



## Investigation of erosive wear behavior of granulated blast furnace slag on hard coated and uncoated steels

Recep Demirsöz<sup>1\*</sup>, Refik Polat<sup>2</sup>, Ahmet Türk<sup>3</sup>, Garip Erdoğan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kardemir Iron and Steel Industry Trade and Company Inc., Karabük, 78170, Turkey

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Karabük University, Karabük, 78050, Turkey

<sup>3</sup>Department of Materials Engineering, Celal Bayar University, Manisa, 45140, Turkey

### Highlights:

- Three type of materials are compared in terms of slurry erosion behaviour
- W<sub>2</sub>C-NiCrBSi based coating showed best resistance
- Concentration of erodent particle was found dominant on the other parameters

### Keywords:

- Granulated slag
- Hard coating
- Erosive wear
- Concentration
- Normal impact angle

### Article Info:

Received: 05.05.2017

Accepted: 27.10.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416467

### Acknowledgement:

This study was supported by Research Fund of Karabük University (Project number: KBÜ-BAP-13/2-DR-014)

### Correspondence:

Author: Recep Demiröz

e-mail:

recepdemirsoz@hotmail.com

phone: +90 505 232 81 22

### Graphical/Tabular Abstract

One of the biggest problems in industrial plants is wear that directly affects equipment life. In integrated plants such as blast furnaces, many types of wear are encountered, one of which is erosive wear. This type of wear is often encountered during the transport of materials with certain particle sizes. Slurry erosion is one of the most effective types of erosive wear. Granulated blast furnace slag, is essentially a waste but as a secondary product, be used in different branches of the industry. During the transfer of the slag into the liquid medium, the transport equipment is exposed to slurry erosion. The high amount of erosion seriously shortens the life of the equipment where the transportation is carried out and increases the maintenance-repair costs. In this study, blast furnace slag was used in the slurry erosive wear test system and the abrasivity of the St 37-2 reference standard pipe material, Hardox 400 and W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coating materials was investigated.

Speed (m/s)	2			4		
Concentration (% a.g.)	10	20	30	10	20	30
St 37-2 (x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> )	320 ±11,5	350 ±12,7	380 ±12,5	960 ±13,6	1090 ±38,3	1250 ±21,7
Hardox 400 (x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> )	180 ±10,7	210 ±10,3	230 ±7,4	470 ±8,8	480 ±10,7	510 ±9,6
W <sub>2</sub> C-NiCrBSi coated St 37-2 (x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> )	70 ±5,8	80 ±5,1	90 ±3,6	110 ±5,7	120 ±4,6	140 ±3,6

Table A. Wear and standart deviation values of the specimens

**Purpose:** Determination of the material with the best erosive wear resistance caused by blast furnace slag

**Theory and Methods:** The slag was sieved to an average particle size of 505 µm and slurry containing 10 %, 20 % and 30 % by weight of slag was prepared. The experiments were carried out at 2 m/s and 4 m/s peripheral speed values at the partial normal impact angle (90°).

**Results:** It has been determined by these experimental studies that the abrasivity of the slag prepared at a certain grain size is directly related to the concentration and the rotation speed (material conveyance speed) and that the wear is also increased by increasing the concentration and rotation speed.

**Conclusion:** The wear values of the materials used as specimens are determined from high to low respectively as St 37-2, Hardox 400 and W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coating material.



## Yüksek fırın granüle cürufunun sert kaplama uygulanmış ve uygulanmamış çeliklere karşı erozif aşındırma davranışının incelenmesi

Recep Demirsöz<sup>1\*</sup>, Refik Polat<sup>2</sup>, Ahmet Türk<sup>3</sup>, Garip Erdoğan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kardemir, Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Karabük, 78170, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, 78050, Türkiye

<sup>3</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa, 45140, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sulu çamur erozyonu davranışı açısından üç tip malzeme karşılaştırıldı
- W<sub>2</sub>C-NiCrBSi esaslı kaplama en iyi direnci gösterdi
- Aşındırıcı partikül konsantrasyonunun diğer parametrelere göre daha etkin olduğu saptandı

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.05.2017

Kabul: 27.10.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416467

### Anahtar Kelimeler:

Granüle cüruf,  
sert kaplama,  
erozif aşınma,  
konsantrasyon,  
normal çarpma açısı

### ÖZET

Sanayi tesislerindeki en büyük problemlerden biri ekipman ömürlerini doğrudan etkileyen aşınmalardır. Yüksek fırınlar gibi entegre tesislerde aşınmanın birçok türüne rastlanmakta olup bunlardan bir tanesi de erozif aşınmadır. Sulu çamur erozyonu ise erozif aşınmanın etkili türlerinden biridir. Cürufun sıvı akışkan ortam içerisinde nakli sırasında, nakil ekipmanları sulu çamur erozyonuna maruz kalmaktadır. Yüksek erozyon oranı naklin gerçekleştirildiği malzemelerin ömrünü ciddi oranda kısaltmakta ve bakım-onarım maliyetlerini artırmaktadır. Bu çalışmada sulu çamur erozyon aşınma deney düzeneğinde yüksek fırın granüle cürufu kullanılmış ve St 37-2 referans standart boru malzemesi, Hardox 400 ve W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemelerinin üzerindeki aşındırıcılığı incelenmiştir. Cüruf ortalama 505 µm partikül büyüklüğünde elenmiş ve ağırlıkça %10, %20 ve %30 değerlerinde cüruf içeren sulu çamur ortamı hazırlanmıştır. Deneyler 2 m/s ve 4 m/s çevresel hız değerlerinde ve partikül normal çarpma açısında (90°) gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalarla belirli partikül büyüklüğünde hazırlanmış olan cürufun aşındırıcılığının partikül konsantrasyonu ve dönme hızı (malzeme iletim hızı) ile doğrudan ilgili olduğu ve konsantrasyonun ve dönme hızının artmasıyla aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Numune olarak kullanılan malzemelerin aşınma değerleri yüksekten düşüğe doğru sırasıyla St 37-2, Hardox 400 ve W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için aşınmış yüzeylerin morfolojik yapıları SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) kullanılarak incelenmiştir.

## Investigation of erosive wear behavior of granulated blast furnace slag on hard coated and uncoated steels

### H I G H L I G H T S

- Three type of materials are compared in terms of slurry erosion behaviour
- W<sub>2</sub>C-NiCrBSi based coating showed best resistance
- Concentration of erodent particle was found dominant on the other parameters

### Article Info

Research Article

Received: 05.05.2017

Accepted: 27.10.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416467

### Keywords:

Granulated slag,  
hard coating,  
erosive wear,  
concentration,  
normal impact angle

### ABSTRACT

One of the biggest problems in industrial plants is wear that directly affects equipment life. In integrated plants such as blast furnaces, many types of wear are encountered, one of which is erosive wear. Slurry erosion is one of the effective types of erosive wear. During the transfer of the slag into the liquid medium, the transport equipment is exposed to slurry erosion. The high amount of erosion seriously shortens the life of the equipment where the transportation is carried out and increases the maintenance-repair costs. In this study, blast furnace slag was used in the slurry erosive wear test system and the abrasivity of the St 37-2 reference standard pipe material, Hardox 400 and W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coating materials was investigated. The slag was sieved to an average particle size of 505 µm and slurry containing 10%, 20% and 30% by weight of slag was prepared. The experiments were carried out at 2 m/s and 4 m/s peripheral speed values at the partial normal impact angle (90°). It has been determined by these experimental studies that the abrasivity of the slag prepared at a certain grain size is directly related to the concentration and the rotation speed (material conveyance speed) and that the wear is also increased by increasing the concentration and rotation speed. The wear values of the materials used as specimens are determined from high to low respectively as St 37-2, Hardox 400 and W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coating material. In addition, the morphological structures of the worn surfaces were examined using SEM (Scanning Electron Microscope) in order to understand the wear mechanisms.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: recepdemirsöz@hotmail.com, refikpolat@karabuk.edu.tr, ahmet.turk@cbu.edu.tr, g.erdogan@cbu.edu.tr / Tel: +90 505 232 81 22

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir akışkan ortam içerisindeki partiküllerin akışkanla beraber hareketleri esnasında herhangi bir yüzeye temas etmeleri neticesinde söz konusu yüzey üzerinden parça kopması anlamına gelen erozif aşınmayı ilk olarak Finnie [1] katı partikül aşınması olarak detaylı bir şekilde irdelemiştir. Diğer bir çalışmada da sünek malzemeler üzerinde erozif aşınma konusunu ele almıştır [2]. Bitter [3] ise sıvı ortamda katı taşınımında aşınmayı eş zamanlı etkiyen deformasyon ve kesme aşınması olarak iki farklı türde tanımlamış ve aşınma olayını aşındırıcı ve aşınmaya maruz kalan malzemenin mekaniksel ve fiziksel özelliklerine göre formülize etmiştir. Farklı bir çalışmada ise bir çok erozif aşınma olayını formüllerle açıklamış ve pratikte erozif aşınmayı önleme ve aşınmanın azaltılması yönünde bulgular ortaya koymuştur [4]. Shipway ve Hutchings [5] erozif aşınmayı, aşındırıcı partiküllerin bir yüzeye çarparak o yüzey üzerinden malzeme kaldırması olarak tanımlamış ve erozif aşınma oranının hem hedef malzeme ve hem de aşındırıcı özelliklerine ve aşındırıcının çarpma koşullarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Lindsley ve Marder [6] erozif aşınmada partikül hızının kritik bir deney parametresi olduğunu, farklı hızların hedef malzeme üzerindeki etkileri çok kolay ayırt edilebildiği ve hızın artırılması ile erozif aşınmada artış elde edildiği sonucuna ulaşmıştır. Barton [7] boru iç yüzeyine, valflere, bağlantı elemanlarına ve sistemin diğer bileşenlerine çarpan kum gibi katı partiküllerin mekanik aşınmaya sebebiyet vermelerinin yanı sıra muhtemel sistem hasarlarına da sebep olduklarını belirtmiş, sanayide özellikle katı partikül taşınan akışkan ortamlarda kullanılmakta olan ekipmanlarda erozif aşınmanın malzeme ömrünü kısaltan birincil etken olduğunu ifade etmiştir. Koşullarla ilgili olarak sıvı ortamın türü, taşınan katı partiküllerin şekli [8], ebadı [9], sıvı içerisindeki konsantrasyonu, çarpma açısı [10], çarpma hızı [11] ve akışkan ortam sıcaklığı etkili parametreler olarak sayılırken [12], aşınan malzeme ile ilgili olarak da tokluk, sertlik gibi parametreler önem arz etmektedir [13]. Söz konusu parametrelerin gerek sünek [14] ve gerekse gevrek yapıdaki malzemeler üzerindeki etkilerinin incelenmesi maksadı ile birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların yapılması amacı ile birçok deney metodu ve bu metodların uygulanabilmesi için deney düzenekleri geliştirilmiştir [15]. Örneğin Desale vd. [16] deneylerin bir hazne içerisinde gerçekleştirildiği düzenek tasarlamış ve aşındırıcı partiküllerin rastgele hareketini minimuma indirilmek için tasarimsal olarak önlem almışlardır. Numune ile aşındırıcı partiküller arasındaki bağıl hızı minimuma indirmek için bir karıştırıcının (karışımı aşağı yönlü yönlendirme hareketi ile) kullanıldığı çalışmalar yapmışlardır. Üstelik aşındırıcı çarpma açısı, konsantrasyon, hız ve partikül büyüklüğü

parametrelerinin erozif aşınma üzerindeki etkilerini ölçmek için farklı koşullar oluşturmuşlardır. Bu hazneli deney düzeneği ile borular, dirsekler ve pompalar gibi ekipmanlarda makul konsantrasyon oranlarında ve fiili akış hızlarında aşınmaların öngörüsünün yapılması ve daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Khan [17] santral külü taşınması işleminde kullanılmakta olan AISI 202 malzemesi yüzeyine HVOF yöntemi ile WC-12Co kaplama uygulaması ve % 18 Cr, % 4 Ni, % 8 Mn içeren Cr-Mn-Ni kalite çeliklerin kullanılması ile erozif aşınma değerlerini 3 kata kadar azaltmıştır. Yine yumuşak çeliklere uygulanan aynı kaplama yöntemi ile erozif aşınma değerlerinde 4 kata kadar azalma sağlamıştır. Üstelik Kumar ve Ratol [18] akışkan ortam içerisinde yapmış oldukları çalışmada özel uygulamalara uygun malzeme ile (ki bu kaplamalı da olabilir kaplamasız da) sulu çamur erozyonu dayanımının artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Hâlihazırda yapılmış olan bu çalışmada Karabük Demir Çelik Fabrikası'nda üretilen yüksek fırın granüle cürufunun sebep olduğu sulu çamur erozyonunun (slurry erosion) partikül hızı ve konsantrasyon parametreleri değiştirilerek St 37-2, Hardox 400 ve W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemeleri üzerindeki aşındırma etkileri incelenmiş, sonuçlar mukayese edilip SEM görüntüleri kullanılarak aşınma mekanizmaları hakkında bilgi edinilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. Aşındırıcı Partikül ve Sulu Çamur Hazırlanması (Preparation of Abrasive Particles and Slurry)

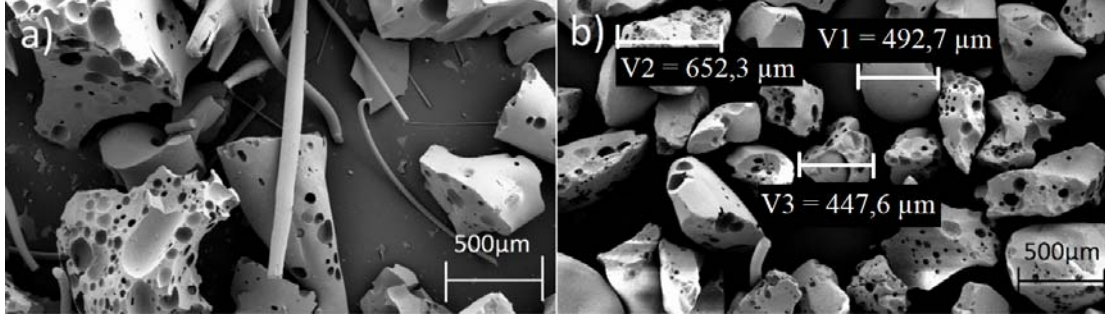
Aşındırıcı olarak kullanılan cüruf tamamen nemi alındıktan sonra kuru elek yöntemi ile elenmiş, partikül boyutlarının yüzdelik dağılımları elde edilmiş ve yaklaşık % 65'lik kısmının 300 µm ile 710 µm değerleri aralığında olduğu tespit edilmiştir. Cüruf sırası ile 710 µm ve 300 µm açıklıklara sahip eleklerde elenmiş ve ortalama 505 µm boyut dağılımına sahip aşındırıcı partiküller hazırlanmıştır. ARL Advant'x XRF (X-Işını Emisyon Spektroskopisi) cihazında elde edilmiş kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen cürufun eleme işleminden önce ve sonraki SEM görüntüsü Şekil 1'de verilmektedir. SEM görüntüsünden anlaşılacağı üzere kullanılan aşındırıcı partiküller düzensiz şekilli ve mikro boşluklar içeren oksit yapıları partiküllerdir.

### 2.2. Numuneler (Specimens)

Isıl püskürtme kaplama yöntemleri ile oksit, karbür, metal esaslı kaplamalar farklı türdeki altlık malzemelerin yüzeylerine kaplanabilmektedir. Bu kaplamalar ile altlık malzemenin yüzeyinde aşınmaya dayanıklı tabakalar elde

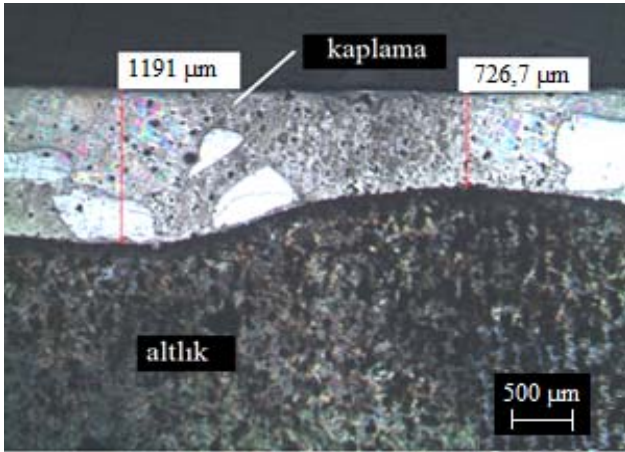
**Tablo 1.** Yüksek fırın granüle cüruf numunesinin kimyasal bileşimi [% ağı.]  
(The chemical composition of granulated blast furnace slag sample [wt %])

	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	S	Fe	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Diğer
% ağı.	38,84	39,13	8,91	6,90	2,25	0,71	0,49	1,00	0,39	1,04	0,34



**Şekil 1.** Yüksek fırın granüle cürufunun SEM görüntüsü a) eleme işleminden önce b) eleme işleminden sonra (SEM images of granulated blast furnace slag a) before sieving b) after sieving)

edilebilmektedir [19]. Bu çalışma kapsamında deney numunesi olarak St 37-2 ana malzeme, Hardox 400 ana malzeme ve St 37-2 altlık üzerine % 60 W<sub>2</sub>C ve %40 NiCrBSi matris malzemeden teşkil sert dolgu malzemesi ile TIG kaynak dolgu yöntemi kullanılarak 750 µm kalınlığında (Şekil 2) kaplama yapılmış numuneler kullanılmıştır. Kullanılan numuneler üzerinde herhangi bir ısıl işlem yapılmamış olup sulu çamur erozyon deneyinden önce yüzeyler 1000 gritlik silisyum karbür zımpara kâğıdı ile zımparalanarak yüzey pürüzlülük değerleri yakınlaştırılmaya çalışılmıştır. Böylelikle aynı pürüzlülük değerlerinde aşınmaya başlayan malzemelerin deneyler sonunda yüzeylerinin son durumlarının daha kolay mukayese edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3’de zımparalama işleminden sonra elde edilmiş olan numune yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 2.** W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama yapılmış numunedan alınmış optik mikroskop görüntüsü (Optical microscope image taken from W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coated specimen)

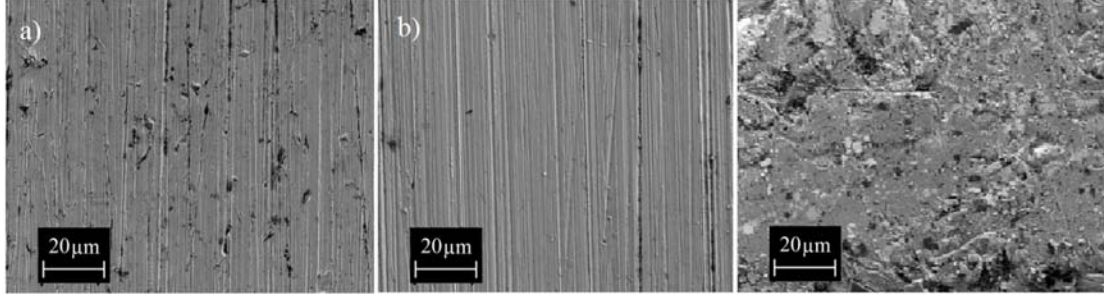
Tablo 2’de numunelere ait yüzey sertlik değerleri ve işlemden sonra elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.

### 2.3. Sulu Çamur Erozyonu Deneyleri (Slurry Erosion Experiments)

Sulu çamur erozyonu genellikle sıvı ortam içerisinde yer alan katı partiküllerin temas ettikleri yüzeylerden malzeme

kaldırması olarak tanımlanmaktadır. Bu ortam sadece sıvı değil herhangi bir gaz akışkan da olabilmektedir. Sulu çamur erozyonuna etki eden parametrelerin denenebilmesi maksadı ile tasarlanmış olan bu deney düzeneği (Şekil 4) More vd. [20] tarafından tasarlanmış deney düzeneği ile aynı prensiptedir. 240 mm iç çap değerine ve 10 lt hacme sahip olan hazne içerisinde toplam altı adet plaka mevcuttur. Haznenin alt kısmında Şekil 4.a’da görüldüğü gibi dört kanatlı karıştırıcı bir pervane yer almaktadır. Bu karıştırıcı 1.1 kW güce sahip devir ayarlı bir AC motor tarafından kayış kasnak mekanizması kullanılarak tahrik edilmektedir. Numuneler numune tutucular yardımı ile sisteme bağlanmaktadır. Numune tutucular ise Şekil 4.b’de görüldüğü gibi kollar vasıtası ile kol tutucuya, kol tutucu ise bir mile bağlıdır. Bu mil 1.1 kW güce sahip devir ayarlı ikinci bir AC motor ile kayış kasnak mekanizması kullanılarak eksenine etrafında döndürülmektedir. Bu eksenine etrafında dönme hareketi ve numune tutucuların pozisyonundan dolayı cüruf ile numune teması 90° normal çarpma açısında olmaktadır. Numune tutucular, kollar ve kolların bağlanmış olduğu silindirik kol tutucu uzun ömürlü olmaları amacı ile AISI 316 malzemeden imal edilmişlerdir. Aşınma ölçümlerinde bu numune tutucularda meydana gelen aşınmalar dikkate alınmamış olup ayrıca numune tutucular birden fazla deneyde kullanılmıştır. Numune kollarına bağlı tutucuların dönme yarıçapları 72 mm’dir. Numuneler 30 x 5 x 6 mm ölçülerindedir. Aşınmaya maruz bırakılan yüzey ölçüsü Şekil 4.c’de görüldüğü gibi 30 x 5 mm’dir.

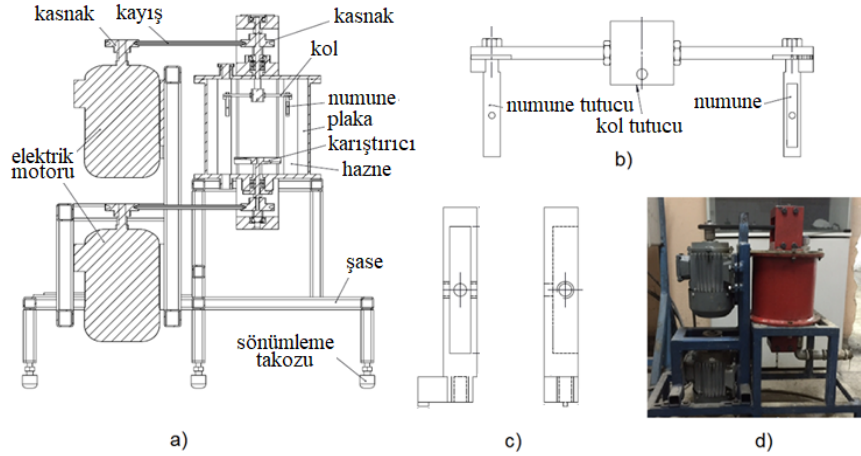
Numuneler deneyden önce musluk suyu ile temizlenip saç kurutma makinesi ile kurutulmuş ve 0,1 mg hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Aynı temizleme işlemi deneylerden sonra da tekrar edilmiştir. Numunelerin numune tutucu üzerine yerleştirildikten sonra sabitlenmesi daha önce yapılmış olan deneylerin aksine yapıştırma yolu ile değil sabitleme civataları yardımı ile yapılmıştır. Yapıştırıcı kullanılmamasından dolayı deneyin akabinde tartım için numunelerin temizlenmesinde herhangi bir kimyasal kullanımına da gerek duyulmamıştır. Deneylerin süresi partikül büyüklüklerindeki değişimden ve aşındırıcı yüzeylerinde meydana gelecek kenar yuvarlanmalarından kaynaklı aşındırıcılık etkisinin azalmasını önlemek amacı ile bir saatle kısıtlı tutulmuştur. Sağlıklı sonuç alınabilmesi için aynı deney beş kez tekrarlanmış ve aşınma değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3. Zımparalama işleminden sonra numunelere ait yüzey görüntüleri a) St 37-2, b) Hardox 400, c) W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama (Surface images of specimens after sanding a) St 37-2, b) Hardox 400, c) W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coated)

Tablo 2. Numunelerin yüzey sertlik ve pürüzlülük değerleri (Hardness and roughness values of surface of the specimens)

Numune	St 37-2	Hardox 400	W <sub>2</sub> C-NiCrBSi Kaplama
Sertlik Değeri [HV-100 kgf]	100	368	349,6
Ra[µm]	0,087	0,096	0,082



Şekil 4. DeneY Düzenegİ a) düzenek kesit resmi b) tutucu kollar c) numune tutucu d) düzenek fotoğrafı  
(Test Rig a) sectional drawing of assembly b) holding arms c) specimen holder d) rig photo)

Temas alanı her numune için 1,5cm<sup>2</sup>'dir. Her deneyin akabinde eski cüruf sistemden tahliye edilmiş ve daha önce hazırlanmış olan yeni cüruf sisteme dahil edilmiştir. Deneylerin akabinde çıkan cürufun yaklaşık % 60'ının partikül ebadı olarak yine aynı değer aralığında kaldığı geri kalan kısmını ise 300 µm'nin altına düştüğü tespit edilmiştir. Yine her bir deneyden sonra numune tutucuların içinde herhangi bir kalıntı kalmaması için basınçlı su ile iç yüzeyleri temizlenmiştir. Lindsley ve Marder [6] yapmış oldukları çalışmada partikül hızını kritik bir deney parametresi olarak ele almış ve farklı hızların hedef malzeme üzerindeki etkileri çok kolay ayırt edilebilir olduğu ve hızın artırılması ile erozif aşınmada artış elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca Desale vd. [21] erozif aşınma değeri üzerinde hız ve partikül boyutunun yanında ortam katı konsantrasyonunun da etkili parametre olduğu fakat hız ve partikül boyutu parametrelerine göre özellikle normal çarpma açısında nitekim daha az etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Halihazırda yapılmış olan bu

çalışmada söz konusu parametrelerin incelenmesi amacı ile 2 değişik hız değeri ve 3 farklı konsantrasyon değerinde sulu çamur hazırlanmıştır. 2 m/s ve 4 m/s hız değerlerine karşılık gelen sırası ile 314 d/d ve 628 d/d devir sayısı seçilmiştir. Karıştırıcı devir sayısı ise 600 d/d tecrübe edilmiş ve her deney için sabit tutulmuştur. Numune dönme yönü ile karıştırıcı dönme yönü farklı istikametlerde olacak şekilde ayarlanmıştır. Cürufun haznenin dibine çökmesini önlemek amacı ile kullanılan karıştırıcı pervane ayrıca karışımın uniform bir yapıya sahip olmasını sağlamıştır. Ayrıca pervane kanat pozisyonları cüruf hareketlerinin merkezden hazne duvarına doğru oradan da yukarı yönlü hareket edecek şekilde olması için tasarlanmıştır. DeneY esnasında hazne duvarlarında yer alan altı adet plaka cüruf partiküllerinin numune dönüş yönünde dairesel hareket yapmalarını önlemiştir. Deneylerde hızın yanında katı konsantrasyonu üç farklı değerde, % 10, % 20 ve % 30 olarak seçilmiştir. Numune bağlama açılarında bir değişikliğe gidilmemiş deneyler sadece normal çarpma açısında gerçekleştirilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Aşınma Miktarları (Wear Quantity)

Farklı aşındırıcı konsantrasyon ve hızlarında yapılan deneyler sonucunda numunelerin ağırlık kayıpları ölçülmüş ve farklı öz ağırlık değerlerine sahip olmaları sebebiyle sağlıklı bir mukayese yapılabilmesi amacı ile hacimsel kayıplar hesaplanmıştır. Ağırlık kayıplarından hacimsel kayıpların hesabına geçilirken her bir numunenin yoğunluklarından yararlanılmıştır. Yoğunluk hesapları su taşıma yöntemi ile yapılmıştır. Ana malzeme numunelerinde numune öncelikli olarak terazide tartılarak ağırlığı bulunmuş, ardından içinde belirli bir miktar su bulunan dereceli silindirin içine yavaşça bırakılmış ve yeni hacim bulunmuştur. Ağırlık değerinin son hacim ile ilk hacmin farkına bölünmesi ile yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Kaplama malzemesinde ise yoğunluk değeri örnek numune yaptırılarak yine aynı yöntemle bulunmuştur. Bu ölçümler sonucunda St 37-2, Hardox 400 ve  $W_2C-NiCrBSi$  kaplama malzemeleri için sırası ile yoğunluk değerleri 7,60, 7,66 ve  $14,4 \text{ mg/mm}^3$  olarak bulunmuştur. Her bir deney şartı için gerçekleştirilen beş farklı deney kapsamında toplam on adet numunenin aşınma değerlerinin ortalaması alınmış ve bu değerlerle birlikte bunlara ait standart sapma değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Malzemelerin erozif aşınma dayanımlarının sırası ile sert dolgu kaplama malzemesi, Hardox 400 ve referans numunesi şeklinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 3'den anlaşılacağı üzere artan aşındırıcı konsantrasyonu ile malzeme kayıpları lineer bir şekilde artış göstermiştir. Ayrıca her iki hızda da en az malzeme kaybını  $W_2C-NiCrBSi$  esaslı sert dolgu kaplama malzemesi yaşamıştır.  $W_2C$  partikülleri içeren kaplamada ölçülen sertlik değerinin Hardox 400 malzemeden daha düşük olduğu Tablo 2'de görülmektedir. Kaynakla kaplama yöntemlerinde

poroziteler barındıran kaplamalar ortaya çıkabilmektedir [22]. Böyle mikro yapıya sahip bir kaplamadan alınan sertlik değerleri  $W_2C$  partiküllerinin sertliğini değil kaplamanın genel olarak sertliğini vermektedir. Her ne kadar düşük sertlik değerleri ölçülmüş olsa dahi, aşınma deneyleri sırasında kaplama bünyesinde bulunan nispeten daha az sert bölgelerin ilk olarak aşınmaya maruz kalması sert partiküllerin açığa çıkmasına neden olmaktadır. Böylelikle yüzeyde bulunan sert fazlar aşınma direncini artırmaktadır.

Yine Tablo 3'de verilen 4 m/s hızda gerçekleştirilen deney sonuçlarında St 37-2 esaslı numunenin malzeme kaybı diğer malzemelere göre daha yüksek oranda olmuştur. Genel olarak hızın artışı ile meydana gelen malzeme kayıplarının konsantrasyonun artışı ile meydana gelen kayıplara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Buradan hızın daha etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 3.2. Aşınma Yüzeyleri (Wear Surfaces)

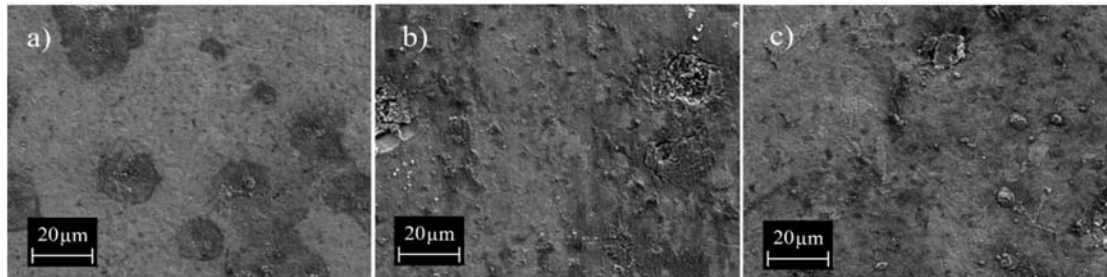
Şekil 5'de St 37-2 numunesi için 2 m/s hız değeri ve tüm konsantrasyon değerlerinde, Şekil 6'da 4 m/s hız değeri ve tüm konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

Şekil 7'de Hardox 400 numunesi için 2 m/s hız değeri ve tüm konsantrasyon değerlerinde, Şekil 8'de 4 m/s hız değeri ve tüm konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

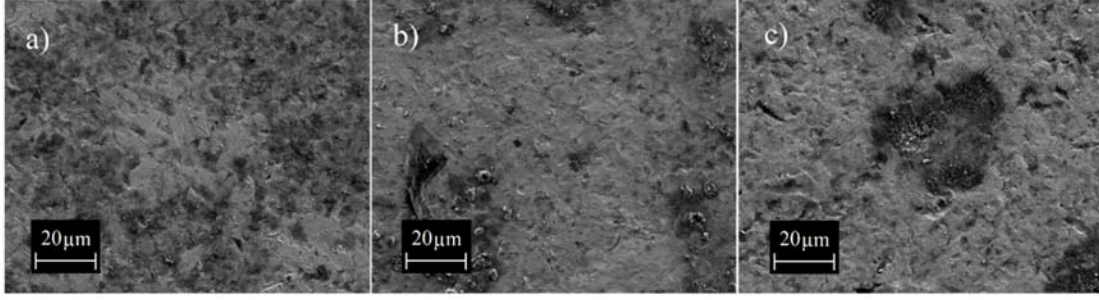
Şekil 9'da kaplama numunesi için 2 m/s hız değeri ve tüm konsantrasyon değerlerinde, Şekil 10'da 4 m/s hız değeri ve tüm konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

**Tablo 3.** Numunelerin aşınma ve standart sapma değerleri (Wear and standart deviation values of the specimens)

Hız (m/s)	2			4		
Konsantrasyon (% ağı.)	10	20	30	10	20	30
St 37-2 ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^3$ )	320 $\pm$ 11,5	350 $\pm$ 12,7	380 $\pm$ 12,5	960 $\pm$ 13,6	1090 $\pm$ 38,3	1250 $\pm$ 21,7
Hardox 400 ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^3$ )	180 $\pm$ 10,7	210 $\pm$ 10,3	230 $\pm$ 7,4	470 $\pm$ 8,8	480 $\pm$ 10,7	510 $\pm$ 9,6
$W_2C-NiCrBSi$ kaplanmış St 37-2 ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^3$ )	70 $\pm$ 5,8	80 $\pm$ 5,1	90 $\pm$ 3,6	110 $\pm$ 5,7	120 $\pm$ 4,6	140 $\pm$ 3,6

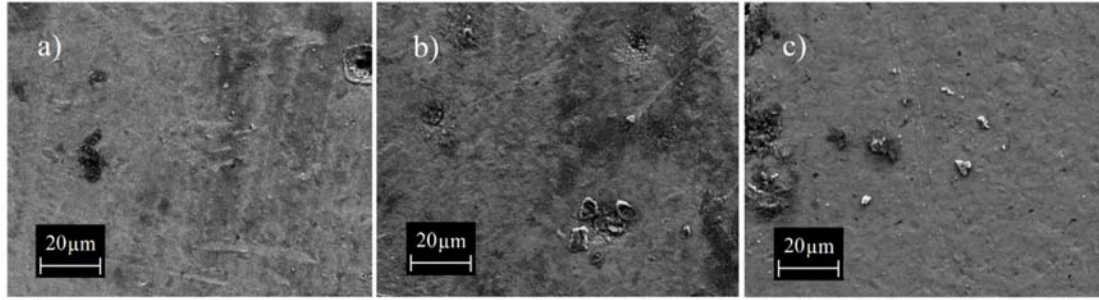


**Şekil 5.** St 37-2 numunesine ait 2 m/s hız değerindeki yüzey görüntüleri a) % 10 konsantrasyon, b) % 20 konsantrasyon, c) % 30 konsantrasyon (Surface images of the specimen of St 37-2 at 2 m/s velocity a) 10 wt % concentration, b) 20 wt % concentration, c) 30 wt % concentration)



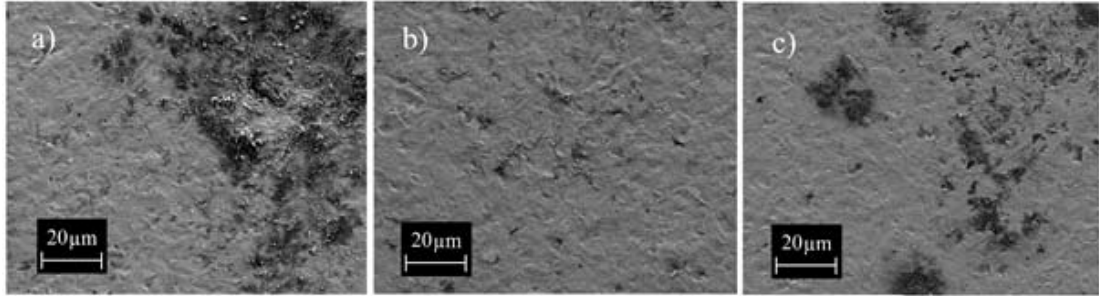
**Şekil 6.** St 37-2 numunesine ait 4 m/s hız değerindeki yüzey görüntüleri a) % 10 konsantrasyon b) % 20 konsantrasyon c) % 30 konsantrasyon

(Surface images of the specimen of St 37-2 at 4 m/s velocity a) 10 wt % concentration b) 20 wt % concentration c) 30 wt % concentration)



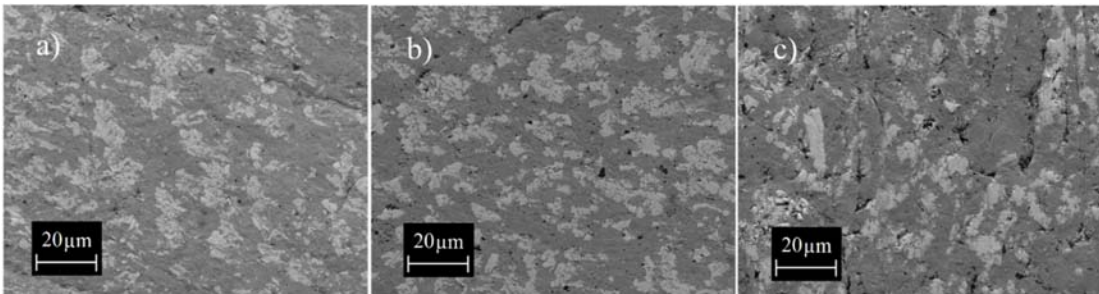
**Şekil 7.** Hardox 400 numunesine ait 2 m/s hız değerindeki yüzey görüntüleri a) % 10 konsantrasyon, b) % 20 konsantrasyon, c) % 30 konsantrasyon

(Surface images of the specimen of Hardox 400 at 2 m/s velocity a) 10 wt % concentration b) 20 wt % concentration c) 30 wt % concentration)



**Şekil 8.** Hardox 400 numunesine ait 4 m/s hız değerindeki yüzey görüntüleri a) % 10 konsantrasyon b) % 20 konsantrasyon c) % 30 konsantrasyon

(Surface images of the specimen of Hardox 400 at 4 m/s velocity a) 10 wt % concentration b) 20 wt % concentration c) 30 wt % concentration)



**Şekil 9.** W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunesine ait 2 m/s hız değerindeki yüzey görüntüleri a) % 10 konsantrasyon b) % 20 konsantrasyon c) % 30 konsantrasyon (Surface images of the specimen of W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coated at 2 m/s velocity a) 10 wt % concentration b) 20 wt % concentration c) 30 wt % concentration)

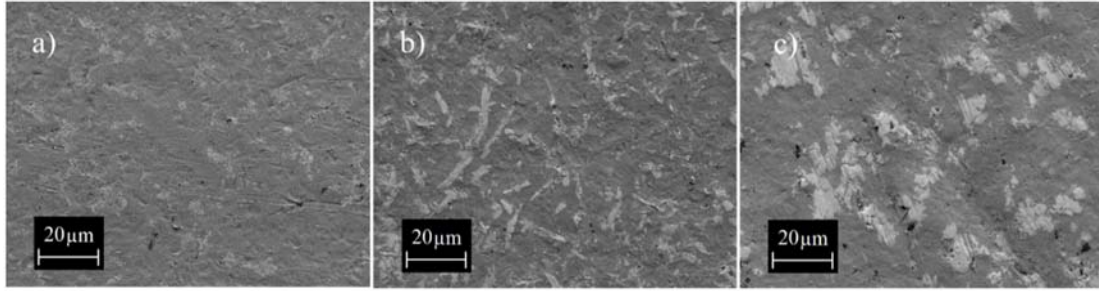
Yüzeye dik ( $90^\circ$ ) olan çarpma açısında numune yüzeylerinde baskın aşınma mekanizması plastik deformasyon olmaktadır ve bundan dolayı derin hasar bölgelerine rastlanılmaktadır. Genellikle açısız partikül çarpmalarında rastlanan sınırlı kesme aşınması izleri ise çok nadir olmaktadır [23].

Görüntülerden anlaşılacağı üzere aşınma öncesi zımparalama çizgileri deney sonrası neredeyse ortadan kaybolmuştur. Bu sonuç numune yüzeyinde en az maksimum çukur derinliğine kadar malzeme kaybı olduğu anlamına gelmektedir.

Artan hız ile birlikte malzeme yüzeyinde plastik deformasyon kaynaklı çukurlaşmalarda artışın ortaya çıktığı görülmüştür. St 37-2 için Şekil 5 ve 6'daki, Hardox 400 malzeme için Şekil 7 ve 8'deki ve  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesi için ise Şekil 9 ve 10'daki görüntüler durumu açıkça göstermektedir. Artan aşındırıcı konsantrasyonu ile birlikte gömülü partiküllerin varlığında artış ortaya

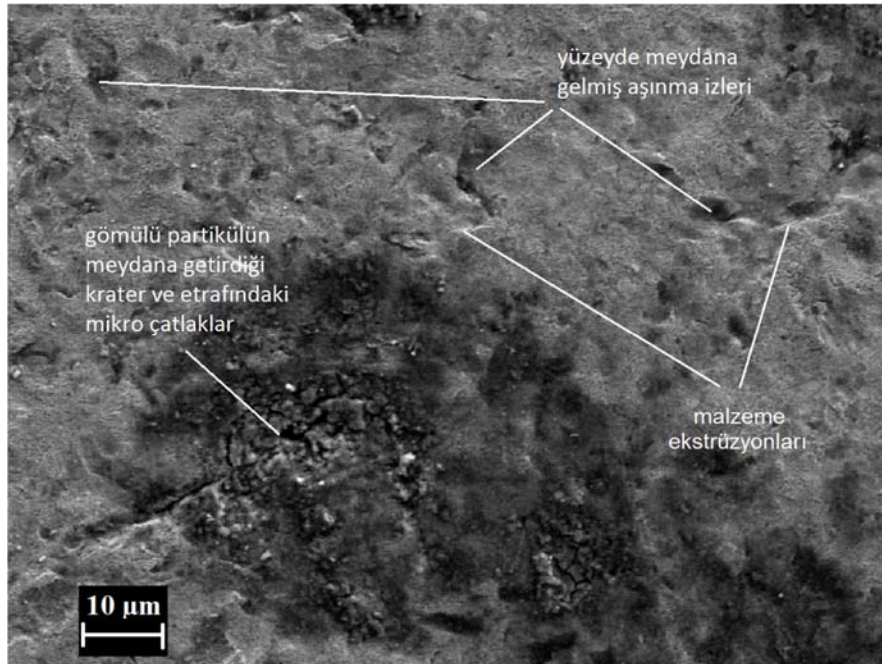
çıkmıştır. Bu partiküllere en çok St 37-2 malzemesi ve en az  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesinde rastlanmıştır. Gömülü partiküllerin varlığı kaplama yapılmış numunede özellikle tungsten elementinin bulunmadığı ve diğer yüzey bölgelerine göre nitelik daha az sert bölgelerde az miktarda gözlenmiştir. Gömülü partiküllere hemen hemen her hız ve konsantrasyon değerinde rastlanmıştır. Üstelik Şekil 11'den de görüldüğü üzere gömülü partiküllerin oluşturdukları kraterlerin çevresinde mikro çatlaklar meydana gelmiştir. Ayrıca dikkat çekici bir şekilde yüzeyde yüksek hız ve konsantrasyon nedeniyle tüm yüzeye dağılmış şekilde aşırı derecede plastik deformasyon izleri mevcuttur. Bunların yanında yüzeyde normal çarpma açılarında sıklıkla rastlanan malzeme ekstrüzyonları [24] ve hemen hemen tüm yüzeye dağılmış bir şekilde gömülü partiküller mevcuttur.

Tablo 4'den görüleceği üzere artan aşındırıcı konsantrasyonu ile birlikte ortalama yüzey pürüzlülük değerleri artış yönünde değişmiştir.  $W_2C$ -NiCrBSi kaplamalı



**Şekil 10.**  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama numunesine ait 4 m/s hız değerindeki yüzey görüntüleri a) % 10 konsantrasyon, b) % 20 konsantrasyon, c) % 30 konsantrasyon

(Surface images of the specimen of  $W_2C$ -NiCrBSi coated at 4 m/s velocity a) 10 wt % concentration, b) 20 wt % concentration, c) 30 wt % concentration)



**Şekil 11.** St 37-2 numunesinin 4 m/s hız ve % 30 konsantrasyon değerinde alınmış SEM görüntüsü  
(SEM image taken at a velocity of 4 m/s and a concentration of 30 wt % of St 37-2)

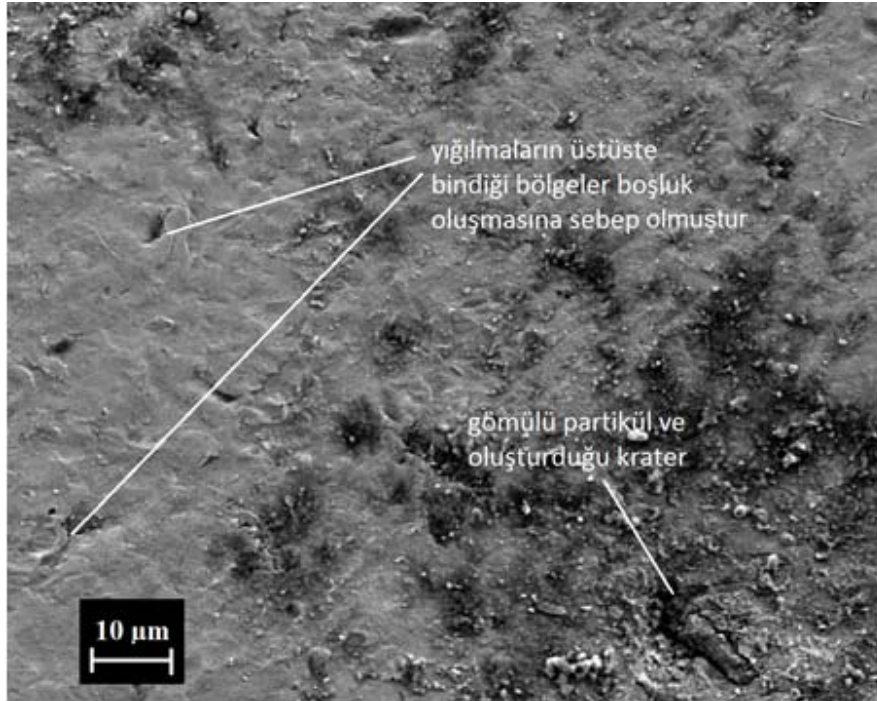


numunenin yüzeyinin diğer numune yüzeylerine göre pürüzlülük değerindeki yükseklik  $W_2C$  içeren bölgeler ile matris bölgelerinin aşınma değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Daha fazla malzeme kaybı olan yüzeyler nitekim daha düşük sertlik değerine sahip matris bölgelerdir. Uygulanan sert dolgu malzemesinin teknik verilerinde matris bölgesinin sertlik değeri 620 HV olarak belirtilirken karbür bölgenin sertliği ise 2500 HV olarak verilmiştir. Tekrarlı çarpmalardan dolayı krater etrafında şişkin hale gelmiş bölgeler yeni çarpmaların etkisi ile üst üste binmiş ve Şekil 12'deki gibi boşlukların oluşmasına sebep olmuştur.

Kaplamalı numunede yüzey Şekil 13'de görüldüğü üzere diğer malzemelerde olduğu gibi uniform bir yapıya sahip değildir. Farklı noktalarda gömülü partiküller mevcuttur. Şekil 13'de 1 ile belirtilmiş gömülü partiküllere ait EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) grafiği ve mikro analiz sonuçları Şekil 14'de, 2 ve 3 noktalarına ait elementlerin yüzde dağılımları da Tablo 5'de verilmiştir. Ayrıca yine Şekil 13'de görüldüğü üzere koyu renkli bölgeler (3 no'lu nokta) tungsten elementini daha az ihtiva eden bölgeler, açık renkli bölgeler (2 no'lu nokta) ise yüksek oranda içeren bölgelerdir ve bu bölgelerde plastik

**Tablo 4.** Deney sonrası numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (Surface roughness values of worn specimens)

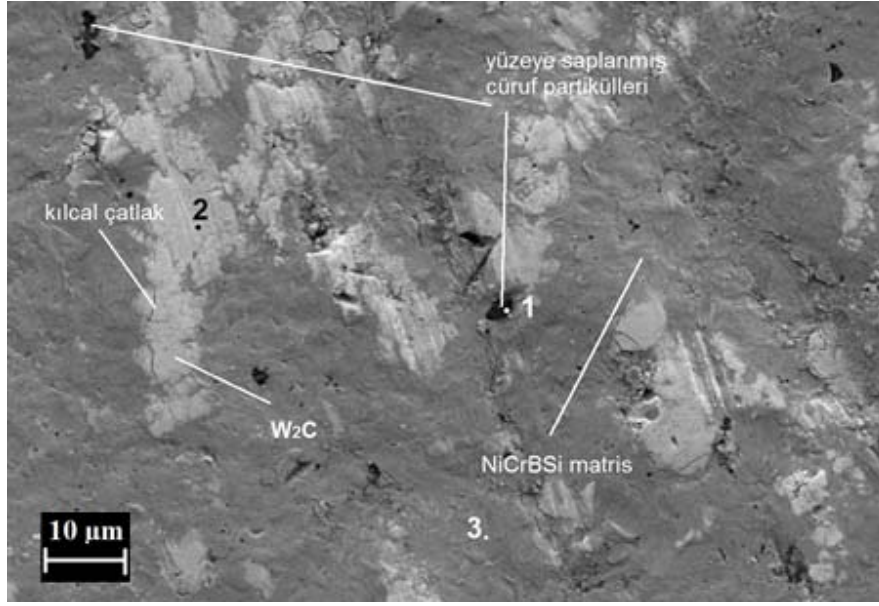
Ra[ $\mu$ m]	2 m/s			4 m/s		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%
St 37-2	0,159	0,188	0,286	0,160	0,247	0,260
Hardox400	0,054	0,068	0,107	0,091	0,137	0,217
$W_2C$ -NiCrBSi kaplama	0,116	0,255	0,330	0,233	0,249	0,385



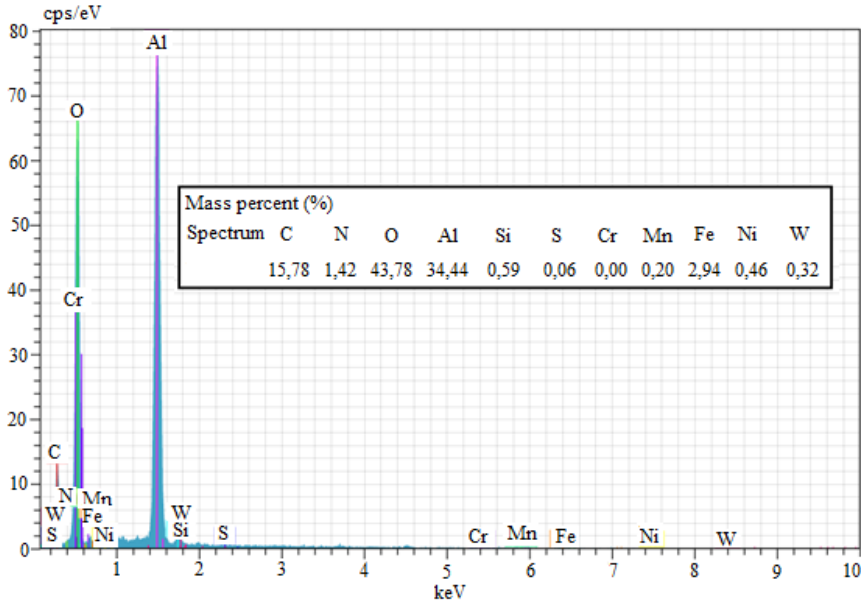
**Şekil 12.** St 37-2 numunesinin 4 m/s hız ve % 10 konsantrasyon değerinde alınmış SEM görüntüsü (SEM image taken at a velocity of 4 m/s and a concentration of 10 wt % of St 37-2)

**Tablo 5.** Şekil 14'deki seçilmiş noktalara ait mikro analiz tablosu (The micro analysis table of the point selected in Figure 13)

Şekil 13'deki konum	% ağı.									
	C	N	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	W
2	14,94	0,40	0,70	0,12	2,18	8,83	1,55	13,56	18,03	39,69
3	11,47	0,81	0,27	0,09	0,00	4,49	0,84	39,04	39,71	3,28



Şekil 13.  $W_2C$ -NiCrBSi kaplamalı numunenin 4 m/s hız ve % 30 konsantrasyon değerinde alınmış SEM görüntüsü (SEM image taken at a velocity of 4 m/s and a concentration of 30 wt % of  $W_2C$ -NiCrBSi coated specimen)



Şekil 14. Şekil 13'deki 1 noktasına ait EDX grafiği ve mikro analiz değerleri (EDX graph and micro analysis of Point 1 on Fig.13)

deformasyondan daha çok sınır bölgelerde kılcal çatlaklar meydana gelmiştir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, NiCrBSi ve  $W_2C$  esaslı kaplama ile Hardox 400 ile St-37 çeliğinin erozif aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Aşındırıcı konsantrasyonu, hız gibi parametrelere göre incelenen çalışmanın sonuçları şu şekilde özetlenebilir. Hız, konsantrasyon parametresine göre daha etkili bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 3'de görüldüğü gibi özellikle St 37-2 malzemesinde hızın artışı ile aşınma miktarlarının değişimi daha fazla olmuştur. Yapılmış

olan deneyler neticesinde numunelerin içinde en az malzeme kaybına uğrayan  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesi olmuştur. Her bir konsantrasyon ve hız değerinde en az malzeme kaybı ile en yüksek aşınma dayanımını göstermiştir. 2 m/s hız ve % 30 konsantrasyon değerinde St 37-2 numunesine göre aşınma miktarı dörtte bir iken en zor deney şartlarını kapsayan 4 m/s hız ve % 30 konsantrasyon değerinde neredeyse dokuzda bir mertebelerinde gerçekleşmiştir.

Aşındırıcı konsantrasyonu üç malzemenin de aşınma davranışı üzerinde etkili olmuştur. Yüksek fırın çürük taşıyıcı hat tasarımlarında özellikle konsantrasyon parametresi

üzerinde durulmalı ve pompa ve taşıma sıvısı debisi hesaplanırken göz önüne alınmalıdır. Yüksek fırın hatlarında granülasyon için kullanılacak olan su miktarı üretilen cüruf miktarı göz önünde tutularak hesaplanmalı. Mümkünse oran %10 seviyelerinde seçilmelidir.

Etkin aşınma mekanizmasının genellikle plastik deformasyon türünden olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu mekanizmaya ek olarak çarpıp malzeme üzerinde kalan cüruf granüllerinin de varlığı gözlenmiştir.

En düşük aşınma kaybı  $W_2C$ -NiCrBSi malzemesinde gözlenmekle beraber en yüksek kayıp St-37 kalite çelikte olmuştur.  $W_2C$  partikülleri içeren kaplamada nispeten daha yumuşak bölgelerden oluşan NiCrBSi metalik yapısının aşınmaya maruz kalması ile ortaya çıkan sert fazların aşınma direncini artırdığı değerlendirilmiştir.

Yüksek fırın cüruflarını taşıyan sistemlerin tasarımlarında bu çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar partikül boyut dağılımı olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan tüm aşındırıcı partiküller elenerek belirli bir boyutta incelenmiştir. İlerleyen çalışmalarda farklı partikül boyut ve dağılımları için inceleyen yaklaşımlar değerlendirilebilir.

## 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Makalenin içeriğinin ve sunumunun geliştirilmesi için yorum ve tavsiyelerinden dolayı Editöre ve anonim hakemlere teşekkürü bir borç biliriz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Finnie I., Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3, 87-103, 1960.
2. Finnie I., Some observations on the erosion of ductile metals, *Wear*, 19, 81-90, 1972.
3. Bitter J.G.A., A study of erosion phenomena—Parts I, *Wear*, 6, 5-21, 1963.
4. Bitter J.G.A., A study of erosion phenomena—Parts II, *Wear*, 6, 169-190, 1963.
5. Shipway P.H., Hutchings L.M., The role of particle properties in the erosion of brittle materials, *Wear*, 193, 105-113, 1996.
6. Lindsley B.A., Marder A.R., The effect of velocity on the solid particle erosion rate of alloys, *Wear*, 225–229, 510–516, 1999.
7. Barton N.A., Erosion in Elbows in Hydrocarbon Production Systems: Review Document, TÜV NEL Limited, Research Report 115, Glasgow, 2003.
8. Adamiak M., Effect of Abrasive Size on Wear, Abrasion Resistance of Materials, *InTech*, 167-184, 2012.
9. Kulu P., Tarbe R., Vallikivi, A., Abrasive Wear of Powder Materials and Coatings, *Materials Science*, 11, 230-234, 2005.
10. Lopez D., Congote J.P., Can J.R., Toro A., Tschiptschin A.P., Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion–erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels, *Wear*, 259, 118-124, 2005.
11. Jha A.K., Batham R., Ahmed M., Majumder A.K., Modi O.P., Chaturved S., Gupta, A. K., Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum, *Trans. Nonferrous Met. Soc.China*, 21, 32-38, 2011.
12. Katsich C., Badisch E., Manish Roy, Heath G.R., Franek F., Erosive wear of hard faced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature, *Wear*, 267, 1856–1864, 2009.
13. Doubek P., Filipek J., Abrasive and erosive wear of technical materials, *Acta Univ. Agric. Et Silv. Mendel. Brun.*, 3, 13–22, 2011.
14. Patil M.S., Deore E.R., Jahagirdar R. S., Patil S.V., Study of the Parameters Affecting Erosion Wear of Ductile Material in Solid-Liquid Mixture, *Proc. Of the World Congress on Engineering*, London, UK, 2159-2163, 2011.
15. Franek F., Badisch E., Kirchgassner M., Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials, *FME Transactions*, 37, 61-70, 2009.
16. Desale G.R., Gandhi B.K., Jain S.C., Improvement in the design of a pot tester to simulate erosion wear due to solid–liquid mixture, *Wear*, 259, 196-202, 2005.
17. Khan A.A., Evaluation of Erosion Wear of Ash Handling Pipes, Master of Engineering, Thapar University, Patiala, 2011.
18. Kumar S., Ratol J.S., Effects of Tribological Parameters on Slurry Erosion Behaviour of Uncoated and Coated Materials: A Review, *Materials Engineering*, 20, 119-131, 2013.
19. Özel S., Yüzey Kaplama İşlemlerinde Kullanılan Isıl Püskürtme Yöntemleri, *BEU Journal of Science*, 2 (1), 88-97, 2013.
20. More S.R., Nandre B.D., Desale G.R., Development of Pot Tester to Simulate the Erosion Wear due to Solid-Liquid Mixture, *Int.Jour. of Researchers*, 2, 6-12, 2014.
21. Desale G.R., Gandhi B.K., Jain S.C., Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition, *Wear*, 264, 322-330, 2008.
22. Ramanujam N., Nakamura T., Erosion mechanisms of thermally sprayed coatings with multiple phases, *Surface and Coatings Technology*, 204, 42-53, 2009.
23. Avcu E., Fidan S., Karabay S., Sınmazçelik T., Türkiye’de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 ile AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(4), 865-874, 2012.
24. Abd-Elrhman Y.M., Abouel-Kasem A., Emara K.M., Ahmed S. M., Effect of Impact Angle on Slurry Erosion Behaviour and Mechanisms of Carburized AISI 5117 Steel, *Journal of Engineering Sciences*, Assiut University, 41, 137-157, 2013.

