

AISI 1020 Çeliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı
Kullanımının Araştırılması

Koray Kılıçay

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2012

Investigation the Usage of Solid Lubricants
in Milling AISI 1020 Steel

Koray Kılıçay

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

JUNE 2012

AISI 1020 eliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı
Kullanımının Araştırılması

Koray Kılıçay

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yard. Doç. Dr. Mustafa Ulutan

HAZİRAN 2012

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Koray Kılıçay' ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “AISI 1020 Çeliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı Kullanımının Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yard. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

İkinci Danışman : -----

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Nejat KIRAÇ

Üye : Prof. Dr. Bilal PAR

Üye : Yard. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Yard. Doç. Dr. Mesut TEKKALMAZ

Üye : Yard. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

İmalat sektöründe, talaşlı imalat en temel ve en gerekli üretim yöntemlerinden biridir. En yaygın kullanılan talaşlı imalat yöntemleri tornalama ve frezeleme işlemleridir. Talaşlı imalat işlemi sırasında kesme bölgesinde oluşan yüksek kesme kuvvetleri sonucunda, takım ve iş parçası arasında sürtünme ve ısı oluşumunun arttığı bilinmektedir. Kesme sıvıları genellikle kesme bölgelerindeki ısıyı uzaklaştırmak ve sürtünmeyi azaltmak için kullanılmaktadır. Bu sıvıların kullanılması ekolojiyi ve işçi sağlığını tehdit etmektedir. Ayrıca depolanması ve saklanması zordur. Bu nedenle çevre ve kullanıcı dostu yağlayıcı alternatiflerine ihtiyaç vardır. Çevre ve kullanıcı dostu katı yağlayıcılar, yağlama için önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Son dönemlerde araştırmacılar doğrudan katı yağlayıcıların kullanımı üzerine çalışmaktadırlar.

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan frezeleme işleminde Türkiye’ de üretilen bor içerikli tozların katı yağlayıcı olarak kullanımı araştırılmıştır. Katı yağlayıcı olarak bor içerikli olan borik asit, bor oksit, bor pentahidrat ve etidot-67 tozları kullanılmıştır. Ayrıca karşılaştırma için kuru kesme şartlarında da frezeleme yapılmıştır. Talaş kaldırma işlemleri sırasında sabit paso, kesme hızı ve ilerleme değerleri kullanılmıştır. Frezeleme işlemi sırasında kesme kuvvetleri dinamometre ile anlık olarak ölçülmüştür. İşlem sonrası numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Bunun yanında numunelerin yüzeyi ile takımların aşınmaları elektron mikroskobu ve elektron dağılımlı X-ışını kırınımı yöntemiyle incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı yağlayıcılar, borik asit, bor oksit, kesme kuvveti, takım aşınması.

SUMMARY

Metal cutting is one of the most fundamental and indispensable processes in manufacturing industry. The most common used metal cutting processes are turning and milling. During the manufacturing industry, it is known that in the cutting zone as a result of the high cutting force between the workpiece and tool life the friction and heat formation increase. Cutting fluids generally is used in order to decrease the friction and remove the heat in the cutting zone. The usage of these fluids threat the ecology and worker health. Besides that it is difficult to storage and keeps to them. Because of this there is a need for the alternative of the lubricants which are environmental and user friendly. We are facing that the solid lubricants which are environmental and user friendly are the important alternatives of the lubricants. In the recent terms, the researchers are working on the direct usage of the solid lubricants.

In this study, it is investigated that the usage of the solid lubricants boron based powder produced in Turkey which are commonly used in the milling. The boron content of powders of boric acid, boron oxide, boron pentahydrate, and etidot-67 used as solid lubricants. Meanwhile the milling is made to make a comparation in the dry cutting condition. During the metal cutting process constant the depth of cut, cutting speed and feed rate values are used. In the process of the milling, the cutting forces are measured with the dynamometer momentarily. After the process, surface roughness values of the specimens were measured. In addition to this the surface of the specimens and tools wear is investigated with the electron microscope and energy dispersive X-ray spectroscopy.

Key words: Solid lubricants, boron acid, boron oxide, cutting force, tool wear.

TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışman hocam Yard. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN' a, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Tekniker İlhami Altınsöz' e ve bor esaslı yağlayıcıları temin etmemde yardımcı olan ETİ MADEN İŞLETMELERİ çalışanlarına teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. TALAŞLI İMALAT VE TALAŞLI İMALATI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.. 3	
2.1. Frezeleme	3
2.2. Yüzey Pürüzlülüğü	7
2.3. Talaş Kaldırma İşleminde Kesme Kuvvetleri.....	10
2.3.1. Ortogonal kesme mekaniği.....	11
2.3.2. Oblik (eğik) kesme mekaniği.....	12
2.3.3. Frezelemede kesme kuvvetleri.....	14
2.4. Sürtünme ve Aşınma.....	16
2.4.1. Kesici takımlarda aşınma mekanizmaları.....	18
2.4.1.1 Abrasiv aşınma	19
2.4.1.2. Difüzyon aşınması	20
2.4.1.3. Oksidasyon aşınması.....	21
2.4.1.4. Yorulma aşınması	21
2.4.1.5. Adheziv aşınma.....	21

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.4.2. Kesici takımlarda aşınma tipleri	22
2.4.2.1. Serbest yüzey aşınması	24
2.4.2.2. Krater aşınması	24
2.4.2.3. Plastik deformasyon.....	24
2.4.2.4. Çentik aşınması.....	25
2.4.2.5. Isıl (termal) çatlaklar.....	25
2.4.2.6. Mekanik yorulma çatlakları	25
2.4.2.7. Kesici kenardan parça kopması	26
2.4.2.8. Kırılma	26
2.4.2.9. Yığılma kenar.....	26
2.4.3. Kesici takımlarda aşınmanın belirlenmesi	27
2.5. Kesme Sıvıları ve Yağlayıcılar	29
2.5.1. Sıvı yağlayıcılar.....	30
2.5.2. Katı yağlayıcılar	31
2.5.2.1. Yapısal yağlar	38
2.5.2.2. Mekanik yağlar	43
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	45
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	50
4.1. Tezgah.....	50
4.2. İş Parçası	50
4.3. Kesici Takım.....	52

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü	52
4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Ölçümü	55
4.6. Bor İçerikli Katı Yağlayıcılar	57
4.7. SEM ve EDS Analizleri	59
5. DENEYSEL SONUÇLAR	61
5.1. Kesme Kuvvetleri Ölçüm Sonuçları	61
5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	70
5.3. Freze Takımlarında Aşınmaların İncelenmesi	74
6. GENEL SONUÇLAR	88
KAYNAKLAR DİZİNİ	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Frezeleme çeşitleri (a) çevresel frezeleme, (b) alın frezeleme, (c) eksenel yönde ilerleyerek frezeleme	4
2.2 Kesme hızı, ilerleme ve devirin şematik gösterimi.....	5
2.3 Aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme.....	6
2.4 Yüzey profili	8
2.5 R_z yüzey pürüzlülüğü.....	9
2.6 Ortogonal kesme mekaniği düzlemsel parçalarda (a) ve silindirik parçalarda(b)	12
2.7 Oblik kesme mekaniği düzlemsel parçalarda (a) ve silindirik parçalarda (b) .	13
2.8 Eğik kesme geometrisi.....	13
2.9 Frezelemede ardışık iki diş tarafından çizilen sikloid eğrisi.....	14
2.10 Kesme kuvvetin bileşenleri.....	15
2.11 Tipik aşınma bölgeleri	18
2.12 Temel aşınma tipleri	19
2.13 Kesici takımlarda oluşan aşınma tipleri.....	23
2.14 Çeşitli aşınma tipleri için analiz boyutları	28
2.15 Serbest yüzey aşınması için analiz boyutları	28
2.16 Stribeck diyagramı	30
2.17 Grafit (a), hegzagonal bor nitür (b), molibden disülfid (c) ve borik asitin (d) tabakalı kristal yapılarının şematik gösterimi	41
2.18 Borik asitin tabakalı yapısının SEM fotoğrafı	42
4.1 AISI 1020 malzemeden yapılmış deney numunesi işlem öncesi (a) ve işlem sonrası (b).....	51
4.2 Dinamometre ve kontrol ünitesi	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3 Kesme kuvvetleri ölçümü için hazırlanmış sistem	53
4.4 DynoWare programı kullanılarak elde edilen ekran görüntüsü.....	54
4.5 Mitutoyo SJ 400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	55
4.6 Yüzey pürüzlülüğü ölçümü elektronik rapor örneği.....	56
4.7 Otomatik titreşimli elek	59
4.8 LEO 1430 VP modeli SEM cihazı ve EDS ünitesi.....	60
5.1 Kesme kuvvetlerinin ölçüm yönleri.....	61
5.2 F_z basma kuvvetinin zamanla değişimi.....	62
5.3 Kuru kesme işlemi yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları	63
5.4 Etidot 67 tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları	65
5.5 Bor pentahidrat tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları.....	66
5.6 Borik asit tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları	67
5.7 Bor oksit tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 4 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları	68
5.8 İlerleme yönündeki kuvvetin zamanla değişimi	69
5.9 Ortalama yüzey pürüzlülüğünün [R_a] kesme boyuna göre değişimi	73
5.10 Maksimum yüzey pürüzlülüğünün [R_z] kesme boyuna göre değişimi	73
5.11 Parmak freze takımlarının kesici ağızlarından çekilmiş 250X büyütme SEM görüntüsü	75

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.12 Kuru kesme işleminde kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS sonuçları	76
5.13 Kuru kesme işleminde kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu.....	77
5.14 Etidot-67 tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu .	78
5.15 Etidot-67 tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları.....	79
5.16 Bor pentahidrat tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 3 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları	81
5.17 Bor pentahidrat tozuyla işlemede kullanılmış freze takımın EDS analizi sonucu	82
5.18 Borik asit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları.....	83
5.19 Borik asit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları.....	84
5.20 Bor oksit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 3 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları.....	86
5.21 Bor oksit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu..	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	Talaş kaldırma işlemlerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri 10
2.2	Katı yağlayıcıların sıvı yağlar ve gres ile karşılaştırılması..... 33
2.3	Katı yağlayıcıların değişik şartlarda elde edilmiş sürtünme katsayıları 36
2.4	Dünya bor rezervleri miktarları ve % oranları..... 37
3.1	Literatür araştırması genel sonuçlar 49
4.1	AISI 1020 çeliğinin % bileşimi 51
4.2	Katı yağlayıcı olarak kullanılan bor bileşiklerinin kimyasal özellikleri..... 58
5.1	Yüzey pürüzlülüğü değerleri 71
6.1	Bor içerikli tozların katı yağlayıcı olarak kullanılmasının değerlendirilmesi 90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
N	Ana mil hızı, dev/dk
V_c	Kesme hızı, m/dk
a	Paso, mm
f_u	Birim zaman başına ilerleme, mm/dk
f_s	Devir başına ilerleme, mm/dev
f_z	Kesici kenar başına ilerleme, mm/diş
R_z	En büyük profil yüksekliği, μm
R_a	Profilin aritmetik ortalaması, μm
F_c	Teğetsel kesme kuvveti, N
F_{cn}	Radyal kesme kuvveti, N
F_p	Eksenel kesme kuvveti, N
μ	Sürtünme katsayısı
F	Sürtünme kuvveti, N
N	Normal yük, N
C	Grafit
MoS_2	Molibden disülfid
WS_2	Tungsten disülfid
$CoCl_2$	Kobalt klorür
$ZrCl_2$	Zirkonyum klorür
BN	Bor nitrür
$Na_2B_4O_7$	Boraks
PTFE	Politetrafloretilen
PE	Polietilen
PP	Polipropilen

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$Na_2B_8O_{13} \cdot 4H_2O$	Etidot-67
$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	Boraks penta hidrat
H_3BO_3	Borik asit
B_2O_3	Bor oksit
MX_2	Geçiş-metali dikalkogenit
MoO_3	Molibden trioksit
SO_2	Sülfür dioksit
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
<i>HSS</i>	Yüksek hız çeliği
<i>ppm</i>	Milyonda bir birim
<i>HBN</i>	Kübik bor nitrür
<i>SEM</i>	Taramalı elektron mikroskobu
<i>EDS</i>	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
<i>CNC</i>	Bilgisayar kontrollü tezgah
<i>m</i>	Metre
<i>mm</i>	Milimetre
μm	Mikrometre
<i>nm</i>	Nanometre
<i>dk</i>	Dakika
<i>dev</i>	Devir
<i>N</i>	Newton
<i>et al</i>	Ve diğerleri
<i>vb.</i>	Ve benzerleri

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Talaşlı imalat, teknik resimlerle şekilleri ve ölçüleri belirlenmiş iş parçasını imal etmek için ham madde üzerinden talaş olarak isimlendirilen parçaların takım tezgahları ve kesici takımlarla uzaklaştırılması işlemidir. Talaşlı imalat yöntemlerinde kesici takım ve/veya iş parçasının birbirine göre hareketleriyle iş parçası üzerinde gerilim oluşturulur. Bu gerilim sayesinde iş parçasından talaş uzaklaştırılarak şekil verme işlemi gerçekleştirilir. Talaş kaldırma işlemlerinde kullanılacak kesici takımların sert, mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı olması gerektiğinden takımlar yüksek hız çelikleri, sinterlenmiş karbürler, sermetler, seramikler ve kübik bor nitrür malzemelere özel kesme profilleri verilerek üretilirler. Talaşlı imalat yöntemlerinin ana başlıkları tornalama, frezeleme, delik işleme, planyalama, vargelleme, broşlama, taşlama, diş açma ve testere ile kesme işlemi olarak sıralanabilir. Bu imalat yöntemlerinden tornalama ve frezeleme en sık kullanılan işlemlerdir. Tornalama ve frezeleme işlemlerinin yaygın olarak kullanılmasının en önemli nedeni esnek imalata olanak sağlamasıdır. Bu iki talaşlı imalat yöntemi yaygın olarak kullanıldıkları için teknolojik anlamda büyük gelişim ve değişim göstermişlerdir.

Frezeleme işlemi, düzlemsel yüzeylere sahip iş parçalarının hareketli tablalara bağlanması ve kendi eksenleri etrafında dönen kesici takımların parçalara daldırılmasıyla gerçekleştirilen talaşlı imalat yöntemidir. Ancak günümüzde kullanılan beş eksenli işleme merkezleriyle düzlemsel olmayan şekiller ve yüzeyler de elde edilebilir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan kesici takımlar çok ağızlı (çok kesme kenarlı) takımlardır. Kesme kenarlarının bir kısmı iş parçasından talaş kaldırırken bir kısmı boşta hareket eder. Kesici takım üzerindeki kesici ağızların sırasıyla kesme işlemi yapmasından dolayı kesici takım darbeli yüke maruz kalır. Frezeleme işleminde kesici takım, iş parçası üzerinde hemen hemen her yönde ilerleme hareketi gerçekleştirebilir. Bu nedenle frezeleme işlemi çok yönlü işleme yapılabilen esnek bir talaşlı imalat yöntemidir. Darbeli yükler altında, yüksek paso ve ilerleme değerlerinde

yapılan frezeleme işlemlerinde uygun kesme sıvısı veya yağlayıcı kullanımı avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada AISI 1020 çelik malzeme yüzeyinin frezelenmesi sırasında bor içerikli tozların katı yağlayıcı olarak kullanılması araştırılmıştır. Bu amaçla çelik malzeme üzerinden yüksek hız çeliği parmak freze takımı kullanılarak talaş kaldırılmıştır. Talaş kaldırma işlemi 1 mm paso derinliği, 1000 devir/ dk ve 80 mm/dk ilerleme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Aynı şartlar altında katı yağlayıcıların kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmaları üzerine etkisini inceleyebilmek için kuru kesme ve dört farklı yağlama durumunda deneyler gerçekleştirilmiştir. Katı yağlayıcı olarak etidot-67, bor oksit, bor pentahidrat ve borik asit kullanılmıştır. Her bir yağlama durumu için 500 mm boyunda talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri sırasında KISTLER 9257BA modeli dinamometre ile kesme kuvvetleri eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Kesme işleminden sonra iş parçalarının yüzeylerinden yüzey pürüzlülüğü değerleri Mitutoyo yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında ölçülmüştür. Kesici takımların aşınma yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) teknikleri ile incelenmiştir.

Altı bölümden oluşan bu çalışmada, birinci bölüm giriş bölümü olup bu bölümde tezin konusu ve amacı belirtilmiştir. İkinci bölümde talaşlı imalatı etkileyen faktörler üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde katı yağlayıcılar ile ilgili literatür araştırmasının bulguları verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan materyal ve çalışmalarda seçilen yöntemler anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca tüm deney şartları verilmiş ve deneylerin nasıl gerçekleştirildiği tarif edilmiştir. Beşinci bölümde deney sırasında ölçülen kesme kuvveti ve işlenmiş numuneler üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde deney numuneleri ve aşınmış takımlar üzerinden alınmış SEM görüntüleri ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Son bölüm olan altıncı bölümde genel sonuçlara yer verilmiştir.

BÖLÜM 2

TALAŞLI İMALAT VE TALAŞLI İMALATI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Talaş kaldırma işlemi, elastik ve plastik şekil değiştirmeye dayanan, sürtünme ve ısı oluşumu, talaş oluşumu ve kırılması, iş malzemesi yüzeyinin sertleşmesi, kesici takım ucunun aşınması ve/veya kırılması gibi birçok olayın meydana geldiği karmaşık bir olaydır. Bu nedenle talaş kaldırma işlemini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Talaşlı imalatı etkileyen başlıca faktörler; kesme hızı, paso, ilerleme, takım malzemesi, iş parçası malzemesi, soğutma sıvısı, yağlama, takım geometrisi, titreşim, vb. şeklinde sıralanabilir.

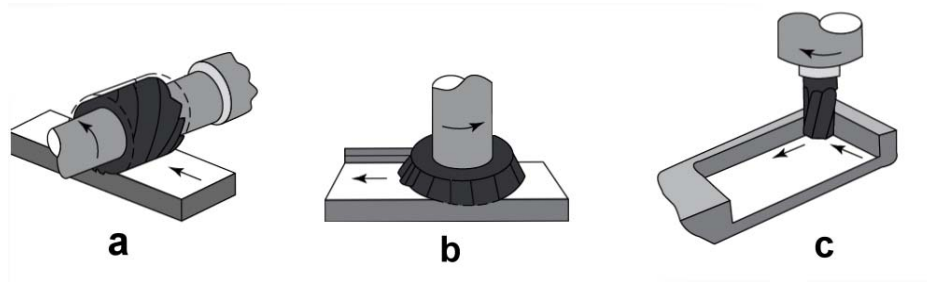
Bu çalışmada frezeleme yönteminde katı yağlayıcıların kullanımı araştırılmış ve bu işlemler sırasında kesme kuvveti ölçümü, işlem sonrası numunelerden yüzey pürüzlülüğü ölçümü ve elektron mikroskopunda incelemeler yapılmıştır. Bu nedenle bu bölümde özellikle bu konular üzerine yoğunlaşmıştır.

2.1. Frezeleme

Frezeleme prensip olarak, dönen çok uçlu bir takım ile iş parçasının doğrusal hareketi sonucunda gerçekleştirilen, bir talaş kaldırma işlemidir. Günümüzde frezeleme işleminde takım hemen hemen her yönde iş parçasına doğru hareket edebilmektedir. Freze olarak anılan kesici takımların birçok kesici kenarı vardır ve her kenar belirli bir miktar talaş kaldırma kapasitesine sahiptir. Frezelemenin avantajları yüksek işleme verimliliği, iyi yüzey kalitesi, hassasiyet ve şeklin oluşturulmasındaki esnekliktir. Frezeleme genellikle düzlem yüzeylerin, dik köşelerin ve kanalların işlenmesi amacıyla kullanılan bir işlemdir. Günümüzde bilgisayar kontrollü tezgahların (CNC) kullanımı sayesinde frezelemenin verimliliği giderek artmaktadır. Frezeleme yöntemi tezgahlar, kontrol üniteleri ve kesici takımlardaki değişimler sonucunda giderek evrensel bir işleme metodu haline gelmektedir. Günümüzde işleme merkezleri, frezeleme işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan tezgahlardır. Bu ileri imalat tekniklerinin

kullanılması beraberinde kullanılan soğutucu ve yağlayıcılarında geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur.

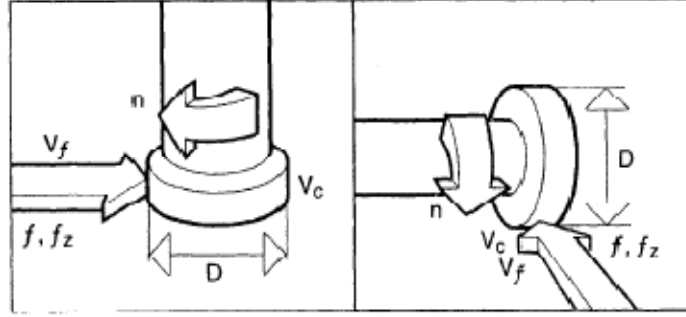
Frezeleme metotlarının farklılığından dolayı, takımın dönme eksenine bağlı olarak, farklı ilerleme yönleri mevcuttur. Bu ilerleme yönlerine göre alın frezeleme, çevresel frezeleme ve aksenal yönde ilerleyerek frezeleme işlemleri yapılabilir. Çevresel frezeleme (Şekil 2.1-a) takımın çevresindeki kesiciler ile gerçekleştirilir. Freze, teğetsel ilerlemeye paralel bir eksen etrafında döner. Alın frezeleme (Şekil 2.1-b) genellikle takımın çevresinde ve bazı durumlarda alın yüzeyinde bulunan kesici kenarlar ile gerçekleştirilen bir talaş kaldırma işlemidir. Bu işlemde freze iş parçasının radyal ilerleme yönüne dik açı yapacak şekilde döner. Bazı frezeler üçüncü bir ilerleme yönü olan aksenal yönde (Şekil 2.1 –c) de çalışabilirler. Bu, frezenin alın yüzeyindeki kesici uçlar tarafından gerçekleştirilen, bir delme işlemidir. Bu işlemlerde takım belirli bir derinliğe kadar aşağıya doğru deler ve daha sonra radyal ilerleme yönünde ilerleyerek, çevresindeki kesici kenarların sayesinde deliği büyütür (Çakır, 2010).



Şekil 2.1. Frezeleme çeşitleri (a) çevresel frezeleme, (b) alın frezeleme, (c) aksenal yönde ilerleyerek frezeleme (Schneider, 2002)

Frezeleme işlemi için kullanılması gereken talaşlı imalat tanımları kesme hızı, paso, ana mil hızı, ilerleme ve talaş debisidir.

- Ana mil hızı (N – devir /dakika) : Ana mile bağlı freze çakısının, kendi ekseninde dakikada yaptığı dönüş sayısıdır.



Şekil 2.2. Kesme hızı, ilerleme ve devirin şematik gösterimi (Çakır, 2010)

- Kesme hızı (V_c – metre / dakika) : Kesici takım belirli bir devirde dönerken takımın iş parçasına temas ettiği noktada oluşan çevresel hızdır.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad 2.1$$

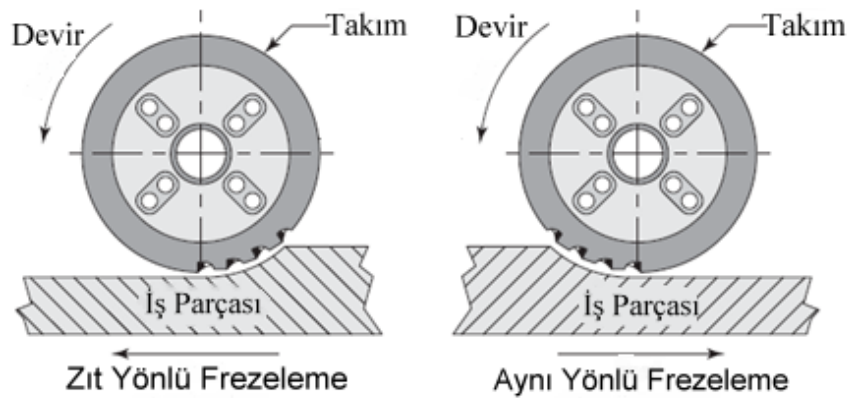
- Paso (a – milimetre) : Kesici takımın iş parçasına dalma miktarıdır. Alın frezelemede aksenal yönde, çevresel frezelemede radyal yönde talaş kaldırılır.
- İlerleme (f – milimetre / dakika, milimetre / devir veya milimetre / diş) : Kesici takımın iş parçası üzerinde birim zamanda aldığı mesafedir. İlerleme birimi olarak dakika başına yapılan milimetre cinsinden ilerleme f_u , kesici takım bir tam devir yaptığında milimetre olarak ilerleme f_s veya bir kesici kenarın parçaya girişi ile bir sonraki kesici kenarın parçaya girişi arasında geçen zamanda milimetre olarak ilerlemeye f_z ve freze takımındaki uç sayısı z olmak üzere,

$$f_z = \frac{f_s}{z} = \frac{f_u}{N \cdot z} \quad 2.2$$

bağıntısı vardır. Freze takımları çok uçlu takımlardır. Bu nedenle her ucun yeterli talaşı kaldırması için uygun ilerleme değerlerine ihtiyaç vardır.

Prensipite freze takımı dönerken, iş parçası freze takımına doğru ilerler (veya tersi). Talaş kaldırma işlemi, freze takımının iş parçasına göre dönüş yönüne bağlı olarak iki şekilde gerçekleştirilir. İş parçası, freze dönüş yönünün tersine doğru veya dönüş yönüyle aynı yönde ilerler. Dönüş yönüne göre ilerleme yönündeki farklılık kesme işleminin başlangıcındaki ve bitişindeki koşulları belirler.

- Aynı yönlü frezeleme (aşağı doğru frezeleme de denir) esnasında, iş parçasının ilerleme yönü takımın dönüş yönü ile aynıdır (Şekil 2.3). Aynı yönlü frezelemede kesici uç, kesme işlemine büyük bir talaş kalınlığı ile başlar. Bu tip frezelemede, daha az ısı oluşumu ve minimum deformasyon sertleşmesi eğilimi sayesinde, ezme etkisi oluşmaz. Büyük talaş kalınlığı avantajlıdır.
- Zıt yönlü frezeleme (klasik frezeleme de denir) esnasında iş parçasının ilerleme yönü takımın dönüş yönüne terstir (Şekil 2.3). Talaş kalınlığı sıfırdan başlar ve kesme işleminin sonuna kadar artar. Sıfır talaş kalınlığından başlayan zıt yönlü frezeleme işleminde, freze ile iş parçasını birbirinden ayırmaya çalışan, yüksek kesme kuvvetleri söz konusudur. Sıfır talaş kalınlığı nedeniyle kesici uç parçaya bastırıldığında parçayı kesmez, ezer; dolayısıyla aşırı sürtünmeye ve yüksek sıcaklıklara neden olur. İşlemden önceki işlem nedeniyle deformasyon sertleşmesine uğramış yüzeye temas eder. Kuvvetler iş parçasını, tabladan yukarıya doğru kaldırmaya çalışır, bu ise parça bağlanma açısından önlem alınmasını gerektirir (Çakır, 2010).



Şekil 2.3. Aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme (Schneider, 2002)

2.2. Yüzey Pürüzlülüğü

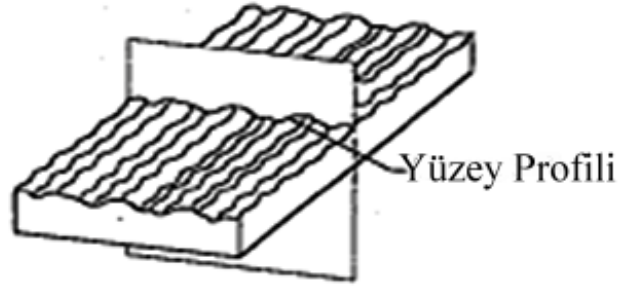
Yüzeyler genellikle düzensiz ve karmaşık işlemlerle imal edilirler. Çoğu işlemlerde sıradan kontroller ve minimum kalite kontrolü ile genel yüzey doku gereksinimleri tam olarak karşılanamamaktadır. Çalışma şartlarına uygun olarak, bazı özel durumlar için detaylı yüzey kalitesine ihtiyaç duyulur. Bu yüzden bu parçalar için, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve kalite kontrolü gerekmektedir. Korozif ortamda çalışan makine elemanları, dönen makaralar, kaplanmış yüzeyler, bujiler vb. gibi sürtünmeye karşı yağların kullanıldığı parçaların imalatı da titizlik gerektirir.

Yüzey dokusu, üç boyutlu yüzey topoğrafyası şeklinde nominal yüzeyden sapmalar olarak tanımlanabilir. İş parçasının profilindeki bu sapmalar, mekanik, optik ve elektronik devrelerin bir kombinasyonu ile ölçülebilir. Hiç bir zaman tam anlamıyla düzgün bir yüzey elde edilemez ve daima bir miktar pürüzlü bir yapı kalır. Bu durum bitirme işleminin kalitesine göre biraz artabilir. Bazı yüzeyler hem pürüzlü hem de dalgalı olabilir. Yüzey dokusu dört elemandan oluşmaktadır. Bunlar; pürüzlülük, dalgalanmalar, yataylık ve çatlaklıklardır.

- Pürüzlülük : Üretim işleminin tabiatında var olan düzensizliklerden oluşmaktadır. Bunlar takım izleri ve diğer ölçü dışı düzensizliklerdir.
- Dalgalanma : Yüzey dalga durumu, bütün düzensizlikleri içermektedir ve pürüzlülük uzunluğundan büyüktür. Dalgalanma, makineden veya parçaların dönmesinden, titreşiminden, ısı işlemlerden, kesici takımın kırılmasından kaynaklanabilir. Pürüzlülük, dalgalı yüzeylerin üst üste gelmesinden meydana gelebilir.
- Yataylık : Belli bir yüzey durumuna doğru kaymadır. Genellikle kullanılan üretim metodundan kaynaklanır.
- Çatlaklıklar : İstenmeyen veya kasıtsız düzensizliklerdir. Çatlaklık, bir bölgede veya yüzeydeki aralıkların değişimi ile gerçekleşir. Çatlaklar hava boşluğu, yükselticiler ve kazıntılar içermektedir. Belirlenen bu özellikler olmadıkça, çatlakların etkisi yüzey pürüzlülüğünü aşırı derecede etkilemez. (Çaydaş, 2002).

Yüzey durumları, imalatın kalite ve ekonomik durumuna etkisi bakımından önemli rol oynar. İmal edilmiş bir parçanın yüzeyi, parça resminin tarif ettiği yüzeye

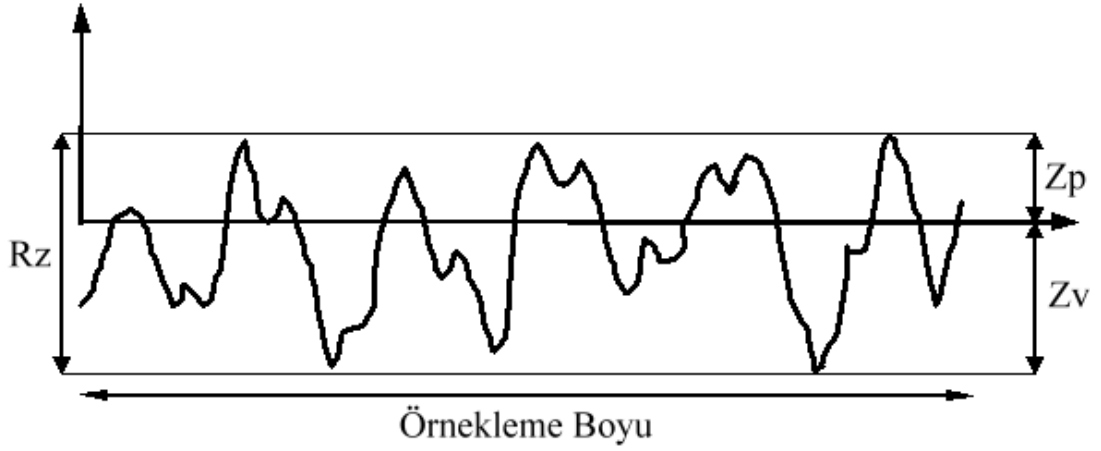
hiçbir zaman eşdeğer olmaz; böyle bir yüzeyin mikroskop altındaki görüntüsünde bir çok girinti ve çıkıntılar gözlenir. Şekil 2.4' te, gerçek yüzey ile belirlenen düzlemin kesişmesi sonucu oluşan bir yüzey profili gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yüzey profili (Kıraç, 2011)

Yüzey profilleri, kesici takımların geometrisine, kesme ve ilerleme hızlarına, soğutulma-yağlanma koşullarına ve kesme derinliğine bağlı olup; sürtünme, aşınma, yağlama, korozyon ve sızdırmazlık gibi hususlara etki eder. Bu bakımdan yüzey durumlarını belirlemek, ölçmek ve kontrol etmek büyük önem taşır. Bunun için de, bir yüzeyin fonksiyonel özelliklerini, yüzey durumu özellikleriyle açıkça sağlayan farklı birkaç yüzey durumu parametresinin tespiti gerekli olabilir.

Profil parametreleri, R-profilleri, W-profilleri ve P-profilleri olmak üzere üç yüzey profili için tarif edilmiştir. Burada, R-profil parametresi, yüzey pürüzlülük profilinden; W-profil parametresi, dalgalılık profilinden ve P-profil parametresi de ana profilden hesaplanan parametrelerdir. Yüzey profili parametrelerinden en büyük profil yüksekliği (P_z , R_z , W_z), TS 6956 EN ISO 4287/Nisan 2004'e göre, örnekleme uzunluğu içinde en büyük profil tepe nokta yüksekliği Z_p ile en büyük profil çukur nokta derinliği Z_v değerlerinin toplamı olarak tarif edilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. R_z yüzey pürüzlülüğü

Değerlendirilen profilin aritmetik ortalama sapması (P_a , R_a , W_a) ise, TS 6956 EN ISO 4287/Nisan 2004'e göre, örnekleme uzunluğu içinde mutlak ordinat değerlerinin aritmetik ortalaması olup,

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad 2.3$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada l , örnekleme uzunluğudur (Kıraç, 2011).

Üretim metotları ile elde edilebilecek profil sapmalarının aritmetik ortalama değerleri R_a (μm) işlem tipine göre değişiklik gösterir. Talaşlı imalat işlemleriyle elde edilebilecek ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 2.1' de verilmiştir. Bu çizelge incelendiği zaman en düzgün yüzey broşlama işleminde, en kötü yüzey testere ile kesme işleminde görülür. Broşlama daha hassas, testere ile kesme ise daha kaba bir işlem olduğu için elde edilen yüzey özelliklerinin farklı olması beklenen bir durumdur.

Çizelge 2.1. Talaş kaldırma işlemlerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Şahin, 2001)

İşleme Tipi	Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri [μm]							
	0.2	0.4	0.81	1.6	3.2	6.3	12.7	25.4
Tornalama								
Delik büyütme								
Delme								
Raybalama								
Frezeleme								
Vargelleme								
Planyalama								
Broşlama								
Testere ile kesme								

2.3. Talaş Kaldırma İşleminde Kesme Kuvvetleri

Kesici takım üzerine etki eden kuvvetler, talaş kaldırmanın önemli bir safhasıdır. Takım tezgahlarının tasarımı, işlem sırasında oluşacak kuvvetlerin bilinmesi ve gerekli güç kapasitesinin hesaplanması gereklidir. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi, takım tasarımını optimize etmede faydalı olup kesme işleminin bilimsel analizi de kuvvetlerin bilinmesini gerektirmektedir. Son yüzyılda takım kuvvetlerinin yeterli hassaslıkta ölçülmesi için pek çok dinamometre geliştirilmiştir. Kullanılan bütün metotlar yük altında takımın elastik yer değiştirmesinin ölçülmesi esnasına dayanmaktadır (Şahin, 2000).

Talaş kaldırma işlemlerinde kesme kuvvetlerinin belirlenmesi aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı büyük önem taşımaktadır.

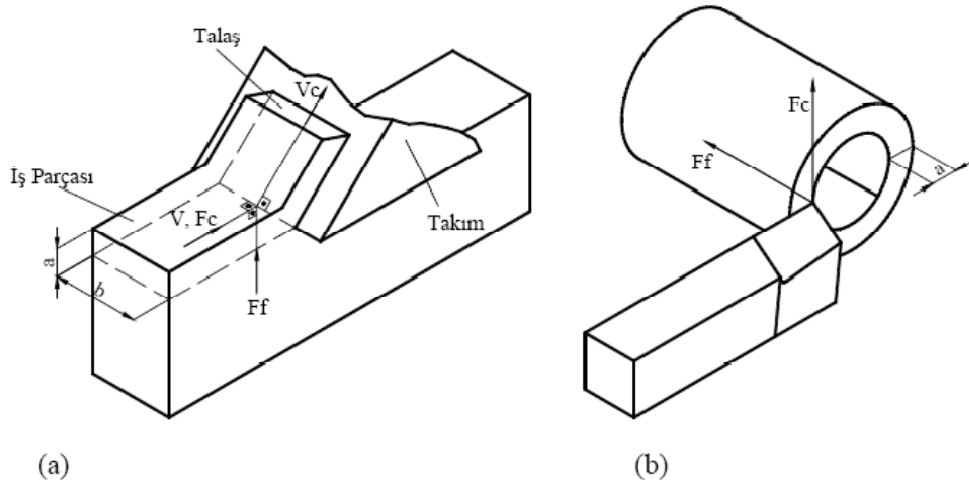
- Takım tezgahının talaş kaldırma sırasında harcadığı enerjinin tespit edilmesinde,
- Takım tezgahının, takımların ve bağlama aparatlarının tasarımında ve boyutlandırılmasında,

- Tezgah rijitliği ve boyutlarının hesaplanmasında,
- Kesme kuvvetlerine veya harcanan enerjiye bağlı olarak, talaş kaldırma sırasında optimizasyona dayalı adaptif bir kontrol sistemi oluşturmak için önemlidir (Işık ve akır, 2000).

Bu bölümde ortogonal (dik) kesme, oblik (eğik) kesme ve frezelemede kesme kuvvetleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.3.1. Ortogonal kesme mekaniği

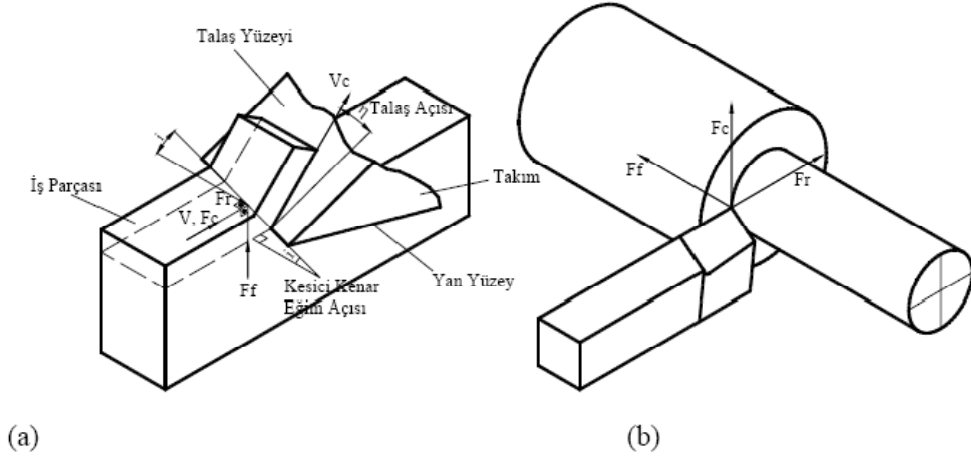
Birçok yaygın kesme işlemleri, üç boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip olmasına rağmen, iki boyutlu ortogonal kesme metal talaş kaldırma işleminin genel mekaniğini açıklamak için kullanılır. Ortogonal kesmede malzeme ile takım kesme kenarı arasındaki açı diktir ve bu şekilde talaş kaldırma işlemi gerçekleşir. Daha karmaşık, üç boyutlu eğik kesme işlemlerinin mekaniği, genellikle ortogonal kesme işlemine uygulanmış geometrik ve kinematik dönüşüm modelleriyle değerlendirilir. şekil 2.6' da şematik olarak ortogonal işlemlerinin temsili gösterimi yapılmıştır. Ortogonal kesme, kesme kenarı, kesme hızına (V) dik olan düz takımla şekillendirme işlemine benzer. Kesme genişliği (b) ve kesme derinliği (a) ile metal talaş, iş parçasından kesilerek ayrılır. Ortogonal kesmede kesme işlemi kesme kenarı boyunca uniform olarak düşünülür. Böylelikle malzemenin kenarına yayılma olmaksızın iki boyutlu düz birim şekil değiştirme işlemi gerçekleşmiş olur. Dolayısıyla, kesme kuvvetleri sadece esas kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme kuvveti (F_f) olarak isimlendirilen hız ve kesilmemiş talaş kalınlığı doğrultusunda g sarf eder (Taylan, 2009).



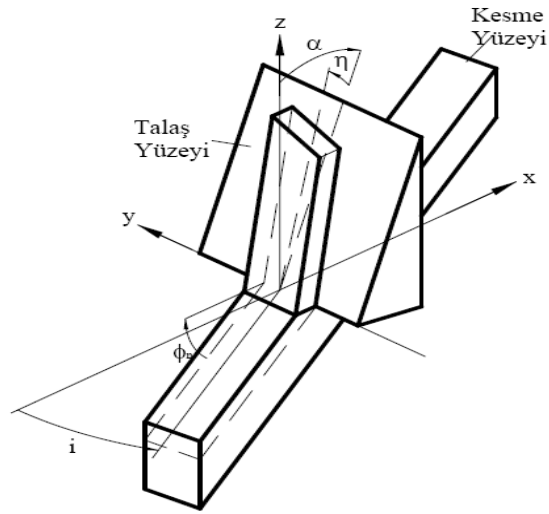
Şekil 2.6. Ortogonal kesme mekaniği düzlemsel parçalarda (a) ve silindirik parçalarda (b) (Altıntaş 2000 : Taylan, 2009)

2.3.2. Oblik (eğik) kesme mekaniği

Eğik kesme mekaniği Şekil 2.7' de görülmektedir. Kesme hızı (V) ortogonal kesmede kesme kenarına diktir. Oysaki eğik kesmede, kesme kenarı ile normal düzlemi arasında bir (i) eğim açısı bulunmaktadır. Kesme kenarının normali ve kesme hızına paralel olan düzlem, normal düzlem veya P_n olarak belirlenebilir. Kesilme olayı ve talaş oluşumu, kesme hızıyla paralel tüm normal düzlemlerde benzerdir ve kesme kenarına diktir. Dolayısıyla kesme hızı, kayma hızı ve talaş hızı kesme kenarına diktir. Bileşke kuvvet ve kayma talaş yüzeyi bölgesindeki diğer kuvvetlerin tümü ortogonal kesmede aynı normal düzlemdir. Normal düzleme dik üçüncü doğrultuda bir kesme kuvveti yoktur. Eğik kesme işlemlerinde kesme hızı eğimlidir ve böylece kayma, sürtünme, talaş akışı ve bileşke kuvvet doğrultuları 3 kartezyen koordinatın bileşkeleridir. Şekil 2.8' de x eksenine kesme kenarına diktir, fakat kesme yüzeyi üzerindedir. Y eksenine kesme kenarıyla hizalıdır ve z eksenine xy düzlemine diktir. Eğik kesmede kuvvetler 3 doğrultunun tümünde de oluşmaktadır. Eğik kesmede önemli olan düzlemler kayma düzlemi, talaş yüzeyi, kesme yüzeyi xy , normal düzlem xz , veya P_n ve hız düzlemi P_v ' dir. Normal düzlemdeki eğik kesmenin mekaniği ortogonal kesme ile aynıdır, dolayısıyla tüm hız ve kuvvet vektörleri normal düzlemde hesaplanır.



Şekil 2.7. Oblik kesme mekaniği düzlemsel parçalarda (a) ve silindirik parçalarda (b)
(Altıntaş 2000 : Taylan, 2009)

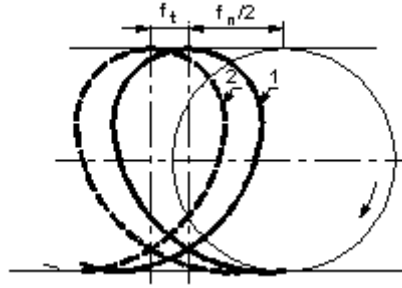


Şekil 2.8. Eğik kesme geometrisi (Altıntaş 2000 : Taylan, 2009)

2.3.3. Frezelemede kesme kuvvetleri

Frezelemede kesme, takımın kendi ekseninde dairesel hareketi ve iş parçasının doğrusal ilerleme hareketi ile gerçekleşen temel bir kesme operasyonudur. Frezelemede her kesici ağız kısa bir süre parçayı keser. Kesici ağızlar parça ile sürekli

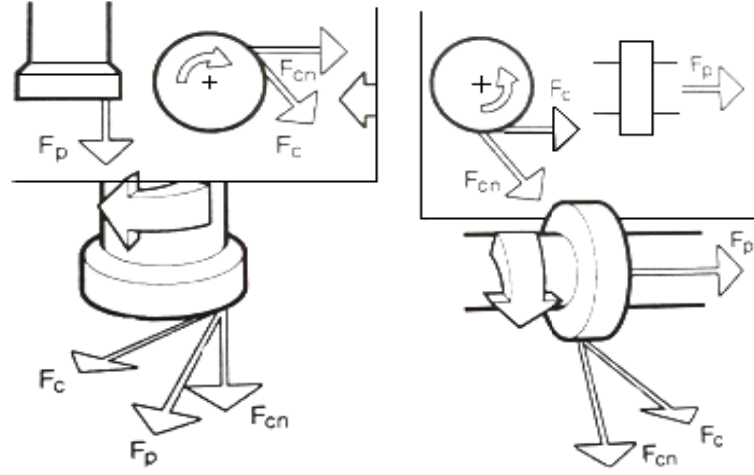
temasta olmadığından frezeleme bir kesintili kesme işlemidir ve talaş kesiti ve dolayısıyla talaş yükü de her an değişir. Kesme esnasında kesici ağızların her noktası parçaya göre izafi hareket ederek birer sikloid eğrisi çizer (Şekil 2.9). Birbirini izleyen iki dişe ait yörüngeler arasında kalan “virgül” şeklindeki kısım talaş şeklini meydana getirir. Frezelemede talaş kalınlığı kesme çevrimi boyunca değiştiğinden bu, değişken takım kuvvetleri ve temas şartları sağlar (Sağlam, 2001).



Şekil 2.9. Frezelemede ardışık iki diş tarafından çizilen sikloid eğrisi (Sağlam, 2001)

Frezeleme işleminde kuvvetlerin yönleri ve büyüklükleri frezeleme işleminin tipine, takımın pozisyonuna, iş parçası malzemesine, kesme geometrisine, talaş kalınlığına, kesme verilerine, aşınmanın miktar ve tipine bağlıdır. Frezeleme işleminde kesme kuvvetleri iş parçasını işleyen kesici uçlarca oluşturulurlar. Kesme kuvvetlerinin 3 bileşeni vardır : Teğetsel (F_c), radyal (F_{cn}), aksenal (F_p) (Şekil 2.10)

Teğetsel kuvvet frezenin dönüş yönüne etki eder ve güç üzerinde en önemli etkiye sahiptir. Radyal ve aksenal kuvvetler iş parçası ilerleme gücü ve iş parçası tespit sistemi üzerinde etkide bulunur.



Şekil 2.10. Kesme kuvvetin bileşenleri (Çakır, 2010)

Teğetsel kuvvetin yönü ve büyüklüğü, kesmeye katılan her bir kesici uca ait teğetsel kuvvetlerce oluşturulur. Bu tekil kuvvetler frezenin dönmesi nedeniyle çeşitli yönlerden etki ederler. İşlemin tipi ve özellikle talaş derinliği kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü etkiler. Tipik olarak çevresel frezelemede, daha az kesici uçun kesmeye katıldığı küçük bir talaş derinliği için teğetsel kuvvet ilerleme yönüyle hemen hemen aynı çizgi üzerinde olacaktır. Genellikle alın frezelemede olduğu gibi, daha fazla kesici ucun kesmeye katıldığı büyük talaş derinliklerinde ise teğetsel kuvvet ilerleme yönüne dik bir kuvvettir. Bu, hem gücü hem de parça tespit sistemini etkiler. İş parçasının ilerlemesi için gereken güç, ilerleme kuvvetine ya da yatay bileşene bağlıdır. Kuvvet teğetsel ve radyal kesme kuvvetlerinin bir bileşimidir. Frezenin iş parçasına göre nasıl konumlandığına bağlı olarak değişkenlik gösteren bu kuvvet, zıt yönlü frezeleme esnasında, talaş derinliği ilerleme yönünün tersi yönde arttıkça, artacaktır. Alın frezeleme işleminde aynı yönlü frezeleme ile zıt yönlü frezeleme arasında çok büyük farklılık yoktur. Alın frezeleme işleminde daha yüksek kesme hızı, daha düşük teğetsel kuvvet demektir. Bu, kesme hızı azaldıkça kesici uç üzerinde daha büyük bir teğetsel kuvvetin etkilemesi anlamına gelir. İş parçasının çok rijit olmadığı durumlarda ve kesici kenardaki kırılmanın önüne geçilebilmesi için dikkate alınması gereken bir durumdur. Kesme hızı, daha yüksek bir devir sayısının veya daha büyük çaplı bir

frezenin kullanımlıyla artırılabilir. Parça tespit sistemi açısından etkileyen kuvvetler, çok daha pratik bir şekilde düşey bileşenlere ayrılabilirler. Parçanın tespiti esnasında kuvvetlerin etkiye yönlerindeki değişimin dikkate alınması şarttır, çünkü parça tespit sistemi, bu kuvvetleri karşılamak ve iş parçasının şekli ne olursa olsun, iş parçası için gerekli rijitliği sağlamak zorundadır. Frezeleme yönü, özellikle çevresel frezeleme işleminde, kesme kuvveti bileşenlerini etkileyecektir. Zıt yönlü frezelemede talaş derinleştikçe düşey kuvvetin yönü önemli ölçüde değişir ve iş parçasını kaldırmaya çalışır. Aynı yönlü frezelemede kuvvetlerin yön değiştirmesi söz konusu değildir, dolayısıyla parça tespiti için özel önlem alınması gerekmez (Çakır, 2010).

2.4. Sürtünme ve Aşınma

İki malzeme birbiri ile temas edip biri diğeri üzerinde kayma veya yuvarlanma hareketi gerçekleştirirken, bu harekete karşı gösterilen direnç sürtünme olarak tanımlanır. Normal kuvvetle sürtünme kuvveti arasındaki oran sürtünme katsayısını verir. Sürtünme katsayısı 0 ile 1 arasında değişen bir değer alır.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad F = \text{Sürtünme kuvveti}, N = \text{Normal yük} \quad 2.4$$

Hareketin başlaması için yenilmesi gereken sürtünme kuvveti statik sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Hareket başladıktan sonra hareketin devam etmesi için gerekli olan sürtünme kuvveti dinamik sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Statik sürtünme kuvveti her zaman dinamik sürtünme kuvvetinden büyüktür.

Sürtünmenin kısaca tanımı yapıldıktan sonra aşınma tanımlanabilir. Temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı veya kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı-sıvı-gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması aşınma olarak tanımlanır (Taylan, 2009). Aşınma temasın olduğu her yüzeyde gerçekleşir. Aşınmayı tamamen engellemek imkansız olmakla birlikte en aza indirebilmek için

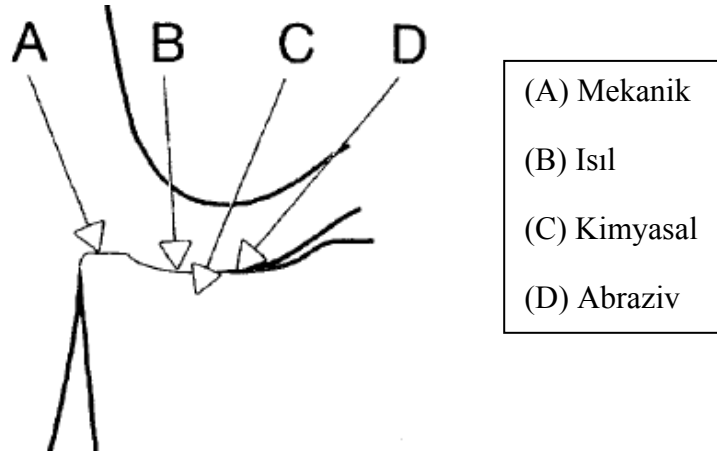
çalışmalar yapılmaktadır. Aşınmanın malzeme kaybına neden olmasından dolayı birbiriyle eş çalışan yüzeylerde temastan dolayı yüksek aşınma görülür. Bu gibi durumlarda yüzeylerin aşınmasının devamlı olarak takip edilmesi gerekmektedir. Aşınma her zaman kötü değildir. Gerekli aşınma tipleri de vardır. Bunlara verilebilecek en iyi örnek kurşun kalemle yazma örneğidir. Kurşun kalem grafitten yapılmadığı ve kâğıdın üzerine temas ettirildiğinde aşınarak kâğıt üzerinde iz bırakır. İşte bu aşınmadan faydalanarak yazı oluşturulur. Yararlı aşınmaya örnek olarak talaşlı imalat ve parlatma işlemi de verilebilir. Bu işlemlerde kontrollü aşınma gereklidir. Aynı şekilde imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımların ise aşınmaması istenir. Aşınma yataklar, dişliler ve kamalar gibi makine elemanlarında istenmez. Bu gibi parçalarda çok az bir malzeme kaybı veya yüzeyde oluşacak aşırı pürüzlenme parçaların değiştirilmesine neden olur. İyi tasarlanmış tribolojik yüzeyler ile malzeme kaybı azaltılabilir fakat aşınma düzgün ve sürekli olarak devam eder. Genellikle yüksek sürtünmenin söz konusu olduğu durumlarda yüksek aşınma beklenmektedir. Ancak bu durum her zaman doğru değildir. Örneğin seramik malzemeler de orta düzeyde sürtünme görülürken, düşük aşınma gözlemlenebilir. Bir diğer örnek olarak polimer malzemeler verilebilir. Polimer malzemeler, düşük sürtünme değerlerinde yüksek aşınma gösterebilirler.

Talaş kaldırma işlemlerinin tamamında kesici takımlar aşınır ve bu aşınma kesici takım ömrünü tamamlayana kadar devam eder. Takım ömrü, takıma ait kesici kenarın iş parçasını istenilen özelliklerde şekillendirebilmesi koşuluyla işlem yapabileceği süredir. Takım ömrü dakika cinsinden ifade edilir. Talaşlı imalatta takım ömrünü belirleyen parametreler yüzey kalitesi, hassasiyet, takım aşınması ve talaş oluşumudur. Takım aşınmasını etkileyen faktörler;

- Kesici takım malzemesi,
- İş parçası malzemesi,
- Kesme hızı, paso ve ilerleme gibi işlem şartları,
- Kesici takım geometrisi,
- Soğutucu veya yağlayıcı sıvı vb. olarak sıralanabilir (Şahin, 2001).

2.4.1. Kesici takımlarda aşınma mekanizmaları

Bu bölümde talaşlı imalatta görülen aşınma mekanizmaları hakkında bilgi verilecektir. Kesici takımın aşınması üzerine etkiyen yüklerin bir sonucudur. Temel yük faktörleri ve bu faktörlerin etki ettiği bölgeler Şekil 2.11’ de gösterilmiştir.

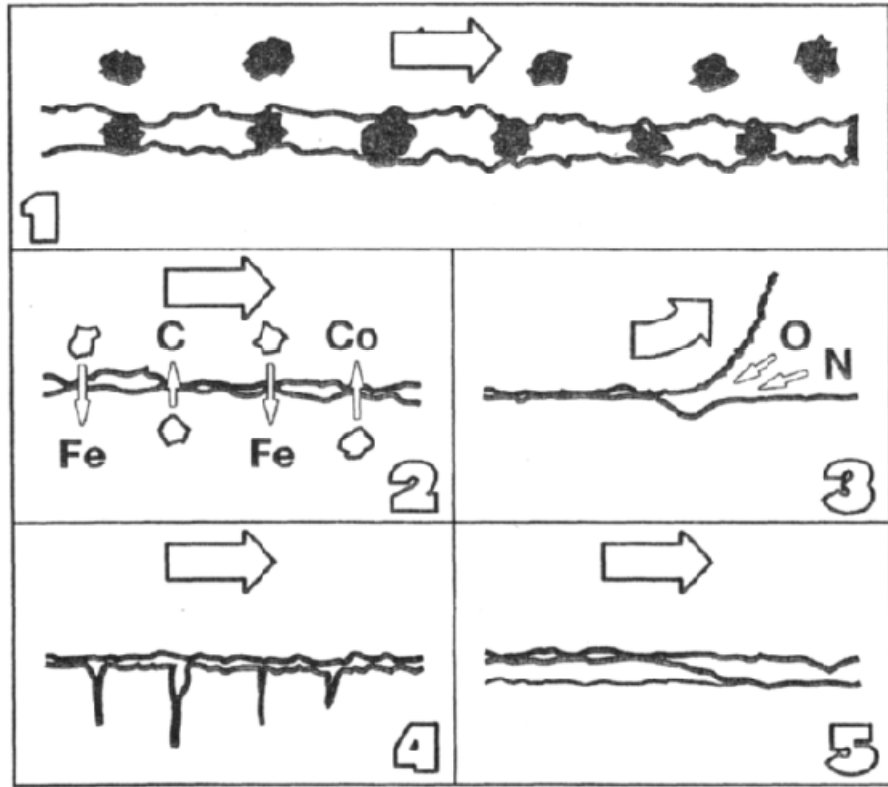


Şekil 2.11. Tipik aşınma bölgeleri (Çakır, 2006)

Mekanik yükün statik bileşenin yanı sıra talaş oluşumundan, değişken talaş derinliklerinden, darbeli ve frezeleme işleminde olduğu gibi aralıklı kesme işlemlerinden kaynaklanan çeşitli dinamik bileşenleri de söz konusudur. Talaş kaldırma işlemi esnasında kesici ucun talaş oluşturan bölgesinde ve serbest yüzeylerinde büyük miktarda ısı oluşumu söz konusudur. Talaş kaldırma işlemi sürekli olarak temiz bir metal yüzeyin oluştuğu ve bu yüzeyin takım malzemesi boyunca çok yüksek basınç ve sıcaklıklara maruz kaldığı bir işlemdir. Oluşan bu yüzey metallerin difüzyonu ve kimyasal reaksiyonlar için son derece çekici bir ortam teşkil eder. Talaş kaldırma işlemi esnasında birçok iş parçası malzemesi içerisinde sertlikleri bazen takım malzemesi sertliğine yaklaşan, son derece sert parçacıklar bulunur. Bu parçacıklar takım üzerinde abraziv olarak aşındırıcı bir etkide bulunur.

İşleme esnasında kesici kenar üzerine etkiyen çeşitli yük faktörlerinin nedeni olarak 5 temel aşınma mekanizması talaş kaldırma işlemine etki eder. Bunlar :

1. Abraziv aşınma
2. Difüzyon aşınması
3. Oksidasyon aşınması
4. Yorulma aşınması
5. Adheziv aşınmadır (Çakır, 2006).



Şekil 2.12. Temel aşınma tipleri (Çakır, 2006)

2.4.1.1 Abraziv aşınma

Abraziv aşınma, sert bir yüzeyin pürüzleri veya sert parçacıkları ile daha az sert veya yumuşak bir yüzeyin pürüzlerinin teması ile oluşur. Bu temas sırasında sert olan yüzey daha yumuşak olan yüzeyde plastik deformasyona neden olur. Abraziv aşınma

için iki durum söz konusudur. Birinci durum, sürtünen yüzeylerden bir daha serttir. Buna iki cisimli abrazyon denir. İki cisimli abrazyona talaşlı imalat işlemleri örnek verilebilir. İkinci durumda, sert yüzey üçüncü bir cisimdir ve bunlar genellikle küçük abraziv partiküllerdir. Sert cisimler iki yüzey arasında bulunur, yüzeylerden birini veya her ikisini de aşındırabilir. Buna üç cisimli abrazyon denir ve örnek olarak parlatma işlemi verilebilir.

Abraziv aşınma talaşlı imalatta en yaygın görülen aşınma tiplerinden biridir. (Şekil 2.12-1) Genellikle iş parçasına ait sert parçacıklar nedeniyle ortaya çıkar. Bu aşınma tipi kesici ucun serbest yüzey aşınmasına yol açar. Kesici kenarın abraziv aşınmaya karşı direnç kabiliyeti önemli ölçüde sertliğine bağlıdır. Sert parçacıkların yoğun bir şekilde sıkıştırılması ile oluşan takım malzemesi abraziv aşınmaya dayanacaktır, ancak bu malzemenin diğer tip yüklere de dayanabilmesi için gereken önlem alınmalıdır (Çakır, 2006).

2.4.1.2. Difüzyon aşınması

Difüzyon aşınmasında talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kimyasal yükler daha etkilidir (Şekil 2.12-2). Takım malzemesinin kimyasal özellikleri ve takım malzemesinin iş parçası malzemesine olan afinitesi difüzyon aşınma mekanizmasının oluşumunu belirleyecektir. Takım malzemesinin sertliği süreçte çok fazla etkili değildir. Malzemeler arasındaki metalurjik ilişki aşınma miktarını belirler. Bazı takım malzemeleri, bazı iş parçası malzemelerine karşı yüksek afiniteye sahipken bazıları iş parçası malzemesiyle etkileşime girmez.

Tungsten karbür ve çelik birbirine karşı difüzyon aşınma mekanizmasının oluşmasına sebep olan birleşme eğilimine sahiptirler. Bunun sonucu olarak takımın talaş yüzeyi üzerinde bir çukur oluşması söz konusudur. Mekanizma daha çok sıcaklığa bağlıdır ve bu sebeple yüksek kesme hızlarında daha büyüktür (Çakır, 2006).

2.4.1.3. Oksidasyon aşınması

Yüksek sıcaklıkların ve havanın varlığı birçok metal için oksidasyon demektir. Oksitler birbirlerine göre farklılık gösterirler (Şekil 2.12-3). Tungsten ve kobalt gözenekli oksit film tabakaları oluştururlar, ancak bu tabakalar talaş ve yüzeyden uzaklaştırılabilirler. Alüminyum oksit filmi gibi bazı oksitler ise son derece dayanıklı ve serttir. Bu nedenle bazı takım malzemeleri için kesici kenarın aşınması söz konusudur. Özellikle kesici kenarın talaş ile temasta olan kısmında, talaş genişliğinin sona erdiği noktada (talaş derinliğinde) hava da kesme işlemine etkide bulunur ve oksidasyon nedeni ile kenarda çentikler oluşur. Oksidasyon aşınması bugün talaşlı imalat alanında pek yaygın olmayan bir aşınma tipidir (Çakır, 2006).

2.4.1.4. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, (Şekil 2.12-4) genellikle termo-mekanik bir kombinasyondur. Sıcaklık dalgalanmaları ve kesme kuvvetlerinin yüklenmesi ve kaldırılması kesici kenarda çatlaklara ve kırılmalara sebep olur. Kesintili kesme etkisi sürekli ısı oluşumundan sonra soğumaya ve aynı zamanda kesici kenara çarpmalarla darbelere sebep olur. Bazı takım malzemeleri yorulma mekanizmasına diğerlerinden daha duyarlıdır. Aynı zamanda, kesme kuvvetlerinin etkisiyle, kesici kenarın mekanik dayanımı çok yüksek olduğunda sırf mekanik yorulma da ortaya çıkabilir. Bu durum sert ve işlenmesi zor (dayanım sınırı yüksek) malzemelerin oldukça yüksek ilerleme değerleriyle işlenmesinden veya takım malzemesinin yeterince sert olmamasından kaynaklanabilir. Bu gibi durumlarda plastik deformasyon oluşur (Çakır, 2006).

2.4.1.5. Adheziv aşınma

Birbiri ile temas halinde çalışan iki metal parçanın birbirlerine bastırılması halinde yüzeyler yüksek noktalarda temas ederler. Bu durumda temas noktalarında çok yüksek basınçlar meydana gelir. Bu yüksek basınç nedeniyle metaller akma sınırına ulaşırlar ve temas bölgelerinde mikro-kaynaklar oluşur. Temas yüzeyleri birbirine göre

relatif olarak hareket ederlerse mikro-kaynaklar kırılır. Birbirlerinin yüzeylerinden çok ufak talaş zerrelere özellikle yumuşak malzemeden koparılır. Bu şekilde ortaya çıkan aşınma adheziv aşınma olarak isimlendirilir.

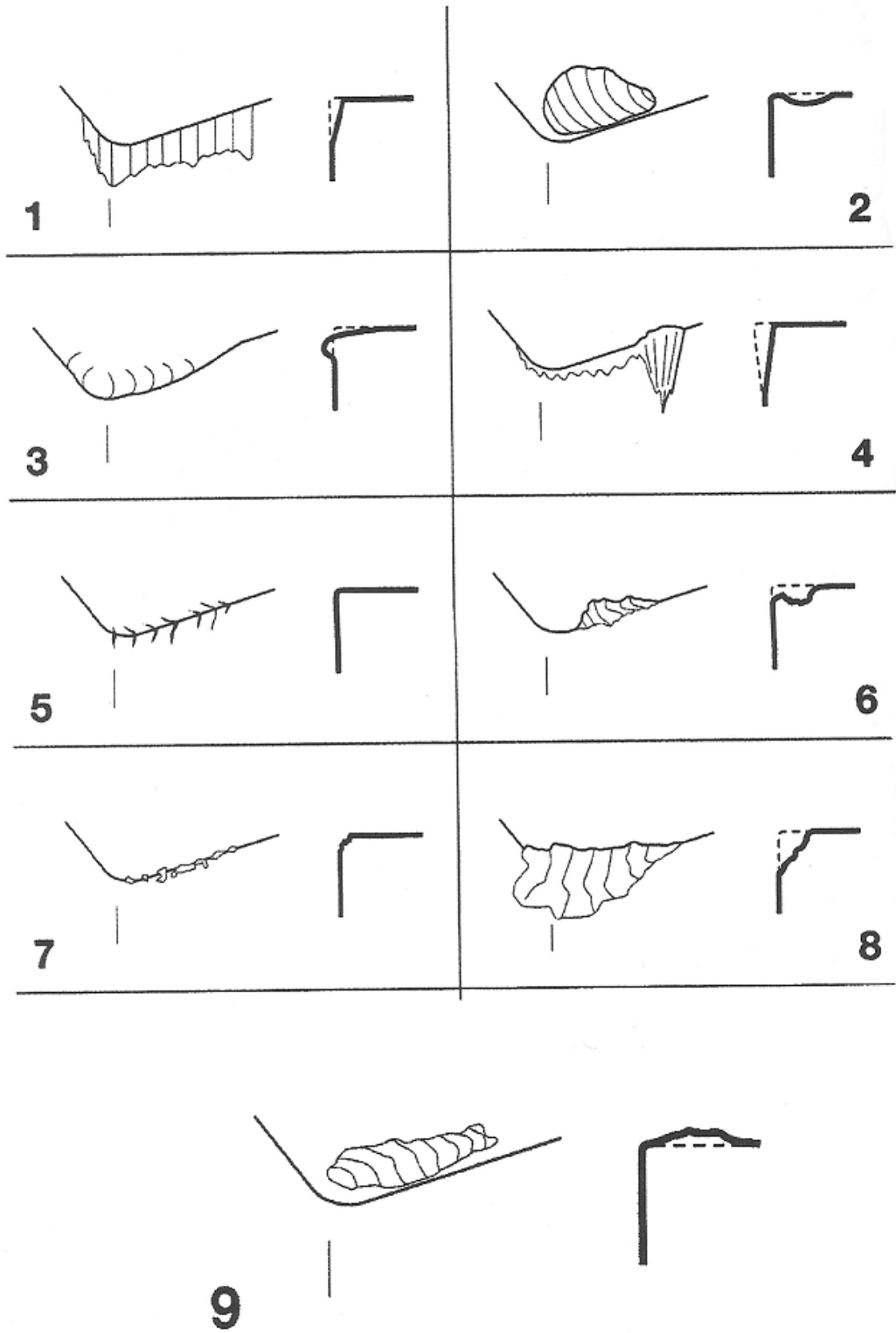
Bu tip aşınmaya en fazla tesir eden faktörler temas eden yüzeylerin sertliği, yüzey kaliteleri ve yüzeyler arasındaki basınçtır. Sıcaklıkta malzemenin sertliğine tesir ettiğinden aşınmaya neden olur. Talaş kaldırmada bu tür aşınma, takım, iş parçası ile temas halinde iken çıkan talaşın takım yüzeyine sürtünmesi durumunda gözlemlenebilmektedir (Şahin , 2001).

2.4.2. Kesici takımlarda aşınma tipleri

Talaş kaldırma işlemi sırasında, kesici takımın uç yüzeyi, yan kenarlar ve talaş hareket eden iş parçası ile temas halindedir. Bu yüzeylerdeki temastan dolayı aşınma bölgeleri oluşur ve zamanla bu aşınma bölgeleri büyür. Bu nedenle takım orijinal şeklini kaybeder. İş parçası işlenirken düzgün bir kesme işlemi yapılmak istendiğinde, kesici takım hassas şeklini korumalıdır. Kesici takım üzerinde belirli miktarda bir aşınma olduğunda değiştirilmesi gerekir. Aksi takdirde hassas işleme yapılması imkansızlaşır.

Kesici takımlarda görülen belli başlı aşınma tipleri Şekil 2.13' de verilmiştir. Bunlar :

1. Serbest yüzey aşınması
2. Krater aşınması
3. Plastik deformasyon
4. Çentik aşınması
5. Isıl (termal) çatlaklar
6. Mekanik yorulma çatlakları
7. Kesici kenardan parça kopması
8. Kırılma
9. Yığılma kenardır.



Şekil 2.13. Kesici takımlarda oluşan aşınma tipleri (Çakır, 2006)

2.4.2.1. Serbest yüzey aşınması

Kesici kenarın serbest yüzeyinde meydana gelir (Şekil 2.13-1). Abraziv tip aşınma mekanizmasından kaynaklanır. Talaşın oluşumu sırasında ve sonrasında ana kesici kenar, yardımcı kesici kenar ve köse radyüsü iş parçası ile temastadır. En yaygın aşınma tiplerinden biridir. Serbest yüzey aşınmasında belirli bir değerin üzerine çıkmasıyla yüzey kalitesi kötüleşir, hassasiyet azalır, sürtünme artar (Çakır, 2006).

2.4.2.2. Krater aşınması

Talaş yüzeyinde abraziv ve difüzyon aşınma mekanizmaları nedeniyle oluşur. Krater, talaş kaldırma esnasında sert parçacıkların takımın talaş yüzeyinde taşlama işlemine benzer bir işlem gerçekleştirmeleri sonucunda veya takım ile talaş malzemesi arasında, talaş yüzeyinin en sıcak kısmında oluşan difüzyon nedeniyle ortaya çıkar (Şekil 2.13-2). Krater aşınmasının belli bir değerin üzerine çıkması halinde kesici kenarın geometrisi değişir ve uç zayıflar (Çakır, 2006).

2.4.2.3. Plastik deformasyon

Plastik deformasyon (Şekil 2.13-3) kesici kenar üzerinde yüksek sıcaklıklar ve yüksek basıncın bir birleşimi sonucunda oluşur. Yüksek kesme hızı, yüksek ilerleme ve sert iş parçası malzemesi ısı ve basınç demektir. Takımın bu etkilere dayanabilmesi için yüksek kızıl sertliğe sahip olması gerekir. Kesici kenarın bu şekilde deformasyona uğraması daha yüksek sıcaklıkların oluşumuna, geometri deformasyonuna ve talaş akısının değişimine neden olacaktır. Kenarın yuvarlatılması ve uygun kesici geometrisi bu tip aşınmanın önlenmesinde önemli rol oynar (Çakır, 2006).

2.4.2.4. Çentik aşınması

Bu aşınma tipik bir adheziv aşınmasıdır. Çentik, kesici kenar ile malzemenin ayrıldığı noktada oluşur. Aşınma kesmenin sonunda, havanın kesme bölgesiyle temas ettiği bölgede oluşması nedeniyle bölgeseldir. Çentik aşınmasının (Şekil 2.13-4) belli bir değerin üzerine çıkması ince işlemlerde yüzey kalitesini etkiler, kesici kenar zayıflar (Çakır, 2006).

2.4.2.5. Isıl (termal) çatlaklar

Bu aşınma tipi genellikle ısı dağılımı nedeniyle ortaya çıkan yorulma aşınmasıdır. Özellikle frezelemede söz konusu olan sıcaklık değişimleri bu tip aşınmaya neden olur. Bu aşınma sonucunda kesici kenara dik çatlaklar meydana gelir (Şekil 2.13-5) ve takım malzemesi kenardan dışa doğru zorlanır. Bu zorlanma sonucunda takım malzemesinde ani kırılma ve ucun kullanılmaz hale gelmesi söz konusudur. Kesme esnasında değişen talaş kalınlıkları da sıcaklık oluşumuna etkide bulunur (Çakır, 2006).

2.4.2.6. Mekanik yorulma çatlakları

Kesme kuvvetlerindeki ani değişimler sonucunda ortaya çıkarlar. Mekanik yükün kendi basına çatlak oluşturacak büyüklükte olmamasına rağmen mekanik yükteki sürekli değişim çatlığa neden olur. Kesmenin başlangıcında ve kesme kuvvetinin büyüklüğü ve yönündeki değişimler kesici ucun mukavemetinden ve tokluğundan fazla olduğunda bu tip aşınma gözlenir (Şekil 2.13-6). Çatlaklar kesici kenara paraleldir (Çakır, 2006).

2.4.2.7. Kesici kenardan parça kopması

Kesici kenarın aşınmasından çok kırılması nedeniyle oluşur. Bu aşınma tipinde genellikle takıma etkiyen yükün sürekli olarak üst ve alt değerler arasında değişmesi nedeniyle bir yorulma oluşur ve bunun sonucunda takım malzemesi takım yüzeyinden kopar (Şekil 2.13-7). Darbeli kesme işlemi bu tip aşınmanın en sık görülen nedenlerinden biridir. Kenar üzerindeki dikkatli bir inceleme aşınmanın serbest yüzey aşınması mı yoksa kenardan parçacık kopması mı olduğunu belirleyecektir (Çakır, 2006).

2.4.2.8. Kırılma

Kesici kenarın ömrünü tamamlamasına neden olan bir aşınma tipidir (Şekil 2.13-8). Kenardaki büyük miktarlardaki kırılma mümkün olduğunca kaçınılması gereken en tehlikeli aşınma türüdür. Kenarın kırılması birçok diğer aşınma tipi içinde yolun sonu demektir. Geometrinin değişimi, kenarın zayıflaması, sıcaklıktaki ve kuvvetlerdeki artışlar kesici kenarın bu tip bir aşınmaya maruz kalmasına neden olur. Yüksek kesme hızlarında ve diğer talaş kaldırma koşullarında kesici kenar üzerinde oluşan çeşitli gerilmeler kesici ucun mukavemet sınırını aştığı anda kırılmanın oluşumu kaçınılmazdır (Çakır, 2006).

2.4.2.9. Yığma kenar

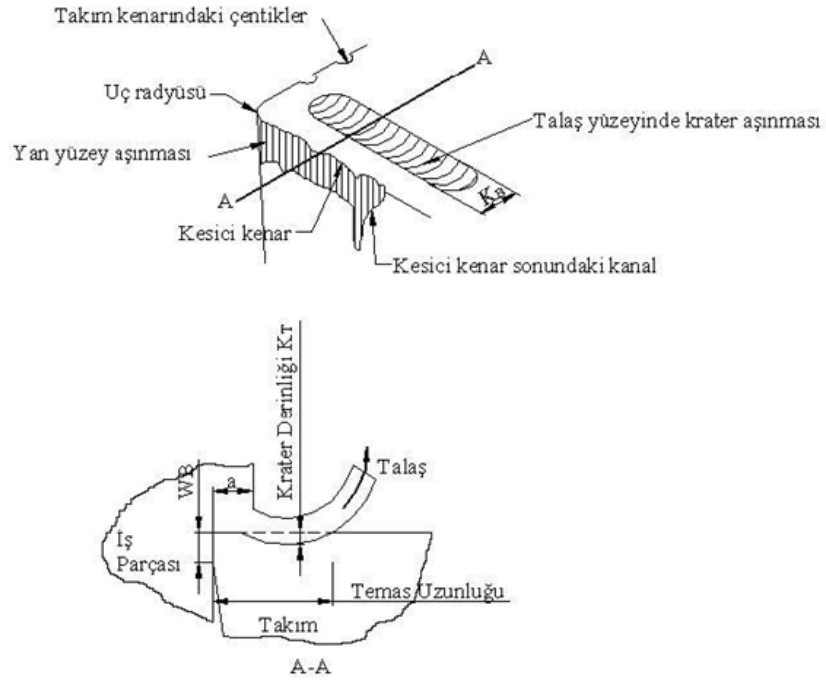
Önemli ölçüde sıcaklığa dolayısıyla kesme hızına bağlı bir aşınma türüdür. Takım yüzeyine kaynak olan malzemedan dolayı ortaya çıkan, takım yüzeyinden parçacık kopmasına neden olan yığma kenar istenmeyen durumdur (Şekil 2.13-9). Yığma kenar oluşumuna iş parçası ve takım arasındaki afinite de etkide bulunur. Düşük sıcaklıklar ve yüksek basınçlar iş parçası malzemesinin takım yüzeyine kaynak olmasına neden olur. Yığma kenar oluşumuna sebebiyet veren sıcaklık ve kesme hızları bilindiğinden bu tip aşınmanın kolaylıkla önüne geçilebilir. Birçok modern talaş kaldırma işleminde kesme hızları yığma kenar oluşum alanının çok üzerindedir ve

birçok kalite yığılma kenar oluşumuna engel olacak şekilde seçilir. Yığılma kenar oluşumuna izin verildiği takdirde yüzey kalitesi bozulur ve bu oluşum devam etmesi halinde kenarın kırılması ve hatta ömrünü tamamlaması söz konusu olabilir.

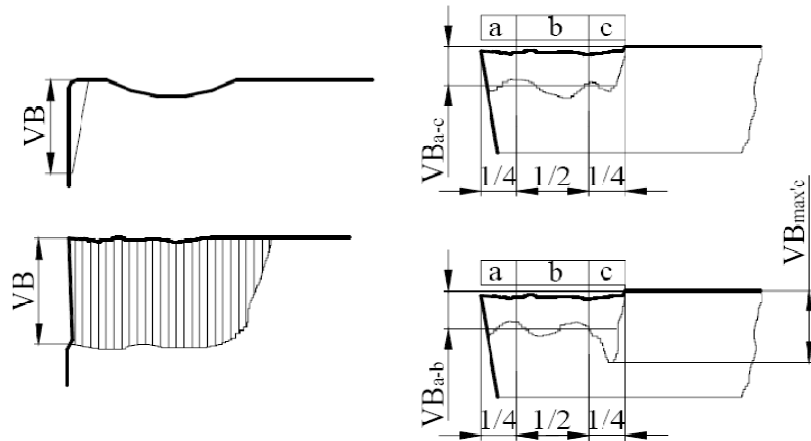
Yukarıda ana aşınma tiplerinden bahsedilmiştir. Bu aşınma tiplerinden bazıları aşınma olmayıp kesici ucun aniden kırıldığı durumlardır ve bu durumların önüne geçilmesi şarttır. Daha çok serbest yüzeyde görülen kontrollü bir aşınma, kesici kenarın ne zaman değiştirileceğini belirleyeceği için optimum takım ömrü sağlayacaktır (Çakır, 2006).

2.4.3. Kesici takımlarda aşınmanın belirlenmesi

Takım aşınması, belli bir seviyeye ulaşmadan önce geçen işleme zamanına bağlı olarak geliştiğinde, muayene ve kontrol yöntemleriyle belirlenir. Uygun bir mikroskop veya büyüteç en yaygın kullanılan kontrol aletleridir. Şekil 2.14’ te çeşitli aşınma tiplerinin analizi için esas boyutlar görülmektedir. Yan yüzey aşınması asıl kesme kenarından ölçülür. Ölçüm yapmak için aşınan kısım üç bölgeye ayrılarak incelenir. Toplam uzunluk dört eşit parçaya bölünür ve 1/4’lük kısımlar iki başta ve 1/2’lik kısım ortada kalacak şekilde üçe ayrılarak analiz yapılır. Şekil 2.15’ te a,b,c olarak ayrılan bu bölgelerin üçünde aşınma değeri benzer bir dağılım gösteriyorsa yan yüzey aşınması bu üç bölgenin ortalaması olarak “ VB_{a-c} ” şeklinde alınır. Eğer bu üç bölgenin birinde aşırı bir serbest (yan) yüzey aşınması söz konusu ise, ortalama değerin alınması için bu bölgenin göz ardı edilmesi tavsiye edilir ve ortalama değer iki bölgeye göre alınır (VB_{a-b}). Ayrıca, maksimum aşınmanın olduğu bölge ayrı olarak ele alınarak maksimum serbest yüzey aşınması da kaydedilir (Taylan, 2009).



Şekil 2.14. Çeşitli aşınma tipleri için analiz boyutları (Şeker 1997 : Taylan, 2009)



Şekil 2.15. Serbest yüzey aşınması için analiz boyutları (Şeker 1997 : Taylan, 2009)

2.5. Kesme Sıvıları ve Yağlayıcılar

Takım talaş ara yüzeyinde oluşan ısı; iş parçası, takım veya talaşla olmak üzere üç yolla ortamdan uzaklaşır. İş parçası fazla ısı alırsa, bu parçanın boyutunu değiştirerek şeklini bozabilir. Bu fazla ısı iş parçası yüzeyine ısıl olarak zarar da verebilir. Kesici takım fazla ısı alırsa aniden bozulabilir veya takım ömrü azalabilir. İdeal olan yöntem oluşan ısının talaş ile atılmasıdır. Kesme sıvısı kullanıldığı zaman takım talaş ara yüzeyinde oluşan ısının taşınması veya tahliye edilmesi kolaylaşır. Belirli şartlar altında talaş kaldırma işleminde kesme sıvısının kullanılması takım yüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak güç sarfiyatını düşürmekte ve işlenen yüzeyde talaş yapışmasını azaltarak yüzey kalitesini artırmaktadır. Yapılan çalışmalarda kesme sıvısının kesici takım ömrüne olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir. Kesme sıvısının yağlama ve soğutma etkisiyle sağladığı faydaları:

- Kesme sıcaklığını azaltarak takım ömrünü artırması,
- Kesici takıma iş parçasının yapışması dolayısıyla daha kötü yüzey kalitesi ve daha kısa takım ömrünün engellenmesi,
- Tezgah veya iş parçasını korozyon, pas, lekelenmeye ve oksitlenmeye karşı koruması,
- Kesme işlemi esnasında iş parçasının operatör tarafından daha iyi görülebilmesinin sağlanması,
- Talaş ve parçacıkların daha kolay akışının sağlanmasıdır (Şahin, 2000).

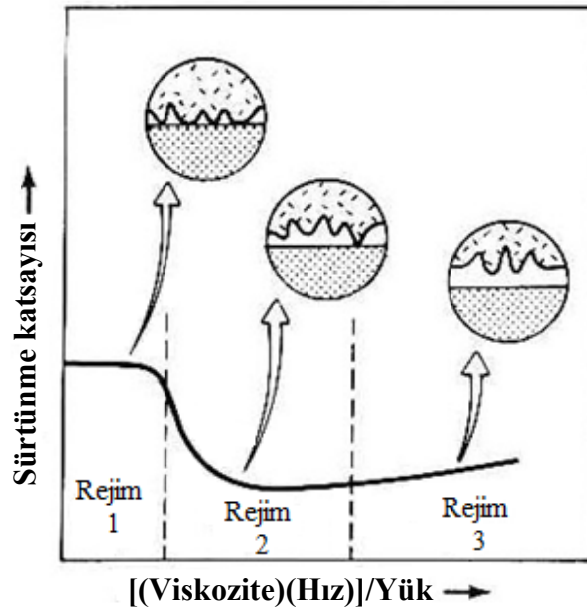
Yağlayıcı maddelerden beklenen özellikler kuru ve sıvı sürtünme hallerinde farklıdır. Sıvı sürtünme halinde yağlayıcıların viskozitesi önem kazanırken, yarı sıvı sürtünme halinde yağlayıcıların ıslatma kabiliyeti ön plana çıkar. Bu sebeple sıvı sürtünme halinde sıvı ve nadiren gaz yağlayıcılar kullanılırken, yarı sıvı sürtünme halinde katı ve katkılı sıvı yağlayıcılar kullanılmaktadır.

2.5.1. Sıvı yağlayıcılar

Sıvı yağlayıcılar sürtünmeyi azaltmak ve yüzey hasarlarını önlemek için kullanılırlar. Önemli sıvı yağlayıcılar; mineral yağı, olefin polimerler, alkali aromatik, bazik asit esterler, fosfat esterleri, silikon, silikat ester, florokarbonlardır. Sıvı yağlayıcılar iki yüzey arasında ince veya kalın koruyucu film oluştururlar. Özellikle kaymalı yataklar gibi sıcaklık yükselmesinin mahsurlu olduğu ve sürtünme dolayısıyla oluşan ısının çabucak uzaklaştırılmasının gerektiği yerlerde yağlayıcı olarak sıvı yağlayıcılar kullanılır.

Sıvı yağlayıcılar 3 grupta toplanır. Bunlar,

1. Organik Yağlayıcılar : Gıda olarak tüketilen yağlardır. Kısa ömürlü oldukları için çok kullanılmazlar.
2. Madensel Yağlar : Yüzeyler arasına kolayca girip çıkmaları, ısıyı dışarı atabilmeleri ve kolayca depo edildikleri için daha çok kullanılırlar.
3. Sentetik Yağlar : İyi yağlama özelliği göstermelerine rağmen pahalı oldukları için çok tercih edilmezler.



Şekil 2.16. Stribeck diyagramı (Mang and Dresel, 2007)

Stribeck diyagramı, (Şekil 2.16) sıvı veya sınır sürtünmesi durumunda sürtünme veya yağlamanın arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak gösterir. Başlangıçta düz bir mil yatağında bulunan mil ve yatak malzemesi sadece moleküler yağ tabakasıyla ayrılmıştır. Tüm yük, tepcikler ve ince yağ tabakasıyla taşınır. Bu sınır sürtünme durumu olup grafikte birinci rejim bölgesidir. Milin dönüş hızı artığında ince bir hidrodinamik yağ filmi oluşur ve bu oluşan karışık veya ince yağlama sayesinde sürtünme katsayısı önemli derecede azalır. Milin dönüş hızı artmaya devam ettiğinde tüm sürtünen yüzeyler arasında sürekli yağ filmi oluşur ve sürtünme katsayısı keskin bir şekilde azalır. Bu karışık sürünme durumudur ve grafikteki ikinci rejim bölgesini oluşturur. En düşük sürtünme bu durumda karşımıza çıkar. Hız artmaya devam ettiğinde sürtünmeye dış sürtünmeler eklenir. Minimum sürtünme katsayısından sonra eğri, bu dış sürtünmelerden dolayı artış gösterir. Bunlar viskozitenin neden olduğu sürtünmelerdir. Grafikte üçüncü rejim bölgesidir ve hidrodinamik sürtünme olarak karşımıza çıkar (Mang and Dresel, 2007).

2.5.2. Katı yağlayıcılar

Yağlar, birbirlerine göre hareketli iki yüzeyin tribolojik temasında sürtünme katsayısını ve/veya aşınma miktarını azaltır. Katı yağlayıcılar ile yağlama, yatak yüzeylerinde ki tribolojik temas gibi zor koşullar altında bile yüzeyleri etkin bir şekilde birbirinden ayırabilir. Makine parçalarının yağlama ömrü, fonksiyonel ve tribolojik dizayn ve yağlayıcıların optimizasyonun hesabına bağlı olarak değişir. Gerekli yağlayıcının seçiminde temas halindeki yüzeylerin arasındaki sürtünme, aşınma, ara yüzeyde oluşan yağlamanın tribolojik sistemini ve her bir parçanın spesifik özelliklerinin bilinmesi kesinlikle gereklidir. Katı yağlayıcılar genellikle sınır sürtünme ve karışık sürtünme durumlarındaki kesme yüzeyine uygulanan yüksek spesifik yükler ile örneğin havacılık ve roket teknolojisi gibi yağlamanın geniş bir sıcaklık aralığında yapılması gerektiğinde veya çok yüksek sıcaklıklardaki kritik uygulamalarda ki problemleri çözmek için kullanılırlar. Katı yağlayıcılar aynı zamanda nükleer reaktörlerde, yüksek vakum ortamlarında, zor çevre şartlarında ve gres veya sıvı ile yağlamanın neden olduğu kirlenmenin kabul edilemeyeceği durumlarda da kullanılırlar.

Katı yağlayıcılar genellikle sürtünmeyi ve/veya aşınmayı azaltan katı malzemeler olarak tanımlanırlar. Katı yağlayıcılarda ana amaç sürtünen yüzeyler arasında sürekli yumuşak veya sert film tabakası oluşturmaktır. Bu film tabakaları mekanik, kimyasal, elektrokimyasal ve fiziksel proseslerde kullanılırlar (Mang and Dresel, 2007).

Tribolojik uygulamalarda genellikle sıvı veya gres ile yağlama, sürtünme ve aşınmayı azaltmak için kullanılmasına rağmen çeşitli kullanım şartlarında (yüksek veya düşük sıcaklık, vakum, radyasyon, aşırı temas basıncı, vb.) katı yağlayıcılar sürtünme ve aşınmanın kontrolünde tek alternatif olmaktadır. Katı yağlayıcıların, sıvı veya gres ile yağlamaya göre önemli avantajları Çizelge 2.2' de özetlenmiştir. Katı ve sıvı yağlayıcıların karışımı temas bölgesindeki sürtünme ve aşınma performansını iyi yönde etkiler. Su, sıvı yağlar ve gresin içinde dağılabilen katı yağlayıcılar yüksek sıcaklık ve/veya basınç altında sürtünme ve aşınma özelliklerini başarılı bir şekilde geliştirirler (Bhushan, 2001; Erdemir, 1995; Martin and Ohmae, 2008; Kimura, et al., 1999; Krishna, et al., 2010; Krishna and Rao, 2008; Lovell, et al., 2010).

Kayma ara yüzeylerinde katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcılar ile benzer özellik gösterirler. Kayma yüzeyleri arasını kolaylıkla ayırıp düşük sürtünme sağlar ve aşınmayı önlerler. Birçok inorganik malzeme (örneğin; Molibden disülfid, grafit, hegzagonal bor nitrür ve borik asit) çok iyi yağlama sağlayabilir (Bhushan, 2001; Martin and Ohmae, 2008; Reddy and Rao, 2005; Mukhopadhyay, et al., 2007; Rao and Krishna, 2007; Rao and Dilbag, 2007). Birçok katı yağlayıcı yağlama özelliğini lamelli veya katmanlı yapısına borçludur. Çok az bir kısım ise (örneğin; polytetrafluoroethlene (PTFE), yumuşak metaller, elmaslar) katmanlı kristal yapısına sahip olmamalarına rağmen yağlayıcı özellik gösterirler (Bhushan, 2001). Katmanlı tabakaya sahip katı yağlayıcılar grafit, hegzagonal bor nitrür (hBN), borik asit (H_3BO_3) ve geçiş-metalik dikalkogenit MX_2 ' dir. Geçiş-metalik dikalkogenit katı yağlayıcılarda M simgesi molibden, tungsten veya niobyum; X simgesi ise sülfür, selenyum veya tellür elementlerinden birisidir.

Çizelge 2.2. Katı yağlayıcıların sıvı yağlar ve gres ile karşılaştırılması (Bhushan, 2001).

Çevre şartları ve/veya durum	Katı yağlayıcılar	Sıvı yağlayıcılar ve Gresler
Vakum	Bazı katılar (geçiş-metalli dikalkogenitler) yüksek vakumda çok iyi yağlayıcıdır ve düşük buhar basıncına sahiptir.	Birçok sıvı yağlayıcı buharlaşır.
Basınç	Yüksek basınçlara dayanabilirler.	İlave madde olmadan yüksek basınca dayanamazlar.
Sıcaklık	Düşük ve yüksek sıcaklıktan nispeten etkilenmez; kaymadan dolayı düşük ısı üretir.	Düşük sıcaklıklarda katılaşma ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal ayrışma veya oksitlenme oluşabilir; ısı üretimi viskoziteyle değişir.
Elektriksel iletkenlik	Bazıları mükemmel elektriksel iletkenidir.	Genellikle yalıtkandır.
Radyasyon	Genellikle nükleer radyasyondan etkilenmez.	Birçok zaman kimyasal olarak ayrışabilir.
Aşınma	Düşük hızlarda ve aşınma durumlarında mükemmel aşınma performansı veya devamlılık sağlar; kullanım süresini yağ filmi kalınlığı ve aşınma oranı belirler.	Düşük hızlarda ve aşınma durumlarında marjinal performansı ve devamlılığı sağlar; sınır yağlama durumu için katkı maddeleri gerekir.
Sürtünme	Çok düşük sürtünme katsayıları mümkündür.	Sürtünme katsayısı, viskozite, sınır sürtünme filmi ve sıcaklıkla değişir.
Termal iletkenlik ve ısı yayma kapasitesi	Metalik yağlayıcılarda mükemmel, inorganik ve tabakalı katı yağlayıcılarda genellikle düşüktür.	Genellikle iyidir.

Çizelge 2.2. Katı yağlayıcıların sıvı yağlar ve gres ile karşılaştırılması (devamı)
(Bhushan, 2001)

Çevre şartları ve/veya durumu	Katı yağlayıcılar	Sıvı yağlayıcılar ve Gresler
Depolama	Çok uzun süre depolanabilir. (geçiş metali dikalkogenitler nem ve oksijene karşı hassastır.)	Depolama sırasında sızıntı, kaçak veya buharlaşma oluşabilir.
Hijyen	Çok az veya sıfır tehlikeli emisyonlardan dolayı iyi endüstriyel hijyen; katı olduklarından çevre kirletici etki göstermezler.	Tehlikeli emisyonlar oluştururlar; sıvı yağlar sızıntı veya kaçakla çevreyi kirletebilir; yağ ve greslerde yangın tehlikesi vardır.
Tribolojik yüzeylere uygunluk	Zor yağlanan yüzeyler için uygundur. (Örneğin; Alüminyum, titanyum, paslanmaz çelikler ve seramikler)	Demir dışı ve seramik yüzeyler için kullanımı uygun değildir.
Suya karşı dayanımı ve çevreyle kimyasal etkileşimi	Suya, kimyasal solventlere, yakıtlara, asit ve bazlara karşı nispeten hassas değildir.	Asidik ve sulu ortamlardan etkilenebilir ve değişebilirler.

Katı yağlayıcıların temel eksiklikleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Birçok katı yağlayıcının termal iletkenliği zayıftır. Bu nedenle kaymanın olduğu ara bölgesinden ısıyı uzaklaştıramazlar.
2. Deney ve temas durumlarındaki sürtünme katsayısı yüksek olabilir veya önemli derecede değişkenlik gösterebilir.
3. Sınırlı aşınma ömürleri vardır ve sıvı yağlayıcılara göre tekrar kesme bölgelerine uygulanmaları daha zordur.
4. Zaman içinde oksidasyon ve eskimeyle ilişkili olarak azalma meydana gelebilir ve bu problem genellikle geçiş-metali dikalkogenitlerde görülür.

5. Yüksek ısı ya da oksidasyon ortamında katı yağlayıcıların yapısal-kimyasal değişiklikleri yağlama özelliklerini kaybetmesine ve yağlayıcı özelliği olmayan abraziv ürünlerin oluşmasına neden olur (Bhushan, 2001).

Katı yağlayıcıların yağlama özellikleri kullanım sıcaklıklarına göre değişiklik gösterir. Yağlayıcı özelliklerini grafit 400°C' ye, kübik bor nitrür 1000°C' ye ve molibden disülfid 500°C' ye kadar koruyabilir (Bhushan, 2001 : Sliney, 1982). Katı yağlayıcıların sürtünme katsayıları test şartları, çevre şartları ve sıcaklığa göre değişmektedir. Bu değişim Çizelge 2.3' te verilen bazı katı yağlayıcıların sürtünme değerlerinden gözlemlenebilir. Çizelge 2.3' teki değerler çeşitli test şartlarında elde edilmiş sonuçları içermektedir. Örneğin geçiş-metali dikalkogenitlerin (MX_2) sürtünme katsayısı nötr atmosferde, vakum veya kuru ortamda 0,002-0,05 arasında iken nemli havada artarak 0,2 değerine kadar çıkabilir (Bhushan, 2001).

Katı yağlayıcılar tribolojik yüzeylere çok değişik şekillerde uygulanabilirler. En eski ve en basit yöntem katı yağlayıcının tribolojik yüzeylere doğrudan serpererek veya sürerek uygulanmasıdır. Bu basit yöntemin yanı sıra katı yağlayıcıların ilave edildiği sıvılar yüzeylere püskürtme yöntemleriyle de ulaştırılabilir. Son dönemlerde katı yağlayıcılar üzerine yapılan çalışmalarda artışlar gözlemlenmiştir. Katı yağlayıcılar bazı çalışmalarda kanola yağı (Lovell, et al., 2010), hindistan cevizi yağı (Krishna, et al., 2010) gibi sıvılarla karıştırılarak, bazı çalışmalarda ise direk yüzeye uygulanarak (Reddy and Rao, 2005; Mukhopadhyay, et al., 2007; Rao and Krishna, 2007; Rao and Dilbag, 2007) kullanılmıştır. Genellikle katı yağlayıcı olarak molibden disülfid ve grafit kullanılmasına rağmen bor içerikli katı yağlayıcı kullanımı düşük sürtünme katsayısı sağlaması (Bhushan, 2001) nedeniyle son dönemlerde ciddi bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bilimsel çalışmalarda bor esaslı katı yağlayıcı olarak genellikle borik asit kullanılmaktadır. Borik asit farklı tane boyutlarında ve sıvıların içerisinde farklı oranda karıştırılarak hazırlanan karışımlarla yağlayıcı kullanılmıştır (Krishna, et al., 2010; Krishna and Rao, 2008; Lovell, et al., 2010; Rao and Krishna, 2007; Rao and Dilbag, 2007). Bu çalışma kapsamında kullanılan bor esaslı etidot-67, bor pentahidrat ve bor oksit tozlarının katı yağlayıcı olarak kullanımıyla ilgili bir literatüre ulaşılamamıştır.

Çizelge 2.3. Katı yağlayıcıların değişik şartlarda elde edilmiş sürtünme katsayıları
(Bhushan, 2001).

Sınıflandırma	Katı yağlayıcılar	Sürtünme Katsayıları
Tabakalı katılar	MoS ₂	0,002-0,25
	Tungsten disülfid	0,01-0,2
	hBN	0,15-0,7
	Grafit	0,07-0,5
	Grafit florür	0,05-0,15
	Borik asit	0,02-0,2
Yumuşak metaller	Gümüş	0,2-0,35
	Kurşun	0,15-0,2
	Altın	0,2-0,3
	Kalay	0,2
Oksitler	Bor oksit	0,15-0,6
	Renyum oksit	0,2
	Titanyum dioksit	0,1
	Çinko oksit	0,1-0,6
Oksit karışımları	Kurşun oksit-Bor oksit	0,2-0,1
	Bakır oksit-Renyum oksit	0,3-0,1
Polimerler	PTFE	0,04-0,15
Karbon esaslı katılar	Elmas	0,02-0,1
	Elmasımsı karbon	0,003-0,5
	Fulleren ve Camsı karbon	0,15

Türkiye' nin zengin bor madenlerine sahip olması bu konu hakkında çalışma yapma olanağını kolaylaştırmakta ve ülke ekonomisi açısından borun yeni kullanım alanlarını belirlenmesini gerektirmektedir. Bor ürünleri uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalurji ve inşaat gibi 500'e yakın alanda kullanılmaktadır. Ancak tüketilen bor ürünlerinin %80'e yakını cam, seramik, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Borun yeni kullanım alanlarının tespiti için araştırmalar sürmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bor esaslı tozların hepsi Türkiye' de üretilmekte ve ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından tüm dünyaya satılmaktadır. Eti Maden İşletmelerinin 2010 yılı verilerine göre Türkiye dünya bor rezervlerinin %72.1' ine sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 2.4' te ülkelere göre dünya bor rezervleri miktarını göstermektedir.

Çizelge 2.4. Dünya bor rezervleri miktarları ve % oranları (Roskill, 2002 : Kılıç vd., 2009)

Ülke	Görünür Ekonomik Rezerv (bin ton)	Muhtemel Mümkün Rezerv (bin ton)	Toplam Rezerv (bin ton)	Toplam Rezervdeki Pay (%)
Türkiye	227.000	624.000	851.000	72.20
A.B.D.	40.000	40.000	80.000	6.80
Rusya	40.000	60.000	100.000	8.50
Çin	27.000	9.000	36.000	3.10
Arjantin	2.000	7.000	9.000	0.80
Bolivya	4.000	15.000	19.000	1.60
Şili	8.000	33.000	41.000	3.50
Peru	4.000	18.000	22.000	1.90
Kazakistan	14.000	1.000	15.000	1.30
Sırbistan	3.000	0	3.000	0.30
TOPLAM (Bin Ton)	369.000	807.000	1.176.000	100.00

Katı yağlayıcılar çeşitli şekilde sınıflandırılırlar ancak kullanışlı ve yaygın yapılan sınıflandırmalara göre yapısal yağlar ve mekanik yağlar olarak ikiye ayrılırlar.

2.5.2.1. Yapısal yağlar

Yapısal yağlar yağlayıcı özelliklerini tabakalı kafes yapısına sahip olmalarına borçludurlar. Bu sınıftaki katı yağlayıcıların kristal yapıları, aynı tabakadaki yakın paketlenmiş kuvvetli kimyasal bağlar ile bağlanmış atomların oluşturduğu tabakalar ve bu tabakaların birbirine nispeten zayıf bağlarla (örneğin van der Waals) bağlanmasıyla oluşurlar. Kayma işlemi sırasında bu tabakalar hareket yönüne paralel olarak sıralanır ve kayma işlemini kolaylaştırırlar. Böylelikle yüzeyler arasında düşük sürtünme sağlarlar. Buna ek olarak her tabakadaki güçlü atomlar arası bağlar ve paketlerin aşınmayı azalttığı düşünülür (Bhushan, 2001). Yapısal yağlara örnek olarak grafit (C) ve molibden disülfidin (MoS_2) haricinde, tungsten disülfid (WS_2), niobyum disülfid (NbS_2), baryum hidroksit ($\text{Ba}(\text{OH})_2$), kadmiyum klorür (CdCl_2), kobalt klorür (CoCl_2), zirkonyum klorür (ZrCl_2), bor nitrür (BN), boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), vb. verilebilir. Grafit ve molibden disülfid hariç sektörde yaygın olarak kullanılan katı yağlayıcı yoktur. Katmanlı tabakaya sahip katı yağlayıcılardan grafit, hegzagonal bor nitrür, borik asit ve molibden disülfidin tabakalı kristal yapılarının şematik gösterimi Şekil 2.17’ de verilmiştir.

Grafit, sürtünme bölgesinde düşük sürtünme ve yüksek aşınma direnci sağlayan tabakalı yapıya sahip katı maddedir (Şekil 2.17-a). Grafitte aynı elmas gibi çok kristalli karbonlardan oluşur. Kimyasal olarak grafit ve elmas aynı olmasına rağmen kristal yapılarındaki farklılık özelliklerini değiştirir. Örneğin grafit en yumuşak malzemelerden biriyken, elmas en sert malzemelerden biridir. Elmasın ısı iletimi yüksek iken grafitin ısı iletimi oldukça düşüktür. Grafitin kristal kafes yapısında düzlemdeki her karbon atomu komşu karbon atomuyla 120° lik açı yapar ve aralarındaki mesafe 0.1415nm ’ dur. Oda sıcaklığında aralarında van der Waals kuvvetleri ile bağlı olan atomik tabakalar arası mesafe 0.335 nm ’ dur. Nemli havada grafitin sürtünme katsayısı 0.07 ile 0.15 arasındaki bir değerde olurken, sürtünme katsayısı test koşullarına, sürtünen temas bölgesinin durumuna ve grafitin kullanım

şekline (toz, ince film, dökme) göre değişir. Kuru havada, inert atmosferde ve vakum ortamında grafitin yağlayıcı özelliği azalır, sürtünme katsayısı 0.5 değerine kadar hızlıca yükselir. Grafit, su solvent, yağ ve greslerin içine başarılı bir şekilde karıştırılarak zor şartlar altında yağlama için kullanılabilir (Bhushan, 2001).

Grafitin düşük sürtünmesi yalnızca kristal yapısıyla ilgili değildir. Aynı zamanda absorp filmlerine ve özellikle yüzeyde düşük kohezyon sağlayan su buharıyla değişir. Böylece grafitin uygun yağlama özelliği nem varlığına göre değişir (Mang and Dresel, 2007). Grafit lamel yapısıyla düşük sürtünmesi sonucu esas yüzeyleri kolaylıkla ayırır. Birçok görüş grafitin düşük sürtünmesinin, grafitin temel yüzeylerinin düşük enerjili yüzeyler olmasına dayandırmaktadır. Hareket sırasındaki temel yüzeyler paralel yönelir ve yüzeyler arası adhezyon çok düşük olur. Temel yüzeyler zarar görürse, yüksek enerjili yüzeyler açığa çıkar ve eğer bu yüzeyler soğurulmuş buharla nötr hale getirilmemişse adhezyon ile sürtünme önemli derecede artar. Grafitin termal dengesi yüksektir (>2000 °C) fakat normal ortamda ortalama $500 - 600$ °C’ de oksidasyonun başlaması yağlamayı sınırlandırır. Düşük sürtünme sağlamak için gerekli soğurulmuş buhar grafitin daha düşük sıcaklıklarda kullanılmasını sınırlayabilir. Daha düşük sürtünme meydana gelmesi için, bazı inorganik bileşikler eklenerek sıcaklık aralığı genişletilebilir (Booser, 1983).

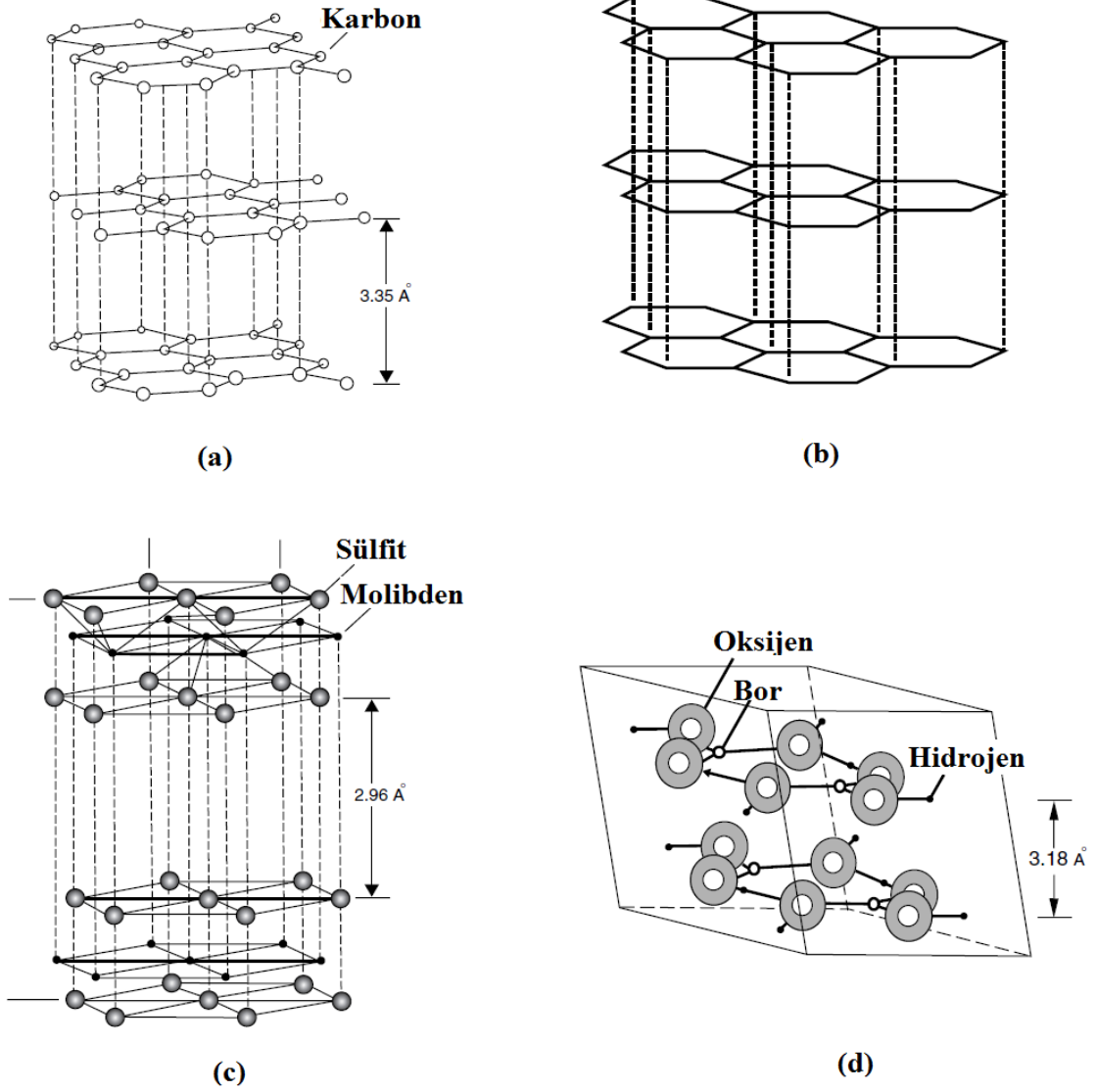
Molibden disülfütün (MoS_2) yapısı trigonal simetriye sahip hegzagonal yapıdadır (Şekil 2.17-c). Her molibden atomu sülfür atomlarının trigonal prizması ile çevrilidir. Molibden disülfüt kimyasal olarak çok kararlıdır. MoS_2 ’ ün yağlama etkisi kristal yapısıyla ilgilidir. Sülfür tabakaları arasındaki zayıf bağlar (wan der Waals) tabakaların kolay hareketini sağlar ve böylece kayan yüzeyler arasında düşük sürtünme oluşur. Diğer taraftan molibden ve sülfür arasındaki iyonik bağlar yüksek mukavemet sağlar (Mang and Dresel, 2007).

Molibden disülfit geçiş-metali dikalkogenit sınıfındadır. Bu sınıftaki katı yağlayıcılar (MX_2) kuru ve vakum ortamında çok düşük sürtünme gösterirler. Nemli ve oksidatif ortamlardan etkilenir, yağlayıcı özelliklerini kaybederler. Molibden disülfit ve tungsten disülfit en çok bilinen ve en yaygın kullanılan dikalkogenitlerdir. Molibden disülfit, molibdenit adıyla bilinen doğal mineraldir. Tungsten disülfitinde içinde

bulunduğu diğer dikalkogenitler doğada hazır halde bulunmazlar yapay olarak üretilirler. Bu nedenle bu dikalkogenitler pahalıdır (Bhushan, 2001). Molibden disülfidin oksidasyonu yaklaşık 375°C ' ye ulaşmadan başlamaz, sıcaklık yaklaşık 500°C ' ye ulaştığında hızlı bir oksidasyon başlar ve MoO_3 (molibden trioksit) ve SO_2 (sülfür dioksit) oksitleri oluşur. Tungsten disülfidin termal ve oksidasyon kararlılığı molibden disülfitten daha iyidir (Sloney, 1982; Bhushan,2001).

Metallerin işlenmesinde yağlayıcı olarak grafit büyük rol oynamasına rağmen üç nedenden dolayı MoS_2 , grafitin yerini alması giderek artmaktadır. Birincisi grafitin geniş çeşitliliği farklı kaynaklarda olurken, MoS_2 ' in kalitesi ayrıntılar tarafından ayrı ayrı belirlenebilir. İkincisi MoS_2 ' ün düşük sürtünmesi soğurulmuş buharla değişmez ve genellikle vakumda havadan daha düşük olur. Son olarak MoS_2 ' nin yük taşıma kabiliyeti genellikle daha çoktur (Booser, 1983).

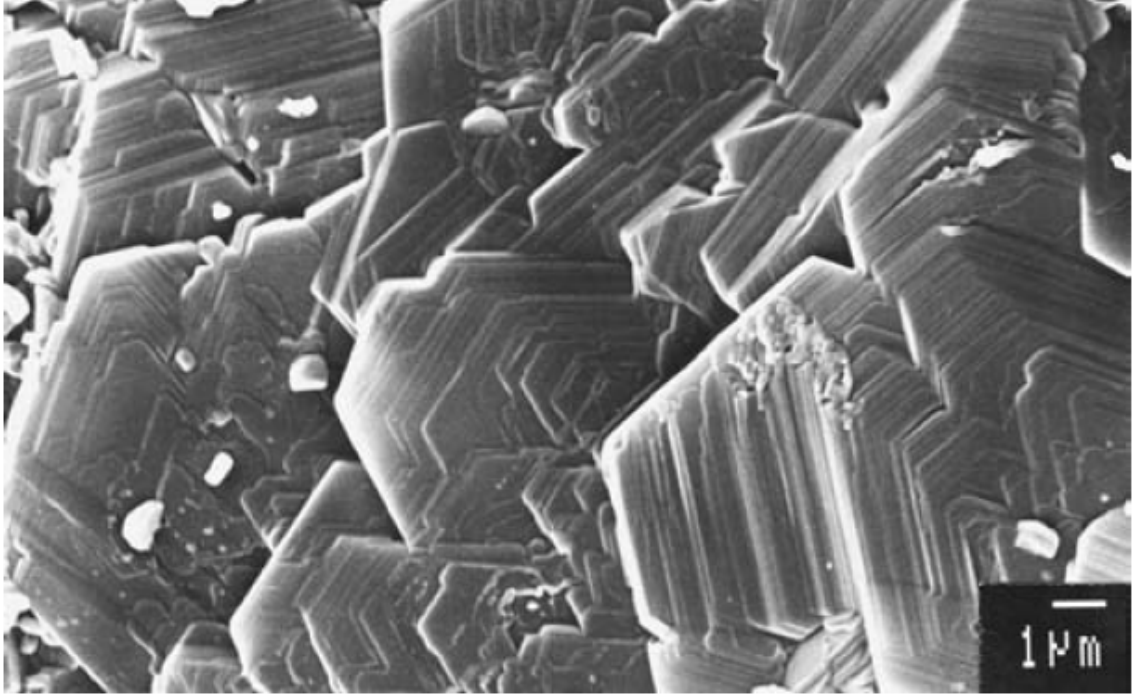
Hegzagonal bor nitrür (hBN), sentetik bir katı yağlayıcıdır. Yağlama kapasitesi, sıcaklık yükselmesinden etkilenmez. 1000°C ' e kadar oksidasyon çok az miktarda olduğu için önemsizdir. Kristal yapısı (Şekil 2.17-b) grafitte benzerdir. Atomik yapısı, iki-boyutlu sıralanmış bor ve nitrojen atomlarından oluşur. Grafitte olduğu gibi hegzaonal bor nitrürde de aynı tabakadaki atomlar birbirine kuvvetli bağ olan kovalent bağlarıyla, tabakalar ise zayıf van der Waals bağlarıyla bağlanmıştır. Hegzaonal bor nitrür, bor oksitin yüksek sıcaklıkta üre ve amonyak gazıyla reaksiyonundan oluşur. Grafitin aksine hBN beyaz renklidir. hBN, elmas gibi sert ve aşınmaya dayanıklıdır. Genellikle toz formunda üretilirler. hBN yağın ve gresin içine ilave edilerekte kullanılabilir. hBN üretim şartlarına göre (turbostatik, turbostatikimsi, grafitli, vb.) değişik şekillerde sınıflandırılır. En iyi yağlayıcı özellik gösteren grafitli tipidir. Saflık ve son ürünün toz boyutu da yağlama performansını etkiler. hBN' ün tipik sürtünme katsayısı 700°C ' ye kadar 0.2 ile 0.3 civarındadır. Vakum ortamında yağlayıcı özelliğini kaybeder (Bhushan, 2001; Martin and Ohmae, 2008)



Şekil 2.17. Grafit (a), hegzagonal bor nitür (b), molibden disülfid (c) ve borik asitin (d) tabakalı kristal yapılarının şematik gösterimi (Bhushan, 2001)

Borik asitte, hBN ve grafit gibi tabakalı kristal yapıya sahiptir (Şekil 2.17-d). Borik asit üç eksende sıralanmış bor, oksijen ve hidrojen atomları tabakalarının esas tabakalara paralel sıralanmasıyla oluşurlar. Tabakalarda sıralanmış atomlar, kovalent/iyonik ve hidrojen bağlarıyla, 0.318nm aralıklı tabakalar ise zayıf van der Waals bağlarıyla bağlanırlar. Bor ve oksijen atomları genellikle kovalent veya bazen

iyonik bağlarla bağlıdır. Kuvvetli hidrojen bağları bor/oksijen atomu gruplarını birlikte tutarlar (Bhushan, 2001).



Şekil 2.18. Borik asitin tabakalı yapısının SEM fotoğrafı (Bhushan, 2001)

Borik asit iki temel kristal yapıya sahiptir. Bunlar; metaborik asit ($H_2O \cdot B_2O_3$ veya HBO_2) ve ortoborik asittir ($3H_2O \cdot B_2O_3$ veya H_3BO_3). Ortoborik asit çeşitlerinden bazıları tabakalı yapıya sahiptir ve böylece yağlayıcı özelliğe sahip olmuş olurlar. Uygulama sırasında sıcaklık yükselmesi borik asidin kullanıldığı uygulamalarda birçok nedenden dolayı tavsiye edilmez. Birinci neden, yaklaşık $400^\circ C$ ' nin üzerindeki sıcaklıklarda borik asit kimyasal olarak ayrışır ve genellikle bor okside dönüşerek tabakalı kristal yapısını ve böylece yağlama özelliğini kaybeder. İkinci neden, sıcaklık yaklaşık $450^\circ C$ ' in üzerine çıktığında borik asit sıvı-benzeri hal alır ve temel malzemelere karşı tepkimeye girmek için meyilli olur. Metaller için sıvı benzeri hal ve kimyasal reaksiyon önemsizdir fakat seramiklerde – özellikle oksitlerde – bu durum

farklıdır. Sıvı bor oksit bu seramikler ile tepkimeye girer ve yüksek korozif aşınmaya meyilli olur (Bhushan, 2001; Martin and Ohmae, 2008).

2.5.2.2. Mekanik yağlar

Bu sınıftaki maddelerin farklı türleri, yağlama etkisinin fiziksel ve mekanik özellikleri veya özel durumlarına göre sınıflandırılır. Bunlar kendinden yağlayıcı özelliği olan maddeler, yağlama özelliği için destekleyici madde gereken yağlayıcılar ve sertliğinden dolayı yağlayıcı özelliği olan maddelerdir.

Kendinden yağlayıcı maddeler organik bileşikler, metal tabakalar, kimyasal yüzey katmanları ve camlardır. Organik bileşiklere örnek olarak politetrafloretillen (PTFE), polietilen (PE), polipropilen (PP), poliamid, naylon, vb. verilebilir. Polimerlerin sürtünme karakteristiği kimyasal yapısına ve temas ettiği yüzeye göre değişir. Sıcaklık değişimleri, polimerlerin sürtünme özellikleri üzerinde çok az bir etkiye sahiptir. Polimerlere; MoS₂, grafit ve metal tozu ilavesi sürtünme özelliğini ve sertliklerini artırır. Aynı zamanda grafit politetrafloretillen' in elastisite modülünü artırır. Yumuşak kimyasal yüzey katmanları, havayla temas halindeki malzeme yüzeyinde kendiliğinde oluşan oksit filmleridir. Malzeme yüzeylerinde katı yağlayıcı film kimyasal veya elektrokimyasal olarak oluşur. Camların yağlama özelliği kompozisyonuna bağlıdır. Sürtünme katsayısı, sıcaklığın etkisiyle viskozite, ısı iletkenliği, kayma oranı, kayma alanı, cam ile malzeme arasındaki temas açısına göre değişir. Yağlayıcı olarak kullanılan camların önemi, yaklaşık 1500 °C' de şekillendirilen özel metal işleme operasyonlarında görülebilir. Metal tabakalarla katı yağlama yapılması için malzemelerin yüzeyi ince bir tabaka metal ile kaplanır. Sürtünme, yumuşak bir metal ince bir film tabakasıyla kaplandığı zaman azalabilir çünkü sürtünme ince tabakanın kesme dayanımına göre değişir. Dayanıklılık yüzey filminin sertliğine, homojenliğine ve adhezyona bağlıdır. Metal tabakaların yağlama etkisi, erime noktası ile sınırlıdır.

Yağlayıcı özelliği için destekleyici madde gereken yağlayıcılar, inorganik bileşikler ve metal tozları olarak sınıflandırılırlar. İnorganik bileşikler; sülfürler, florür,

fosfat ve hidroksit sürtünme ve aşınma azaltıcı tabakalar üreterek destekleyici madde olurlar. Örneğin kalsiyum hidroksit, çeliğin sürtünme yüzeyi üzerinde Fe_3O_4 demir oksit tabakası üretimini destekler. Bu oksit daha yaygın görülen Fe_2O_3 demir oksidinden daha iyi tribolojik özelliklere sahiptir. Bu tabakaların oluşumu çeliğin kimyasal bileşimine ve özellikle yüzeyin kimyasına bağlıdır. Metal tozlarıyla yapılan yağlamada; kurşun, kalay, çinko, bakır, gümüş maddeler kendi kendine yağlayıcı özelliği olmayan mekanik yağların adhezyon ve kohezyon özelliklerini geliştirmek için kullanılır.

Sertliğinden dolayı yağlayıcı özelliği olan malzemeler, oksitlerin, borürlerin ve silikatların buhar biriktirme (PV) ile kaplanmasıyla oldukça yüksek sürtünme katsayısı oluşmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bile aşınma direnci korunur. Bu yöntem yüzeye sert malzeme kaplanması olarak görülür (Mang and Dresel, 2007).

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Reddy and Rao (2005), yaptıkları çalışmada frezeleme işleminde katı yağlayıcıların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. AISI 1045 çelik malzeme üzerinden 20 mm çapında kaplamalı karbür parmak freze takımı kullanarak farklı koşullarda talaş kaldırma işlemi yapmışlardır. Kesme şartları; paso 1 mm, kesme boyu 20 mm, kesme hızı 150-200-250 m/dk ve ilerleme 200-300-400 mm/dk olarak kullanmışlardır. Yağlama işlemi için klasik kesme sıvısı ve katı yağlayıcı olarak da grafit ve molibden disülfid kullanmışlardır. Kesme kuvvetleri ölçümü için üç kanallı dinamometre, yüzey pürüzlülüğü ölçümü için yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ve takım aşınmasının belirlenmesi için 1 µm çözünürlüğe sahip Mitutoyo optik mikroskobu kullanmışlardır. Sonuç olarak uygulanan işlem şartlarında katı yağlayıcı kullanımının kesme kuvveti, spesifik enerjiyi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini başarılı bir şekilde azalttığını görmüşlerdir. Deneysel sonuçlarından takım ve iş parçası arasında oluşan sürtünmeyi molibden disülfidin, grafit ve kesme sıvısına göre daha fazla düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarının sonucunda çeşitli katı yağlayıcıların kullanımının kesme sıvılarını elemek için önemli bir alternatif olduğunu ve katı yağlayıcıların çevre dostu olduğu vurgusunu yapmışlardır.

Mukhopadhyay, et al., (2007) yaptıkları çalışmada AISI 1040 malzemesinin tornalamasında katı yağlayıcıların kullanımını araştırmışlardır. Kesme sıvılarının kesme bölgesinin sıcaklığını düşürürken doğayı kirlettiğini ve katı yağlayıcıların doğayı kirletmeden kesme bölgesinin sıcaklığını düşürebileceğinin yeni bir olgu olduğu belirtmişlerdir. Sıvı yağlayıcı olarak 1:20 oranında suyla karıştırılmış kesme sıvısı ve katı yağlayıcı olarak da molibden disülfid kullanmış ve sonuçları karşılaştırmışlardır. 30 mm çapında AISI 1040 malzeme üzerinde kaplamasız karbür takımla işlem yaparken kesme şartları olarak; kesme hızı 100-125-150-175-200 m/dk, ilerleme 0.1-0.15-0.20-0.25-0.30 mm/dev, yaklaşma açısı 45-55-65-75-90 ve talaş açısı 0-4-8-12-16 olarak

kullanmışlardır. Son yüzey Taylor Hobson Talysurf ekipmanlarıyla ve talaş kalınlığını 1 µm çözünürlüğe sahip Tool Maker's Mikroskobu kullanarak ölçmüşlerdir. Yüzey pürüzlüğü yaklaşma açısıyla önce azalmış sonra artmış, en düşük yüzey pürüzlülüğünü molibden disülfitte 70 °C' de, kesme sıvısında 60 °C' de gözlemlemişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülüğü molibden disülfitte 12 derece talaş açısında, kesme sıvısında 8 derece talaş açısında elde etmişlerdir. Aynı zamanda molibden disülfite için en düşük yüzey pürüzlüğü; 200 m/dk kesme hızında, 0.1 mm/dev ilerlemede, 75 derece yaklaşma açısı ve 12 derece talaş açısı işlem şartlarında olmuştur. Talaş kalınlığı oranının (ölçülen talaş kalınlığı / kesilmemiş talaş kalınlığı) azalması iyi bir yağlama özelliği göstereceği vurgusunu yapmışlardır. Molibden disülfitin tüm kesme şartlarında kesme sıvısına göre daha düşük talaş kalınlığı oranı gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu sonuçlara dayanarak molibden disülfitin yüzey pürüzlüğü ve talaş kalınlığını başarılı bir şekilde azalttığı, takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi kesme sıvısından daha fazla azalttığı için molibden disülfitin kesme sıvılarına önemli bir alternatif olduğu yorumunu yapmışlardır.

Krishna, et al., (2010) yaptıkları çalışmada AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında SAE-40 ve hindistan cevizi yağı içinde nano borik asit süspansiyonun performansının deneysel olarak incelemişlerdir. Süspansiyon olarak ağırlıkça %0.25, %0.5, %1 oranlarında 50 nm tane büyüklüğüne sahip borik asit içeren SAE-40 ve hindistan cevizi yağı çözeltileri oluşturmuşlardır. Kesme bölgesine 10 ml/dakika oranıyla uygulamışlardır. 50 mm çapındaki AISI 1040 çeliğinin üzerinden karbür takımla talaş kaldırma işlemi yaparken kesme şartları olarak; paso 1mm, kesme hızı 60-80-100 m/dk ve ilerleme 0.14-0.16-0.20 mm/dev değerlerini kullanmışlardır. Deneyler sonucunda kesme bölgesi sıcaklığı, kesici takımın serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde etmişlerdir. Kesme bölgesi sıcaklığı, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri hindistan cevizi yağı içindeki süspansiyonda, SAE-40 yağı içindeki süspansiyona göre daha düşük değerlerde oluşmuştur. Deney sonuçlarına göre en düşük kesme bölgesi sıcaklığı, en düşük serbest yüzey aşınması ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri %0.5 oranında borik asit içeren hindistan cevizi yağı kullanıldığında elde edilmiştir.

Krishna and Rao (2008), yaptıkları çalışmada tornalama işleminde katı yağlayıcıların performansını geliştirmek için çalışmışlardır. 50 mm çapında EN 8 çeliği üzerinde kaplamasız karbür takım kullanarak talaş kaldırma işlemi yapmışlardır. Kesme şartları olarak; paso 1mm, kesme hızı 110 m/dk, ilerleme 0.25 mm/dev seçmişler ve kuru kesme, kesme sıvısıyla kesme ve SAE-40 yağı içerisine %5-%10-%20-%30-%40 oranında borik asit ve grafit katı yağlayıcıları ekleyerek deneyler yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, kesme bölgesi sıcaklığı ve serbest yüzey aşınmasını incelemişlerdir. Yüzey borik asit filminin serbest yüzey aşınmasını ve kesme kuvvetlerini azalttığını, %20 borik asit ilave edilmiş SAE-40 yağının en iyi sonuçları elde ettiğini, katı yağlayıcı karışımının kinematik viskoziteyi arttırdığı ve borik asit katkılı SAE-40 yağının kuru kesmeye ve kesme sıvısı ile kesmeye göre son yüzey özelliklerini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Babu, et al., (2008) yaptıkları çalışmada metal matrisli kompozit malzemenin frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin ölçümünü analitik model kurarak teorik olarak hesaplamışlardır. 10 mm çapında yüksek hız çeliğinden yapılmış parmak freze takımıyla Al/SiC metal matrisli kompozit malzeme üzerinden talaş kaldırma işlemi yapılmışlardır. Kesme şartları olarak; paso 0.4-0.8-1.2-1.6-2.0 mm, ilerleme 0.3-0.6-0.9-1.2-1.5 mm/dev, kesme hızı 56-84-112-140-224 m/dk kullanılarak dinamometre yardımıyla kesme kuvvetleri ölçümü yapmışlardır. Teğetsel kesme kuvvetinin ilerleme ve kesme kuvvetini etkilediğini, radyal kuvvete kesme hızının etkisi olmadığını ve radyal kuvvetin ilerleme ile arttığını, eksenel kuvvetin pasoyla arttığını ve ilerlemeyle yavaş olarak arttığını gözlemlemişlerdir.

Lovell, et al., (2010) yaptıkları çalışmada “çevre dostu yağlayıcı” kanola yağı içine farklı tane boyutlarında ve miktarlarda borik asit ilave ederek yağlama performanslarını araştırmışlardır. Sürtünme ve aşınma deneyleri pim-disk yöntemi, 7500 metre sürtünme mesafesinde ve küre olarak 6.5 mm çapında bakır ve disk olarak 66 mm çapında alüminyum disk kullanmışlardır. Yağlayıcı olarak kanola yağı içerisine %5 oranında 4 µm borik asit, %5 oranında 5µm molibden disülfid, %5 oranında 600 nm borik asit, %5 oranında 4µm (%2.5) ve 600 nm (%2.5) borik asit karışımı ve %5 oranında 20 nm borik asit partikülleri konularak 5 farklı yağlama ortamı

oluşturmuşlardır. Sürtünme mesafesi arttığı zaman sürtünme katsayısının azaldığını ve en düşük sürtünme katsayısı ile en düşük aşınma oranını 20 nm borik asit partiküllerinin olduğu kanola yağında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Rao and Krishna (2007), yaptıkları çalışmada tornalamada katı yağlayıcı partiküllerinin boyutunun kesme parametreleri üzerine etkisini incelemiştir. 50 mm çapında EN 8 çelik malzeme üzerinden karbür takımla talaş kaldırma işlemi yaparken kesme şartlarını; paso 1 mm, kesme hızı 110 m/dk, ilerleme 0.25 mm/dev olarak kullanmışlardır. Yağlayıcı olarak kuru kesme, kesme sıvısı ve katı yağlayıcı olarak grafit ve borik asit kullanmışlardır. Grafit ve borik asit için tane boyutları 50-100-150-200 μm olan farklı şartlar kullanmışlardır. Katı yağlayıcıların kesme sıvısı ve kuru kesme şartlarına göre daha iyi son yüzey oluşturduğunu, grafit ve molibden disülfid gibi katı yağlayıcıların kesme sıvıları gibi hastalık yapıcı özelliğinin olmadığını ve katı yağlayıcıların tekrar kullanılabilirdiği için pahalı olmadığını sonuçlarında özellikle belirtmişlerdir. En düşük tane boyutu olan 50 μm tane boyutlu borik asit ve 50 μm tane boyutlu grafit ile yapılan kuru yağlama durumlarında yüzey pürüzlülüğü, serbest yüzey aşınması ve kesme kuvvetlerin en düşük değerleri aldığını tespit etmişlerdir.

Rao and Dilbag (2007), zor işlenen parçaların tornalanmasında katı yağlayıcılarla performansı geliştirmek için çalışmışlardır. 70 mm çapında AISI 52100 çelik malzeme üzerinden 0.2 mm sabit paso ile işlem yaparken kesme şartları; kesme hızı 50-75-100-125-150 m/dk ve ilerleme 0.04-0.08-0.12-0.16-0.20 mm/ dev olarak kullanılmışlardır. Katı yağlayıcı olarak 2 μm tane boyutuna sahip grafit ve molibden disülfid kullanmış ve sonuçları aynı şartlarda kuru kesme yaparak karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi; kesme hızının 125 m/dk ya kadar arttığında azaldığı ve sonra çok bir değişim göstermediğini ve ilerlemenin yaklaşık 0.08 mm/dev olduğunda yaklaşık sabit ve bu değerden sonra ilerlemenin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm kesme şartları altında katı yağlayıcıların kuru kesmeye göre daha iyi bir yüzey oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Katı yağlayıcılar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise molibden disülfidin, grafitte göre daha düzgün yüzeyler oluşturduğunu belirlemişlerdir.

Çizelge 3.1. Literatür araştırması genel sonuçları

Yayın	Yağlayıcı	İşleme Yöntemi	Sonuçlar
Reddy and Rao (2005)	Grafit MoS ₂ Kesme sıvısı	Frezeleme	Katı yağlayıcı kullanımının kesme kuvvetini, spesifik enerjiyi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini başarılı bir şekilde azalttığını görmüşlerdir. Deneysel sonuçlarından takım ve iş parçası arasında oluşan sürtünmeyi molibden disülfidin, grafit ve kesme sıvısına göre daha fazla düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.
Mukhopadhyay, et al., (2007)	Grafit MoS ₂ Kesme sıvısı	Tornalama	Molibden disülfidin yüzey pürüzlülüğü ve talaş kalınlığını başarılı bir şekilde azalttığı, takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi kesme sıvısından daha fazla azalttığı için molibden disülfidin kesme sıvılarına önemli bir alternatif olduğu yorumunu yapmışlardır.
Krishna, et al., (2010)	SAE-40 Hindistan cevizi yağı içinde nano borik asit	Tornalama	Kesme bölgesi sıcaklığı, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri hindistan cevizi yağı içindeki süspansiyonda, SAE-40 yağı içindeki süspansiyona göre daha düşük değerlerde oluşmuştur. Deney sonuçlarına göre en düşük kesme bölgesi sıcaklığı, en düşük serbest yüzey aşınması ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri %0.5 oranında borik asit içeren hindistan cevizi yağı kullanıldığında elde edilmiştir.
Krishna and Rao (2008)	Kesme sıvısı SAE-40 yağı içine borik asit SAE-40 yağı içine grafit	Tornalama	Yüzey borik asit filminin serbest yüzey aşınmasını ve kesme kuvvetlerini azalttığını, %20 borik asit ilave edilmiş SAE-40 yağının en iyi sonuçları elde ettiğini, katı yağlayıcı karışımının kinematik viskoziteyi arttırdığı ve borik asit katkılı SAE-40 yağının kuru kesmeye ve kesme sıvısı ile kesmeye göre son yüzey özelliklerini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir.
Rao and Krishna (2007)	Kuru kesme Kesme sıvısı Grafit Borik asit	Tornalama	Katı yağlayıcıların kesme sıvısı ve kuru kesme şartlarına göre daha iyi son yüzey oluşturduğunu, en düşük tane boyutu olan 50 µm tane boyutlu borik asit ve 50 µm tane boyutlu grafit ile yapılan kuru yağlama durumlarında yüzey pürüzlülüğü, serbest yüzey aşınması ve kesme kuvvetlerin en düşük değerleri aldığını tespit etmişlerdir.
Rao and Dilbag (2007)	Kuru kesme Grafit MoS ₂	Tornalama	Tüm kesme şartları altında katı yağlayıcıların kuru kesmeye göre daha iyi bir yüzey oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Katı yağlayıcılar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise molibden disülfidin, grafitte göre daha düzgün yüzeyler oluşturduğunu belirlemişlerdir.
Lovell, et al., (2010)	Kanola yağı içine borik asit	Pim-disk	Sürtünme mesafesi arttığı zaman sürtünme katsayısının azaldığını ve en düşük sürtünme katsayısı ile en düşük aşınma oranını 20 nm borik asit partiküllerinin olduğu kanola yağında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda kullanılan takım, malzeme, tezgah, cihaz ve sistemler bu bölümde tanıtılmış ve deneylerin sistematığı belirtilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ve bulgular bu bölümde irdelenmiştir.

4.1. Tezgah

Deneyler sırasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi MMF Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgahları Laboratuvarında bulunan Tos Olomouc marka üniversal freze tezgahı kullanılmıştır. Tezgah X, Y, Z eksenlerinde dikey ve yatay frezeleme işlemi yapabilmektedir. Tezgahın ana iş mili motor gücü 4kW, devir sayıları 45-63-90-125-180-250-355-500-710-1000-1400-2000 devir/dakika, ilerleme değerleri 14-20-28-40-56-80-112-160-224-315-450-630-900 milimetre/ dakikadır.

Deneylerde freze tezgahının kullanılmasının nedeni frezeleme işleminin esnek imalata uygun olması ve düzlemsel parçaların işlenmesinde kullanılmasıdır. Düzlemsel parçalar sayesinde katı yağlayıcıların kesme bölgesine uygulanması ve uygulandıkları bölgede kalması kolaylaşmıştır. Deneyler sırasında seçilen kesme parametreleri kullanılan tezgahın ortalama değerleri olarak belirlenmiştir.

4.2. İş Parçası

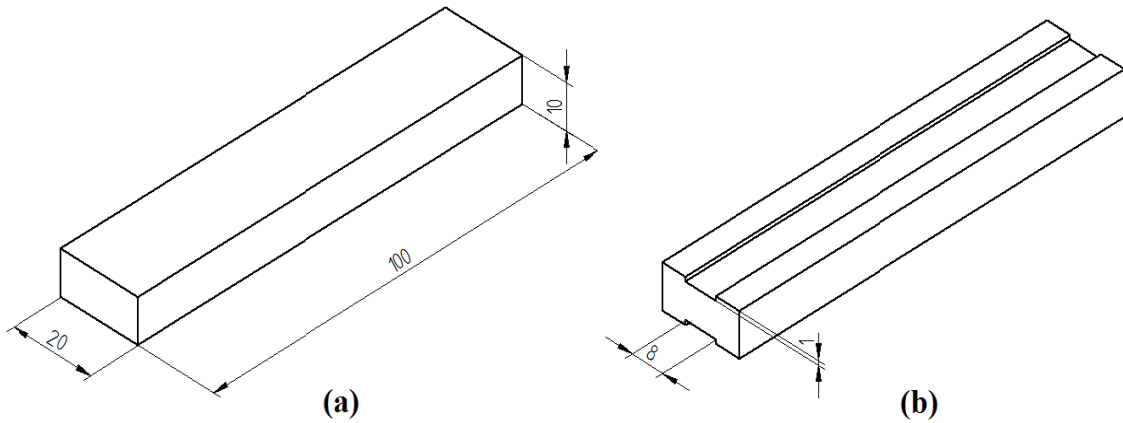
Deneyler sırasında AISI 1020 çelik malzemedен hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Numunelerin boyutları 20x10x100 mm olarak hazırlanmıştır. Her beş yağlama durumunda üçer numune kullanılarak toplam 15 adet numune üzerinden aynı şartlarda sadece yağlama durumu değiştirilerek talaş kaldırma işlemi yapılmış ve

böylece kontrollü deneylerle yağlama durumunun talaşlı imalat üzerine etkisi araştırılmıştır. AISI 1020 çeliğinin % bileşimi Çizelge 4.1’ de verilmiştir. AISI 1020 çeliğinin kullanım alanları; hafif yükler için yapı parçaları, piston pimleri, dişliler, zincir makaraları, kasnaklar, miller, cıvata ve somun yapımı gibi geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu amaçla işlenebilirliğinin kolay olması ile katı yağlayıcıların etkileri daha net belirlenebileceği için ve aynı zamanda geniş kullanım alanına sahip olduğu için deneylerde AISI 1020 çeliği tercih edilmiştir.

Çizelge 4.1 AISI 1020 çeliğinin % bileşimi

% Bileşim	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
AISI 1020	0.19	0.24	0.65	0.01	0.04	0.02	0.01	0.04	0.01	97.2

Numunelerin yüzeyinde Ø8 mm parmak freze çakısıyla her seferinde 100 mm boyunda toplamda 500 mm kanallar frezelenmiştir. Numunelerin Şekil 4.1’ den görüldüğü üzere her iki yüzeyinden de talaş kaldırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.1. AISI 1020 malzemedeki yapılmış deney numunesi işlem öncesi (a) ve işlem sonrası (b)

4.3. Kesici Takım

Deneyler sırasında AISI 1020 çeliği üzerinden frezeleme işlemi yapmak için 8 mm çapında yüksek hız çeliğinden (HSS) imal edilmiş parmak freze çakısı kullanılmıştır. Takım 4 ağızlı, kaplamasız, 69 mm boyunda, 10 mm bağlama çapına sahip parmak freze çakısıdır. Talaş kaldırma işleminde aşınmanın daha belirgin ve daha az işleme oluşabilmesi için yüksek hız çeliği kesici takım tercih edilmiştir. Deneyler sırasında her yağlama durumu için 1 takım olmak üzere toplam 5 farklı takım kullanılmıştır. Her takım için seçilen yağlama durumunda 100 mm kesme boyuna sahip numunelerden 5 kesme işlemi yapılmış toplam 500 mm kesme boyuna ulaşılmıştır. Takımların aşınmalarının incelenebilmesi için her takımın uçları plastik örtüyle korunarak 10 mm boyda Stuers Discotom – 5 cihazında kesme diskiyle kesilmiştir. Elde edilen 10 mm boyundaki numuneler üzerinde takım aşınmaları elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir.

4.4. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

Frezeleme işlemi esnasında her talaş kaldırma işleminde kesme kuvveti anlık olarak KISTLER 9257BA modeli dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçümler için dinamometreye beraber Kistler marka 5233A modeli kontrol ünitesi, DynoWare programı, bağlantı kabloları ve standart ağırlıklar kullanılmıştır (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Dinamometre F_x ile F_y yönünde 5 kN ve F_z yönünde 10 kN' a kadar ölçüm yapabilmektedir. Kesme kuvveti ölçümü için dinamometre freze tezgahına monte edilmiş üzerine ara bağlama elamanı vasıtasıyla mengene bağlanmıştır. Mengeneye parça bağlandıktan sonra ağırlıkların etkisini ortadan kaldırmak için dara alma işlemi uygulanmıştır. Dara alma işleminden sonra standart ağırlıklar sistemin üzerine yerleştirilerek ölçümün doğruluğu test edilmiştir. Ölçümün doğruluğu test edildikten sonra talaş kaldırma işlemlerinde her 1 saniyede 1000 veri alınarak toplam her numuneden 60 saniye boyunca ölçümler gerçekleştirilmiştir.

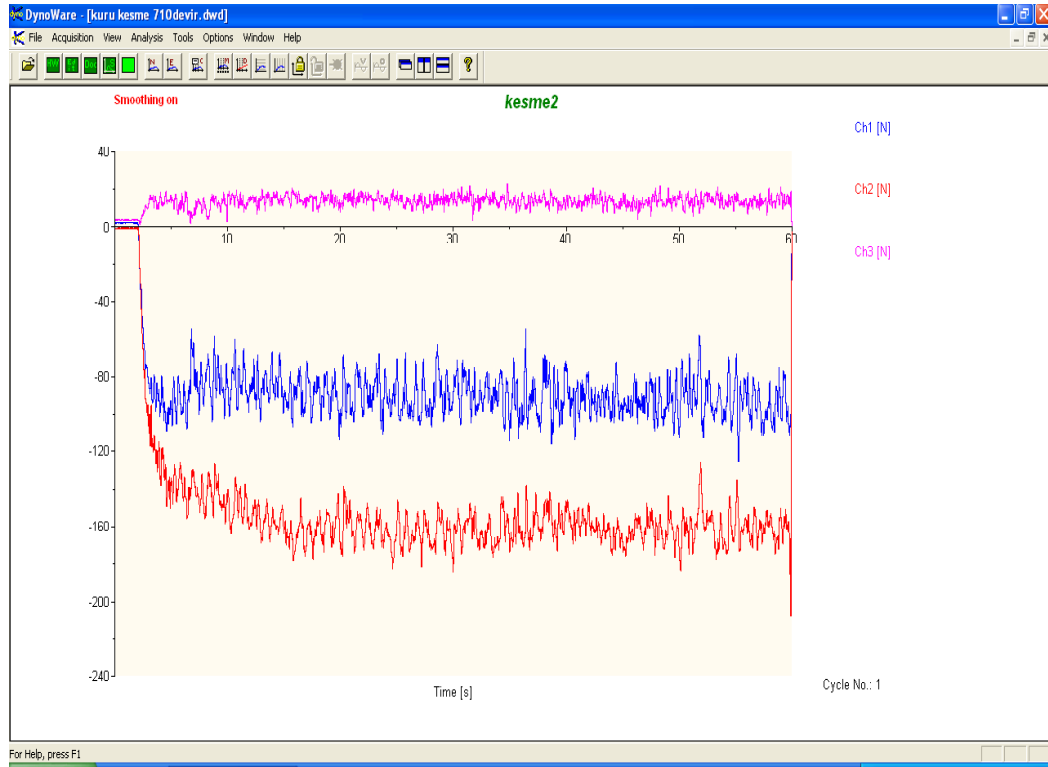


Şekil 4.2. Dinamometre ve kontrol ünitesi



Şekil 4.3. Kesme kuvvetleri ölçümü için hazırlanmış sistem

Ölçümler her farklı yağlama durumu için 500 mm kesme boyunda her seferinde 100 mm kesme yapılarak 5 seferde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4' te DynoWare programıyla elde edilen ekran görüntüsü verilmiştir. DynoWare programından alınan ölçüm sonuçlarına göre bazı kuvvetlerin negatif değerde olmasının nedeni dinamometrenin tezgaha bağlanma yönüyle ilgilidir. Burada ki negatif değerler sadece kuvvetin yönünü temsil etmektedir. Kesme kuvvetinin ölçümlerine kesici takım iş parçasına temas etmeden başlanmıştır. Bu nedenle grafikteki değerler belli bir süre sıfırdır ve temas başladığı andan itibaren artarak devam etmektedir. Genellikle ölçümlerde temas başladığı anda artış olduktan sonra kuvvetler yaklaşık aynı değerde kalmıştır. Anlık değişimlerden etkilenmemek için filtreleme işlemi Dynoware programı içerisinde aktif hale getirilmiştir. DynoWare programında alınan ölçüm sonuçları Microsoft Excel programına aktarılmış, negatif kuvvetler pozitif kuvvetlere çevrilmiş, aritmetik ortalama değerleri hesaplanmış ve kesme kuvvetinin zamana göre değişim grafikleri tekrar çizilmiştir.



Şekil 4.4. DynoWare programı kullanılarak elde edilen ekran görüntüsü

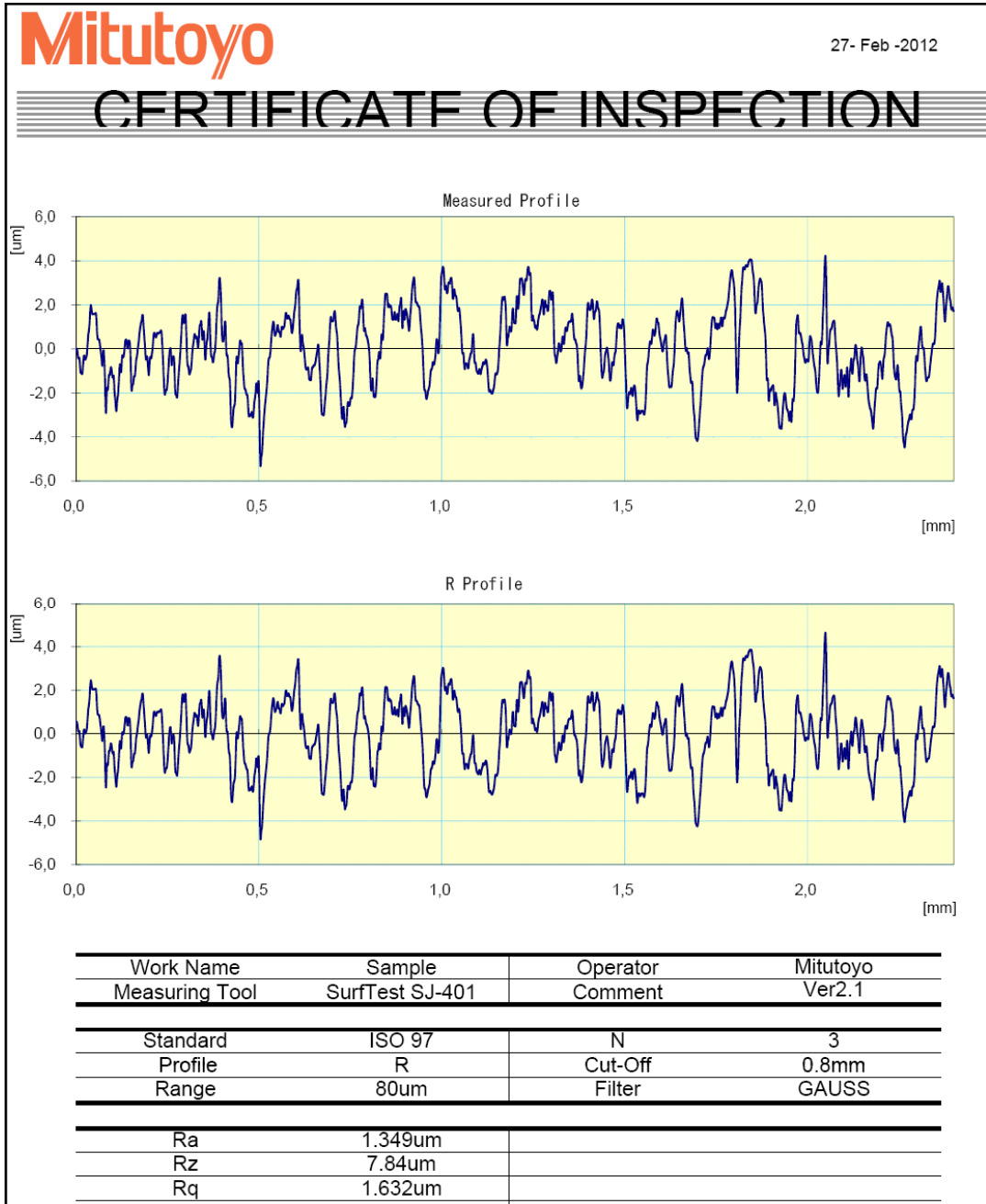
4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Malzeme ve Triboloji laboratuvarında bulunan Mitutoyo SJ 400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Şekil 4.5) kullanılmıştır. Bu cihazla AISI 1020 malzemeden frezelenmiş kanalların içinde ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve maksimum yüzey pürüzlülüğü (R_z) ölçümü yapılmıştır. Deneyle sırasında ISO 97 standardı, Gauss filtreleme ve R profil değerleri kullanılmıştır. Tüm ölçümler elektronik ortamda rapor olarak alınmıştır ve yüzey profilleri belirlenmiştir. Ölçümler her numune üzerinde kesici takımın giriş, orta ve çıkış bölgelerinden olmak üzere 3 farklı bölgeden ölçülmüştür.



Şekil 4.5. Mitutoyo SJ 400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçümleri her numunenin üzerinden 3 ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiş ve her ölçüm elektronik ortamda raporlanmıştır (Şekil 4.6). Her numunenin yüzeyinden alınan 3 ölçümün değerlerinin aritmetik ortalamaları alınmış ve yüzey profili değerlerinin grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü elektronik rapor örneği

4.6. Bor İçerikli Katı Yağlayıcılar

Frezeleme işleminde 4 farklı katı yağlama ortamı oluşturulmuştur. Yağlama ortamlarının etkilerini görebilmek için aynı kesme şartlarında sadece yağlayıcı ortam değiştirilerek deneyler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Kuru kesme işlemi yağlamanın olmadığı durumla tozların etkilerini karşılaştırabilmek için yapılmıştır. Yağlayıcı ortam olarak kullanılan bor içerikli tozlar;

1. Etidot- 67 ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$),
2. Bor pentahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 5\text{H}_2\text{O}$),
3. Borik asit (H_3BO_3),
4. Bor oksittir. (B_2O_3).

Deneylerde kullanılan katı yağlayıcıların tamamı bor esaslı maddelerdir. Katı yağlayıcıların tamamı Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğünden alınmıştır. Boraks pentahidrat Kırka Bor İşletme Müdürlüğünden, etidot – 67, bor oksit ve borik asit Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları İşletme Müdürlüğünden temin edilmiştir. Katı yağlayıcılar bor kimyasallarıdır yani rafine bor ürünleridir. Bu ürünler ocaktan çıkarılmış fakat üzerinde hiçbir cevher hazırlama işlemi yapılmamış olan, ham madde halindeki bor cevherlerinin kimyasal reaksiyonu sonucunda elde edilen inorganik boratlar ile bu ürünlerin ısı işlem sonucu dehidrasyona uğramış halleridir. Bu bor ürünlerinin hepsi Türkiye’ de üretilmektedir.

Deneylerde kullanılan 4 bor esaslı katı yağlayıcı yeni bir uygulama alanı oluşturmaktadır. Bu deneylerle bor esaslı bu malzemelerin katı yağlayıcı özelliklerinin olup olmadığı araştırılmıştır. Kullanılan bor esaslı katı yağlayıcıların üretici tarafından verilen kimyasal özellikleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Katı yağlayıcı olarak kullanılan bor bileşiklerinin kimyasal özellikleri

ETİDOT – 67 (Na₂B₈O₁₃.4H₂O)		
İçerik	Birim	Değer
B ₂ O ₃	%	67.00 min.
Na ₂ O	%	14.00 min.
Safiyet	%	99.90 min.
BOR OKSİT (B₂O₃)		
İçerik	Birim	Değer
B ₂ O ₃	%	98.00 min.
SO ₄	ppm	500 max.
Cl	ppm	10 max.
Fe	ppm	15 max.
BORAKS PENTA HİDRAT (Na₂B₄O₇.5H₂O)		
İçerik	Birim	Değer
B ₂ O ₃	%	47.76 min.
Na ₂ O	%	21.25 min.
SO ₄	ppm	135 max.
Cl	ppm	70 max.
Fe	ppm	5 max.
Safiyet	%	99.90 min.
Suda çözünmeyenler	ppm	150 max.
BORİK ASİT (H₃BO₃)		
İçerik	Birim	Değer
B ₂ O ₃	%	56.25 min.
Safiyet	%	99.90 min.
SO ₄	ppm	500 max.
Cl	ppm	10 max.
Fe	ppm	10 max.

Deneylerde kullanılan etidot – 67, boraks pentahidrat, borik asit ve bor oksit tozları üreticiden alındıktan sonra hiçbir işlem yapılmadan sadece tane boyutlarını eşitlemek için 60 μ m elekten geçirilmiştir. Tozların daha sağlıklı bir kıyaslama işlemine tabi tutulabilmesi için aynı tane boyutlarında olması gerekmektedir. Rao and Krishna, 2007 yılında yaptıkları çalışmada düşük tane boyutlarında yağlama etkisinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu nedenle tozların aynı tane boyutuna getirilmesi için otomatik titreşimli elek kullanılarak tozlar 60 μ m' luk elekten geçirilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Otomatik titreşimli elek

4.7. SEM ve EDS Analizleri

Frezelenmiş yüzeylerin yapısının tespit edilmesi ve işlem sonrası kesici uçlarda oluşan aşınma yapısının belirlenmesi için SEM ve EDS analizlerinden yararlanılmıştır. SEM ve EDS analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı ile yapılmıştır. Şekil 4.8' de cihazın resmi verilmiştir. Bu cihaz W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron, geri yansıyan elektron ve X ışınları (EDS- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve

haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementer analizleri yapabilmektedir.



Şekil 4.8. LEO 1430 VP modeli SEM cihazı ve EDS ünitesi

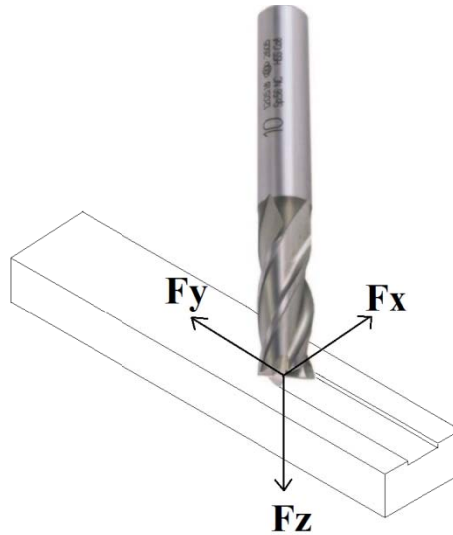
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde frezeleme işleminde farklı bor içerikli katı yağlayıcıların kullanılması ile yapılmış deneyler sonrasında elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların irdelenmesi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar olarak kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları verilmiştir. Ayrıca aşınmış kesici uçlar ile birlikte frezelenmiş yüzeylerde katı yağlayıcıların etkilerinin belirlenebilmesi için elektron mikroskopunda yapılmış olan SEM ve EDS analizleri sonuçları verilmiştir.

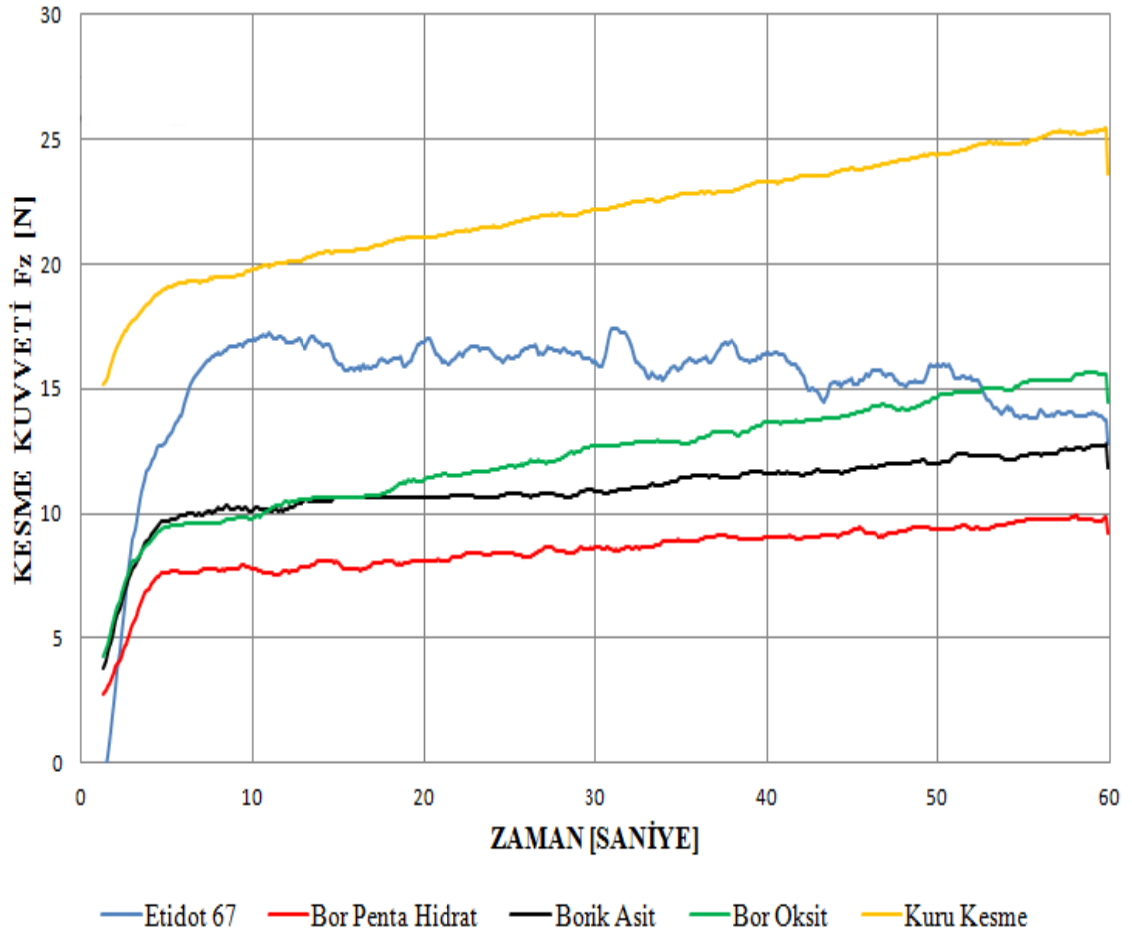
5.1. Kesme Kuvvetleri Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada bor içerikli katı tozların katı yağlayıcı olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla işlem sırasında eş zamanlı olarak 3 farklı yöndeki kesme kuvvetleri ölçülmüştür (Şekil 5.1).



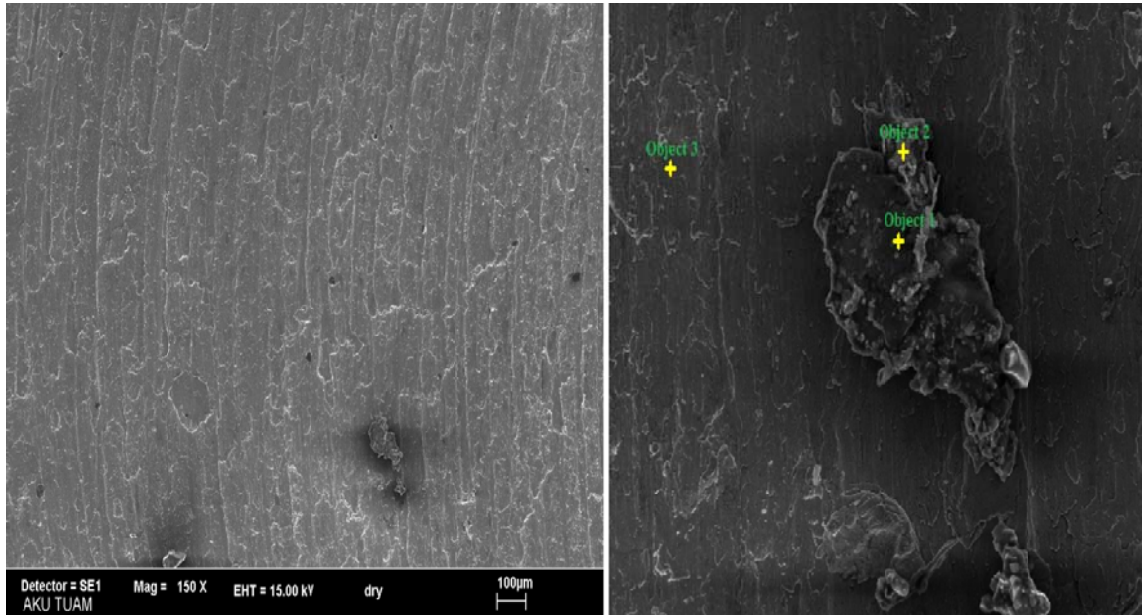
Şekil 5.1 Kesme kuvvetlerinin ölçüm yönleri

Bu kuvvetlerden F_z (basma-kesme yönüne dik kuvvet) kuvvet değerleri diğerlerine göre düşük olsa da öncelikli olarak incelenecektir. Bu kuvvette meydana gelecek değişiklikler kullanılan katı yağlayıcıların kesme bölgesinde kalarak kesme işlemine etki ettiğini göstermektedir. Şekil 5.2 incelendiğinde kuru kesme şartlarında ki en yüksek kuvvet değerlerinin 25 N' a ulaşan değerler olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak katı yağlayıcıların kullanıldığı frezeleme işlemlerinde kuvvet değerleri işlem sonunda 15N değerlerine ulaşmıştır. Bor pentahidratın en düşük baskı kuvveti oluşturması sebebiyle temas noktasına en iyi şekilde dağıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Tozlar arasında baskı kuvvetini en az etkileyen etidot-67 olmuştur ancak bu baskı değeri yine de kuru kesme işleminden daha küçük değerde ölçülmüştür.



Şekil 5.2. F_z basma kuvvetinin zamanla değişimi

Kuru kesme şartlarında beklenildiği gibi kesme kuvveti değeri en yüksek değerde çıkmıştır. Belirli işlem şartlarında yüzeyde sürtünmeyi azaltıcı herhangi bir etki olmaması sonucunda bu durum doğaldır. Ayrıca bu numunenin işlem sonrası yapılan SEM yüzey fotoğraflarında (Şekil 5.3) düzgün ilerleme izlerinin yanı sıra demir oksit partikülleri görülmektedir. EDS analizlerinde bu partiküller ve bunların yaptığı abraziv etki açık olarak görülmektedir.



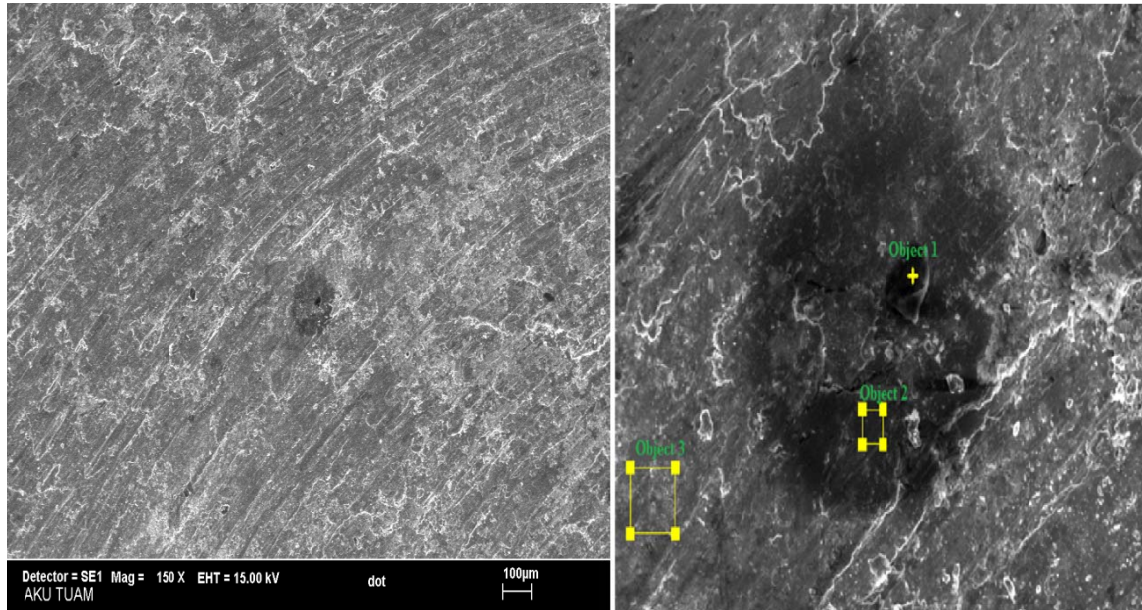
NOKTA 1			NOKTA 2			NOKTA 3		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Karbon	2,80	51,23	Karbon	2,10	45,23	Karbon	2,61	11,10
Oksijen	37,43	26,67	Oksijen	34,66	25,26	Demir	97,18	88,90
Sodyum	2,26	2,16	Sodyum	0,0	0,0			
Sülfür	0,57	0,39	Sülfür	0,82	0,66			
Demir	49,72	19,55	Demir	62,46	28,86			

Şekil 5.3. Kuru kesme işlemi yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları

Katı yağlayıcılardan etidot-67 de kuvvet değerleri çok büyük dalgalanmalar göstermiştir. Diğer işlemlerde bor penta hidrat, borik asit ve bor oksit tüm işlemler boyunca benzer bir kuvvet değişimi sergilemiştir. Burada katı yağlayıcıların iş parçası – takım arasında kalarak baskı kuvvetini azalttığı söylenebilir. Etidot-67 ile yapılan işlemde görülen kuvvet dalgalanmalarının ve işlemin başlarındaki ani kuvvet artışının sebebi olarak tozun işlem şartlarında (basma kuvveti-sıcaklık artışı ve ilerleme) oluşan sinterleme ve topaklanmanın etkisiyle olduğu düşünülmektedir. Bu sonucu destekleyen Şekil 5.4’ te yüzeyden alınan SEM fotoğrafında böyle bir partikül görülmektedir. Aynı şekilde bu işlem sonunda kullanılan kesici ucun EDS analizi fotoğrafında (Şekil 5.15) takıma transfer olmuş partiküller görülmektedir. Bunlar kuvvet artışını şiddetlendirmiştir.

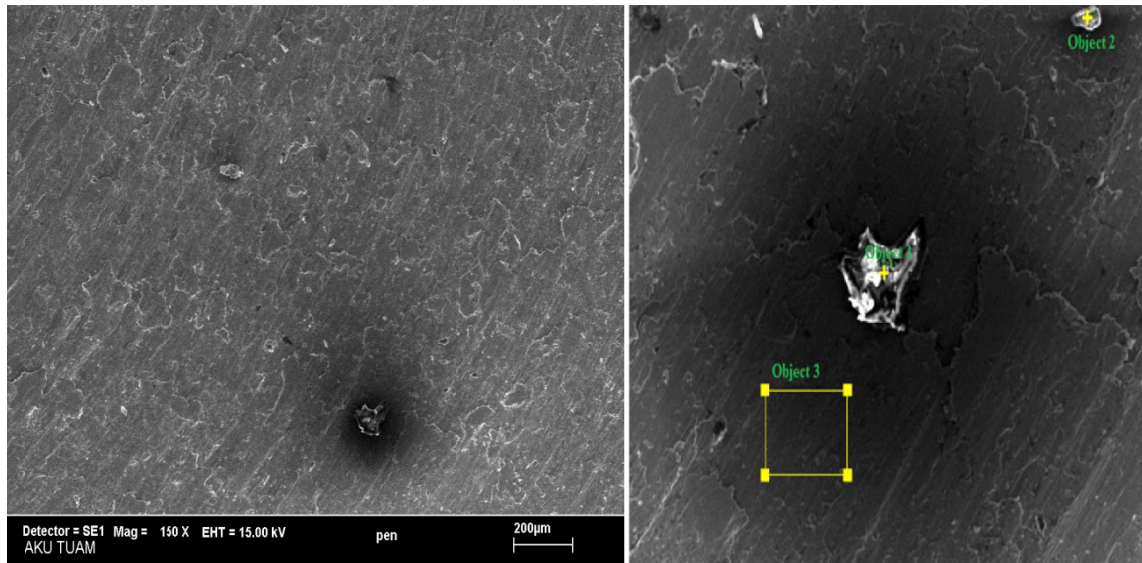
Bor oksit, borik asit ve bor penta hidrat tozlarının katı yağlayıcı olarak kullanılmasında Fz kuvveti düzgün bir seyir göstermiştir. İşlem sonrasında alınan yüzey SEM fotoğrafları incelendiğinde en düşük kuvvet değeri veren bor pentahidratın numune yüzeyinde işlem başlangıcında geniş bir bölgede demir oksit tabakası (muhtemelen Fe_3O_4) yüzeyi kaplamıştır (Şekil 5.5). Bu şekilde devam eden imalat işleminde takımla iş parçası arasındaki temas azalmıştır.

Borik asit ve bor oksitte benzer etkilerin yanı sıra SEM yüzeyleri incelendiğinde imalat izlerinin düzgün olduğu görülmektedir. Borik asit ile işlem yapılan numunenin yüzeyinden alınan EDS analizlerinde benzer oksit tabakası görülmektedir (Şekil 5.6). Bu tabakanın diğer toz partikülleri tarafından bozulması sonucunda bor pentahidrata göre kuvvet kısmen artmıştır. Bor oksitte ise yüzeyde bor oksit partikülleri görülmektedir (Şekil 5.7). Kesici yüzeyin arkasında kalan bu artık partiküllerin takıma etkisiyle az da olsa kuvveti arttırdığı düşünülmektedir.



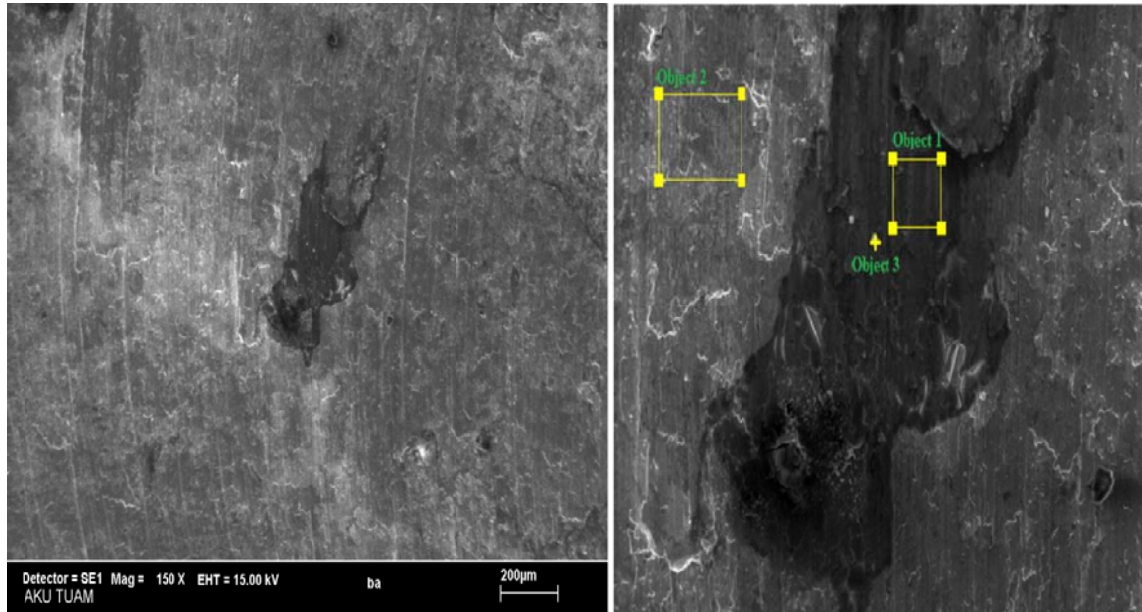
NOKTA 1			NOKTA 2			NOKTA 3		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,0	0,0	Bor	0,0	0,01	Bor	0,01	0,02
Karbon	27,27	44,99	Karbon	5,5	17,99	Karbon	4,33	14,47
Azot	11,22	15,87	Oksijen	8,43	20,7	Oksijen	9,40	23,55
Oksijen	18,56	22,99	Sodyum	0,77	1,32	Demir	86,27	61,96
Sodyum	1,8	1,55	Demir	85,29	59,98			
Demir	41,15	14,60						

Şekil 5.4. Etidot 67 tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları



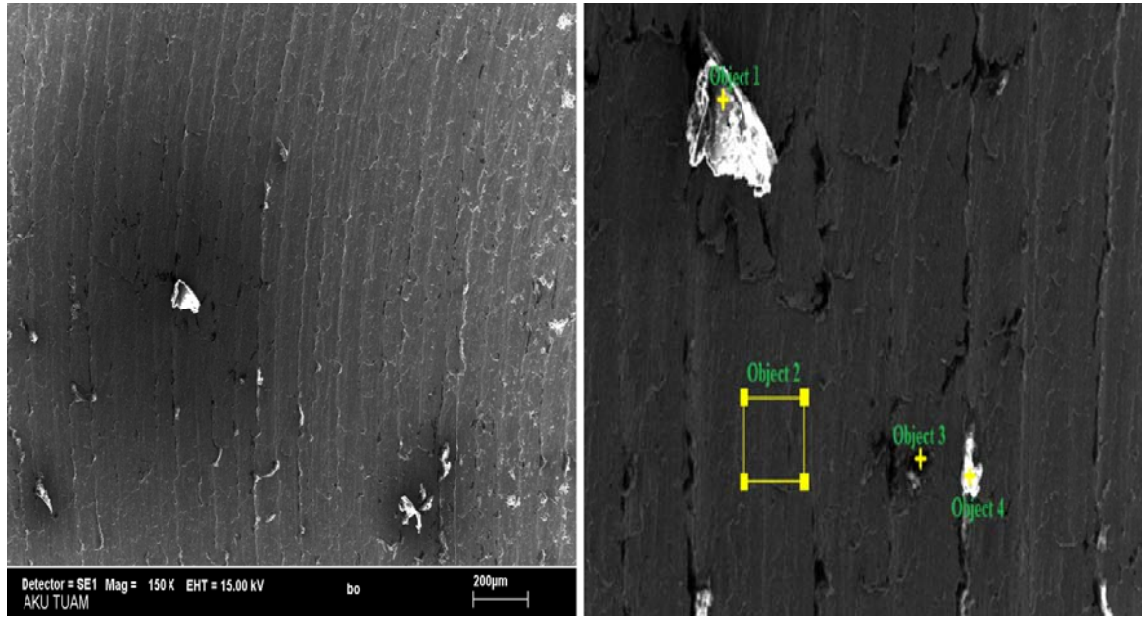
NOKTA 1			NOKTA 2			NOKTA 3		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,01	0,01	Bor	0,0	0,01	Karbon	3,98	14,67
Karbon	54,13	62,14	Karbon	51,52	59,70	Oksijen	4,69	12,98
Oksijen	41,98	36,18	Oksijen	43,11	37,49	Demir	91,32	72,35
Sodyum	2,02	1,21	Sodyum	2,78	1,68			
Demir	1,86	0,46	Demir	2,59	1,12			

Şekil 5.5. Bor pentahidrat tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları



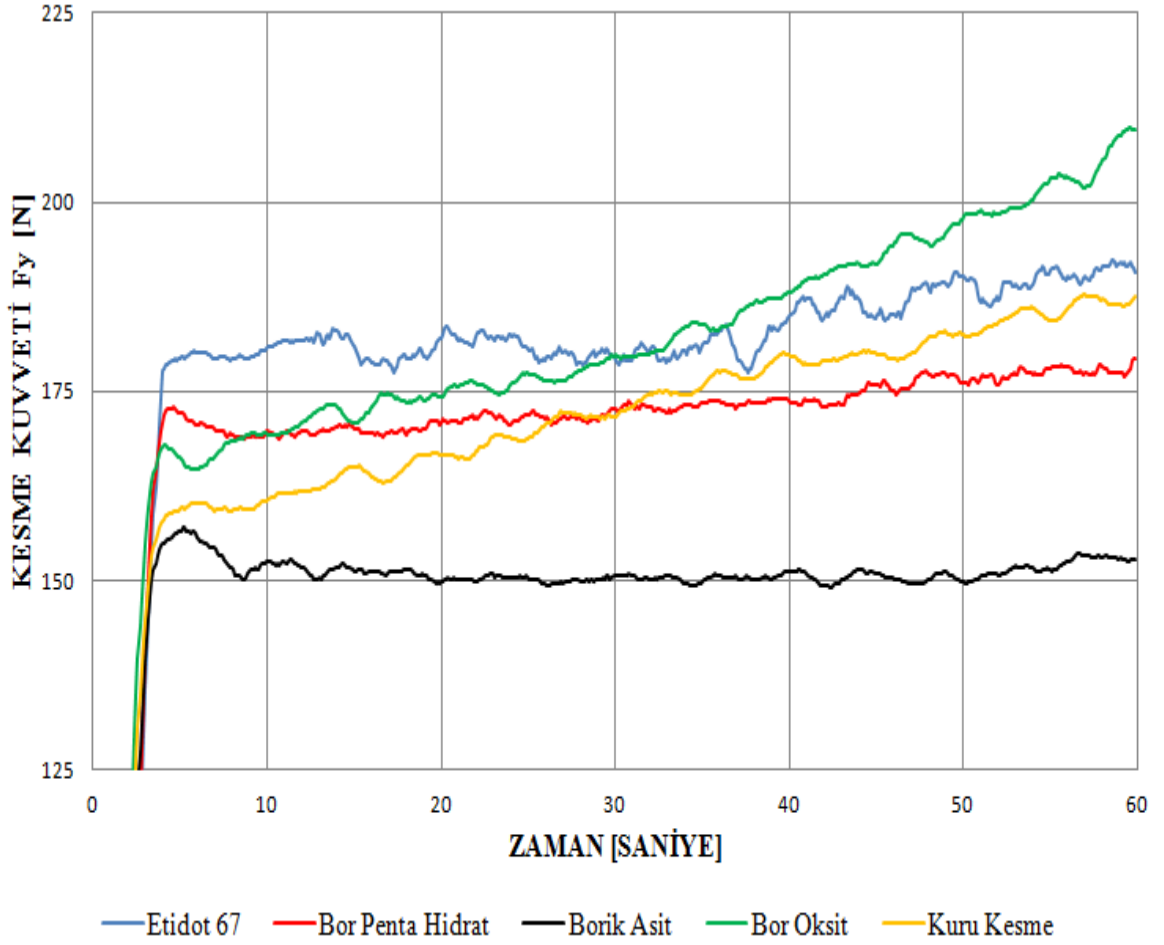
NOKTA 1			NOKTA 2			NOKTA 3		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,01	Bor	0,0	0,01	Bor	0,01	0,02
Karbon	4,8	13,51	Karbon	2,88	10,56	Karbon	4,51	10,00
Oksijen	19,16	40,47	Oksijen	6,54	18,01	Oksijen	57,99	27,63
Demir	76,03	46,00	Demir	90,58	71,42	Demir	37,48	62,84

Şekil 5.6. Borik asit tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 3 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları



NOKTA 1			NOKTA 2		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,01	Bor	0,01	0,04
Karbon	61,06	67,63	Karbon	2,89	10,92
Oksijen	38,93	32,37	Oksijen	5,00	14,18
			Demir	92,10	74,86
NOKTA 3			NOKTA 4		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,01	0,02	Bor	0,01	0,01
Karbon	27,27	50,30	Karbon	53,16	65,84
Oksijen	21,09	29,21	Oksijen	32,67	30,38
Demir	51,62	20,48	Demir	14,17	3,78

Şekil 5.7. Bor oksit tozuyla işlem yapılmış numunenin 150X SEM fotoğrafı ve 4 farklı noktadaki EDS analizi sonuçları



Şekil 5.8. İlerleme yönündeki kuvvetin zamanla değişimi

Şekil 5.8.' de F_y (ana kesme kuvveti-ilerleme yönündeki kuvvet) kuvvetinin kesme mesafesi boyunca ortalama değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte görüleceği üzere borik asit kullanılan işlemlerde en düşük kesme kuvveti değeri (yaklaşık 150N) elde edilmiştir. Benzer şekilde bor pentahidratta yaklaşık 175 N' luk bir kesme kuvvet değeri göstermiştir. Etidot-67 ve bor oksit kullanılan işlemlerde beklenilenin aksine en yüksek kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Bor oksit numunesinde kesme işleminin başından sonuna kadar sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Bor oksit tozunun nemden etkilendiği bilinmektedir. Nemli ortamlarda bor oksit tozlarının kısmen iri partiküllü hale gelmesi ve işlem şartlarının etkisiyle topaklanması sonucunda tane boyutları değişmektedir. Tane boyutunun artması yağlayıcı etkiyi azaltmakta ve kesme kuvvetinde

devamlı artışa neden olmaktadır. Tane boyutunun büyümesi ile kesme kuvvetinin arttığı bilinmektedir (Rao and Krishna, 2007). Bu numunenin SEM fotoğrafında (Şekil 5.7) ilerleme yönünde yüzeye saplanmış taneler görülmektedir. Aynı şekilde etidot-67 numunesinde de benzer tanecikler mevcuttur. Bu tanecikler kesme kuvvetini artırıcı yönde davranmıştır. Bor pentahidrat tozu kullanılarak yapılan kesme işleminde 30 saniyeden sonra kuru kesmeye oranla azalma görülmektedir. Bu azalmanın nedeni olarak ilerleme yönünde tozlarında katkısıyla oluşan oksit içerikli tabakalar olduğu söylenebilir. İşlemler sonunda borik asit numunesinin SEM yüzey fotoğrafı incelendiğinde ilerleme yönünde oldukça kalın oksit ve bor içerikli bir tabakanın daha deney başlarında oluşarak ilerleme kuvvetini büyük oranda azalttığı düşünülmektedir. Takımla iş parçasının temasının azalmasının sonucunda yağlayıcı etki oluştuğu söylenebilir.

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Talaşlı imalat işlemlerinden sonra elde edilen iş parçalarının belirli yüzey özellik değerlerini sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü değerleri katı yağlayıcı performansının değerlendirilmesinde bir kriter olarak alınmıştır.

Çizelge 5.1' de talaş kaldırma işlemi uygulanmış numuneler üzerinden alınmış yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tablosu verilmiştir. Tabloda 100, 200, 300, 400 ve 500 mm kesme boylarında numune üzerinde ölçülmüş 3 farklı bölgenin ölçüm sonuçları bulunmaktadır. Şekil 5.9' da ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri R_a 'nın kesme boyuna göre değişim grafiği verilmiştir. Şekil 5.9' da verilen grafik Çizelge 5.1' de verilen ölçüm 1, ölçüm 2 ve ölçüm 3 yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak çizilmiştir. Şekil 5.10' da maksimum yüzey pürüzlülüğü değeri R_z 'in kesme boyuna göre değişim grafiği verilmiştir. Şekil 5.10' da verilen grafik Çizelge 5.1' de verilen ölçüm 1, ölçüm 2 ve ölçüm 3 yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak çizilmiştir.

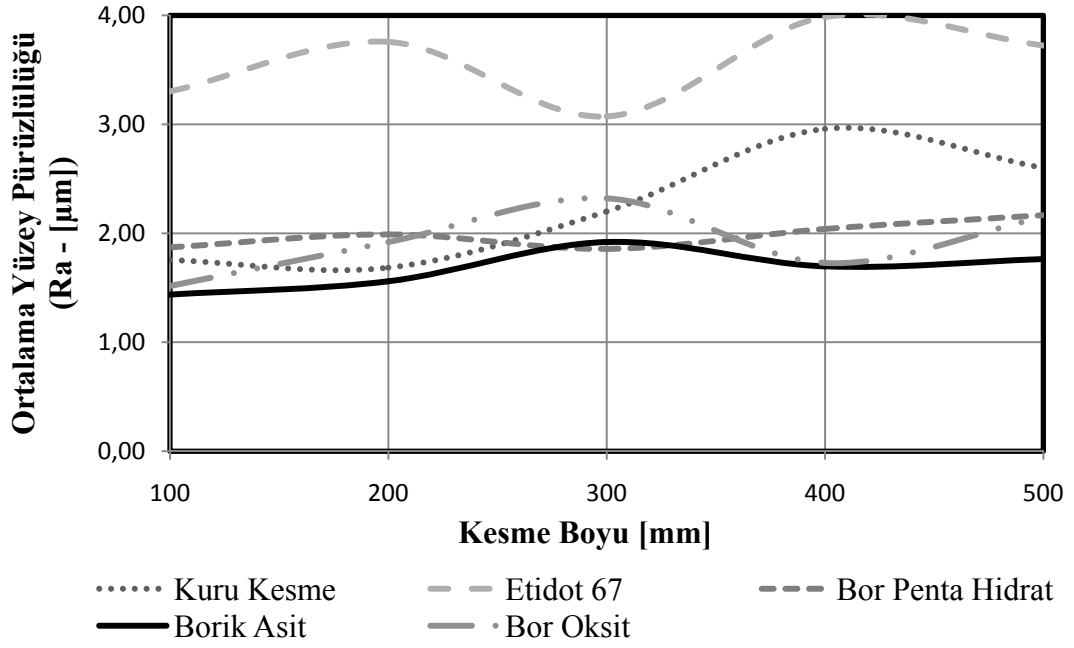
Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü değerleri

YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ TABLOSU (μm)		ÖLÇÜM 1		ÖLÇÜM 2		ÖLÇÜM 3	
KESME BOYU		R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
KURU KESME	100 mm	1,826	10,26	1,72	10,65	1,72	10,65
	200 mm	1,749	11,47	1,884	10,28	1,42	8,15
	300 mm	2,319	12,37	1,859	11,33	2,42	12,54
	400 mm	2,912	13,84	2,906	16,14	3,057	15,23
	500 mm	2,554	13,46	2,929	14,50	2,316	12,25
ETİDOT 67	100 mm	3,353	18,27	3,784	17,66	2,769	14,79
	200 mm	3,914	19,87	3,145	18,48	4,21	20,97
	300 mm	2,959	16,45	3,009	15,66	3,248	19,98
	400 mm	4,998	26,84	3,995	21,6	3,976	21,33
	500 mm	4,33	28,3	3,77	20,1	3,070	15,95
BOR PENTA HİDRAT	100 mm	1,782	10,46	2,069	13,43	1,76	13,62
	200 mm	2,004	12,22	2,245	13,34	1,72	12,12
	300 mm	2,061	11,75	1,74	10,17	1,77	9,91
	400 mm	2,035	10,95	2,263	11,87	1,823	10,27
	500 mm	2,196	12,33	2,112	13,36	2,191	12,41
BORİK ASİT	100 mm	1,349	7,84	1,526	8,47	1,436	8,71
	200 mm	1,440	8,95	1,74	10,76	1,497	9,45
	300 mm	1,853	10,18	1,993	12,79	1,915	11,21
	400 mm	1,877	10,34	1,655	9,57	1,558	8,32
	500 mm	1,828	9,96	1,772	10,41	1,691	11,95
BOR OKSİT	100 mm	1,478	9,30	1,535	10,36	1,539	9,81
	200 mm	1,976	12,20	1,978	12,50	1,805	11,59
	300 mm	2,352	12,37	2,246	12,38	2,365	11,97
	400 mm	1,528	10,00	1,774	10,57	1,882	10,29
	500 mm	2,127	12,6	2,283	10,81	2,036	11,61

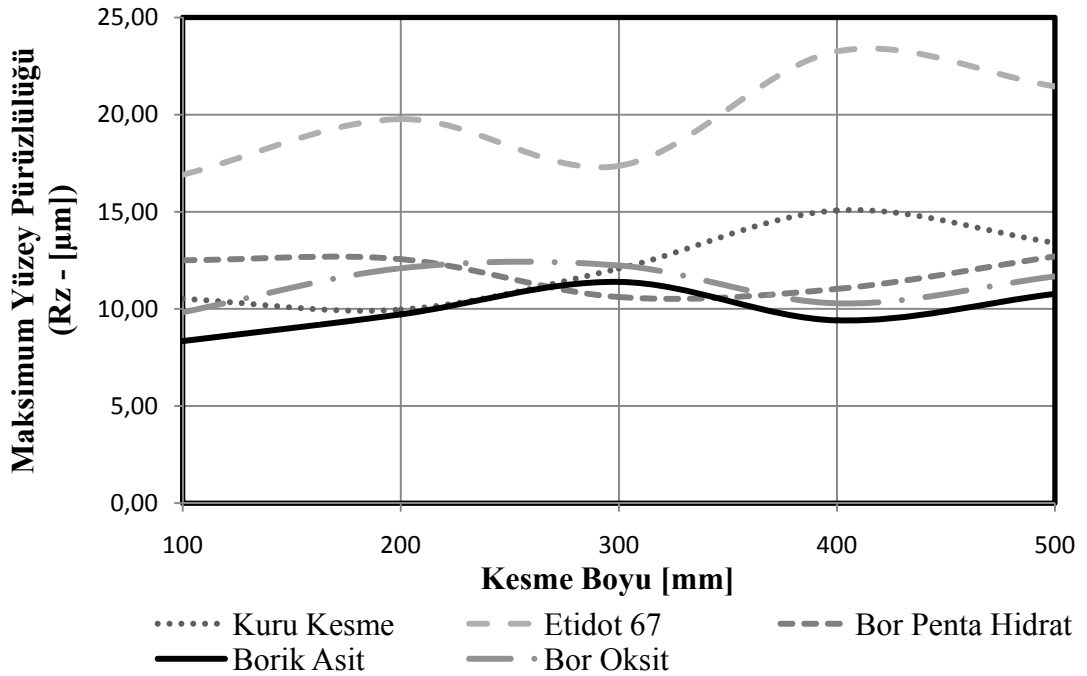
Şekil 5.9 ve 5.10' da görülen sonuçlara göre etidot -67 tozu kullanılarak işlenen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri ve maksimum yüzey pürüzlülük değerleri (R_z) beklenenin aksine kuru kesme işlemi ile elde edilen değerlerden oldukça yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar aynı zamanda tüm deneylerin en yüksek pürüzlülük değerleridir. Yüksek olan bu pürüzlülük değerleri bir önceki başlıkta tartışılan aynı toz için elde edilen yüksek kuvvet değerlerinin oluşmasını da desteklemektedir. Bu pürüzlülük değerlerine bakılarak etidot-67 tozu kullanılarak işlenen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin belirgin bir şekilde arttırdığını ve yüzey özelliklerini kötüleştirdiği sonucuna varılabilir.

Bor oksit tozu ile işlenen numunelerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 300 mm kesme boyu civarında kuru kesme pürüzlülük değerlerinin üzerine çıkmış ancak 300 mm kesme boyuna kadar ve 300 mm' den sonraki kesme boylarında yüzey özellikleri iyileşmiştir. Bor pentahidrat tozu kullanılarak işlenen numunelerde kuru kesmeye göre başlangıçta düşük bir fark gözlemlenmesine rağmen kesme boyu artınca ortalama yüzey pürüzlülüklerinde azalma belirgin hale gelmiştir. Genel olarak bor oksit, bor pentahidrat ve borik asit arasında pürüzlülük yönünden çok büyük farklar olmadığı söylenebilir. Bu tozların kullanımının artan kesme boylarında pürüzlülük açısından iyileşmeye neden olduğu söylenebilir.

Borik asit tozu kullanılarak işlenmiş numunelerde yüzey pürüzlüklerinde artan kesme boylarında oldukça belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Bu pürüzlülük değerleri deneylerde ölçülen en düşük değerlerdir. Kesme boyunun başlangıcından sonuna kadar ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri neredeyse değişmeden sabit ($\sim 1.65 \mu\text{m}$) kalmaktadır. Doğrudan yüzey üzerinde kullanılan tozların ince tanelerinin, yumuşak iş parçası yüzeyinde zımparalamaya benzer bir etkiyle pürüzlülüğü azalttığı düşünülmektedir. Bu pürüzlülük değerlerine bakılarak etidot-67 hariç diğer bor içerikli tozların katı yağlayıcı olarak kesme işlemine olumlu etkilerinin olduğu söylenebilir.



Şekil 5.9. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün [R_a] kesme boyuna göre değişimi



Şekil 5.10. Maksimum yüzey pürüzlülüğünün [R_z] kesme boyuna göre değişimi

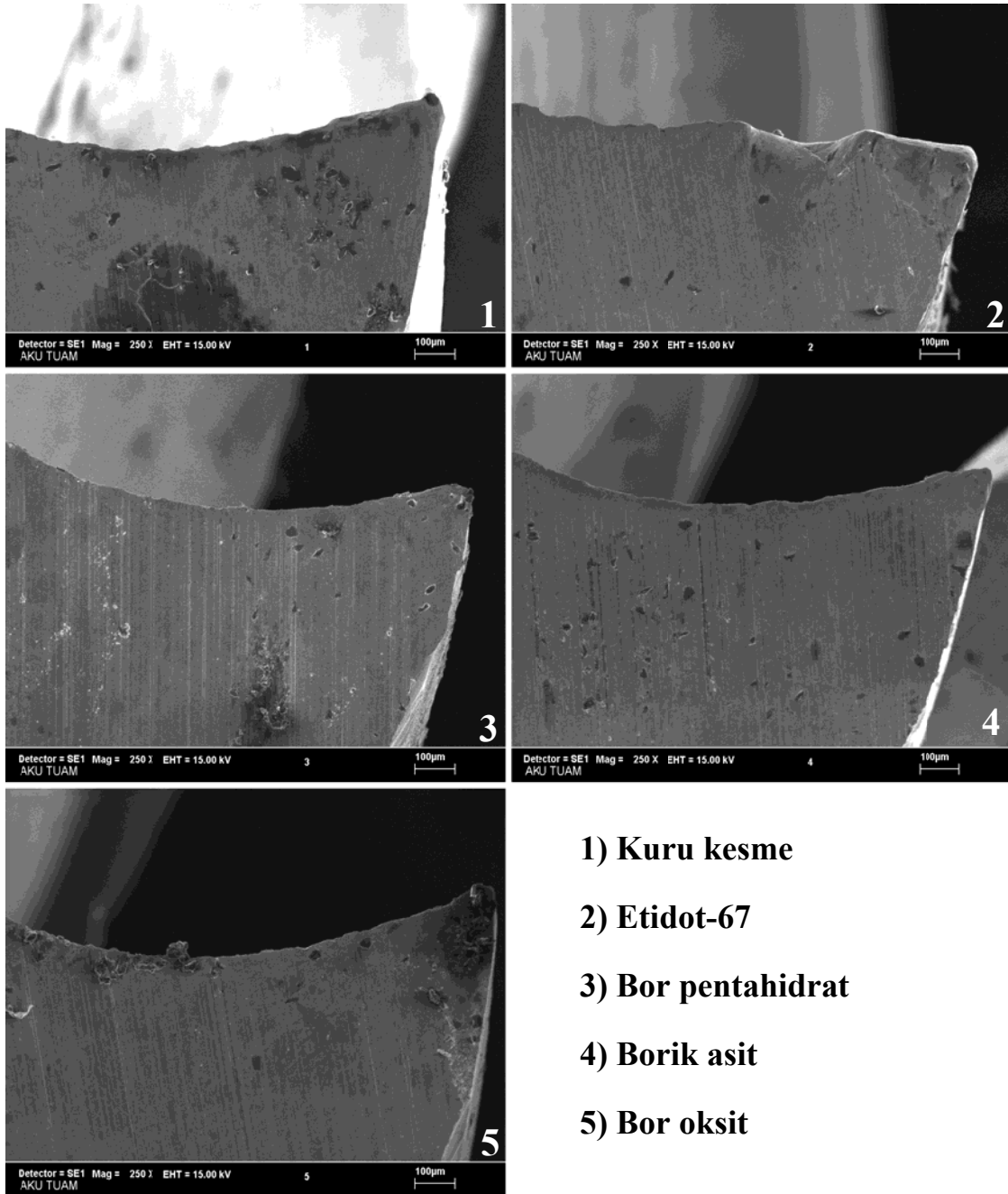
5.3. Freze Takımlarında Aşınmaların İncelenmesi

Frezeleme işlemi sonrasında freze takımlarının aşınma durumlarının belirlenmesi için bu takımların kesme bölgelerinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları ile elektron dağılımlı spektroskopisi analizleri (EDS) alınmıştır. Şekil 5.11’ de parmak freze takımlarının kesici ağızlarından çekilmiş 250X büyütme SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.12 ile Şekil 5.21 arasında frezeleme işleminde kullanılan parmak freze takımlarının SEM fotoğrafları ve EDS analizleri verilmiştir. Bor, karbon ve oksijen gibi hafif elementleri içeren kantitatif EDS analizlerinde ölçüm hassasiyetinde sapmalar olabilmektedir. Guo, et al., (2008) yaptıkları çalışmada EDS analizinde karbon içeriğinin hassas bir şekilde belirlenemeyeceğini belirtmişlerdir.

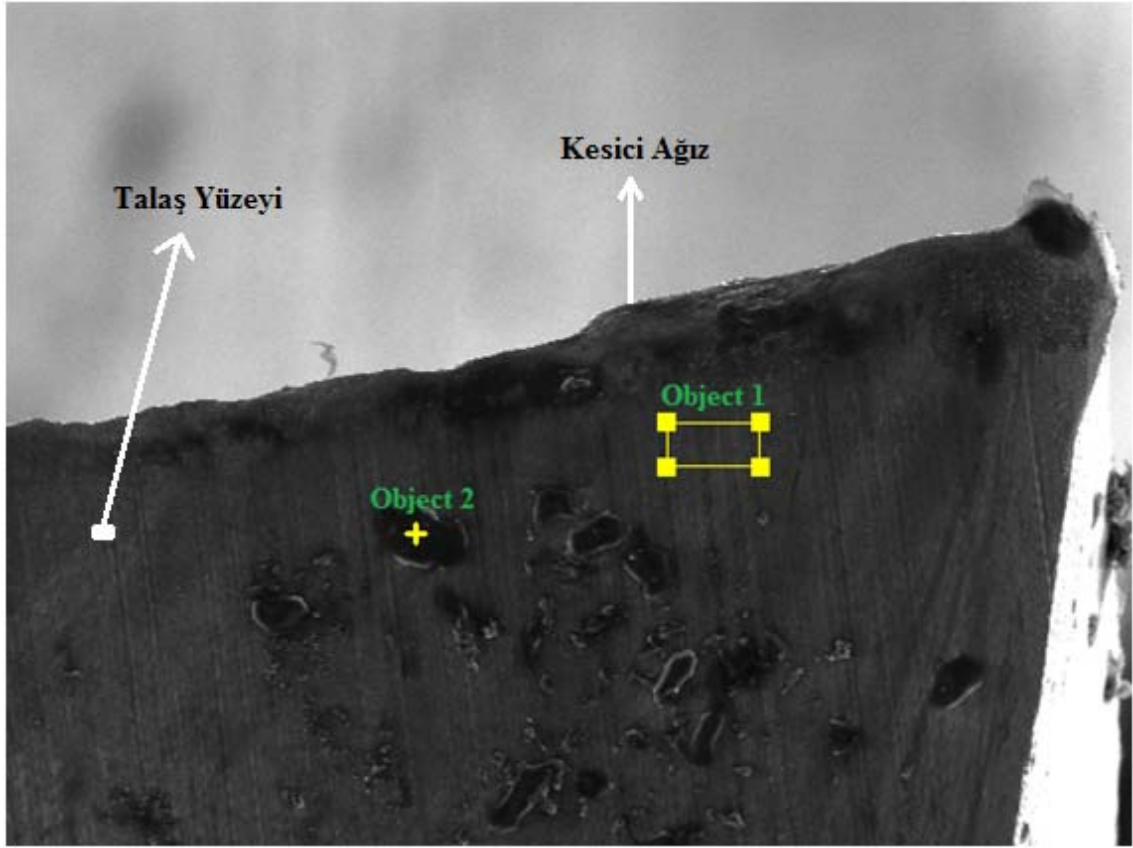
Frezeleme işleminde kuru kesme şartlarında beklendiği üzere kesici ağızda büyük kopmalar görülmektedir (Şekil 5.12). Kesici ağzın kesme formu tamamen kaybolmuştur. Kesici ucun uç kısmında ani kopmalar dikkat çekmektedir. Kuru kesme şartlarında sık karşılaşılan talaşın takıma yapışması burada da görülmektedir. Ayrıca işlem sırasında sıcaklık ve sürtünme etkisiyle oluşan çeşitli demir oksit partikülleri takım talaş yüzeyinde (arka yüzeyi) hareket ederek ilave abraziv aşındırıcı etkiye sebep olmuştur. Bu aşınma etkisi sonucunda F_z kesme kuvveti beklendiği gibi tüm numuneler arasında en yüksek değerde ölçülmüştür. Ayrıca diğer kesme ağzında büyük parçalar halinde takım ucu ve talaş yüzeyinden kopmalar olduğu görülmektedir (Şekil 5.13).

Etidot-67 tozunun yağlayıcı olarak kullanıldığı frezeleme işleminde takım ucunda büyük parçacıkların kopması sonucunda oluşan aşınma etkileri açıkça görülmektedir (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15). Bu numunede ayrıca derin aşınma izleri dikkat çekmektedir. Bu aşınma izlerinin işlem sırasında yer yer topaklanan ve irileşen etidot-67 partiküllerinin etkisiyle olduğu düşünülmektedir. Aşınma yüzeyinde görülen bu iri partiküllerin varlığı aynı şekilde işlenmiş parçaların yüzey analizi olan Şekil 5.4’ te de daha önce tespit edilmiştir. Bu partiküllerin etkisiyle takımın kesici ağzında büyük aşınmalar meydana gelmiştir. Ayrıca işlem sırasında oluşan talaşın oksitlenmesi sonucunda oluşan demir oksit partikülleride bu kesici takımın arka yüzeyindeki aşınmayı artırmıştır. Buna rağmen etidot-67 tozunun kullanıldığı bu numunede, kuru kesme şartlarına göre F_z basma kuvvetinde yaklaşık %20 oranında azalma

gözlemlenmiştir. Bu numunenin F_z kuvvet grafiğindeki (Şekil 5.2) dalgalanmalarda sistem içerisindeki farklı boyuttaki (oksit ve topaklaşan etidot-67) partikül hareketi varlığını desteklemektedir.

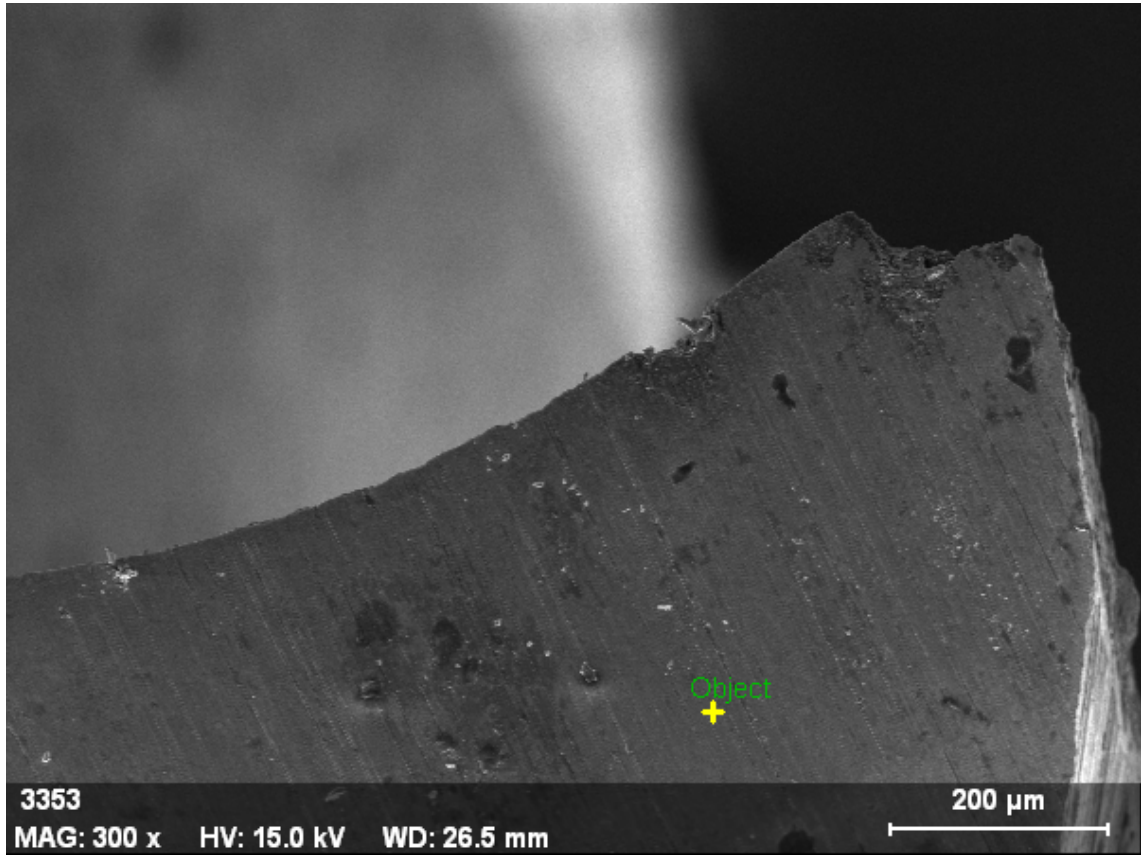


Şekil 5.11. Parmak freze takımlarının kesici ağızlarından çekilmiş 250X büyütme SEM görüntüsü



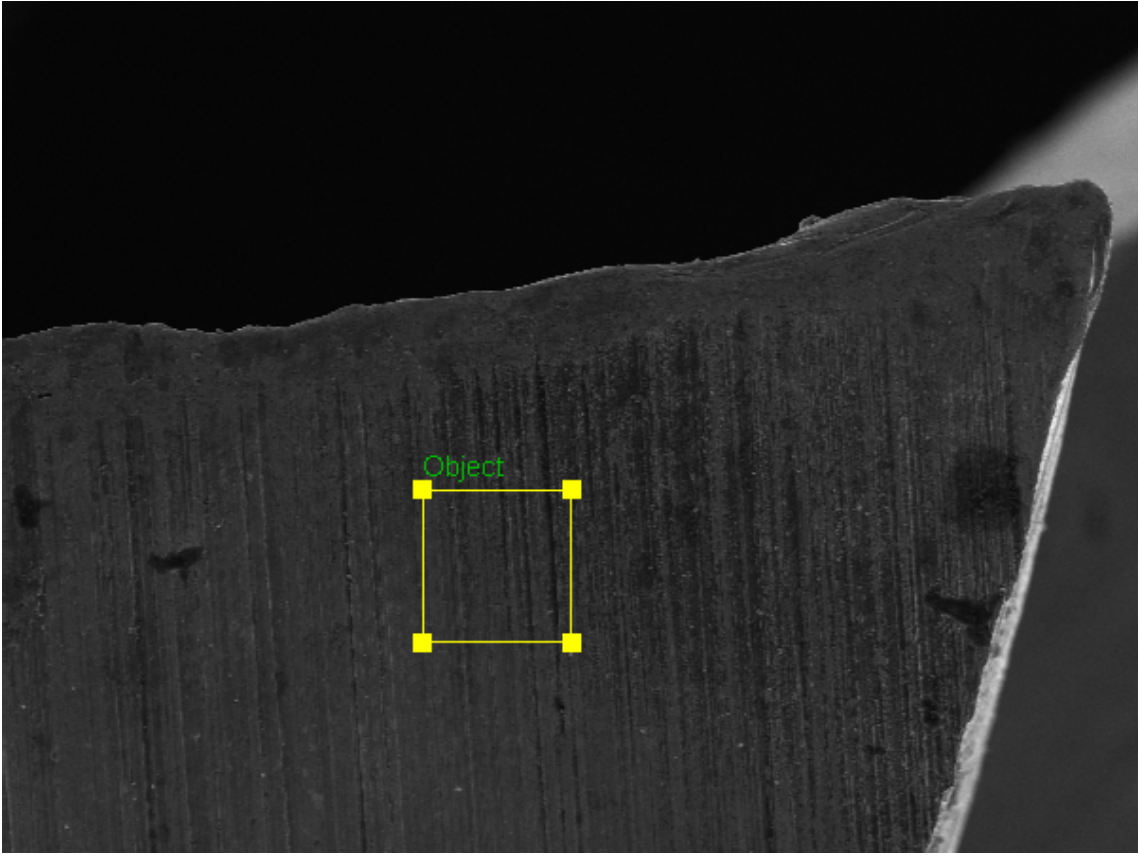
NOKTA 1			NOKTA 2		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Karbon	9,51	30,27	Karbon	3,31	0,81
Oksijen	6,17	14,73	Oksijen	36,87	31,48
Krom	3,09	2,27	Demir	59,52	67,69
Demir	75,22	51,47	Tungsten	0,3	0,02
Tungsten	6,01	1,25			

Şekil 5.12. Kuru kesme işleminde kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları



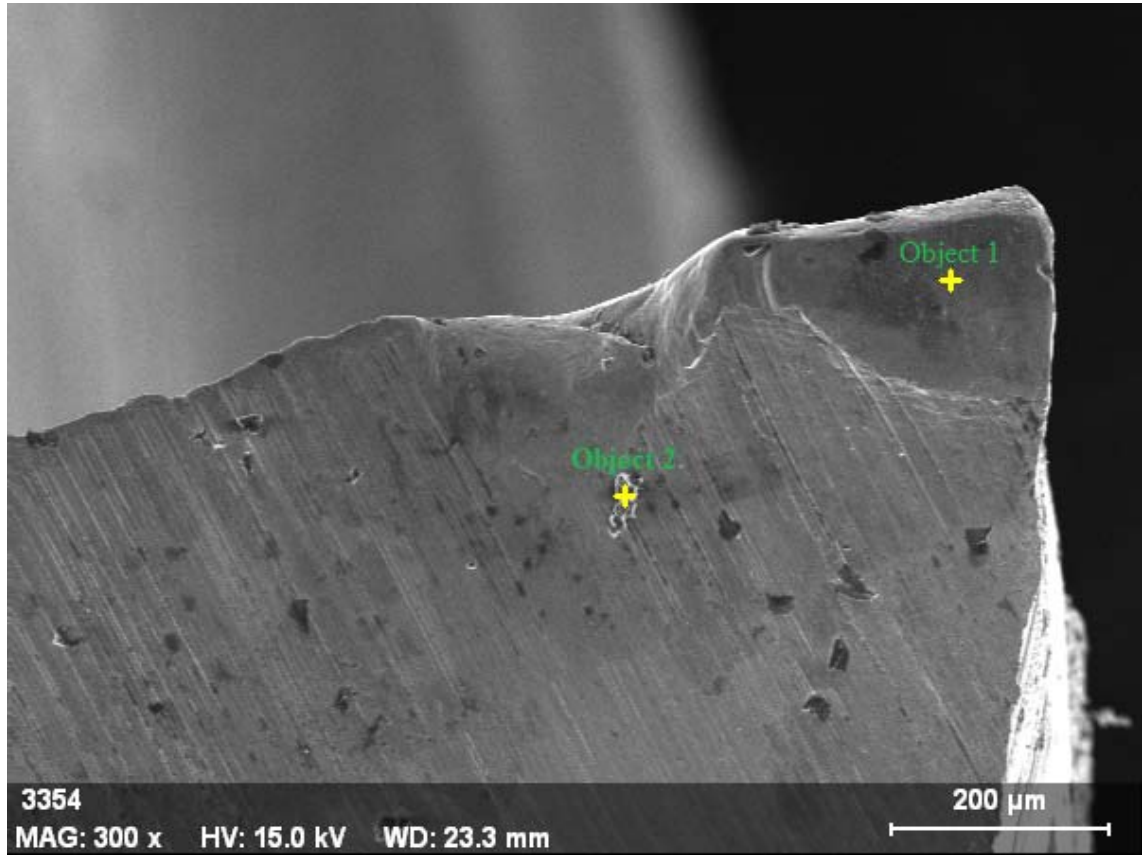
NOKTA		
Element	% Ağırlık	% Atom
Karbon	2,57	11,76
Oksijen	0,00	0,00
Silisyum	0,00	0,00
Vanadyum	0,95	1,03
Krom	3,76	3,97
Demir	79,84	78,48
Molibden	3,33	1,9
Tungsten	9,55	2,85

Şekil 5.13. Kuru kesme işleminde kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu



NOKTA		
Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,01
Karbon	5,37	15,58
Oksijen	18,68	40,68
Sülfür	2,84	3,09
Krom	9,49	6,36
Demir	51,15	31,91
Tungsten	12,47	2,36

Şekil 5.14. Etidot-67 tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu

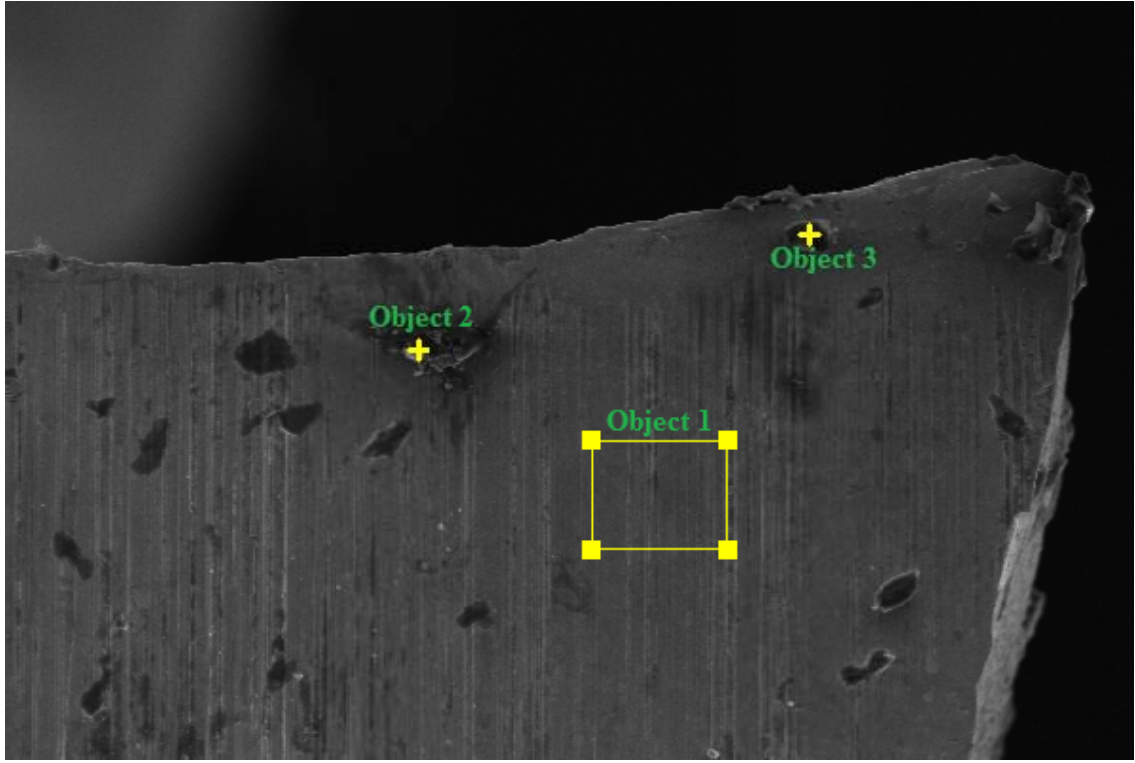


NOKTA 1			NOKTA 2		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,02	Bor	0,04	0,05
Karbon	3,00	11,04	Karbon	1,43	0,34
Oksijen	9,70	26,77	Oksijen	22,31	18,47
Vanadyum	1,53	1,32	Vanadyum	0,41	0,11
Krom	5,38	4,56	Krom	0,32	0,08
Demir	65,85	52,04	Demir	1,43	0,34
Molibden	3,43	1,58	Molibden	2,06	0,28
Tungsten	11,11	2,67	Tungsten	0,31	0,02

Şekil 5.15. Etidot-67 tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları

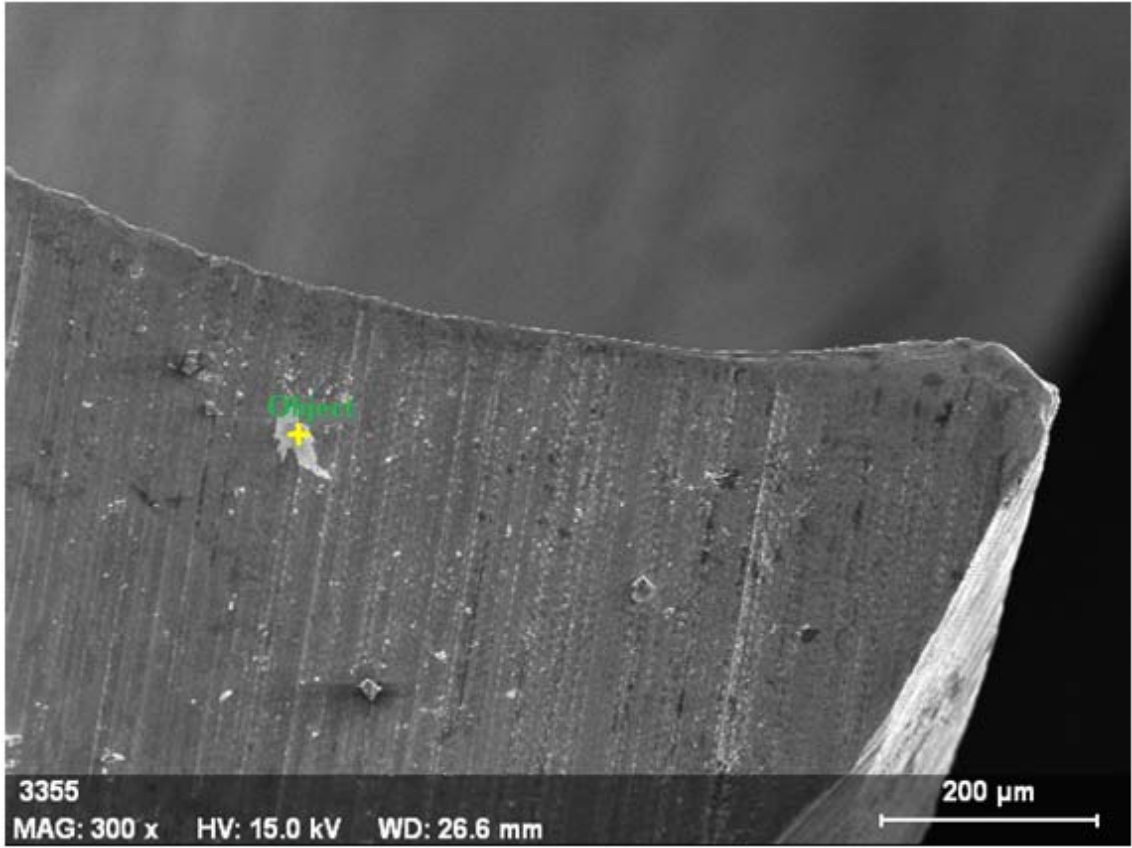
Bor pentahidratın katı yağlayıcı olarak kullanılması durumunda işlem sonrasında takım kesme ağzının kesme formunu büyük oranda koruduğu görülmektedir. Kesici takımın uç kısmından alınan EDS analizi sonucunda herhangi bir transfer söz konusu olmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 5.16 ve Şekil 5.17). Kuru kesme ve etidot-67 tozu kullanılarak işlem yapmış takımlar ile karşılaştırıldığında bu kesici takım arka yüzeyindeki abrazyon etkilerinin oldukça düzenli ve ince olduğu görülmektedir. Takım arka yüzeyindeki tanelerin takıma olumsuz yönde etkiler yapmadığı rahatlıkla söylenebilir. Yüzeyde yer yer oluşan demir oksitlerin özellikle (Fe_3O_4) kesme ağzı civarında yapışarak kalması ilerleme yönündeki kuvvette artışa sebep olmuş ancak basma yönündeki kuvvette herhangi bir olumsuz etki meydana getirmemiştir.

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’ da borik asit tozu kullanılarak yapılan frezeleme işlemi sonrasında kesici takımın kesme ağzlarında diğer numunelerle karşılaştırıldığında oldukça düşük bir aşınma görülmektedir. Özellikle ilerleme yönündeki kuvvet değeri en düşük ve basma yönündeki kuvveti de oldukça düşük olan bu tozun yağlayıcı etkisinin oldukça iyi olduğu düşüncesi oluşmuştur. Bu takımın arka yüzeyinde yapılan EDS analizinde herhangi bir oksit kalıntısına rastlanmamıştır. Bu durum takım, iş parçası ve tozdan oluşan tribolojik sistemi içerisinde borik asitin yağlayıcı etkisiyle olmuştur. Yağlayıcı etki nedeniyle sıcaklık artışının düşük olması sonucunda kalın tabakalı demir oksitler sisteme dahil olmamıştır. Bu işlemin iş parçası tarafında yüzeyde (Şekil 5.6) düşük miktarda oksijen görülürken yer yer yumuşak iş parçasının çukur kısımlarında yüksek oksit içeren bileşikler elde edilmiştir. Bu oksitler yüzeyde gömülü kaldıkları için takıma herhangi bir olumsuz etkide bulunmamışlardır. Takım yüzeyinden alınan EDS analizlerinde çok küçük partiküller de oksit artışı görülmektedir. Bu küçük oksit partikülleri de abrazyon aşınmayı şiddetlendirecek herhangi bir olumsuz etkide bulunmamışlardır.



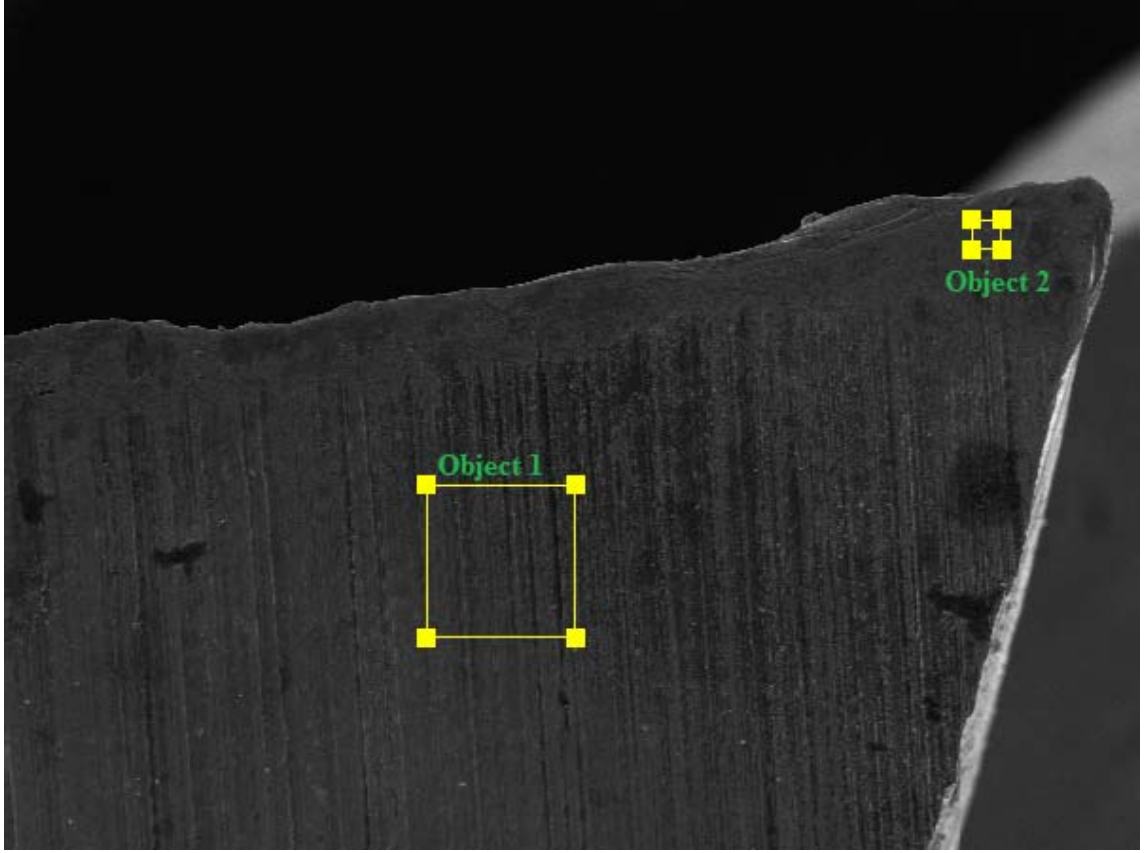
NOKTA 1			NOKTA 2			NOKTA 3		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,02	Bor	0,00	0,01	Bor	0,00	0,00
Karbon	4,52	18,47	Demir	74,94	79,93	Karbon	5,30	9,25
Oksijen	1,61	4,94	Oksijen	25,05	20,06	Oksijen	23,49	54,57
Krom	3,51	3,31				Sodyum	0,31	0,37
Demir	80,36	70,59				Sülfür	0,98	0,85
Tungsten	10,00	2,67				Klor	2,15	1,69
						Krom	2,15	1,16
						Demir	63,69	31,82
						Tungsten	1,93	0,29

Şekil 5.16. Bor pentahidrat tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 3 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları



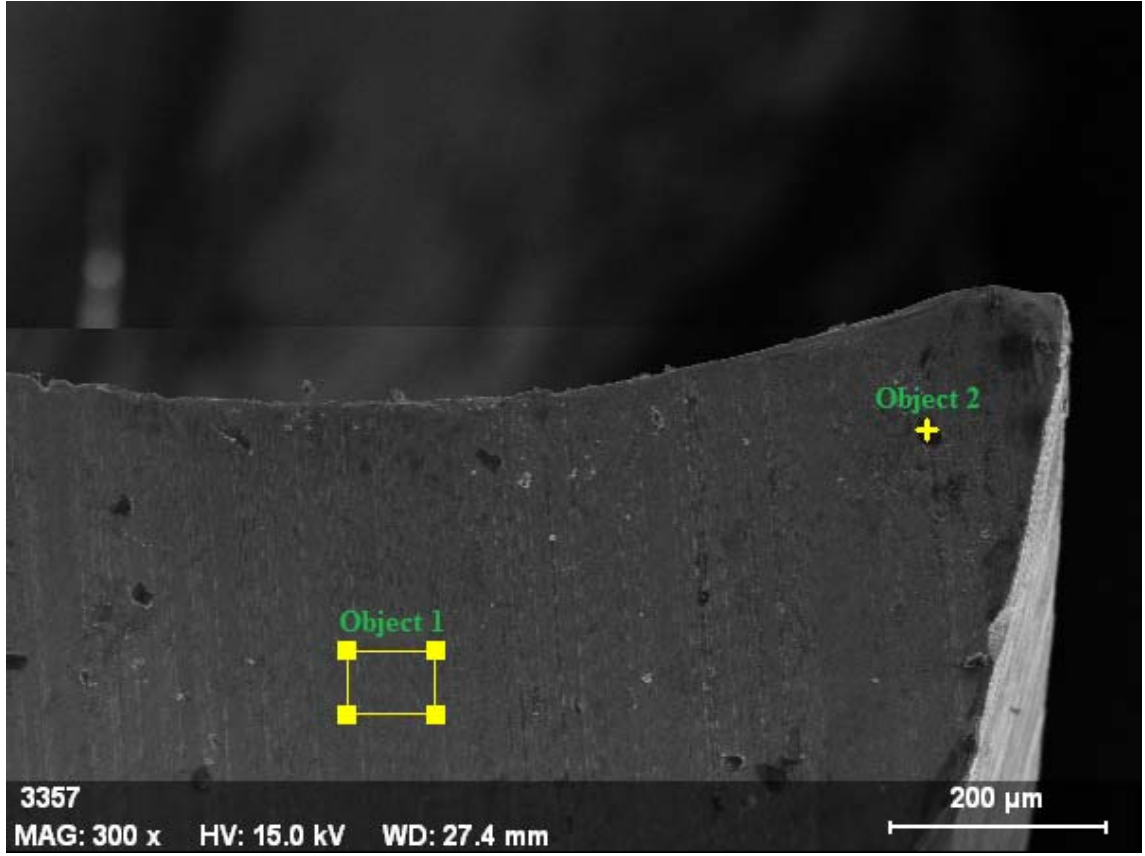
NOKTA		
Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,01	0,02
Karbon	5,30	14,04
Oksijen	23,32	46,37
Silisyum	0,13	0,15
Krom	1,76	1,07
Demir	65,62	37,38
Molibden	1,91	0,63
Tungsten	1,95	0,34

Şekil 5.17. Bor pentahidrat tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu



NOKTA 1			NOKTA 2		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,01	Bor	0,00	0,02
Karbon	6,34	22,08	Karbon	2,67	11,74
Oksijen	5,58	14,58	Oksijen	0,02	0,07
Vanadyum	1,44	1,18	Krom	3,55	3,60
Krom	3,43	2,76	Demir	86,99	82,19
Demir	77,64	58,13	Molibden	1,71	0,94
Tungsten	5,56	1,27	Tungsten	5,05	1,45

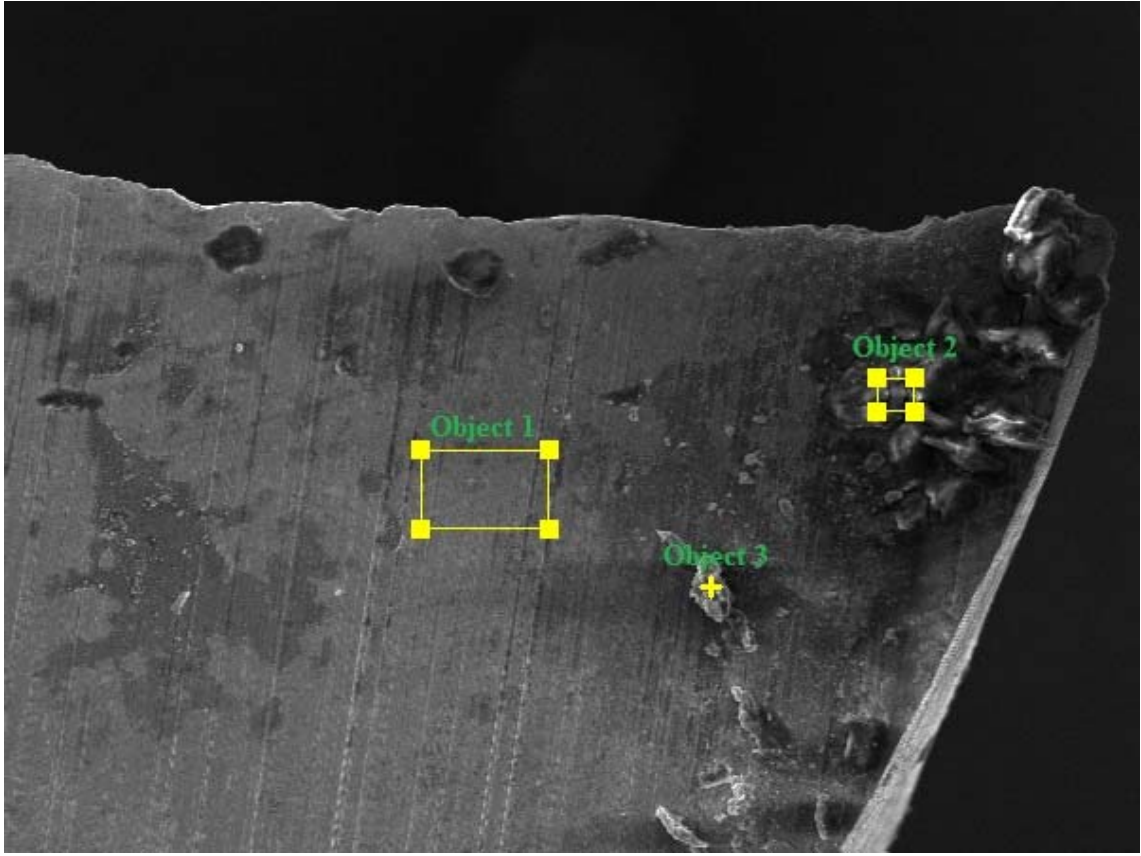
Şekil 5.18. Borik asit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları



NOKTA 1			NOKTA 2		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,02	Bor	0,00	0,01
Karbon	3,18	14,05	Karbon	19,23	47,02
Oksijen	0,00	0,01	Oksijen	3,01	13,82
Silisyum	0,86	1,42	Sodyum	0,90	1,15
Vanadyum	1,47	1,53	Vanadyum	0,23	0,14
Krom	3,35	3,41	Krom	0,54	0,30
Demir	80,04	75,96	Demir	71,22	37,46
Molibden	1,53	0,85	Molibden	0,33	0,10
Tungsten	9,57	2,76	Tungsten	0,01	0,00

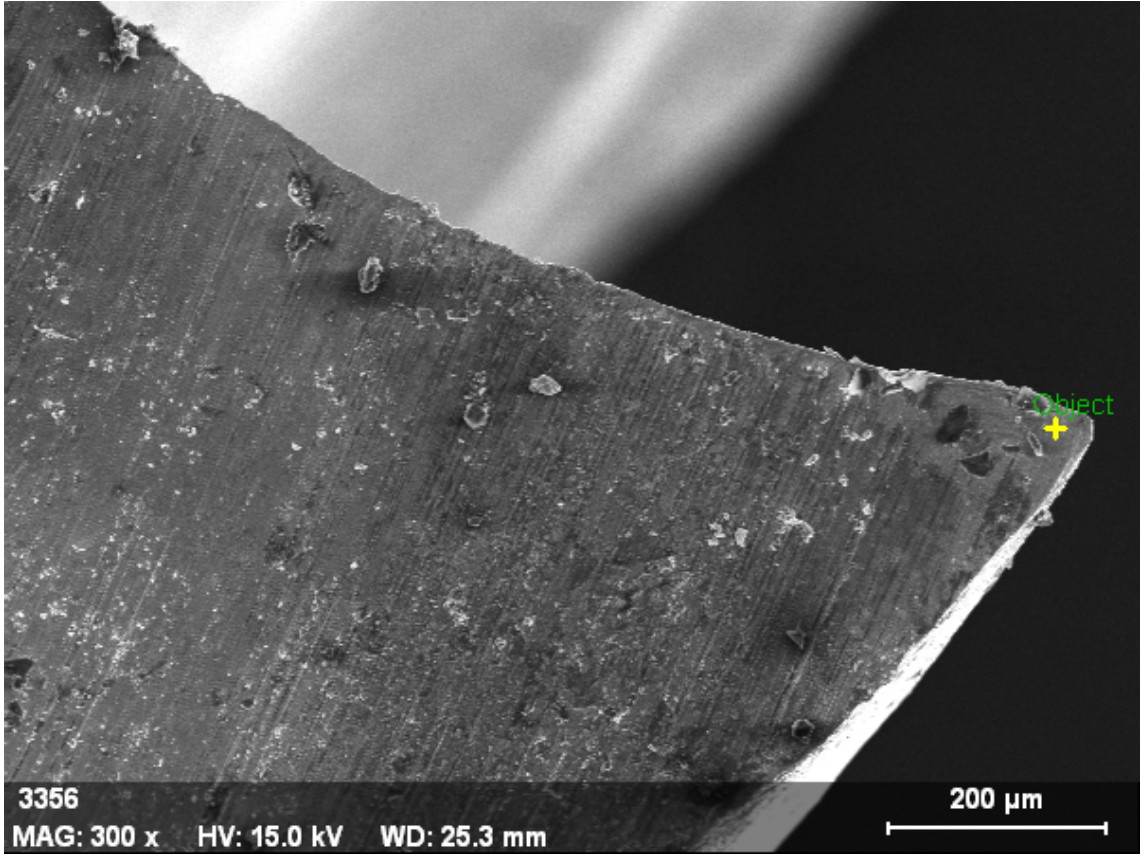
Şekil 5.19. Borik asit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 2 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları

Bor oksit tozu kullanılarak yapılmış frezeleme işlemi sonrasında takım yüzeyinden alınan görüntüler Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir. Bu takımın uç kısımlarında büyük oranlarda topaklanmış ve sinterlenmiş (basınç ve sıcaklık etkisiyle) tabakalar görülmektedir. Kesici takımın özellikle ucunda biriken bu kalıntılar takım üzerinde büyük dengesizlikler yaratarak basma yönündeki Fz kuvvetinde artışa neden olmuştur. Ayrıca kesme ağzı incelendiğinde küçük aşınma çentikleri görülmekle beraber aşınma miktarı azdır. Talaş yüzeyi incelendiğinde ise yer yer geniş ve derin çizikler görülmektedir. Bu çiziklere bor oksit tozunun işlem sırasında iş parçası ile tepkimeye girerek yüzeyde oluşturduğu aşınma kalıntılarının sebep olduğu düşünülmektedir. Bu aşınma kalıntıları ve toz partikülleri iş parçası yüzeyinde de etkili olmuştur (Şekil 5.7). Ancak iri parçalı tanelerin yumuşak iş parçasına gömülmesi ve küçük partiküllerinde yüzeyde taşlamaya benzer bir etki yapması sonucunda yüzeyde ki bu olumsuz etki azalmıştır. Kesici takımın yüzeyindeki partiküllerden alınan EDS analizleri sonucunda bor oksit tozu kalıntıları görülmektedir. Aynı deneylerde iş parçası yüzeylerinde de benzer kalıntılar elde edilmiştir. Bor oksit tozlarını eleme işlemi öncesinde yapılan gözle ve elle yapılan muayenesinde nem ve topaklanma olduğu tespit edilmiştir. Eleme işlemi sırasında da bu durum nedeniyle toz boyutlarının küçültülmesinde sıkıntılar yaşanmıştır. Nemlenmenin de etkisiyle katı ve sıvı destekli bir yağlayıcı etki oluştuğu için bor oksit tozlarının olumsuz etkisi bir miktar azalmıştır. Diğer numunelerle karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğü değerleri kısmen iyi olarak gözükse de nemden dolayı oluşan topaklanma ve takıma transfer olarak yapışan partiküllerin etkisiyle kesme kuvvetleri açısından takımda büyük zorlanmalar oluşmuştur.



NOKTA 1			NOKTA 2			NOKTA 3		
Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom	Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,00	0,02	Bor	0,0	0,00	Bor	0,00	0,01
Karbon	4,61	19,01	Karbon	43,90	54,16	Karbon	46,75	55,47
Oksijen	0,78	2,41	Oksijen	47,52	44,01	Oksijen	48,66	43,35
Krom	4,21	4,01	Demir	6,15	1,63	Demir	4,59	1,17
Demir	76,03	46,00	Tungsten	2,42	0,20			
Molibden	1,48	0,77						
Tungsten	8,21	2,21						

Şekil 5.20. Bor oksit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının 3 farklı noktasındaki EDS analizi sonuçları



NOKTA		
Element	% Ağırlık	% Atom
Bor	0,01	0,03
Karbon	2,05	8,84
Oksijen	0,33	1,07
Silisyum	0,00	0,00
Vanadyum	0,89	0,91
Krom	3,35	3,34
Demir	91,87	85,36
Molibden	0,08	0,04
Tungsten	1,43	0,4

Şekil 5.21. Bor oksit tozuyla işlemede kullanılmış freze takımının EDS analizi sonucu

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada AISI 1020 çeliğinin frezelenmesinde katı yağlayıcı olarak bor içerikli tozların kullanılması ve etkileri araştırılmıştır. Bu tozların kullanılması sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin anlık değişimi, iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ve kesici takımlarda meydana gelen aşınma özellikleri incelenmiştir. Yapılan araştırma ve deneylerde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Düşük karbonlu olan ve herhangi bir alaşım elementi içermeyen AISI 1020 çeliği kolay işlenebilir bir malzemedir.
2. Deneylerde kuru kesme, etidot-67 ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), bor pentahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), borik asit (H_3BO_3) ve bor oksit (B_2O_3) gibi beş farklı kesme ortamı incelenmiştir. Tozlar ticari olarak satın alınmış halde maksimum $60\mu\text{m}$ boyutunda olacak şekilde elenmiştir. Bu tozlarının katı yağlayıcı olarak kullanılması sonrasında iş parçasının ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve maksimum yüzey pürüzlülüğü (R_z) değerleri kesme boyundan bağımsız olarak değişmeden kalmıştır. Sadece etidot-67 tozunda kesme boyu değiştikçe yüzey pürüzlülüğü değerlerinde yaklaşık 1.5-2 kat arasında dalgalanmalar gözlenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri etidot-67 tozunun kullanıldığı kesme şartlarında oluşmuştur. Bunu kuru kesme ve diğer yağlayıcı olarak kullanılan tozlar takip etmiştir. Bor pentahidrat, bor oksit ve borik asit tozlarının katı yağlayıcı olarak kullanılmasında kesme boyunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ki iyileşmenin daha verimli olacağı sonucuna varılmıştır.
3. Kesme kuvveti değerleri açısından bakıldığında en iyi yağlayıcı etki borik asit ve bor pentahidrat olarak gözükmektedir. Özellikle bu iki tozun kullanıldığı işlemlerde kesme kuvvetinin yaklaşık değerlerde değişmeden seyretmesi tercih

sebebi olabilir. İlerleme yönündeki kuvvet ve basma kuvvetinin her ikisi birden dikkate alındığında kuru kesmenin en yüksek kuvvet değeri sonuçları verdiği söylenebilir. Burada etidot-67' nin kesme kuvveti değerlerinin büyük dalgalanmalar göstermesi ve bor oksitin de ilerleme yönünde kuvvet değerlerinin artırıcı etkisi olumsuz sonuçlar olarak tespit edilmiştir.

4. AISI 1020 çeliğinin farklı bor içerikli katı yağlayıcılar kullanılarak yapılan frezeleme işleminden sonra kesici takımların aşınmaları mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda beklenildiği üzere genel aşınma mekanizmasının abraziv aşınma olduğu tespit edilmiştir. Bazı numunelerde yağlayıcı olarak kullanılan tozların ve işlem sırasında oluşan çeşitli demir oksitlerin etkisiyle aşınma şiddeti artmıştır. En büyük aşınma değeri takım ağzı kesici formunun neredeyse tamamen kaybolduğu etidot-67 ile yağlamada görülmüştür. Bunu kuru kesme işlemi yapılmış takım ağzı takip etmiştir. Bor pentahidrat, borik asit ve bor oksit tozlarının katı yağlayıcı olarak kullanılması durumunda ana kesme ağzında az miktarda aşınmalar görülmüştür. Takım arka yüzeyinde de abraziv etkiler gözlemlenmiştir. Kuru kesme şartlarında iş parçasından takıma malzeme transferi görülürken bu durum yağlayıcıların kullanıldığı kesme şartlarında çok daha az bir oranda görülmüştür.
5. İş parçalarının yüzeylerinin işlem sonrasında temizlenmesi veya silinmesi gibi herhangi bir ihtiyaç oluşmamıştır. Sadece etidot-67 tozunun kullanılması durumunda yüzeyde yer yer camlaşma şeklinde kalıntılar görülmüştür. Deneyler sonrasında kullanılan tozlar rahatlıkla talaş kalıntılarında temizlenip tekrar kullanılmak üzere saklanmıştır. Kullanılan tozlar, katı yağlayıcı olarak kullanıldıktan sonra içerlerindeki talaş parçalarından eleme ve/veya mıknatıs ile talaş uzaklaştırma işlemlerinden vb. geçirilerek tekrar kullanılabilir niteliktedir. Sıvı yağların aksine depolanması kolaydır.
6. Bu çalışma sonucunda bor pentahidrat, borik asit ve bor oksit tozlarının kullanılmasıyla kesme işleminde kuvvet, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınma değerlerinde azalmalar olacağı tespit edilmiştir. Etidot-67 tozu katı

yağlayıcı olarak kullanıldığında kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca işlenmiş numune yüzeyinde kalıntılar bırakmıştır. Bu nedenle etidot-67 tozunun katı yağlayıcı olarak kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

7. Deneyler ve incelemeler sonrasında çeşitli parametrelere göre oluşturulan Çizelge 6.1’deki değerlendirme tablosundan da görülebileceği gibi frezeleme işleminde kullanılan bor içerikli tozlardan borik asit, bor pentahidrat ve bor oksit tozlarının katı yağlayıcı olarak kullanılmasında verimli sonuçlar elde edilmiştir. Etidot-67 tozunun frezeleme işleminde katı yağlayıcı olarak kullanılması durumunda, kuru kesmeye göre olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle bu tozun katı yağlayıcı olarak kullanılması uygun değildir.

Çizelge 6.1. Bor içerikli tozların katı yağlayıcı olarak kullanılmasının değerlendirilmesi

	Kuru Kesme	Borik Asit	Bor Oksit	Bor Penta Hidrat	Etidot-67
F_Z Kesme Kuvveti	✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓
F_Y Kesme Kuvveti	✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓	✓✓✓✓	✓
R_Z Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü	✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓
R_a Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü	✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓
Kesici Takımlardaki Aşınma	✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓
Toplam Değerlendirme	✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓

KAYNAKLAR DİZİNİ

Babu, B. G., Selladurai, V. and Shanmugam R., 2008, Analytical modeling of cutting forces of end milling operation on aluminum silicon carbide particulate metal matrix composite material using response surface methodology, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 3, 5-18.

Bhushan, B., 2001, Modern tribology hanbook, CRC Press, 1, 1690 p.

Booser, R., 1983, Handbook of lubricant, CRC Press, 645 p.

Çakır, M. C., 2006, Modern talaşlı imalatın esasları, Dora Yayıncılık, 2. Baskı, 267 s.

Çakır, M. C., 2010, Modern talaşlı imalat yöntemleri, Dora Yayıncılık, 2. Baskı, 535 s.

Çaydaş, U., 2002, Wedm yönteminde işlem parametrelerinin mikro yapı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, 95 s.

Erdemir, A., 1995, Lubrication with boric acid additives, United States Patent No.5, 431, 830.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Guo, M., Liu, A., Zhao, M., Hu, H., and Wang, Z., 2008, Microstructure and wear resistance of low carbon steel surface strengthened by plasma melt injection of SiC particles, *Surface and Coating Technology*, 202, 4041-4046.

Kılıç, A. M., Kılıç, Ö., Andaç, İ. and Çelik, A. G., 2009, Türkiye bor madenciliği, dünya bor piyasasındaki durumu ve ekonomik açıdan önemi, IV. Uluslar arası Bor Sempozyumu, Eskişehir.

Kıraç, N., 2011, Teknik resim, Dora Basın Yayın, 4. Basım, 254 s.

Kimura, Y., Wakabayashi, T., Okada, K., Wada T., and Nishikawa, H., 1999, Boron nitride as lubricant additive, *Wear*, 232, 199-206.

Krishna, P. V. and Rao, D. N., 2008, Performance evaluation of solid lubricants in terms of machining parameters in turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 1131-1137.

Krishna, P. V., Srikant, R. R. and Rao, D. N., 2010, Experimental investigation on the performance of nanoboric acid suspensions in SAE-40 and coconut oil during turning of AISI 1040 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50, 911-916.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Lovell, M. R., Kabir, M. A., Menezes, P. L. and Higgs C. F., 2010, Influence of boric acid additive size on green lubricant performance, Philosophical Transactions of the Royal Society, 368, 4851-4868.

Mang, T. and Dresel, W., 2007, Lubricants and lubrication, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 837 p.

Martin, J. M., and Ohmae, N., 2008, Nanolubricants, John Wiley and Sons Ltd., 234 p.

Mukhopadhyay, D., Banerjee, S. and Reddy, N. S. K., 2007, Investigation to study the applicability of solid lubricant in turning AISI 1040 steel, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 129, 520-526.

Rao, D. N. and Krishna, P. V., 2007, The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48, 107-111.

Rao, P. V. and Dilbag, S., 2007, Performance improvement of hard turning with solid lubricants, International Journal of Manufacture Technology, 38, 529-535.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Reddy, N. S. K. and Rao, P. V., 2005, Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46, 189-198.

Roskill, 2002, The economics of boron 10th. edition, 2002 Roskill Information Services Ltd. 236 p.

Sağlam, H., 2001, Frezelemede kesme parametreleri ile kesme kuvvetlerinin değişimi ve bunların takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi, Selçuk-Teknik Online Dergisi 1, 3.

Schneider, G., 2002, Cutting tool applications, GMRS Associates, 243 p.

Sliney, H. E., 1982, Solid lubricant materials for high temperatures-a review, Tribology International, 15, 303-315.

Şahin, Y., 2000, Talaş kaldırma prensipleri 1, Nobel Yayıncılık, 1, 562 s.

Şahin, Y., 2001, Talaş kaldırma prensipleri 2, Nobel Yayıncılık, 2, 490 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Taylan, F., 2009, Sert malzemelerin frezelenmesinde takım aşınma davranışlarının belirlenmesi, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 223 s.

Y. Işık, M.C. Çakır, 2000, Takım çeliklerinin talaşlı imalatında kesme kuvvetleri ile takım ömrü arasındaki ilişkinin deneysel olarak incelenmesi, 9. Uluslararası Makine Tasarımı ve Üretimi Kongresi, ODTÜ, Ankara.