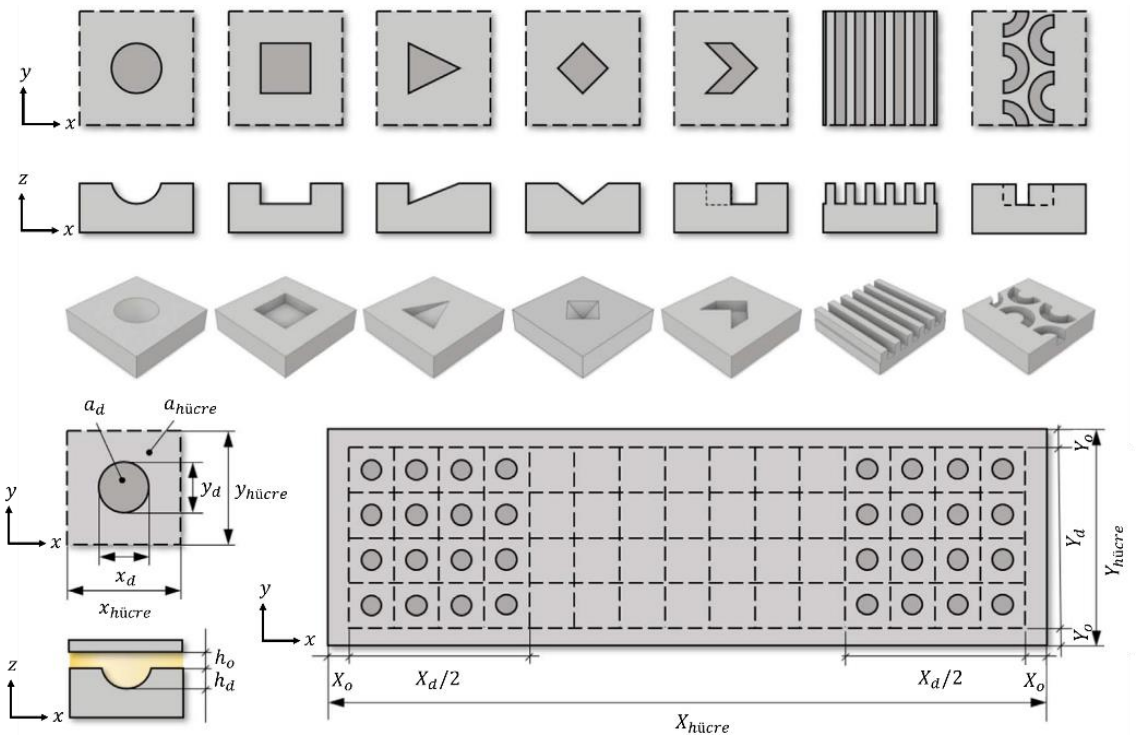
Yüzey dokusunun bütün sistemlerdeki ortak beş temel yararlı etkileri:

- Parça yakalama etkisi: Dokular, bütün yağlama koşullarında 1 – 20 μm boyutlarındaki aşınma partiküllerini yakalayabilmektedir.
- Mikro-hidrodinamik etkisi: Hidrodinamik yağlama koşullarında, dokular mikro-hidrodinamik yatak gibi davranır. Böylece dinamik akışkan basıncını arttırarak yük taşıma kapasitesini arttırır.
- Giriş emme etkisi: Besleme basıncı yağlayıcı kavitasyon basıncını aştığı zaman, dokular yüzeyler arasına yağlayıcı besler.
- Yağ rezervi etkisi: Karışık ve sınır yağlama koşullarında, dokular rezervuar görevi üstlenerek arayüze yağlayıcı gönderir.

- Karışık yağlama ve kuru sürtünme durumunda kontak alanını dolayısıyla sürtünmeyi azaltır.

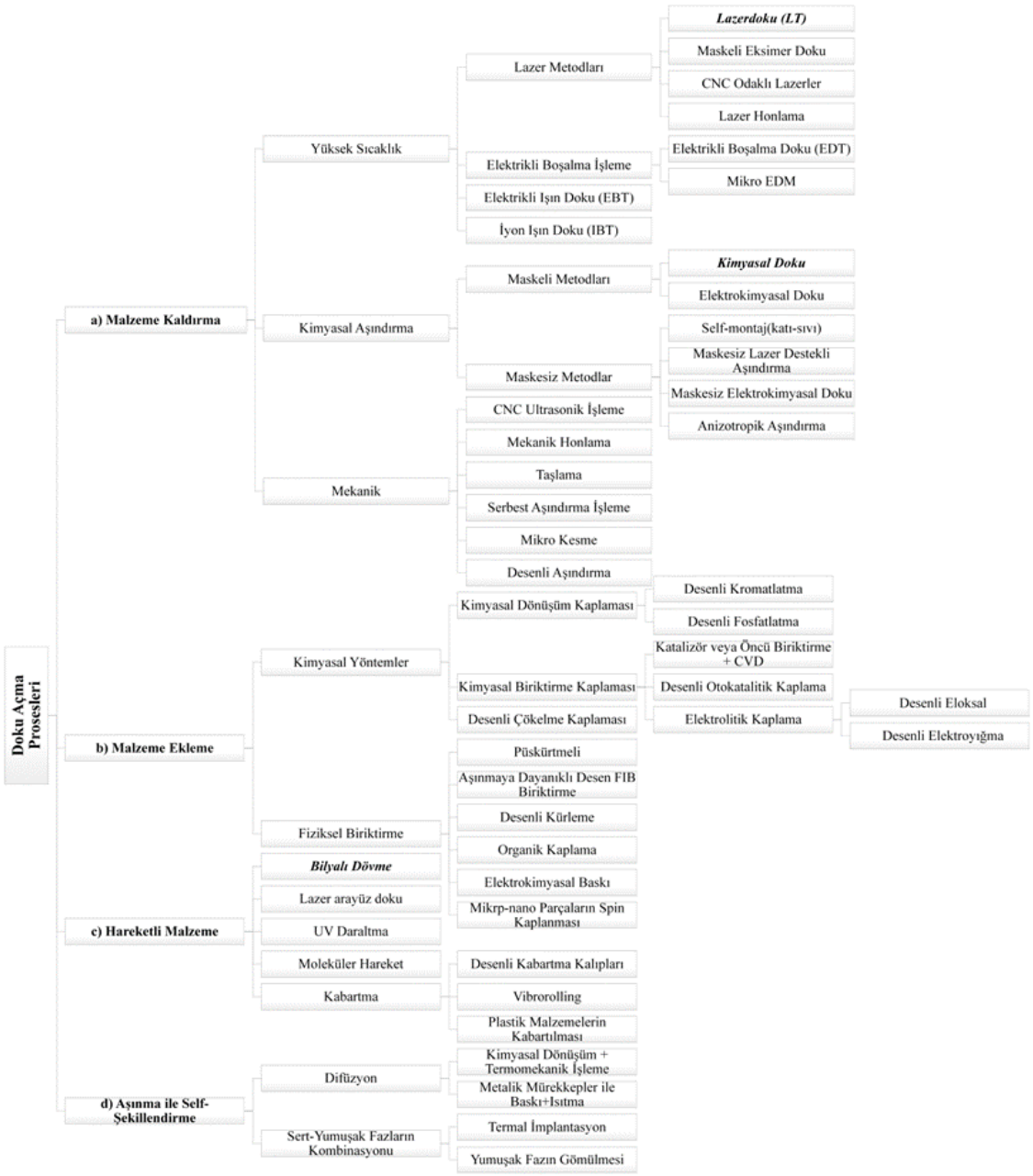
Geleneksel olarak oyma ve kazıma yöntemi ile oluşturulan çukur formdaki dokular negatif; çıkıntı formdaki dokular ise pozitif dokular olarak adlandırılmaktadır. Pozitif dokular genellikle elektronik ve iletken teknolojilerinde kullanılır. Çalışmamızda özellikle tribolojik performansı arttırmak amacı ile kullanılan negatif dokulara yer verilmiştir. Dokuların şekli, ölçüsü, derinliği ve yüzey üzerindeki yoğunluğu tribolojik özellikleri iyileştirmek için önemli parametrelerdir. Şekil 3.1'de farklı doku geometrileri ve dokuların ana ölçüleri belirtilmiştir. Dokunun konumlandığı birim hücrenin ve dokunun alanları sırasıyla a_d ve $a_{hücre}$; h_o yağ film kalınlığı, h_d doku derinliği; x ve y ise hücre ve dokuların geometrik kenar ölçülerini temsil etmektedir. Dokuların yüzey üzerindeki yoğunluğu Denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$DY = (a_{doku} * \text{Doku Sayısı}) / (X_{hücre} * Y_{hücre}) \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. Doku geometrileri ve parametreleri tanımı (Lu ve Wood, 2020)

3.1. Kalıp Yüzey Dokusu Oluşturma Yöntemleri



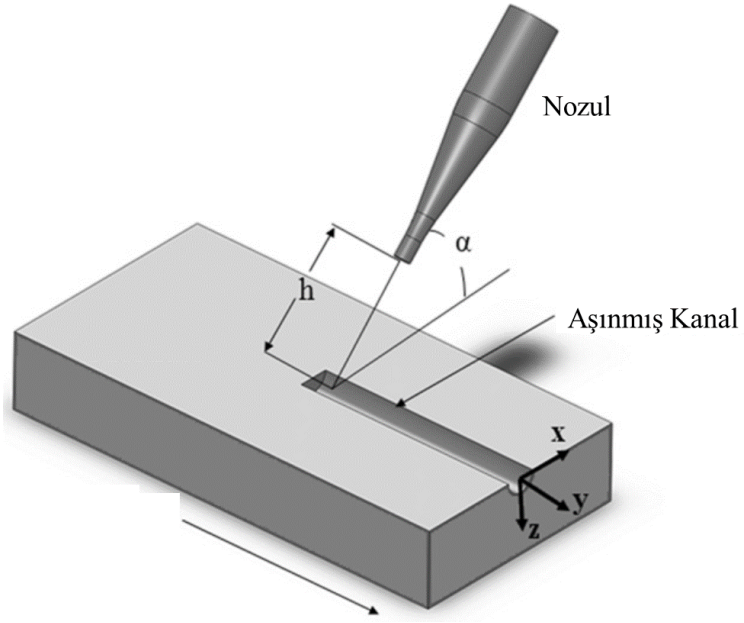
Şekil 3.2. Yüzey dokusu oluşturma yöntemleri (Bagheri, 2018)

Diğer üretim yöntemlerinde olduğu gibi kalıp yüzey dokusu oluşturma yöntemlerinde de bir yöntem seçilirken teknik ve mali özellikleri incelenmektedir. Prosesin basitliği, bulunabilirliği, ekipman maliyeti, proses maliyeti, geometrik desenleri işleme esnekliği gibi özellikler prosesi seçmek için önemli kriterlerdendir. Doku oluşturmak için teknikler sırasıyla, yüzeyden farklı yöntemler ile malzemenin kaldırılmasıyla doku oluşturma malzeme kaldırma, yüzeye malzeme ekleyerek doku oluşturma yöntemine malzeme

ekleme, bir yüzeyden başka bir yüzeye malzemenin hareketlendirilmesi ve plastik deformasyon ile doku oluşturmaya hareketli malzeme ve aşınma dayanımı yüksek olan malzemenin bu özelliği ile yüzeye doku oluşturma yöntemine de aşınma ile self-şekillendirme denir. Belirtilen sınıflar altında gruplandırılan doku oluşturma yöntemleri Şekil 3.2'de özetlenmiştir.

3.1.1. Aşındırıcı Jet Mikro-İşleme (AJM)

Aşındırıcı Jet Mikro İşleme (AJM) yönteminde, Şekil 3.3'te gösterilen nozul ile basınçlandırılmış hava, küçük aşındırıcı parçaları malzeme yüzeyine hızla çarptırarak yüzeyden malzeme kaldırılmasını sağlar. Kumlama ve bilyalı dövmeye benzeyen bu yöntemde mikro kanallar, mikro delikler ve kademeli düz bölgeler oluşturulabilir. Birçok metal genellikle tipik sünek erozif davranış sergiler. Bu özellik ile küçük açılarda kesme aşınması ve dik açılarda deformasyon aşınması özellikleri kullanılarak dokular oluşturulur (Ally ve diğ, 2012).

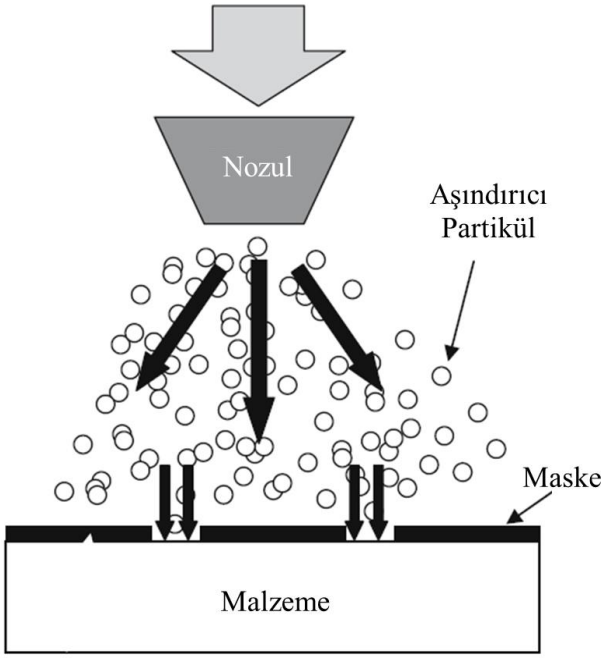


Şekil 3.3. Aşındırıcı Jet Mikro-İşleme yöntemi (Ally ve diğ, 2012)

3.1.2. Kumlama ve Bilyalı Dövme ile Yüzey Dokusu Oluşturma

Kumlama (shot blasting, SBST) ve bilyalı dövme (shot peening, SPST) olarak adlandırılan bu yöntemde Şekil 3.4'teki gibi aşındırıcı parçacıklar belirli bir hızda yüzeye fırlatılırlar. Parçacıklar malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşturarak yüzeye

yapışırlar. Bu şekilde yüzeyde krater ve tepecik oluşur. Maskesiz yöntemde dokular rastgele oluşacağından dolayı pürüzlülükten farklı olmayan bir yüzey oluşmaktadır. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü; bilyanın/kumun parçaya çarpma hızına, çarpma açısına, sertliğine ve büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Maskeli yöntemde ise proses parametreleri dokuların ölçülerini etkilemektedir. Kumlama yöntemi basit ve ucuz bir yöntem olup birkaç yüz mikrometre derinliğinde doku elde edilebilirken bilyalı dövme yönteminde 50 mikrometre derinliğinde doku elde edilebilir (Bitaraf, 2019).

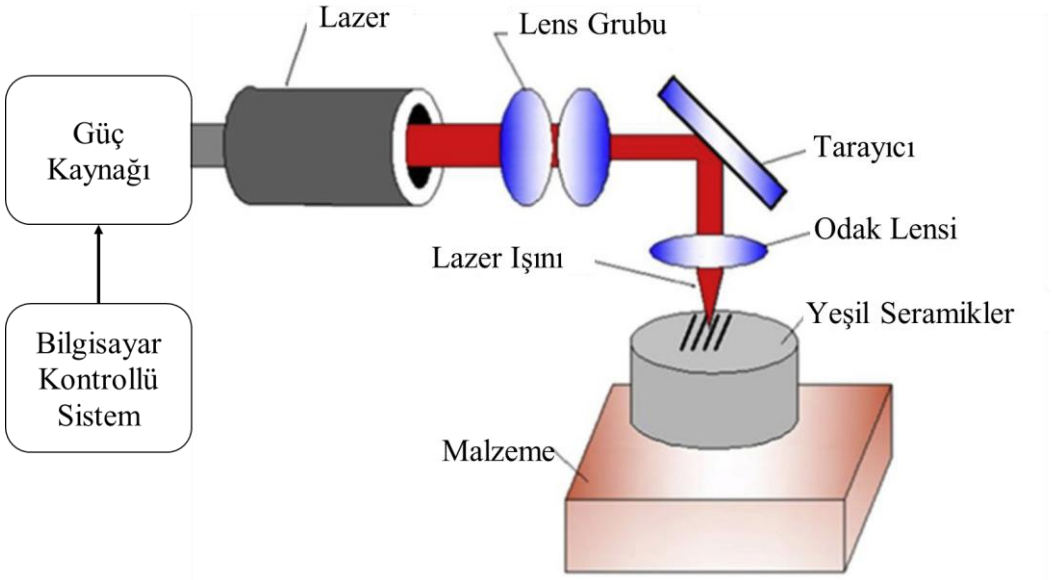


Şekil 3.4. Kumlama yöntemi (Bitaraf, 2019)

3.1.3. Lazer İşleme ile Yüzey Dokusu Oluşturma (LST)

Lazer; kaplama, sertleştirme, işleme ve temizleme gibi önemli prosesler için kullanılan bir yöntemdir. Son yıllarda geliştirilen doku açma tekniklerinden lazer yüzey doku oluşturma yöntemi (LST), yüksek esnekliği, üstün doku ölçü doğruluğu ve iyi kontrol edilebilirliği nedeniyle önemli ilgi görmektedir. Kontrol edilmesi ve kararlı bir proses olması sebebiyle yüzey doku uygulamalarında da son zamanlarda çalışmalarda tercih edilmektedir. Bu yöntemde yüksek enerjili lazer ışınları, malzemede hızlı eritme ve buharlaştırma sürecini başlatarak yüzeyden malzemenin kaldırılmasını sağlar. Şekil 3.5'te tanımlı bilgisayar kontrol sistemi ile istenilen geometri ve ölçülerde dokular oluşturulabilmektedir (Mao ve diğ., 2020). Deney çalışmalarına göre genişlik ve derinlik

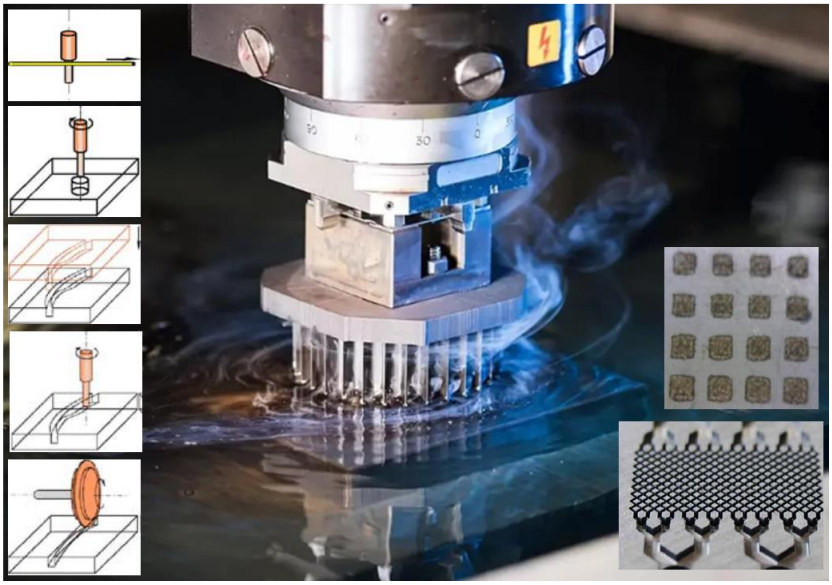
olarak 20 ÷ 1000 µm arasında dokular oluşturulmuştur. İşlem yüzeyden eriterek ve buharlaştırarak malzeme kaldırma yöntemine dayandığı için doku çevrelerinde yanma kraterleri oluşmaktadır. Bu yüzden doku oluşturma sonrası yanan malzemelerin yüzeyden uzaklaştırılması gerekmektedir.



Şekil 3.5. Lazer yüzey dokusu yöntemi (Mao ve diğ., 2020)

3.1.4. Mikroelektrik Deşarjlı İşleme ile Yüzey Dokusu Oluşturma

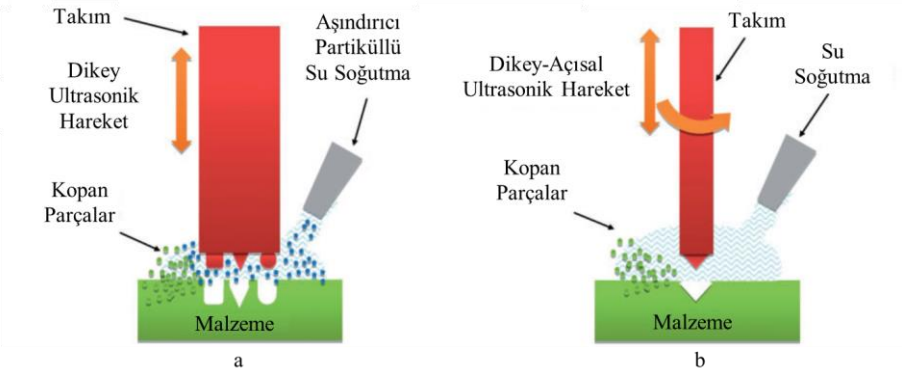
EDM (Electrical Discharge Machining) termal malzeme kaldırma yöntemidir. Elektrod ve parça arasındaki elektriksel boşalma yüzeyden parça kaldırılmasını sağlamaktadır. İletken olmayan bir sıvı prosesin etkinliğini arttırmak için kullanılır. İşleme esnasında uygulanacak voltaj dielektrik sıvı iletkenliğine ve çalışma boşluğuna bağlıdır. Dielektrik sıvının görevleri parça elektrodunu takım elektrodundan izole etmektir. Böylece plazma kanalındaki akım yoğunlu artar, ısınan elektrodu soğutur, elektrik boşalması sonundaki ayrılan parçaları uzaklaştırır ve kısa devreyi önler. Bu yöntem ile 100 µm altında dokular oluşturulabilir, kompleks parçalar üzerinde doku oluşturulabilir; ancak proses yavaştır. Şekil 3.6'da EDM prosesi gösterilmiş olup pürüzlülüğün sürdürülebilir olması önemli avantajlarındandır (Arslan ve diğ., 2016).



Şekil 3.6. EDM yüzey dokusu yöntemi (Uhlmann ve diğ., 2005)

3.1.5. CNC Ultrasonik İşleme ile Yüzey Dokusu Oluşturma (USM)

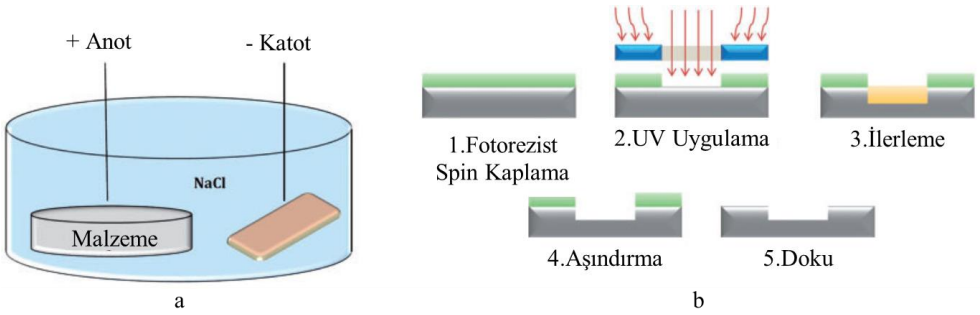
USM (Ultrasonic Machining) serbest aşındırıcı ve bir takımı içeren bir yöntem olup Şekil 3.7.a'da gösterildiği üzere ultrasonik freakansta titreşen takım aşındırıcı malzemeyi yüzeye yönlendirerek yüzeyde gevrek bir kırılma oluşturur. Seramik, cam, grafit ve silikon gibi gevrek malzemeler için uygun bir yöntemdir. Takımın şekli ve ölçüleri doku oluşturacak parçanın şekil ve ölçülerini belirler. 50 µm'den milimetre seviyesine genişlik ile 1-10 µm derinlikte yüksek doğrulukta doku oluşturulabilir. Yöntem işlemesi zor olan sert malzemelere uygulanabilir. Şekil 3.7.b'de gösterildiği üzere Döner CNC USM titanyum alaşımları ve seramik gibi daha sert malzemeler için uygulanır (Arslan ve diğ., 2016).



Şekil 3.7. a) CNC ultrasonik b) döner CNC Ultrasonik işleme (Coblas ve diğ., 2014)

3.1.6. Kimyasal Aşındırma Yöntemi ile Yüzey Dokusu Oluşturma

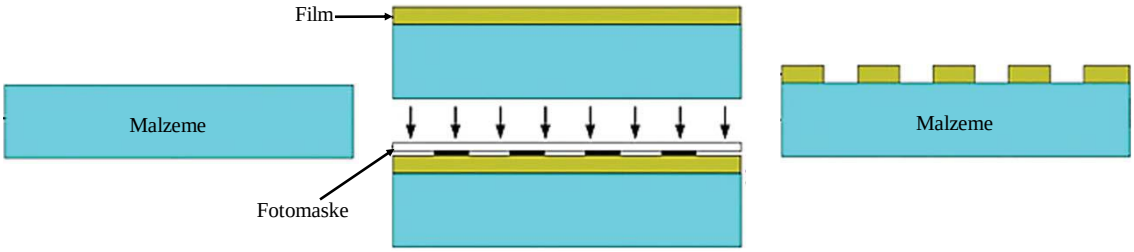
Elektrokimyasal hücre aksiyonu (CET, chemical etching), malzemelerin kimyasal çözülmesi ve korozyon sürecine benzer şekilde yüzeyden malzeme kaldırmak için kullanılır. Bu yöntemde kimyasal ajan, parça kaldırılacak özel bölgelere uygulanır ve malzemenin mekanik özelliklerinden ziyade yüzey topografyasını değiştirir. Yüzeye dağlayıcı sürülen bölge maskelenebilir veya özel aparat ile konumlandırılabilir. Asidin uygulama süresi doku ölçülerini etkiler. 0,5 µm – 1 mm derinlik ve 5 µm – 4 mm genişlikte doku oluşturulabilir. Rulmanlarda, kesme takımlarında ve hidrolik motorlarda sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak için kimyasal doku oluşturma yöntemi kullanılmaktadır. Yöntem Şekil 3.8'de gösterilen baskı(photolithography), kopyalama gibi daha kompleks yöntemlerin bir parçasıdır (Arslan ve diğ., 2016).



Şekil 3.8. a) photolithography yöntemi b) aşındırma prosesi (Coblas ve diğ., 2014)

3.1.7. Elektrokimyasal İşleme Yöntemi Yüzey Dokusu Oluşturma

Bu yöntemde malzeme yüzeyden elektroliz işlemi ile anodik çözülme yoluyla uzaklaştırılır. EDM ve USM yöntemlerindeki gibi elektrokimyasal (ECM, electrochemical) yönteminde de doku işleme şekli elektrodun şekli ile belirlenir. Düşük üretim maliyeti, yüksek verimlilik, ısıdan etkilenen alanın olmaması ve kalıp aşınmasının olmaması ECM'nin diğer yüzey doku oluşturma yöntemlerine göre daha avantajlı olmasını sağlamaktadır. Pürüzlülüğün yüksek olması, nispeten zayıf yorulma özelliği ve keskin köşelerin zor işlenebilirliği yöntemin dezavantajlarındandır. ECM maskeli ve maskesiz şekilde uygulanabilir. Şekil 3.9'da gösterilen maskeli ECM yöntemi fotolitografi yöntemine benzemektedir. Bu yöntem seçici olarak malzeme çözer. Bu yöntemde örnek olarak rulman çeliklerinde 300 µm çapında 5 µm derinliğinde doku oluşturulmuştur (Arslan ve diğ., 2016).



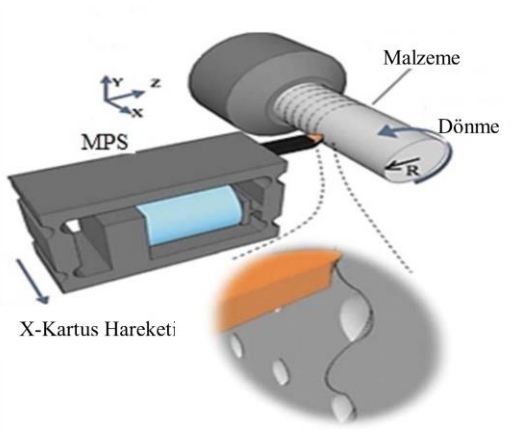
Şekil 3.9. Maskeli ECM yöntemi (Arslan ve diğ., 2016)

3.1.8. Odaklanmış İyon Işını ile Yüzey Dokusu Oluşturma (FIB)

Son zamanlarda FIB (Focused Ion Beam) yöntemi mikro yapılı yüzeylerin üretimi için çekici hale gelmiştir. İyon ışınının yüzeye doğrudan çarpmasıyla desen oluşturulur. Yöntemin avantajı komplike ve pahalı maske yöntemi kullanmadan ve desen trasnfer prosedürü olmadan mikro yapı oluşturabilmesidir. Bu yöntemde örnek olarak 30 µm çapında 11 µm derinliğinde doku oluşturulmuştur (Arslan ve diğ., 2016).

3.1.9. Vibromekanik Yöntem ile Yüzey Dokusu Oluşturma (VMT)

VMT mikro dokular oluşturmak için yeni ve uygun bir yöntemdir. Yöntem dönen parça yüzeyine tutunduğunda salınım hareketi yapan tek nokta kesmeli torna işlemine dayanır. Takım adımının ayarlanabilir salınım hareketi çeşitli doku ölçülerini üretebilir. Şekil 3.10'da gösterilen VMT yönteminde üç derecede kontrol hareketi vardır; parçanın dönme hareketi, takımın parça boyunca hareketi ve servo kontrollü osilasyon hareketi (z ekseni). 2 – 50 µm derinliğinde ve 100 – 500 µm çapında dokular elde edilebilir (Arslan ve diğ., 2016).



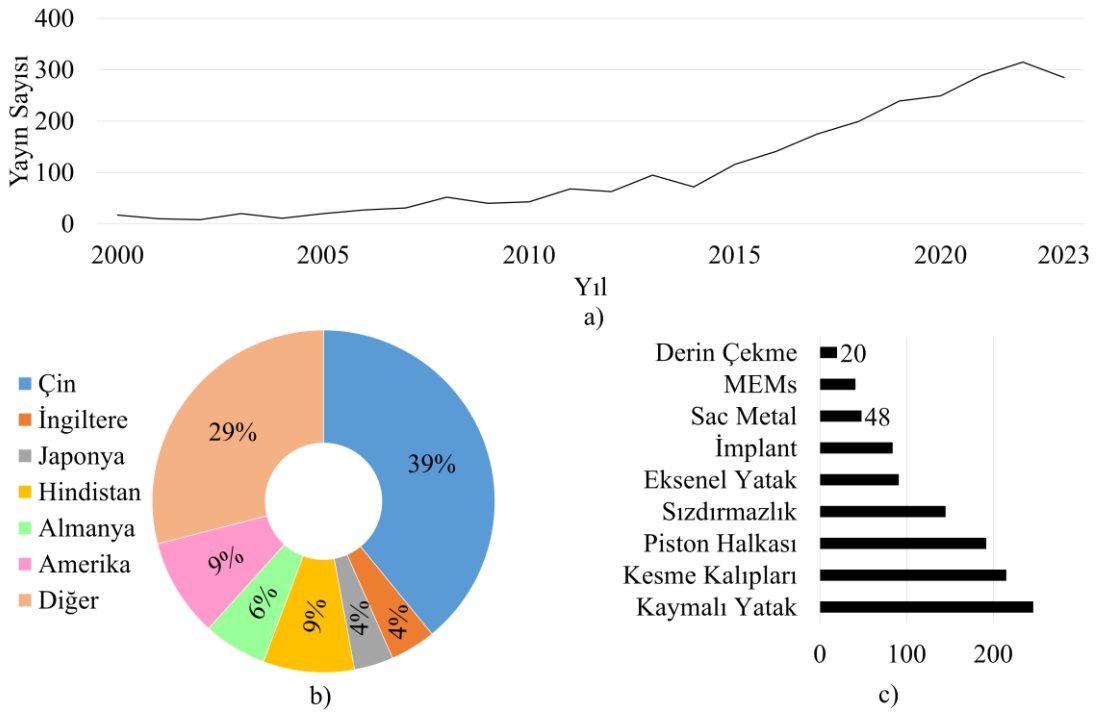
Şekil 3.10. VMT yöntemi (Arslan ve diğ., 2016)

3.1.10. Mikro Taşlama ile Yüzey Dokusu Oluşturma

Basit ve işletme maliyeti düşük olan bu yöntemde küçük boyutlu dokular oluşturmak için yaygın olarak kullanılır. Bunun nedeni, taşlama kesme işleminde mikro taneciklerin kullanılması ve bu nedenle yalnızca az miktarda malzemenin çıkarılmasıdır. Taşlama ile ilgili teknik bir problem bu işlemi yapmak için gerekli olan bir kalıbın olmasıdır (Arslan ve diğ., 2016).

3.2. Literatür Araştırması

Kalıp yüzey dokusu üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre değişimi, çalışmaların yapıldığı ülkeler ve uygulama alanları Şekil 3.11'de belirtilmiştir (URL-2). Her geçen gün birçok alanda dikkatleri üzerine çeken üzerinde çalışmalar yapılan yöntem, ülkemizde ve özellikle sac şekillendirme sektöründe halen gelişime açık bir durumdadır.



Şekil 3.11. a) 2000'den bugüne tribolojik yüzey dokusu üzerine yayınlanan makale sayısı b) farklı bölgelerin katkıları c) uygulama alanları (URL-2:Web of Science, 2024)

Bazı örneklerinin detayları yukarıda bahsedildiği üzere, yüzey doku oluşturma yöntemlerinin faydaları, kısıtlamaları ve uygulama amaçları Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Tablo 3.2'de yüzey dokusu oluşturulan malzemelerin hangi alanlarda kullanıldığı, dokunun ana fonksiyonu ve uygulama alanları özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Yüzey doku oluşturma yöntemlerinin karşılaştırılması (Arslan ve diğ., 2016)

Yöntem	Faydaları	Kısıtlar	Uygulama/Amaç
Lazer Yüzey Dokusu	Yüksek hassasiyet, Ölçüsel doğruluk, Temas kuvveti gerekmez,	Yüzey kusurları, Periyodik yüzey yapılarının oluşumu, Düşük işleme hızı, Yüksek ekipman maliyeti, Bakım ve ayar zorluğu, Isıdan etkilenen alan,	Silindir gömleği/piston halkası, Doku için tribolojik araştırma, Mekanik sızdırmazlıklar, Rulmanlar, Manyetik depolama, Biyomedikal implantlar,
Mikroelektrik Deşarj İşleme	Mekanik proseslere göre düşük işleme kuvveti, Kompleks geometrik şekillerin üretimi, Daha pürüzsüz yüzeyler, Parçada mekanik stresin olmaması, Büyük hassaslık ve takım seçimi,	Düşük malzeme kaldırma oranı, Isıdan etkilenen alan soğuma kaynaklı yeniden katılaşma, Kalıbın kontak problemi kaynaklı doku ölçülerindeki belirsizlikler, Uzun işlem aralıklı düşük pürüzlülük değeri,	Kesme kalıpları, Piston/silindir,
CNC Ultrasonik İşleme	Seramik, cam, grafit ve silikon gibi kırılgan malzemelere uygulanabilir	Malzeme seçimi 3D yüzeylerin işlenmesi için pahalı ve kompleks 5 eksenli CNC makine ihtiyacı	Doku için tribolojik araştırma
Kimyasal Aşındırma Yüzey Dokusu	Mekanik özellikler değişmez, 0 işleme kuvveti, Yüzey hasarı yok, Çelik ve bakır içeren geniş malzeme yelpazesi işlenebilir,	Proses hızı, baskı metodu ve gravür hızına bağlıdır	Kesme kalıpları, Rulmanlar, Hidrolik motorlar,
Elektrokimyasal İşleme	Düşük üretim maliyeti, Yüksek verimlilik, Isıdan etkilenen tabakanın olmaması, Kalıp aşınmasının olmaması,	Yüksek yüzey pürüzlülüğü, Nispeten düşük yorulma özelliği, Keskin köşelerin işlenmesi zor,	Doku için tribolojik araştırma
Odaklanmış İyon Işını İşleme	Maliyetli ve komplike maske ve doku tranfer prosedürü kullanılmadan mikro yapılar oluşturulur, Yüksek hassasiyet, Alt tabakanın yüzeyi üzerinde kısıtlama yok, Düşük yüzey pürüzlülüğü,	Proses hızı düşük, Daha düşük bir voltaj ile 8 nm'ye kadat iner	MEMS
Kumlama/Aşındırıcı Jet İşleme(AJM)	Jet nozullu AJM yönteminde pahalı ve zor maskeleme yoktur	Maskeli AJM prosesi pahalıdır, Kumlama yönteminde sert partikülün şekli, ölçüsü, sertliği ve hızından dolayı dokunun hassas kontrolü zordur	Doku için tribolojik araştırma, Kam/manivela

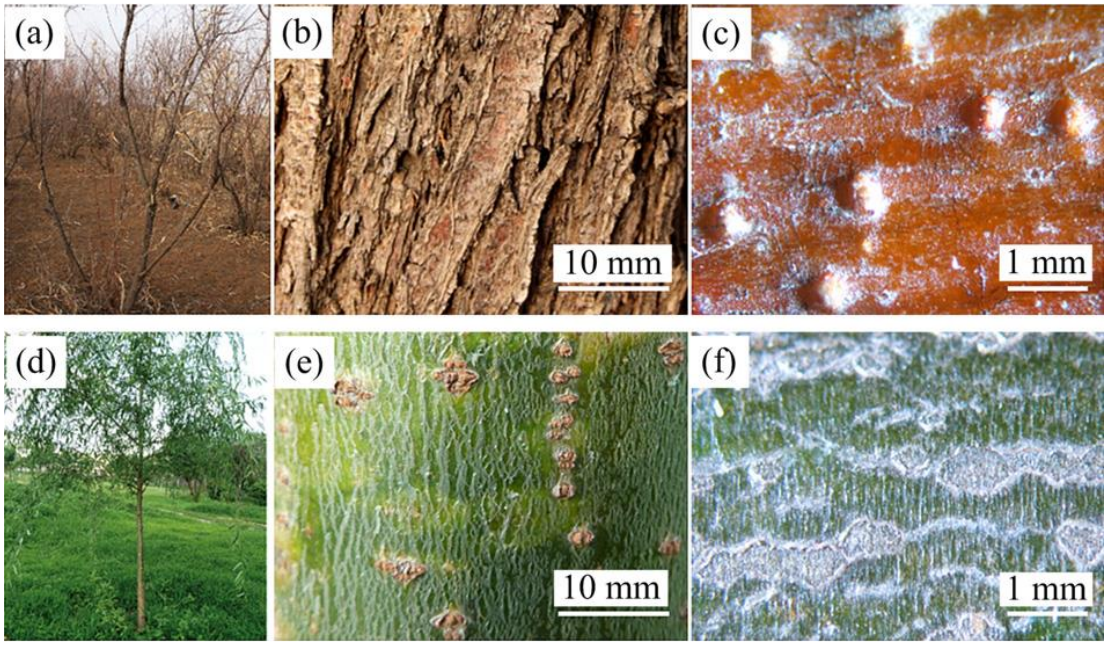
Tablo 3.2. Dokulu yüzeylerin fonksiyonları ve uygulama alanları (Coblas ve diğ, 2014)

Alan	Ana Fonksiyon	Uygulama
Optik	Yansıtıcılık, kırınım, polarizasyon, ışık emilimi, filtreleme	Fresnel lensler, yansıtıcı yol işaretleri, ışık filtreleri, dalga boyuna özel aynalar
Akustik	Ses ve titreşim azaltma	Fren diskleri
Yüzey Enerjisi	Kılcallık, ıslanma, yapışma	Süper hidrofobik, süper oleofobik, kendi kendini temizleyen yüzeyler, boya yapışması, Velcro (bağlanma), yağ/su ayırma, kirlenme önleyici
Mekanik	Sertlik ve yorulma ömrünü arttırma	Sabit diskler, vakumlu aynalar, aşındırıcı işleme takımları (kesme, cilalama, gravür için)
Yağlama	Mikro yatak, parça tutucu, yağlayıcı haznesi, sürtünmenin azaltılması, aşınma direncinin iyileştirilmesi, tribo film oluşumunun desteklenmesi	Rulmanlar, contalar
Hidrodinamik	Pasif karıştırma, sürtünmeyi azaltma (aerodinamik), kabarcıkların çekirdeklenmesi	Mikro akışkanlar, lastik izleri, golf topları
Bioenerji	Doku büyümesi, emilme ve yapışma engellemeye veya destek	Hücre kültürü sistemleri, kılcal elektroforez, biyo-MEMS, kalça implantları, epoksi kaplamaların (diş uygulamaları) pürüzlü yüzeylere iyileştirilmiş yapışması
Termodinamik	Isı transferi	Sprey mekanizmaları, Isıtma

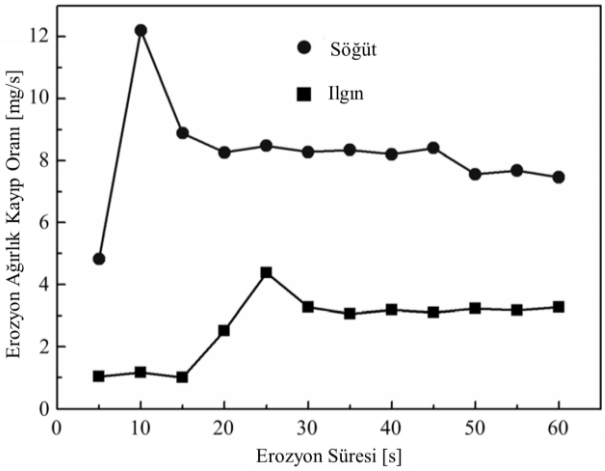
Yüzey dokusu, tribolojik performansı arttırmak için kullanılan inovatif bir yöntem olarak önemini her geçen gün arttırmaktadır. Mekanik sistemlerde meydana gelen sürtünme ve sürtünmeye bağlı aşınma, sistemin ömrünü ve performansını azaltmakta ve bakım maliyetlerini arttırmaktadır. En önemlisi yüzeyden aşınma sonrası kopan partiküller,

kalıp yüzeyine yapışarak ardışık üretim sonrasında ürün yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle sürtünmeyi kontrol altında alarak kayıpları azaltmak ve yok etmek önemli bir hedeftir. Örneğin Çin'de 100 milyar yuanlık bir parasal kaynak (Gayri Safi Yurtiçi Hasılanın %1,55'i) sürtünme ve aşınma nedeniyle kaybedilmektedir (Ibatan ve diğ., 2015). Literatürde yüzey dokuları ile ilgili kuru ve sıvı sürtünme durumlarındaki farklı uygulamalarda sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan birçok çalışma bulunmaktadır.

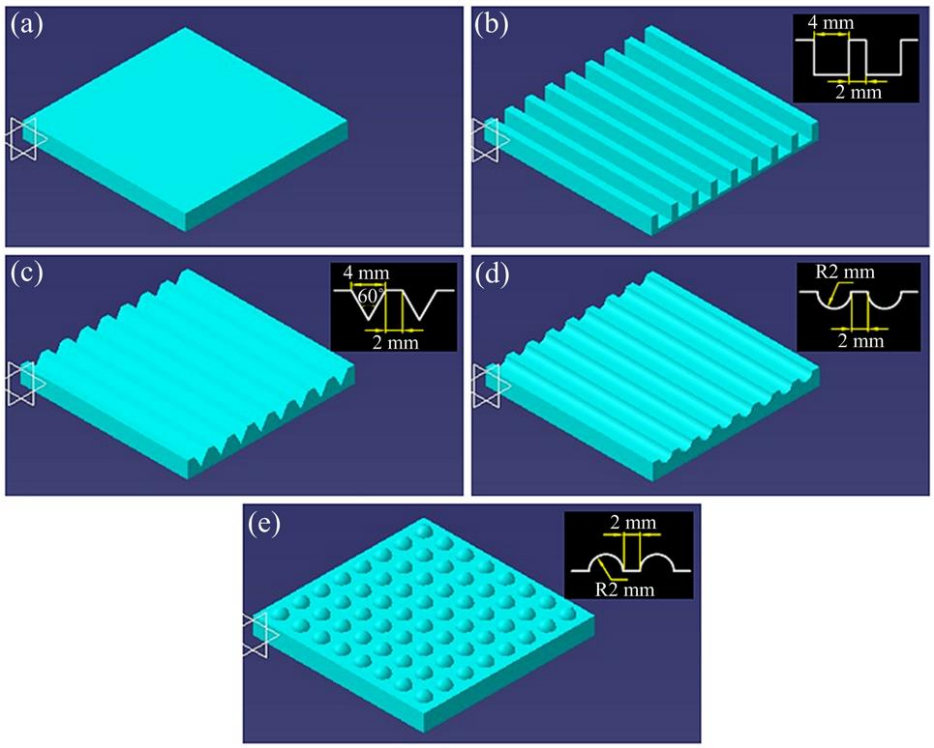
Han ve arkadaşları, tabii sistemleri analiz etme yöntemi ile yüzey dokusunun etkisini incelemişlerdir. Şekil 3.12'de gösterilen ılgın ve söğüt ağaçlarının gövdeleri üzerine araştırma yapmışlardır. Yapılan araştırma sonucunda, kurak ve yarı kurak bölgelerde yetişen bir bitki olan ılgın ağacının son derece etkili ve sağlam erozyon önleyici yüzey desenleri geliştirerek fırtınalı koşullara uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Ilgının bu yüzey özelliği ile rüzgar-kum karışımı erezyonuna karşı yüzeyleri yalnızca küçük çiziklere maruz kalmaktadır. Bunun sebebinin ise yüzeydeki dokuların parçacıkları tutarak çarpma hızını azaltmasından dolayı olduğu düşünülmüştür. Ilgın ve söğüt ağaçlarının yüzey dayanımları, Finnie metoduna göre yapılan hesaplamalarda erozyon ağırlık kayıp oranları ile Şekil 3.13'te verilmiştir (Han ve diğ., 2013).



Şekil 3.12. Ilgın ve söğüt ağaçlarının yüzey morfolojileri: a) Ilgın ağacı, b) ılgın ağacının gövdesindeki oluklar c)çıkıntılar d) söğüt ağacı; e) gövdesi f) dal yüzeyi (Han ve diğ., 2013)



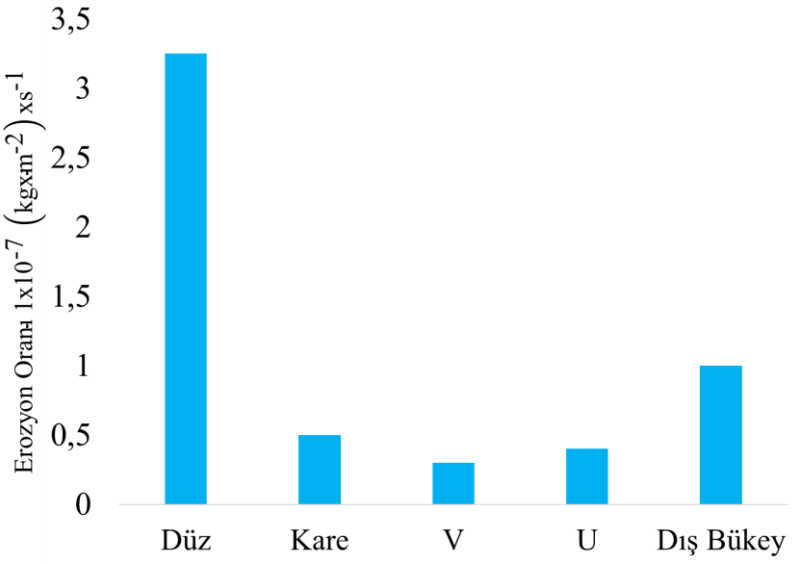
Şekil 3.13. Ilgın ve söğüt ağaçları dal kabuklarının erezyon ağırlık kayıp oranları (Han ve diğ., 2013)



Şekil 3.14. Ilgın ağacı biyonik modelleri a)düz b)kare c)V d)U e)dışbükey (Han ve diğ., 2013)

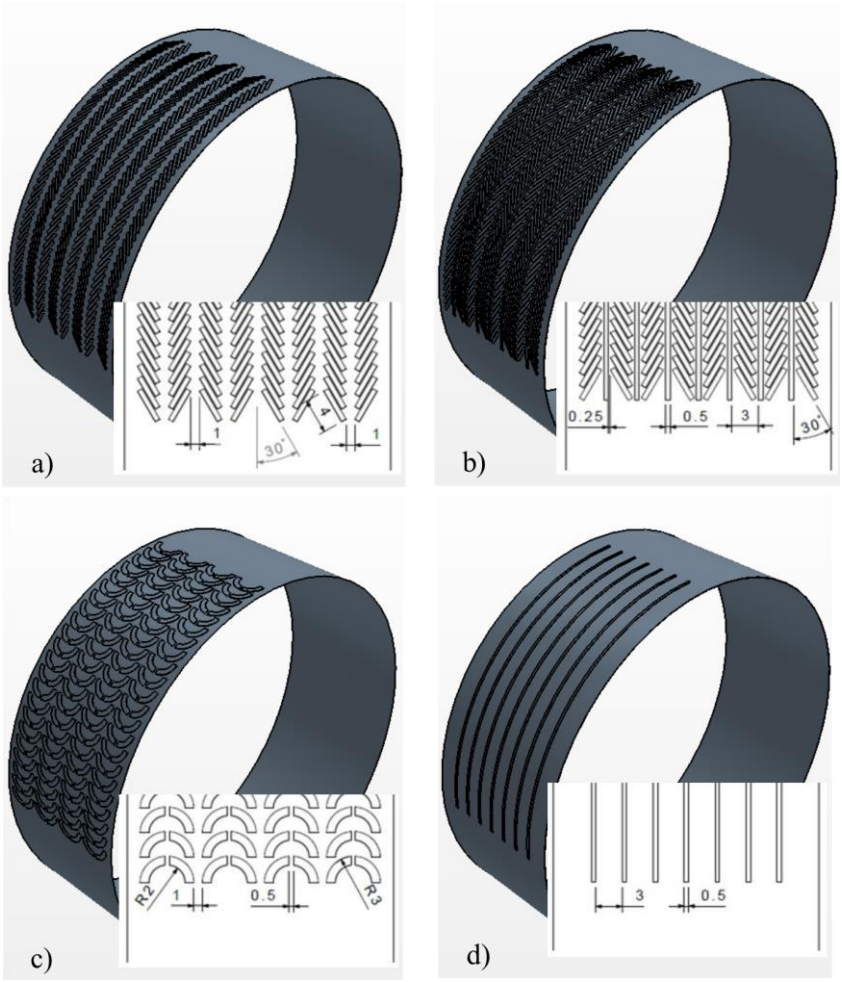
Tabii sistemin analizi sonrasında biyonik modeller üzerinde Şekil 3.14'te gösterilen dokular oluşturulmuştur. Biyonik numunelerin ve biyonik santrifüj fan kanatlarının erozyon aşınma davranışına ilişkin simülasyon ve deney sonuçları, Şekil 3.15'te gösterildiği üzere V tipi oluklu biyonik yüzeyin en iyi erozyon direncini sergilediğini göstermektedir. Optimum parametrelere sahip santrifüj fan kanatları üzerindeki biyonik

yüzey, erozyon önleme özelliğini etkili bir şekilde %28,97 oranında arttırabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, helikopter rotor kanatları, uçak pervaneleri, roket motoru nozülleri ve düzenli olarak erozyon nedeniyle aşınan borular gibi kir ve kum partikülü ortamında çalışan hareketli parçaların erozyon önleme performansını iyileştirme çalışmalarında biyonik uygulama için bir yol göstermektedir (Han ve diğ., 2013).



Şekil 3.15. Biyonik modellerin aşınma oranları (Han ve diğ., 2013)

Emre Has, dizel motorlarda yaygın olarak kullanılan kaymalı yatak üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. GT-Suite programı kullanılarak kaymalı yatak bir boyutlu modeli oluşturulmuştur. Daha sonra Simcenter Star-CCM+ programında geometriler parametrik olarak oluşturularak yapılacak analizlerde kullanılacak tasarımların modellemesi kolaylaştırılmıştır. Aynı programda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak radyal kaymalı yataklar incelenmiş ve geçmişte yapılan bazı deneysel çalışmalar ile de sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modellerin doğrulanması sonrasında sürtünme momentini iyileştirici desenler üzerinde çalışmalar gerçekteştirilmiştir. Çalışmada Şekil 3.16'da görüldüğü gibi dört farklı desenler uygulayarak hidrodinamik performansını iyileştirmeyi hedeflemiştir. Şekil 3.16'da gösterilen dokular yatağın 90°'lik kısmını taramaktadır. Deney çalışmaları kapsamında dokuların yüzey kapladığı açının değiştirilmesi, doku yoğunluk ve derinliğinin değiştirilmesi üzerinde farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir.



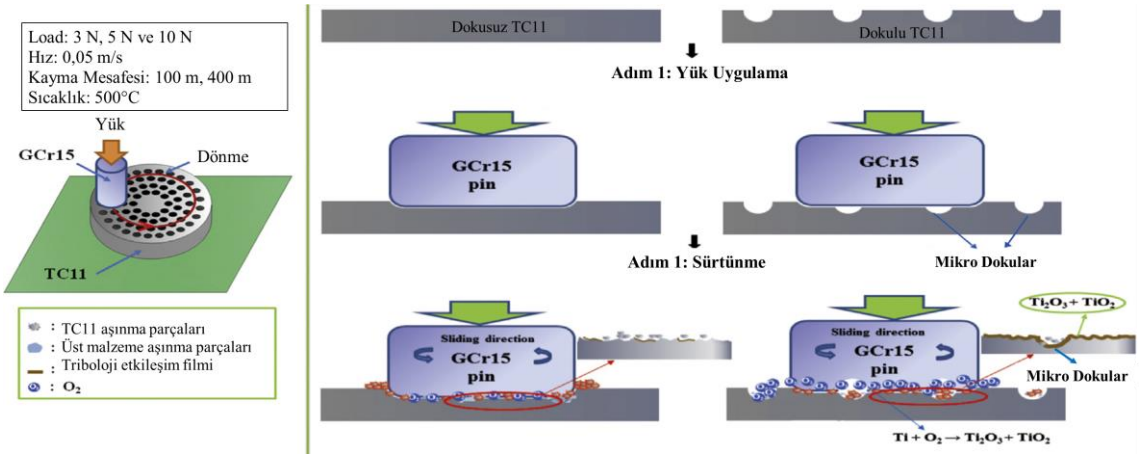
Şekil 3.16. Dört farklı model görselleri (Has, 2020)

Çalışma sonucunda:

-Yüzey desenlerinin şekilleri, sürtünme momenti üzerinde etkili olmaktadır.
-Radyal yatak üzerine uygulanan desenlerin açısal olarak yerleşimi sürtünme momentinin azalmasını sağlamaktadır Radyal yatağın yük bölgesinin karşı tarafına yerleştirilen 180° desen sürtünme momenti açısından en iyi sonucu vermektedir.
-Uygulanan desenlerin derinliği sığ ve derin olacak şekilde film kalınlığına bağlı olarak incelenmiştir. Desen derinliği arttıkça sürtünme momenti iyileşmektedir.
-Desenlerin uygulama sıklığının artması sürtünme momentini iyileştirmektedir.
-Sürtünme momenti üzerinde etkili olan bir diğer parametre ise desenlerin yatak ekseni ile yaptığı açıdır. Yatak eksenine olan açı azaldıkça sürtünme momenti düşmektedir (Has, 2020).

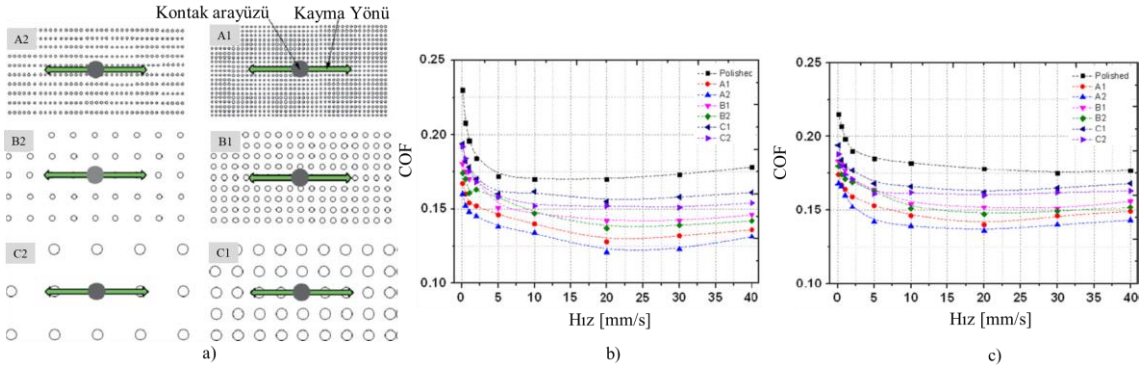
Kuru sürtünme durumunda genel olarak örneklere Mao ve ark. tarafından yapılan derleme çalışmalarında yer verilmiştir. Mao ve ark. yüzey dokusu oluşturma tekniklerinden son zamanlarda popüler olan lazer yüzey dokusu üzerine kapsamlı araştırma yapmışlardır. Lazer doku oluşturma yöntemlerinden üç farklı yöntemi ve işleme parametreleri üzerine çalışmışlardır. Testler ball-on-disk test düzeneğinden gerçekleştirilmiştir. Derleme çalışması içindeki önemli olan örneklere bakıldığında doğrudan lazer işleme ile oluşturulan gruplardan dairesel dokulu Nikel bazlı kompozit, dairesel dokulu Nitrür çeliği, lineer dokulu Al_2O_3/TiC kompozit, dairesel dokulu dökme demir ve dairesel dokulu Ti-6Al-4V numuneleri için kuru sürtünme durumunda sürtünme katsayılarının sırasıyla %50, %37,5, %16,7, %57,9 ve %40 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir; ancak dairesel dokulu 304 paslanmaz çeliğinde ise %272,3 oranında artmıştır (Mao ve diğ., 2020).

Kuru sürtünme durumu, özellikle yağlayıcıların kullanılamadığı yüksek sıcaklıkta çalışma şartlarında da geçerlidir. Sun ve ark., 500°C sıcaklık şartlarını simüle edecek şekilde THT07-135 pin-on-disk tribo test cihazını kullanmıştır. Bir adet düz yüzey ve lazer yöntemi ile açılan üç farklı çapta (60 µm, 180 µm ve 300 µm) ve üç farklı doku yoğunluğunda yüzey dokulu TC11 Titanyum alaşımı, 0,05 m/s hızda; 3 N, 5 N ve 10 N normal yükte; 100 m ve 400 m kayma mesafesinde test edilerek sonuçlar incelenmiştir. Dokuların Şekil 3.17'de gösterildiği üzere tribooksitleri dokusuz yüzeylere göre daha iyi hapsederek aşınma direncini arttırdığı ve küçük çaplı ve yüksek yoğunluklu dokulu yüzeyin TC11'in tribolojik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Sun ve diğ, 2015).



Şekil 3.17. Dokulu ve dokusuz yüzeylerin aşınma mekanizmaları (Sun ve diğ, 2015)

Sıvı sürtünme durumunda ise dokular yağ rezervi görevi görerek hidrostatik yağ film kalınlığını arttırarak yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Amanov ve ark., pin-on-disk tribo test cihazı kullanarak squalene (0,858 gr/cm^3, 0,012 PaS, 25°C sıcaklıkta) yağı ile sıvı sürtünme testleri üzerine çalışma yapmışlardır. 50 µm, 100 µm ve 200 µm çaplarında, 4 µm derinliğinde dairesel dokular %20 ve %5 doku yoğunluğunda yüzeylere lazer işleme yöntemiyle açılmıştır. Ttibolojik testler 5N ve 20N normal yük altında, 10 mm strokta ve 600 çevrim ile yapılmıştır. Şekil 3.18.a'da gösterilen dokulardan, A1, A2 numunelerinin çapları 50 µm, doku merkezleri arası mesafe sırasıyla 100 µm ve 200 µm, doku yoğunlukları sırasıyla %20 ve %5, en boy oranı 0,08, çıkıntı yüksekliği 3,5 µm. B1, B2 numunelerinin çapları 100 µm, doku merkezleri arası mesafe sırasıyla 200 µm ve 400 µm, doku yoğunlukları sırasıyla %20 ve %5, en boy oranı 0,04, çıkıntı yüksekliği 3,5 µm. C1, C2 numunelerinin çapları 200 µm, doku merkezleri arası mesafe sırasıyla 400 µm ve 800 µm, doku yoğunlukları sırasıyla %20 ve %5, en boy oranı 0,02, çıkıntı yüksekliği 4,2 µm. Şekil 3.18.b ve Şekil 3.18.c'de görüldüğü üzere dokulu yüzeylerin sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi düz parlatılmış yüzeye göre daha düşük çıkmıştır. Bir önceki çalışmanın aksine doku yoğunluğu küçük (%5) olan küçük çaptaki dokuların sürtünme katsayısı düşük çıkmıştır. Yapılan benzer çalışmada lineer dokulu semente karbür ve dairesel dokulu T8 çeliği üzerinde yapılan sürtünme testleri sonrası sürtünme katsayıları sırasıyla %46,1 ve %80,1 oranlarında azaltılmıştır (Amanov ve diğ., 2013; Mao ve diğ., 2020).

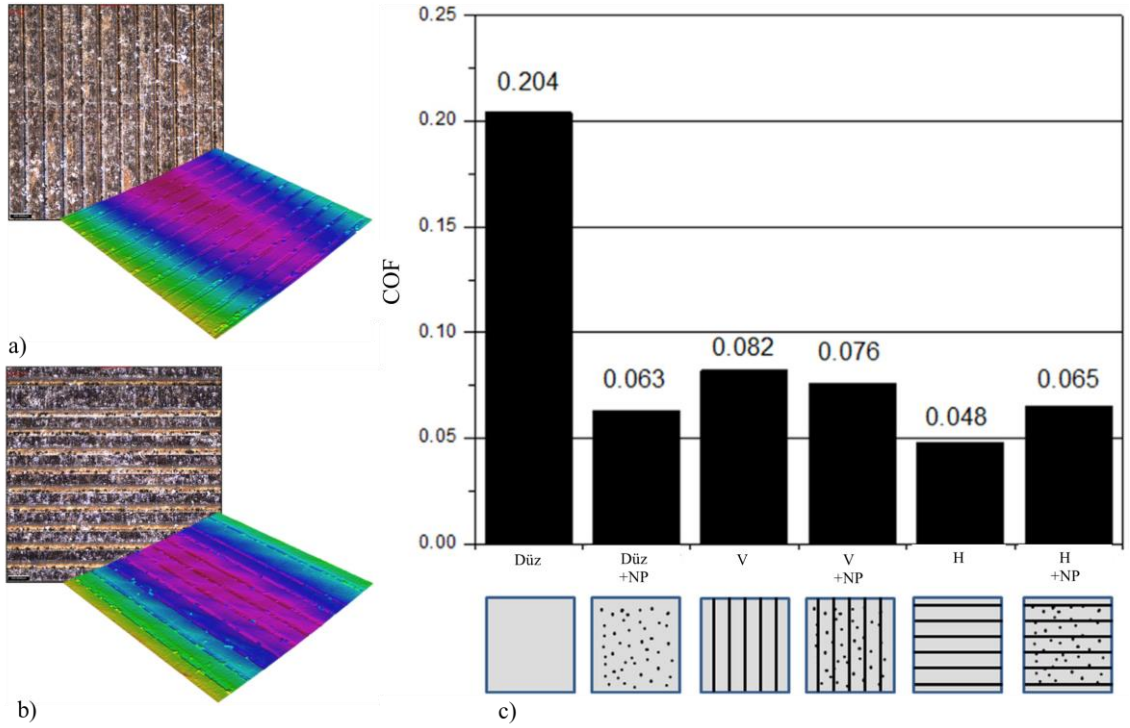


Şekil 3.18. a) farklı dokuların kontak arayüzleri, b) 5N COF sonuçları, c) 20N COF sonuçları (Amanov ve diğ., 2013)

Zhang ve ark., 10 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde silindir Cr12 malzemesi üzerine kimyasal aşındırma yöntemi ile doku oluşturmuşlardır. Kimyasal banyo olarak distile su, demir florür ve nitrik asit karışımı farklı sürelerde kullanılarak dokular oluşturulmuştur.

Sürtünme testleri suda çözülebilir emülsiyon yağı kullanılarak yüzey kontak basıncı 9 MPa, 18 MPa, 36 MPa, 54 MPa ve 72 MPa olarak belirlenmiştir. Geliştirdikleri bir sistemin çekme cihazına bağlanması ile testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre, yüzey dokusunun yüksek yük koşullarında tribo çiftleri arasındaki sürtünme katsayısını ortalama %35,6 oranında azalttığı gözlemlenmiştir; ancak test sistemi tam olarak gerçek koşulları simüle etmemektedir. Yük küçük olduğunda, yük esas olarak katı temas alanı tarafından taşınır ve soğuk kaynak olgusu nedeniyle, yüzey dokulu numunenin sürtünme katsayısı, yüzey dokusu olmayan numuneden daha büyüktür. Yük büyük olduğunda, yük esas olarak gerçek temas alanı ve kapalı yağlama yağı dokusu tarafından taşınır ve yüzey dokulu numunenin sürtünme katsayısı, yüzey dokusu olmayan numuneninkinden önemli ölçüde daha küçüktür (Zhang ve diğ., 2020).

Derin çekme prosesinde yüzey dokusu kullanımı ile ilgili literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Maldonado ve ark., D2 çeliği üzerine lazer yüzey dokusu ile oluşturdukları 61 µm genişliğinde, 4 µm derinliğinde, doku merkezleri arası 185 µm olan Şekil 3.19.a ve Şekil 3.19.b'de gösterilen yatay (dönme eksenine paralel-H) ve dikey (dönme eksenine dik-V) kanallara %0,05 oranında yarı küre 135-165 nm boyutlarında 974 HV sertliğinde TiO_2 nano parçacıklar (NP) dağıtarak sıvı sürtünme durumundaki sinerjik etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Tribolojik test için T-05 blok-on-disk tipi test cihazı kullanılmıştır. Çalışmalarının ana teması derin çekme prosesi olsa da bu test tipi, derin çekme prosesinde sac malzeme ve kalıp arasındaki etkileşimi bire bir modelleyen bir sistem değildir. Test sonuçlarına göre aşınma dayanımı en iyi olan numuneler sırasıyla yatay kanal+nanopartikül püskürtme ve düz yüzey+nanopartikül püskürtme numuneleridir. Sürtünme katsayısındaki en iyi düşüş sırasıyla yatay kanal ve düz yüzey+nanopartikül püskürtme numuneleridir. Sürtünme katsayısı %76 oranında, aşınma dayanımı %89 oranında iyileşmiştir. Lazer dokunun tribolojik performansı iyileştirdiği bilinmektedir partikül takviyesi ile yağlayıcı etkinin de aşınma ve sürtünmeyi iyileştirmesi sinerjik etkisini göstermektedir (Maldonado ve diğ., 2019).



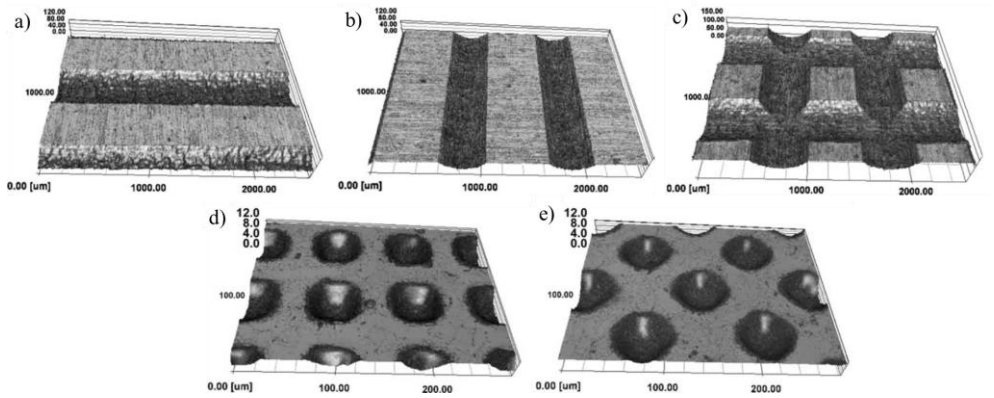
Şekil 3.19. a) yatay-H, b) dikey-V doku, c) COF sonuçları (Maldonado ve diğ., 2019)

Franzer ve ark., 3 eksenli CNC makinesinde hidrostatik küresel mafsallı takım ile (rolling) enine, boyuna ve zigzag dokular oluşturmuşlardır. Çalışma konuları derin çekme olsa da testleri şerit çekme test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada lokal sürtünme artışına odaklanılmış olup sürtünmenin doku geometrisine, ölçüsüne ve sac giriş özelliklerine bağlı olduğu yorumlanmıştır. Testlerde soğuk haddelenmiş derin çekmeye uygun DC04 sac malzemesi ile dual fazlı DP600 sac malzemesi kullanılmıştır. 10 mm/sn, 100 mm/sn çekme hızlarında ve 2 MPa, 10 MPa kontak basınçlarında kuru ve PN226 yağı kullanılarak sıvı sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. DC04 malzemesinde kuru ve sıvı sürtünme durumlarında sürtünme katsayısı en düşük düz yüzey olan numunelerinde çıkmıştır (0,09 ve 0,12). DP600 malzemesinde kuru sürtünme durumunda zigzaglı yüzey(0,11); sıvı sürtünme durumunda ise düz yüzey(0,13) sürtünme katsayısı en düşük çıkmıştır (Franzer ve diğ., 2010).

Vrbka ve ark., bilyalı dövmenin (shot peening), karma yağlama koşulları altında yuvarlanma teması yorulmasını ve yağlayıcı film kalınlığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bilya malzemesi 0,07 ve 0,11 mm çaplarında cam küreler kullanılmıştır. Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin sertliği artsa da yuvarlanma teması ömrüne pozitif etkisi olmamıştır; ancak çalışma sonucunda yağ filmine ve çalışmaya uygun oluşturulmuş

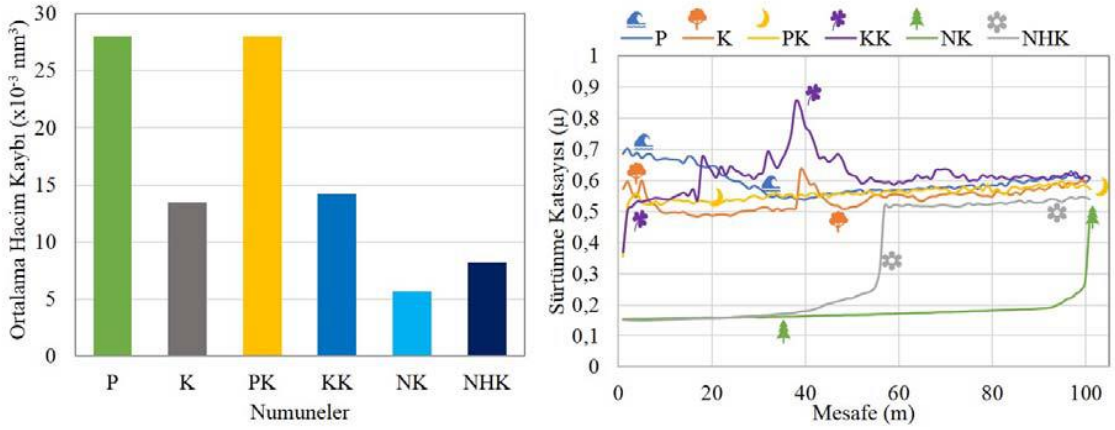
yüzey dokusu, karışık yağlamalı yuvarlanan/kayan kontaklarının temas yorulma ömrünün ve yağ filmlerinin verimliliğinin arttıracağı çıkarımı yapılmıştır (Vrbka ve diğ., 2011).

Nakano ve ark., 230 HV sertliğinde dökme demir (ASTM Sınıf 35) üzerine kumlama (shot blasting) ve makine ile işlemi yöntemleri ile oluşturdukları Şekil 3.20'de verilen 500 µm genişliğinde ve 50 µm derinliğinde yatay/dikey lineer dokular; yatay ve dikey kanalların açıldığı mesh dokular ve 60 µm çapında 6-10 µm derinliğinde yarı küre dokular ile testler gerçekleştirilerek düz yüzey sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Testler pin-on-blok tribometre test cihazı ile yapılmıştır. Test sonuçlarına göre lineer dokuların sınır yağlama oluşturdukları için sürtünmeyi arttırdığı; yarı küre dokuların ise bölgesel hidrodinamik yağ etkisi sağladığı için sürtünmeyi azalttığı gözlemlenmiştir (Nakano ve diğ., 2007).



Şekil 3.20. a) dikey lineer, b) yatay lineer, c) paralel mesh, d) yatay küre, e) 45° küre dokular (Nakano ve diğ., 2007)

Balyalı, tez çalışması kapsamında AISI 316 ve Ti6Al4V malzemelerine 0,006, 0,08 ve 0,010 A olmak üzere üç farklı Almen şiddetinde bilyalı dövme işlemi uygulandıktan sonra, numuneler disk tipi test cihazında kuru ve sıvı sürtünme durumunda test edilmiştir. Kuru sürtünme durumunda paslanmaz çelik numunelerde sürtünme katsayısında artış görülmüştür (0,4 – 0,7). Kuru sürtünme durumunda titanyum alaşımı sürtünme katsayısında büyük bir değişim olmamıştır. Sınır sürtünme durumunda ise paslanmaz çelik malzemenin sürtünme katsayısı kayma hızı arttıkça azalmıştır (0,1 – 0,25). Titanyum alaşımında da benzer sonuç elde edilmiştir. Özetle bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin malzeme özelliklerinin önemli derecede etkilediği, tribolojik davranışlarında etkin rol oynadığı sonucuna varılmıştır (Balyalı, 2015).



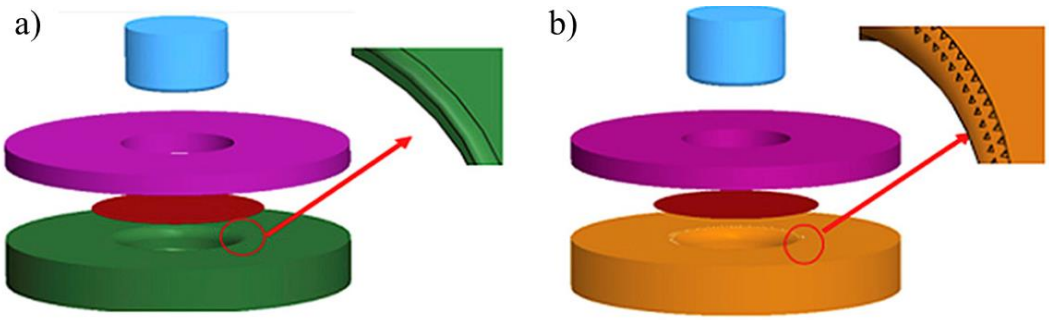
Şekil 3.21. Ortalama hacim kaybı ve sürtünme katsayısı grafikleri (Gül ve diğ., 2023)

Gül ve ark., magnetron püskürtmeli Tantal-Oksit kaplama öncesi uygulanan alkali, alkali-asit ve kumlama yüzey işlemlerinin 7075 Alüminyum alaşımının aşınma davranışına etkilerini incelemişlerdir. 10 mm x 24 mm x 3 mm ölçülerindeki malzemeler SiC zımpara ile 2500 gride kadar zımparalanıp solüsyonlar ile parlatılmıştır. Kumlama işlemi ise 400 µm çapında Al_2O_3 kum ile 20 mm mesafeden 0,6 MPa basınç ile gerçekleştirilmiştir. Kaplanmamış sadece parlatılmış (P), kaplanmamış sadece kumlanmış (K), 50°C'de %5 NaOH çözeltisinde 3 dakika bekletilmiş (PK), 50°C'de %5 NaOH çözeltisinde 3 dakika bekletilmiş, yıkandıktan sonra %50 HNO_3 çözeltisinde oda sıcaklığında 1 dakika bekletilmiş (NH), parlatılmış ve kaplanmış (PK), kumlanmış ve kaplanmış (KK), 50°C'de %5 NaOH çözeltisinde 3 dakika bekletilmiş ve kaplanmış (Alkali işlem görmüş numune) (NK) ve 50°C'de %5 NaOH çözeltisinde 3 dakika bekletilmiş, yıkandıktan sonra %50 HNO_3 çözeltisinde oda sıcaklığında 1 dakika bekletilmiş ve sonrasında kaplanmış (Alkali-Asit işlemi görmüş numune) (NHK) şeklinde sekiz farklı numune üzerinde testler yapılmıştır. Şekil 3.21'deki test sonuçları incelendiğinde özellikle kaplamasız kumlanmış yüzeyin (K), aşınma davranışı ve sürtünme katsayısı kumlanmış kaplanmış yüzeye (PK) göre daha iyi çıktığı gözlemlenmiştir (Gül ve diğ., 2023).

Hu ve ark., MoS_2 katı yağlayıcı kaplamaların tribolojik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 396 HV sertliğinde AISI 304 paslanmaz çelik üzerine lazer doku oluşturma yöntemiyle 120 µm çapında 14 µm derinliğinde yarı küre dokular açılmıştır. Dokular sırasıyla %8,5, %13,5, %24 ve %43 doku yoğunluğunda yüzeye açılmıştır. Sonrasında sıcak presleme ile yüzeye MoS_2 kaplanmıştır. MoS_2 katı yağlayıcıların

sürtünme katsayılarının 0,1'in altında olduğunu, %8,5 doku yoğunluğu olan numunenin aşınma direnci düz yüzeye göre daha iyi olduğu belirlenmiştir (Hu ve diğ., 2012).

Chen ve arkadaşları, Şekil 3.22'de gösterilen derin çekme kalıbı üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Derin çekme dişi kalıbının Şekil 3.22.b'de gösterilen radius bölgesine, lazer işleme yöntemiyle yüzey dokusu oluşturarak yağ altında tribolojik özelliklerini simülasyon ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada sac malzemesi 6061 Aluminyum alaşımı, doku oluşturulacak kalıp alt parçası ise Cr12MoV malzemesi kullanılmıştır. Düz ve dokulu olmak üzere iki adet kalıp seti hazırlanmıştır, taşlanan yüzeyler Ra 0,3 µm pürüzlülük değerine getirilmiştir. Yağlayıcı olarak poli-alfa-olefin (54 cSt, 40°C sıcaklıkta) kullanılmıştır.

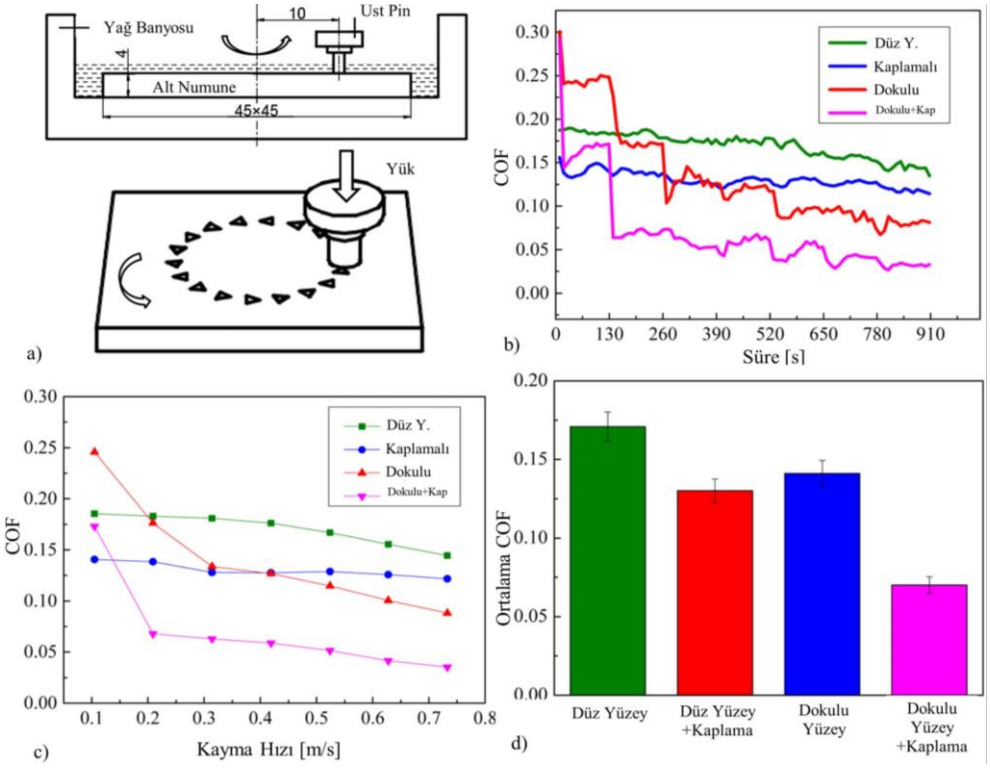


Şekil 3.22. a) düz kalıp, b) üçgen dokulu kalıp (Chen ve diğ., 2018)

Simülasyon çalışmalarında farklı sürtünme katsayısı değerleri girilerek parça flanş kısmında ve alt radius bölgesindeki incelme sonuçları gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre düz kalıpta, parça alt radius kısmında %1,5 olan incelme değeri, lazer işleme ile doku açılan kalıp ile iyileştirilerek parçanın şekillendirme yeteneği arttırılmıştır. Bu durum dokuların tribolojik etkilerini göstermektedir. Deney çalışmalarına göre ise dokuların sürtünmeyi önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. 400 parça sonrası dokulu yüzeyde daha az yüzey kusurları gözlemlenmiştir (Chen ve diğ., 2018).

Chen ve arkadaşları, TiN kaplamalı kalıp çeliği üzerine açılan üçgen dokuların sürtünme ve aşınma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. 50-55 HRC sertlikte 50Cr kalıp çeliği kaplandıktan sonra lazer işleme yöntemi ile 550 µm kenar ölçülerinde ve 4,6 µm derinliğinde üçgen dokular açılmıştır. Lazer işleme sonrası parça tekrar taşlanarak yüzeydeki yanma olukları temizlenmiştir. Bu işlem sonrası Ra yaklaşık 0,15 µm

ölçülmüştür. Sürtünme ve aşınma testleri Şekil 3.23.a'da gösterilen pin-on-disk tipi tribometre ile farklı yük ve kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yağlayıcı olarak ise SE15W-40 (dinamik viskozite 0,293 Pas) kullanılmıştır. Şekil 3.23.d incelendiğinde düz yüzeylerde kaplamalı yüzey; dokulu yüzeylerde ve deney grubu genelinde kaplamalı dokulu yüzey en iyi tribolojik performansı göstermiştir.



Şekil 3.23. a) test düzeneği, b) kayma süresine göre, c) kayma hızına göre, d) ortalama COF değerleri (Chen ve diğ., 2016)

Literatürde yüzeye doku açmanın tribolojik uygulamalardaki olumlu etkilerine yönelik birçok çalışma olmasına rağmen elde edilen sonuçların etkinliğinin nedenleri üzerine çalışmalar halen devam etmektedir. Fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal üretim teknolojileri ile oluşturulan dokuların yukarıda da özetlendiği gibi mekanik sistemlerin verimini arttırdığı birçok örnek olmasına rağmen uygun geometride, ölçülerde ve yoğunlukta açılmayan dokular aksine sistemin sürtünme katsayısını arttırarak aşınma direncinin düşmesine neden olabilmektedir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında yüzey dokusu oluşturmanın derin çekme prosesi tribolojik performansına etkilerini incelenmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere derin çekme prosesinde yaygın olarak kullanılan sac metal ve kalıp malzemesi seçilmiştir. Sac malzeme yüzey özellikleri sabit bırakılarak kalıp malzemesinin yüzeylerine bilyalı dövme, kimyasal aşındırma ve lazer işleme yöntemleri ile farklı geometri ve ölçülerde yüzey dokuları oluşturulmuştur. Kalıp numunelerin içinden seçilen belirli dokulu gruplara fiziksel buhar biriktirme (PVD, Physical Vapor Deposition) yöntemi ile farklı kaplama türleri uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler çalışma kapsamında tasarlanan tribolojik test cihazında kuru ve sıvı sürtünme durumlarında test edilerek düz yüzey sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ticari ürün muadili üzerine açılan doku ile üretilen parça ise düz yüzeyli kalıp ile üretilen parçaya göre karşılaştırılmıştır.

4.1. Malzeme ve Hazırlama Teknikleri

Çalışma kapsamında derin çekme prosesine uygun şekillendirme özelliklerine sahip sıcak haddelenmiş DD13 (EN 10111:2008) sac metal malzeme ile derin çekme kalıplarında yaygın olarak kullanılan 1.2379 (EN X155CrMoV12) soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. DD13 sac metal ve 1.2379 kalıp malzemelerinin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1'de; mekanik özellikleri ise Tablo 4.2'de belirtilmiştir. Sac metal numuneler, 20 mm x 20 mm x 5 mm ölçülerinde; kalıp numuneleri ise 60 mm x 40 mm x 10 mm ölçülerinde tel erezyon prosesi ile kesilerek hazırlanmıştır. Kalıp malzemesi 1040°C sıcaklıkta östenitleme (vakum sertleştirme) ve ardışık üç meneviş işlemleri sonrası 620 – 660 HV sertlik değerine ulaşmıştır. Sonrasında satıh taşlama makinesi ile yüzeylerin Ra ortalama pürüzlülük değerleri 1 μm değerine getirilmiştir.

Tablo 4.1. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin kimyasal bileşenleri (Uçakkuş ve diğ., 2024)

Malzemeler		C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
DD13 6224 EN 10111:2008	Katalog	< 0.07	< 0.35	< 0.025	< 0.025	-	-	-	-
	Ölçüm	0.05	0.23	0.014	0.004	0.04	0.04	0.005	0.007
DIN 1.2379 EN X155CrMoV12	Katalog	1.45	0.20	0.03	0.030	0.10	11.00	0.60	0.90
	Ölçüm	1.47	0.36	0.24	0.004	0.36	11.60	0.77	0.77

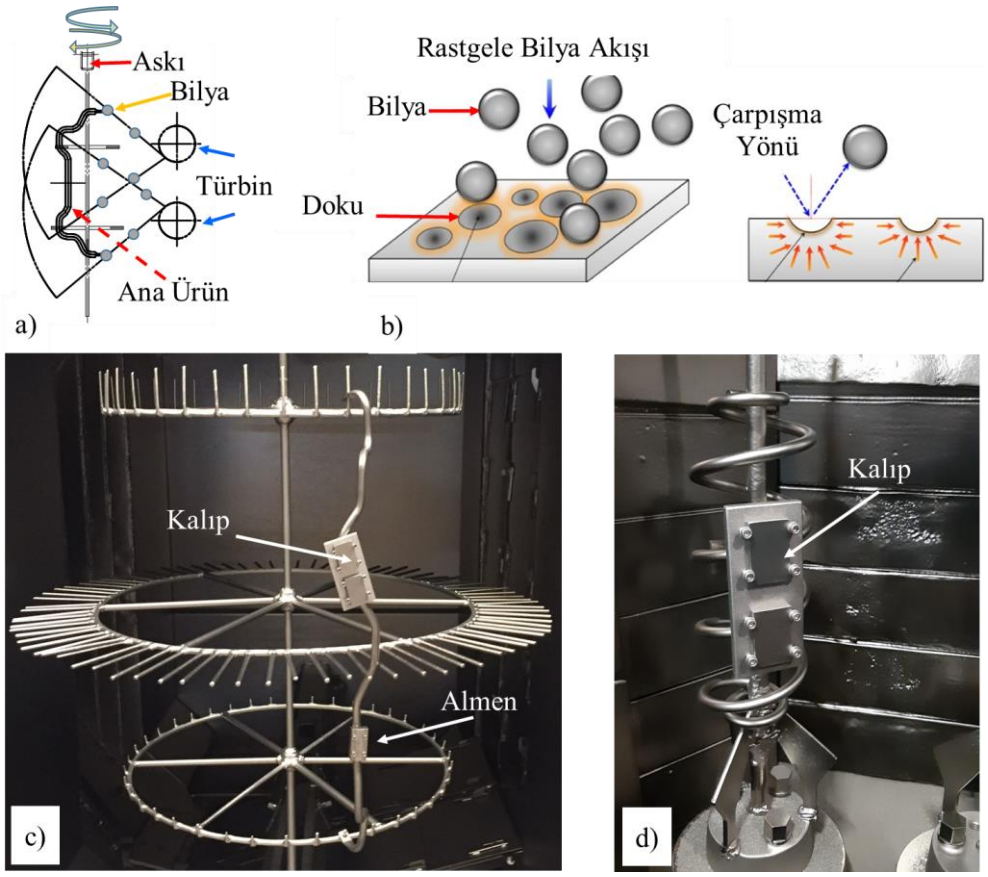
Tablo 4.2. DD13 ve 1.2379 malzemelerinin mekanik özellikleri (Uçakkuş ve diğ., 2024)

Malzemeler		R_p [N/mm^2]	R_m [N/mm^2]	A [%]	Sertlik [HV]
DD13	Katalog	170-310	400	33	125
	Ölçüm	256	368	38,7	
1.2379	Katalog	-	2145	-	620-660

4.2. Numunelere Yüzey Dokusu Oluşturma

4.2.1. Bilyalı Dövme ile Oluşturulan Yüzey Dokuları

Şekil 4.1.a'da endüstriyel bilyalı dövme prosesinin çalışma prensibi, Şekil 4.1.b'de ise bu proseste doku oluşumunun prensibi gösterilmiştir. Isıl işlem sonrası taşlanan kalıp numuneleri ve SAE J442'ye göre üretilen Almen plakaları, Şekil 4.1.c'de ve Şekil 4.1.d'de gösterildiği gibi sırasıyla I nolu ve II nolu endüstriyel bilyalı dövme makinesinde ticari ürünler üzerine konumlandırılmıştır ve numune yüzeylerine dokular oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. a) Bilyalı dövme prosesi metodu b) yüzey dokusu c) I nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi d) II nolu endüstriyel bilyalı dövme prosesi

İki makinenin teknik özelliklerine göre benzer almen şiddeti elde edilecek proses süreleri atanmıştır (türbin kapasiteleri farklıdır). Tablo 4.3'te belirtilen sürelerde herbir numuneden ikişer adet üretilerek kardeş numuneye PVD yöntemiyle Tablo 4.8'te belirtilen "CT1 (CrN)" kodlu kaplama uygulanmıştır. Tablo 4.4'te her iki makinede kullanılan bilyaların kalitesi, malzemesi, sertlik değeri ve ölçüleri verilmiştir. G1 kalite bilya telden kesilmiş parçanın kabaca yuvarlatılması ile, G2 kalite bilya ise G1 kalitenin daha hassas yuvarlatılması ile üretilmektedir.

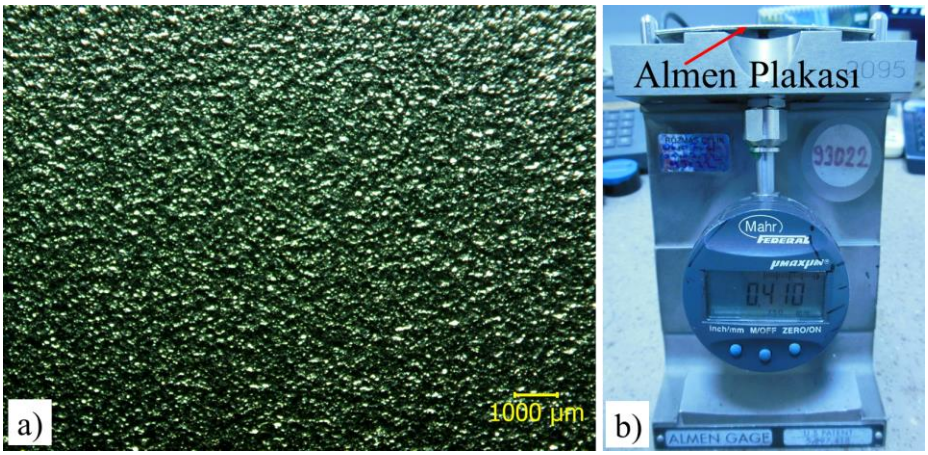
Tablo 4.3. Bilyalı dövme süreleri

Makine/Numuneler	Bilyalı Dövme Süresi - [sn]							
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
I nolu makine (SPST1)	30	60	90	120	150	180	210	240
II nolu makine (SPST2)	10	12	14	16	17	18	19	20

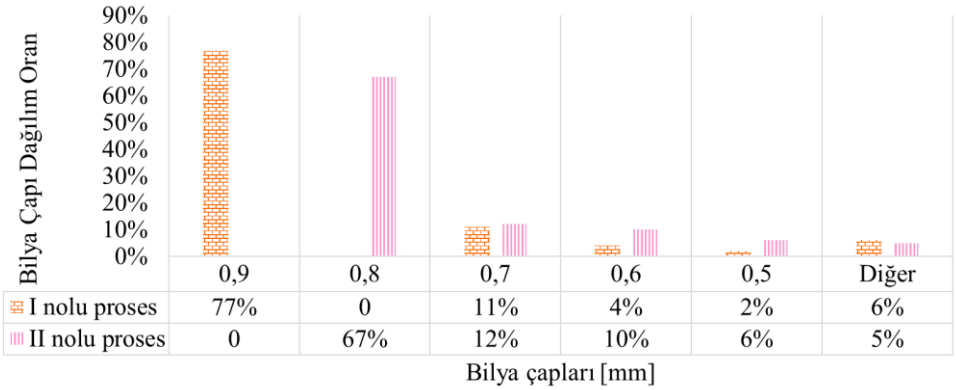
Tablo 4.4. Kullanılan bilyaların özellikleri

Makine/Proses	Kalite	Malzeme	Sertlik	Çap
	[-]	[-]	[HV]	[mm]
I nolu makine	G1	Peenox CS (Karbon Çeliği)	640	0,9
II nolu makine	G2			0,8

"Yüzey örtme oranı" (coverage) deformasyona uğramış yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır (Avcu, 2019). Şekil 4.2.a'da numuneler ile birlikte prosese tabi tutulan Almen plakalarının örnek örtücülük inceleme görüntüsü verilmiştir. Almen plakaları üzerindeki değişim ise Şekil 4.2.b'de gösterilen Almen Ölçüm Cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 4.3'te proses sonrası bilya çaplarındaki değişim oranını ifade eden elek analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.2. a) Örtücülük incelemesi b) almen testi

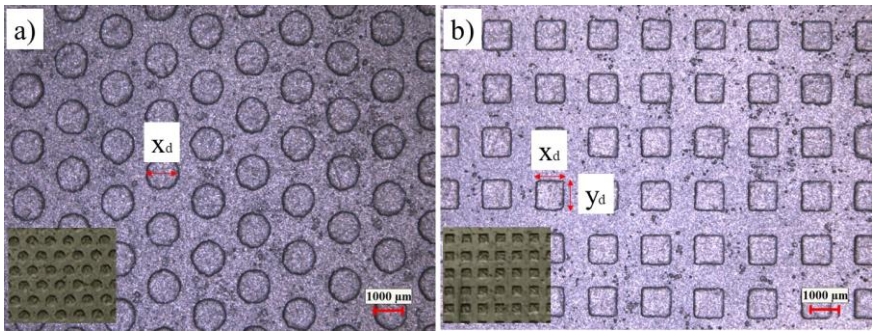


	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	Diğer
I nolu proses	77%	0	11%	4%	2%	6%
II nolu proses	0	67%	12%	10%	6%	5%

Şekil 4.3. Proses sonrası elek analiz sonuçları

4.2.2. Kimyasal Aşındırma ile Oluşturulan Yüzey Dokuları

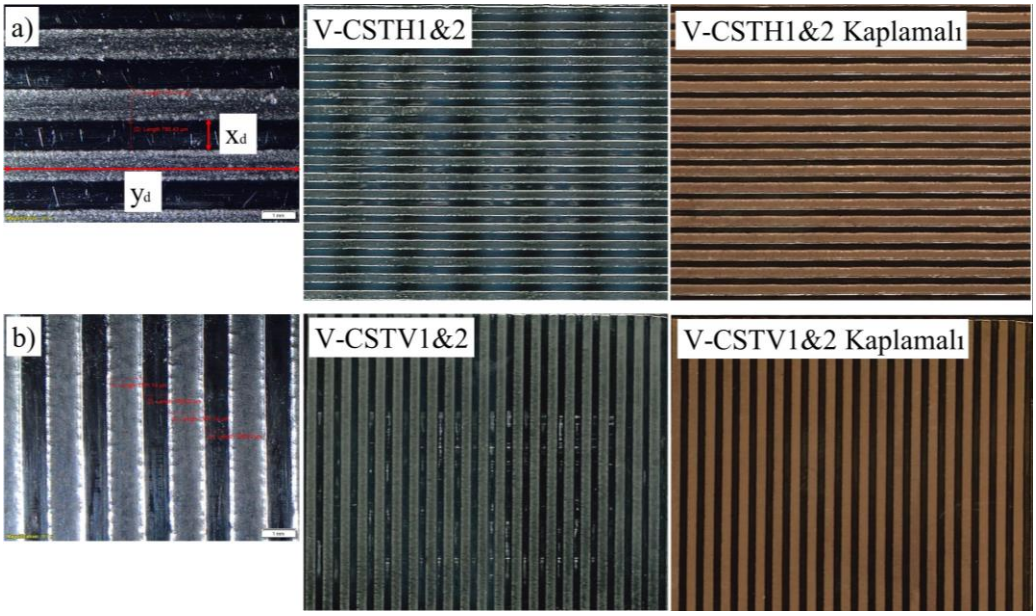
Kimyasal aşındırma yöntemi ile doku oluşturmak için iki farklı firma ile çalışma yapılmıştır. Dokuların oluşturulması ile ilgili maskeleme ekipmanları ve banyo kimyasal içeriği gizlilik kapsamında paylaşılmamıştır. Şekil 4.4'te DKET firmasının kimyasal aşındırma ile oluşturduğu dokuların stereo mikroskop görüntüleri, Tablo 4.5'te ilgili dokuların ölçüsel özellikleri verilmiştir. Dairesel dokuların çapları (x_d) ~ 1200 µm, merkezler arası mesafe ~ 2000 µm, derinlikleri sırasıyla 50^{+10} µm ve 90^{+10} µm'dir. Kare dokuların kenar ölçüleri (x_d, y_d) ~1100 µm, merkezler arası mesafe ~ 2000 µm, derinlikleri daire dokular ile aynıdır.



Şekil 4.4. Dokuların stereo mikroskop görüntüleri a)dairesel, b)kare - DKET

Tablo 4.5. Kimyasal aşındırma ile açılan dokuların ölçüsel değerleri - DKET

Doku	Kod	x_d [µm]	y_d [µm]	h_d [µm]	Doku Yoğunluğu
Dairesel	D-CST1 D-CST2	1200	-	50 90	%28,8
Kare	D-CST3 D-CST4	1100	1100	50 90	%29,2



Şekil 4.5. Dokuların stereo mikroskop görüntüleri a) paralel, b) dik – Voestalpine

Şekil 4.5'te Voestalpine firmasının oluşturduğu dokuların kaplamasız ve kaplamalı yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri, Tablo 4.6'da ilgili dokuların ölçüsel özellikleri verilmiştir. Sürtünme testi hareket yönü ile aynı yönde açılan dokular yatay (H), hareket yönüne dik olan dokular ise dikey (V) olarak tanımlanmıştır. Tabloda belirtildiği üzere kardeş parçalara CV1(TiAlCN) kaplaması uygulanmıştır. ("h_d" derinlik değerleri taranmış değerlerdir.)

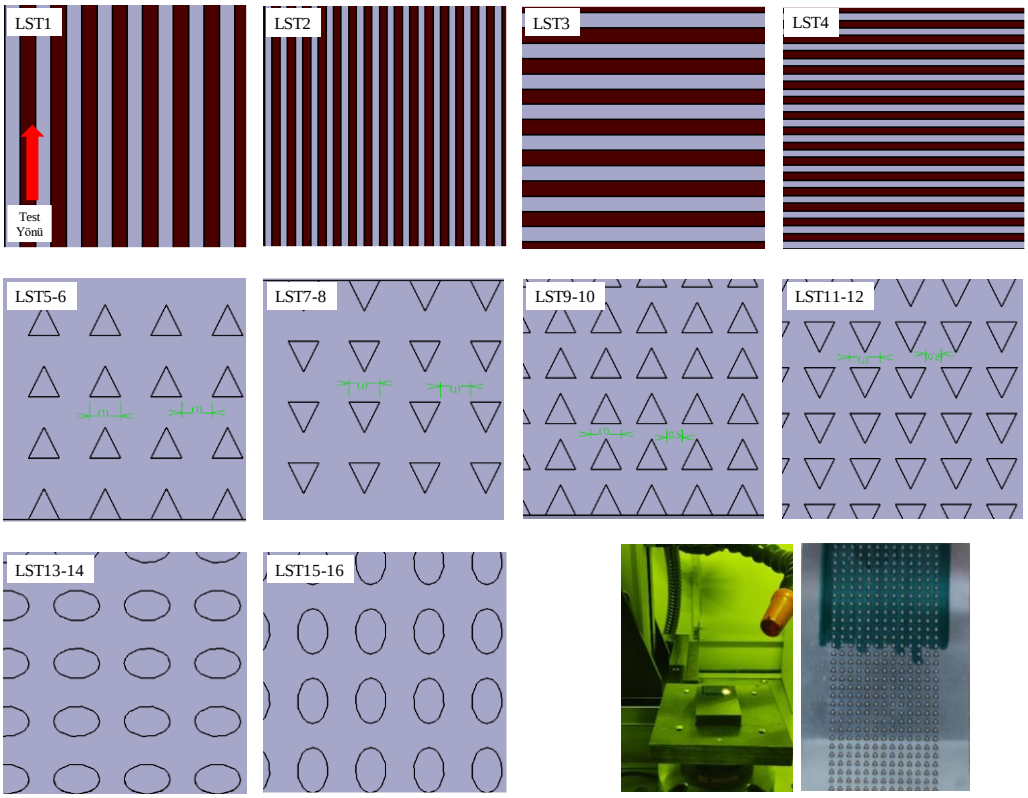
Tablo 4.6. Kimyasal aşındırma ile açılan dokuların ölçüsel değerleri - Voestalpine

Doku	Kod	x_d [µm]	y_d [µm]	h_d [µm]	Doku Yoğunluğu	Kaplama
Lineer-H	CSTH1	1000	60000	120	%47,5	-
	CSTH2			128		-
	CSTH1-CV1			120		CV1
	CSTH2-CV1			128		CV1
Lineer-V	CSTV1	40000	1000	125	%48,3	-
	CSTV2			132		-
	CSTV1-CV1			125		CV1
	CSTV2-CV1			132		CV1

4.2.3. Lazer İşleme ile Oluşturulan Yüzey Dokuları

50 kW gücünde, 1064 nm dalga boyunda, 20 kHz frekansta, 1000 mm/sn tarama hızında, 10 um tarama sıklığında ve 10-12 mikron laser ışınlı (spot size) nanosaniye atımlı lazer makinesi Şekil 4.6'da gösterilen farklı geometrilerde dokular, Tablo 4.7'de belirtilen

ölçülerde oluşturulmuştur. Kaplama yapılacak gruplar ve üçgen geometrisinin ters yönde etkisini incelemek için aynı ürünlerin kardeşlerine aynı şartlarda dokular oluşturulmuştur. Tabloda belirtildiği üzere kardeş parçalara CK2(TiCN) kaplaması uygulanmıştır. ("h_d" derinlik değerleri tasarım değerleridir.)



Şekil 4.6. Lazer dokuların CAD modelleri

Tablo 4.7. Lazer işleme ile açılan dokuların ölçüsel değerleri

	Doku	Kod	x_d [µm]	$y1_d$ [µm]	$y2_d$ [µm]	h_d [µm]	Doku Yoğunluğu	Kaplama
1	Lineer-H	LST1	500	60000	-	100	%50,0	-
2		LST2	250				%49,0	
3	Lineer-V	LST3	25000	500			%50,0	
4		LST4		250			%50,0	
5	Üçgen	LST5-T1	1000	1118	1118	100	%12,7	-
6		LST6-T1						CK2
7		LST7-T1						-
8		LST8-T1						CK2
9	Üçgen	LST9-T2	1000	1118	1118	100	%22,2	-
10		LST10-T2						CK2
11		LST11-T2						-
12		LST12-T2						CK2
13	Elips	LST13-E-V	1000	1500	-	100	%27,6	-
14		LST14-E-V						CK2
15		LST15-E-H	1500	1000			%26,6	-
16		LST16-E-H						CK2

4.3. PVD Kaplama

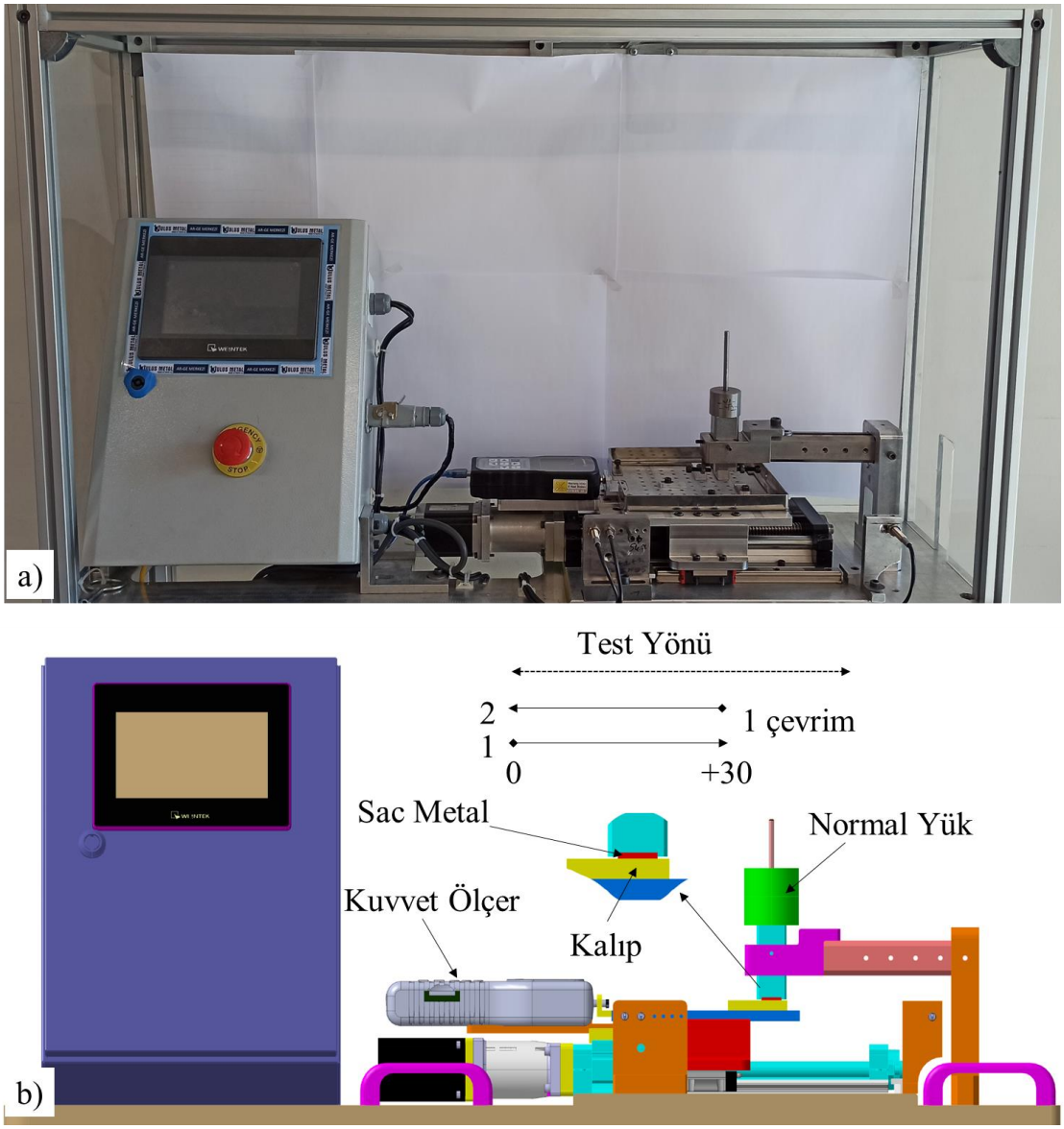
Fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama yöntemi, sac metal şekillendirme kalıplarında yaygın olarak kullanılan kaplama türüdür. Özellikle derin çekme kalıplarında ütüleme, kalibre ve boğma gibi adımlarda yüksek şekillendirme kuvvetleri oluşmaktadır. Sistemin tribolojik performansını arttırarak sürtünmeyi ve sürtünmeye bağlı aşınmayı azaltmak; sistemin ömrünü ve parça kalitesini arttırmak için kalıp yüzeylerine kaplama uygulanmaktadır. Çalışma kapsamında sektörde yaygın olarak kullanılan geleneksel ve derin çekme prosesine özel geliştirilen yeni nesil kaplama tipleri seçilmiştir. Kaplanmış düz ve dokulu kalıp parçalarının kuru ve sıvı sürtünme durumundaki davranışları incelenerek sonuçlar yorumlanmıştır. Tablo 4.8'te düz ve dokulu yüzeylere uygulanan kaplama türlerine ait katalog değerleri verilmiştir.

Tablo 4.8. PVD kaplama türlerinin katalog değerleri

Kaplama Ticari İsmi	Kaplama Bileşeni	Kod	Sertlik	COF	Kaplama Kalınlığı
			[HV]	[-]	[µm]
Duplex Variantic-1000	TiAlCN	DY-CV1	4000 ± 200	0,20	9-11
Duplex Variantic		DY-CV2	3500 ± 200	0,20	2-4
NovaTic	TiCN	DY-CK2	3500 ± 500	0,15	1-4
Moldex Extra	CrN	DY-CT1	2400	0,35	2-10

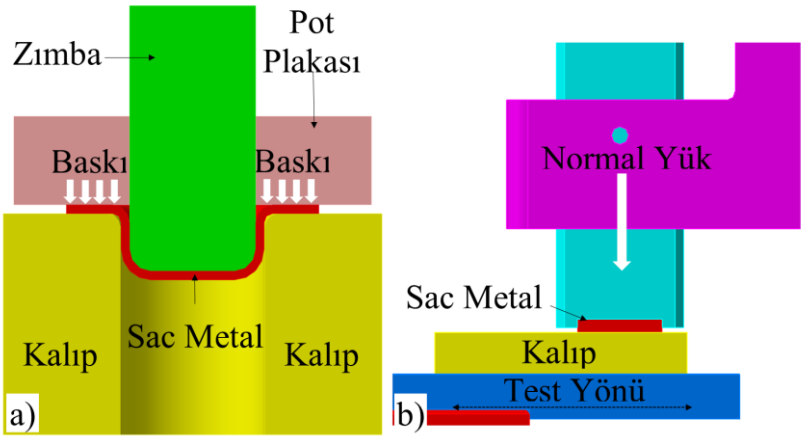
4.4. Test Cihazı Tasarımı

Sac şekillendirme üzerine incelenen birçok çalışmalarda, tribolojik testler geleneksel aşınma test cihazları ile yapıldığı için bu cihazlar derin çekme prosesini birebir simüle etmemektedir. Bu boşluk fırsat olarak görülerek bizleri sac metalin derin çekme kalıbı ile temasını ve kalıplar arasındaki hareketini simüle edebilecek bir test cihazı tasarımı çalışmasına yöneltmiştir. ISO 15359, ISO 8295 ve ASTM D 1894 standartlarındaki gereklilikler referans alınarak Şekil 4.7.b'de ana hatları ile tanımlanan sürtünme test cihazı tasarlanmış ve devreye alınmıştır (tez yazarı adına faydalı model ve tasarım tescili alınmıştır). Test cihazı ayrıca aşınma ve yüzey çizilme testleri yapabilme yeteneğine de sahiptir. Kuvvetölçer kuvvet ölçüm aralığı 0,5 – 50,0 ± %0,5 N ve step motor doğrusal hareket hız aralığı ise 1,0 – 30,0 mm/s olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. a) Test cihazı görseli, b) test cihazı bileşenleri

Şekil 4.8.a'da derin çekme prosesinde sacın kalıp içindeki hareketi incelendiğinde sac metal, kalıp (dişi kalıp) üzerine konumlanmakta ve zımbanın saca temasıyla oluşan yükleme etkisi ile pot plakası ile kalıp arasında yatay yönde hareket etmektedir. Böylece şekillendirme esnasında birbirine paralel iki levha arasında basınç altında sürtünme meydana gelmektedir. Bu sürtünme davranışını en gerçekçi koşullarda simüle eden mekanizma Şekil 4.8.b'de gösterilmiştir. Test cihazında sac malzeme, normal yük altında kalıp numunesi üzerinde hareket etmektedir.



Şekil 4.8. Derin çekme prosesinde baskı altındaki sacın a) pot plakası ile kalıp arasındaki hareketi b) pot plakası ile kalıp arasındaki hareketinin test cihazı üzerindeki simülasyonu

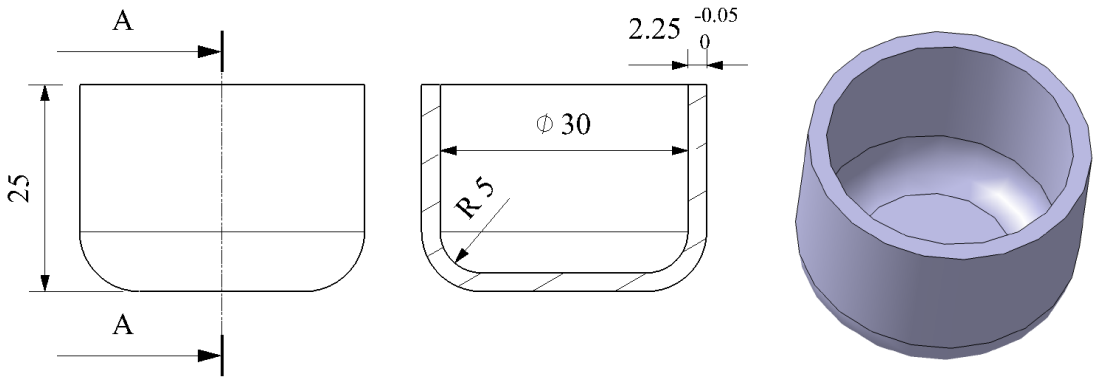
4.5. Deney Numunesi Tasarımı

Farklı geometri ve ölçülere sahip dokuların sürtünme testi sonuçlarına göre en uygun doku derin çekme dişi kalıbına uygulanmak üzere seçilmiştir. Dokusuz kalıp ve dokulu kalıp ile üretilen parçaların kesit kalınlıklarındaki farklar ölçülerek dokunun derin çekme prosesindeki etkisi incelenmiştir. Ürün tasarımı ise, tek seferde sınır şartlarda çekilebilecek $2{,}25^{-0{,}05}$ mm kalınlığında DD13 sac metal malzeme Şekil 4.9'da verilen ana ölçüleri ve Tablo 4.9'da verilen teknik bilgilere göre hesaplanmıştır (Kabakçı, 2020).

Çekme oranı Denklem (4.1)'de, çekme boşluğu Denklem (4.2)'de verilmiştir;

$$\beta = D_i/D_p \tag{4.1}$$

$$c \geq 1{,}1 * t_o \tag{4.2}$$

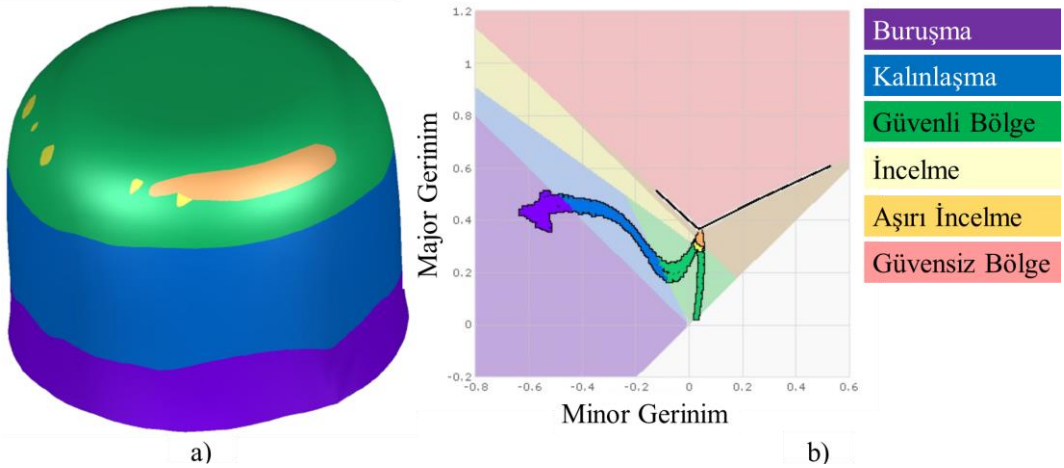


Şekil 4.9. Deney numunesi (ticari ürün) teknik özellikleri

Tablo 4.9. Deney numunesi teknik bilgileri ve teorik hesaplamaları

Malzeme	-	DD13	
Çekme Dayanımı	$\sigma_ç - R_m$	400	MPa
Akma Dayanımı	$\sigma_a - R_p$	240	MPa
Açınım Çap	D_i	60	mm
Zımba Çapı	D_p	30	mm
Sac Kalınlığı	t_o	2,25	mm
Açınım Alan	A	2827	mm^2
Pot Çemberi İç çapı	d_N	34	mm
Sürtünme Katsayısı	μ	0,2	
Min İncelme Kalınlığı	t_{o1}	1,7	mm
Kalıp Radiusu	R_{dc}	7,3	mm
Kalıp Boşluğu(Tek Taraf)	c_{min}	0,225	mm
Dişi Kalıp İç Çap	d	34,95	mm
Çekme Oranı	β	2,0	
İzin Verilen Max Çekme Oranı	βo	2,0	

Teorik hesaplamalara göre ana ölçüleri belirlenen ürün Autoform sac metal parça proses simülasyon programı ile analiz edilmiştir. Şekil 4.10.b'de FLD (forming limit diagram-şekillendirme sınır diyagramı) sonucuna göre herhangi bir yırtılma olmadan üretilebileceği görünmektedir. FLD sonuçlarına göre renkli bölgelerin yüzey üzerindeki oranına göre simülasyon sonucuna göre parçaya onay verilir ya da güvenli (yeşil) bölge oranını arttırmak için giriş değişenleri ile tekrarlı simülasyon yapılabilir. Farklı geometri ve ölçülere sahip dokuların sürtünme testi sonuçlarına göre en uygun doku derin çekme dişi kalıbına uygulanmak üzere seçilmiştir. Dokusuz kalıp ve dokulu kalıp ile üretilen parçaların kesit kalınlıklarındaki farklar ölçülerek simülasyon sonucuna göre kesitteki kalınlık dağılımına göre gelişim oranı değerlendirilecektir.



Şekil 4.10. a)Autoform şekillendirme simülasyon sonucu, b) FLD diyagramı

4.6. Testler

4.6.1. Pürüzlülük Ölçümleri

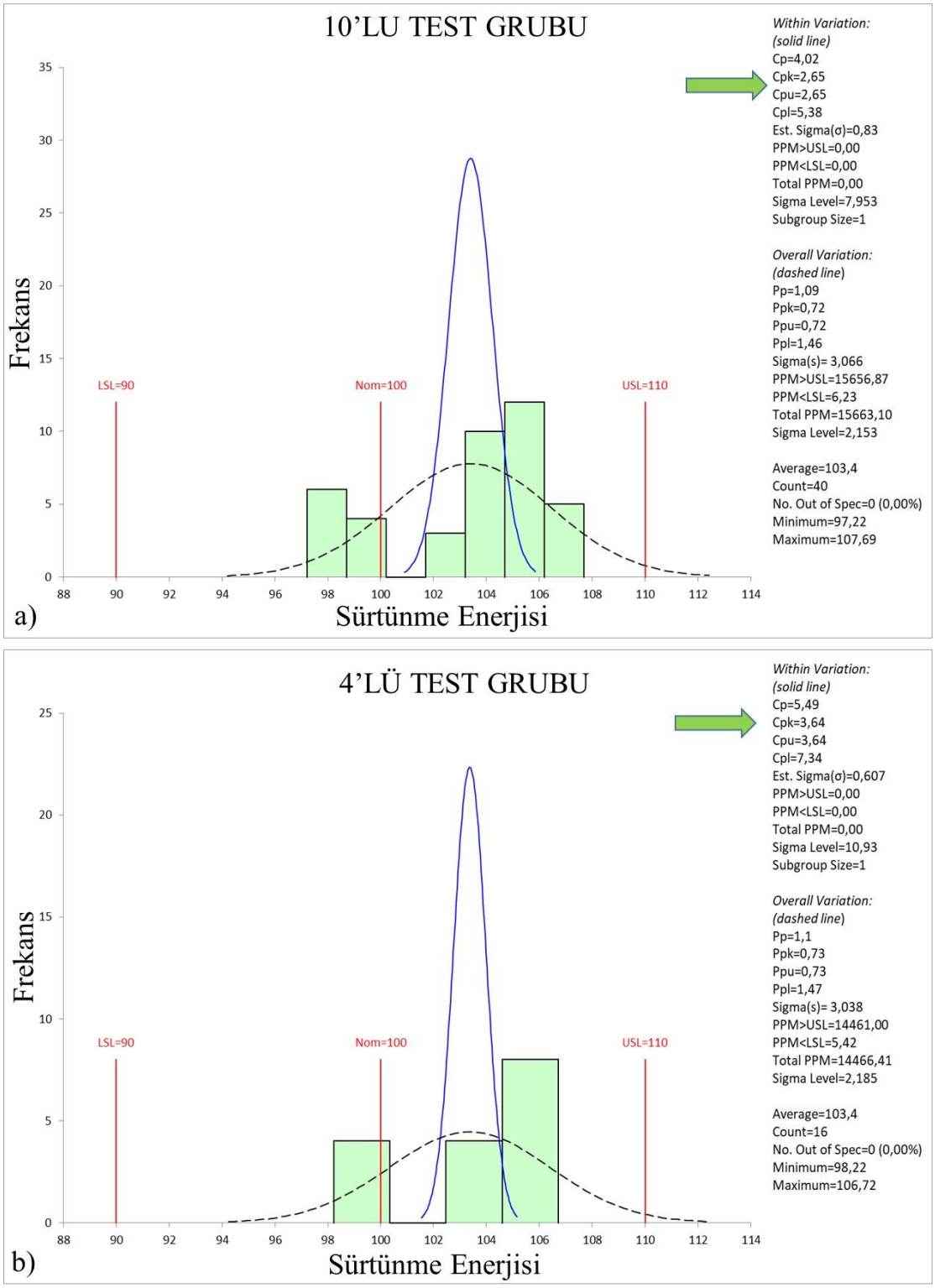
Taşlanmış numunelerin kaplama, doku açma ve test öncesi/sonrası Ra ortalama pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ-210 model yüzey pürüzlülük cihazıyla 0,5 mm/sn ölçüm hızı ve x5 numune ölçüm uzunluğu ile ölçülmüştür.

4.6.2. Sürtünme Testleri

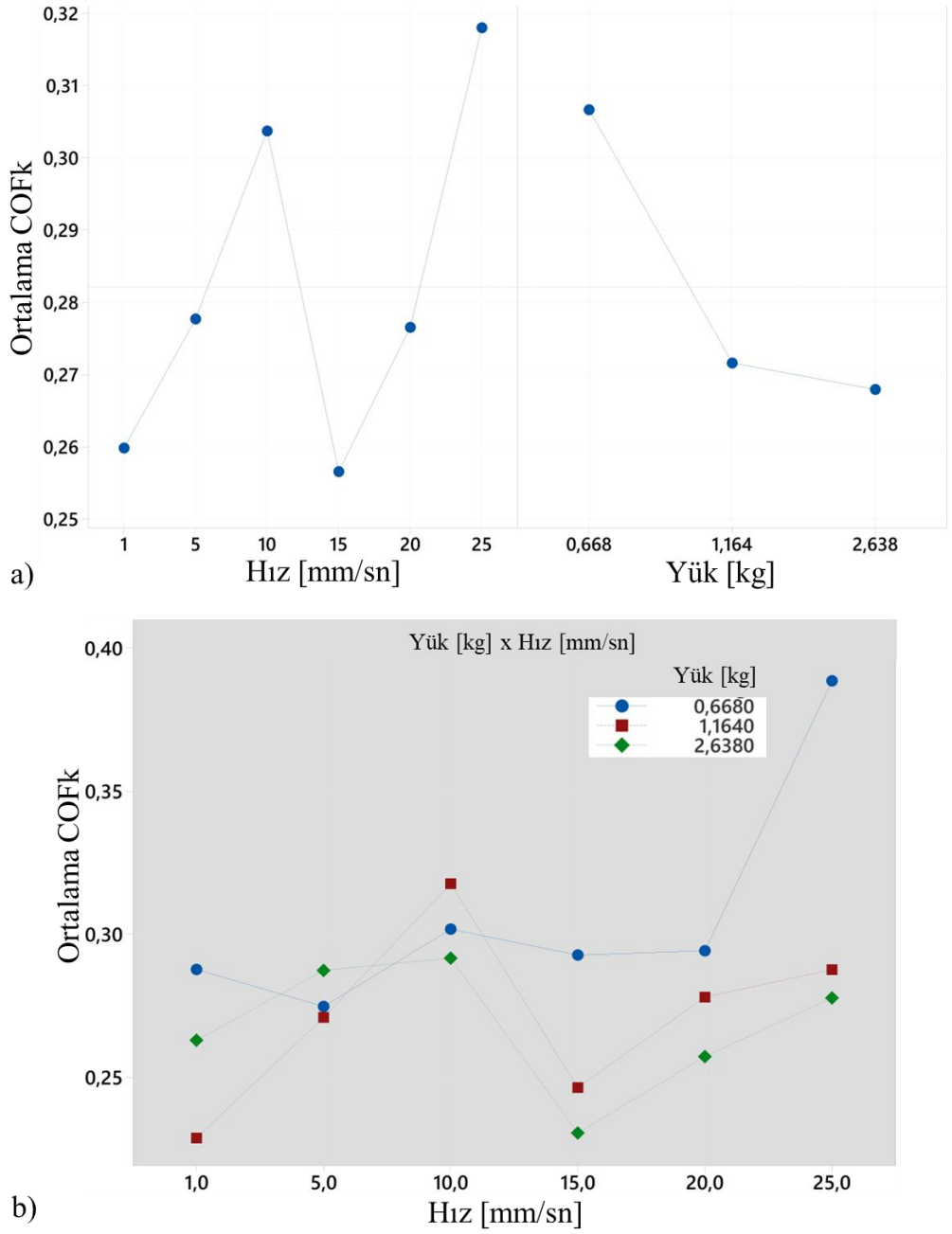
Sürtünme testleri düz ve dokulu yüzeye sahip bütün deney grupları için iklimlendirilmiş laboratuvar şartlarında yapılmıştır (20,5±1°C, %40±5 bağıl nem). Bir numune üzerinde aynı şartlar altında ardışık on adet test tekrarı yapılmıştır. Herbir test tamamlanınca kuvvetölçerden test verileri alınıp sıradaki test başlatılmıştır. Bir test grubu ise ±30 mm stroktan oluşup bu strok aralığında üç kez tekrarlanmaktadır. Bir testin üç çevrimden oluşması sac ile kalıbın yük altında temas durumunu kararlı hale gelmesini sağlamak ve veriyi kararlı anda almaktır. Aynı numunenin on kez test edilmesi ise sonuçların kararlı olmasına rağmen çevre ve malzeme şartlarının etkilerini gözardı etmek için ilk ve son üç değeri hesap dışında bırakarak orta dörtlü değeri hesaba katmak içindir.

Kuvvetölçer tabla ile birlikte hareket ettiği için hareket esnasında oluşan doğal sürtünme değeri de test esnasında ölçülmektedir. Bu sürtünme enerjisinin hangi aralıkta değiştiğini ve kararlılığını incelemek için dört farklı zamanda test tablasında ön yük (F_N) olmadan boş test yapılmıştır. Test sonuçlarına göre yapılan yeterlilik analizi Şekil 4.11'de verilmiştir. Özellikle değerlendirmede kullanılan orta 4'lü grubun cpk (proses kabiliyeti) değeri 3,64 çıkmıştır. Normalde bu değerin en az 1,33 olması gerekmektedir. Uygun yük ve hız parametrelerini belirlemek için kaplamasız ve dokusuz düz yüzey üzerinde 1 mm/sn, 5 mm/sn, 10 mm/sn, 15 mm/sn, 20 mm/sn ve 25,0 mm/sn hızlarda ve 0,668 kg, 1,164 kg ve 2,638 kg yüklerde testler yapılmıştır. Test sonucunda oluşturulan kuvvet ve yol grafiğinden sürtünme enerjileri hesaplanmıştır. Sürtünme enerjileri Şekil 4.12'de belirtilen ANOVA "general linear model" yöntemi ile analiz edilmiştir. Şekil 4.12.a'da görüldüğü üzere yük değerinin ortalama kinetik sürtünme katsayısına etkisi yüksektir. Şekil 4.12.b'de ise 1,164 kg ve 2,638 kg yüklerin etkilerini benzer etkiye sahip olup hem

COF_k sonuçları hem de seri imalattaki pres hızları dikkate alındığında deney gruplarında kullanılacak en uygun parametre çifti hız 10 mm/sn ve normal yük 2,638 kg seçilmiştir.

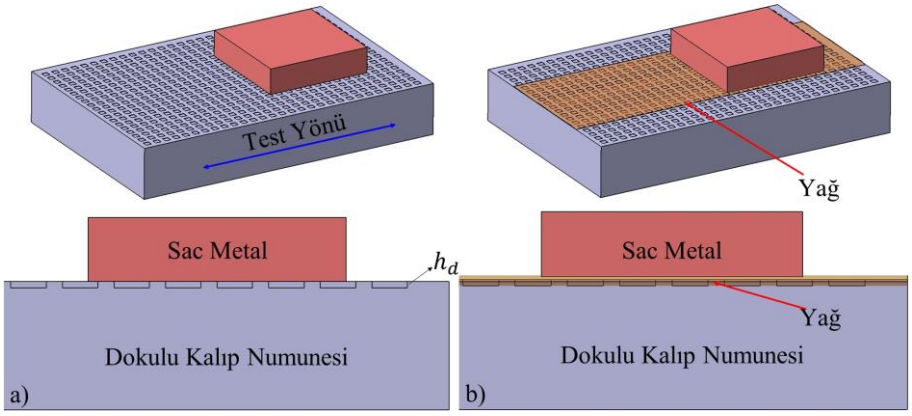


Şekil 4.11. Test cihazı yeterlilik analizi a)10'lu test b)orta 4'lü test grubu



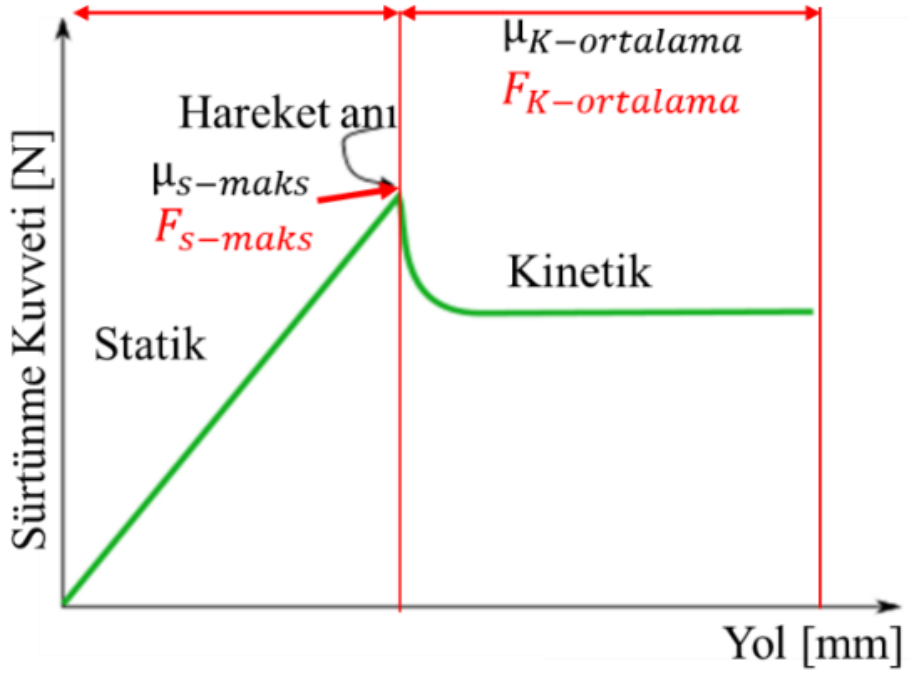
Şekil 4.12. Ortalama COF_k a) ana parametrelerin etkileri, b) parametre etkileşimleri

Seçilen bu parametreler ile kaplamasız ve Tablo 4.8'de tanımlanan kaplama bileşenleri ile kaplanan düz yüzeyler Şekil 4.13'teki gibi kuru ve sıvı sürtünme şartlarında test edilmiştir. Düz yüzeylerde elde edilen sonuçlar referans değer olarak alınarak dokulu yüzeylerin test sonuçları bu değerler ile karşılaştırılmıştır. Sıvı sürtünme durumunda ise 0,1 mL, 0,3 mL ve 0,5 mL ile yapılan denemeler sonucunda, yağlayıcı olarak 0,5 mL derin çekme yağı (DRAWTEX KC70, viskozitesi 85 cSt, 40°C sıcaklıkta) kullanılmıştır.



Şekil 4.13. a) kuru sürtünme, b) sıvı sürtünme durumu

Her test grubu için kuvvetölçer üzerinden excel ile alınan kuvvet – zaman değerleri test cihazının hız değeri kullanılarak kuvvet – yol grafiğine dönüştürülmüştür. Şekil 4.14'te gösterilen grafik üzerinden hareket başlangıç anından önceki en yüksek kuvvet değeri F_S statik sürtünme kuvveti, kinetik bölgedeki ortalama kuvvet ise F_K kinetik sürtünme kuvveti hesaplanmıştır. Bu değerler normal yük değerine bölünerek μ_S (COF_S) ve μ_K (COF_K) statik ve kinetik sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Benzer şekilde grafik altında kalan alan hesaplanarak hareket boyunca toplam, statik bölge ve kinetik bölge sürtünme enerjileri hesaplanmıştır.

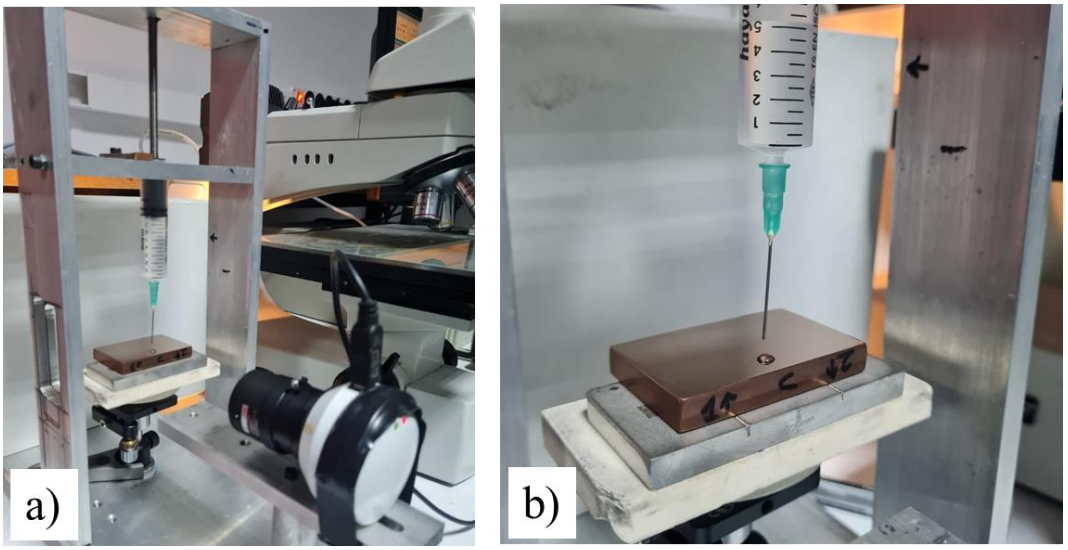


Şekil 4.14. Sürtünme kuvveti yol grafiği

Kaplamasız, kaplamalı düz ve dokulu bütün numunelerin yüzey özelliklerini ve sürtünme enerji değişimini incelemek için numuneler ±30 mm strokta 50 çevrimde Vickers sertlik elmas ucu ile (ISO 6507/2 ve ASTM-E92 A3) uzun çevrimli sürtünme testine tabi tutularak çizik bölgelerin yüzeylerinin stereo mikroskop (OLYMPUS BX53M-5X) ve profilometre ile incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

4.6.3. Kontak Açısı Ölçümleri

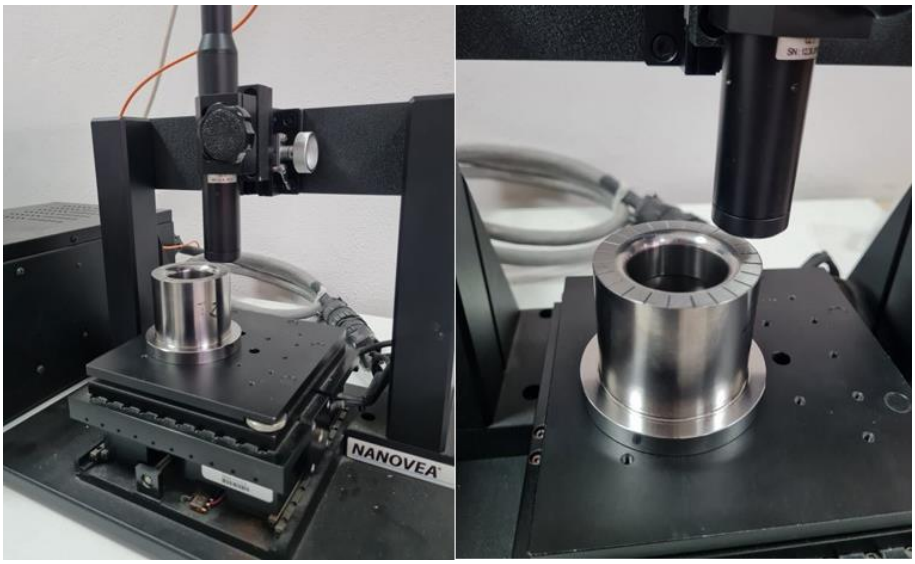
Kontak açısı, sıvı damlacığın yüzey ile yaptığı açıdır. Açı 90°'den küçük ise yüzey hidrofilik (ıslatılabilir), 90°'den büyük ise hidrofobik (ıslatılamaz) olarak tanımlanır (Özbey ve diğ., 2021). Kaplamalı ve kaplamasız düz-dokulu yüzeylerin yüzey özelliklerini incelemek için kontak açısı ölçümleri yapılmıştır. ± 2° sapma ile çalışan kontak açısı ölçüm cihazında her bir numune yüzeyine bir şırınga yardımıyla yaklaşık olarak 40 mm mesafeden saf su damlatılmış ve yüzeye damlatılan damla kararlı hale geldikten sonra (yaklaşık 20 sn.) düzenekte bulunan kamera yardımıyla 0,5 saniye aralıklarla alınan fotoğraf kareleri kullanılarak kontak açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, "Image-j" programı uygulaması olan "Drop analysis" ile belirlenmiş olup Şekil 4.15.a'da kullanılan kontak açısı ölçüm cihazı görülmektedir. Şekil 4.15.b'de ise numune üzerine örnek uygulama gösterilmiştir.



Şekil 4.15. a) Kontak açısı ölçüm cihazı b) numune üzerinde uygulama

4.6.4. Profilometre Ölçümleri

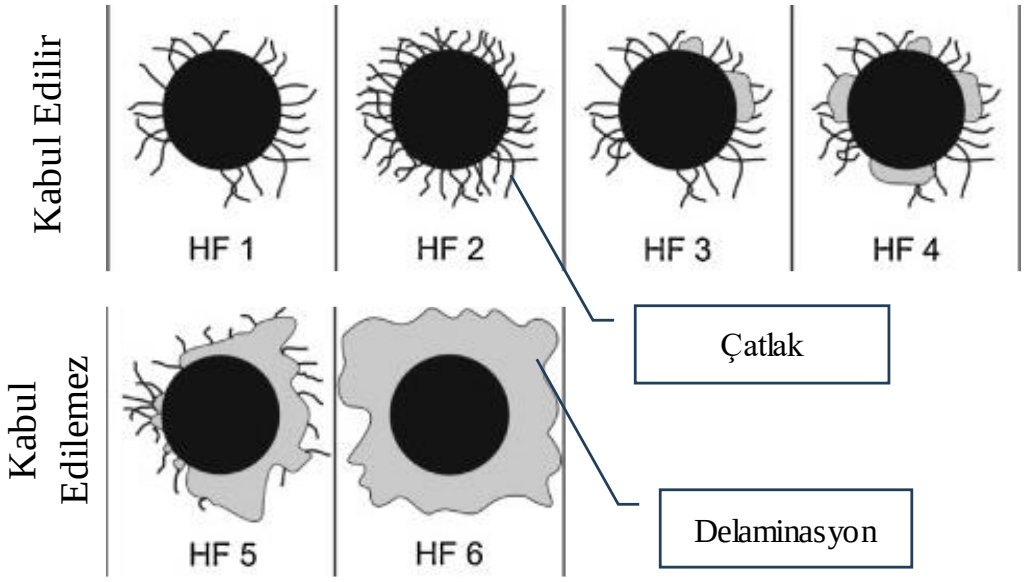
Deney numunelerinin yüzey karakterizasyonu Şekil 4.16'da yer alan temassız lazer Nanovea 3D Temassız Profilometre cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Her parametre için 3,0 x 2,0 mm^2'lik bir alan, profilometre ile 0,1 mm/s hızında, 1000 Hz frekansta ve hem X hem de Y yönünde 10 µm'lik adımlarla taranmıştır.



Şekil 4.16. 3D Temassız profilometre

4.6.5. Kaplama Yapışma (Adhezyon) Ölçümü

Kaplamanın malzeme yüzeyine yapışma kalitesini incelemek için sektörde farklı test yöntemleri geliştirilmiştir. En yaygın olanı ise ince film adhezyon (yapışma) ölçüm tekniğidir. Yöntem Daimler-Benz tarafından VDI 3198 standardına göre geliştirilmiştir. Yöntem, kaplama yüzeyi üzerinde Rockwell-C ucuyla, 150 kg yük altında iz oluşturma prensibine dayanmaktadır. Oluşan HRC izi, optik mikroskopta x100 büyütme ile incelenir ve iz çevresindeki kaplama çatlama ve dökülmeleri standart patern ile mukayese edilerek, kaplamanın taban malzemeye yapışma mukavemeti hakkında kalitatif bilgiye ulaşılmaktadır. Standart değerlendirme skalası Şekil 4.17'de gösterilmiştir ve HF1 ile HF6 arası toplam altı yapışma grubuna karşılık gelmektedir. HF1- HF4 arası yapışmalar kabul edilebilir iken, HF5 ve HF6 kabul edilemez, yetersiz kaplama adhezyonu anlamına gelmektedir (Edis, 2022).



Şekil 4.17. Kaplama yapışma skalası

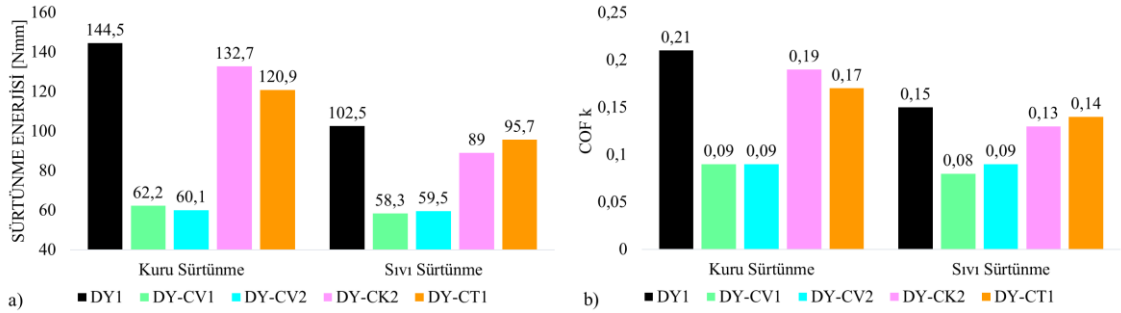
5. TEST VE ANALİZ SONUÇLARI

5.1. Dokusuz Referans Numunelerin Test Sonuçları

Numunelerin kuru ve sıvı sürtünme testleri tablolarda sırasıyla "K" ve "Y"; sürtünme enerjisi "E_S", statik sürtünme katsayısı COF_S ve kinetik sürtünme katsayısı COF_K şeklinde tanımlanmıştır. Tablo 4.8'te katalog değerleri verilen kaplama türleri ile kaplanan yüzeyi düz numunelerin kuru ve sıvı sürtünme durumunda sürtünme enerji ve sürtünme katsayıları Tablo 5.1'de ve Şekil 5.1'de verilmiştir. Düz yüzey kuru sürtünme şartlarında sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsaysısı sırasıyla 144,5 Nmm, 0,22 ve 0,21; sıvı sürtünme durumunda ise sırasıyla 102,5 Nmm, 0,09 ve 0,15 hesaplanmıştır. Kaplamalı düz yüzeye sahip bütün numunelerin sonuçları beklenildiği gibi kaplamasız düz yüzeye (DY1) göre düşük çıkmıştır.

Tablo 5.1.Düz yüzey sürtünme test sonuçları

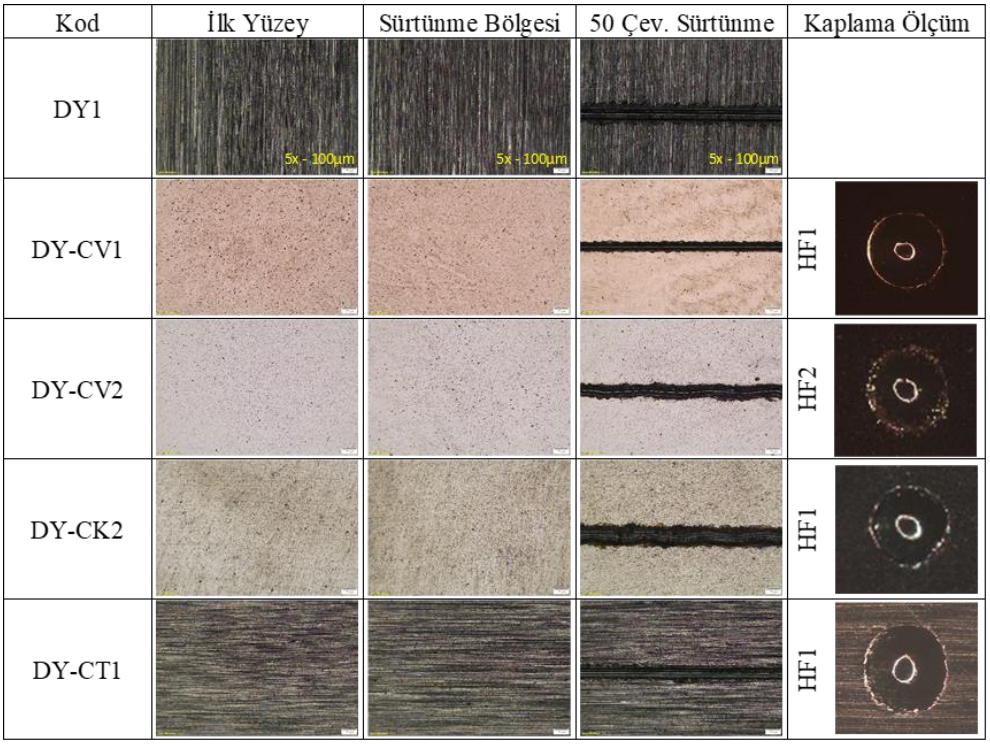
Numune	Kaplama	Kaplama Ticari İsmi	E_S [Nmm]		COF_S [-]		COF_K [-]	
			K	Y	K	Y	K	Y
DY1	-	-	144,5	102,5	0,22	0,09	0,21	0,15
DY-CV1	TiAlCN	Duplex Variantic-1000	62,2	58,3	0,08	0,09	0,09	0,08
DY-CV2	TiAlCN	Duplex Variantic	60,1	59,5	0,09	0,08	0,09	0,09
DY-CK2	TiCN	NovaTic	132,7	89,0	0,19	0,13	0,19	0,13
DY-CT1	CrN	Moldex Extra	120,9	95,7	0,18	0,14	0,17	0,14



Şekil 5.1. Düz yüzey numuneler kuru ve sıvı sürtünme durumları a) sürtünme enerjisi, b) kinetik sürtünme katsayısı grafikleri

CV1 (Duplex Variantic-1000 / TiAlCN) ve CV2 (Duplex Variantic / TiAlCN) kaplama türü derin çekme prosesine uygun yeni nesil kaplama türüdür. Kuru sürtünme durumunda kinetik sürtünme katsayısı CV1 (TiAlCN), CV2 (TiAlCN), CK2 (TiCN) ve CT1 (CrN) numunelerinde sırasıyla %57, %57, %9 ve %19 oranlarında; sıvı sürtünme durumunda ise sırasıyla %47, %40, %13 ve %7 oranlarında kaplamasız düz yüzeye göre düşük

çıkmıştır. Şekil 5.2'de numunelerin yüzeyi üzerinde sürtünmeye maruz kalmayan ilk yüzey, sürtünme testinin yapıldığı bölge ve çevrimli sürtünme/çizik testinin yapıldığı bölgelerin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. CV1 (TiAlCN) kaplamasının aşınma hattının stabil olmasından ve CV1 kaplamasının özellikle sıvı sürtünme durumunda sürtünme katsayısının düşük çıkmasından dolayı, Bölüm 4.2.2'deki kimyasal aşındırma yöntemi ile açılan lineer dokuların kardeşlerine bu kaplama türü uygulanmıştır. Katalog değeri incelendiğinde CK2 (TiCN) kaplama hariç diğer gruplarda aralarında benzer orantıda sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.2'de CK2 kaplamanın kaplama yapışma özelliği kabul edilebilir sonuç verse de çevrimli test sonucu incelendiğinde kaplamanın genişleme ölçüsü diğerlerine göre fazla çıkması yüzeyin düz yüzey gibi davranmasını neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.2. Düz yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri

5.2. Bilyalı Dövme ile Oluşturulan Dokulu Numunelerin Test Sonuçları

Tablo 5.2'de ilgili bölümde detaylı şekilde gösterilen ve yüksek türbin kapasitesine sahip I nolu proseste oluşturulan dokulu yüzeylerin test sonuçları ve düz yüzeye göre değişim oranları verilmiştir. Düz yüzey kuru sürtünme şartlarında sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsaysısı sırasıyla 144,5 Nmm, 0,22 ve 0,21; sıvı sürtünme durumunda

ise sırasıyla 102,5 Nmm, 0,09 ve 0,15 hesaplanmıştır. Kuru sürtünme şartlarında; düz yüzeylerde harcanan sürtünme enerjisi 144,5 Nmm; yağ kullanımında ise bu değer %29,1 azalarak 102,5 Nmm'ye düşmüştür. Dokusuz yüzeylerde yağlama kullanımıyla sürtünme direncinin azalması beklenen bir sonuçtur.

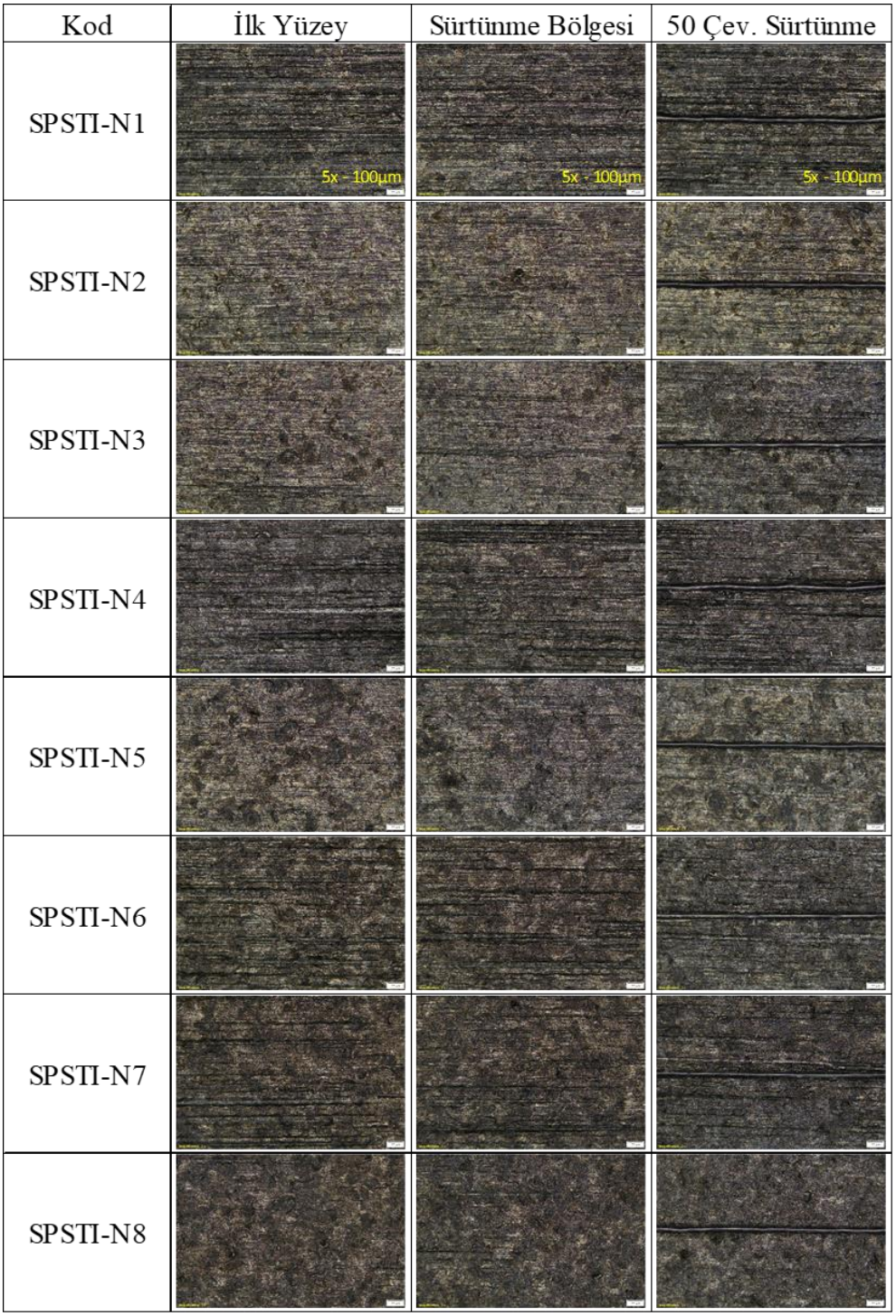
Tablo 5.2. I nolu proseste oluşturulan yüzey dokulu kaplamasız numunelerin test sonuçları

Numune	E_S [Nmm]				COF_S [-]				COF_K [-]			
	K		Y		K		Y		K		Y	
DY1 (Ref)	144,50	%Δ	102,50	%Δ	0,22	%Δ	0,09	%Δ	0,21	%Δ	0,15	%Δ
SPSTI-N1	113,57	-21	96,45	-6	0,15	-30	0,20	119	0,16	-22	0,14	-8
SPSTI-N2	117,64	-19	42,42	-59	0,20	-10	0,13	43	0,17	-19	0,06	-60
SPSTI-N3	124,16	-14	132,32	29	0,19	-12	0,13	42	0,18	-15	0,19	29
SPSTI-N4	108,94	-25	85,55	-17	0,17	-21	0,09	2	0,16	-25	0,13	-16
SPSTI-N5	107,66	-25	45,18	-56	0,19	-13	0,15	70	0,16	-25	0,06	-58
SPSTI-N6	121,04	-16	132,76	30	0,17	-21	0,12	36	0,18	-16	0,19	28
SPSTI-N7	113,55	-21	94,15	-8	0,18	-17	0,07	-18	0,16	-22	0,14	-9
SPSTI-N8	122,88	-15	86,58	-16	0,21	-5	0,05	-42	0,18	-16	0,12	-17

Tablo 5.2'de görüldüğü üzere kuru sürtünme şartlarında, bütün dokulu numunelerin sürtünme enerjisi düz yüzey sonuçlarına göre düşük çıkmıştır. G1 kalite, Ø 0,9 mm bilya ile oluşturulan dokuların kalıp ile sac arasındaki gerçek temas alanını ve kohezyon kuvvetlerini azaltması sebebiyle bütün numunelerde sürtünme katsayısı referans numuneye göre düşük çıkmıştır (Balyalı, 2015; Azushima, 2021). Bu gruptaki en iyi sonuç, SPSTI-N5 (I nolu makine 150 saniye) numunesinde sürtünme enerjisi %25 (107,66 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %25 (0,16) oranında azalmıştır. Şekil 5.3'te gösterildiği üzere SPSTI-N5 nolu numunenin hem sürtünme yüzeyi çiziklere karşı direnç göstermiştir hem de çevrimli test sonrası yüzey özelliği daha kararlı çıkmıştır.

Tablo 5.2'de belirtilen sıvı sürtünme şartlarında; I nolu proseste SPSTI-N3 (I nolu makine 90 saniye) ve SPSTI-N6 (I nolu makine 180 saniye) nolu numuneler hariç numunelerin sürtünme enerjisi düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, sürtünme enerjisi %59 (42,42 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %60 (0,06) oranında SPSTI-N2 (I nolu makine 60 saniye) numunesinde azalmıştır. Normal şartlar altında dokulara dolan yağ, yağın giriş basıncı ile yük altında hidrostatik karşı basınç oluşturarak tribo çiftlerin temas oranlarını azaltır. Böylece sınır yağlama durumundan hidrostatik yağlama koşuluna geçiş ile sürtünme katsayısı azalır; ancak dokuların geometrisi yük altında hareket eden

sacın kalıba yaptığı etkiyle birlikte ortaya çıkan hidrodinamik etki akışkanlar mekaniği ilkelerine uygun olarak davranış değiştirmektedir. Uygun şartlar meydana gelmediğinde yağ, sınır yağlama koşulları oluşmadığında istenilen şekilde yağlayıcılık özelliğini gösterememektedir.



Şekil 5.3. SPSTI dokulu kaplamasız yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri

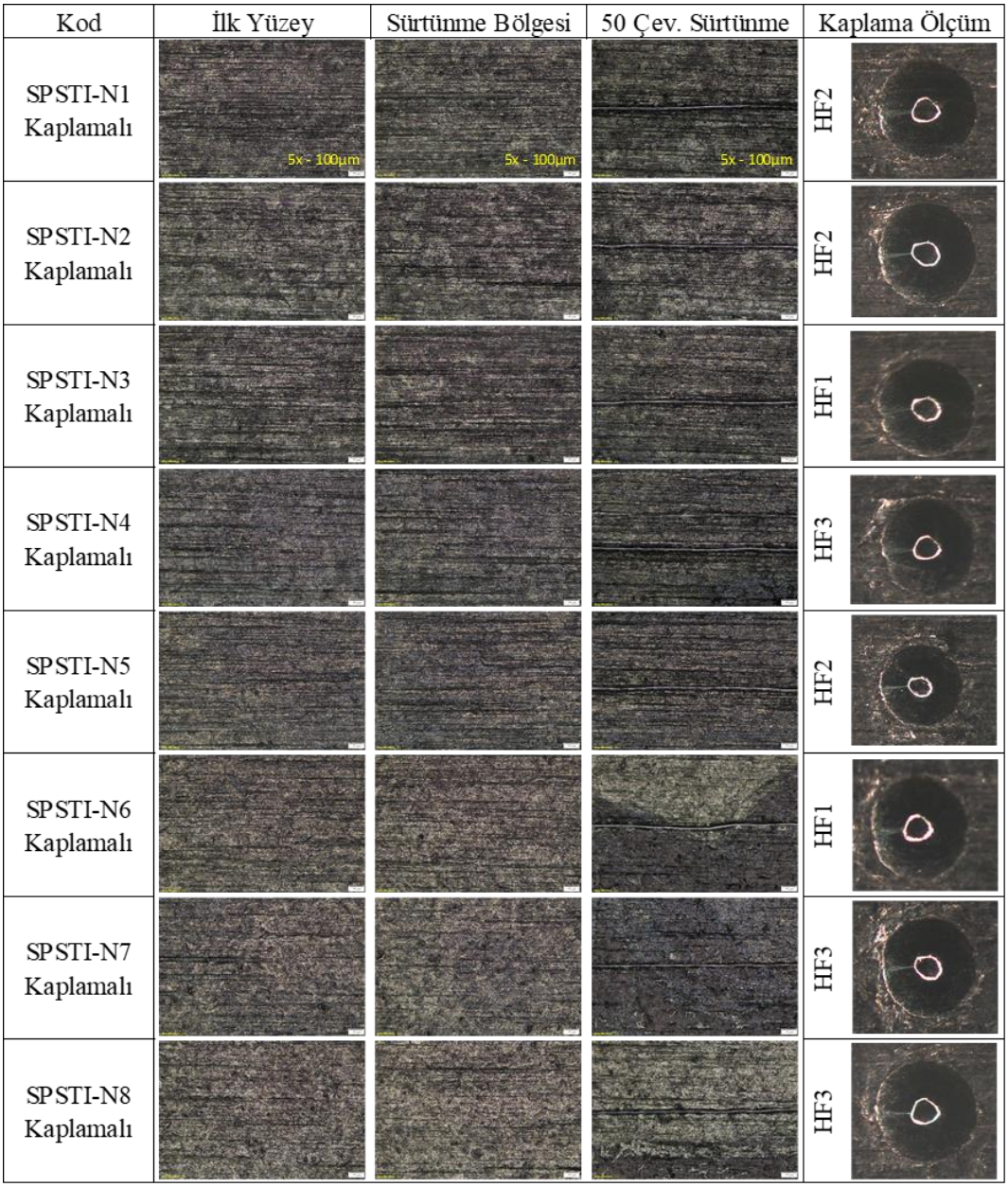
Mikro seviyede de olsa aşınma ürünlerinin oluşan haznelere dolması, hareket esnasında sacın ve karşı yüzeyin (kalıbın) tepe ve vadi arasında biriken aşınma ürünleri gerek kuru gerek yağlı ortamlarda üç cisimli abrasif aşınmaya neden olabilmektedir. Dolayısıyla sınır yağlama şartları sağlanmayan durumlarda halen geçerli olan abrasif aşınma mekanizmaları hatta yağın yüzeylerle olan kohezyon kuvvetleri sürtünme katsayısının artmasına neden olabilir. Numunelerin yüzeyleri hidrofilik olup kontak açıları 46,8° ile 50,8° arasındadır. Yüzeyin ıslanabilir olmasına rağmen kuru sürtünme durumuna göre "% değişim oranları" numune grupları arasında farklılık göstermesi ve iki (3 ve 6 nolu) numunenin yüksek çıkması yukarıdaki kök nedenlere ek olarak kalıp ile sac arasındaki tepeciklerin etkileşim durumlarından etkilenmektedir (Balyalı, 2015; Toparlı, 2023).

Tablo 5.3. I nolu proseste oluşturulan CT1(Moldex Extra) kaplamalı yüzey dokulu numunelerin sürtünme test sonuçları

Numune	E_S				COF_S				COF_K			
	[Nmm]				[-]				[-]			
	K		Y		K		Y		K		Y	
DY-CT1	120,09		95,7		0,18		0,14		0,17		0,14	
DY-CV1' (Ref)	75,00	%Δ	73,00	%Δ	0,12	%Δ	0,10	%Δ	0,11	%Δ	0,09	%Δ
SPSTI-N1	120,63	61	36,64	-50	0,22	80	0,07	-34	0,17	58	0,05	-41
SPSTI-N2	127,26	70	180,84	148	0,21	79	0,15	47	0,18	67	0,27	196
SPSTI-N3	127,33	70	104,79	44	0,19	58	0,06	-36	0,18	66	0,15	70
SPSTI-N4	133,48	78	96,51	32	0,23	92	0,05	-53	0,19	74	0,14	57
SPSTI-N5	134,57	79	159,01	118	0,24	96	0,16	59	0,19	76	0,23	157
SPSTI-N6	119,20	59	84,78	16	0,20	65	0,00	-97	0,17	56	0,12	37
SPSTI-N7	145,29	94	157,87	116	0,25	105	0,03	-68	0,21	91	0,23	159
SPSTI-N8	131,67	76	48,33	-34	0,17	42	0,05	-53	0,19	72	0,07	-22

Tablo 5.3'te I nolu proses ile oluşturulan dokulu CT1(Moldex Extra) ile kaplanmış yüzeylerin sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayısı sonuçları, CT1 düz yüzeyden ziyade gelişimi daha agrasif şekilde görmek için yüzeyi CV1'(CV1- TiAlCN duplex variantic 1000 grubundaki yüksek değer) yeni nesil kaplama ile kaplanmış düz yüzeye sahip kalıp numunesinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. CV1' kaplamalı düz yüzeyin kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjisi 75,0 N.mm; statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,12 ve 0,11 olarak hesaplanmıştır. Kuru sürtünme durumunda sekiz numunenin de sürtünme enerjisi değeri CV1' kaplamalı düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Ayrıca CT1 kaplamalı düz yüzeye göre iki numune yakın çıksa da sonuçlar yüksek çıkmıştır. Şekil 5.4'teki yüzeyler incelendiğinde kaplama yapışma

özelliğinin kabul edilebilir sınırda olmasına rağmen, rastgele açılan dokuların kaplama ile uyum sağlayamaması, 4-5 mikron boyutundaki dokuların kaplama ile dolması kaynaklı yüzeylerin düz yüzey teması gibi davrandığı düşünülmüştür. Ayrıca Tablo 5.12'deki 50 çevrim sonrası test sonuçları incelendiğinde kaplamalı yüzeylerin sürtünme enerjileri ilk beş numunede artmışken son üç numunede azalmıştır.



Şekil 5.4. SPSTI dokulu CT1 kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri

Tablo 5.3'te belirtilen CV1' kaplamalı düz yüzey numunenin sıvı sürtünme durumunda sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 73,0 N.mm, 0,10 ve 0,09

hesaplanmıştır. SPSTI-N1 (I nolu makine 30 saniye) ve SPSTI-N8 (I nolu makine 240 saniye) numuneleri hariç düz yüzeye göre sonuçlar yüksek çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, sürtünme enerjisi %50 (36,64 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %41 (0,05) oranında SPSTI-N1 numunesinde azalmıştır. Kaplamanın, geometrik dokuların oluşturulduğu yüzeylerin kuru ve sıvı sürtünme durumlarında tribolojik özelliklerini çoğunlukla iyileştirdiği bilinmektedir. Bilyalı dövme prosesine benzer yöntemler ile açılan rastgele dokularda kaplama malzemesi yüzeyde oluşan dokunun geometrisini ve ölçülerini mikron mertebesinde de olsa değiştirmektedir. Bu nedenle de kaplama sürtünme katsayısını azaltan ve arttıran yönde davranabilmektedir (Chen ve diğ., 2021). Özellikle yük altında, doku içindeki yağda oluşan hidrostatik ve hidrodinamik etkiler değişmektedir. Bu durum daha iyi bir karşı basınç oluşturabilir ya da sınır yağlamada olumlu sonuçlar doğurabileceği gibi yağ filminin kesilmesine ve sürtünme katsayısının artmasına da neden olabilmektedir. Diğer yandan kaplamalı kalıp malzemesinde, aşınma eğilimi de oldukça azalacaktır. Dolayısıyla aşınan kalıp malzemesinin üç cisimli abrasif aşınmaya neden olma eğilimi azalacaktır. Fakat diğer yandan sac ile kalıp arasındaki sertlik farkı artacağından sac malzemede aşınma eğiliminin artması ve aşınma ürünlerinin sürtünme sürecinde sürtünme katsayısını ve aşınma miktarını arttırması söz konusu olabilmektedir (Cao ve diğ., 2020; Xing ve diğ., 2018). Tablo 5.6'da verilen kontak açısı değerlerine göre sekiz numunenin de yüzey enerjilerinin birbirlerine yakın çıkmasına rağmen sıvı sürtünme durumunda 1 (I nolu makine 30 saniye) ve 8 (I nolu makine 240 saniye) numaralı numuneler hariç diğer numunelerin yüksek çıkması hatta aralarındaki farkların yüksek olması yukarıda bahsedildiği gibi üç cisimli abrasif aşınma durumundan oluştuğu değerlendirilmiştir.

Tablo 5.4'te II nolu proseste oluşturulan dokulu yüzeylerin test sonuçları ve düz yüzeye göre değişim oranları verilmiştir. Bu grupta kuru sürtünme durumunda, SPSTII-N2 (II nolu makine 12 saniye) numaralı yüzey hariç bir iyileşme gözlemlenmemiştir. SPSTII-N2 numunesinin sürtünme enerjisi %10 (129,52 N.mm) ve kinetik sürtünme katsayısı %11 (0,19) oranında azalmıştır. Sıvı sürtünme durumunda ise sadece SPSTII-N4 (II nolu makine 16 saniye) ve SPSTII-N8 (II nolu makine 20 saniye) numaralı numunenin sürtünme enerjisi düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, sürtünme enerjisi %35 (66,41 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %36 (0,10) oranında SPSTII-N8 numunesinde azalmıştır. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere II nolu proses ile doku

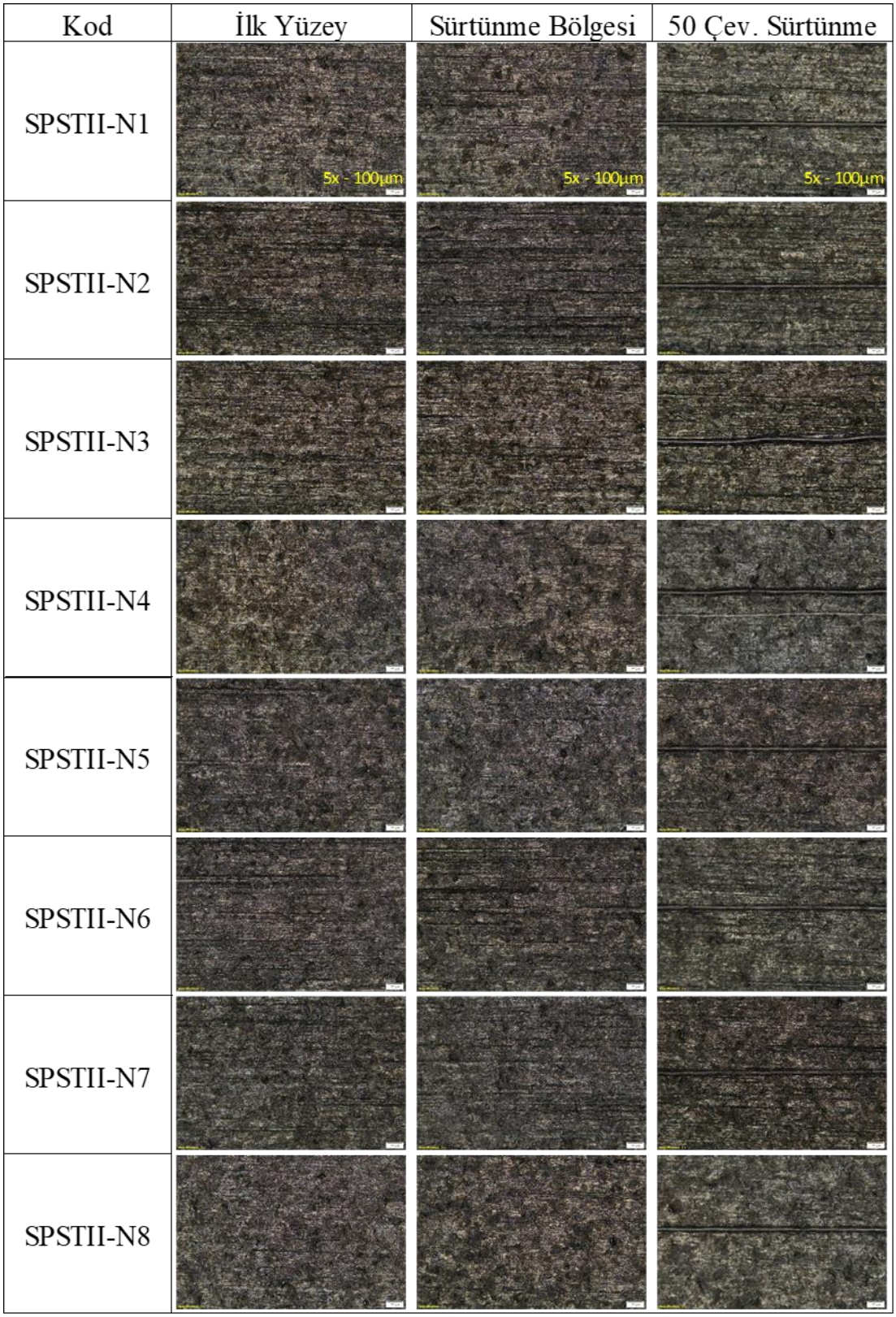
oluşturulan yüzeylerin hem G2 kalite, 0,8 mm çaplı bilya ile kaplanma oranları hem de Almen yükseklikleri, I nolu prosesteki yüzeylere göre düşük çıkmıştır. I nolu proses için yapılan açıklamalarda da belirtildiği üzere oluşturulan dokuların geometrileri ve boyutlarının uygun olmaması durumunda, yüzeyler arasında yağ olmasına rağmen uygun yağlama şartları oluşmamasına, yağ filminin kesilmesine neden olmaktadır. Yağ filminin kesilmesi, aşınma ürünlerinin devreye girmesi ile üç cisimli abrazif aşınma şartlarının oluşması, aşınma ürünlerinin oluşan dokular içine birikmesi ve adhezyonu arttırması gibi sebeplerden dolayı dokular istenilen sonuçları vermemiştir. Ayrıca Şekil 5.5'teki sürtünme yüzeyleri incelendiğinde yüzeydeki dokulu yapının sac ile gerçek temas alanını azaltmaya yönelik etkileşiminin olmadığı gözlemlenmiştir, bu durum da düz yüzey sürtünme davranışı göstermektedir.

Tablo 5.4. II nolu proseste oluşturulan kaplamasız dokuların sürtünme test sonuçları

Numune	E_S				COF_S				COF_K			
	[Nmm]				[-]				[-]			
	K		Y		K		Y		K		Y	
DY (Ref)	144,50	%Δ	102,50	%Δ	0,22	%Δ	0,09	%Δ	0,21	%Δ	0,15	%Δ
SPSTII-N1	166,35	15	207,48	102	0,24	9	0,16	73	0,24	15	0,30	103
SPSTII-N2	129,52	-10	115,36	13	0,21	-6	0,03	-68	0,19	-11	0,17	12
SPSTII-N3	165,87	15	156,10	52	0,25	15	0,01	-84%	0,24	14	0,23	53
SPSTII-N4	175,55	21	101,40	-1	0,31	40	0,16	80	0,25	21	0,15	-3
SPSTII-N5	180,84	25	172,71	69	0,29	32	0,08	-16	0,26	26	0,25	69
SPSTII-N6	152,74	6	138,79	35	0,22	2	0,05	-40	0,22	5	0,20	35
SPSTII-N7	146,10	1	172,48	68	0,23	6	0,09	4	0,21	1	0,25	70
SPSTII-N8	165,78	15	66,41	-35	0,26	16	0,16	76	0,24	14	0,10	-36

Tablo 5.5. II nolu proseste oluşturulan CT1(Moldex Extra) kaplamalı dokuların sürtünme test sonuçları

Numune	E_S				COF_S				COF_K			
	[Nmm]				[-]				[-]			
	K		Y		K		Y		K		Y	
DY-CT1	120,09		95,7		0,18		0,14		0,17		0,14	
DY-CV1' (Ref)	75,00	%Δ	73,00	%Δ	0,12	%Δ	0,10	%Δ	0,11	%Δ	0,09	%Δ
SPSTII-N1	159,28	112	53,49	-27	0,24	99	0,10	5	0,23	109	0,08	-14
SPSTII-N2	153,03	104	150,88	107	0,21	75	0,13	31	0,22	102	0,22	148
SPSTII-N3	158,75	112	99,35	36	0,25	110	0,18	76	0,23	108	0,14	60
SPSTII-N4	150,85	101	123,76	70	0,25	105	0,03	-66	0,22	99	0,18	101
SPSTII-N5	158,30	111	158,21	117	0,19	60	0,03	-72	0,23	109	0,23	156
SPSTII-N6	149,52	99	74,26	2	0,25	109	0,10	0	0,22	97	0,11	20
SPSTII-N7	163,20	118	143,67	97	0,24	104	0,06	-40	0,24	116	0,21	134
SPSTII-N8	145,59	94	55,65	-24	0,25	106	0,07	-30	0,21	91	0,08	-10

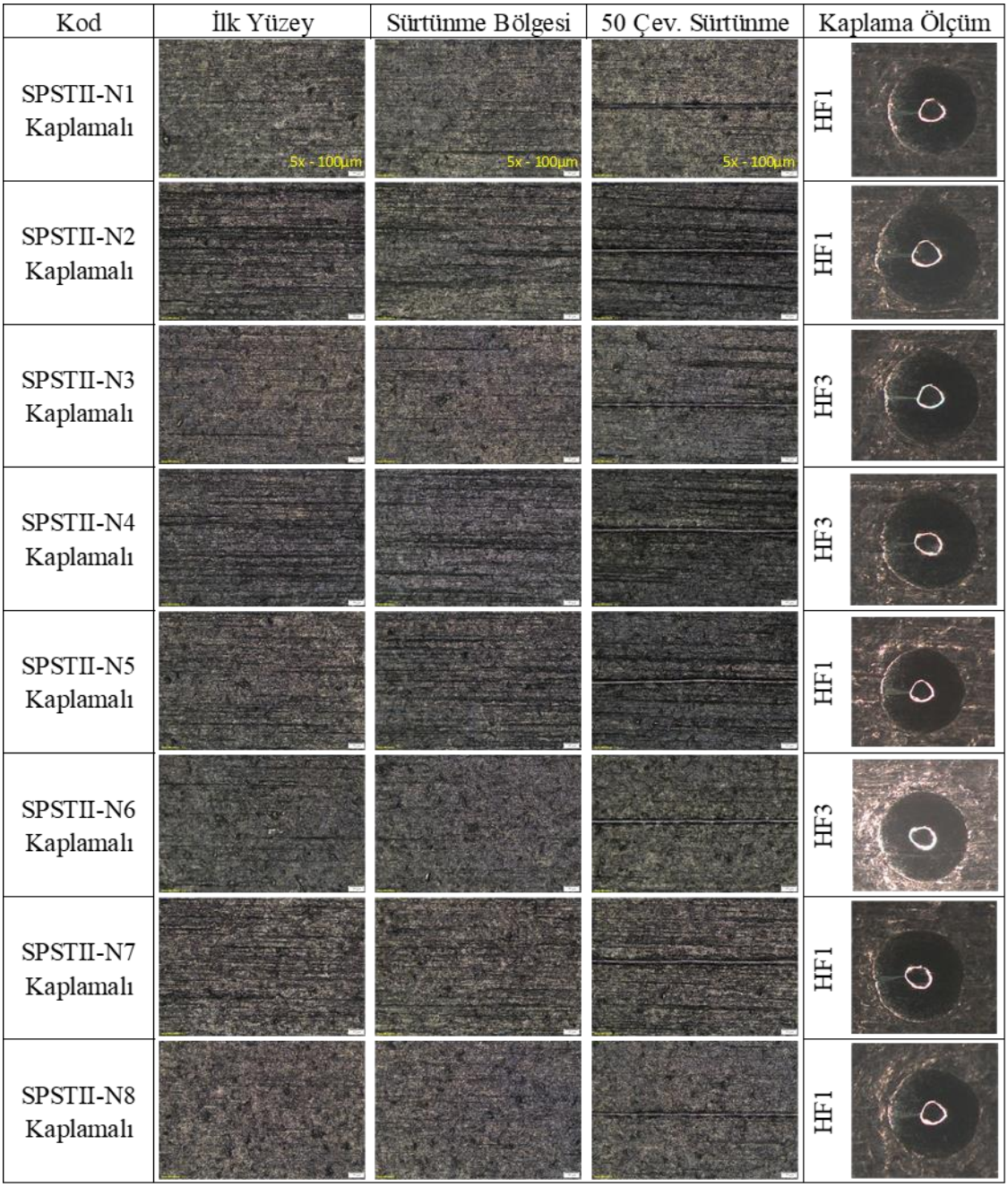


Şekil 5.5. SPSTII dokulu kaplamasız yüzey yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri

Tablo 5.5'te II nolu proses ile oluşturulan dokulu CT1(Moldex Extra) kaplanmış yüzeylerin sürtünme enerjisi, statik ve kinetik sürtünme katsayısı sonuçları, yüzeyi CV1' kaplanmış düz yüzeye sahip kalıp numunesinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kuru sürtünme durumunda, dokulu sekiz numunenin de sürtünme enerjisi değeri kaplamalı düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Şekil 5.6'da belirtilen kaplama yapışma özellikleri kabul edilebilir aralıkta olmasına rağmen, sürtünme yüzeyleri incelendiğinde yüzeydeki dokulu yapının sac ile gerçek temas alanını azaltmaya yönelik etkileşiminin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda dokulu yüzey düz yüzey sürtünme davranışı göstermektedir. Sıvı sürtünme durumunda ise dokulu numunelerden SPSTII-N1 ve SPSTII-N8 numaralı numunelerin sürtünme enerjisi değeri düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, sürtünme enerjisi %27 (53,94 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %14 (0,08) oranında SPSTII-N1 numunesinde azalmıştır. I nolu proses kaplamalı grubunda da açıklandığı üzere II nolu proseste oluşturulan kaplamalı dokuların kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjilerinin yakın çıkması, yüzey enerjilerinin birbirlerine yakın olmasındandır. Şekil 4.3'te belirtildiği üzere II nolu prosesin G1 kalite, Ø0,8 mm bilya ile yüzey örtme oranı, I nolu prosese göre daha düşüktür. Ayrıca Tablo 5.6'da gösterilen almen değerleri de alt limit olan 0,3 mm değerine çok yakındır. Sınırlarda olan bu iki özellik, yüzeyde doku yerine dağınık pürüzlü bir yapı oluşturmuştur. Yukarıda da açıklandığı üzere kaplamanın rastgele dokulardaki etkisi ile birlikte bu iki etken bir araya geldiğinde üç cisimli abrasif aşınma ortaya çıkarak sürtünme ve aşınmayı arttırmaktadır. Sıvı sürtünme durumunda düşük çıkan iki yüzey ise bahsedilen uygun şartların bir araya gelmesi durumunda yağ filmi oluşumunun hızlandığını göstermektedir.

Tablo 5.6'da kalıp ve sac yüzeylerin test öncesi ve sonrası pürüzlülük değerleri incelendiğinde, pürüzlülük değerlerindeki artma ve azalma durumlarının sürtünme enerjisi değişimleri ile doğrudan bağlantısı olmadığı ve bilyalı dövme gibi rastgele açılan dokularda ilişki kurulamayacağı gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin düşük olması kalıp üzerindeki dokuların tepeciklerinin yüksekliklerinin düşük olmasına yol açmakta; fakat tepeciklerin yüzey üzerindeki dağılımı, yoğunluğu ve konumlarının değişmesi ile ilgili bir sonuç içermemektedir. Ra değerlerinin düşük olması oluşan dokuların geometrilerinin değişmesine, daha sığ dokuların oluşmasına, aşınma ürünlerinin haznelere dolma eğiliminin yükselmesine,

yüzeylerin birbirlerine adhezif olarak daha fazla çekmesine yol açması gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu şartlar altında sürtünme katsayısının yükselmesi söz konusu olabilmektedir (Chen ve diğ., 2021).

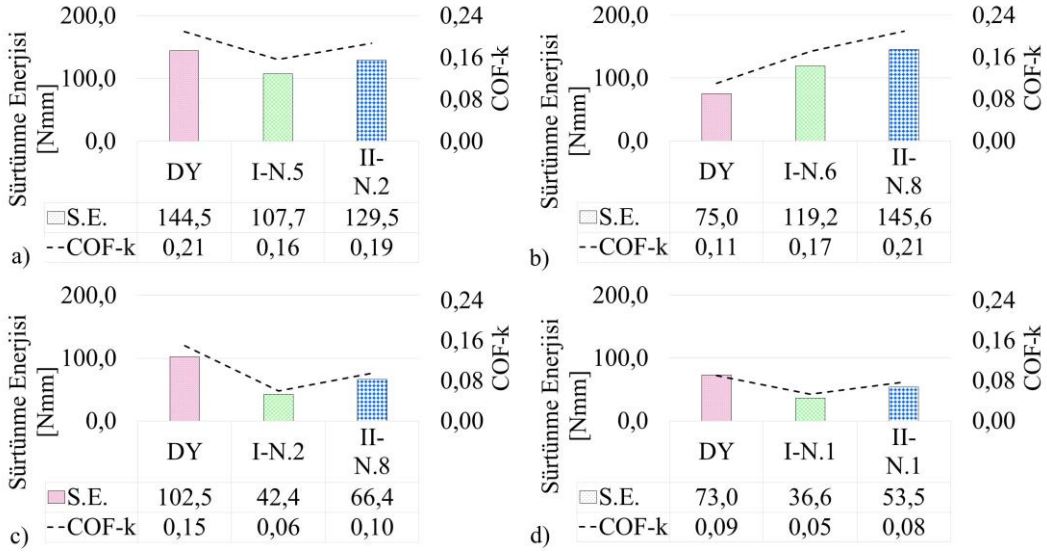


Şekil 5.6. SPSTII dokulu CT1 kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri

Tablo 5.6. Numunelere ait kontak açısı, Almen yüksekliği ve test öncesi-sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

Numune	Kontak Açısı KA [°]		Almen Yüksekliği [mm]	Ra-Kaplamasız Yüzey Pürüzlülük Ölçümü-µm				Ra-Kaplamalı Yüzey Pürüzlülük Ölçümü- µm			
				Test Öncesi		Test Sonrası		Test Öncesi		Test Sonrası	
	Kaplamasız	Kaplamalı		Kalıp	Sac	Kalıp	Sac	Kalıp	Sac	Kalıp	Sac
DY	71,850	60,000	-	1,059	1,063	1,132	1,116	0,068	1,409	0,084	1,191
I-N1	50,857	38,514	0,482	1,187	1,449	1,111	1,265	1,111	1,209	0,979	1,410
I-N2	48,223	37,675	0,463	0,923	1,271	0,938	1,365	1,026	1,292	1,008	1,440
I-N3	49,699	38,959	0,453	0,855	1,531	0,891	1,568	0,951	1,470	1,178	1,307
I-N4	46,845	39,416	0,549	1,222	1,443	1,186	1,604	1,196	1,236	1,296	0,932
I-N5	46,846	40,381	0,532	0,904	1,554	0,932	1,289	0,942	1,339	1,011	1,358
I-N6	49,480	41,432	0,627	1,076	1,524	1,263	1,694	1,257	1,216	1,110	1,418
I-N7	50,863	41,102	0,658	1,119	1,336	0,964	1,358	1,134	1,370	1,092	1,464
I-N8	49,480	36,886	0,636	1,001	1,505	1,048	1,742	1,156	1,639	0,941	1,303
II-N1	50,859	46,580	0,325	0,911	1,448	0,797	1,393	0,891	1,337	0,875	0,932
II-N2	50,858	45,111	0,384	1,188	1,228	1,013	1,383	1,077	1,247	1,223	1,180
II-N3	52,348	46,847	0,339	1,157	1,488	1,137	1,278	0,981	1,538	0,991	1,390
II-N4	52,354	43,777	0,410	0,936	1,456	1,120	1,512	1,146	1,570	0,962	1,493
II-N5	52,350	45,107	0,381	1,155	1,369	1,001	1,393	1,322	1,377	1,094	1,399
II-N6	50,854	46,843	0,342	1,204	1,440	1,272	1,678	1,165	1,306	1,074	0,998
II-N7	50,852	43,772	0,371	1,198	1,356	1,119	1,197	1,196	1,308	1,284	1,266
II-N8	50,863	45,111	0,391	0,955	1,374	1,068	1,396	1,341	1,494	1,320	1,463

Şekil 5.7'de dokulu grupların düz yüzeye göre iyileştirme olma durumunda en iyi gruplar; iyileştirme yok ise en yakın gruplar gösterilmiştir. Bilyalı dövme ile yüzeye açılan dokular üzerine uygulanan CT1 (CrN) kaplama sürtünmeyi, sıvı sürtünme durumunda kısmen azaltsa da kuru sürtünme durumunda bütün yüzeylerde arttırmıştır.



Şekil 5.7. Bilyalı dövme sürtünme test sonuçları a) kaplamasız kuru, b) kaplamalı kuru sürtünme, c) kaplamasız sıvı, d) kaplamalı sıvı sürtünme

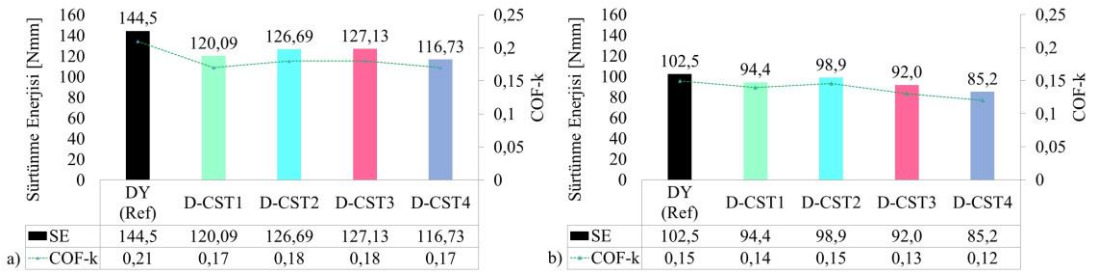
5.3. Kimyasal Aşındırma ile Oluşturulan Numunelerin Test Sonuçları

5.3.1. Kimyasal Grup-1

Tablo 5.7'de ve Şekil 5.8'de DKET firmasının oluşturmuş olduğu daire ve kare dokuların sürtünme testi ve kontak açısı ölçüm sonuçları yer almaktadır. Kontak açısı tabloda "KA" olarak gösterilmiştir. CST1 ve CST2 sırasıyla 50 µm ve 90 µm derinliğindeki daire dokuları, CST3 ve CST4 sırasıyla 50 µm ve 90 µm derinliğindeki kare dokuları tanımlamaktadır.

Tablo 5.7. Kimyasal dokulu grup-1 numunelerin test sonuçları

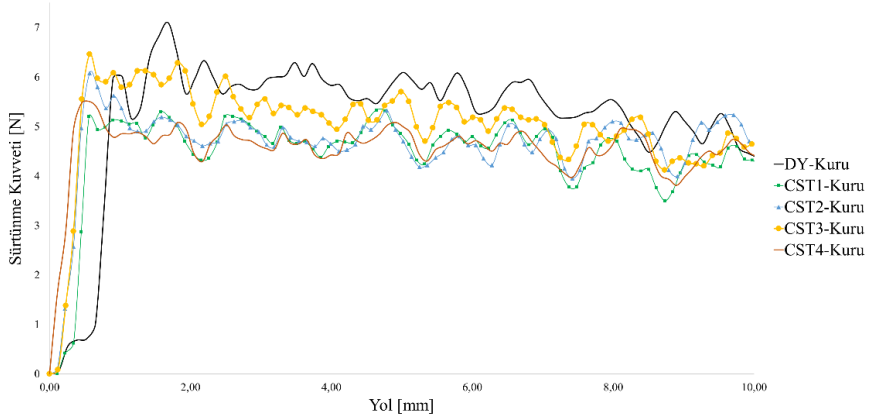
Numune	E_S				COF_S				COF_K				KA
	[Nmm]				[-]				[-]				[°]
	K		Y		K		Y		K		Y		
DY (Ref)	144,5	%Δ	102,5	%Δ	0,22	%Δ	0,09	%Δ	0,21	%Δ	0,15	%Δ	71,8
D-CST1	120,1	-16,9	94,4	-7,9	0,24	9,1	0,02	-77,8	0,17	-19,0	0,14	-6,7	57,4
D-CST2	126,7	-12,3	98,9	-3,5	0,24	9,1	0,08	-11,1	0,18	-14,3	0,15	-2,7	57,8
D-CST3	127,1	-12,0	92,0	-10,3	0,24	9,1	0,02	-77,7	0,18	-14,3	0,13	-13,3	53,1
D-CST4	116,7	-19,2	85,2	-16,8	0,16	-27,3	0,15	66,7	0,17	-19,0	0,12	-20,0	50,8



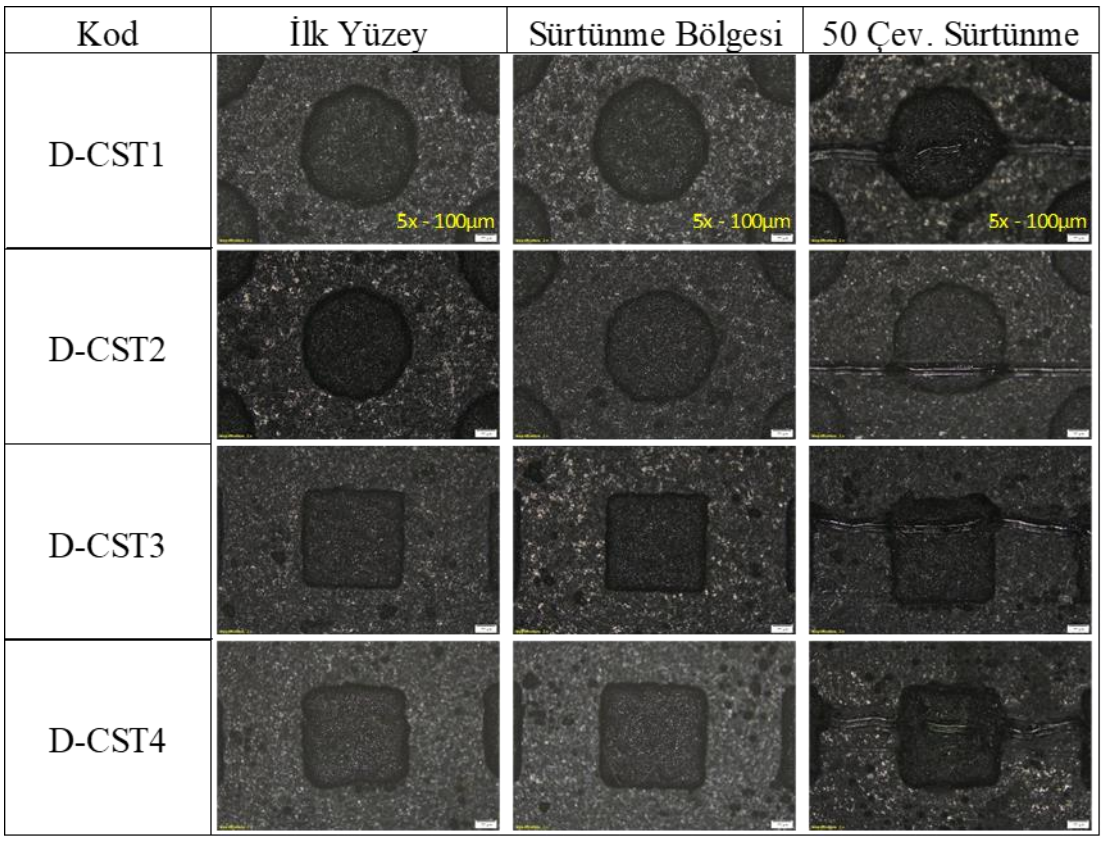
Şekil 5.8. Kimyasal dokulu grup-1 kaplamasız test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme

Daire (CST1,2) ve kare dokuların test sonuçları genel olarak incelendiğinde, sıvı sürtünme durumunda hesaplanan kinetik sürtünme katsayısı, kuru sürtünme durumundaki sürtünme katsayısına göre %42,9 (0,21-0,12) oranında bir azalma göstermiştir. Sürtünme katsayısı sonuçlarına göre kare dokulu numuneler, dairesel dokulu numunelere göre daha yüksek performans göstermiştir. Sürtünme enerjisi düz numuneyle karşılaştırıldığında, CST4 numunesinde kuru sürtünme durumunda yaklaşık %19,2; sıvı sürtünme durumunda ise %16,8 oranında azalmıştır. Kuru sürtünme durumunda, dairesel dokulu yüzeyler arasındaki en düşük sürtünme enerjisi değerleri, düşük derinliğe sahip CST1 (daire 50 µm derinlik) numunesinde çıkmıştır. Kare dokularda ise bu durum ters yönde çıkmıştır. Sonuçlar ise grafiksel olarak Şekil 5.9'da yer alan sürtünme kuvveti-yol grafiğinde

gösterilmiştir. Buna göre sürtünme enerjisinin en yüksekten en düşüğe karşılaştırma sıralaması DY, CST3, CST2, CST1 ve CST4 şeklindedir.



Şekil 5.9. Kuru sürtünme durumunda düz ve dokulu yüzeyler kuvvet yol grafiği



Şekil 5.10. Kimyasal dokulu grup-1 kaplamasız yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri

Şekil 5.10'daki sürtünme ve aşınma bölgelerinin benzer davranışlar sergilemesi, Tablo 5.7'deki sürtünme enerjisi değerlerinin benzer olmasını desteklemektedir. Bu durumda en uygun dokuyu belirlemek için ek testler gerekmektedir. Yüzey dokusunun tribolojik

performans üzerindeki etkisi; sürtünme, aşınma ve yağlama gibi olayların anlaşılmasına dayanan kapsamlı bir teorik çerçeve içerisinde araştırılmıştır. Sac metal ve kalıp malzemeleri arasındaki yüzey etkileşimlerini karakterize etmek için yüzey pürüzlülüğü ISO 4287 standardına göre analiz edilmiştir. En uygun kimyasal yüzey doku (CST) geometrisini belirlemek amacıyla yapılan analizlerde yüzey pürüzlülük parametreleri dikkate alınmıştır.

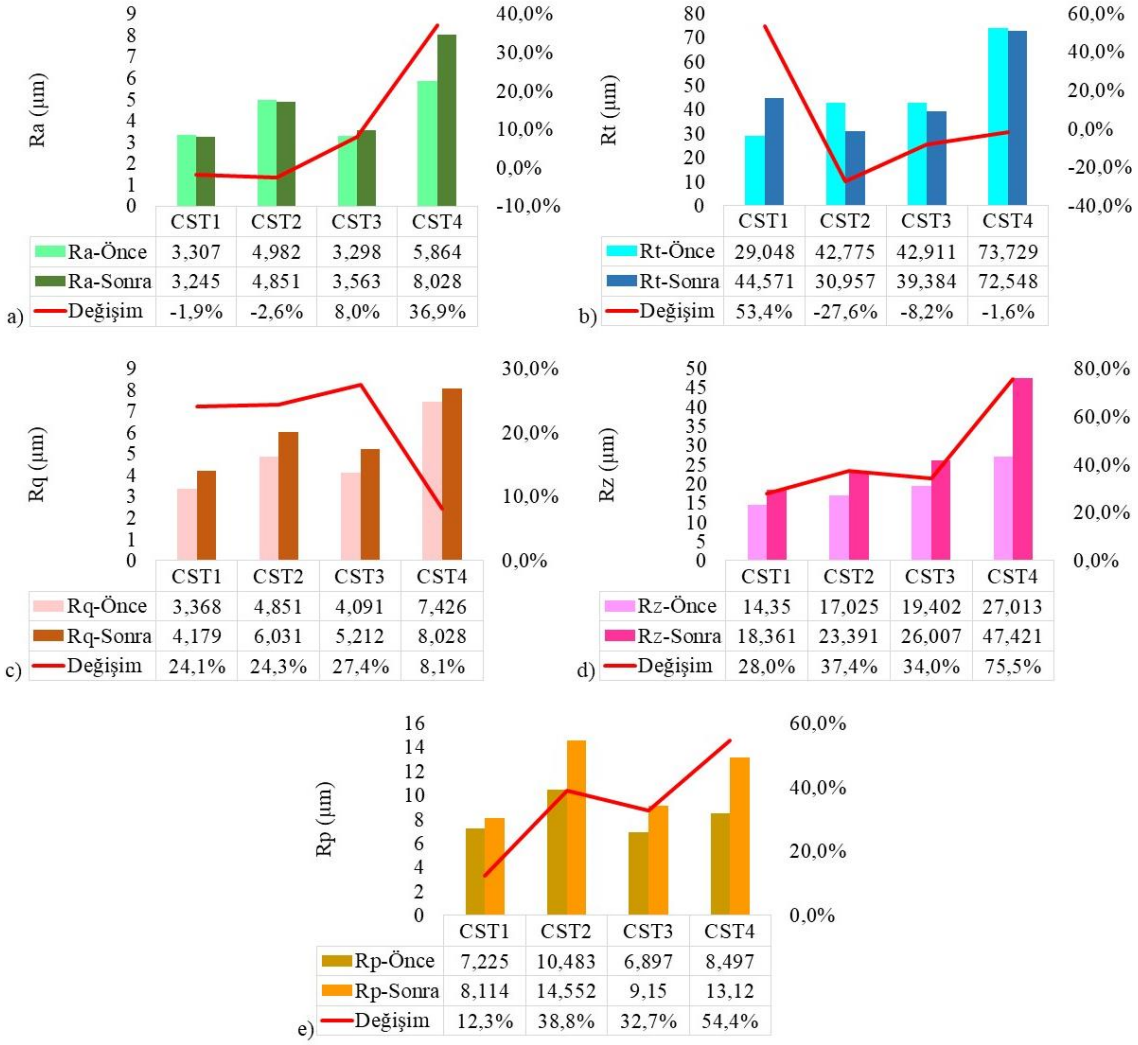
Şekil 5.11.a'da numunelerin morfolojileri için ortalama pürüzlülüğü ifade eden Ra değerlerinin analiz sonuçları sunulmaktadır. Test öncesi Ra değerleri CST1 (daire 50 µm derinlik) için 3,307 µm, CST2 (daire 90 µm derinlik) için 4,982 µm, CST3 (kare 50 µm derinlik) için 3,298 µm ve CST4 (kare 90 µm derinlik) için 5,864 µm; test sonrası bu değerler sırasıyla 3,245 µm, 5,037 µm, 3,563 µm ve 7,643 µm ölçülmüştür. Artan Ra değerleri sürtünme testi sonrasında yüzeyin daha düzensiz hale geldiğini göstermektedir.

Şekil 5.11.b'de ise Rt değerlerinin analiz sonuçları sunulmaktadır. Rt değerleri yüzeydeki en yüksek ve en alçak noktalar arasındaki maksimum yükseklik farkını temsil eder. Test öncesi Rt değerleri CST1, CST2, CST3 ve CST4 için sırasıyla 29,048 µm, 64,775 µm, 42,911 µm ve 73,729 µm; test sonrası bu değerler sırasıyla 44,571 µm, 30,957 µm, 39,384 µm ve 72,548 µm ölçülmüştür. En büyük artış CST1 numunesinde gözlemlenmiştir.

Şekil 5.11.c'de Rq değerlerinin analiz sonuçları sunulmaktadır. Rq değerleri ortalama yüzey pürüzlülüğünün karekökünü temsil eder. Test öncesi Rq değerleri CST1, CST2, CST3 ve CST4 için sırasıyla 3,368 µm, 4,851 µm, 4,091 µm ve 7,426 µm; test sonrası bu değerler sırasıyla 4,179 µm, 6,031 µm, 5,212 µm ve 16,028 µm ölçülmüştür. Numune derinliği ve şekli arttıkça Rq değerlerindeki artışlar daha belirgin hale gelmektedir.

Şekil 5.11.d'de ise Rz değerlerinin analiz sonuçları sunulmaktadır. Rz değerleri yüzeydeki en yüksek ve en alçak noktalar arasındaki mesafeyi gösterir. Test öncesi Rz değerleri CST1, CST2, CST3 ve CST4 için sırasıyla 14,35 µm, 17,025 µm, 19,402 µm ve 27,013 µm; test sonrası bu değerler sırasıyla 18,361 µm, 23,391 µm, 26,007 µm ve 47,421 µm ölçülmüştür. Numune derinliği arttıkça ve deformasyona uğradıkça gözlenen artışlar daha belirgin hale gelmektedir.

Şekil 5.11.e'de Rp değerlerinin analiz sonuçları sunulmaktadır. Rp değerleri ortalama tepe(max) yüksekliği parametresini temsil eder. Aşınma öncesi Rp değerleri CST1, CST2, CST3 ve CST4 için sırasıyla 7,225 µm, 10,483 µm, 6,897 µm ve 8,497 µm; test sonrası bu değerler sırasıyla 8,114 µm, 14,552 µm, 9,150 µm ve 17,120 µm ölçülmüştür. En önemli artış CST4 örneğinde gözlenmiştir.

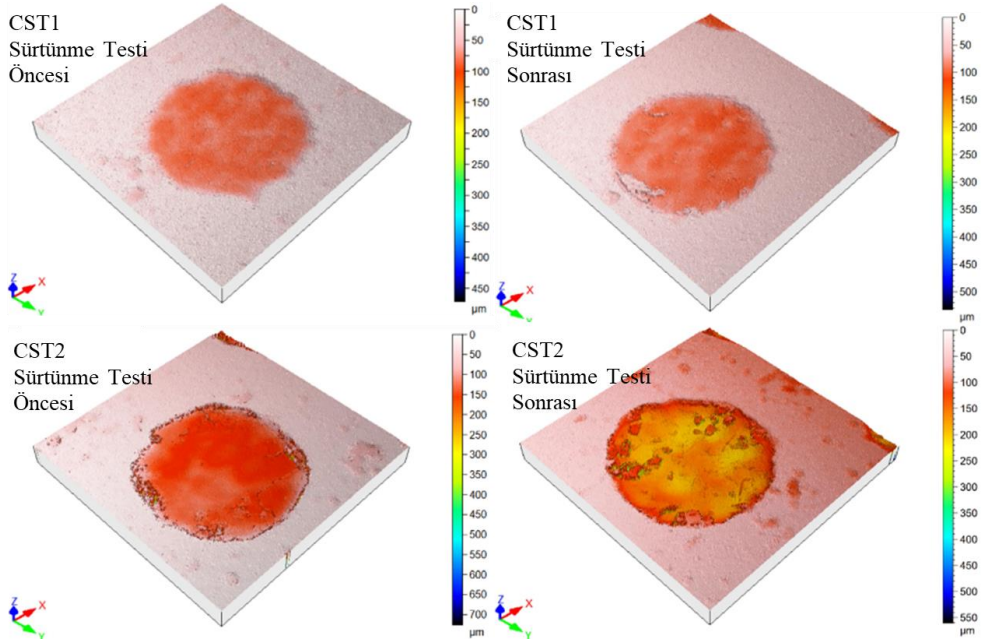


Şekil 5.11. Kimyasal dokulu grup-1 test öncesi ve sonrası dokulu numunelerin a)Ra, b)Rt, c)Rq, d)Rz, e)Rp sonuçları

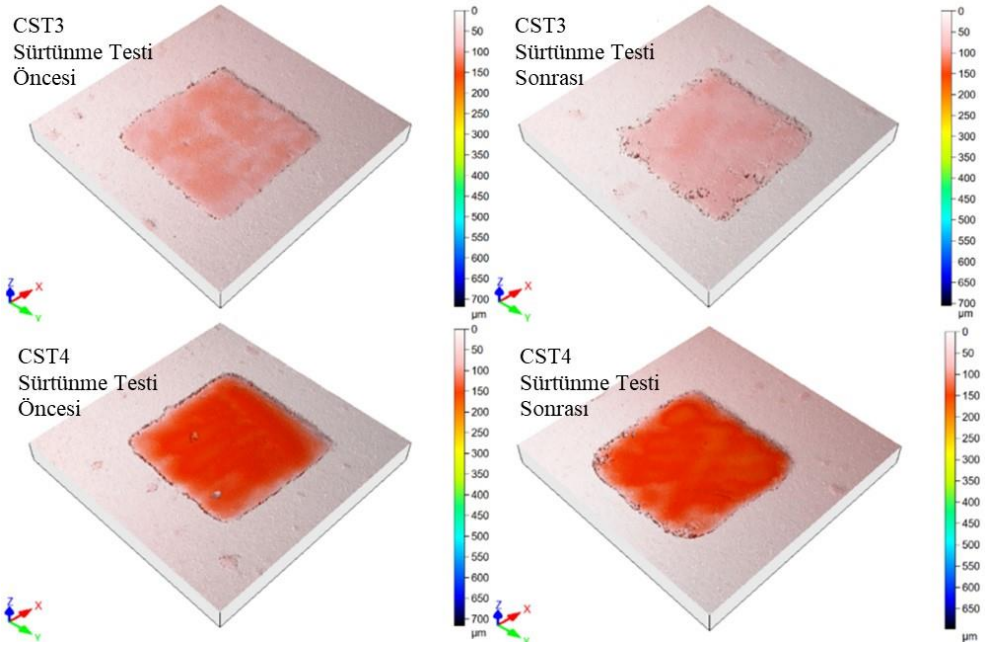
Analiz sonuçlarına göre, CST1 ve CST3 numunelerinin diğerlerine göre daha düşük Ra, Rq, Rt ve Rp değerlerine sahip olması bu numunelerin daha pürüzsüz ve homojen yüzeylere sahip olduğunu göstermektedir. CST1 ve CST3 için test sonrası yüzeyde meydana gelen değişikliklerin analizleri, işlem sonrası pürüzlülüğün ve yapı değişikliklerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır. Daha düşük Ra ve Rq

değerleri, ortalama yüzey pürüzlülüğünde bir azalma olduğunu gösterir; bu da potansiyel olarak şekillendirme sırasında sürtünme ve aşınmanın azaldığını gösterir. Benzer şekilde, daha düşük Rt ve Rp değerleri, maksimum yükseklik farkının ve yüzeydeki belirgin özelliklerin azaldığını gösterir, bu da derin çekme işlemleri sırasında potansiyel olarak daha az gerinim ve kusur olasılığını ifade eder. Ra, Rq, Rt ve Rp değerlerine dayalı analizler, derin çekme işlemleri için en uygun dokunun belirlenmesinde değerli bir veri sağlamıştır. Özellikle Ra değerleri incelendiğinde CST1 ve CST3 değerlerinin daha düşük olduğu ve bu durumun daha düzgün bir yüzey yapısına işaret ettiği görülmüştür. Ayrıca Rt ve Rp değerleri maksimum yükseklik farkının azaldığını ve yüzeyde öne çıkan özellikleri işaret ederek CST1'in ve CST3'ün derin çekme işlemlerine daha uygun olabileceğini düşündürmektedir. CST1 ve CST3 daha düzgün ve homojen yüzey özellikleri nedeniyle derin çekme işlemlerinde daha stabil ve başarılı sonuçlar verebilir. Yüzey dokusunun tribolojik performans üzerindeki etkisi sürtünme, aşınma ve yağlama gibi temel olayların anlaşılmasına dayanır. Yüzey pürüzlülüğü ve yağlama durumu gibi faktörler hem kuru hem de sıvı sürtünme durumlarında sürtünme katsayısını belirler. CST yöntemiyle işlenen yüzeylerdeki düşük sürtünme katsayıları, daha pürüzsüz bir yüzey profilinden ve daha etkili bir yağlama filmi oluşumundan kaynaklanmaktadır. Yüzey morfolojisi ve yağlama filmi kalınlığı gibi faktörler aşınma miktarını belirler. CST yöntemiyle işlenen yüzeylerde aşınma oranlarının düşük olması, yüzeyin daha dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençli olduğunu göstermektedir. Ayrıca kuru sürtünme durumunda, Şekil 5.12'de dairesel mikro yüzey desenleri için testten önceki ve sonraki yüzey koşulları, Şekil 5.13'te ise kare mikro yüzey desenleri için karşılık gelen koşullar gösterilmiştir. 90 µm değinliğe sahip CST2 dokusunun sürtünme testi sonrası görüntülerinde, mikro aşınma parçacık izlerinin daha yoğun olduğu görülmektedir. Aşınan parçaların derin dokuda birikmesi ve üst üste gelme ihtimali hareket esnasında sürtünmeyi arttırdığı değerlendirilmiştir. 90 µm derinliğe sahip CST4 kare doku numunesinin sürtünme testi sonrası yüzey durumu incelendiğinde ise kalıntıların az ya da homojen dağıldığı görünmektedir. Bu nedenle 50 µm derinliğindeki CST3 numunesine göre sürtünme enerjisi daha iyi çıktığı değerlendirilmiştir. Kuru sürtünme durumunda olduğu gibi sıvı sürtünme durumunda da daire dokularda sığ olan derin olan dokuya göre; kare dokularda ise derin olan sığ olan dokulara göre daha iyi performans göstermiştir. Tablo 5.7'de belirtilen kontak açıları CST1, CST2, CST3 ve CST4 numuneleri için

sırasıyla 57,4°, 57,8°, 53,1° ve 50,8°'dir. Düz yüzeye göre daha ıslanabilir olan dokulu yüzeylerin kendi aralarındaki ıslanabilirlik özellikleri de sürtünme enerjileri ile paralel çıkmıştır. Şekil 5.12'de CST2 numunesinin aşınma sonrası yüzey durumu incelendiğinde aşınma parçalarının dokuyu doldurması, yağın doku ceplerine dolmaması ve sınır numuneyi aşamaması nedenlerinden dolayı sonuç düz yüzeye yakın çıkmıştır.



Şekil 5.12. DKET-Dairesel dokular test öncesi ve sonrası yüzey durumları



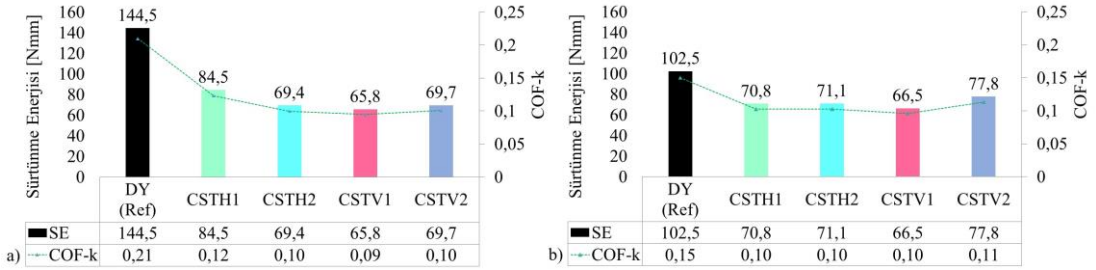
Şekil 5.13. DKET-Kare dokular test öncesi ve sonrası yüzey durumları

5.3.2. Kimyasal Grup-2

Tablo 5.8'de ve Şekil 5.14'te Voestalpine firmasının oluşturmuş olduğu yatay ve dikey lineer kaplamasız dokuların sürtünme testi ve kontak açısı ölçüm sonuçları yer almaktadır. Sürtünme testi hareket yönü ile aynı yönde açılan dokular "H", dik olan dokular ise "V" olarak tanımlanmıştır. Bütün numunelerdeki dokuların genişliği ve düz bölge ölçüleri 1000 µm'dir. CSTH1, CSTH2, CSTV1 ve CSTV2 numunelerinin derinlikleri ise sırasıyla 120 µm, 128 µm, 125 µm ve 132 µm'dir. Tablodan da görüldüğü üzere bütün dokulu numunelerin sürtünme enerjisi kuru ve sıvı sürtünme durumunda düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, kuru sürtünme durumunda CSTV1 numunesinde sürtünme enerjisi %54 (65,8 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %55 (0,09) oranında azalmıştır. Şekil 5.15'te verilen görsellerden sürtünme bölgesi incelendiğinde CSTH1 numunesinin sürtünme bölgesinde doku geçişleri arasındaki düz bölgede aşınma parçalarının kalması sürtünme enerjisinin ve katsayısının yüksek çıkmasına neden olmuştur. Özellikle dikey dokularda CSTV1 numune aşınan parçaların tutulması sürtünme enerjisinin düşmesini sağlamıştır. Sıvı sürtünme durumundaki test sonuçları kontak açılarında olduğu gibi birbirlerine yakın çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, CSTV1 numunesinde sürtünme enerjisi %35 (66,5 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %36 (0,10) oranında azalmıştır.

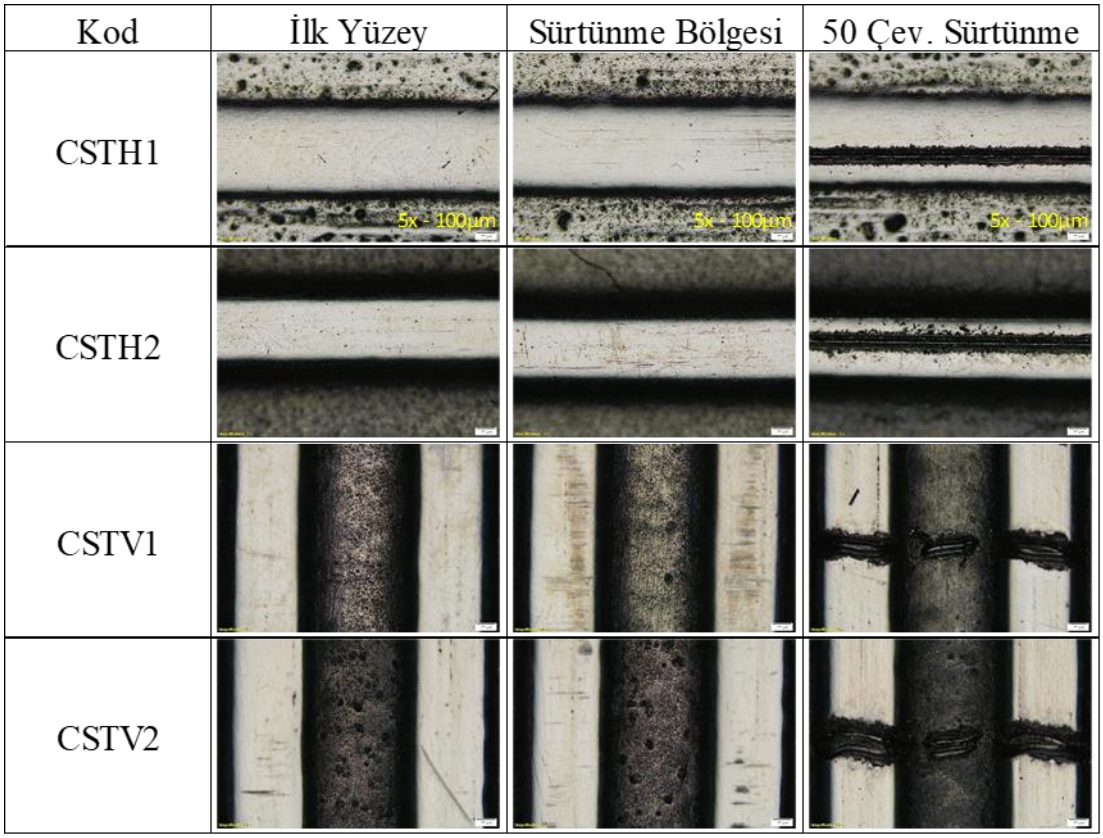
Tablo 5.8. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamasız numunelerin test sonuçları

Numune	E_S [Nmm]				COF_S [-]				COF_K [-]				KA [°]
	K		Y		K		Y		K		Y		
DY (Ref)	144,5	%Δ	102,5	%Δ	0,22	%Δ	0,09	%Δ	0,21	%Δ	0,15	%Δ	71,8
CSTH1	84,5	-42	70,8	-31	0,12	-45	0,07	-21	0,12	-41	0,10	-32	66,5
CSTH2	69,4	-52	71,1	-31	0,11	-51	0,10	12	0,10	-52	0,10	-32	56,1
CSTV1	65,8	-54	66,5	-35	0,08	-62	0,09	4	0,09	-55	0,10	-36	63,3
CSTV2	69,7	-52	77,8	-24	0,11	-51	0,12	34	0,10	-52	0,11	-25	60,6



Şekil 5.14. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamasız test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme

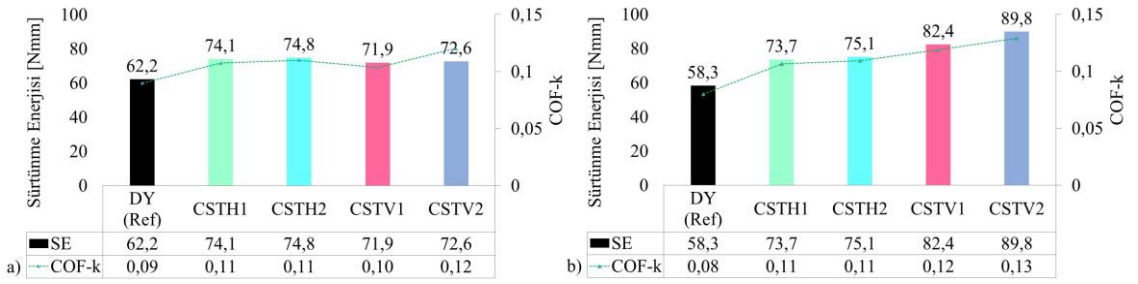
Tablo 5.9'da ve Şekil 5.16'da ise Tablo 5.8'de yer alan dokuların CV1 kaplanmış ikizlerinin sürtünme testi ve kontak açısı ölçüm sonuçları yer almaktadır. Her iki durumda da sürtünme enerjileri düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Şekil 5.17'de belirtilen kaplama yapışma özelliklerinin farklı olmasına rağmen sonuçların benzer çıkması kaplama ile sac metal arasındaki sertlik farkından kaynaklı abrasif aşınmanın başlaması ve adhesif halde devam etmesinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu durumda doku gerçek temas alanını azaltsa da etkileşimlerden kaynaklı kalıp malzemesi düz yüzey gibi davranmıştır.



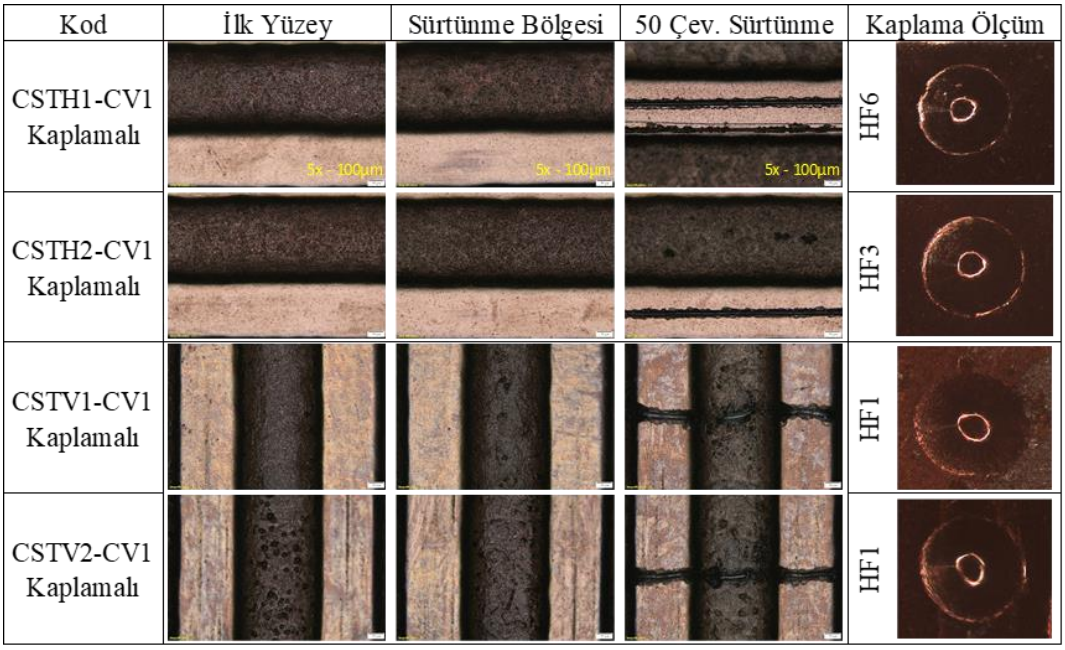
Şekil 5.15. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamasız yüzey test öncesi-sonrası yüzey mikroskop görüntüleri

Tablo 5.9. Kimyasal dokulu grup-2 CV1 kaplamalı numunelerin test sonuçları

Numune	E_S [Nmm]				COF_S [-]				COF_K [-]				KA [°]
	K		Y		K		Y		K		Y		
DY-CV1 (Ref)	62,2	%Δ	58,3	%Δ	0,08	%Δ	0,09	%Δ	0,09	%Δ	0,08	%Δ	60,0
CSTH1	74,1	19	73,7	26	0,08	-2	0,09	3	0,11	19	0,11	33	62,8
CSTH2	74,8	20	75,1	29	0,12	50	0,07	-22	0,11	22	0,11	37	48,0
CSTV1	71,9	16	82,4	41	0,10	29	0,13	40	0,10	15	0,12	48	58,5
CSTV2	72,6	17	89,8	54	0,14	75	0,15	69	0,12	34	0,13	61	62,1



Şekil 5.16. Kimyasal dokulu grup-2 kaplamalı test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme



Şekil 5.17. Kimyasal dokulu grup-2 CV1 kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri

5.4. Lazer İşleme ile Oluşturulan Numunelerin Test Sonuçları

Lazer işleme yöntemi ile açılan bütün dokuların tasarım derinlikleri 100 µm'dir. LST1, LST2 hareket yönüne paralel uzanın kaplamasız H dokulardır. LST3, LST4 hareket yönüne dik uzanan kaplamasız V dokulardır. Her iki dokuların genişlikleri ve düz bölgeleri sırasıyla 500 µm ve 250 µm'dir. LST6-8-10-12-14-16 nolu numuneler CK2 (NovaTic) nolu kaplama türü ile kaplanmıştır. LST5, LST6, LST7 ve LST8 üçgen dokular olup ikizkenar üçgenlerin kenar ölçüleri 1000 µm, 1118 µm, 1118 µm'dir ve üçgenler arası mesafe 1000 µm'dir. LST5 ve LST6 üçgenler hareket yönünde uzanır; LST7 ve LST8 üçgenler ise hareketin tersi yönünde uzanır. LST9, LST10, LST11 ve LST12 aynı ölçüde üçgen dokular olup fark üçgenler arası mesafe 500 µm olmasıdır. LST9 ve LST10 üçgenler hareket yönünde uzanır. LST11 ve LST12 üçgenler hareketin

tersi yönünde uzanır. LST13 ve LST14 elips dokular olup büyük kenarı hareketin tersi yönünde uzanmaktadır. LST15 ve LST16 elips dokuların büyük kenarları ise hareket yönünde uzanmaktadır.

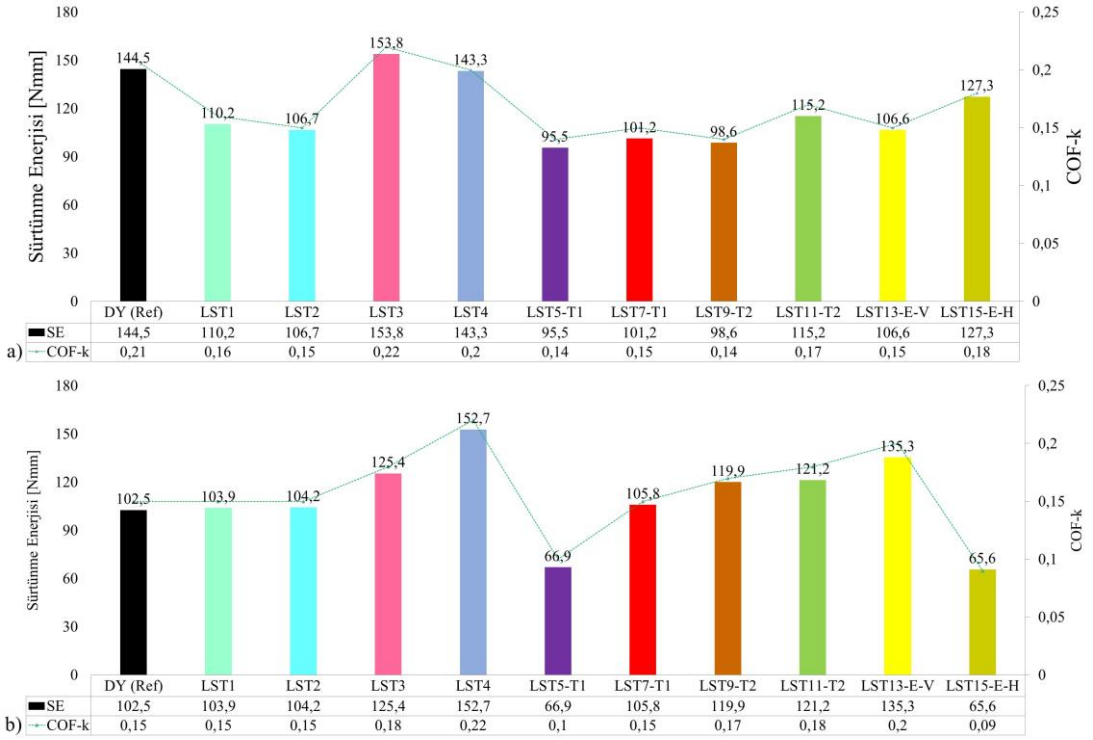
Tablo 5.10'da ve Şekil 5.18'de kaplamasız dokuların sürtünme testi ve kontak açısı ölçüm sonuçları yer almaktadır. Kaplamasız kuru sürtünme durumunda dikey lineer dokulara sahip LST3 ve LST4 hariç bütün numunelerin sürtünme enerjileri düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, LST5-T1 (sürtünme testi yönündeki üçgen) numunesinde sürtünme enerjisi %34 (95,5 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %33 (0,14) oranında azalmıştır. Sıvı sürtünme durumunda ise LST5-T1 düz üçgen doku ile LST15-E-H hareket yönüne uzanan elips dokular hariç sürtünme enerjileri düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Her iki numunenin değerleri yakın olup LST15-E-H numunesinde sürtünme enerjisi %36 (65,6 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %40 (0,09) oranında azalmıştır.

Tablo 5.10. Lazer işleme dokulu kaplamasız numunelerin test sonuçları

Numune	E_S				COF_S				COF_K				KA
	[Nmm]				[-]				[-]				[°]
	K		Y		K		Y		K		Y		
DY (Ref)	144,5	%Δ	102,5	%Δ	0,22	%Δ	0,09	%Δ	0,21	%Δ	0,15	%Δ	71,8
LST1	110,2	-24	103,9	1	0,17	-23	0,18	100	0,16	-24	0,15	0	58,3
LST2	106,7	-26	104,2	2	0,18	-18	0,19	111	0,15	-29	0,15	0	41,2
LST3	153,8	6	125,4	22	0,23	5	0,23	156	0,22	5	0,18	20	63,1
LST4	143,3	1	152,7	49	0,23	5	0,12	33	0,20	-5	0,22	47	60,7
LST5-T1	95,5	-34	66,9	-35	0,13	-41	0,09	0	0,14	-33	0,10	-33	63,4
LST7-T1	101,2	-30	105,8	3	0,16	-27	0,07	-22	0,15	-29	0,15	0	63,7
LST9-T2	98,6	-32	119,9	17	0,15	-32	0,19	111	0,14	-33	0,17	13	47,9
LST11-T2	115,2	-20	121,2	18	0,18	-18	0,07	-22	0,17	-19	0,18	20	52,2
LST13-E-V	106,6	-26	135,3	32	0,14	-36	0,20	122	0,15	-29	0,20	33	57,6
LST15-E-H	127,3	-12	65,6	-36	0,19	-14	0,13	44	0,18	-14	0,09	-40	49,1

Tablo 5.11. Lazer işleme dokulu kaplamalı numunelerin test sonuçları

Numune	E_S				COF_S				COF_K				KA
	[Nmm]				[-]				[-]				[°]
	K		Y		K		Y		K		Y		
DY-CK2 (Ref)	132,7	%Δ	89,0	%Δ	0,19	%Δ	0,13	%Δ	0,19	%Δ	0,13	%Δ	65,7
LST6-T1	103,3	-22	62,0	-30	0,15	-21	0,20	54	0,15	-21	0,09	-31	59,6
LST8-T1	123,8	-7	45,7	-49	0,18	-5	0,15	15	0,18	-5	0,06	-54	65,8
LST10-T2	131,5	-1	154,4	73	0,19	0	0,28	115	0,19	0	0,22	69	62,3
LST12-T2	139,2	5	158,4	78	0,21	11	0,13	0	0,20	5	0,23	77	65,8
LST14-E-V	136,5	3	66,4	-25	0,19	0	0,02	-85	0,20	5	0,10	-23	63,6
LST16-E-H	109,6	-17	77,7	-13	0,16	-16	0,20	54	0,16	-16	0,11	-15	64,7

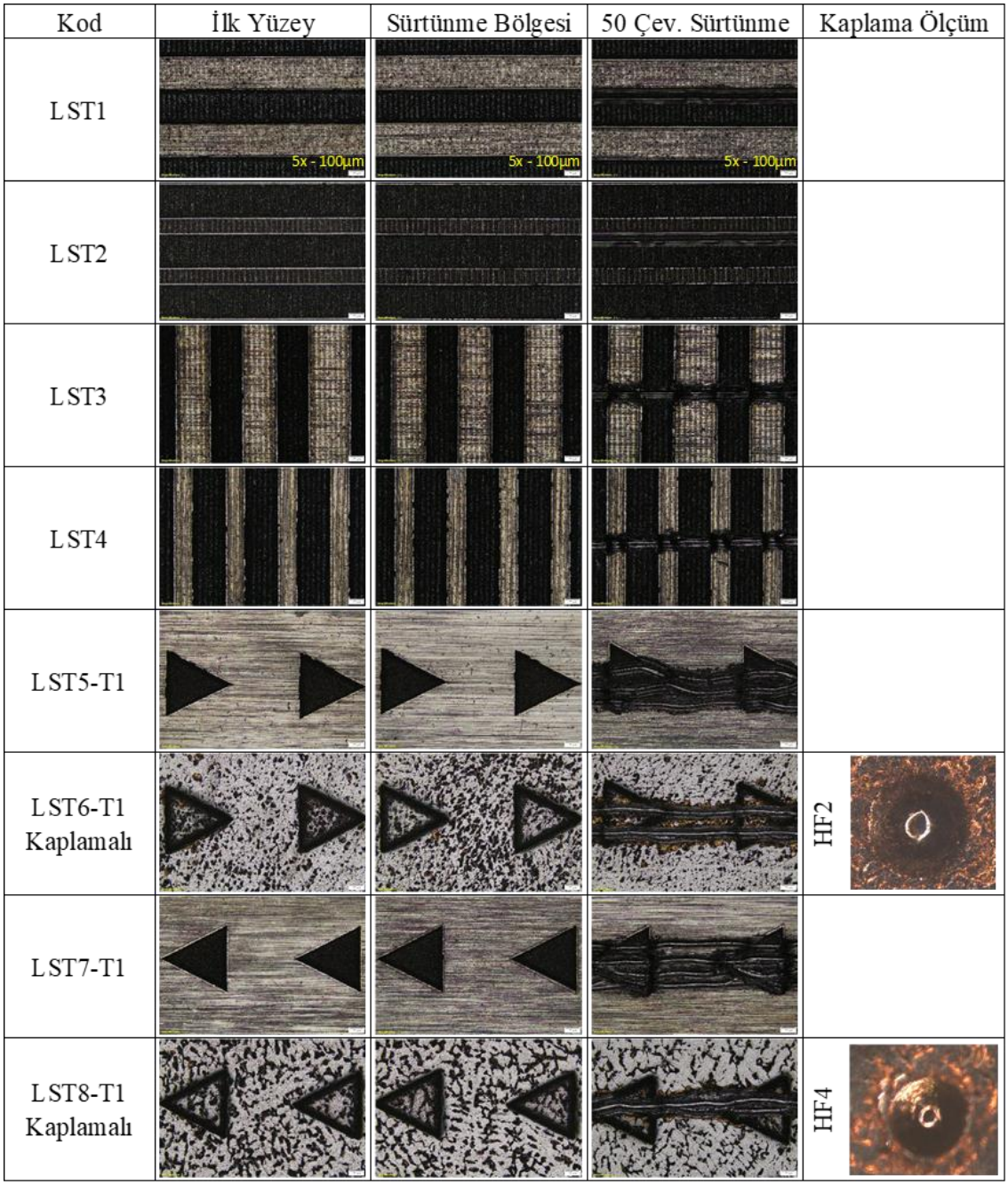


Şekil 5.18. Lazer işleme dokulu kaplamasız test sonuçları a) kuru, b) sıvı sürtünme

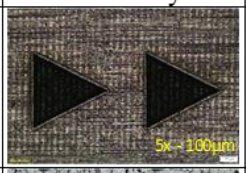
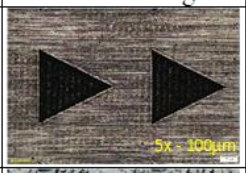
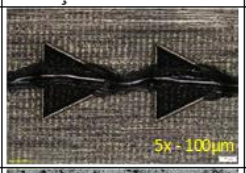
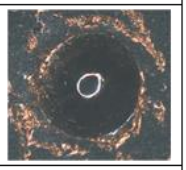
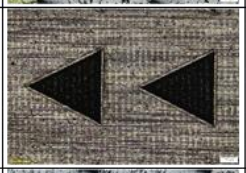
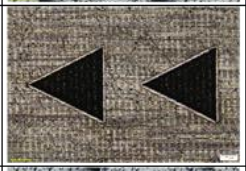
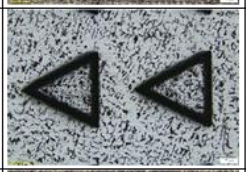
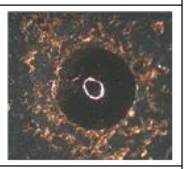
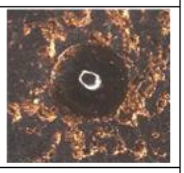
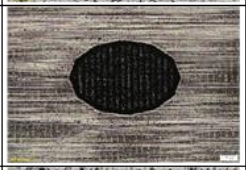
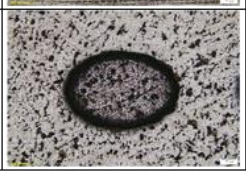
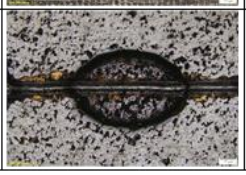
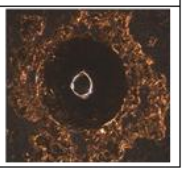
Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'deki yüzey özellikleri incelendiğinde kuru sürtünme durumunda LST3 ve LST4 dikey lineer dokuların sürtünme katsayılarının yüksek çıkmasının (düz yüzey sonuçlarına yakın) sebebi olarak lazer işleme sonrası oluşan yanma kraterlerinin tam anlamıyla yüzeyden uzaklaştırılamamasından dolayı olduğu gözlemlenmiştir. Sıvı sürtünme durumunda ise yüzey analiz sonuçlarındaki yanma kraterleri kaynaklı dalgalanmanın yağ filmi oluşumuna etkisinin sürtünme katsayısının düz yüzeye göre yüksek çıkmasının sebebi olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5.11'de kaplamalı dokuların sürtünme testi ve kontak açısı ölçüm sonuçları yer almaktadır. Kaplamalı kuru sürtünme durumunda ters üçgen LST12-T2 ve harekete dik yönde uzanan elips LST14-E-V dokular hariç bütün numunelerin sürtünme enerjileri düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç, LST6-T1 numunesinde sürtünme enerjisi %22 (103,3 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %21 (0,15) oranında azalmıştır. Sıvı sürtünme durumunda ise, LST10-T2 düz üçgen doku ile LST12-T ters üçgen dokular hariç sürtünme enerjileri düşük çıkmıştır. Bu gruptaki en iyi sonuç ise LST8-T1 numunesinde sürtünme enerjisi %49 (45,7 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %54 (0,06) oranında azalmıştır. Kaplamasız gruplardaki sonuçların aksine sıvı sürtünme

durumunda sürtünme katsayısının düşmesi kaplamanın doku kenarlarındaki mikro mertepedeki tepecikleri kapatmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.19. LST dokulu kaplamasız kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri

Kod	İlk Yüzey	Sürtünme Bölgesi	50 Çev. Sürtünme	Kaplama Ölçüm
LST9-T2				
LST10-T2 Kaplamalı				HF6 
LST11-T2				
LST12-T2 Kaplamalı				HF4 
LST13-E-V				
LST14-E-V Kaplamalı				HF5 
LST15-E-H				
LST16-E-H Kaplamalı				HF6 

Şekil 5.19. (Devam) LST dokulu kaplamasız kaplamalı yüzey test öncesi-sonrası yüzey ve kaplama mikroskop görüntüleri

50 çevrim ile gerçekleştirilen sürtünme testlerinin ilk ve sonuncu çevrimlerinden kuvvetölçer üzerinden alınan kuvvet-zaman değerleri test cihazı hız değeri kullanılarak kuvvet-yol grafiğine dönüştürülmüştür. Grafik altında kalan alanlardan ve grafikteki diğer değerlerden Tablo 5.12'de verilen sürtünme enerjisi ve kinetik sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır, bütün sonuçlar Tablo 5.13'te özetlenmiştir.

Tablo 5.12. 50 çevrim sürtünme test sonuçları

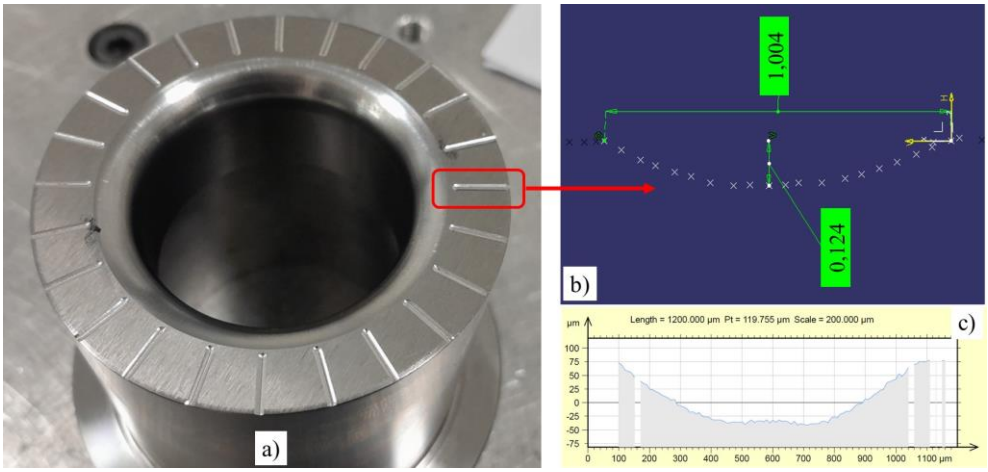
Numune	Kaplama	1.Tur		50.Tur		%Δ	Numune	Kaplama	1.Tur		50.Tur		%Δ
		E_S	COF_K	E_S	COF_K				E_S	COF_K	E_S	COF_K	
		[Nmm]	[-]	[Nmm]	[-]				[Nmm]	[-]	[Nmm]	[-]	
DY1	-	173,98	0,25	124,42	0,18	27,5	SPSTII-N7	+	48,25	0,07	26,95	0,04	46,8%
DY-CV1	+	103,04	0,15	85,18	0,12	18,5	SPSTII-N8	+	48,24	0,07	27,41	0,04	43,6%
DY-CV2	+	100,67	0,15	79,01	0,12	20,3	D-CST1		130,46	0,20	85,98	0,12	37,6%
DY-CK2	+	245,93	0,35	203,70	0,30	13,5	D-CST2		146,69	0,21	119,63	0,17	19,6%
DY-CT1	+	211,64	0,31	108,77	0,16	49,7	D-CST3		131,61	0,19	89,58	0,14	27,7%
SPSTI-N1		91,40	0,13	108,62	0,16	-19,5	D-CST4		126,95	0,19	104,92	0,15	21,6%
SPSTI-N2		76,81	0,11	90,59	0,13	-17,2	H1		69,65	0,10	57,33	0,08	17,3%
SPSTI-N3		69,64	0,10	71,56	0,11	-6,6	H2		98,09	0,14	33,47	0,05	65,8%
SPSTI-N4		73,18	0,11	83,48	0,12	-13,4	V1		123,28	0,19	137,94	0,19	-4,5%
SPSTI-N5		66,00	0,10	67,87	0,10	-3,1	V2		114,06	0,16	123,92	0,17	-6,9%
SPSTI-N6		70,15	0,10	69,62	0,10	1,2	H1'	+	60,81	0,09	24,22	0,03	61,0%
SPSTI-N7		64,41	0,09	70,13	0,10	-7,0	H2'	+	67,22	0,10	23,61	0,03	65,7%
SPSTI-N8		67,52	0,10	75,68	0,11	-15,4	V1'	+	112,90	0,15	153,54	0,22	-42,1%
SPSTI-N1	+	44,42	0,06	57,37	0,08	-29,4	V2'	+	125,74	0,18	76,61	0,12	32,4%
SPSTI-N2	+	53,20	0,08	70,26	0,10	-32,9	LST1-500		112,67	0,17	53,42	0,08	52,8%
SPSTI-N3	+	45,63	0,07	50,55	0,07	-7,4	LST2-250		146,40	0,22	59,19	0,09	60,8%
SPSTI-N4	+	49,08	0,07	70,09	0,10	-49,2	LST3-500		150,91	0,22	110,46	0,16	26,4%
SPSTI-N5	+	47,27	0,07	47,70	0,07	-4,0	LST4-250		151,29	0,22	117,64	0,17	23,4%
SPSTI-N6	+	43,64	0,07	30,27	0,04	36,5	LST5-T1		150,19	0,22	114,16	0,16	25,5%
SPSTI-N7	+	49,43	0,07	29,12	0,04	40,0	LST6-T1	+	176,80	0,27	194,21	0,28	-6,5%
SPSTI-N8	+	44,97	0,06	27,14	0,04	38,6	LST7-T1		122,64	0,18	90,18	0,13	29,5%
SPSTII-N1		44,64	0,07	23,17	0,03	48,2%	LST8-T1	+	168,97	0,26	202,11	0,29	-14,4%
SPSTII-N2		50,30	0,08	28,35	0,04	45,7%	LST9-T2		158,58	0,23	117,32	0,17	24,9%
SPSTII-N3		50,74	0,07	27,65	0,04	45,6%	LST10-T2	+	175,64	0,25	201,94	0,30	-16,4%
SPSTII-N4		51,46	0,07	30,50	0,04	41,7%	LST11-T2		157,95	0,22	104,76	0,15	32,8%
SPSTII-N5		52,36	0,07	28,79	0,04	40,7%	LST12-T2	+	144,44	0,21	187,99	0,28	-32,1%
SPSTII-N6		52,22	0,08	34,63	0,05	33,3%	LST13-E-V		123,18	0,18	115,21	0,17	3,7%
SPSTII-N7		59,59	0,09	32,14	0,05	45,7%	LST14-E-V	+	101,34	0,15	177,50	0,26	-74,9%
SPSTII-N8		55,85	0,08	34,40	0,05	39,5%	LST15-E-H		119,04	0,18	111,71	0,16	11,2%
SPSTII-N1	+	42,02	0,06	28,38	0,04	32,2%	LST16-E-H	+	122,21	0,17	206,56	0,30	-72,9%
SPSTII-N2	+	41,53	0,06	29,58	0,04	28,9%	SPSTII-N7	+	48,25	0,07	26,95	0,04	46,8%
SPSTII-N3	+	45,46	0,07	29,27	0,04	38,2%	SPSTII-N8	+	48,24	0,07	27,41	0,04	43,6%
SPSTII-N4	+	45,95	0,07	33,29	0,05	30,7%							
SPSTII-N5	+	43,46	0,06	30,42	0,05	28,0%							
SPSTII-N6	+	47,91	0,07	25,36	0,04	48,2%							

Tablo 5.13. Ortak sonuç tablosu

		Geometri	x_d µm	h_d µm	Doku Yoğ. %	$\frac{h_d}{x_d}$ %	KAPLAMASIZ KURU COF$_k$		KAPLAMASIZ SIVI COF$_k$		KAPLAMASIZ KA [°]	KAPLAMALI KURU COF$_k$		KAPLAMALI SIVI COF$_k$		KAPLAMALI KA [°]
	DY						0,21	▲	0,15	▲	71,8					
KİMYASAL	D-CST1	Daire	1200	50	28,8%	4,2%	0,2	**-19,0%**	0,14	**-6,7%**	57,4					
	D-CST2			90		7,5%	0,2	**-14,3%**	0,15	**-2,7%**	57,8					
	D-CST3	Kare	1100	50	29,2%	4,5%	0,2	**-14,3%**	0,13	**-13,3%**	53,1					
	D-CST4			90		8,2%	0,2	**-19,0%**	0,12	**-20,0%**	50,8					
	DY-CV1											0,09	▲	0,08	▲	60,0
	CSTH1	Lineer	1000	120	47,5%	12,0%	0,12	**-41%**	0,10	**-32%**	66,5	0,11	19%	0,11	33%	62,8
	CSTH2			128		12,8%	0,10	**-52%**	0,10	**-32%**	56,1	0,11	22%	0,11	37%	48,0
	CSTV1			125	48,3%	12,5%	0,09	**-55%**	0,10	**-36%**	63,3	0,10	15%	0,12	48%	58,5
	CSTV2			132		13,2%	0,10	**-52%**	0,11	**-25%**	60,6	0,12	34%	0,13	61%	62,1
BİLYALI DÖVME	**DY-CT1**											0,17		0,14		72,1
	DY-CV1'											0,11	▲	0,09	▲	60,0
	SPSTI-N1	x	-	7,7/6,6	-	-	0,16	**-22%**	0,14	**-8%**	50,9	0,17	58%	0,05	**-41%**	38,5
	SPSTI-N2		-	6,2/6,5	-	-	0,17	**-19%**	0,06	**-60%**	48,2	0,18	67%	0,27	196%	37,7
	SPSTI-N3		-	5,7/6,2	-	-	0,18	**-15%**	0,19	29%	49,7	0,18	66%	0,15	70%	39,0
	SPSTI-N4		-	7,1/7,2	-	-	0,16	**-25%**	0,13	**-16%**	46,8	0,19	74%	0,14	57%	39,4
	SPSTI-N5		-	5,5/6,2	-	-	0,16	**-25%**	0,06	**-58%**	46,8	0,19	76%	0,23	157%	40,4
	SPSTI-N6		-	7,5/8,3	-	-	0,18	**-16%**	0,19	28%	49,5	0,17	56%	0,12	37%	41,4
	SPSTI-N7		-	7/6,7	-	-	0,16	**-22%**	0,14	**-9%**	50,9	0,21	91%	0,23	159%	41,1
	SPSTI-N8		-	6,6/7,5	-	-	0,18	**-16%**	0,12	**-17%**	49,5	0,19	72%	0,07	**-22%**	36,9
	SPSTII-N1		-	6,4/6	-	-	0,24	15%	0,30	103%	50,9	0,23	109%	0,08	**-14%**	46,6
	SPSTII-N2		-	8,6/7,4	-	-	0,19	**-11%**	0,17	12%	50,9	0,22	102%	0,22	148%	45,1
	SPSTII-N3		-	8,3/6,8	-	-	0,24	14%	0,23	53%	52,3	0,23	108%	0,14	60%	46,8
	SPSTII-N4		-	7/7,3	-	-	0,25	21%	0,15	**-3%**	52,4	0,22	99%	0,18	101%	43,8
	SPSTII-N5		-	8,9/8,7	-	-	0,26	26%	0,25	69%	52,4	0,23	109%	0,23	156%	45,1
	SPSTII-N6		-	10/8	-	-	0,22	5%	0,20	35%	50,9	0,22	97%	0,11	20%	46,8
	SPSTII-N7		-	8,4/7,3	-	-	0,21	1%	0,25	70%	50,9	0,24	116%	0,21	134%	43,8
	SPSTII-N8		-	6,7/9,4	-	-	0,24	14%	0,10	**-36%**	50,9	0,21	91%	0,08	**-10%**	45,1
LAZER İŞLEME	**DY-CK2**											0,19	▲	0,13	▲	65,7
	LST1-H	Lineer	500	100	50,0%	20%	0,16	**-24%**	0,15	**0%**	58,3					
	LST2-H		250		49,0%	40%	0,15	**-29%**	0,15	**0%**	41,2					
	LST3-V		500		50,0%	20%	0,22	5%	0,18	20%	63,1					
	LST4-V		250		50,0%	40%	0,20	**-5%**	0,22	47%	60,7					
	LST5-T1 (6)	Üçgen	1000 1118 1118		12,7%	10%	0,14	**-33%**	0,10	**-33%**	63,4	0,15	**-21%**	0,09	**-31%**	59,6
	LST7-T1 (8)						0,15	**-29%**	0,15	**0%**	63,7	0,18	**-5%**	0,06	**-54%**	65,8
	LST9-T2 (10)				22,2%	10%	0,14	**-33%**	0,17	13%	47,9	0,19	**0%**	0,22	69%	62,3
	LST11-T2 (12)						0,17	**-19%**	0,18	20%	52,2	0,20	5%	0,23	77%	65,8
	LST13-E-V (14)	Elips	1000 1500		27,6%	8%	0,15	**-29%**	0,20	33%	57,6	0,20	5%	0,10	**-23%**	63,6
	LST15-E-H (16)				26,6%	8%	0,18	**-14%**	0,09	**-40%**	49,1	0,16	**-16%**	0,11	**-15%**	64,7

5.5. Seri Üretimi Yapılacak Ticari Ürün Üretimi

Kaplamasız dokulu yüzeye sahip kalıp numunelerinden bilyalı dövme ile oluşturulan dokular hariç diğer gruplarda kuru ve sıvı sürtünme durumlarında ortalama en iyi sonuç lineer dokularda elde edildiği için Bölüm 4.5'te tasarlanan parçanın üretiminde kullanılan dişi kalıp yüzeyine Şekil 5.21'de gösterildiği gibi lineer dokular oluşturulmuştur. Doku kimyasal aşındırma yöntemi ile açılan dokuların ölçüsel değerlerine yakın açılmış olup genişlik 1004 µm, derinlik 124 µm ve doku yoğunluğu %14,3'tür.



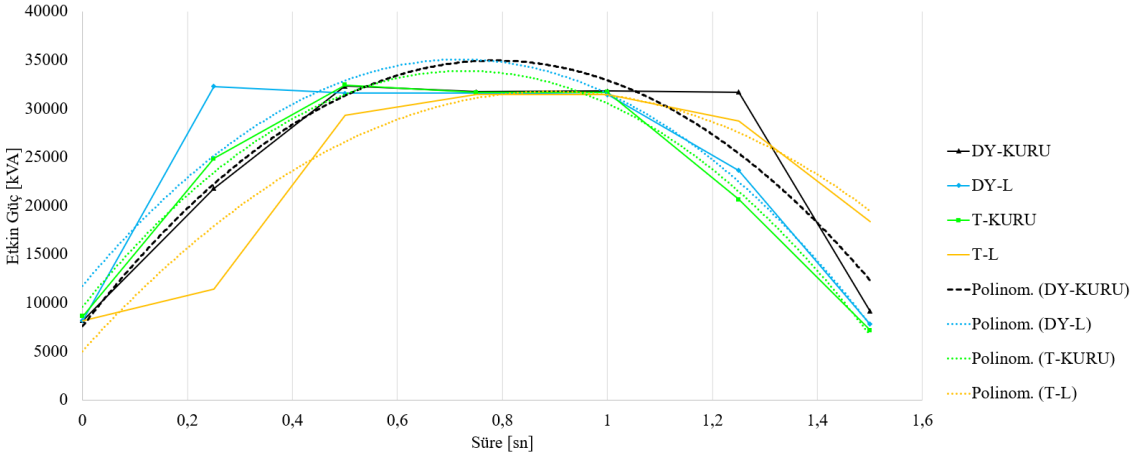
Şekil 5.20. a)lineer dokulu dişi kalıp, b)doku CMM tarama sonucu, c)doku profilometre tarama sonuçları

Düz yüzey kalıp ve dokulu kalıp ile kuru ve sıvı sürtünme durumunda üretilen parçaların üretimi esnasında harcanan güç değerleri Şekil 5.22'de gösterilen Fluke 435 Series II Enerji Analiz cihazı ile ölçülmüştür. Analiz cihazı voltaj ölçümü hassasiyeti nominal gerilimin ±%0,1'i ve akım ölçüm hassasiyeti ±%0,5 seviyesindedir.

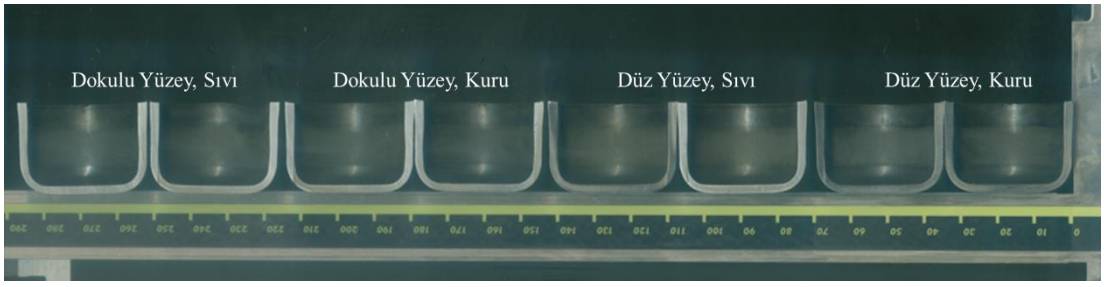


Şekil 5.21. Enerji analizatörü pres panosuna bağlantısı

Düz yüzeyli kalıpta kuru sürtünme (DY-Kuru) ve sıvı sürtünme (DY-L); dokulu kalıpta kuru sürtünme (T-KURU) ve sıvı sürtünme (T-L) şartlarında 1.faz deneme numuneleri üretilmiştir. Şekil 5.23'te Fluke 435 Series II Enerji Analizi cihazı üzerinden alınan verilerden sadece şekillendirme bölgesi incelenerek zımbanın saca teması ve parçayı bırakması anındaki enerji tüketimleri Güç-Zaman grafiği altında kalan alan ile hesaplanmıştır. DY-Kuru, DY-L, T-KURU ve T-L numunelerinin şekillendirme enerjileri sırasıyla 69593 kJ, 69240 kJ (%1), 66851 kJ (%4) ve 67433 kJ (%3) hesaplanmıştır. Şekil 5.24'te ise üretilen parçaların kesitleri incelenmiştir. Parçaların şekillendirme ekseninde uzaması, eksene dik yönde uzaması ve Radius bölgesinin düz bölgeye geçişleri ölçüsel olarak incelendiğinde dokulu kalıpta üretilen ürünlerin daha homojen şekillendiğini göstermektedir. Sonuçlar, doku oluşturmanın sürtünmeyi ve sürtünmeye bağlı aşınma durumunu azaltarak şekillendirme için gerekli enerji ihtiyacını da azalttığını göstermektedir.



Şekil 5.22. Düz ve dokulu kalıplarda üretilen ürünlerin hidrolik pres güç zaman grafiği



Şekil 5.23. I.faz üretilen parçaların kesit görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada derin çekme prosesinde yaygın olarak kullanılan DD13 sac metal malzeme ile 1.2379 soğuk iş takım çeliği kalıp malzemesi arasındaki tribolojik etkileşimlerin iyileştirilmesi konusunda yüzey dokusunun etkileri incelenmiştir. 40 mm x 60 mm x 10 mm ölçülerinde ısıl işlem sonrası yüzeyleri taşlanan numuneler farklı proseslere tabi tutulmuştur. Numune kalıp yüzeylerine bilyalı dövme, kimyasal aşındırma ve lazer işleme yöntemleri ile farklı geometri ve ölçülerde kare, daire, lineer, üçgen ve elips dokular oluşturulmuştur. Düz yüzeylere ve dokular içinden seçilen gruplara Bölüm 4.3'te detayları verilen CV1 (TiAlCN), CK2 (TiCN) ve CT1 (CrN) kaplamaları uygulanmıştır. Kaplamalı-kaplamasız ve düz-dokulu bütün yüzeyler kuru ve sıvı sürtünme durumlarında sürtünme testine tabi tutularak sürtünme enerjileri ve kinetik sürtünme katsayıları karşılaştırılmıştır. En uygun görülen doku ise derin çekme kalıp yüzeyine uygulanarak ticari bir ürün üzerindeki yüzey dokusunun etkisi incelenmiştir.

İki farklı bilyalı dövme makinesi ile farklı sürelerde oluşturulan maskesiz dokuların kaplamasız ve kaplamalı ikizlerinin kuru ve sıvı sürtünme durumunda elde edilen sonuçlarının düz yüzey test sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen değerlere göre bulgular aşağıda açıklanmıştır.

Kaplamasız kuru sürtünme şartlarında; düz yüzey sonucuna göre dokulu yüzeyler karşılaştırıldığında, sürtünme enerjisinin ve kinetik sürtünme katsayısının %15-25 aralığında azalmıştır. II nolu makinede oluşturulan dokular ile yapılan testlerin sonucu ise bir numune hariç yüksek çıkmıştır. Oluşturulan farklı dokuların geometrileri, boyutları, kalıp yüzeyindeki yoğunluklarının sürtünme durumlarını etkilemektedir. II nolu makinede oluşturulan dokuların Almen değerlerinin sınırda gelmesi yüzey altı sertlik değerine etkisinin düşük olmasına, rastgele oluşan pürüzlü yapının ise doku özelliği oluşturamamasına neden olduğu için ikinci grup düz yüzey eğiliminde davranmıştır. Kuru sürtünme durumunda birinci grubun sürtünme katsayısındaki düşüş, uygun şartlarda oluşturulan yüzey dokusunun gerçek temas alanını azaltarak sürtünmeyi azaltmasının sonucudur. Sürtünmede görülen bu iyileşme ardışık binlerce parçanın üretildiği seri şartlarda şekillendirme için gerekli toplam enerji miktarını azaltacaktır. Aynı zamanda kontrollü sürtünme parça kalitesini de iyileştireceği için sürtünmeyi azaltmak için kontrolsüz yağ kullanımını ve geleneksel kaplama ihtiyaçlarını da azaltacaktır. En önemli

katkısı ise sürdürülebilirlik kapsamında sınırlı enerji kaynaklarının olduğu günümüzde kurumsal ve ürün karbon ayakizi skoruna katkısı olacaktır.

Kaplamasız sıvı sürtünme şartlarında; düz yüzey sonuçlarına göre dokulu yüzeyler karşılaştırıldığında, sürtünme enerjisinin %6-59 aralığında ve kinetik sürtünme katsayısının %8-60 aralığında azaldığı gözlemlenmiştir. Düz yüzeye göre dokulu yüzeylerin ıslanabilirlik etkisi ile rastgele oluşturulan dokuların sinerjik etkileri yağ filmi oluşumunu hızlandırarak sürtünme değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Düz yüzeye göre sürtünmenin yüksek çıktığı iki grupta ve II nolu makinedeki altı grupta yağ filmi oluşumu sinerjik etkinin oluşamaması kaynaklı sınır sürtünme durumunun uzamasından kaynaklanmıştır. Benzer şekilde yağlama etkisinin oluşmaması ve aşınan parçaların dokulardan uzaklaştırılamaması sürtünmeyi arttıran bir diğer etken olmuştur.

Kaplamalı kuru sürtünme şartlarında; 2400 HV sertlikte CT1 (CrN) PVD kaplanan numunelerin sonuçları, CV1'(TiAlCN) kaplanmış DY test sonuçlarına göre karşılaştırıldığında, sürtünme enerjisi ve kinetik sürtünme katsayısı beklendiğinin aksine yüksek çıkmıştır. CT1 kaplı düz yüzey sonuçlarına göre de karşılaştırıldığında sonuç değişmemektedir. Benzer şekilde CT1 kaplı düz yüzey sonuçların kaplamasız düz yüzey test sonuçlarına yakın çıkması kaplamanın sertliğinin, elementler arası kalınlık geçişlerinin ve toplam kalınlığının seçim için önemli kriter olduğunu göstermektedir. Mikron seviyesindeki dağınık dokuların kaplama malzemesi ile kaplandığının sonucu olarak dokuların temas alanını azaltma etkisi öne çıkamayarak sürtünme değerleri yüksek çıkmıştır.

Kaplamalı sıvı sürtünme şartlarında; CT1 (CrN) PVD kaplanan dokulu yüzeylerde yağ kullanılmasına rağmen kaplama ve doku etkileşiminin yüzeylerin sürtünme enerjisini arttırabildiği gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme ile yüzeye açılan dokular üzerine uygulanan kaplamanın sürtünmeyi, sıvı sürtünme durumunda üç numunede (SPSTII-N1, N6 ve N8) kısmen azaltsa da kuru sürtünme durumunda bütün yüzeylerde arttırmıştır. Farklı temas ve yağlama koşulları altında yüzey dokusunun etkilerini anlamak hala zorluk teşkil etmektedir. Yüzey dokusunun sürtünme ve aşınma üzerindeki etkilerinin özellikle yağlama rejimlerine göre değiştiği bilinmektedir. Bu test sonuçlarına göre PVD kaplama yönteminin uygunsuz olmasının değerlendirilmesi yanlış olur, sadece yönteme uygun kaplama türünün ve / veya katman kalınlıklarının seçilmesi konusunda çalışma yapılması

gerekliliğini göstermektedir. Uygulanan bu kaplama türünde yüzey enerjisinin düz yüzeye göre daha ıslanabilir olmasına rağmen doku tepe noktalarının sac metal ile teması özellikle kaplama kaynaklı sertlik farkının artmasından dolayı dokunun sac metali abrazif olarak aşındırmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu aşınma ile artan aşınma parçalarının dokuları doldurarak yağlama etkisini azalttığı gözlemlenmiştir.

Kimyasal aşındırma yöntemi DKET firması ile oluşturulan kaplamasız kare ve daire dokuların sonuçları ve Voestalpine firması ile oluşturulan lineer yatay ve dikey kaplamasız-kaplamalı dokuların kuru ve sıvı sürtünme durumunda elde edilen sonuçlarının düz yüzey test sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen değerlere göre bulgular aşağıda açıklanmıştır.

Kuru sürtünme şartlarında; dört numunenin de sürtünme enerjisi ve sürtünme katsayısı düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. CST1, CST2, CST3 ve CST4 numunelerinde kinetik sürtünme katsayısı düz yüzeye göre sırasıyla %19,0, %14,3, %14,3 ve %19,0 oranlarında azalmıştır.

Sıvı sürtünme şartlarında; dört numunenin de sürtünme enerjisi ve sürtünme katsayısı düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. CST1, CST2, CST3 ve CST4 numunelerinde kinetik sürtünme katsayısı düz yüzeye göre sırasıyla %6,7, %2,7, %13,3 ve %20,0 oranlarında azalmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yüzey dokusunun derin çekme işlemlerinde kritik bir rol oynadığını ve kalıp ile ürün arasındaki tribolojik etkileşimi belirleyebileceğini göstermektedir. Analizler, kimyasal aşındırma (CST) yöntemiyle işlenen yüzeylerin temiz ve ölçüsel kararlılığından dolayı tribolojik performansı arttırdığını, dolayısıyla kalıp ve sac metal arasındaki etkileşimi iyileştirdiğini göstermektedir. Bu bağlamda kimyasal aşındırma (CST) yöntemi, malzeme yüzeyine mikro ölçekli yapısal değişiklikler uygulayarak tribolojik performansı artırma potansiyeline sahiptir. Daire ve kare dokuların doku yoğunlukları sırasıyla %28,8 ve %29,2'dir. Yoğunluklar benzer olup geometri ve derinliklere göre elde edilen sonuçlar şekillendirme özelliğine göre değerlendirilip kalıp yüzeyine uygulanmalıdır. CST yöntemiyle işlenen yüzeylerin derin çekme operasyonlarındaki performansını değerlendirmek üzere yapılan analizlerde, CST1 ve

CST3 (50 µm derinlikteki doku) numunelerinin diğerlerine göre önemli ölçüde daha düşük Ra, Rq, Rt ve Rp değerleri gösterdiği belirlenmiştir.

Voestalpine firması ile kimyasal aşındırma yöntemi ile oluşturulan yatay ve dikey dokuların doku yoğunlukları sırasıyla %47,5 ve %48,3'tür. Yatay ve dikey lineer kaplamasız dokuların kuru sürtünme şartlarında; sürtünme enerjileri bütün gruplarda düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Kuru sürtünme durumunda en iyi sonuç, CSTV1 numunesinde sürtünme enerjisi %54 (65,8 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısı %55 (0,09) oranında azalmıştır. 1000 µm genişliğinde ve ortalama 125 µm derinliğinde olan lineer dokuların kimyasal yöntem ile açılması ve doku kenarlarında sürtünmeyi arttıracak kalıntıların olmaması kuru sürtünme durumunda beklenildiği gibi gerçek temas alanını azaltarak sürtünme katsayısının düşmesini sağlamıştır.

Yatay ve dikey lineer kaplamasız dokuların sıvı sürtünme şartlarında; sürtünme enerjileri bütün gruplarda düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. En iyi değer yine CSTV1 numunesinde sürtünme enerjisinde %35 (66,5 Nmm) ve kinetik sürtünme katsayısında %36 (0,10) oranında azalmıştır. Doku genişlik ve derinlik oranının 0,1 değerinde olması yağ filmi oluşumunu hızlandırmıştır.

Yatay ve dikey lineer CV1 kaplamalı dokuların kuru ve sıvı sürtünme şartlarında sürtünme enerjileri bütün gruplarda düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Doku derinlik/doku genişlik oranları ortalama %12,5 olsa da doku yoğunlukları ortalama %48 civarında olan numunelerin 4000 HV sertlikte 9-11 µm kalınlığında kaplama ile kaplanması sonrası ilk test sonucunda yüzey incelenmiştir. Yüzey profilinin incelenmesinde bölgesel olarak parçaların doku kenarlarına yapıştığı gözlemlenmiştir. Bu parçalar ile üç cisimli abrasif aşınmanın oluşması ve yatay/dikey dokularda yağın doku boyunca akarak arayüzeyde yağ filmi oluşturamaması nedenleri ile sürtünme değerlerin hedefin üstünde çıkmıştır. Bu gibi dokularda h_d yağ filmi oluşması için arayüzeye sürekli yağ ya da yeteri miktarda yağ beslenmelidir.

Lazer işleme yöntemiyle oluşturulan dokulardan yatay ve dikey dört dokunun doku yoğunluğu %50'dir. Kuru sürtünme durumunda, kaplamasız yatay (H) lineer dokulardan 500 µm derinlikteki LST1 ve 250 µm derinlikteki LST2 numunelerinin sürtünme enerjileri sırasıyla %24 ve %26; kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla %24 ve %28

oranlarında düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Kaplamasız dikey (V) lineer dokulardan 500 µm derinlikteki LST3 numunesinin sürtünme enerjisi %6; kinetik sürtünme katsayıları %5 oranında düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Kaplamasız dikey (V) lineer dokulardan 250 µm derinlikteki LST4 numunesinin sürtünme enerjisi %1; kinetik sürtünme katsayıları %5 oranında düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Lazer dokulardan yatay dokularda aşınma parçalarının doku boyunca hareket ekseninde temas noktasından ayrılarak sürtünmenin artışına neden olmadığı; dikey dokularda ise aşınan parçaların kanallarda kalarak sac malzeme ile sürtünmeyi arttırdığı gözlemlenmiştir. Benzer doku yoğunluğundaki kimyasal yöntem ile oluşturulmuş yatay ve dikey dokuların sürtünme enerjileri %41-55 oranlarında düz yüzeye göre daha iyi çıkmıştır. Her iki yöntemdeki dokuların derinlikleri yakın olsa da doku genişlikleri kimyasal yöntem de daha geniş olup doku genişliği doku derinliği ortalama %13 oranındadır. Bu durum kimyasal yöntem ile açılan dokuların ölçüsel olarak daha uygun olduğunu göstermektedir. Sıvı sürtünme durumunda ise yatay dokuların sürtünme enerjisi düz yüzeye göre yakın; dikey dokuların sürtünme enerjileri ise düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Yatay dokularda doku genişlik ve derinliklerinin yağın hidrostatik yağlama oluşturması için yeterli olmadığını ve dokuların düz yüzey gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Dikey dokularda ise dokularda dolarak hareket yönüne dik yönde akan yağ sınır sürtünme oluşumuna neden olarak yağlama filmi oluşturmak için yeterli yağ rezervi sağlayamadığından sürtünme değerleri yüksek çıkmıştır. Kuru sürtünme durumunda olduğu gibi sıvı sürtünme durumunda da kimyasal yöntemler ile açılan dokuların ölçüsel uygunluğunun yağ filmi oluşturmasından dolayı daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Hareket yönüne doğru uzanan ve hareket yönüne dik yönde uzanan kaplamasız üçgen ve elips dokuların kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjileri düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. %12,7 ve %22,2 doku yoğunluklarındaki düz üçgenlerde sürtünme enerjisi değerleri sırasıyla 95,5 Nmm ve 98,6 Nmm; aynı doku yoğunluklarındaki aynı üçgenlerin hareketin ters yönünde uzanan üçgenlerin sürtünme enerjisi değerleri ise sırasıyla 101,2 Nmm ve 115,2 Nmm hesaplanmıştır. Dokuların kenar ölçüleri ve gerçek yüzey alanları aşınan parçaları tutacak yeterlilikte olduğu için aşınan parçaları hapsedip sac ile kalıbın temas alanlarını azalttığı için sürtünme enerjileri düşük çıkmıştır. Bir başka açıdan üçgenlerin yönelimlerinin aşınan parçaların hareket yönünde temas noktalarından kolay şekilde yüzeyden gönderilmesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Sıvı sürtünme

durumunda ise %12,7 doku yoğunluğuna sahip LST5 düz üçgen ve %27,6 doku yoğunluğuna sahip LST15 hareket yönünde uzanan elips dokular hariç diğer dokularda sürtünme enerjisi düz yüzeye göre yüksek çıkmıştır. Ters yöne uzanmış üçgen ve elips dokularda yağın hareketin ters yönüne doğru akış göstermesi ilerleyen harekette yağın özellikle dokusuz bölgelerdeki yeterli yağı besleyememesinden dolayı sürtünme enerjileri yüksek çıkmıştır. Yağ miktarı arttırılarak yağ miktarı mı yoksa doku geometri ve derinliğinin yağ filmine olan etkisi mi sonucu etkilemektedir incelenebilir.

Hareket yönüne doğru uzanan ve hareket yönüne dik yönde uzanan 3500 HV sertlikteki CK2 (NovaTic) kaplamalı üçgen ve elips dokuların kuru sürtünme durumunda sürtünme enerjileri %22,2 doku yoğunluğundaki LST12 ters üçgen doku ile %27,6 doku yoğunluğundaki LST14 dikey elips doku hariç diğer dokuların test sonuçları düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Ters yönelimdeki dokularda aşınan parçaların hareket bölgesinde kalması özellikle kaplamadan kaynaklı sertlik farkından dolayı üç cisimli abrasif aşınma durumunu arttırmaktadır. Sıvı sürtünme durumunda ise %22,2 doku yoğunluğundaki LST10 düz üçgen ve LST12 ters üçgen dokular hariç diğer dokularda sürtünme enerjisi düz yüzeye göre düşük çıkmıştır. Sıvı sürtünme durumunda, dokulu yüzeylerin performansının iyileştirilmesine yönelik ana mekanizmalar, hidrostatik film kalınlığındaki ve yük taşıma kapasitesindeki artış, artan giriş emme ve gelişmiş yağlayıcı tedariğidir.

Ticari ürün üzerinde yapılan 1.faz üretim çalışmalarına göre düz yüzeye sahip kalıbın kuru sürtünme durumu enerji tüketimine göre dokulu kuru sürtünme durumunda %3,9 ve dokulu sıvı sürtünme durumunda %3,1 orannda enerji tüketiminde azalma olmuştur. Sonuçlar, doku oluşturmanın sürtünmeyi ve sürtünmeye bağlı aşınma durumunu azaltarak şekillendirme için gerekli enerji ihtiyacını da azalttığını göstermektedir. Sürdürülebilirlik kapsamında kısıtlı enerji kaynakları göz önünde bulundurulduğunda enerji tüketimindeki bu kazanç önemli bir çıktıdır.

Genel olarak üç farklı doku oluşturma proses ile yapılan çalışmanın sonucunda üç yöntem de sektörde ulaşılabilir durumdadır; ancak bilyalı dövme işleminde pürüzlü bir yapı oluşumundan ziyade doku özelliği oluşturmak için aşınmaya dayanıklı maske gerekliliği ve formlu kalıp yüzeylerinde homojen doku oluşturma problemi, lazer işleme yönteminde yüzeylerin ısı girdisinden etkilenmesi ve yanma oluklarının doku kenarlarından

temizlenmesi için ek proses ihtiyacının yanı sıra tam temizlenmemesi durumunda ise dokunun sürtünme eğilimi yöntemlerin negatif yönlerindendir. Kimyasal aşındırma yönteminde ise maskeleme yönteminin esnekliği ile formlu kalıp yüzeylerine uygulabilir olması, doku oluşturma hassasiyeti ve işlem sonrası temiz bir yüzey elde edilmesi nedenleri ile sac şekillendirme kalıpları için öncelikli yöntem olarak kullanılabilir.

Fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal üretim teknolojileri ile oluşturulan dokuların çalışma genelinde özetlendiği gibi mekanik sistemlerin verimini arttırdığı birçok örnek olmasına rağmen uygun geometride, ölçülerde ve yoğunlukta açılmayan dokular aksine sistemin sürtünme katsayısını arttırarak aşınma direncinin düşmesine neden olabilmektedir. Üçgen ve benzeri geometrideki dokuların kuru sürtünme durumunda bile yönelimi sonuca etki etmektedir. Ters yönde açılan bu tarz dokular kuru sürtünme durumunda aşınan parçaların dokuya kaymasına, sıvı sürtünme durumunda ise hidrostatik etki oluşumuna engel olmaktadır, hatta yağın ters yönde akmasına neden olarak yağ filmi oluşmamaktadır. Uyumlu temas koşulları altında, yüzey dokusunun etkileri için optimum doku yoğunluk aralığın %10 ila %30 arasında olduğu ve yüzey dokusu yüksekliği ile genişliği arasındaki oranın %10 ila %15 arasında etkili olduğu bulunmuştur. Ancak uyumsuz temas koşullarında başarılı sonuçlar için özelliklerin daha küçük olması gerektiği bulunmuştur.

Halen yüzey dokusu üzerine geliştirme çalışmaları devam etmekte olup uygulamaya özel bir formülasyon oluşturulamamıştır. Test düzeneklerinden elde edilen sonuçlara göre seçim yapılmaktadır. Sonuç ise genelde normal yük ve hız koşullarına bağlıdır. Bu davranışlar uygulama özelinde farklı yükleme şartlarına göre değişim gösterecektir. Bu konuda şekillendirme yöntemi seçim için bir kriterdir. Özetle ana mekanizma doku, kaplama ve yağın oluşturacağı sinerjik etki olup şekillendirme yöntemine göre uygun doku parametreleri seçilmelidir. Aksi durumda sürtünmenin artacağı deney sonuçlarından da görüldüğü üzere aşikardır.

Konu üzerine geliştirme çalışmalarımız devam etmeke olup, ticari ürünlere ait kalıplar üzerine açacağımız dokular ile firma kurumsal/ürün karbon ayakizi düşürülerek yöntemin ac şekillendirme kalıpları tribolojik performansı üzerine etkileri bir kez daha ispat edilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

Ally, S., Spelt, J.K., Papini, M. (2012). Prediction of Machined Surface Evolution in the Abrasive Jet Micro-machining of Metals. *Wear, 292-293*, 89-99. DOI: 10.1016/j.wear.2012.05.029

Amanov, A., Yang, X., Zhang, Y., Yang, H., Lv, G. (2013). The Influence of Bulges Produced by Laser Surface Texturing on the Sliding Friction and Wear Behavior. *Tribology International, 60*, 216-223. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.10.018

Arslan, A., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Varman, M., Mufti, R.A. (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), 1-35. DOI: 10.1080/10408436.2016.1186597

Avcu, Y.Y. (2019). Ti6Al4V Titanyum Alaşımın Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 575805.

Azushima, A., (2022). S Tribological Technology in Sheet Metal Forming (eBook). Springer, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.

Bagheri, H. (2018). Trıbological Characteristics of Microtextured Surfaces Under Mixed and Hydrodynamic Lubrication. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 521136.

Bal, M. (2007). Açılı Derin Çekme Kalıplarında Matris ve Zımba Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 200171.

Balyalı, H.A. (2015). Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 405035.

Bitaraf, H. (2019). Soğuk Sac Haddelenmesinde Fiber Optik Lazer Yöntemi ile Pürüzlendirmenin Kalite ve Verimlilik Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 604615.

Boljanovic, V. (2004). *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*, (2nd ed.) (69-82). Industrial Press, New York.

Cao, C. Z., Xia, Y., Chen, C., Zheng, K., Zhang, Y. (2020). A Synergetic Strategy Based on Laser Surface Texturing and Lubricating Grease for Improving the Tribological and Electrical Properties of Ag Coating Under Current-Carrying Friction. *Friction, 9*(5), 978-989. DOI: 10.1007/s40544-020-0383-2

Chen, K., Yang, X., Zhang, Y., Yang, H., Lv, G. (2021). Research Progress of Improving Surface Friction Properties by Surface Texture Technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116*(9-10), 2797-2821. DOI: 10.1007/ s00170-021-07614-1

Chen, P., Liu, X., Huang, M., Shi, Z., Shan, B. (2018). Numerical Simulation and Experimental Study on Tribological Properties of Stamping Die with Triangular Texture. *Tribology International, 132*, 244-252. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.12.025

Chen, P., Xiang, X., Shao, T., La, Y., Li, J. (2016). Effect of Triangular Texture on the Tribological Performance of Die Steel with TiN Coatings Under Lubricated Sliding Condition. *Applied Surface Science, 389*(2016), 361-368. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.119

Coblas, D.G., Fatu, A., Maoui, A., Hajjam, M., (2014). Manufacturing Textured Surfaces: State of Art and Recent Developments. *Journal of Engineering Tribology, 229*(1), 77-82. DOI: 10.1177/1350650114542242

Çetin, Ö. (2021). Nano-Grafen Oksit Katkılı Motor Yağının Tribolojik Özelliklerinin ve Motor Performansına Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 664003.

Decrozant-Triquenaux, J., Pelcastre, L., Courbon, C., Prakash, B. (2021) Effect of Surface Engineered Tool Steel and Lubrication on Aluminium Transfer at High Temperature, *Wear, 477*(1), 203879. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203879

Edis, R. (2022). Kalıp Malzemesine Uygulanan Isıl İşlem ve Yüzey Kaplamalarının Sac Şekillendirmeye Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 706982.

Franzen, V., Witulski, J., Brosius, A., Trompeter, M., Tekkaya, A.E. (2010). Textured Surfaces for Deep Drawing Tools by Rolling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, 50*(11), 969-976. DOI: 10.1007/j.triboint.2010.02.002

Gowtham, K., Srikanth, K.V.N.S., Murty, K.L.N. (2012). Simulation of the Effect of Die Radius on Deep Drawing Process. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME), 2*(1), 12-17. DOI: 10.47893/IJARME.2012.1043

Gül, C., Albayrak, S., Çinici, H., Şimşek, İ.B.A. (2023). The Effects ff Alkali, Alkali-Acid and Sandblasting Surface Treatments Applied Before Tantalum-Oxide Coating with Magnetron Sputtering on the Wear Behavior of 7075 Aluminum Alloys. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38*(2), 795-806. DOI: 10.17341/gazimmfd.1024352

Han, Z., Yin, W., Zhang, J., Jiang, J., Niu, S., Ren, L. (2013). Erosion-Resistant Surface Inspired by Tamarisk. *Journal of Bionic Engineering, 10*, 479-487. DOI: 10.1016/S1672-6529(13)60238-3

Has, E. (2020). Yüzey Topografyasının Kaymalı Yatak Performansına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 637415.

Hu, T., Zhang, Y., Hu, L. (2012). Tribological Investigation of MoS_2 Coatings Deposited on the Laser Textured Surface. *Wear, 278-279*, 77-82. DOI:10.1016/j.wear.2012.01.001

İbatan, T., Uddin, M.S., Chowdhury, M.A.K. (2015). Recent Development on Surface Texturing in Enhancing Tribological Performance of Bearing Sliders. *Surface & Coatings Technology, 272*(1), 102-120. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.04.017

Kabakçı, M.O. (2020), Kalıp Geometrisinin Derin Çekilebilirliğe Etkisinin Deneysel Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 656375.

Lu, P., Wood, R.J.K. (2020). Tribological Performance of Surface Texturing in Mechanical Applications—A Review. *Surface Topography: Metrology and Properties, 8*(4), 22. DOI: 10.1088/2051-672X/abb6d0

Makhkamov, A. (2017). Tribology in Sheet Working. Thesis, Porto University, Department of Mechanical Engineering, Portugal.

Maldonado-Cortés, D., Peña-Parás, P., Barrios-Saldaña, C. (2019). Synergistic Effect on the Tribological Properties of Tool Steel Through the Use of Laser Surface Texturing Channels and Nanoparticles. *Wear, 426-427*(Part B), 1354-1361. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.040

Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y., Menezes, P.L. (2020). Laser Surface Texturing and Related Techniques for Enhancing Tribological Performance of Engineering Materials: A Review. *Journal of Manufacturing Processes, 53*(2020), 153-173. DOI: 10.1016/j.mapro.2020.02.009

Nakano, M., Koregana, A., Korenaga, A., Miyake, K. (2007). Applying Micro-Texture to Cast Iron Surfaces to Reduce the Friction Coefficient Under Lubricated Conditions. *Tribol Lett, 28*(2), 131-137. DOI: 10.1007/ s11249-007-9257-2

Nilsson, M. (2012). Tribology in Metal Working. Thesis, Uppsala University, Department of Engineering Sciences, Sweden.

Özbey, M., Gürbüz, M., Karakurt, U. (2021). Experimental Investigation of the Effects of Hydrophobic Impeller Surfaces on the Centrifugal Pump Performance. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36*(1), 267-274. DOI: 10.17341/gazimmfd.551887

Özdilli, Ö., Erdin, M. E. (2018). Comparison of Common Deep Drawing Steel Sheets in terms of Blank Holder Force and Friction Conditions. *International Journal of Automotive Science and Technology*, *2*(3), 36-41. DOI: 10.30939/ijastech..463629

Shirzadegan, M., Björling, M., Almqvist, A., Larsson, R. (2015). Low Degree of Freedom Approach for Predicting Friction in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts. *Tribology International, 94*(2016), 560-570. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.10.010

Singh, A., Basak, S., Prakash, L., Roy, G. (2018). Prediction of Earing Defect and Deep Drawing Behavior of Commercially Pure Titanium Sheets Using CPB06 Anisotropy Yield Theory. *Journal of Manufacturing Processes, 33*(2018), 256-267. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.05.003

Sun, Q., Hu, T., Fan, H., Zhang, Y., Hu, L. (2015). Dry Sliding Wear Behavior of TC11 Alloy at 500°C: Influence of Laser Surface Texturing. *Tribology International, 92*, 136-145. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.06.003

Toparlı, M.B. (2023). Fatigue Performance of Tungsten Carbide Cobalt (WC-Co) Hardmetal Materials After Shot Peening Process. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38*(1), 269-281. DOI: 10.17341/gazimmfd.894192

Uhlmann, E., Piltz, S., Doll, U. (2005). Machining of Micro/miniature Dies and Moulds by Electrical Discharge Machining—Recent Development. *Journal of Materials Processing Technology, 167*(2005), 488-493. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.013

Uçakkuş, Ö.E., Zeren, A., Sınmazçelik, T., Yalçın, C. (2024). Derin Çekme Kalıbında Bilyalı Dövme Prosesi ile Oluşturulan Yüzey Dokusunun Tribolojik Performans Üzerindeki Etkisinin Ölçülmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40*(1), 265-275. DOI: 10.17341/gazimmfd.1380153

URL-1:https://www.wassilmfg.com/sheet_metal_factory, (Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2023).

URL-2:https://www.webofscience.com, (Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2024).

Vrbka, M., Krupka, I., Svoboda, P., Sperka, P., Navrat, T., Hartl, M., Nohava, J. (2011). Effect of Shot Peening on Rolling Contact Fatigue and Lubricant Film Thickness within Mixed Lubricated Non-conformal Rolling/Sliding Contacts. *Tribology International, 44*(12), 1726-1735. DOI: 10.1007/j.triboint.2010.02.002

Welo, T. (2007). Sheet Metal Forming. *Advances in Material Forming,* 175-191. DOI: 10.1007/978-2-287-72143-4_10

Xing, Y., Deng, J., Gao, P., Gao, J., Wu, Z. (2018). Angle-dependent Tribological Properties of AlCrN Coatings with Microtextures Induced by Nanosecond Laser Under Dry Friction. *Applied Physics A Material Science & Processing,* 124(4). DOI:10.1007/s00339-018-1710-6

Yalçın, S. (2010). Analysis and Modeling of Plastic Wrinkling in Deep Drawing. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 268931.

Yılmaz, M.A. (2020). TiAlN, AlTiN ve AlCrN Kaplamaların Sınır Yağlama Şartlarında Tribolojik Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 624684.

Zaid, A.I.O. (2016). Deep Draawing Mechanism, Parameters, Defects and Recent Results: state of the art. *14th International Symposium on Advanced Materials, 146*(5), 2348-4470. DOI: 10.1088/1757-899X/146/1/012009

Zhang, Q., Mei, T., Zhang, D., Cao, M., Han, B. (2020). Preparation of Chemically Etched Surface Texture and Its Friction Characteristics in Sheet Forming. *Procedia Manufacturing, 50*, 439-443. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.08.080

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Açıkgöz, A., Yalçın, C., Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.** (2024). Production Of Rear Shock Absorber Body Connection Eye Ring Part With An Innovative Approach. *7. International Marmara Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 27-28 Ocak 2024.

Açıkgöz, A., Makaracı, M., Ceylan, R., **Uçakkuş, Ö.E.** (2024). Reducing The Carbon Footprint Of Shock Absorber Sub-Part Used In The Automotive Industry. *7. International Marmara Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 27-28 Ocak 2024.

Akın, E., Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.** (2023). Investıgatıon Of Sprıngback Behavıor Of Dıfferent Grade Sheet Materıal And Rollıng Dırectıon. *9th İnternational May 19 Innovative Scientific Approaches Congress,* Samsun, Türkiye, 17-19 Mayıs 2023.

Aktaş, M., **Uçakkuş, Ö.E.**, (2018). Improvement of Tool Setup Times as an Innovation Study with SMED Approach. *IRDITECH 2018 International R&D Innovation and Technology Management Congress,* İstanbul, Türkiye, 18 Mayıs 2018.

Alkan, O., Aral, S.F., Bulut, B., Edis, R., Ertem, Y., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın C. (2021). Ulus Metal Firması'nda Dijitalleşme Çalışması Örneği. *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD'21,* İstanbul, Türkiye, 22-25 Aralık 2021.

Ceylan, R., **Uçakkuş, Ö.E.,** Aral, S.F., Eraydın, F., Yalçın, C., Edis, R. (2024). Development Of Image Processing Based Part Control System For Control Of Different References. *7. International Ankara Multidisciplinary Studies Congress,* Ankara, Türkiye, 5-6 Mart 2024.

Ceylan, R., **Uçakkuş, Ö.E.,** Çetin, B., Akın, E., Yalçın, C. (2024). Mechanical Interlocking Application of Knuckle Bracket Part. *7. International Ankara Multidisciplinary Studies Congress,* Ankara, Türkiye, 5-6 Mart 2024.

Çelikkol, E., **Uçakkuş, Ö.E.,** Demir İ., Atapek H. (2019). A Study of Failure Analysis on 34MnB5 Tube Stabilizer Bar. *IMASCON 2019,* Kocaeli Türkiye, 2019.

Çelikkol, E., **Uçakkuş, Ö.E.,** Demir, İ. (2019). The Effect of Shot Peening Time in Fatigue Life of Tube Stabilizer Bar. *IRDITECH 2019 International R&D Innovation and Technology Management Congress,* İstanbul, Türkiye, 3 Mayıs 2019.

Doğan, Y., Edis, R., Gökkuş, Y., Sınmazçelik, T., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2021). Sac Şekillendirme Proseslerinden Derin Çekme İşleminin Proses Parametrelerinin İncelenmesi. *6. Uluslararasi Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi,* İstanbul, Türkiye, 20-21 Kasım 2021.

Doğan, Y., Edis, R., Gökkuş, Y., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2021). Sac Şekillendirme Prosesinde Autoform Simülasyon Programı ile Ürün Toleransının Sağlanması. *6. Uluslararasi Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi,* İstanbul, Türkiye, 20-21 Kasım 2021.

Doğan, Y., Eraydın, F., Ertürk, T., Karabay, H., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2023). The Effects For Temperature Generatıon And Dıstrıbutıon Of Dıfferent Cuttıng Tool Coatıngs In The Machınıng Of CuCrZr Parts. *9th İnternational May 19 Innovative Scientific Approaches Congress,* Samsun, Türkiye, 17-19 Mayıs 2023.

Doğan, Y., Eraydın, F., Ertürk, T., Sınmazçelik, T., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2023). Modular Friction and Wear Test Rig. *9th İnternational May 19 Innovative Scientific Approaches Congress,* Samsun, Türkiye, 17-19 Mayıs 2023.

Edis, R., Erdem, C., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2022). Investigation of The Performance of CrNi and New generation Developed Multilayer CrTiN + Tribo Coated Dies in the Deep Drawing Process. *5th INTERNATIONAL AEGEAN CONGRESSES,* İzmir, Türkiye, 25-26 Şubat 2022.

Edis, R., Ertürk, T., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2022). Uniaxial tensile Strength of Friction Stir Welded AL 6061-T6 Materials. *5th INTERNATIONAL AEGEAN CONGRESSES,* İzmir, Türkiye, 25-26 Şubat 2022.

Edis, R., Ertürk, T., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2023). Influence Of Process Parameters On Mechanıcal Performance Of Al 6061-T6 Frıctıon Stır Weldıng Joınts. *9th İnternational May 19 Innovative Scientific Approaches Congress,* Samsun, Türkiye, 17-19 Mayıs 2023.

Edis, R., Evecen, E.H., Subaşı, S., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2021). Sac Parça Görsel Kontrol Alanında REBA ve RULA Ergonomi Çalışması. *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD'21,* İstanbul, Türkiye, 22-25 Aralık 2021.

Edis, R., Gökkuş, Y., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. Yurdakul, Y. (2021). Derin Çekme İşleminde Zımba Hızı ve Yağlayıcı Etkisinin DD13 ve 304 Paslanmaz Çelik Üzerine Etkilerinin Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD'21,* İstanbul, Türkiye, 22-25 Aralık 2021.

Edis, R., Sınmazçelik, T., **Uçakkuş, Ö.E.,** Yalçın, C. (2021). Derin Çekme İşleminde Zımba Hızı Değişiminin ve Yağlayıcı Kullanımının Etkilerinin Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Ankara IV. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi,* Ankara, Türkiye, 10 Nisan 2021.

Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.** (2022). Examination of Springback Behavior of Different Grade Sheet Materials. *9th İnternational Congress on Engineering, Architecture and Design,* İstanbul, Türkiye, 14-16 Mayıs 2022.

Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.** (2023). Reducing Sheet Material Process Cost with Innovative Tool Design. *4th İnternational Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 11-12 Mart 2023.

Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.** (2023). Improving Raw Material Scrap Rate and Process Time with Innovative Tool Design. *4th İnternational Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 11-12 Mart 2023.

Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2022). Establishing KAIZEN Process with Industry 4.0 Concept. *9th İnternational Congress on Engineering, Architecture and Design,* İstanbul, Türkiye, 14-16 Mayıs 2022.

Edis, R., **Uçakkuş, Ö.E.**, Yalçın, C. (2022). Projection Welding Parameter Optimization by Taguchi Method. *9th İnternational Congress on Engineering, Architecture and Design,* İstanbul, Türkiye, 14-16 Mayıs 2022.

Evecen, E.H, **Uçakkuş, Ö.E.** (2022). Evaluation of Downtimes Occurred in the Automotive Sheet Metal Forming Industry with REBA, RULA, BAUA and QEC Risk Analysis Methods. *9th İnternational Congress on Engineering, Architecture and Design,* İstanbul, Türkiye, 14-16 Mayıs 2022.

Evecen, E.H, **Uçakkuş, Ö.E.** (2022). TIE(Total Industrial Engineering) KAIZEN Application in Automotive Sheet Forming Industry. *9th İnternational Congress on Engineering, Architecture and Design,* İstanbul, Türkiye, 14-16 Mayıs 2022.

Kına, M.B., **Uçakkuş, Ö.E.** (2019). A Lean Manufacturing Technique SMED. *IRDITECH 2019 International R&D Innovation and Technology Management Congress,* İstanbul, Türkiye, 3 Mayıs 2019.

Sınmazçelik, T., **Uçakkuş, Ö.E.**, Zeren, A. (2023). Examination of Effects of Surface Texture on Mechanical Systems. *4th İnternational Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 11-12 Mart 2023.

Uçakkuş, Ö.E. (2018). The Effect of Distorsions Occurring During Polymerized Water and Oil Hardening Processes in Fatigue Life of Tube Stabilizer Bar. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 323973.

Uçakkuş, Ö.E., Ertem, Y., Yalçın, C., Edis, R. (2024). Ensuring Traceability By Developing The R&D Center Management Program. *7. International Marmara Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 27-28 Ocak 2024.

Uçakkuş, Ö.E., Yalçın, C. (2023). Scrool Compressor Muffler Plate Process Improvement. *4th İnternational Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 11-12 Mart 2023.

Uçakkuş, Ö.E., Yalçın, C. (2024). Investigation Of The Effect Of The Lubricant Volume On Friction Energy Occurs Between Tribo Pairs. *7. International Marmara Scientific Research and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 27-28 Ocak 2024.

Uçakkuş, Ö.E., Zeren, A., (2018). The Effect of Distorsions Occurring During Polymerized Water and Oil Hardening Processes in Fatigue Life of Tube Stabilizer Bar. *IRDITECH 2018 International R&D Innovation and Technology Management Congress,* İstanbul, Türkiye, 18 Mayıs 2018.

Uçakkuş, Ö.E., Zeren A., Sınmazçelik, T., Yalçın, C. (2024). Derin Çekme Kalıbında Bilyalı Dövme Prosesi İle Oluşturulan Yüzey Dokusunun Tribolojik Performans Üzerindeki Etkisinin Ölçülmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40*(1), 265-275. DOI: 10.17341/gazimmfd.1380153.

Uçakkuş, Ö.E., Zeren, A., Ürgün, S., Fidan, S., Bora, M.Ö., Ceylan, R., Ozun, E., Sınmazçelik, T., (2024). Characterization Of Surface Morphology Changes In Cold Work Tool Steel 1.2379 From Repetitive CO_2 Laser Line Operations. *9. International Sciences and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 16-17 Mart 2024.

Uçakkuş, Ö.E., Zeren, A., Ürgün, S., Fidan, S., Bora, M.Ö., Ceylan, R., Ozun, E., Sınmazçelik, T., (2024). Investigating The Effects Of CO_2 Laser Processing Parameters On 1.2379 Cold Work Tool Steel Surfaces. *9. International Sciences and Innovation Congress,* İstanbul, Türkiye, 16-17 Mart 2024.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Emre Uçakkuş ilk, orta ve lise öğrenimini Kırıkkale'de tamamladı. 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. Makine Mühendisliği Bölümünden 2010 yılı bahar döneminde 3,71 ortalama ile bölüm 1.si fakülte 2.si olarak mezun oldu. 01.02.2011 tarihinde Rözmaş Çelik A.Ş. firmasına başlayan yazar en son Ar-Ge, Proses Geliştirme ve Yalın Üretim Şefi olarak 24.01.2021 tarihinde görevini tamamlamıştır. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başlayan yazar ısıl işlem üzerine yapmış olduğu tez çalışması ile 2018 yılında yüksek lisansı tamamlamıştır. Takip eden dönemde doktora öğrenimine başlamıştır. 25.01.2021 tarihinde Ulus Metal A.Ş. firmasına Ar-Ge Merkezi Şefi olarak başlamıştır.