

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MADENCİLİK SEKTÖRÜNE YÖNELİK ÇELİK, POLİMER VE SERAMİK İÇERİKLİ HİBRİT
AŞINMA PLAKALARININ GELİŞTİRİLMESİ VE SAHA UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe DOKUZ

NİSAN 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MADENCİLİK SEKTÖRÜNE YÖNELİK ÇELİK, POLİMER VE SERAMİK İÇERİKLİ
HİBRİT AŞINMA PLAKALARININ GELİŞTİRİLMESİ VE SAHA UYGULAMALARI**

Tuğçe DOKUZ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12/03/2024

Tezin Savunma Tarihi : 22/04/2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Madencilik Sektörüne Yönelik Çelik, Polimer ve Seramik İçerikli Hibrit Aşınma Plakalarının Geliştirilmesi ve Saha Uygulamaları” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu yüksek lisans çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Çolakoğlu Mühendislik Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. üniversite – sanayi iş birliği çerçevesinde yürütülen 3220884 No’lu ve Madencilik Sektöründe Kullanılmak Üzere Yüksek Aşınma Dirençli ve Uzun Ömürlü Hibrit Aşınma Plakalarının ve Bunlar İçin Aşınma Takip Sistemlerinin Geliştirilmesi isimli 1501 – TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Katkısı için TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK’e, Doç. Dr. Murat SEKBAN’a ve Dr. Öğr. Üyesi Onur Tolga OKAN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca yardım ve ilgilerini esirgemeyen Çolakoğlu Mühendislik Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. ailesine teşekkür ederim. Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Tuğçe DOKUZ
Trabzon, 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Madencilik Sektörüne Yönelik Çelik, Polimer ve Seramik İçerikli Hibrit Aşınma Plakalarının Geliştirilmesi ve Saha Uygulamaları” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/04/2024

Tuğçe DOKUZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Madencilik Sektöründe Karşılaşılan Aşınma Problemleri	4
1.3. Madencilik Sektöründe Yaygın Olarak Kullanılan Aşınma Astarları.....	6
1.3.1. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler	7
1.3.2. Seramikler	9
1.3.3. Polimer Malzemeler	9
1.3.4. Hibrit Astarlar.....	11
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	12
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	17
2.1. Aşınma Plakalarını ve Aşındırıcı Karışımı Oluşturan Malzemeler.....	17
2.1.1. Hardox 450 ve Hardox 500	17
2.1.2. Alümina (Alüminyum oksit, Al_2O_3).....	19
2.1.3. Neopren	21
2.1.4. Aşındırıcı Karışımı Oluşturan Malzemeler	24
2.2. Hibrit Aşınma Plakalarının Hazırlanması	26
2.2.1. Hardox 450 + Alümina, Hardox 500 + Alümina Hibrit Aşınma Plakası	26
2.2.3. Hardox 450 + Alümina Katkılı Neopren ve Hardox 500 + Alümina Katkılı Neopren Hibrit Aşınma Plakası.....	28
2.3. Aşınma Deneyleri.....	28
2.3.1. Aşınma Tamburu Test Cihazı.....	28
2.3.2. Darbeli Abrazif Aşınma Test Prosedürleri	30
2.3.3. Darbeli Abrazif Aşınması Testleri Sonrasında Kütle Kaybı ve Yüzey İncelemeleri	34
2.4. Saha Çalışmaları.....	34

2.4.1.	Eti Bakır Siirt Madenköy İşletmesi Saha Testleri	35
2.4.2.	Demir Export İspir Bakır Çinko İşletmesi Saha Testleri.....	35
2.4.3.	Batısöke Çimento Sanayi Saha Testleri	37
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	39
3.1.	Doğal Çakıl Taşının XRD Analizi	39
3.2.	Plakalarda Meydana Gelen Aşınma Miktarı ve Aşınma Yüzeylerinin Görünümü.....	40
3.3.	Saha Çalışmalarına Ait Bulgular	51
4.	SONUÇLAR.....	58
5.	ÖNERİLER.....	60
6.	KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MADENCİLİK SEKTÖRÜNE YÖNELİK ÇELİK, POLİMER VE SERAMİK İÇERİKLİ
HİBRİT AŞINMA PLAKALARININ GELİŞTİRİLMESİ VE SAHA UYGULAMALARI

Tuğçe DOKUZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK
2024, 64 Sayfa

Bu çalışmada madencilik sektöründe kullanılan ekipmanların aşınma bölgelerine kaplanan çelik esaslı aşınma plakalarına alternatif olarak hibrit aşınma plakaları tasarlanmıştır. Hardox 450 ve Hardox 500 malzemeleri referans aşınma plakası olarak seçilmiştir. Bu çelik plakalar alümina ve alümina katkılı neopren malzemeler ile kombinlenerek hibrit aşınma plakaları geliştirilmiştir. Aşınma plakalarının aşınma performanslarını karşılaştırmak için laboratuvar ve saha koşullarında darbeli abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testlerinde aşındırıcı malzeme olarak doğal çakıl taşı ve bakır-çinko cevheri, saha testlerinde ise farin malzemesi, bakır ve bakır-çinko cevherleri kullanılmıştır. Yapılan laboratuvar test sonuçlarına göre aktarım elemanlarında doğal çakıl taşı ve bakır-çinko cevheri için sırasıyla Hardox 500 ve Hardox 450 + alümina katkılı neopren aşınma plakaları kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Saha testi sonuçlarına göre ise aktarım elemanlarında farin malzemesi ve bakır cevheri için Hardox 450 + alümina, bakır-çinko cevheri için Hardox 450 + alümina + neopren aşınma plakası kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Laboratuvar ve saha testleri, her malzemenin aşınma türü ve şiddetinin farklılık sergilediğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar malzeme özelliklerine ve gözlemlere dayandırılarak açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Aşınma Plakaları, Hibrit Aşınma Plakaları

Master Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT AND FIELD APPLICATIONS OF STEEL, POLYMER AND CERAMIC HYBRID WEAR LINERS FOR MINING INDUSTRY

Tuğçe DOKUZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Gençğa PÜRÇEK
2024, 64 Pages

In this study, hybrid wear liners were designed as alternatives to steel-based wear plates used in the mining sector. Hardox 450 and Hardox 500 materials were selected as the reference wear liners. These steel plates were combined with alumina and alumina-modified neoprene materials to develop hybrid wear liners. Impact abrasive wear tests were conducted in laboratory and field conditions to compare the wear performance of the wear plates. Natural gravel and copper-zinc ore were used as abrasive materials in the laboratory tests, while raw meal material, copper, and copper-zinc ore were used in the field tests. According to the laboratory test results, it was determined that Hardox 500 and Hardox 450 + alumina-modified neoprene wear liners were suitable for natural gravel and copper-zinc ore in transfer elements, respectively. According to the field test results, it was found that Hardox 450 + alumina wear liners were suitable for raw meal material and copper ore in transfer elements, while Hardox 450 + alumina + neoprene wear liners were suitable for copper-zinc ore. Laboratory and field tests showed that each material exhibited different types and degrees of wear. The results obtained were explained based on material properties and observations.

Key Words: Wear, Wear Liners, Hybrid Wear Liners

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Örnek bir transfer ekipmanına kaplanan aşınma astarları	3
Şekil 2.	Etibakır Giresun Lahanos işletmesinde bulunan ve kalıcı deformasyona uğramış değirmen besleme şutu	5
Şekil 3.	Örnek şut üzerine yerleştirilmiş hibrit ve tekil aşınma plakaları örnekleri	6
Şekil 4.	Hardox 450 ve Hardox 500 Aşınma Plakası: (a) genel boyutları ve (b) imalat sonrası görüntüsü.....	18
Şekil 5.	Hardox 450 + alümina ve Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasını oluşturan metal matris.....	18
Şekil 6.	Hardox 450 + alümina katkılı neopren ve Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakalarını oluşturan metal matris	19
Şekil 7.	Hekzagonal geometriye sahip alümina numune ve boyutları	20
Şekil 8.	Öğütülmüş alümina tozlar	20
Şekil 9.	Kauçuk hamur makinesi ile alümina tozlarının kauçuk hamuruna eklenmesi.....	22
Şekil 10.	Alümina katkılı neopren.....	23
Şekil 11.	Altıgen çıkıntılara sahip alümina katkılı neopren plakalar	23
Şekil 12.	Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan doğal çakıl taşları	24
Şekil 13.	Rigaku SmartLab X-ışını difraktometresi	25
Şekil 14.	Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan bakır-çinko cevherleri	25
Şekil 15.	Hardox 450 + alümina ve Hardox 500 + alümina aşınma plakalarının imalat aşamaları.....	27
Şekil 16.	Hardox 450 ve alümina katkılı neopren hibrit ve Hardox 500 ve alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakası: (a) geometrik birleşiminin şematik gösterimi ve (b) imalat sonrası görüntüsü	28
Şekil 17.	Aşınma tamburu test cihazı	29
Şekil 18.	Aşınma tamburu test ekipmanında darbeli abrazif aşınmayı temsil etmek amacıyla kullanılan kaldıraçlar.....	30
Şekil 19.	Referans ve hibrit aşınma plakaları: (a) RAP.01-RAP.02, (b) HAP.01-HAP.03 ve (c) HAP.02-HAP.04	31
Şekil 20.	Hassas terazi ile referans ve hibrit aşınma plakalarının test öncesi ağırlık ölçümü	32
Şekil 21.	Darbeli abrazif aşınma testi sırasında aşındırıcı karışımın tambur içindeki hareketi	34

Şekil 22.	Saha çalışmalar kapsamında transfer şutunun (a) sol bölgesine yerleştirilen Hardox 450 referans aşınma plakası ve (b) sağ bölümüne yerleştirilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakası	35
Şekil 23.	Demir Export İspir işletmesinde bulunan SAG değirmen içerisine bakır – çinko cevheri besleme şutu aşınma durumu	36
Şekil 24.	Demir Export İspir işletmesinde bulunan SAG değirmen besleme şutuna Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakalarının montajı	37
Şekil 25.	Batisöke Çimento Sanayinde bulunan farin değirmeni içerisinde Hardox 450 + alümina aşınma plakalarının montajı	38
Şekil 26.	Doğal çakıl taşı tozunun XRD analiz sonuçları	39
Şekil 27.	RAP.01 referans aşınma plakasının aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri: (a) genel görünüm, (b) 1. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü ve (c) 2. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü	41
Şekil 28.	HAP.01 hibrit aşınma plakasının aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri: (a) genel görünüm, (b) 1. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü ve (c) 2. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü	42
Şekil 29.	HAP.02 hibrit aşınma plakasının aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri: (a) genel görünüm, (b,c) 1. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü ve (d,e) 2. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü	44
Şekil 30.	Alümina katkılı neopren kauçuk numunenin aşınma sonrası görüntüsü ve kauçuğu yırtarak dışarı çıkan alümina parçacıklarının bıraktığı boşluklar	46
Şekil 31.	Hardox 500 ve alümina malzemelerini birleştiren seramik esaslı epoksi yapıştırıcının ara yüzeyden aşınarak ayrılması sonucu oluşan boşluklar	47
Şekil 32.	Aşındırıcı malzemenin 0, 1 ve 24 saatlik test sonrası durumu	48
Şekil 33.	Etibakır Siirt Madenköy işletmesine ait pantolon şutta meydana gelen aşınma görüntüsü	51
Şekil 34.	Etibakır Siirt Madenköy işletmesine ait pantolon şuta montaj edilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasında meydana gelen yapışma problemi	52
Şekil 35.	Demir Export İspir işletmesinde bulunan SAG değirmen besleme şutuna ait teknik resim	53
Şekil 36.	Demir Export İspir işletmesinde SAG değirmen besleme şutuna montaj edilen Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakalarının 7. gün sonundaki durumu	54
Şekil 37.	Demir Export İspir işletmesinde SAG değirmen besleme şutuna montaj edilen Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakalarının 15. gün sonundaki durumu	54

Şekil 38.	Batisöke Çimento Sanayi işletmesinde bulunan farin değirmenin şematik gösterimi ve en çok aşınan bölgeye ait görüntü.....	55
Şekil 39.	Batisöke Çimento Sanayi işletmesinde bulunan farin değirmeni içerisine yerleştirilen yüksek mangalı çelik + alümina hibrit aşınma plakasının 3 ay sonraki görüntüsü.....	56
Şekil 40.	Batisöke Çimento Sanayi işletmesinde bulunan farin değirmeni içerisine yerleştirilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasının 5 ay sonraki görüntüsü	57



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Hardox çeliklerinin kimyasal bileşimleri	8
Tablo 2. Hardox 450 malzemesinin kimyasal bileşimi	17
Tablo 3. Hardox 500 malzemesinin kimyasal bileşimi	17
Tablo 4. Alümina numunelerin temel özellikleri.....	19
Tablo 5. Neoprenin kimyasal bileşimi.....	21
Tablo 6. Çalışma kapsamında kullanılan neoprene ait temel özellikler	21
Tablo 7. Demir Export İspir işletmesine ait bakır – çinko cevherinin kimyasal bileşimi	26
Tablo 8. Darbeli abrazif aşınma testine tabi tutulan Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarına ait kodlar	31
Tablo 9. Darbeli abrazif aşınma testine tabi tutulan Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarına ait kodlar	31
Tablo 10. Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için yapılan darbeli abrazif aşınma test prosedürleri.....	33
Tablo 11. Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için yapılan darbeli abrazif aşınma test prosedürleri.....	33
Tablo 12. Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testleri sonrasında meydana gelen kütle değişimleri	44
Tablo 13. Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testleri sonrasında meydana gelen kütle değişimleri	49
Tablo 14. Batisöke Çimento Sanayi işletmesine ait farin malzemesinin kimyasal bileşimi	56

1. GENEL BİLGİLER

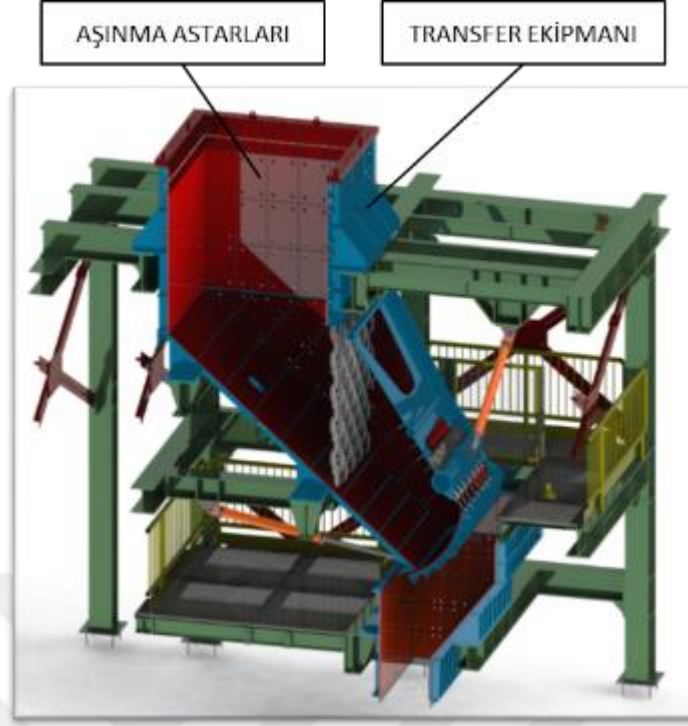
1.1. Giriş

Madencilik sektöründe yer altı ve yer üstü madenlerinden çıkarılan cevherlerin bir yerden başka bir yere aktarılması ve işlenmesi sırasında ekipmanlarda ciddi seviyede aşınma meydana gelmektedir. Cevherlerin ekipmanlar ile arasındaki temastan kaynaklanan sürtünmeler, çalışma ve çevre koşulları hem aşınma tipini hem de aşınma seviyelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca cevherlerin taşıma, işleme ve aktarımı için kullanılan ekipmanlarda oluşan hasarlar ciddi maddi kayıplara sebep olmaktadır (Grasser vd., 2024; Chen vd., 2017). Meydana gelen bu kalıcı hasarlar sonucu ekipmanlarda gerçekleştirilen onarımlar veya hasarlı ekipmanın yenisiyle değiştirilmesi sırasında tesisin üretime ekstra ara vermesine sebep olmaktadır. Maden tesislerinde, genel bakım rutinlerinde bulunan planlı duruşların haricinde üretimin ekstra durdurulması ciddi maddi kayıplara sebep olmaktadır. Planlı duruşlar makine/ekipman bakımı ve plaka değişimleri gibi gereksinimlerden dolayı yapılmaktadır. Plaka değişim süreleri üretici firmanın taahhüt ettiği sürelerle belirlenmektedir. Ancak bu sürelerin belirlenmesi kişiye bağlı teknik bilgi ve birikim esasına göre yapılmaktadır. Bilgi ve tecrübe esaslı yaklaşımlar plakaların aşınma durumunun tespiti için fikir verebilmekte ancak aşınmanın takibinin yapılmaması durumunda istenmeyen sonuçlara sebebiyet verebileceği düşünülmektedir. Mevcut olarak kullanılan bazı yazılım programları aracılığıyla daha önce testleri gerçekleştirilmiş cevherler üzerinden ömür tahminleri de yapılabilmektedir. SSAB firması tarafından geliştirilen WearCalc programı ile aşınma astarı ile kaplanacak ekipman için farklı aşınma astarlarının çalışma ömürlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Çolakoğlu Ar-Ge bünyesinde var olan aşınma servisi markası altında çeşitli aşındırıcı karışımlar ve aşınma astarları ile abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmektedir. Bu test sonuçları incelendiğinde aşındırıcı karışımların plakalar üzerinde oluşturduğu aşınma etkilerinin aynı cevherler arasında bile farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu içerik farklılıkları plakalarda meydana gelecek aşınma türü ve şiddetinin önemli ölçüde etkilemektedir.

Maden tesisinin verimli bir şekilde üretimine devam edebilmesi için bu aşınma plakalarının uzun süre değiştirilmeden dayanabilmesi, üretime ekstra ara verilmesinin minimize edilebilmesi ve üretim sürekliliğinin sağlanabilmesi gerekmektedir. Örneğin

İngiltere'de yapılan bir çalışmaya göre altın madeninin verimli bir şekilde çalışabilmesi için 1 sene boyunca durmadan çalışması gerektiği bildirilmiştir (URL-1, 2019). Hem enerji tüketimi hem de yatırım maliyetinden kaynaklı bu ekipmanların uzun süreli korunması ve kesintisiz çalışması çok önemlidir. Yapılan bazı araştırmalar sonucu madencilik sektörünün toplam enerji tüketiminin, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %6,2'sini oluşturduğu bildirilmiştir. Madencilikte tüketilen enerjinin ise %40'ı sürtünme-aşınma kayıplarından meydana gelmektedir. Bu kayıpların %27'si parça değişimi ve aşınan ekipmanların yeniden üretimi, %33'ünü ise bakım faaliyetleri oluşturmaktadır. Sürtünmeden kaynaklı aşınmaların gelişen yeni teknolojilerle uzun vadede %30 oranında azaltılmasıyla küresel çapta yıllık 62.200 milyon Euro kazanç, 550 TWh daha az enerji tüketimi ve 290 milyon ton CO₂ emisyonu azalması beklenmektedir (Holmberg vd., 2017).

Cevherlerin aktarımı veya işlenmesi sırasında ekipman ve cevherler arasında oluşan temas sonucunda en sık görülen aşınma mekanizmaları darbeli ve kaymalı abrazif aşınmalardır. Özellikle çalışma koşulları, cevherlerin mineralojik yapısı ve içeriği aşınmanın şiddetini arttırmaktadır. Bunlara ek olarak ortamda bulunan su ve hava etkisi ile içeriğinde sülfür mineralinin bol olduğu cevherlerde asit maden drenajı (AMD) meydana gelmektedir (Akaryalı vd., 2018). AMD ekipmanlarda darbeli ve kaymalı abrazif aşınmaya ek olarak korozyonun oluşmasına sebep olmaktadır. Tüm bu aşınma mekanizmaları ekipmanlarda hızlı bir şekilde kalıcı olarak deforme etmekte ve ekipmanları kullanılmaz hale getirmektedir. Bu aşınmaların meydana getirdiği hasarları minimum seviyeye indirmek amacıyla Şekil 1'de gösterilen örnek bir transfer ekipmanındaki gibi ekipmanların aşınan yüzeylerine çeşitli koruyucu astarlar, plakalar veya kaplamalar uygulanmaktadır.



Şekil 1. Örnek bir transfer ekipmanına kaplanan aşınma astarları

Aşınma astarları ekipmanların aşınan bölgelerine ait aşınma türü, sıklığı ve yoğunluğu gibi parametreler doğrultusunda seçilmektedir. Bu astarları çok çeşitli malzemelerden üretilmektedir. Genelde astar malzemesi olarak yüksek manganlı çelikler, paslanmaz çelikler, Hardox çelikleri, çeşitli kauçuk türleri ve seramikler gibi malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin korozif aşındırıcı malzemenin transfer edildiği bir bölgede, gelen malzeme boyutu ve akış özelliklerine bağlı olarak, kauçuk veya seramik çeşitleri tercih edilebilmektedir (Chandasekaran, 2017). Başka bir örnek olarak, malzeme akışı esnasında ekipman yüzeyinde yapışma problemi olan bölgelerde paslanmaz çelik veya teflon gibi malzemeler, yüksek darbe etkisinin bulunduğu bölgelerde ise yüksek manganlı çelikler kullanılabilir. Madencilik sektöründe kullanılan ekipmanların çalışma ömrünün artırılması konusunda teknolojilerin gelişmesine paralel olarak dikkate değer yeni yaklaşımların ortaya konulduğu görülmektedir. Endüstriyel çalışmalar incelendiğinde yüksek manganlı çelik, kauçuk ve seramik malzemelerin kombinasyonları şeklinde hibrit aşınma plakaları üretildiği belirlenmiştir (URL-1, 2019; URL-2, 2024).

Bu tez çalışması kapsamında endüstride yaygın olarak kullanılan Hardox 450 ve Hardox 500 çeliği ile üretilmiş tekil aşınma plakalarının ve Hardox 450, Hardox 500, alümina (alüminyum oksit, Al_2O_3) ve neopren malzemelerinin kombinasyonu ile elde

edilmiş hibrit aşınma plakalarının laboratuvar ölçekli darbeli abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testlerinde aşındırıcı malzeme olarak doğal çakıl taşı ve bakır-çinko cevheri kullanılmıştır. Hardox 450 ve Hardox 500 malzemesi referans aşınma plakaları olarak kabul edilmiştir. Aşınma testleri aşınma tamburu test cihazında gerçekleştirilmiştir. Tekil ve hibrit aşınma plakalarının ağırlıkları test öncesi ve sonrası ölçülmüştür. Aşınma testleri sonrası tekil ve hibrit aşınma plakalarının ağırlık kayıplarına göre aşınmaya karşı dayanımları karşılaştırılmış ve plakaların aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Laboratuvar testlerine ek olarak Eti Bakır Siirt Madenköy İşletmesinde Hardox 450 ve Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakası, Demir Export İspir Bakır- Çinko İşletmesinde Hardox 450 + alümina + neopren ve Batisöke Çimento Sanayinde Hardox 450 + alümina ve yüksek manganlı çelik + alümina hibrit aşınma plakaları ile saha testleri gerçekleştirilmiştir. Hibrit aşınma plakalarının saha testlerinin gerçekleştirildiği işletmeler tarafından daha önce mevcut bölgelerde Hardox 450, Hardox 500, yüksek manganlı çelik, sert dolgu kaynağı ve kauçuk malzemelerinin tekil kullanımı ile oluşturulan aşınma plakaları kullanılmıştır. İşletmelerden alınan bilgilere göre tekil aşınma plakaları işletmelerin talep ettiği süreler boyunca çalışma ömrü sergileyememiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha testleri sonuçlarına göre hibrit aşınma plakalarının tekil plakalara kıyasla mevcut bölgelerde daha uzun süre aşınma dayanımı sergilediği tespit edilmiştir.

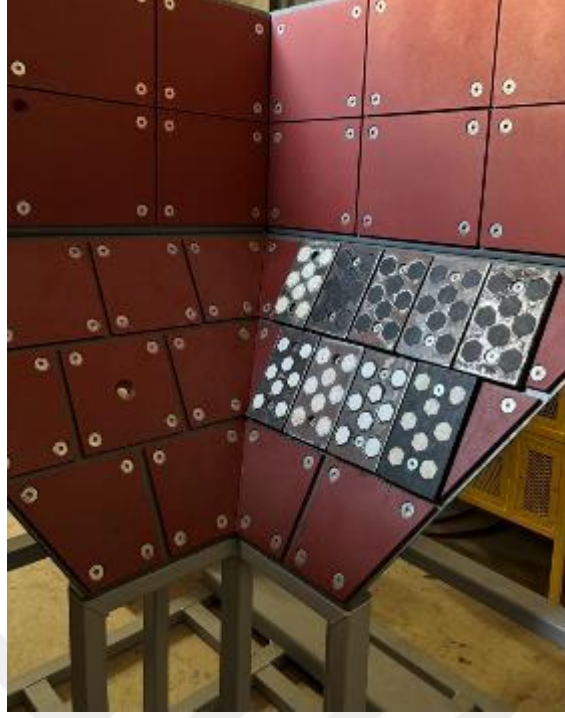
1.2. Madencilik Sektöründe Karşılaşılan Aşınma Problemleri

Madencilik sektöründen yer altı ve yer üstü ocaklarından çıkarılan cevherlerin işlenmesi ve aktarımı sırasında besleme şutları, aktarım olukları, değirmenler gibi çeşitli ekipmanlar kullanılmaktadır. Cevherler ile ekipmanların birbirleri ile teması sonucu ekipmanlarda çalışma ve çevre koşullarına bağlı olarak abrazif aşınmalar ve korozyon aşınmalar meydana gelmektedir. Aşınmalar zamanla ekipmanlarda kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Şekil 2’de bu duruma örnek olarak kalıcı deformasyona uğramış bir değirme besleme şutu örneği görülmektedir. Ekipmanların aldığı hasarlar sonucu kullanılmaz hale gelmesi işletme bakım maliyetlerini ciddi şekilde arttırmaktadır. Sadece ekipmanın değiştirilmesi değil ayrıca ekipmanın değiştirilmesi için geçen sürede tesisin durdurulması da bakım maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2. Etibakır Giresun Lahanos işletmesinde bulunan ve kalıcı deformasyona uğramış değirmen besleme şutu

Ekipmanlarda meydana gelen deformasyonların önüne geçerek ekipmanların çalışma ömürlerini ve tesis verimliliğini arttırmak, bakım maliyetlerini de bunlara bağlı olarak azaltmak amacıyla ekipman yüzeylerine aşınmaya dayanıklı malzemeler ile kaplama uygulamaları yapılmaktadır. Kaplama malzemesi olarak yüksek manganlı çelikler, yüksek kromlu çelikler, aşınmaya dayanıklı çelikler, seramikler ve polimerler malzemeler kullanılmaktadır. Aşınma astarı seçimi cevherlerin boyutu, mineralojik yapısı ve ekipmanların çalışma koşuluna göre yapılmaktadır. Endüstriyel çalışmalar incelendiğinde ekipman yüzeylerinde tercih edilen aşınma astarlarının genel olarak tekil formda kullanıldığı görülmektedir. Bazı altın ve bakır cevherinin çıkarıldığı maden ocaklarından alınan bilgilere göre, tekil aşınma plakalarının karma aşınma bölgelerinde tesisin durdurulmadan çalışması gereken süre boyunca etkin bir şekilde çalışmaya sergileyemediği bildirilmiştir. Bu gibi durumlarda, karma bölgelerde birden fazla aşınma türüne karşı dayanım sağlayabilen hibrit aşınma plakaları kullanılmaya başlanmıştır. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin, seramik ve polimer malzemelerin birbirleri ile kombine edilmesiyle oluşturulan hibrit aşınma plakaları ve tekil kullanılan aşınma plakalarının bir şut üzerinde gösterilebilmesi adına bir örnek çalışma hazırlanmıştır ve bu çalışma Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Örnek şut üzerine yerleştirilmiş hibrit ve tekil aşınma plakaları örnekleri

Hibrit ve tekil aşınma plakalarının aşınma performanslarını karşılaştırmak amacıyla yapılan sınırlı endüstriyel çalışmalar bulunmaktadır. Örnek olarak İngiltere’de bulunan bir madende yapılan çalışma incelendiğinde, tesisin verimli bir şekilde çalışması için ara vermeden geçen üretim süresinin en az bir yıl olması gerektiği bildirilmiştir. Mevcut bölgede aşınma astarı olarak aşınmaya dayanıklı kauçuk plaka kullanıldığında astarların 6 ile 8 hafta gibi bir sürede değiştiği bildirilmiştir. Çalışmalar hala devam etmekte olup manganlı çelik ve seramik malzemelerin birleşimi şeklinde kullanılan hibrit aşınma astarlarının 34 haftadan daha uzun süre kullanıldığı bildirilmiştir (URL-1, 2019). Bu ve benzeri çalışmalar devam etmekte olup kullanım alanına göre seçilecek en uygun aşınma astarları ile hem ekipmanların çalışma ömürlerini hem de kesintisiz çalışma süresini uzaması ile tesislerin verimini arttırmak mümkün hale gelmektedir.

1.3. Madencilik Sektöründe Yaygın Olarak Kullanılan Aşınma Astarları

Madencilik ve benzeri sektörlerde malzemelerin aktarımı ve işlenmesi sırasında ana ekipmanların zarar görmemesi için ekipman içerisine kaplanan aşınma plakalarında yaygın

olarak yüksek manganlı çelikler, Hardox çelikleri, paslanmaz çelikler, seramik ve polimer malzemeler kullanılmaktadır (Çıkıt, 2015; Ge vd., 2017).

1.3.1. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler

Yüksek manganlı çelikler, bir diğer adı ile Hardfield çelikleri, madencilik sektöründe yaygın olarak kullanılan bir çelik türüdür. Bu çelikler yüksek darbe dayanımı, mukavemet ve aşınmaya karşı direnci ile bilinmektedir. Hardfield çelikleri %11-14 Mn içeriğine sahiptir. Yapılan çalışmalar Hardfield çeliklerinin yapısında, yüksek darbe etkisi altında meydana gelen deformasyon ikizlenmesi ve dinamik deformasyon yaşanması gibi durumların çeliklerin yüzeyinde soğuk şekil değiştirme sertleşmesine sebep olduğu sonucuna varılmıştır (Wen vd., 2014; Tsuzaki vd., 1995; Karaman vd., 2000; Idrissi vd., 2010). Bu durum çelik yüzeylerinde aşınmaya dirençli ve sert bir yapı oluşmasıyla yüksek darbe etkisine maruz kalan bölgelerde kullanım avantajı sağlanmaktadır. Hardfield çeliklerinin kullanım alanlarına örnek olarak kırıcı ekipmanları verilebilir. Kırıcı ekipmanları madencilik sektöründe cevherlerin küçük parçalara ayırmasında veya öğütülmesinde kullanılmaktadır. Kırıcı çeşitleri cevherlerin yapısı, istenilen son ürün boyutu gibi parametrelere göre değişkenlik göstermektedir. Yüksek manganlı çelikler, kırıcıların iç yüzeylerine yani kırılan cevherin temas ettiği bölgelere yerleştirilerek ekipmanın kalıcı hasar almasını engellemektedir. Bir başka örnek olarak ekskavatör dişleri ve kazıcı uçlarda kullanılmaktadır. Bu çeliklerin yüksek darbe ve aşınma dayanımı sert kayalar ve cevherlerle temasında mevcut bölgelerin çalışma ömrünü uzatmaktadır (Çıkıt, 2015).

Yüksek kromlu çelikler, madencilik sektöründe çeşitli uygulamalarda kullanılan bir malzeme türüdür. Bu çeliklerin korozyon direnci, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı özelliklerine sahip olması, bu etkilerin görüldüğü bölgelerde tercih edilmektedir (Sun, 2004; Pokusová, 2015; Marcela vd., 2014). Yüksek kromlu çeliklerin madencilik sektöründeki kullanımının örnek olarak cevherlerin aktarılması veya işlenmesi sırasında korozif aşınmanın görüldüğü bölgeler örnek verilebilir. Nemli cevherlerin aşınma plakalarının yüzeyine tutunarak birikmesi sonucu aktarım oluklarında tıkanma problemleri yaşanmaktadır. Bu gibi durumlarda aktarımı gerçekleştirilen cevherlerin akışını kolaylaştırmak amacıyla aşınma plakası malzemesi olarak paslanmaz çelik türlerinden biri olan yüksek kromlu çelikler tercih edilmektedir. Genel olarak paslanmaz çelikler, yüzeyinde bulunan sürekli koruyucu oksit filmi sayesinde, diğer çelik aşınma plaka yüzeylerine kıyasla

daha kaygan bir yüzeye sahiptir. Yüksek kromlu çeliklerinin yüzeylerinin kayganlaştırıcı etkisi cevherin yüzeylerde tutunması zorlaşmakta ve bu durumun önüne geçilebilmektedir.

Yüksek kromlu dökme demirler sahip olduğu yüksek korozyon direnci, aşınma direnci ve tokluğu sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu uygulamalara örnek olarak yüksek aşınmaya maruz kullanılan ekipmanlar, yüksek sıcaklıkta çalışan borular, korozif aşınmaya maruz kalan ekipmanlar, ağır hizmet sektöründe kullanılan ekipmanlar verilmektedir. Özellikle madencilik sektöründe, yüksek aşınmanın meydana geldiği, cevherin kırılması ve öğütülmesi için kullanılan ekipmanlarda kullanımı görülmektedir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin içeriğinde bulunan krom karbürler sayesinde özellikle mekanik dayanım ve aşınma direncinin gerektirdiği bu alanlarda tercih edilmektedir (Pearce vd., 1995).

Bir diğer aşınmaya dayanıklı çelik ise İsveç çelik üreticisi tarafından geliştirilen ve ticari ismi Hardox olan çeliklerdir (Üllen, 2018). Hardox çeliklerinin kimyasal bileşimleri Tablo 1 'de verilmektedir. Hardox çelikleri çeşitli uygulama gereksinimlerini karşılamak amacıyla 10 farklı tipte mevcut olarak üretilmektedir. Hardox çelikleri genellikle endüstriyel ekipmanlarda, madencilik makinelerinde, taşıma araçlarında, inşaat ekipmanlarında, kırıcılar ve öğütücüler gibi ağır hizmet ekipmanlarında kullanılır. Bu çelikler, özellikle aşınmaya karşı yüksek direnç, yüksek tokluk ve dayanıklılık sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Pawlak, 2015).

Tablo 1. Hardox çeliklerinin kimyasal bileşimleri (URL-3, 2024)

	Element (maksimum %)									
Hardox Çelikleri	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox 400	92,74	0,32	0,70	1,60	0,025	0,010	2,50	1,50	0,60	0,004
Hardox 450	93,90	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,005
Hardox 500	93,37	0,30	0,40	1,30	0,020	0,010	2,20	2,00	0,40	0,005
Hardox 500 Tuf	93,77	0,30	0,70	1,60	0,020	0,010	1,50	1,50	0,60	0,005
Hardox 550	94,33	0,44	0,50	1,30	0,020	0,010	1,40	1,40	0,60	0,004
Hardox 600	92,9	0,47	0,70	1,50	0,015	0,010	1,20	2,50	0,70	0,005
Hardox Extreme	93,1	0,47	0,50	1,40	0,015	0,010	1,20	2,50	0,80	0,005
Hardox HiTuf	94,13	0,20	0,60	1,60	0,050	0,020	0,70	2,00	0,70	0,005
Hardox HiTemp	93,01	0,25	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	1,50	0,004
Hardox HiAce	90,2	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	5,10	1,50	0,60	0,005

1.3.2. Seramikler

Seramikler yüksek aşınma ve korozyon direnci ile madencilik sektöründe tercih edilen bir malzeme türüdür. Madencilik ekipmanlarında, öğütme tesislerinde ve taşıma sistemlerinde seramik kaplamalar, ekipmanların aşınma direncini artırarak çalışma ömrünü uzatmaktadır (Chen, 2017; Medvedovski, 2001). Bunların yanında kimyasal dirençlerinin yüksek olması ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılabilmeleri ile bu malzemeler ön plana çıkmaktadır. Bu avantajlarının yanı sıra seramiklerin darbe dayanımının düşük ve maliyetlerinin çelik malzemelere göre yüksek olması dezavantaj yaratmaktadır. Seramik kullanımının gerektirdiği bazı özel durumlarda bulunmaktadır. Buna örnek olarak vitrifiye (lavabo, duş teknesi vb.) ürünleri, iç dekorasyon (vazo, duvar objeleri vb.) ve mutfak (tabak, bardak vb.) ürünleri verilebilir. Değirmenlerde malzemeler öğütülürken değirmen astarı veya aşındırıcı bilya olarak kullanılan metal, kauçuk gibi malzemeler ham madde içerisine karışarak son ürünün renk değişimine sebep olmaktadır. Bu gibi durumlarda üretimi gerçekleştirilen ürünün içeriğine yakın içeriğe sahip seramik malzemesi hem aşınma astarı hem de öğütücü bilyalar da tercih edilmektedir. Madencilik sektöründe yaygın olarak kullanılan bazı seramik türleri aşağıda sıralanmaktadır.

- Alümina Seramikler (Al_2O_3): Alümina seramikler yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma ve kimyasal direncine sahiptir.
- Zirkonya Seramikler (ZrO_2): Zirkonya seramikleri yüksek sıcaklık dayanımına ve aşınma direncine sahiptir. Bunun yanında alümina malzemesine göre tokluğu daha yüksektir.
- Zirkonya katkılı alümina seramikler: Zirkonya katkılı alümina seramikler saf alümina seramiklere kıyasla daha yüksek tokluğa sahiptirler. Bu özellikleri ile darbe etkisi altında saf alümina seramiklere göre daha fazla darbe dayanımı sağlanmaktadır.

1.3.3. Polimer Malzemeler

Polimer malzemeler genel olarak aşınma, korozyon ve darbe direncine sahiptir. Madencilik sektöründe malzemeleri taşınması veya işlenmesi sırasında ekipmanları bu etkilerden korumak amacıyla kullanılmaktadır (Arnold vd., 1990; Sare vd., 1990). Bu malzemelerin avantajları arasında hafiflik, esneklik ve işleme kolaylığı gibi özellikler de

bulunmaktadır. Bu özelliklere ek olarak polimer malzemelerin kullanımı ile ses izolasyonu da sağlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan bazı polimer malzemeler ve özellikleri aşağıda sıralanmaktadır (Soyubol, 2006).

- Polietilen (PE) ve Polipropilen (PP): Polietilen ve polipropilen malzemeler özellikle konveyör bantlarında aşınma direncini artırmak için amacıyla kullanılmaktadır.
- Poliüretan (PU): Poliüretan malzemeler aşınmaya maruz kalan ekipmanların yüzeyine kaplama ve konveyör bantlarda kullanılmaktadır.
- Politetrafloroetilen (PTFE, Teflon): Politetrafloroetilen, hemen hemen tüm kimyasal maddelere karşı dirençlidir. Özellikle maddelerinin yüzeyine yapışmama özelliği sayesinde cevherlerin bir bölgeden başka bir bölgeye aktarılmasında cevherlerin yüzeylere yapışma ve aktarım ekipmanlarında tıkanma problemleri görülen bölgelerde sıkça tercih edilmektedir.
- Doğal Kauçuk (NR): Doğal kauçuk titreşimi azaltmak, darbe Emilimi sağlamak ve aşınma direncini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Doğal asitlere karşı dayanıklı olmasına karşın bazı petrol türevi yağlara, aromatik yağlara, ozon gazına karşı dayanımı düşüktür. Çalışma sıcaklığı $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Çalışma koşullarına uygun olan ekipmanların aşınan bölgelerine kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.
- Nitril Kauçuk (NBR): Nitril kauçuk bitadien ve akrilonitril (ACN) kopolimerasyonu ile oluşturulan bir kauçuk türüdür. Ozona karşı dayanımı doğal kauçuğa göre daha yüksektir. İçeriğinde bulunan ACN oranına göre sınıflandırılmaktadır. ACN oranı arttıkça nitril kauçuğun yakıt türevlerine ve yağlara karşı dayanımı artmaktadır. Çalışma sıcaklığı içeriğine bağlı olarak değişmekte olup minimum $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ maksimum $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Çalışma koşullarına uygun olan ekipmanların aşınan bölgelerine kaplama malzemesi veya konveyör bant malzemesi olarak kullanılmaktadır.
- Neopren Kauçuk (Polikloropren, CR): Neopren kauçuk birçok kimyasal türüne, yağlar, petrol türevlere ve ozona karşı dayanıklılığı ile birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklığı $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Çalışma koşullarına uygun olan ekipmanların aşınan bölgelerine kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

- Florokarbon kauçuklar (FKM): Florokarbon kauçuklar asitler, bazlar, solventler, yağlar, birçok kimyasala, ozon ve atmosferik koşullara karşı dirençlidir. Çalışma sıcaklığı -26 °C ile 204°C aralığındadır. Çalışma koşullarına uygun ekipmanların kaplamalarında, aşınma plakalarında ve değirmen içi astarda kullanılmaktadır.
- Stiren Butadien Kauçuk (SBR): Stiren butadien kauçuk asitlere, bazlara ve glikol esaslı yağlara karşı dirençlidir. Çalışma sıcaklığı -50 °C ile 100°C aralığındadır. Çalışma koşullarına uygun olan ekipmanların aşınan bölgelerine kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.
- Etilen Propilen Kauçuk (EPDM): Etilen propilen kauçuk atmosfer koşullarına suya ve ozana karşı dirençlidir. Birçok kimyasala karışı dirençli olmasına karşın yağ bazlı maddeler ve petrol ürünlerine dayanımı düşüktür. Çalışma sıcaklığı -50 °C ile 150°C aralığındadır. Çalışma koşullarına uygun olan ekipmanların aşınan bölgelerine kaplama malzemesi veya konveyör bant malzemesi olarak kullanılmaktadır.

1.3.4. Hibrit Astarlar

Hibrit astarlar, genellikle farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu hibrit astarlar genel olarak taban ve aşınmaya dirençli yüksek malzemeler olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Bu malzemeler hibrit astarların kullanım alanlarına göre seçilmektedir. Genel bağlamda taban malzeme yüksek mukavemetli çelik, alaşımlı çelik veya polimer malzemelerden oluşmaktadır. Bu taban malzemesi, plakanın bütünlüğünü ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Aşınma direnci yüksek malzemeler ise genel olarak karbürler, seramikler, sinterlenmiş alaşımlar veya diğer yüksek aşınma dirençli malzemelerden oluşmaktadır. Bu malzemeler astarların aşınma direncini ve çalışma ömürlerini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Madencilik sektöründeki yeni gelişmelerle birlikte metal, seramik ve polimer malzemelerin kombinasyonları ile oluşturulan hibrit astarların uygulamaları görülmektedir.

Bu astarlar madencilik sektöründe şutlar, kırıcılar, öğütücüler, konveyör bantlar gibi aşınma ve darbeye maruz kalan ekipmanlarda kullanılmaktadır. Kullanılan hibrit astarların bazı örnekleri aşağıda verilmektedir.

- Fiber Katkılı Polimer Astarlar: Fiber takviyeli polimerler, aşınma direnci yüksek fiber malzemelerin polimer matris ile birleştirildiği malzemelerdir. Bu tür

malzemeler, özellikle aşınma direnci, hafiflik ve dayanıklılık ihtiyacı olan bölgelerde tercih edilmektedir.

- Polimer-Seramik Hibrit Astarlar: Seramik ve polimerin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemeler, mekanik dayanıklılık, aşınma ve korozyon direncine ihtiyaç duyulan, özellikle kaymalı abrazif aşınmasına maruz kalan bölgelerde tercih edilmektedir. Özellikle bu hibrit astarlarda kauçuk malzemelerin kullanımı sayesinde astarların maruz kaldığı yüksek darbe etkisi altında seramiklerin kolayca deforme olması engellenmektedir.
- Metal-Polimer Hibrit Astarlar: Metal ve polimerin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemeler özellikle aşınma direnci, darbe dayanımı ve mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca polimer olarak kauçuk kullanımı ses izolasyonu sağlayarak ortamdaki gürültü seviyesini de azaltmaktadır.
- Metal-Seramik Hibrit Astarlar: Metal ve seramik malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemeler özellikle mekanik dayanıklılık ve abrazif aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Madencilik ve benzeri sektörlerde yer altı veya yer üstü maden ocaklarından çıkarılan cevherlerin bir yerden başka bir yere aktarılması için kullanılan şut ve bunker gibi ekipmanlara aktarım olukları adı verilmektedir. Bu aktarım oluklarında cevherlerin ekipman yüzeylerine temas etmesi sonucunda cevherler ve yüzey arasında oluşan darbe ve sürtünme etkileri altında darbeli ve kaymalı abrazif aşınmalar meydana gelmektedir. Bunun yanında özellikle hava ve suyun cevherler ile etkileşimi ile birlikte cevherin kimyasal içeriğine bağlı olarak meydana gelen asit maden drenajı ekipman yüzeylerinde korozyon aşınmaya sebep olmaktadır (Akaryalı vd., 2018). Bu aşınmalar sonucu olarak ekipmanlarda geri döndürülemez deformasyonlar meydana gelmektedir. Ekipmanların bakım maliyetleri, tesisin bakım süresince durdurulmasıyla birlikte üretime ara verilmesi gibi nedenlerden dolayı hem işletme bakım maliyetleri hem de enerji tüketimi artmaktadır (Holmberg vd., 2017). Bu gibi nedenlerden dolayı ekipmanların korunması ve daha uzun süre kullanılması amacıyla ekipmanların aşınan yüzeylerine çeşitli aşınma astarları yerleştirilmektedir. Aşınma astarları bir plaka veya kaplama olarak ekipman yüzeylerine uygulanmaktadır. Malzeme seçimi ise ekipmanın çalışma koşullarına göre değişkenlik göstermektedir.

Geleneksel olarak kullanılan aşınma astarları genelde tekil yapıda polimer, seramik ve çelik esaslı aşınma plakaları veya sert dolgu kaynağı ile yapılan kaplamalardır. Çelik esaslı aşınma plakaları astarları olarak orta ve yüksek manganlı, yüksek kromlu, martensitik, östenitik, perlitik, ferritik çelikler kullanılmaktadır. Bu çeliklerin yanı sıra yaygın olarak beyaz dökme demirlerin ve sert dolgu kaynakları da astar malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin seçimi kullanım alanlarına göre değişkenlik göstermektedir.

Hibrit aşınma astarları iki veya daha çok malzemenin birleşimi ile oluşturulan plaka veya karışım olarak ekipman yüzeylerine uygulanmaktadır. Plaka şeklinde olan hibrit aşınma plakaları; çelik, polimer ve seramik gibi malzemelerin aşınmaya karşı avantajlarının bir araya getirilmesi amacıyla oluşturulan ve yüzeye cıvata gibi bağlantı elemanları ile yerleştirilen plakalardır. Mevcut bölgelerden alınan ilk sonuçlar incelendiğinde ise hibrit aşınma plakalarının tekil yapıdaki aşınma astarlarına göre çok daha uzun süre kullanım ömrüne sahip olduğu olabilmektedir. Karışım halinde yüzeye kaplanan hibrit yapılar ise, örnek olarak alümina seramik tozlarının katkılı olduğu epoksi bazlı karışımları gibi, ekipman yüzeylerine sürülerek uygulanmaktadır. Genelde bu uygulamalar kanatçık yüzeyleri, boru içi gibi doğrusal olmayan yüzeylerde veya aşınmanın çok yüksek olmadığı bölgelerde tercih edilmektedir.

Martensitik çeliklerle yapılan bir çalışmada Brinell sertlik değeri 400-600 HB arasında olan çelikler ile pin-on-disk, yüksek hızlı çamur haznesi testi ve tambur testi olmak üzere üç farklı yöntem ile aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde çeliklerin sertlik değerlerinin artması ile aşınma oranlarının düştüğü tespit edilmiştir (Valtonen, 2019). Martensitik çelikler ve orta manganlı çelikleri ile yapılan darbeli aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, orta manganlı çeliklerinde martensitik çeliklere göre aşınma testi sonrasında kütle kaybının yaklaşık %30 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun yüksek darbe etkisi altında orta manganlı çeliklerinin, yüzeylerinde oluşan deformasyon sertleşmesi sayesinde, martensitik çeliklere göre daha yüksek aşınma dayanımına sahip olmasından dolayı meydana geldiği bildirilmiştir (Ge, 2017; Tan vd., 2023).

Yüksek manganlı çelikler (20MnCr5) ve martensitik çelikler (Hardox 500) ile yapılan pin-on-disk testlerinin sonuçları incelendiğinde ise yüksek darbe etkisi olmayan abrazif aşınma altında martensitik çeliklerin aşınma dayanımının yüksek manganlı çeliklere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Tarasiuk vd., 2017). Paslanmaz ve yüksek manganlı çelikler ile yapılan darbeli abrazif aşınma testlerinin sonuçları incelendiğinde ise paslanmaz

Çeliklerin aşınma dayanımının yüksek manganlı çeliklere göre daha yüksek olduğunu görülmektedir (Petrov vd., 2006).

Sert dolgu kaplamaları ile yapılan çalışmalarda demir bazlı Fe-C-Cr sert dolgu alaşımlarının içeriğinde bulunan karbür miktarının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin ve aşınmaya karşı dirençlerinin arttığını belirtmiştir. Fakat dolgu alaşımındaki karbür miktarının artmasıyla birlikte yapı gevrekleşmeye başladığından dolayı aşınma direnci artmasıyla birlikte darbe dayanımı düşmektedir ve yapı kırılğanlaşmaya başlamaktadır. Buna bağlı olarak çalışma ömürleri azaltmaktadır (Pawar vd., 2019). Benzer olarak bir başka çalışmada Fe-C-Cr sert dolgu alaşımlarının aşınma direncinin sertliğin artması ile birlikte sürekli olarak artmadığı görülmektedir. Ayrıca bu çalışmada alaşıma Nb, Mo, V, W, Ti ve Ni gibi farklı elementlerin eklenmesiyle sert dolgu alaşımlarının aşınma dirençlerinin arttırılabildiği bildirilmiştir (Kirchgaşner vd., 2008).

Seramik malzeme olarak genelde alümina ve zirkonya katkılı alümina tercih edilmektedir Bu seramiklerin aşınmaya karşı üstün dirençleri sayesinde hibrit aşınma astarlarının aşınma dayanımları arttırılmıştır. Ayrıca darbeli abrazif aşınmaya maruz kalan bölgelerde saf alümina yerine zirkonya katkılı alümina seramiklerin tercih edilmiştir. Bunun sebebinin ise zirkonya katkısının alümina seramiklerin tokluğunu arttırdığı ve buna bağlı olarak darbe dayanımının da arttığı bildirilmiştir (Huang vd., 2016; Chen vd., 2017). Yine de genel olarak seramik malzemelerin darbe dayanımlarının polimer ve elik malzemelere göre daha düşük olması darbe etkisi altındaki bölgelerde kauçuk – seramik veya metal – seramik malzemelerin kombinasyonları ile oluşturulan hibrit aşınma astarlarının tekil yapıda kullanılan seramiklere göre daha uzun çalışma ömrüne sahip olduğu bildirilmiştir, Yapılan rnek bir çalışmada, Brezilya’da bulunan bir peletleme tesisindeki transfer şutunda elik esaslı aşınma plakalarının 75 gün dayanım sergilediği bölgede kauçuk ve seramik birleşimi hibrit aşınma plakalarının iki seneden fazladır çalışmaya devam ettiği ve elik esaslı aşınma plakalarına göre daha fazla aşınma dayanımına sahip olduğu bildirilmiştir (Varga vd., 2021; Varga vd., 2023).

Bu kapsamda genel bir literatür değerlendirmesi yapıldığında; özellikle iki veya daha çok malzemenin birleştirilmesi ile oluşturulan yenilikçi hibrit aşınma plakalarına yönelik çalışmaların aktif bir araştırma alanı olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, hibrit aşınma plakalarını oluşturan malzemeleri, malzemelerin birleşim yöntemleri ve kullanım alanlarını kapsayan sistematik araştırma çalışmaları hem bilimsel ve hem de teknolojik açıdan önemini korumaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında yapılan bu tez çalışmasının amacı, madencilik ve

benzeri sektörlerde yer altı veya yerüstü madenlerinden çıkarılan cevherlerin bir yerden başka bir yere aktarılması veya işlenmesi sırasında ekipmanlarda oluşan kalıcı hasarların engellenmesini veya azaltılmasını sağlayabilecek ve tesislerin talep ettikleri kesintisiz çalışma süreleri boyunca aşınmaya karşı dayanabilecek hibrit aşınma plakalarının geliştirilmesine yönelik öncü çalışmalar yapmaktır. Bu kapsamda ulaşılmak istenilen hedefler ise aşağıda sıralanmıştır:

- Mevcut olarak madencilik ve benzeri sektörlerde yaygın olarak kullanılan Hardox çelikleri birçok uygulamada etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat Hardox çeliklerinin yüksek sertliğe sahip yapıları dolayısıyla yaşanan işleme, bükme ve kaynak işlemlerinde karşılaşılan zorluklar, yapısından dolayı yüksek darbe ve titreşim altında çatlama riskleri ve korozyon direncinin düşük olmasından kaynaklı bu çelikler bazı çalışma koşullarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı Hardox çeliklerinin üstünlüklerinin korozyon ve aşınma direnci yüksek malzemeler ile birleştirerek yeni hibrit aşınma plakaları geliştirilecektir. Başka bir ifadeyle, tekil yapıdaki Hardox çeliklerine kıyasla aşınma direnci daha yüksek hibrit aşınma plakalarının geliştirilmesine çalışılacaktır.
- Hibrit aşınma plakalarının temel matris malzemesi olarak literatürde genel olarak yüksek mangalı çelikler ve kauçuk malzemeler tercih edilmiştir. Fakat Hardox çelikleri ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Özellikle düşük darbe etkisine maruz kalan bölgelerde Hardox çelikleri her iki malzemedenden daha fazla aşınma dayanımına sahiptir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında laboratuvar testleri için matris malzemesi olarak Hardox 500 saha uygulamaları için ise Hardox 450 seçilmiştir. Böylece bu bölgelerde Hardox çelikleri ile oluşturulacak hibrit aşınma plakalarının diğer aşınma plakalarına göre aşınmaya karşı daha fazla dayanım sergilemesi hedeflenmektedir.
- Hibrit aşınma plakalarının oluşturulduğu malzeme olarak alümina ve neopren kauçuk seçilmiştir. Alümina seramiklerin darbeye karşı direncinin çok düşük olmasına karşın aşınmaya karşı üstün dayanımı olduğu bilinmektedir. Bu avantajı ile sayesinde Hardox çeliklerinin de aşınma dayanımının artacağı düşünülmektedir. Ayrıca Hardox çelik matrisin darbe altında göstereceği dayanım ile alümina parçaların korunması hedeflenmektedir.
- Hibrit aşınma plakalarının ile kullanılacak neopren malzemenin üstün darbe absorpsiyonu sayesinde yüksek darbe etkileri altında Hardox çeliğinde oluşabilecek

çatlamaların önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca neopren kauçuğun ses izolasyonu sağlaması ile ekipmanlarda oluşan yüksek gürültü seviyesinin azaltılması sağlanacaktır.

- Hibrit aşınma plakalarında alümina ve neopren kullanımı sayesinde tekil yapıdaki çelik aşınma plakalarına kıyasla daha hafif plakaların elde edilmesi ve buna bağlı olarak plakaların montaj ve demontaj sırasında iş gücünün ve ekipman ağırlığının azaltılması ile enerji tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Aşınma Plakalarını ve Aşındırıcı Karışımı Oluşturan Malzemeler

2.1.1. Hardox 450 ve Hardox 500

Çalışma kapsamında hazırlanan referans ve hibrit aşınma plakalarında temel matris malzemesi olarak Hardox 450 ve Hardox 500 malzemesi kullanılmıştır. Hardox çelikleri İsveç menşeli çelik üretici SSAB firmasından tedarik edilmiştir. Hardox 450 ve Hardox 500 malzemesinin kimyasal içeriğine ait değerler SSAB firmasından alınmış olup sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

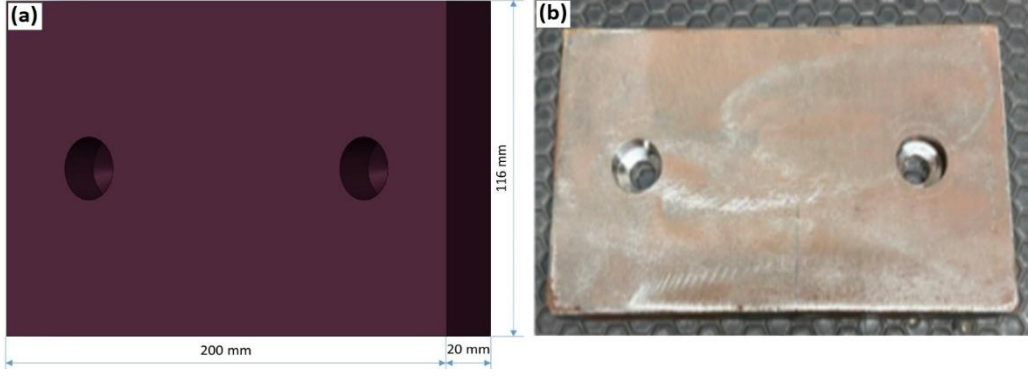
Tablo 2. Hardox 450 malzemesinin kimyasal bileşimi

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Ağırlıkça %	98,09	0,21	0,21	0,57	0,008	0,001	0,80	0,09	0,020	0,001

Tablo 3. Hardox 500 malzemesinin kimyasal bileşimi

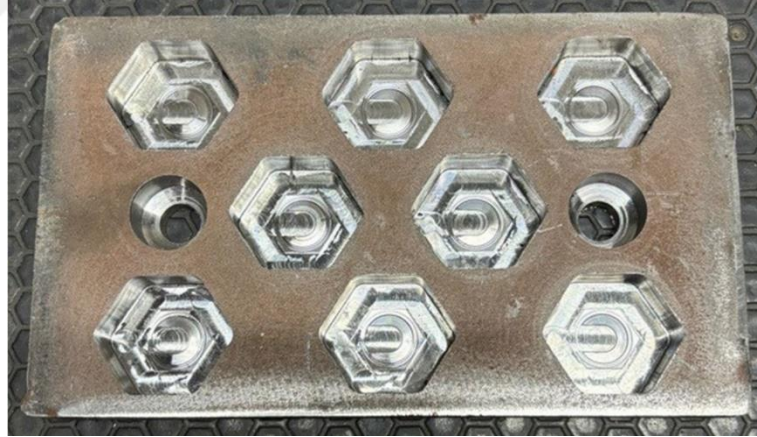
Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Ağırlıkça %	97,75	0,27	0,26	0,90	0,01	0,001	0,70	0,08	0,025	0,001

Hardox 450 ve Hardox 500 malzemesinin tekil formda kullanımı ile referans aşınma plakaları elde edilmiştir. Sac plaka halinde tedarik edilen Hardox çelikleri öncelikle aşınma tamburu test cihazına yerleştirilmek üzere boyutlandırılmıştır. Şekil 4'te gösterilen şekilde 200x116x20 mm³ boyutlarında plazma kesim ile kesilmiştir. Plakalar test cihazına M10 havşa başlı alyan cıvatayla bağlandığından dolayı uygun noktalara bilgisayar destekli nümerik kontrol tezgahı (CNC) ile havşa delik açılmıştır.



Şekil 4. Hardox 450 ve Hardox 500 Aşınma Plakası: (a) genel boyutları ve (b) imalat sonrası görüntüsü

Hardox 450 + alümina ve Hardox 500 + alümina aşınma plakalarını oluşturmak için öncelikle Hardox 450 ve Hardox 500 malzemeleri referans aşınma plakası gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan plakalara hegzagonal geometriye sahip alümina parçaların entegrasyonu için plaka üzerine Şekil 5'te gösterilen şekilde uygun noktalardan 15 mm derinliğe sahip altıgen boşluklar CNC ile açılmıştır.



Şekil 5. Hardox 450 + alümina ve Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasını oluşturan metal matris

Hardox 450 + alümina katkılı neopren ve Hardox 500 + alümina katkılı neopren aşınma plakalarını oluşturmak amacıyla Hardox 450 ve Hardox 500 sac plakalar $200 \times 116 \times 15 \text{ mm}^3$ boyutlarında plazma kesim ile kesilmiştir. Ön boyutlandırılması yapılan plakalar CNC ile Şekil 6'da gösterilen şekilde uygun noktalardan altıgen boşluklar olacak şekilde işlenmiştir.



Şekil 6. Hardox 450 + alümina katkılı neopren ve Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakalarını oluşturan metal matris

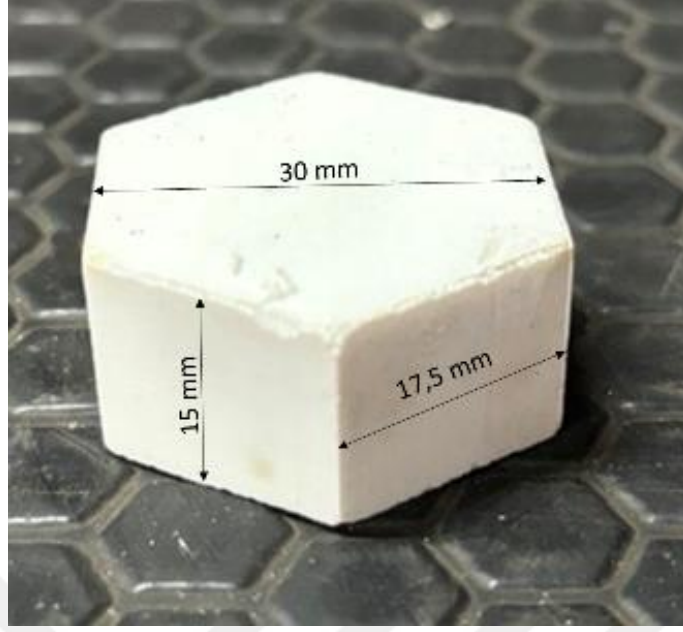
2.1.2. Alümina (Alüminyum oksit, Al_2O_3)

Çalışma kapsamında aşınma testlerinin gerçekleştirileceği hibrit aşınma plakalarında kullanılmak üzere seramik malzeme olarak alümina (Al_2O_3) seçilmiştir. Alümina malzemesinin temel özellikleri tedarikçi firmadan alınmış olup Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Alümina numunelerin temel özellikleri

Malzeme Cinsi	%95 Al_2O_3
Yoğunluk (gr/cm^3)	3,5
Sertlik (mohs)	9

Hekzagonal geometriye sahip alümina numuneler hibrit aşınma plakalarında bulunan metal matrislerin altıgen boşluklarına uyumlu olacak şekilde Şekil 7’deki gibi boyutlandırılmıştır. Bu numunelerin imalatı için öncelikle alümina tozlar uygun bağlayıcı ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım 350 MPa basınç altında izostatik presleme yöntemi ile hekzagonal formda şekillendirilmiştir. Daha sonrasında alümina numuneler atmosfer ortamında 1600 °C’de sinterlenmiştir. Son olarak üzerindeki pürüzlü kısımlar talaş kaldırma yöntemleri ile temizlenmiştir.



Şekil 7. Hekzagonal geometriye sahip alümina numune ve boyutları

Alümina katkılı neopren numunesini oluşturabilmek için hekzagonal geometriye sahip alümina numuneler Şekil 8’de görüldüğü gibi 5-200 mikron boyutlarında olacak şekilde öğütülmüştür.



Şekil 8. Öğütülmüş alümina tozlar

2.1.3. Neopren

Çalışma kapsamında aşınma testleri gerçekleştirilecek olan hibrit aşınma plakalarında kullanılmak üzere polimer malzeme olarak aşınmaya karşı dirençli neopren malzemesi seçilmiştir. Neoprenin kimyasal bileşimi tedarikçi firmadan alınmış olup Tablo 5'te verilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan neoprene ait TS ISO 37 standardında yapılan çekme testi sonuçları, TS ISO 2781 standardına göre yapılan yoğunluk ölçüm sonuçları ve TS ISO 815-1 standardında yapılan sıkıştırma test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Neoprenin kimyasal bileşimi

	Ağırlıkça Yüzdesi (%)
CR Neopren	37
Çinko oksit	1,86
Stearik asit	0,74
Poliizopren	0,6
CİS-1,4 Poliizopren	26
Silika	3,73
Yağ	26
Reçine	1,1
Dibenzothiazyl disulfit	0,74
Tetramethyl-Thiuramdisulfit	0,37
Çinko dibutyldithiocarbamate	1,86

Tablo 6. Çalışma kapsamında kullanılan neoprene ait temel özellikler

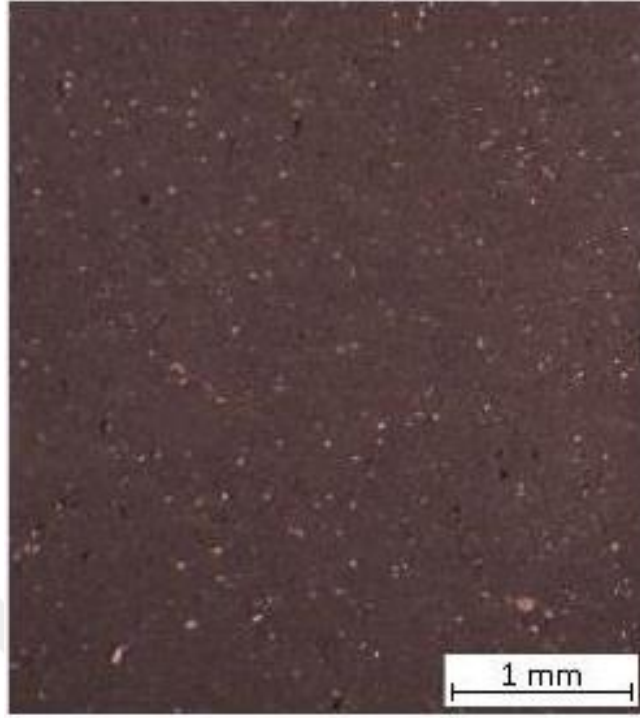
Malzeme Cinsi	Kloropren Kauçuk
Sertlik (Shore A)	60
Yoğunluk (g/cm ³)	1,25
Kalıcı Ezilme Oranı (%)	29
Çekme Mukavemeti (MPa)	19
Kopma Uzaması (%)	690

Alümina katkılı kauçuk numunelerin üretimi, malzemenin mekanik dayanıklılığını, termal ve kimyasal stabilizesini arttırmak için yapılan önemli bir uygulamadır (Cheng vd., 2014; Lin vd., 2020; Fu vd., 2008). Bu çalışmada, neopren hamuruna alümina tozlarının eklenmesiyle numuneler elde edilmiştir ve katkılama işlemi Şekil 9'da gösterilen kauçuk hamur makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Kauçuk hamur makinesinde bulunan iki merdane

arasına kauçuk hamuru ve alümina tozları yerleştirilmiştir. Alümina tozlarının merdaneler arasında ezilerek karıştırılan neopren hamurunda homojen bir şekilde dağılması amacıyla bu işlem 20 dakika boyunca devam etmiştir. Alümina tozlarının boyutları, 5 ila 200 mikrometre arasında değişmektedir ve eklenen miktar, neopren hamurunun kütlesiyle %20 oranında belirlenmiştir. Alümina tozları homojen bir şekilde neopren içerisine eklenmiştir.. Alümina tozlarının, çok küçük boyutlarda olmasından dolayı, neopren içindeki dağılımını incelemek için stereo mikroskop ile inceleme yapılmıştır. Alümina katkılı neoprenin kesit görüntüsü stereo mikroskop ile çekilmiş görüntüsü Şekil 10'da gösterilmektedir.

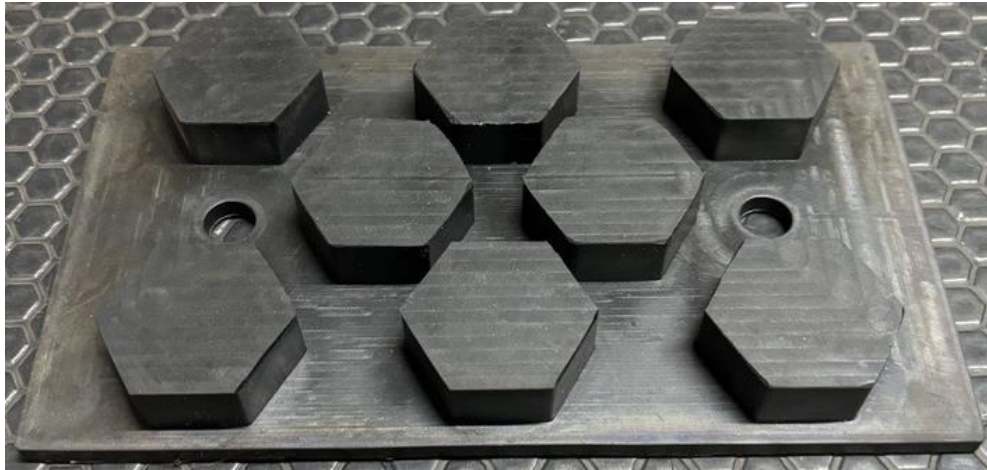


Şekil 9. Kauçuk hamur makinesi ile alümina tozlarının kauçuk hamuruna eklenmesi



Şekil 10. Alümina katkılı neopren

Hardox 450, Hardox 500 ve alümina katkılı neopren plakaları geometrik olarak bağlayabilmek amacıyla neopren plakalar Şekil 11'deki gibi altıgen çıkıntılara sahip bir geometride üretilmiştir.



Şekil 11. Altıgen çıkıntılara sahip alümina katkılı neopren plakalar

2.1.4. Aşındırıcı Karışımı Oluşturan Malzemeler

Çalışma kapsamında yapılan Hardox 500 ve hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli aşınma testlerinde referans ve hibrit aşınma plakalarını aşındırmak amacıyla Şekil 12’de gösterilen doğal çakıl taşı kullanılmıştır. Doğal çakıl taşları 16-25 mm boyutlarında olacak şekilde kumpas yardımıyla ölçülerek seçilmiştir.



Şekil 12. Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan doğal çakıl taşları

Referans ve hibrit aşınma plakalarının aşınmaya dayanımı ekipmanlarda aktarılan malzemenin mineralojik yapısına göre değişkenlik göstermektedir. Aşınma testlerinde kullanılan aşındırıcı karışımında bulunan elementlerin içeriği önem arz etmektedir. Bu sebeple doğal çakıl taşları toz hale getirilerek Şekil 13’te gösterilen Rigaku SmartLab X-ışını difraktometresi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Doğal çakıl taşı tozlarının içerik analizi $4.00^\circ - 60.00^\circ$ Bragg açılarında, $3.0352^\circ/\text{dk}$ tarama hızında, $\text{CuK}\beta$ radyasyonu ile, 0.02° adım aralığında, 2 teta tarama ekseninde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. Rigaku SmartLab X-ışını difraktometresi

Hardox 450 ve hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli aşınma testlerinde referans ve hibrit aşınma plakalarını aşındırmak amacıyla Şekil 14’te gösterilen bakır-çinko cevherleri kullanılmıştır. Bakır – çinko cevherinin kimyasal bileşimine ait sonuçlar Demir Export firması tarafından yapılan metalürjik testler sonucunda belirlenmiştir ve Tablo 7 ‘de verilmiştir.



Şekil 14. Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan bakır-çinko cevherleri

Tablo 7. Demir Export İspir işletmesine ait bakır – çinko cevherinin kimyasal bileşimi

	Ağırlıkça Yüzdesi (%)
Kalkopirit	2,14
Bornit	0,05
Kalkosit	0,04
Sfalerit	4,68
Pirit	27,80
Krizokol	0,28
Hemimorfit	0,02
Titanyum	0,19
Fe-O _x (Mn)/CO ₃	9,21
Kuvars	17,66
K-Feldspat	0,02
Plajiyoklaz Feldspat	0,07
Biyotit	0,09
Muskovit	0,10
Kloritler	1,68
Fe + Mg Silikatları	5,84
Ca Mg Fe Silikatları	8,21
Ca Al Fe Silikatları	7,49
Kalsit	9,88
Ankerit	4,50
Apatit	0,03

2.2. Hibrit Aşınma Plakalarının Hazırlanması

2.2.1. Hardox 450 + Alümina, Hardox 500 + Alümina Hibrit Aşınma Plakası

Hardox 450 + alümina ve Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakaları Şekil 12’de gösterilen metal matris içerisine ara bağlayıcı malzeme ile yapıştırılan hekzagonal geometrili alümina numunelerin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bağlayıcı malzeme için önemli üç kriter mevcut olup bu kriterler aşağıda sıralanmaktadır.

- Yapıştırma mukavemeti: Yapıştırıcı malzemesinin metal ve seramik arasında yüksek mukavemetli bir yapıştırma sergilemesi gerekmektedir.
- Boşlukların doldurulabilmesi: Metal ve seramik malzemelerin arasında kalan boşluğa sürülen yapıştırıcı malzemenin bulunduğu alanı ayrıca dolgu malzemesi olarak doldurması gerekmektedir.
- Yapıştırıcının aşınma dayanımı: Yapıştırıcı malzemesinin metal ve seramiğe göre aşınma dayanımı düşük olması beklenen bir sonuçtur. Fakat çok kolay aşınması

seramik malzemenin metal malzemeye tutunamamasına ve buna bağlı olarak yerinden kopup gitmesine neden olacaktır. Bu sebeplerden dolayı aşınma direnci yüksek bir yapıştırıcı seçilmelidir.

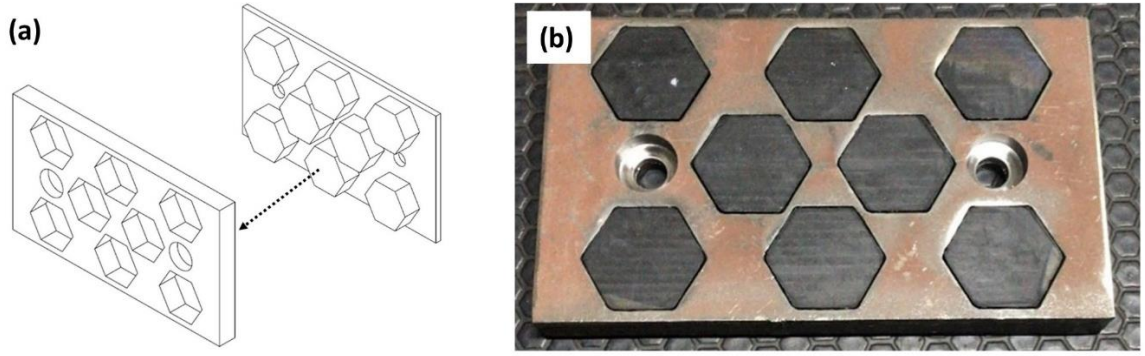
Yapılan önce çalışmalar neticesinde bu kriterlere göre metal ve seramik malzeme arasına bağlayıcı olarak kullanılabilecek en uygun malzeme seramik dolgulu epoksi yapıştırıcısı (Ticari ismi: Weicon Keramik W) seçilmiştir. Hekzagonal geometrili alümina parçaların yerleştirileceği bölgelere yaklaşık 1,5 mm kalınlığında yapıştırıcı sürülmüştür. Alümina numuneler Şekil 15'te gösterildiği gibi plakaların yüzeyine sıfır olacak şekilde metal matris içerisine gömülmüştür.



Şekil 15. Hardox 450 + alümina ve Hardox 500 + alümina aşınma plakalarının imalat aşamaları

2.2.3. Hardox 450 + Alümina Katkılı Neopren ve Hardox 500 + Alümina Katkılı Neopren Hibrit Aşınma Plakası

Hardox 450 + alümina katkılı neopren ve Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakalarını oluşturan malzemeler birbiri ile geometrik olarak birleşecek şekilde imal edilmiştir. Parçaların geometrik birleşimin şematik gösterimi ve plakaların imalat sonrası görüntüsü Şekil 16'da gösterilmiştir. İki malzemenin birleştirme yönü hibrit aşınma plakalarının ekipmana yerleştirme yönüne göre zıt yönde olması sayesinde plakalar değiştirilme zamanına kadar dağılmadan çalışmaya devam edebilmektedir.



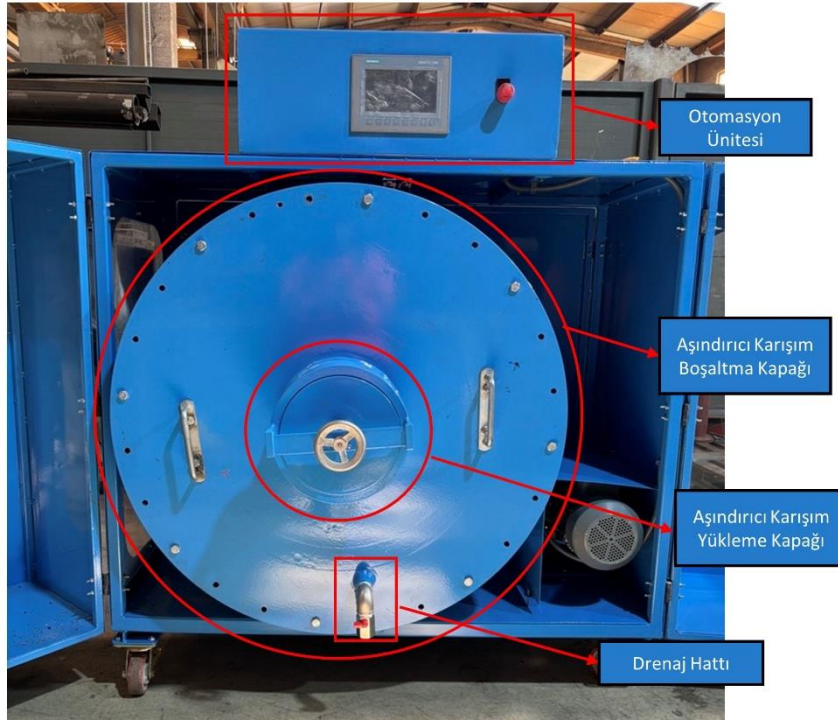
Şekil 16. Hardox 450 ve alümina katkılı neopren hibrit ve Hardox 500 ve alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakası: (a) geometrik birleşiminin şematik gösterimi ve (b) imalat sonrası görüntüsü

2.3. Aşınma Deneyleri

2.3.1. Aşınma Tamburu Test Cihazı

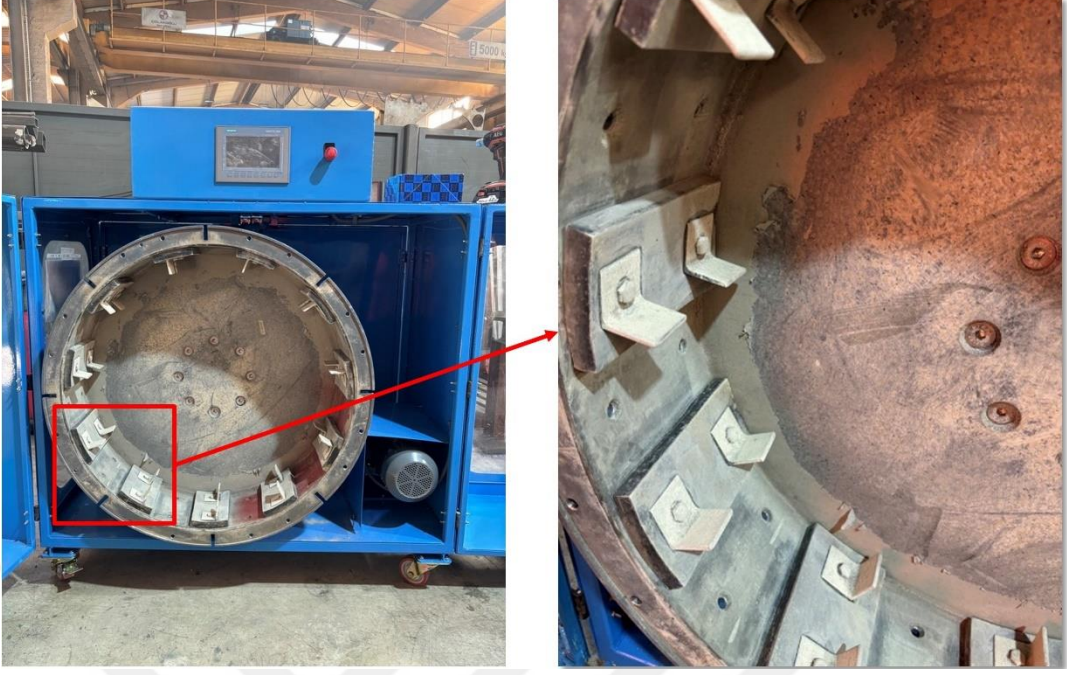
Darbeli abrazif aşınma testleri için çeşitli test cihazları kullanılmaktadır (Franek vd., 2009, Jungedal, M., 2012, Chen vd., 2017). Çalışma kapsamında referans ve hibrit aşınma plakalarının aşınma testlerini gerçekleştirmek amacıyla Çolakoğlu Ar-Ge tarafından aşınma tamburu test cihazı tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Test cihazı 1.1 kW gücünde bir motora sahip olup en fazla 60 d/dk hızında dönebilmektedir. Cihazda kaymalı abrazif testinde 22, darbeli abrazif testinde ise 11 adet farklı plaka aynı anda aynı çalışma koşulları altında test edilebilmektedir. Farklı plakaların aynı anda test edilebilmesi sayesinde tasarlanabilecek farklı hibrit aşınma plakalarının performans karşılaştırılması aynı koşullar altında doğru bir şekilde yapılabilmektedir. Yapılacak aşınma testi süreleri, dönüş hızı ve test tipi kullanıcı

tarafından seçilebilmektedir. Şekil 17’de gösterilmekte olan aşınma tamburu test cihazı düşük karbonlu (S235JR) çelikten üretilmiş olup malzemelerin temas ettiği ve plakaların yetirildiği yüzeyler doğal kauçuk ile kaplanmıştır. Soğuk kaplama yöntemiyle doğal kauçuk ile kaplanan iç yüzey hem aşınmaya dayanım hem de ses izolasyonu sağlamaktadır. Tambur kapağı aşındırıcı karışımın tambur içerisine kolay doldurabilmesi ve içerisinden kolay boşaltılabilmesi amacıyla çift kademeli yapılmıştır. Ayrıca tambur kapağında bulunan drenaj hattı sıvı test yapılması durumunda içerisindeki sıvının boşaltılabilmesi için tasarlanmıştır.



Şekil 17. Aşınma tamburu test cihazı

Bu çalışma kapsamında seçilen ve referans test numunesi olan Hardox 450 ve Hardox 500 aşınma plakalarının çoğunlukla darbeli abrazif aşınma bölgelerinde kullanılmasından dolayı test prosedürleri darbeli abrazif testi olacak şekilde seçilmiştir. Aşınma tamburu test ekipmanında darbeli abrazif testi gerçekleştirmesi amacıyla değirmenlerde ki sisteme benzer olarak tambur çeperine Şekil 18’de gösterilmekte olan kaldıraçlar yerleştirilmiştir. Bu kaldıraçlar sayesinde tambur dönüş hareketini yaparken kaldıraçlardan taşınan aşındırıcı karışımın içerisinde bulunan doğal çakıl taşları serbest düşme hareketi ile plakaların üzerine düşmektedir.



Şekil 18. Aşınma tamburu test ekipmanında darbeli abrazif aşınmayı temsil etmek amacıyla kullanılan kaldıraçlar

2.3.2. Darbeli Abrazif Aşınma Test Prosedürleri

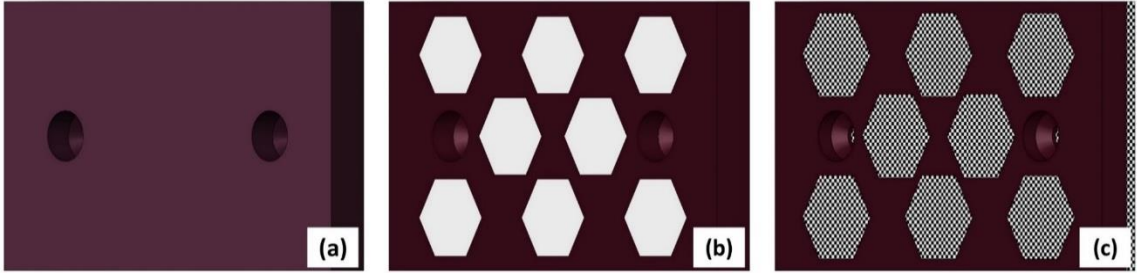
Aşınma plakalarının kullanıldığı transfer ekipmanlarından aktarılan malzemelerin özellikleri sıklıkla değişiklik göstermektedir. Hatta aynı bölgeden farklı zamanlarda çıkarılan cevherlerin bile özelliklerinde farklılık bulunmaktadır. Ayrıca çalışma koşulları ve ortam şartları da aşınma plakalarında oluşan aşınmanın türünü ve şiddetini değiştirmektedir. Referans ve hibrit aşınma plakalarının aşınma performanslarını doğru bir şekilde karşılaştırmak için plakalar her test için aynı koşullar altında test edilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak doğal çakıl taşı ve bakır-çinko cevheri kullanılmak üzere iki adet darbeli abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Her test için referans ve hibrit aşınma plakalarının her birinden ikişer adet imal edilmiştir. Bu plakalar test öncesinde Tablo 8 ve Tablo 9’da verildiği şekilde kodlanmıştır. Test için hazırlanan referans ve hibrit aşınma plakalarının üç boyutlu görselleri Şekil 19’da gösterilmiştir.

Tablo 8. Darbeli abrazif aşınma testine tabi tutulan Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarına ait kodlar

Numune Kodu	Plakada Kullanılan Malzemeler	Test Numunesi Türü
RAP.01	Hardox 500	Referans Aşınma Plakası
HAP.01	Hardox 500 + Alümina	Hibrit Aşınma Plakası
HAP.02	Hardox 500 + Alümina Katkılı Neopren Kauçuk	Hibrit Aşınma Plakası

Tablo 9. Darbeli abrazif aşınma testine tabi tutulan Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarına ait kodlar

Numune Kodu	Plakada Kullanılan Malzemeler	Test Numunesi Türü
RAP.02	Hardox 450	Referans Aşınma Plakası
HAP.03	Hardox 450 + Alümina	Hibrit Aşınma Plakası
HAP.04	Hardox 450 + Alümina Katkılı Neopren Kauçuk	Hibrit Aşınma Plakası



Şekil 19. Referans ve hibrit aşınma plakaları: (a) RAP.01-RAP.02, (b) HAP.01-HAP.03 ve (c) HAP.02-HAP.04

Aşınma testi öncesinde referans ve hibrit aşınma plakalarının ağırlıkları, $\pm 0,02$ gr hassasiyetli hassas bir terazi ile Şekil 20'deki gibi ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri üç kere tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 20. Hassas terazi ile referans ve hibrit aşınma plakalarının test öncesi ağırlık ölçümü

Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testleri için öncelikle aşınma tamburu çeperine aralarında birer boşluk kalacak şekilde aşınma plakaları monte edilmiştir. Bu boşluklara darbeli abrazif aşınmasını temsil etmek amacıyla kaldırmaçların monte edildiği kauçuk plaka yerleştirilmiştir. İki kademeli ön kapak kapatılarak cıvatalar ile sabitlenmiştir. Ön kapak üzerinde bulunan aşındırıcı karışım yükleme kapağından tambur içerine 5 kg ağırlığında 16-25 mm boyutlarında doğal çakıl taşları boşaltılmıştır. Aşınma tamburu 27 dev/dk dönüş hızında 24 saat boyunca saat yönünün tersinde döndürülmüş ve bu test prosedürü 28 kez tekrarlanmıştır. Dört hafta boyunca tekrarlanan 24 saatlik testlerde her yedi tekrarda bir aşınma tamburu açılmıştır. Aşınma plakaları aşınma tamburunda çıkarılarak 15 bar basınçlı su altında temizlenmiş ve 6 bar basınçlı hava ile kurutulmuştur. Daha sonrasında hassas terazi ile 3 kez ağırlık ölçümleri yapılmış ve tekrar aşınma tamburuna yerleştirilerek testlere devam edilmiştir. Bu testler toplamda 672 saat boyunca devam ettirilmiştir. Sürekli taze cevher akışının gerçekleştiği transfer ekipmanlarındaki aşırı aşındırıcı ortamı temsil etmek amacıyla 672 saatlik testlere ek olarak 14 saat boyunca her saat başı aşındırıcı karışımı tazeleyerek darbeli abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm darbeli abrazif aşınma testleri 686 saat sonra tamamlanmıştır. Birinci darbeli abrazif aşınma testlerinde uygulanan test prosedürleri özet olarak Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için yapılan darbeli abrazif aşınma test prosedürleri

Test Süresi / Test Tekrarı (saat/tekrar)	24 / 28 - 1 / 14
Hız (d/dk)	27
Aşındırıcı Boyutları (mm)	16-25
Aşındırıcı Türü	Doğal Çakıl Taşı
Aşındırıcı Karışım Miktarı (kg)	5
Ortam Sıcaklığı (°C)	23

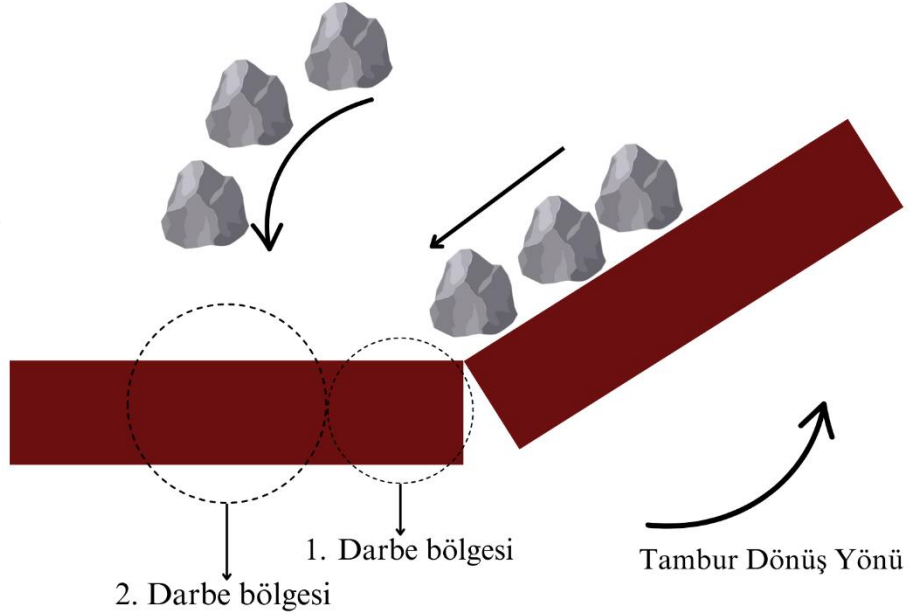
Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarını için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testinde plaka yerleşimi olarak bir önceki teste benzer şekilde plakalar konumlandırılmıştır. İki kademeli ön kapak kapatılarak cıvatalar ile sabitlenmiştir. Ön kapak üzerinde bulunan aşındırıcı karışım yükleme kapağından tambur içerisine 5 kg ağırlığında 16-25 mm boyutlarında bakır-çinko cevherleri boşaltılmıştır. Aşınma tamburu 27 dev/dk dönüş hızında 23 saat boyunca saat yönünün tersinde döndürülmüştür. İlk aşınmadan sonra saate bir cevher tazeleyerek 7 saat boyunca aşınma testleri tekrarlanmıştır 30 saat süren bu testler 16 kez tekrarlanmış ve toplamda 480 saatlik darbeli abrazif aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Her 120 saatlik test sonrasında aşınma tamburu açılmıştır. Aşınma plakaları aşınma tamburunda çıkarılarak 15 bar basınçlı su altında temizlenmiş ve 6 bar basınçlı hava ile kurutulmuştur. Daha sonrasında hassas terazi ile 3 kez ağırlık ölçümleri yapılmış ve tekrar aşınma tamburuna yerleştirilerek testlere devam edilmiştir. İkinci darbeli abrazif aşınma testlerinde uygulanan test prosedürleri özet olarak Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için yapılan darbeli abrazif aşınma test prosedürleri

Test Süresi / Test Tekrarı (saat/tekrar)	23/ 1 + 1/ 7
Hız (d/dk)	27
Aşındırıcı Boyutları (mm)	16-25
Aşındırıcı Türü	Bakır-çinko cevheri
Aşındırıcı Karışım Miktarı (kg)	5
Ortam Sıcaklığı (°C)	23

2.3.3. Darbeli Abrazif Aşınması Testleri Sonrasında Kütle Kaybı ve Yüzey İncelemeleri

Referans ve hibrit aşınma plakalarının aşınma dayanımları darbeli abrazif aşınma testleri sonrasındaki kütle değişimleri değerlendirilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Test edilecek olan aşınma plakalarının her test sonrası $\pm 0,01$ gr hassasiyetli hassas bir terazi ile ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma testleri sonrasında Leica MZ95 marka stereo mikroskop ile aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Darbeli aşınma testlerinde aşındırıcı karışımın tambur içerisindeki hareketi şematik olarak Şekil 21’de gösterilmektedir. Bu hareket sonucunda referans ve hibrit aşınma plakalarının 1. darbe bölgesinde kaymalı abrazif aşınma, 2. darbe bölgesinde ise darbeli abrazif aşınma meydana gelmektedir. Bu nedenle aşınma sonrası yüzey incelemelerinde bu iki bölge ayrı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 21. Darbeli abrazif aşınma testi sırasında aşındırıcı karışımın tambur içindeki hareketi

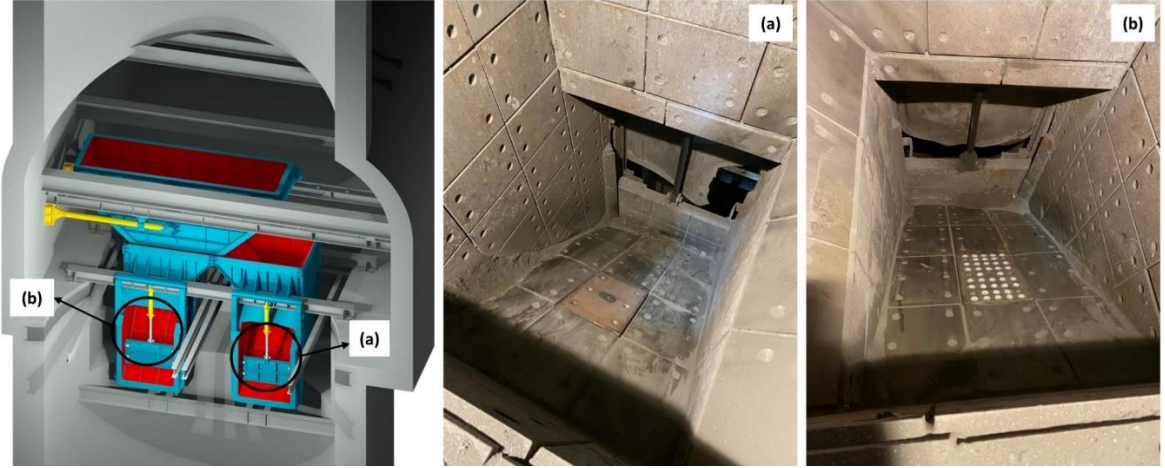
2.4. Saha Çalışmaları

Çalışma kapsamında geliştirilmiş olan Hardox 450 + alümina, Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakalarının test bölgelerinde daha önce kullanılmış olan aşınma plakasına kıyasla aşınma performanslarının incelenmesi adına saha testlerine başlanmıştır.

Saha testleri için Eti Bakır Siirt Madenköy işletmesi, Demir Export İspir bakır çinko işletmesi ve Batısöke çimento sanayi olmak üzere üç farklı saha seçilmiştir.

2.4.1. Eti Bakır Siirt Madenköy İşletmesi Saha Testleri

Eti Bakır Siirt Madenköy işletmesinde yer altı madeninden çıkarılan cevherlerin yer üzerine çıkarılması için çeşitli aktarım elemanları kullanılmaktadır. Bu aktarım elemanlarından biri olan pantolon şuttan saatte 150-200 ton malzeme aktarılmakta olup Şekil 22’de gösterilen şütün (a) sol bölümüne Hardox 450 referans aşınma plakası, (b) sağ bölümüne ise Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakası yerleştirilmiştir. Bu çalışmada hegzagonal geometriye sahip alümina parçalar Hardox plaka yüzeyinden 3 mm yüksekte kalacak şekilde plakalara montaj edilmiştir.



Şekil 22. Saha çalışmalar kapsamında transfer şütünün (a) sol bölgesine yerleştirilen Hardox 450 referans aşınma plakası ve (b) sağ bölümüne yerleştirilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakası

2.4.2. Demir Export İspir Bakır Çinko İşletmesi Saha Testleri

Demir Export firmasının İspir işletmesinde bakır – çinko cevherlerin işlenmesi için kullanılan ekipmanlardan biri olan SAG değirmene malzeme besleyen şutta aşırı aşınma meydana gelmektedir. Besleme şutuna 100 ton/saat bakır – çinko cevheri beslenmekte olup cevherler 2 metre yükseklikten şütün tabanına çarpmakta ve bu bölgede yüksek deformasyona sebep olmaktadır. Mevcut bölgede kauçuk, yüksek manganlı çelikler ve

Hardox gibi aşınmaya dayanıklı birçok malzeme kullanılmakta olup kauçukların 6-8 gün, aşınmaya dayanıklı çelikler ise 8-12 gün sonrasında aşınarak çalışma ömrünü tamamlamaktadır. Şekil 23'te 30 mm kalınlığında Hardox 450 aşınma plakasının aşınma sonrası görüntüsü mevcuttur.



Şekil 23. Demir Export İspir işletmesinde bulunan SAG değirmen içerisine bakır – çinko cevheri besleme şutu aşınma durumu

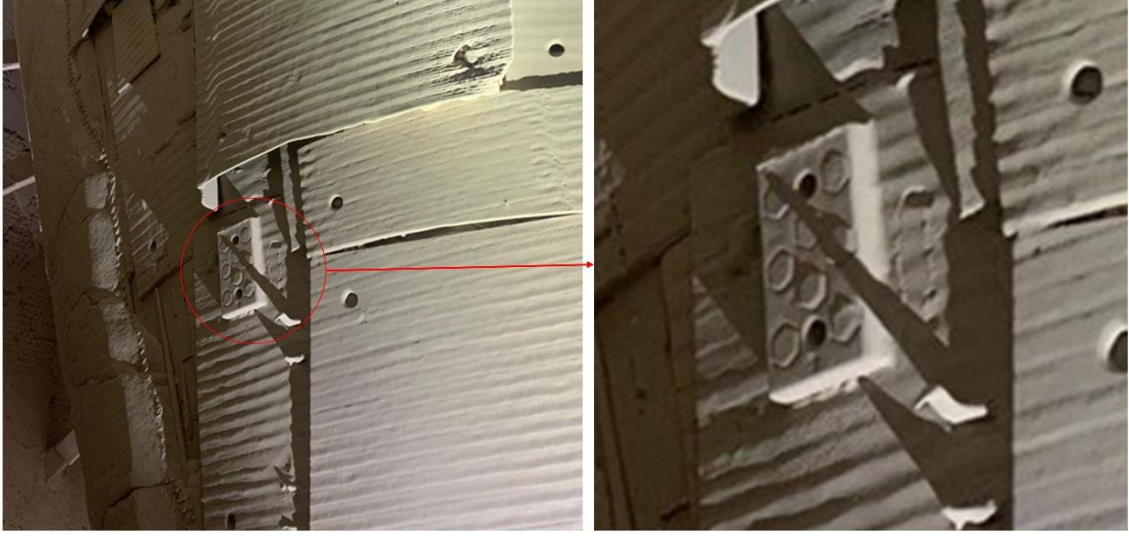
Bu bölgede kullanılmak üzere Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakası imal edilmiştir. Alümina parçaların akan cevherlerin çarpması sonucu karışılacağı yüksek darbe etkisini minimize etmek amacıyla plakaların altında soğuk kaplama yöntemi ile 10 mm kalınlığında neopren kauçuk kaplama yapılmıştır. Şut için hazırlanan hibrit aşınma plakalarının besleme şutuna kaplanmış hali Şekil 24'te görülmektedir.



Şekil 24. Demir Export İspir işletmesinde bulunan SAG değirmen besleme şutuna Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakalarının montajı

2.4.3. Batisöke Çimento Sanayi Saha Testleri

Batisöke Çimento Sanayisinde çimento üretimi sırasında hammaddeleri öğütürerek karışım haline getirmek amacıyla farin değirmenleri kullanılmaktadır. Farin değirmeninde öğütücü tamburlar yardımıyla öğütülen, tane boyutu 90 mikrometreye kadar olan malzemeler değirmen tabanında değirmenin üst çıkışına 50 m/s hıza sahip hava ile püskürtülmektedir. Hava ile hareketlendirilen ince malzemenin farin değirmenin iç yüzeylerine çarpması sonucu mevcut bölgelerde çok yüksek aşınmalara sebep olmaktadır. Bu bölgelerde ki aşınmayı önlemek amacıyla değirmen içine sert dolgu kaynağı ile kaplama yapılmaktadır. Sert dolgunun yüksek krom-karbür içeriğine sahip olması sayesinde aşınma dayanımı sağlanabilmesine rağmen kaplamalar 1-1,5 aylık aşınma dayanımı sergileyebilmektedir. Mevcut alanlarda deneme amaçlı Şekil 25’te gösterilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakaları yerleştirilmiştir. Hibrit aşınma plakaları farin değirmeni içerisine kaplanan sert dolgu kaynaklarının üzerine kaynak edilerek uygulanmasıyla sebebiyle beş yüzeyinden aşınmaya maruz kalmıştır.

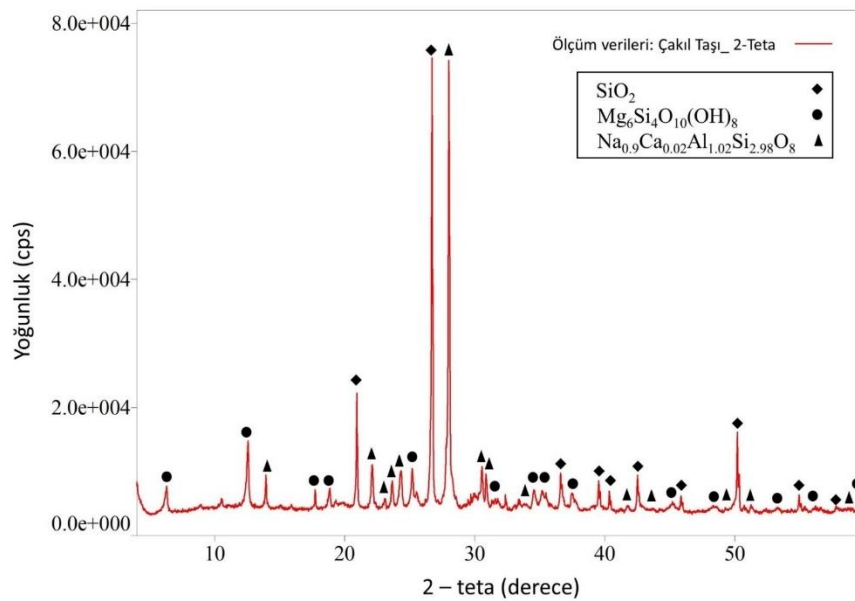


Şekil 25. Batısöke Çimento Sanayinde bulunan farin değirmeni içerisinde Hardox 450 + alümina aşınma plakalarının montajı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Doğal Çakıl Taşının XRD Analizi

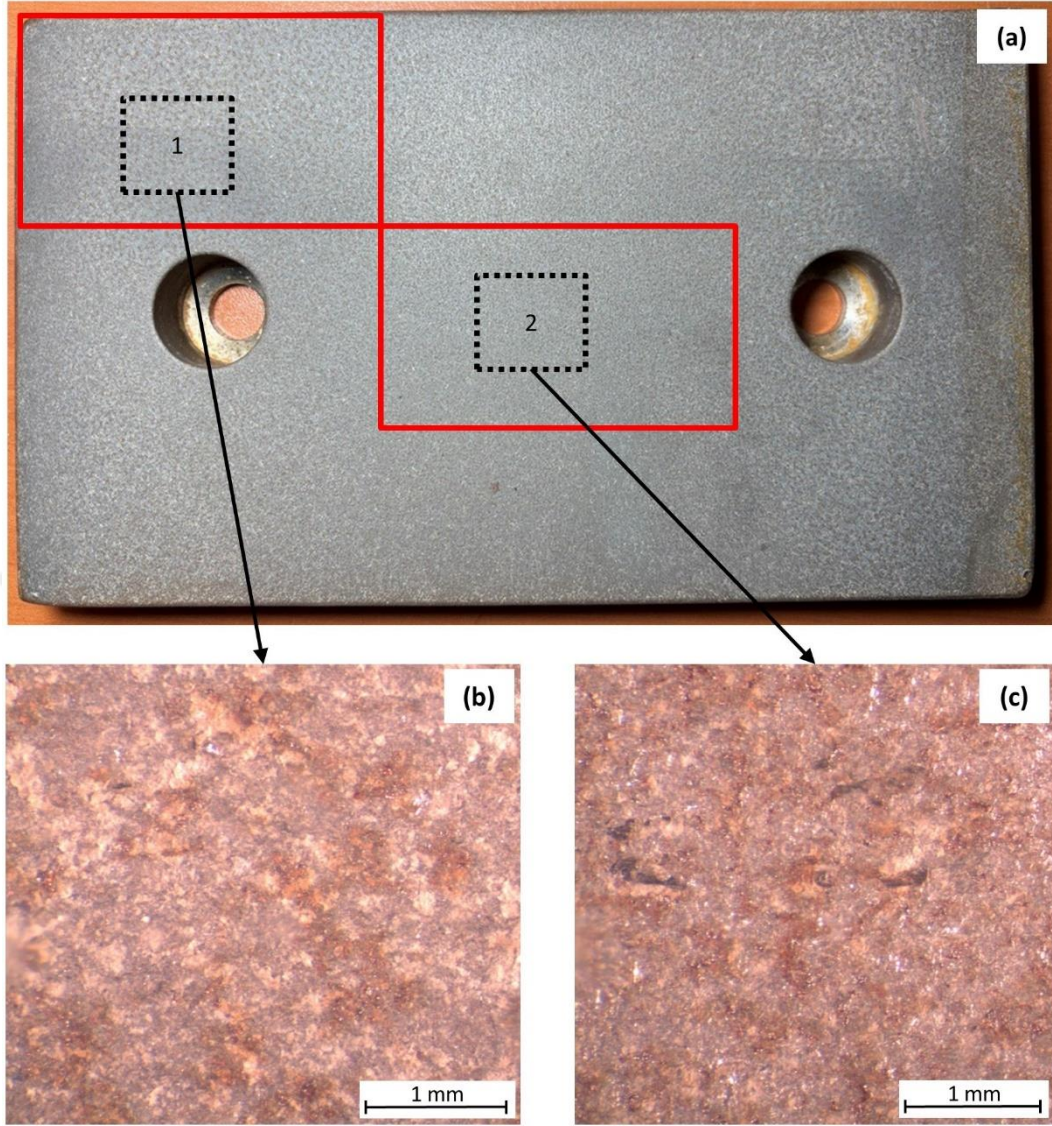
Cevher türlerinin kimyasal değişimi değişkenlik gösterdiği gibi aşınma plakalarının cevherlere göre aşınma karakteristikleri de değişkenlik göstermektedir. Bu durumda cevherlerin içeriği önem kazanmaktadır. Örneğin Etibakır Siirt Madenköy işletmesinden alınan bakır cevheri ve doğal çakıl taşı malzemeleri ile ön aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan 24 saatlik testler sonucunda doğal çakıl taşının bakır cevherine kıyasla daha uzun süre boyutsal kararlılık sergilediği tespit edilmiştir. Doğal çakıl taşlarının boyutsal bütünlüğünü koruması sayesinde uzun süreli testlerde bakır cevherine göre aşındırıcı özelliğinin devam edebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmasında Hardox 500 ve hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testlerinde aşındırıcı malzeme olarak doğal çakıl taşı kullanılmıştır. Doğal çakıl taşlarının içeriğinde bulunan kimyasal bileşimleri tespit etmek amacıyla XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 26’da XRD analizi sonuçlarına ait grafik verilmiş olup, doğal çakıl taşının ağırlık olarak silisyum oksit (SiO_2), clinocllore ($\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) ve albit ($\text{Na}_{0.9}\text{Ca}_{0.02}\text{Al}_{1.02}\text{Si}_{2.98}\text{O}_8$) içerdiği görülmektedir.



Şekil 26. Doğal çakıl taşı tozunun XRD analiz sonuçları

3.2. Plakalarda Meydana Gelen Aşınma Miktarı ve Aşınma Yüzeylerinin Görünümü

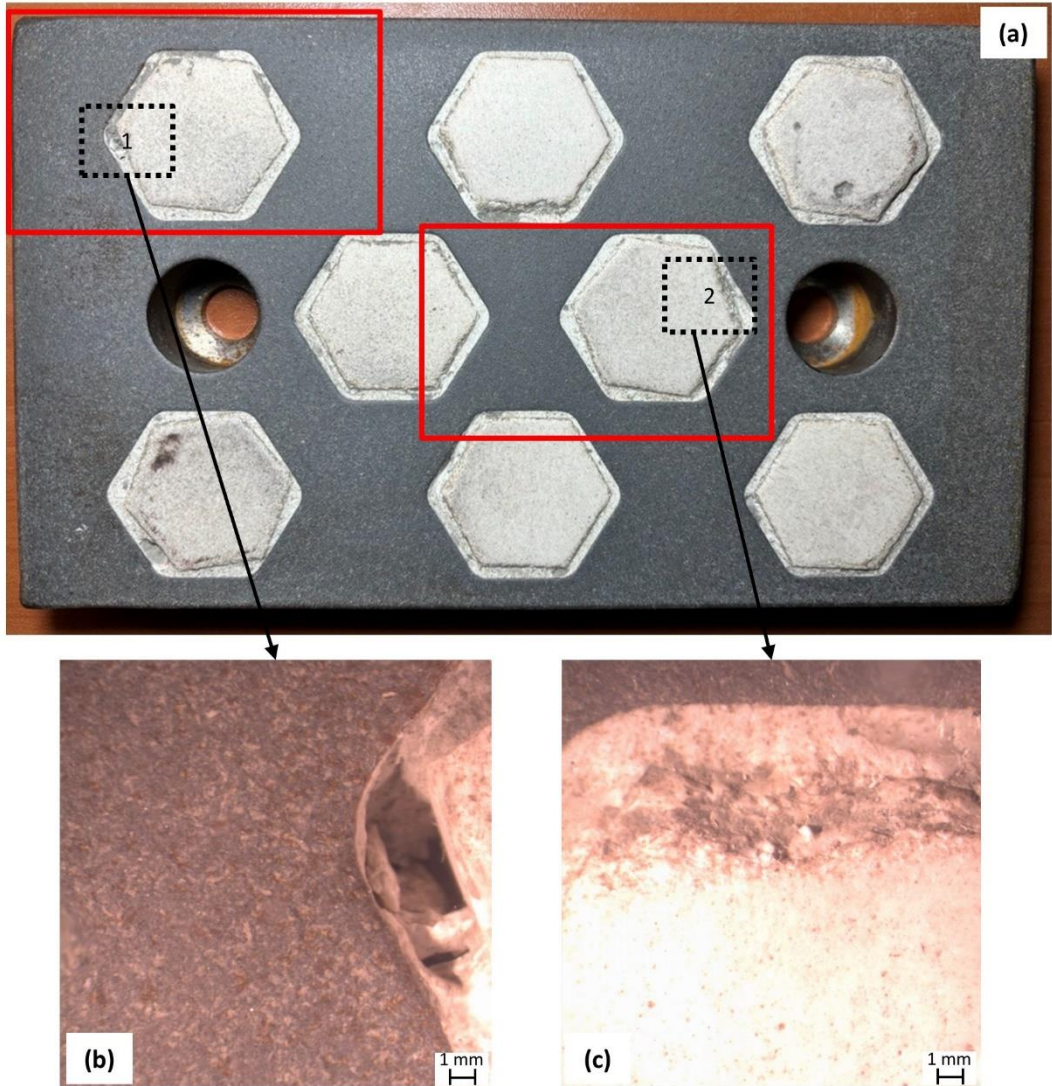
Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testleri sonrasında referans ve hibrit aşınma plakalarının yüzeylerini incelemek amacıyla plaka yüzeyleri iki bölgeye ayrılmıştır. RAP.01 kodlu referans aşınma plakası olan Hardox 500 plakanın aşınma sonrası her iki bölgede oluşan aşınma yüzeyleri Şekil 27’de gösterilmektedir. Daha önce yapılan bazı çalışmalara benzer olarak aşındırıcı karışımın tambur içerisinde yuvarlanma ve düşme hareketi sonucunda aşınma plakaları üzerinden farklı aşınma davranışları gözlemlenmiştir (Peng vd., 2017; Rendón vd., 2009; Ge vd., 2017; Pereira vd., 2017). Şekil 27 (a)’da referans aşınma plakasının genel görünümü verilmiş olup 1. ve 2. darbe bölgeleri plaka üzerinde gösterilmiştir. Şekil 27 (b)’de 1. darbe bölgesi incelendiğinde kayan aşındırıcı malzemenin bölgede oluşturduğu kaymalı abrazif sonucu oluşan aşınma izleri görülmektedir. Doğal çakıl taşlarının aşınma plakalarına sürtünmesi ile plaka yüzeylerinde bulunan mikro çıkıntıların aşınarak yüzeyden ayrılması ile iki cisimli aşınma mekanizması meydana gelmiştir. Yüzeyden ayrılan parçacıklar, aşınma plakası ve aşındırıcı karışımın sürtünmesi sonucu ise üç cisimli aşınma mekanizması meydana gelmiştir (Gahr, 1998). Tüm bunlara bağlı olarak yüzeylerde parçacıkların kayma yolları boyunca aşınma izleri oluşmuştur. Şekil 27 (c)’de 2. darbe bölgesi incelendiğinde ise aşındırıcı malzemenin serbest düşme hareketi ile yüzeyde oluşturduğu darbeli abrazif aşınma sonucu yüzeyde aşınma çizgilerine ek olarak düşen parçacıkların uyguladığı kuvvet etkisi ile çukurlar oluşmuştur.



Şekil 27. RAP.01 referans aşınma plakasının aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri: (a) genel görünüm, (b) 1. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü ve (c) 2. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü

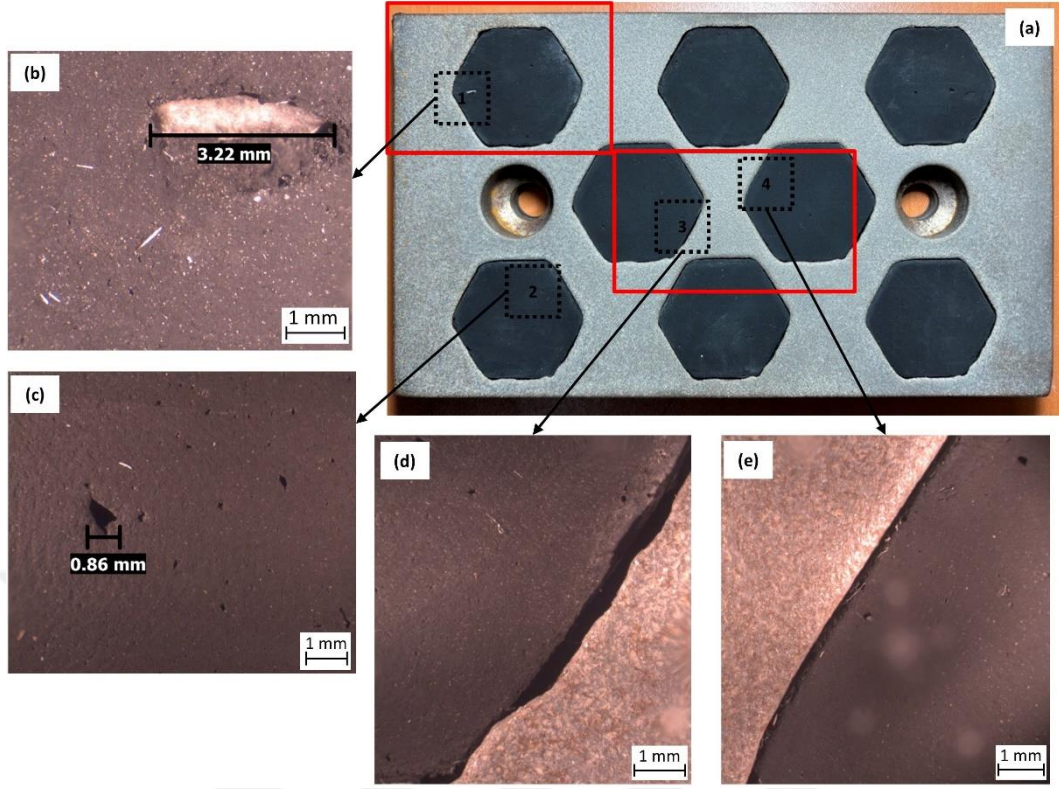
HAP.01 kodlu Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasının aşınma sonrası her iki bölgede oluşan aşınma yüzeyleri Şekil 28’de gösterilmektedir. Şekil 28 (a)’da hibrit aşınma plakasının genel görünümü verilmiş olup 1. ve 2. darbe bölgeleri plaka üzerinde gösterilmiştir. Şekil 28 (b)’de 1. darbe bölgesi incelendiğinde kayan aşındırıcı malzemenin bölgede oluşturduğu kaymalı abrazif aşınma sonucu hekzagonal geometriye sahip alümina parçaların metal matrise sabitlenmesi için kullanılan yapıştırıcının aşınarak ara yüzeyde boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Şekil 28 (c)’de 2. darbe bölgesi incelendiğinde ise aşındırıcı malzemenin serbest düşme hareketi ile hekzagonal geometriye sahip alümina

parçaların kenarlarını oluşturan keskin bölgelerde kırılmalar olduğu görülmektedir. Önceki çalışmalarda gerçekleştirilen seramik ve metal malzemelerin aşınma testleri incelendiğinde malzemelerin sertlik değerlerinin aşınma dirençleri ile bağlantılı olduğu ve seramiklerin metallere göre aşınma direncinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Chen vd., 2017; Widder vd., 2023; Sare vd., 2001). Ancak seramik malzemelerin kırılma yokluğunun metal malzemelere göre daha düşük olması sebebiyle darbe etkisi altında keskin köşelerde oluşan mikro çatlakların zamanla ilerlemesi seramik malzemelerin kırılmasına neden olmaktadır (Zok vd., 2007; Koch vd., 2020).



Şekil 28. HAP.01 hibrit aşınma plakasının aşınma testi sonrası yüzey görünüşleri: (a) genel görünüm, (b) 1. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü ve (c) 2. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü

HAP.02 kodlu Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakasının aşınma sonrası her iki bölgede oluşan aşınma yüzeyleri Şekil 29'da gösterilmektedir. Şekil 29 (a)'da hibrit aşınma plakasının genel görünümü verilmiş olup 1. ve 2. darbe bölgeleri plaka üzerinde gösterilmiştir. Şekil 29 (b)'de 1. darbe bölgesi incelendiğinde kayan aşındırıcı malzemenin bölgede oluşturduğu kaymalı abrazif sonucunda kauçuğun yüzeyden kopması sonucunda yüzeyde oluşan boşluklara yerleştiği görülmektedir. Şekil 29 (c)'de aşındırıcı malzemenin yüzeyde olduğu yırtılmalara ek olarak kauçuk içerisine katkılanmış alümina parçalarının kauçuğu yırtarak dışarı çıkması sonucu yüzeyde oluşan boşluklar görülmektedir. Alümina ve kauçuk malzemesinin arasındaki zayıf ara yüzey yapışması, alümina tozlarının boyutları ve tozların kauçuk içerisinde tam homojen dağılım sergileyememesi mukavemet ve esneklikte azalmaya sebebiyet vermiştir. Bu durum özellikle kaymalı abrazif aşınmaya maruz kalan bölgelerde kauçuğun daha çok deformasyona uğramasına sebebiyet vermiştir (Mirizzi vd., 2023). Şekil 29 (d)'de 2. darbe bölgesi incelendiğinde ise aşındırıcı malzemenin serbest düşme hareketi kauçuk malzemedan ziyade Hardox 500 malzemesinin daha fazla deformasyona uğradığı görülmektedir. Şekil 29 (e)'de ise aynı darbe bölgesinden alınan bir başka bölüm gösterilmektedir. 2. darbe bölgesinde genel olarak kauçuk malzemenin metal matrise göre daha az aşındığı ve kauçuk malzemenin üzerinde daha çok boşluk olduğu görülmektedir.



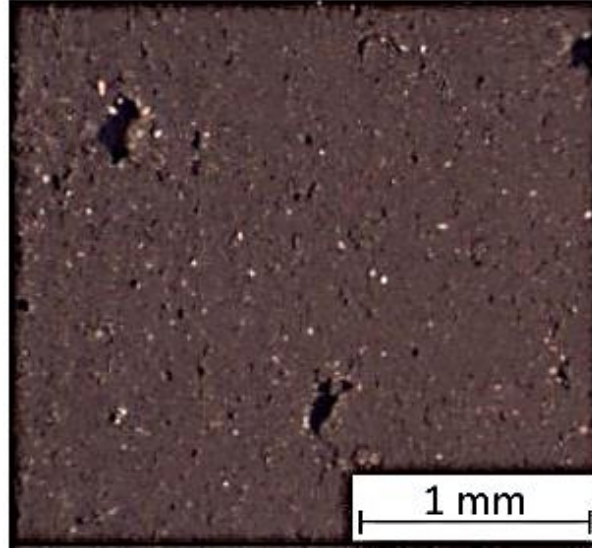
Şekil 29. HAP.02 hibrit aşınma plakasının aşınma testi sonrası yüzey görünüşleri: (a) genel görünüm, (b,c) 1. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü ve (d,e) 2. darbe bölgesinin stereo mikroskop görüntüsü

Referans ve hibrit aşınma plakalarının toplamda 686 saatte tamamlanan birinci darbeli abrazif aşınma testleri sonrasındaki ağırlık ölçümleri her 168 saatte bir ve son olarak 14 saatlik test sonrasında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ağırlık ölçümlerinin sonuçları Tablo 12’de verilmiştir ve ağırlık değişimlerinin nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

Tablo 12. Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testleri sonrasında meydana gelen kütle değişimleri

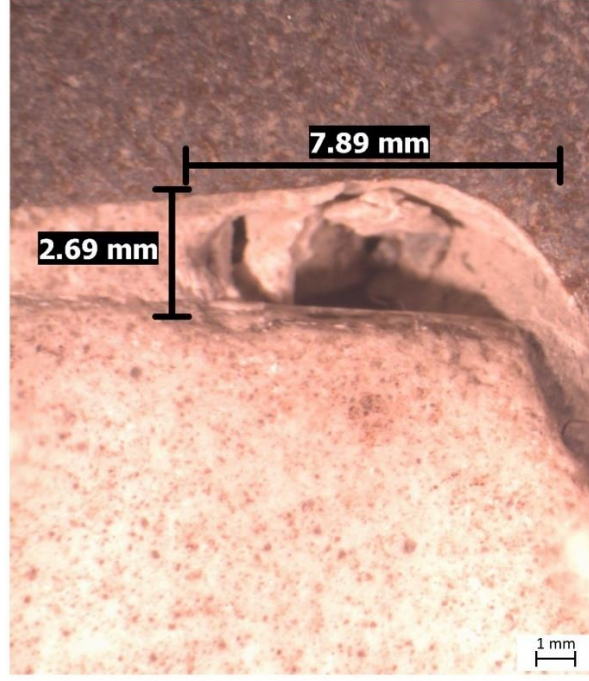
Test Süresi (saat) / Numune Kodu	Referans ve Hibrit Aşınma Plakalarının Ağırlık Ölçümleri (gr)		
	RAP.01	HAP.01	HAP.02
0	3495,72 ±0,02	2945,28 ±0,02	1841,86 ±0,02
168	3493,72 ±0,02	2942,38 ±0,02	1841,12 ±0,02
336	3493,36 ±0,02	2942,01 ±0,02	1840,27 ±0,02
504	3493,2 ±0,02	2941,07 ±0,02	1839,61 ±0,02
672	3493,08 ±0,02	2941,08 ±0,02	1838,79 ±0,02
686	3492,33 ±0,02	2940,41 ±0,02	1838,24 ±0,02
Toplam Kütle Kaybı (gr)			
686	3,39 ±0,02	4,87 ±0,02	3,62 ±0,02

Referans ve hibrit aşınma plakalarının ağırlık ölçümleri incelendiğinde 168 saatlik aşınma testi sonrası kütle kayıplarının RAP.01, HAP.01 VE HAP.02 olmak üzere sırasıyla 2 gr, 2,9 gr ve 0,74 gr olduğu tespit edilmiştir. Hardox 500 malzemesinde bulunan ve koruyucu astar (shop primer) tabakası aşınarak yüzeyden ayrıldığı için genel olarak en çok aşınma sonrası kütle kaybı ilk aşınma testinde gerçekleşmiştir. Aşınma miktarları karşılaştırıldığında en çok aşınma Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasında meydana geldiği görülmektedir. Aşınma miktarının yüksek olmasının sebebi Hardox 500 üzerindeki koruyucu astar tabakasının yüzeyden aşınarak gitmesine ek olarak Hardox 500 ve hegzagonal geometriye sahip alümina seramiklerin birleştirilmesi için kullanılan yapıştırıcı malzemesinin plaka yüzeyinde kalan fazla kısımlarının da aşınmasından kaynaklıdır. İkinci hafta testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.01, HAP.01 VE HAP.02 olmak üzere sırasıyla 0,36 gr, 0,37 gr ve 0,85 gr olduğu tespit edilmiştir. Hardox 500 malzemesinin ilk hafta aşınmasından sonra aşınma miktarının gittikçe azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi shop primer tabakasının aşınarak yüzeyden ayrılması sonrasında açığa çıkan yüzeyin aşınmaya karşı dayanıklı Hardox 500 malzemesi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasının aşınma miktarının, Hardox 500 plakaya göre daha fazla kalmasının sebebi ise ara bağlayıcı olan yapıştırıcının aşınmaya devam etmesinden kaynaklanmaktadır. Aşınma testi sonrası en fazla kütle kaybı olan plaka Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakasıdır. Bunun sebebi ise kauçuk malzemesinin seramik katkılı olmasına rağmen Hardox 500 ve alümina malzemesine göre aşınmaya direncinin daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca neopren içerisine eklenen alümina tozlarının 50 mikrondan büyük olması durumunda kauçuğu yırtarak dışarıya çıkması hem kauçuğun daha fazla deformasyona uğramasına sebep olmuş hem de kauçuk içerisinden çıkmasından dolayı kütle kaybını arttırmıştır. Şekil 30'da seramik tozlarının kauçuğu yırtarak dışarı çıkması sonucu oluşan boşluklar gösterilmektedir.



Şekil 30. Alümina katkılı neopren kauçuk numunenin aşınma sonrası görüntüsü ve kauçuğu yırtarak dışarı çıkan alümina parçacıklarının bıraktığı boşluklar

Üçüncü hafta testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.01, HAP.01 VE HAP.02 olmak üzere sırasıyla 0,16 gr, 0,94 gr ve 0,66 gr olduğu tespit edilmiştir. Hardox 500 üçüncü hafta testlerinde en az aşınan aşınma plakası olmuştur. Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasının ise en çok aşınan hibrit aşınma plakası olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise sadece plaka yüzeyinde kalan yapıştırıcı değil metal ve seramik parçaların yanıl ara yüzeylerinde bulunan yapıştırıcının da aşınmasıyla beraber kütle kaybının devam etmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Yapıştırıcı olarak kullanılan malzemenin, içerisinde alümina tozları bulunması sebebiyle mukavemet değerleri arttırılmasına rağmen, metal ve seramik malzemelere göre düşük mukavemet ve sertlik değerlerine sahip olmasından dolayı yapıştırıcı malzeme diğer malzemelere göre daha çok aşınarak plaka yüzeyinden ayrılmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda seramik ve metal malzeme arasında bulunan yapıştırıcı katmanının kalınlığının aşınma direncine etkisi araştırılmış ve artan katman kalınlığının bağ mukavemetini düşürdüğü, seramiklerin kırılma davranışının arttırdığı ve ara katmanda oluklar oluşturduğu tespit edilmiştir (Liu vd., 2024; Shen vd., 2021). Şekil 31’de Hardox 500 ve alümina malzemelerinin birleşim noktalarında plaka tabanına doğru ilerleyen oluklar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 31. Hardox 500 ve alümina malzemelerini birleştiren seramik esaslı epoksi yapıştırıcının ara yüzeyden aşınarak ayrılması sonucu oluşan boşluklar

Dördüncü hafta testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.01 ve HAP.02 olmak üzere sırasıyla 0,12 gr ve 0,82 gr olduğu tespit edilmiştir. Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasında kütle artışı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin metal ve seramik arasında kalan yapıştırıcının aşınması sonucu oluşan boşluklara aşındırıcı malzemenin dolmasında kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Hardox 500 malzemesinin aşınma miktarı gittikçe azalmakta, Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakanın aşınma miktarı ise ortalama aynı miktarda devam etmektedir. Her saat başı tekrarlanan ve toplamda 14 saat süren testler sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.01, HAP.01 ve HAP.02 olmak üzere sırasıyla 0,75 gr, 0,67 gr ve 0,55 gr olduğu tespit edilmiştir. Aşındırıcı karışımın Şekil 32’de görüldüğü gibi 1 saat sonrasında bile keskin köşelerinin tam olarak kaybolmadığı, fakat 24 saatlik test sonrasında keskin köşelerin aşınma plakalarına çarpma etkisiyle aşınarak zamanla ovalleştiği görülmektedir.



Şekil 32. Aşındırıcı malzemenin 0, 1 ve 24 saatlik test sonrası durumu

Doğal çakıl taşlarının saatte bir değiştirilmesi ve buna bağlı olarak keskin köşeli yapısının korunması, taşların aşındırma özelliğini etkilemektedir (Thakare vd, 2012). Ayrıca endüstriyel ekipmanlarda aktarılan malzemelerin keskin köşeli olmasından dolayı saatlik testlerin plakalarda meydana gelen aşınma durumunu daha iyi simüle edilebileceği tespit edilmiştir. Yapılan saatlik aşınma testlerinde en iyi aşınma dayanımını Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakasını gösterirken en kötü sonucu ise Hardox 500 aşınma plakası vermiştir. Hardox 500 + alümina hibrit aşınma plakasında ise yapıştırıcı malzemenin aşınmasının devam etmesine rağmen aşınma sonrası kütle kaybının Hardox 500 aşınma plakasına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Hardox 500 malzemesinin alüminaya göre sertlik değerinin daha düşük olması iki cisimli abrazif aşınma etkisi altında daha çok aşınmasına ve buna bağlı aşınma sonrası kütle kaybının daha fazla olmasına sebep olmuştur (Chen vd., 2017; Sherman, 2000). Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakasının diğer plakalara kıyasla aşınma sonrası kütle kaybının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Önceki çalışmalar incelendiğinde kauçuk malzemelerin yüksek esneklik, yırtılma, darbe ve aşınma direncine sahip olmasıyla metalik malzemelere göre aşınma dayanımının daha yüksek olduğu ve 14 saatlik test sonuçlara benzer sonuçlar alındığı görülmektedir (Sare vd., 2001). Sonuç olarak laboratuvar ölçekli darbeli abrazif aşınma testlerinde 686 saatlik çalışma sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde toplam kütle kayıplarının RAP.01, HAP.01 ve HAP.02 olmak üzere sırasıyla 3,39 gr, 4,87 gr ve 3,62 gr olduğu ve aşınma sonrası kütle kaybının en düşük Hardox 500 aşınma plakasında meydana geldiği tespit edilmiştir.

Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için 480 saatlik darbeli abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonrasındaki ağırlık ölçümleri her 120 saatlik test sonrasında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ağırlık ölçümlerinin sonuçları Tablo 13'te verilmiştir ve ağırlık değişimlerinin nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

Tablo 13. Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakaları için gerçekleştirilen darbeli abrazif aşınma testleri sonrasında meydana gelen kütle değişimleri

	Referans ve Hibrit Aşınma Plakalarının Ağırlık Ölçümleri (gr)		
Test Süresi (saat)	RAP.02	HAP.03	HAP.04
0	3562,82 $\pm$ 0,02	3019,44 $\pm$ 0,02	1868,06 $\pm$ 0,02
120	3559,75 $\pm$ 0,02	3016,05 $\pm$ 0,02	1866,00 $\pm$ 0,02
240	3557,70 $\pm$ 0,02	3014,45 $\pm$ 0,02	1864,07 $\pm$ 0,02
360	3551,75 $\pm$ 0,02	3011,35 $\pm$ 0,02	1863,01 $\pm$ 0,02
480	3546,97 $\pm$ 0,02	3008,32 $\pm$ 0,02	1860,06 $\pm$ 0,02
Toplam Kütle Kaybı (gr)			
480	15,85 $\pm$ 0,02	11,12 $\pm$ 0,02	8,00 $\pm$ 0,02

120 saatlik darbeli abrazif aşınma testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.02, HAP.03 ve HAP.04 olmak üzere sırasıyla 3,07 gr, 3,39 gr ve 2,06 gr olduğu tespit edilmiştir. Aşınma sonrası kütle kaybı en çok Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasında meydana gelmiştir. Bir önceki testlere benzer şekilde Hardox 450 malzemesinin üzerinde bulunan shop primer tabakasının aşınması tüm plakalarda aşınma sonrası kütle kaybına sebep olmuştur. Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasında ise bu kütle kaybına ek olarak yapıştırıcı malzemenin aşınmasıyla diğer plakalara kıyasla daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir. 240 saatlik darbeli abrazif aşınma testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.02, HAP.03 ve HAP.04 olmak üzere sırasıyla 2,05 gr, 1,6 gr ve 1,93 gr olduğu tespit edilmiştir. Hardox 450 malzemesinin 120 saatlik aşınma testi sonuçlarına göre aşınma sonrası kütle kaybının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi Hardox 500 malzemesine benzer şekilde shop primer tabakasının aşınarak yüzeyden ayrılması sonrasında açığa çıkan yüzeyin aşınmaya karşı dayanıklı Hardox 450 malzemesi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aşınma sonrası kütle kaybının en fazla Hardox 450 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakasında meydana geldiği görülmektedir.

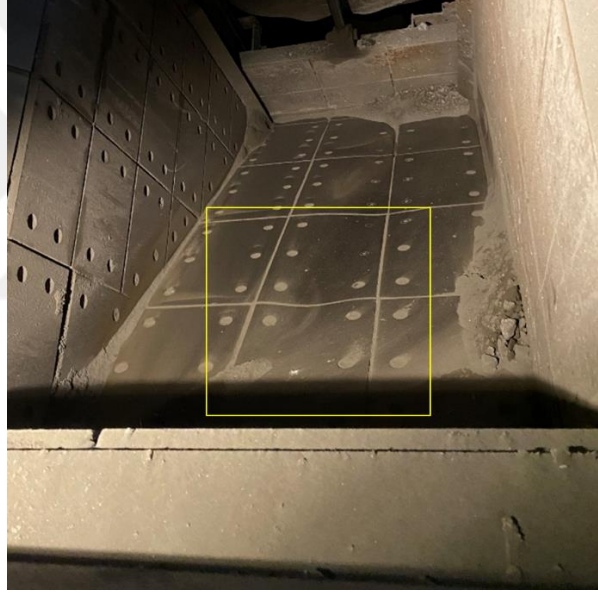
Neopren malzemesinin aşınma direncinin alümina malzemesine göre daha düşük olması sebebiyle Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasına göre daha fazla aşındığı düşünülmektedir. 360 saatlik darbeli abrazif aşınma testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.02, HAP.03 ve HAP.04 olmak üzere sırasıyla 5,95 gr, 3,1 gr ve 1,06 gr olduğu tespit edilmiştir. Demir Export İspir işletmesinden temin edilen bakır-çinko cevherinin içeriği ve nemli yapısı zamanla çelik yapıların abrazif aşınmaya ek olarak korozyon aşınmaya maruz kalmasına sebep olmuştur (Dalmau vd., 2018). Korozyona uğrayan çelik malzemede meydana gelen üç elemanlı abrazif aşınma mekanizması çeliğin daha çok aşınmasına ve buna bağlı olarak aşınma sonrası kütle kayıplarının önceki testlere göre daha fazla olmasına sebep olmuştur (Axén vd., 1994; Gahr, 1998). Bu durumun göstergesi olarak en fazla aşınma sonrası kütle kaybı Hardox 450 aşınma plakasında meydana gelmiştir. Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasında yapıştırıcı malzemenin aşınmasından dolayı Hardox 450 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakasına göre daha fazla aşındığı, alümina malzemesinin korozyon direncinin çelik malzemelere göre daha yüksek olması sebebiyle de Hardox 450 plakaya kıyasla daha az aşındığı düşünülmektedir. 480 saatlik darbeli abrazif aşınma testlerinin sonrasında yapılan ölçümler incelendiğinde aşınma testleri sonrası kütle kayıplarının RAP.02, HAP.03 ve HAP.04 olmak üzere sırasıyla 4,78 gr, 3,03 gr ve 2,95 gr olduğu tespit edilmiştir. Hardox 450 ve Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakalarının 360 saatlik test sonuçlarına benzer şekilde aşınma davranışı sergilemiştir. 480 saatlik testler sonucunda toplam kütle kayıpları RAP.02, HAP.03 ve HAP.04 olmak üzere sırasıyla 15,85 gr, 11,12 gr ve 8 gr olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan tüm aşınma testleri incelendiğinde darbeli abrazif aşınmaya karşı Hardox 450 ve Hardox 450 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarının Hardox 500 ve Hardox 500 ile oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarına benzer şekilde aşınma davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Ancak Hardox 500 malzemesinin Hardox 450 malzemesine göre aşınma dayanımının daha yüksek olması sebebiyle aşınma testleri sonrasında Hardox 500 malzemesi ile oluşturulan aşınma plakalarında daha az kütle kaybı meydana gelmiştir (Üllen, 2018; Valtonen vd., 2019). Ayrıca bakır-çinko cevherlerinin doğal çakıl taşlarına göre daha aşındırıcı bir malzeme olması ve plakalar üzerinde korozyon etki oluşturmaması nedeniyle aşınma plakalarında doğal çakıl taşı ile yapılan testlere göre daha fazla kütle kaybı oluşmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak bakır-çinko cevherleri ile yapılan testlerde hem darbe hem de korozyon direnci yüksek olan neopren malzeme ile elde edilmiş Hardox 450 + alümina

katkılı neopren hibrit aşınma plakasının Hardox 450 ve Hardox 450 + alümina aşınma plakalarına kıyasla aşınma dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Saha Çalışmalarına Ait Bulgular

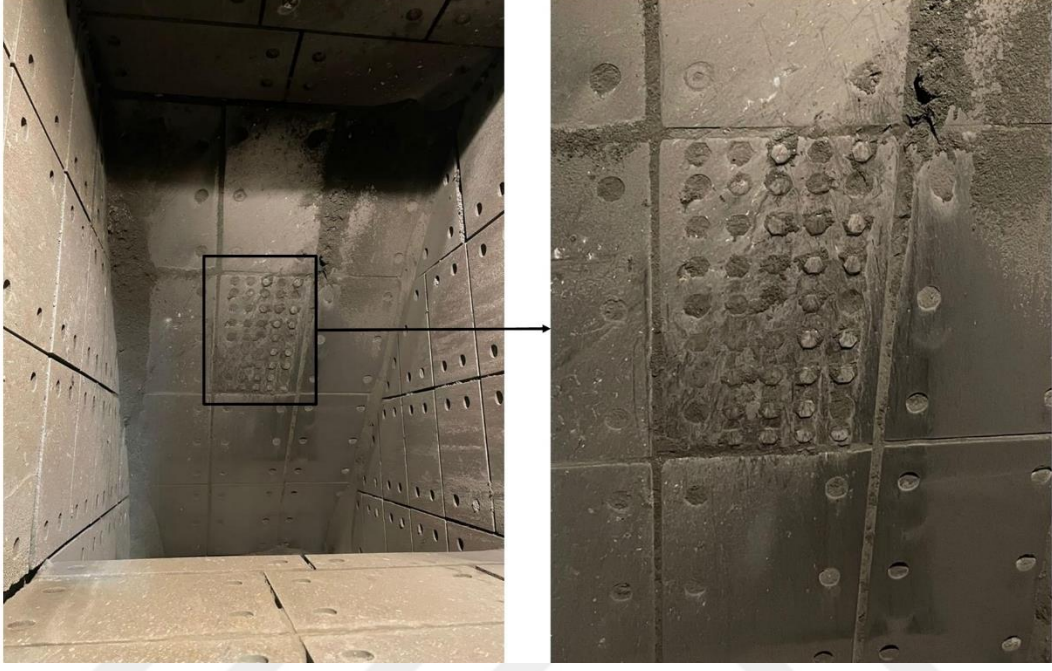
Çalışma kapsamında yapılan üç adet saha testlerinden elde edilen ilk sonuçlar incelendiğinde ise laboratuvar testlerine kıyasla daha farklı ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Eti Bakır Siirt Madenköy işletmesinde yer altında bulunan cevher transfer hattında kullanılan ve Şekil 33'te gösterilen pantolon şutta Hardox 500 aşınma plakaları kullanılmakta ve bu plakalar 6 ay sonrasında tamamen aşınarak çalışma ömrünü tamamlamaktadır.



Şekil 33. Etibakır Siirt Madenköy işletmesine ait pantolon şutta meydana gelen aşınma görüntüsü

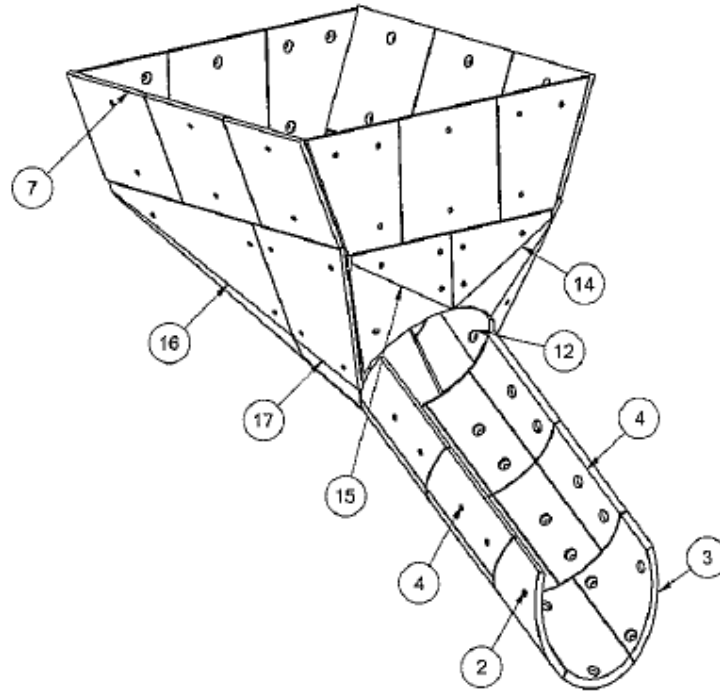
Mevcut bölgeye Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakaları montaj edilerek saha testleri yapılmıştır. Hibrit aşınma plakasını oluşturan seramikler ve metal matris yüzeylerindeki yükseklik farkı sebebiyle nemli cevherler aşınma plakası yüzeyine yapışarak birikmeye başlamıştır. Meydana gelen yapışma problemi Şekil 34'te gösterilmiştir. Bu durumun giderilmesi amacıyla işletmenin her bakım zamanında nemli cevherler kazıma aletleri ile aşınma plakası yüzeylerden temizlenmiştir. Cevherlerin temizlenmesi esnasında seramiklerin metal matris dışında kalan bölümlerine gelen darbeler sonucu deformasyonlar

oluşmuş ve seramikler bir süre sonra kırılmıştır. Bu duruma rağmen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakası ile yapılan saha testleri 9+ aydır devam etmekte olup tekil yapıdaki aşınma plakalarına göre daha uzun çalışma sürelerine ulaşılmıştır.



Şekil 34. Etibakır Siirt Madenköy işletmesine ait pantolon şuta montaj edilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasında meydana gelen yapışma problemi

Demir Export İspir işletmesinde yapılan saha testinden SAG değirmen besleme şutunda 2 metre yükseklikten düşen bakır – çinko cevherleri ve öğütücü bilyalar düşüş noktasında aşırı aşınma meydana gelmektedir. Şekil 35’te besleme şutunun teknik resmi gösterilmiş olup 4 numaralı plakalar aşırı aşınmaya maruz kalmaktadır.



Şekil 35. Demir Export İspir işletmesinde bulunan SAG değirmen besleme şütuna ait teknik resim

Mevcut bölgede daha önce yapılan çalışmalarda kauçuk plakalar 6-8 gün, yüksek manganlı çelik ve Hardox 450 plakalar 8-12 gün sonra tamamen aşınarak çalışma ömrünü tamamlamaktadır. Mevcut şüt tasarımı, aktarımı yapılan cevher ve bilyaların düşüş bölgelerindeki darbe etkisini azaltacak şekilde yapılmaması sebebiyle aşınma plakaları için büyük bir dezavantaj oluşmuştur. Çalışma kapsamında yapılan saha testinden elde edilen ilk sonuçlar incelendiğinde mevcut bölgede Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakalarının 7 gün sonraki durumu Şekil 36'da gösterilmektedir. Önceki çalışmalar incelendiğinde aşınma plakasında seramik malzemelerin kullanımının, düşük darbe tokluğu nedeniyle dezavantaj yarattığı ve seramiğin kauçuk malzeme ile beraber kullanımının bu dezavantajı ortadan kaldırdığı bildirilmiştir (Varga vd., 2023). Ancak mevcut çalışmada hibrit aşınma plakasının tabanına yerleştirilen 10 mm kalınlığa sahip neopren kauçuğun darbeleri sönmülmesine rağmen seramiklerde kırılma başlangıçları gözlemlenmiştir. 15 gün sonunda ise Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakaları aşınarak çalışma ömrünü tamamlamış ve aşınma plakalarının son durumları Şekil 37'de gösterilmiştir.



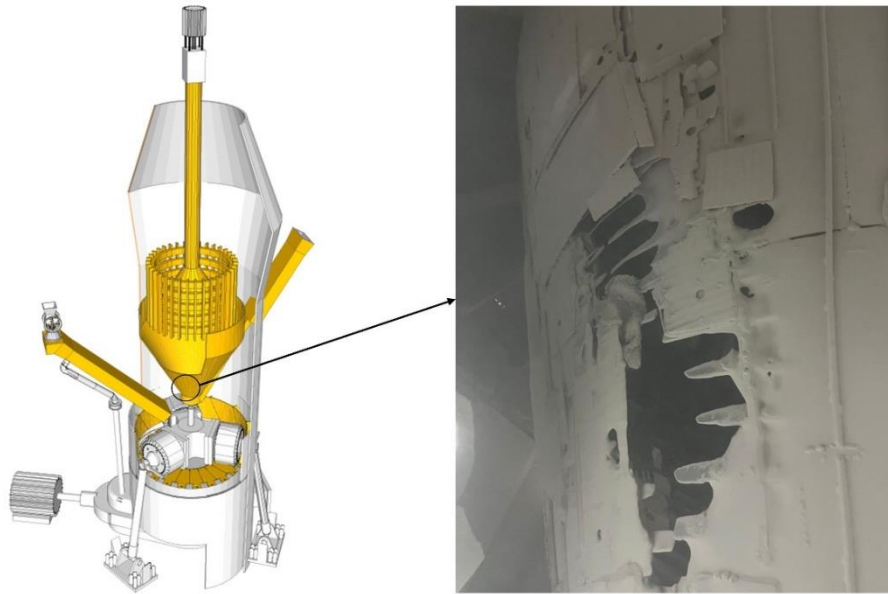
Şekil 36. Demir Export İspir işletmesinde SAG değirmen besleme şutuna montaj edilen Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakalarının 7. gün sonundaki durumu



Şekil 37. Demir Export İspir işletmesinde SAG değirmen besleme şutuna montaj edilen Hardox 450 + alümina + neopren hibrit aşınma plakalarının 15. gün sonundaki durumu

Daha önce yapılan çalışmalarda Hindistan’da bulunan bir kurşun - çinko madeninde cevherlerin aktarıldığı ve işlendiği ekipmanların iç yüzeyinde aşınan bölgelere yüksek manganlı çelik kaplamalar yapılmakta ve yaklaşık 25 gün çalışma ömrü sergilemektedir. Mevcut bölgede denemesi yapılan yüksek manganlı çelik + seramik hibrit aşınma plakalarının bir yıl sonrasında sadece %40’nın değiştirildiği ve %60’ının faaliyete devam ettiği bildirilmiştir (URL-2, 2024). Bir başka örnek olarak İngiltere’de bir altın madeninde 2 metre yükseklikten düşen altın cevherlerinin ekipmana zarar vermemesi için yapılan kauçuk kaplamaların 6-8 haftada değiştirildiği ancak işletmenin verimli çalışması için kesintisiz çalışma süresinin 12 hafta olduğu belirtilmiştir. Mevcut bölgede yapılan yüksek manganlı çelik + seramik aşınma plakalarının 16 haftalık çalışma sonrasında aşınma kaybının hacimsel olarak %10-13 olduğu ve seramik parçalarda deformasyon görülmediği bildirilmiştir (URL-1, 2024). Bu çalışmaların neticesinde Demir Export İspir işletmesinde bulunan değirmen besleme şutunda yüksek manganlı çelik ve Hardox malzemesinin tekil kullanımının yetersiz olduğu, seramik ve kauçuk malzeme ile kombine edilen hibrit aşınma plakalarının kullanımı daha faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

Batisöke Çimento Sanayinde farin malzemesinin öğütülmesi için kullanılan farin değirmeninde sert dolgu kaynağı kullanılarak değirmen için kaplanmaktadır. Farin değirmenine ait şematik resim ve en çok aşınan bölge Şekil 38’de gösterilmektedir. Farin değirmeninde öğütülen farin malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 14’te verilmiştir.



Şekil 38. Batisöke Çimento Sanayi işletmesinde bulunan farin değirmeninin şematik gösterimi ve en çok aşınan bölgeye ait görüntü (URL-4, 2024)

Tablo 14. Batisöke Çimento Sanayi işletmesine ait farin malzemesinin kimyasal bileşimi

	Ağırlıkça Yüzdesi (%)
Silisyum	15
Demir	4
Alüminyum	4
Kalsiyum Karbonat	77

Sert dolgu kalınlığı 5 mm'dir ve mevcut bölgede çalışma ömrü yaklaşık 1 – 1,5 aydır. Daha önce yapılan çalışmalarda tekil olarak kullanılan seramik kaplamalar ve aşınmaya dayanıklı çelikler yaklaşık 1 ay aşınma ömrü sergilemiştir. Çalışma kapsamında yapılan saha çalışmalarında farin içerisinde ne çok aşınan bölgeye Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakası yerleştirilmiştir. Testler 5+ aydır devam etmekte olup Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasında gözle görülür bir aşınma veya yapısal bozulma gözlemlenmemiştir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan yüksek manganlı çeliklerle oluşturulmuş hibrit aşınma plakalarının performansını görmek amacıyla ayrıca aynı bölgeye ve yüksek manganlı çelik + alümina hibrit aşınma plakası da yerleştirilmiştir. Ancak yüksek manganlı çelik + alümina hibrit aşınma plakası yüzeyinde 3. aydan itibaren gözle görülür bir şekilde aşınmaya başlamıştır. Yüksek manganlı çelik + alümina hibrit aşınma plakasına ait görsel Şekil 39'da verilmiştir.



Şekil 39. Batisöke Çimento Sanayi işletmesinde bulunan farin değirmeni içerisine yerleştirilen yüksek manganlı çelik + alümina hibrit aşınma plakasının 3 ay sonraki görüntüsü

Daha önce yapılan bir çalışmada yüksek manganlı çeliklerin yüksek darbe etkisi altında sertleşme sağlamasından dolayı düşük darbe etkilerinde yüksek aşınma dayanımı sergileyemediği ve bunun yanında Hardox çeliklerinin düşük darbelerde yüksek manganlı çeliklere göre daha iyi aşınma dayanımı sergilediğini bildirmiştir (Tarasiuk vd., 2017). Yapılan saha çalışması bu durumu desteklemektedir. Yapılan bir başka çalışmada martensitik çelikler olan Hardox 450, Hardox 600, Fe–Cr–C, Fe–Cr–Nb–C–B içerikli sert dolgu alaşımları ile darbeli aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Darbeli aşınma test sonuçlarına göre sert dolgu alaşımlarının martensitik çeliklere göre aşınma dayanımlarının daha iyi olduğu bildirilmiştir (Rojacz vd., 2022). Çalışma kapsamında saha testlerinin gerçekleştirildiği farin değirmeninin içerisinde bu malzemeler ile saha denemeleri gerçekleştirilmiş ve bu çalışmaya benzer diğer çalışmalardan alınan sonuçlara göre sert dolgu alaşımları ile yapılan kaplamalarla daha iyi sonuç alınmıştır (Widder, L., 2023). Ancak malzemelerin tekil kullanımının yanı sıra tez kapsamında yapılan hibrit aşınma plakaları karşılaştırıldığında da Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasının diğer aşınma plakalarına göre daha uzun çalışma ömrüne ve aşınma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasının saha çalışmasının 5. ayındaki durumuna ait görüntüsü Şekil 40'ta verilmiştir.



Şekil 40. Batisöke Çimento Sanayi işletmesinde bulunan farin değirmeni içerisinde yerleştirilen Hardox 450 + alümina hibrit aşınma plakasının 5 ay sonraki görüntüsü

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamın Hardox 450 ve Hardox 500 aşınma plakası ile Hardox 450 + alümina, Hardox 450 + alümina katkılı neopren, Hardox 500 + alümina ve Hardox 500 + alümina katkılı neopren hibrit aşınma plakalarının aşınma performansları karşılaştırılmıştır. Aşınma plakalar ile laboratuvar ölçekli darbeli abrazif aşınma testleri yapılmıştır. Laboratuvar koşullarına yapılan testlere ek olarak üç adet sahada farklı koşullar altında saha performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Doğal çakıl taşı ile yapılan laboratuvar ölçekli darbeli abrazif aşınma testlerinde Hardox 500 plakanın Hardox 500 + alümina ve Hardox 500 + alümina katkılı neopren aşınma plakasına kıyasla aşınma dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
2. Hardox 450 ve 500 ile alümina malzemesinin birleşimi ile elde edilen hibrit aşınma plakalarında metal matris ve seramik malzemenin birleştirilmesi için kullanılan yapıştırıcının ara yüzeyde oluşturduğu tabaka kalınlığı yapışmayı sağlayacak şekilde optimum kalınlıkta olmalıdır.
3. Alümina malzemesinin geometrik yapısında bulunan keskin köşeleri çentik etkisi yaratmakta ve yüksek darbeler altında kırılmasına sebep olmaktadır.
4. Özellikle darbenin yoğun olduğu bölgelerde seramik ile kombine edilmiş hibrit aşınma plakalarında kauçuk kullanılmaması durumunda seramiklerin aldığı darbeler sonucu plakanın çalışma ömrü azaltmaktadır.
5. Alümina katkılı neopren malzemesi ile oluşturulan hibrit aşınma plakalarında kauçuk kullanımı, cevherlerin ekipman içerisindeki hareketi sonucu ortaya çıkan gürültünün azalmasına katkı sağlamıştır.
6. Neopren içerisine katkılanmış alümina tozları kauçuğun aşınma dayanımı arttırmıştır. Fakat tane boyutu 50 mikrometreden daha büyük olan alümina tozları kauçuğu yırtılmasına sebep olmaktadır.
7. Bakır-çinko cevheri ile yapılan laboratuvar ölçekli darbeli abrazif aşınma testlerinde Hardox 450 + alümina katkılı neopren aşınma plakasının Hardox 450 ve Hardox 450 + alümina aşınma plakalarına kıyasla aşınma dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

8. Hardox 500 malzemesinin aşınma dayanımının Hardox 450 malzemesine göre daha yüksek olması sebebiyle Hardox 500 plakanın aşınma sonrası kütle kayıplarının Hardox 450 plakaya kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.
9. Farin malzemesi ile yapılan saha çalışmaları sonuçlarına göre Hardox 450 + alümina aşınma plakasının sert dolgu kaynağına göre en az 5 kat daha fazla aşınma dayanımı sergilemiştir.
10. Aktarımı gerçekleştirilen cevherlerin mineralojik yapısı ve çevre koşullarına bağlı olarak cevher türlerinin aşındırıcı etkisi farklılık göstermektedir. Ekipmanlara kaplanacak aşınma plakası seçimi için mevcut bölgeden alınan cevherler ile yapılan darbeli abrazif aşınma testleri en uygun plaka seçimi için öngörü sağlamaktadır.

5. ÖNERİLER

Madencilik ve çimento sektörü gibi aktarımı yapılan veya işlenen malzemelerin ekipman yüzeyleri ile teması sonucu ortaya çıkan yüksek aşınmalar sonucu ekipmanlarda oluşan kalıcı deformasyonların önlenmesi amacıyla ekipman yüzeylerine aşınma astarları kaplanmaktadır. Aşınmaya dayanıklı çelikler, kauçuk veya seramik gibi malzemelerin tekil kullanımı ile imal edilen aşınma plakaları birden fazla aşınma türünün aynı anda yaşandığı bölgelerde işletmelerin talep ettikleri sürelerde aşınma dayanımı sergileyememektedir. Bu tip sorunların yaşandığı bölgelerde kullanılmak üzere çelik, seramik ve polimer malzemelerin kombinasyonları şeklinde oluşturulan hibrit aşınma plakaları geliştirilmiştir. Gelecekte yapılan çalışmalarda mevcut plakaların iyileştirilmesi veya yeni aşınma plakalarının geliştirilmesinde aşağıdaki önerilen faydalı olacağı düşünülmektedir.

1. Özellikle aşınma plakalarının kullanılacağı alanda nem oranı yüksek malzemelerin aktarılması ve işlenmesi söz konusu ise seramik numunelerin plaka yüzeyine sıfır olacak şekilde imal edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde plaka yüzeyinde malzeme birikmesine sebep olması zamanla ilgili bölgelerde tıkanmalara sebebiyet verecektir.
2. Çelik ve seramik malzeme kombinasyonları yapılırken malzemelerin birleştirilmesi için ara malzeme olarak yapıştırıcı kullanılması yerine malzemeler geometrik olarak birleştirilebilir. Böylece hem ara malzeme maliyetinin hem de aşınma sonrası oluşan kütle kayıplarından dolayı testlerin doğruluk payının azalması durumunun ortadan kalkacağı ön görülmektedir.
3. Yüksek darbe etkisinde olan bölgelerde seramik kullanımı gerekiyorsa seramiğin kauçuk içine gömülmesi veya plaka tabanında kauçuk kullanılması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akaryalı, E., Gücer, M. A., & Alemdağ. S. (2018). Atık Barajı Rezervuarı ve Cevher Stok Alanlarında Asit Maden Drenajı (AMD) Oluşumunun Değerlendirilmesi: Gümüşhane Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 192-209.
- Arnold, J.C., & Hutchings, I.M. (1990). The Mechanisms of Erosion of Unfilled Elastomers by Solid Particle Impact , *Wear*,1, 138, 36-46.
- Axén, N., Jacobson, S., & Hogmark, S. (1994). Influence of Hardness of the Counterbody in Three-Body Abrasive Wear — An Overlooked Hardness Effect. *Tribology International*, 27 (4), 233-241.
- Chandrasekaran, C. (2017). *Anticorrosive Rubber Lining*. Plastic Design Library Yayını.
- Chen, W., Biswas, S., Roberts, A., O'Shea, J., & Williams, K. (2017). Abrasion Wear Resistance of Wall Lining Materials in Bins and Chutes During Iron Ore Mining. *International Journal of Mineral Processing*, 167, 42-48.
- Cheng, J. P., Liu, T., Zhang, J., Wang, B.B., Ying, J., Liu, F. & Zhang, X. B. (2014). Influence of Phase and Morphology on Thermal Conductivity of Alumina Particle/Silicone Rubber Composites. *Applied Physics*, 117, 1985-1992.
- Çıkıt, E. (2015). *Kırıcı ve Öğütücülerde Kullanılan Demir Esaslı Malzemelerin Yapı, Mekanik Özellikler ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. İ.T.Ü. , Fen Bilimleri Enstitüsü , Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Dalmau, A., Richard, C., & Igual – Muñoz, A. (2018). Degradation Mechanisms in Martensitic Stainless Steels: Wear, Corrosion and Tribocorrosion Appraisal. *Tribology International*, 121, 167-179.
- Franek, F., Badisch, E., & Kirchgaßner, M. (2009). Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials. *FME Transaction*, 37(2), 61-70.
- Fu, S., Feng, X., Lauke, B. & Mai, Y. (2008). Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate–Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, 39 (6), 933-961.
- Gahr, K.-H.Z. (1998). Wear by Hard Particles. *Tribology International*, 31 (10), 587-596.
- Ge, S., Wang, Q., & Wang, J. (2017). The Impact Wear Resistance Enhancement Mechanism of Medium Manganese Steel and Its Applications in Mining Machines. *Wear*, 376-377(B), 1097-1104.
- Grasser, D., Gallo, S. C., Barnett, M., & Pereira, M. (2024). Design Principles for Wear Liners With Inserts in Mining Chutes. *Powder Technology*, 436, 119450.

- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K., & Erdemir, A. (2017). Global Energy Consumption Due to Friction and Wear in the Mining Industry. *Tribology International*, 115, 116-139.
- Huang, C. & Chen, Y. (2016). Design and Impact Resistant Analysis of Functionally Graded $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ Ceramic Composite, *Materials and Design*, 91, 294-305.
- Idrissi, H., Renard, K., Schryvers, D., & Jacques, P. J. (2010). On the Relationship Between the Twin Internal Structure and the Work Hardening Rate of TWIP Steels. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 63(10), 961-964.
- Jungedal, M. (2012). *Mild Impact Wear In A Concrete Mixer: An Evaluation of Wet Abrasive Wear*. Royal Institute of Technology Department of Material Science and Engineering, Yüksek Lisans Tezi, Stockholm.
- Karaman, I., Seyitoglu, H., Gall, K., Chumlyakov, Y. I., & Maier, H. J. (2000). Deformation of Single Crystal Hadfield Steel by Twinning and Slip. *Acta Materialia*, 46(6), 1345-1359.
- Kirchgaßner, M., Badisch, E. & Franekr, F. (2008). Behaviour of Iron Based Hardfacing Alloys Under Abrasion and Impact, *Wear*, 265(5-6), 772-779.
- Koch, B.M.L., Jannotti, P., Mallick, D., Schuster, B., Sano, T., & Hogan, J. (2020). Influence of Microstructure on The Impact Failure of Alumina. *Materials Science and Engineering: A*, 770, 138549.
- Lin, J., Su, S., He, Y. & Kang, F. (2020). Improving Thermal and Mechanical Properties of The Alumina Filled Silicone Rubber Composite by Incorporating Carbon Nanotubes. *New Carbon Materials*, 35 (1), 66-72.
- Liu, Z., Lu, Z., Mei, B., Deng, X., & Güneş, Z. (2024). Influence of Thermal Condition on The Shrinkage and Bond Strength of Polymer-Modified Ceramic Tile Adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 130, 103647.
- Marcela, P., Igor, B., & Lubomír, S. (2014). Abrasion Resistance of As Cast High Chromium Cast Iron. *Scientific Proceedings Faculty of Mechanical Engineering*, 22(1), 74-79.
- Medvedovski, E. (2001). Wear Resistant Engineering Ceramics, *Wear*, 249(9), 821-828.
- Mirizzi, L., D'Arienzo, M., Nistico, R., Fredi, G., Diré, S., Callone, E., Dorigato, A., Giannini, L., Guerra, S., Mostoni, S., Credico, B.D., & Scotti, R. (2023). Al_2O_3 Decorated with Polyhedral Silsesquioxane Units: An Unconventional Filler System for Upgrading Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Rubber Composites. *Composites Science and Technology*, 236, 109977.
- Pawar, S., Jha, A. K. & Mukhopadhyay, G. (2017). Effect of Different Carbides on the Wear Resistance of Fe-Based Hardfacing Alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 78, 288-295.
- Pawlak, K. (2015). A Review of High Strength Wear-Resistant Steel Hardox, *Students' Science Conference*, Poland.

- Pearce, T. H., & Elwell, W. J. (1995). Efficient Heat Treatment of High Chromium Iron Castings for Abrasion-Resistant Applications, Cast Metals Development Ltd, International Conference.
- Peng, Y., Ni, X., Zhu, Z., Yu, Z., Yin, Z., Li, T., Liu, S., Zhao, L., & Xu, J. (2017). Friction and Wear of Liner and Grinding Ball in Iron Ore Ball Mill. *Tribology International*, 115, 506-517.
- Pereira, J.I., Machado, P.C., Penagos, J.J., & Sinatora, A. (2017). Wear Characterization from Field and Laboratory Tests of Pearlitic Steels Used for SAG Mill Liners. *Wear*, 376-377 (A), 37-45.
- Petrov, Y. N., Gavriljuk, V. G., Berns, H., & Schmalt, F. (2006). Surface Structure of Stainless and Hadfield Steel After Impact Wear. *Wear*, 260, 687-691.
- Pokusová, M. (2015). Abrasion Resistance of As Cast High Chromium Cast Iron. *Scientific Proceedings Faculty of Mechanical Engineering*, 22(1), 75-80.
- Rendón, J., & Olsson, M. (2009). Abrasife Wear Resistance of Some Commercial Abrasion Resistant Steels Evaluated by Laboratory Test Methods. *Wear*, 267(11), 2055-2061.
- Rojacz, H., Katsich, C., Kirchgaßner, M., Kirchmayer, R., & Badisch, E. (2022). Impact Abrasife Wear of Martensitic Steels and Complex Iron Based Hardfacing Alloys. *Wear*, 492-493.
- Sare, I.R., & Hutchings, I.M. (1990). The Mechanisms of Erosion of Unfilled Elastomers by Solid Particle Impact, *Wear*, 250(1-12), 1-10.
- Sare, Ir., Mardel, J., & Hill, Aj. (2001). Wear-Resistant Metallic and Elastomeric Materials in The Mining and Mineral Processing Industries — An Overview. *Wear*, 250(1-12), 1-10.
- Shen, Y., Wang, Y., Shaofeng, D., Yang, Z., Cheng, H., & Wang, F. (2021). Effects of The Adhesive Layer on The Multi-Hit Ballistic Performance of Ceramic/Metal Composite Armors. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1496-1508.
- Sherman, D. (2000). Impact Failure Mechanisms in Alumina Tiles on Finite Thickness Support and The Effect of Confinement. *International Journal of Impact Engineering*, 24(3), 313-328.
- Soyubol, B. (2006). *Elastomerlerin Statik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi*. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Sun, Y. (2004). *Yüksek Krom ve Nikelli Çeliklerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Tan, N., Qiao, J., & Wang, Q. (2023). Tribocorrosion Performance of Medium Manganese Austenitic Wear Resistant Steel in Simulated Mine Water. *Corrosion Science*, 219.
- Tarasiuk, W., Napiorkowski, J., Ligier, K., & Krupcz, B., (2017). Comparison of the Wear Resistance of Hardox 500 Steel and 20MnCr5, *Tribologia*, 273(3), 165-170.

- Thakare, M.R., Wharton, J.A., Wood, R.J.K., & Menger, C. (2012). Effect of Abrasive Particle Size and the Influence of Microstructure on the Wear Mechanisms in Wear-Resistant Materials. *Wear*, 276-277, 16-28.
- Tsuzaki, K., Natsume, Y., Tomota, Y., & Maki, T. (1995). Effect of Solution Hardening on the Shape Memory Effect of Fe Mn Based Alloys. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 33(7), 1087-1092.
- URL-1. (2024, Şubat 13). St. Ives Gold Mine Slashes Maintenance Costs With Ferrocer® Impact Wear Panels: <https://www.flsmidth.com/en-gb/customer-stories/st-ives-gold-mine-slashes-maintenance-costs-with-ferrocer-impact-wear-panels> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Şubat 7). Ferrocer 10 Times Longer Life at Hindustan Zinc Mine Case Study: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/ferrocer-wear-panels> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Mart 4). Hardox aşınma çeliği ürünleri kılavuzunuz: <https://www.ssab.com/tr-tr/markalar-ve-urunler/hardox/urun-programi> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Nisan 17). Farin değirmeni gövdesi: <https://www.hardoxwearparts.com/tr-tr/equipment/rawmill-house> adresinden alınmıştır.
- Üllen, N. B. (2018). Investigation of the Wear Resistance of Hardox Steel Plates. 2nd International Conference on Tribology, s. 69-73. İstanbul.
- Valtonen, K., Ojala, N., Haiko, O., & Kuokkala, V. (2019). Comparison of Various High Stress Wear Conditions and Wear Performance of Martensitic Steels. *Wear*, 426-427(A), 3-13.
- Varga, M., Grundtner, R., Maj, M., Tatzgern, F., & Alessio, K. (2023). Impact Abrazife Wear Resistance of High Alumina Ceramics and ZTA. *Wear*, 522.
- Varga, M., Herr, M., Widder, L., Campos, L. A., & Mermagen, J. (2021). Ceramic Rubber Hybrid Materials A Knowledge Based Design Concept, *Wear*, 476.
- Wen, Y. H., Peng, H. B., Si, H. T., Xiong, R. L., & Raabe, D. (2014). A Novel High Manganese Austenitic Steel with Higher Work Hardening Capacity and Much Lower Impact Deformation Than Hadfield Manganese Steel. *Materials & Design*, 55, 798-804.
- Widder, L., Rojacz, H., Adam, K., Kuttner, A., & Varga, M. (2023). Abrazife Wear Protection in Material Handling: Mechanism-Based Combination of Lab Experiments for Optimal Material Selection. *Wear*, 530-531.
- Zok, FW., & Miserez, A. (2007). Property Maps for Abrasion Resistance of Materials. *Acta Materialia*, 55(18), 6365-6371.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğçe DOKUZ, 2013 yılında Trabzon Fatih Lisesi'nden mezun oldu. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini aldı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek öğrenimine başladı. 2021 yılında Çolakoğlu Mühendislik Makine Sanayi ve Ticaret Limited şirketinde Ar-Ge Mühendisi olarak göreve başladı. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 1501 - TÜBİTAK Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenen araştırma projesinde yürütücü, araştırmacı ve tez öğrencisi olarak görev aldı. Ayrıca Tuğçe DOKUZ'un 1 adet uluslararası bildirisi bulunmaktadır.

Yüksek lisans tezi kapsamındaki yayınları:

1. Dokuz, T., Duman, İ. C., & Pürçek, G. (2023). Hibrit Aşınma Plakalarının Darbeli Abrazif Aşınma Davranışlarının Laboratuvar Ölçeğinde İncelenmesi. *Proceedings of 9th International Congress of Mining Machinery and Technologies*, s. 255-320. İzmir.