

EKSTRA SERT AŞINMA DİRENÇLİ HARDOX 600 ÇELİĞİNİN KURU-KAYMA AŞINMA DAVRANIŞI

Yılmaz Küçük^{1*}, M. Sabri Gök¹

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın

Öz

Bu çalışmada, ekstra sert aşınma dirençli Hardox 600 çeliğinin kuru-kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Deneyler ball-on-disk aşınma aparatında ileri-geri doğrusal hareket modunda gerçekleştirilmiştir. Numuneler 6, 7.5 ve 9 mm/s kayma hızlarında ve 3, 5 ve 7 N luk yükler altında aşındırılmıştır. Aşındırıcı olarak 6 mm çapında WC bilya kullanılmıştır. Numune hacim kayıplarının hesaplanmasında 3B profilometre görüntüleri kullanılmıştır. Aşınma yüzeylerinin incelenmesinde SEM mikrograflarından yararlanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda artan yük ve kayma hızına bağlı olarak hacim kayıplarının arttığı, ancak bunun yanı sıra artan yükte birlikte numune sürtünme katsayı değerinin düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte değişen yük ve kayma hızına bağlı olarak numune yüzeylerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarının farklılık gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hardox çeliği, ileri-geri doğrusal hareket, kuru kayma aşınması

DRY-SLIDING WEAR BEHAVIOR OF EXTRA-HARD WEAR-RESISTANT HARDOX 600 STEEL

Extended Abstract

Hardox steels have high strength and wear resistance. So, they are widely used in the automotive, mining, construction, agricultural, and ore processing industries. For this reason, the wear mechanisms on the machine parts, equipment, and machine tools exposed to harsh working conditions are performed as primarily abrasive and adhesive phenomena. In this study, the dry-sliding wear behavior of extra-hard wear-resistant Hardox 600 steel with chemical composition (% 0.4 C, % 0.56 Si, % 1 Mn, % 1.2 Cr, % 1.5 Ni, % 0.60 Mo, % 0.015 P, % 0.010 S) was investigated. The experiments were carried out in a ball-on-disk type tribometer device using reciprocating mode. The samples were abraded at sliding speeds of 6, 7.5, and 9 mm/s and under loads of 3, 5, and 7 N. A WC ball with a diameter of 6 mm was used as an abrasive. 3D profilometer images were used in the calculation of sample volume losses. SEM micrographs were used to examine wear surfaces. As a result of the experimental studies, it was observed that volume losses increased depending on the increasing load and sliding speed. However, it was determined that the friction coefficient values decreased with the increase in load, and it was evaluated that the main reason for this was the oxide layer caused by the temperature increase caused by friction in the contact area. It was determined that oxidation on the contact surface increased especially at low load and high sliding speed. In addition, the normal and tangential shear stresses that increased with the increasing load increased the plastic deformation, and the surface became flatter and less rough, reducing the friction coefficient. In addition, it was observed that the wear mechanisms occurring on the sample surfaces differed depending on the changing load and sliding speed. With the increase in load, first delamination, then adhesion and plastic deformation type wear mechanisms were detected.

Key Words: Hardox steel, reciprocating, dry sliding wear

1. Giriş

Yüksek mukavemetleri ve aşınma dirençleri nedeniyle hardox çelikleri, otomotiv, madencilik ekipmanları, inşaat, tarım aletleri ve cevher işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu çelikler sahip oldukları brinell sertlik değerlerine göre adlandırılmaktadır (Zemlik vd., 2025; Bhakat vd., 2007; Rendón &

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author):** Yılmaz KÜÇÜK;
Bartın Üniversitesi, Mimarlık, Mühendislik ve Tasarım Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, TÜRKİYE.

Geliş (Received) : 24.10.2024
Kabul (Accepted) : 12.11.2024
Basım (Published) : 31.12.2024

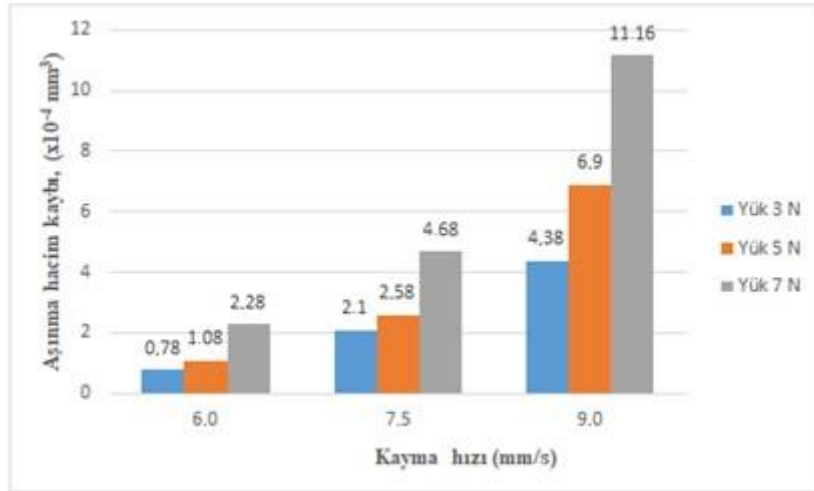
Olsson, 2009). Hardox çelikleri yüksek sertlikteki temperlenmiş martenzit mikro yapısı ve içeriğindeki diğer alaşım elementleri sayesinde yüksek dayanım ve sertliğe sahiptirler. Manganez, krom, nikel, molibden ve bor gibi alaşım elementlerinin 50 ppm'in altındaki fraksiyonları hipoötektoid çeliğin sertleşebilirliğini artırmakta ve ferrit ve perlit oluşumunu geciktirmektedir (Huang vd., 2019; Tchoumi vd., 2016; Xu vd., 2020). Literatürde yüksek aşınma dirençli çeliklerin eroziv ve abraziv aşınma davranışı üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte (Ligier vd., 2022; Deng vd., 2014; Rojacz vd., 2022; Valtonen vd., 2019; Ojala vd., 2014; Konat & Napiórkowski, 2019), Hardox çeliğinin aşınmasına yönelik oldukça sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır (Zemlik vd., 2025; Białobrzeska & Konat, 2017). Bu amaçla bu çalışmada Hardox 600 çeliğinin farklı kayma hızlarında ve farklı yükler altındaki kuru-kayma aşınma davranışları incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kimyasal bileşimi % 0.4 C % 0.56 Si, % 1 Mn, % 1.2 Cr, % 1.5 Ni % 0.60 Mo % 0.015 P % 0.010 S olan ekstra sert aşınma dirençli Hardox 600 çeliğinin kuru-kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Çelik plaka lazer kesim cihazı ile 40 x 40 x 10 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Kesme işleminden sonra numunenin yüzeyi 1200 mesh SiC zımpara ile parlatıldıktan sonra temizlenerek aşındırma işlemine hazır hale getirilmiştir. Aşınma testleri 6, 7.5 ve 9 mm/s kayma hızlarında ve 3, 5 ve 7 N'luk yükler altında ball-on-disk aşınma cihazında ve ileri-geri doğrusal hareket yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı bilya olarak 6 mm çapında WC kullanılmıştır. Bilya sertliği 1800 HV'dir. Numunelerde meydana gelen hacim kayıplarının belirlenmesinde 3B profilometreden faydalanılmıştır. 6 mm boyunda oluşan izin en az 4 farklı bölgesinden alınan iz profili yüzey alanı ölçümlerinden ortalama iz kesit alanı belirlendikten sonra iz boyu ile çarpılarak aşınma hacim kaybı değerleri elde edilmiştir. Aşınmış yüzeyde meydana gelen aşınma mekanizmaları ile yüzey morfolojisinin değerlendirilmesinde ise SEM görüntülerinden faydalanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1'deki grafikte numunelere ait üç farklı kayma hızında ve üç farklı yük altında ileri-geri doğrusal hareket yöntemi ile kuru-kayma aşınması yapılan numunelerin hacim kaybı değerleri verilmiştir. Yükün olduğu kadar kayma hızının da numunelerin hacim kaybında önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır.

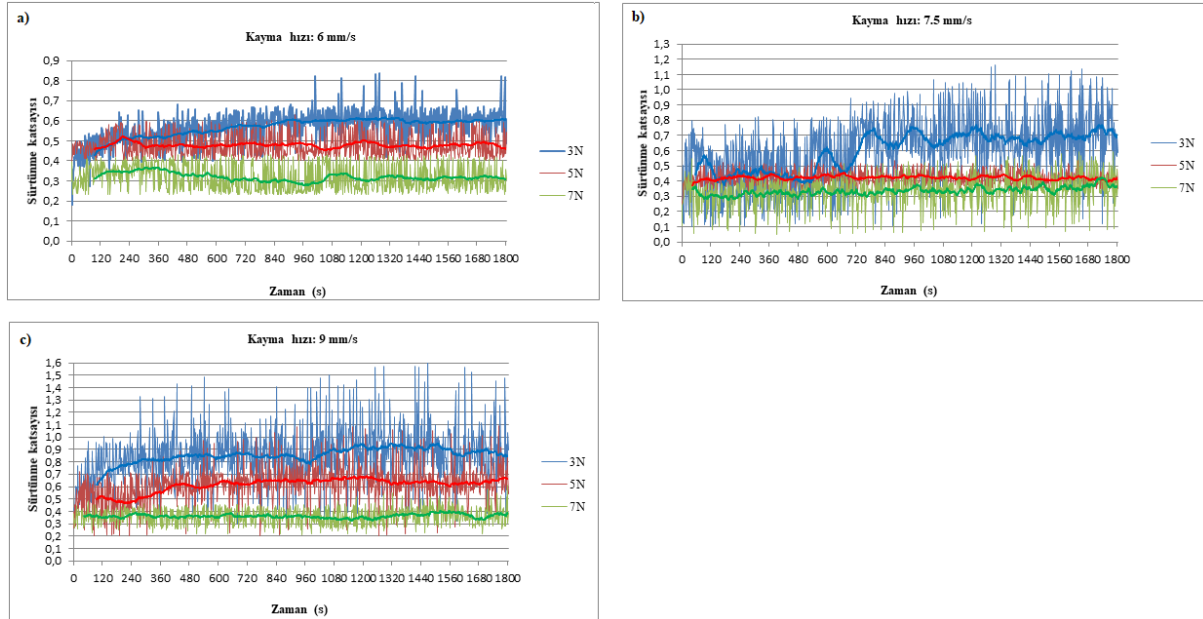


Şekil 1. Hardox 600 çeliğinde değişen yük ve kayma hızlarına bağlı olarak ortaya çıkan aşınma hacim kaybı değerleri

Tribolojik etkileşim karmaşık bir olaydır. Bu etkileşim esnasında, deney parametreleri ve ortama bağlı olarak numunede meydana gelen aşınma oranı ve aşınma mekanizmaları değişmektedir. Bilindiği üzere yük çoğu zaman hacim kayıplarının artmasında önemli bir parametredir. Yük aşındırıcı bilyanın alt yüzeye daha fazla basma gerilmesi uygulamasında önemli bir parametre olduğu kadar yüzeydeki aşınma mekanizmalarının şekillenmesinde de etkin faktördür (Öge vd., 2023; Küçük vd., 2023a; Küçük vd., 2023b; Küçük, 2020a). Böylece yüzey üzerinde oluşan normal ve teğetsel kayma gerilmeleri kadar, sürtünme kaynaklı temas sıcaklığının artması sonucu oluşan oksidasyonla da doğrudan ilişkilidir (Küçük, 2020b; Öge vd., 2019).

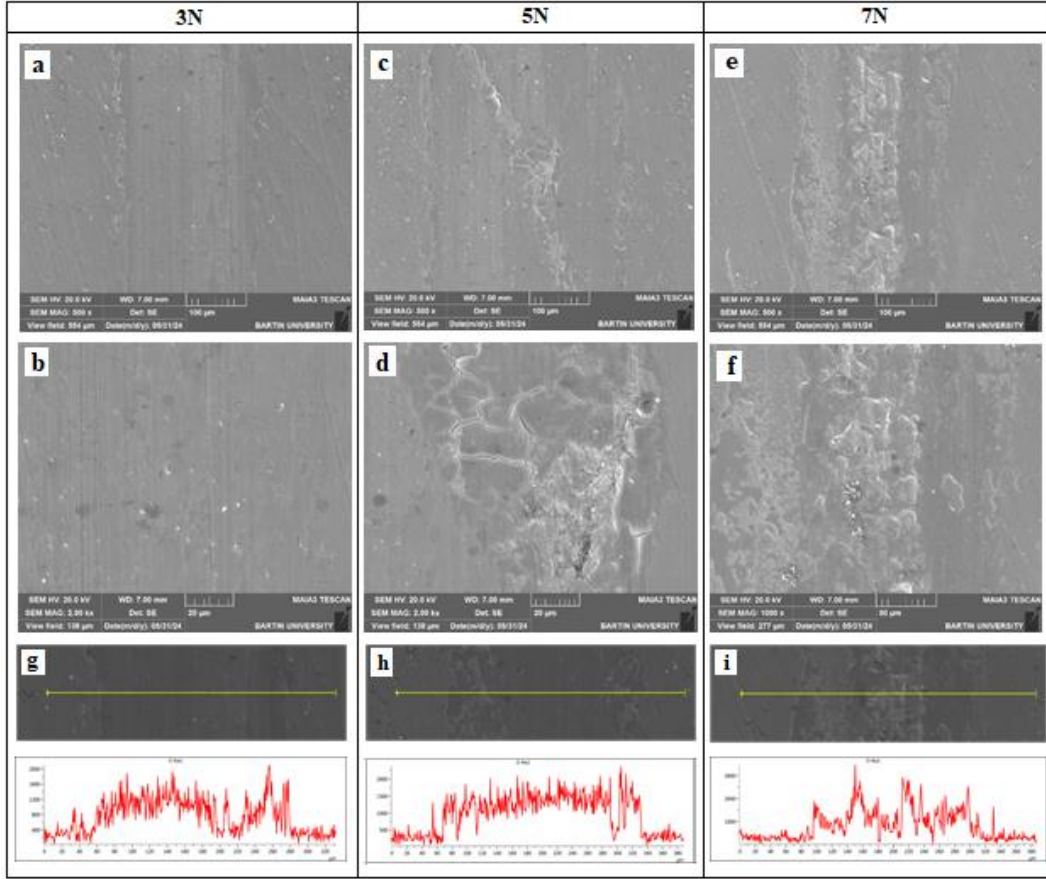
Oksidasyon sonucu temas yüzeyinde hızla bir oksit tabakası oluşur ve söz konusu bu tabaka deney süresince uygulanan tekrarlı yükler ve gerilmelerin etkisiyle kırılarak kopar ve aşındırıcı abrasiv partiküller olarak hacim kayıplarının oluşmasında önemli bir rol oynar (Kucuk vd., 2018). Yine aşındırılan malzemenin kimyasal bileşimi yük ve kayma hızı numune üzerindeki hasar mekanizmasını etkilemektedir (Küçük & Öge, 2022).

Numuneler ait sürtünme katsayısı (SK) değerleri Şekil 2(a-c)'de sırası ile verilmiştir. Şekil 2a'da en düşük kayma hızında gerçekleşen testlerde yükün SK değerinin düşmesinde önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Kayma hızının 7.5 mm/s'ye çıkması ile 3 N luk yük altında SK değerinin özellikle 7. dk (720 s) dan itibaren yükseldiği ve dalgalandığı dikkati çekmektedir (Şekil 2b). Kayma hızının 9 mm/s çıkartılması ile SK değerlerinde nisbi artış görülmüştür (Şekil 2c).

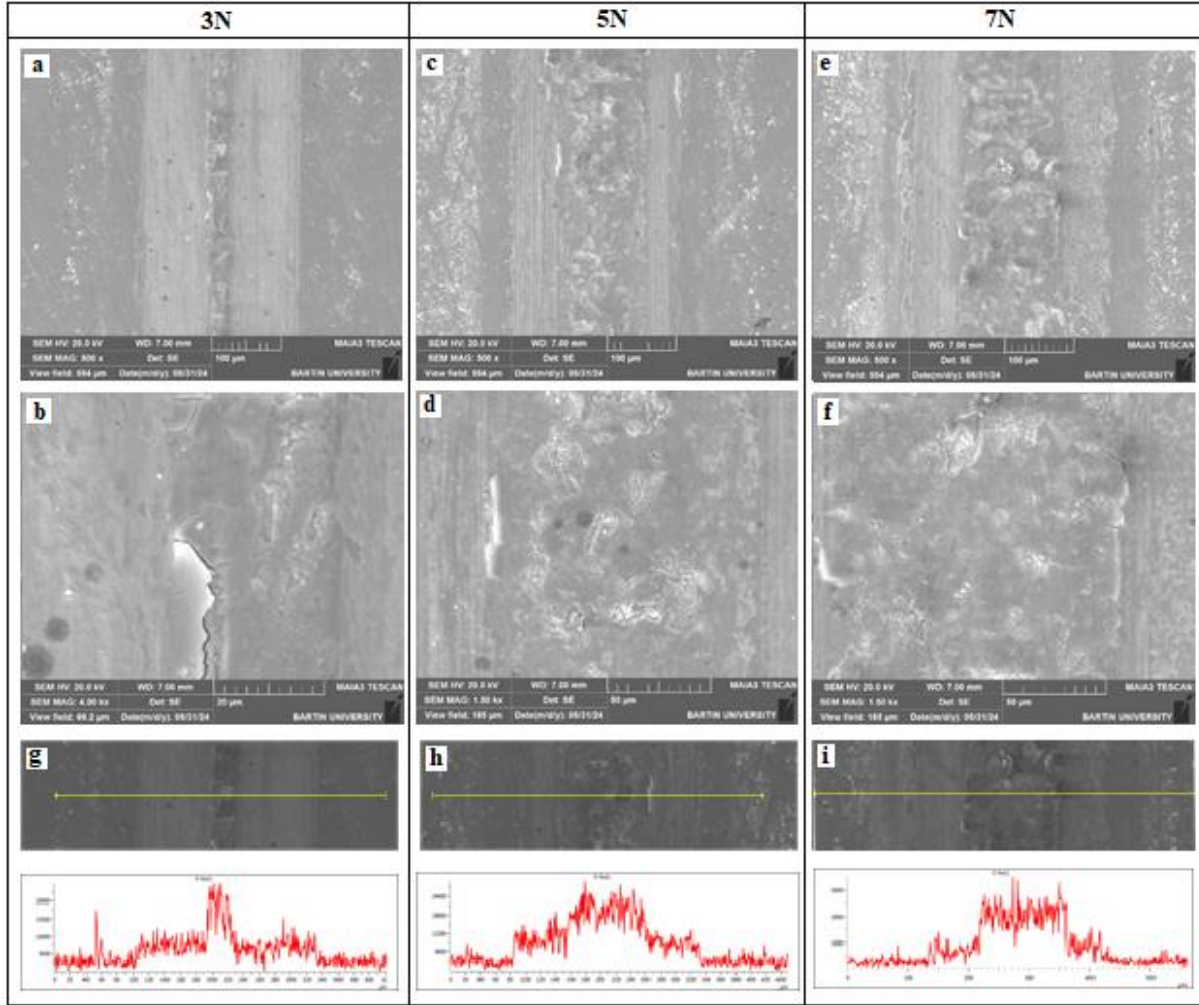


Şekil 2. Farklı yük ve kayma hızlarında kaydedilen sürtünme katsayısı değerleri
 a) 6 mm/s, b) 7.5 mm/s, c) 9 mm/s

Şekil 3(a-f)'de 6 mm/s kayma hızında ve 3, 5 ve 7 N luk yükler altında aşındırılmış numunelerin yüzeyinden iki farklı büyütmede alınmış SEM aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Yükün artması ile aşınma mekanizmasının değiştiği SEM aşınma izi fotoğraflarından görülebilmektedir. Şekil 3(a-b)'de aşınma izinin düşük yük altında oksidasyon mekanizması şeklinde gerçekleştiği yüzeyde mikro çiziklerin ve kısmi aşınma partiküllerinin varlığı görülebilmektedir (Günen vd., 2015; Kucuk, 2012). Şekil 3 c-d incelendiğinde ise oksidasyon mekanizması ile delaminasyon aşınma mekanizmalarının sonucu plastik deformasyonun izlerini görmek mümkündür. Yükün 7 N a çıkması ile birlikte yüzeyde oluşan oksit tabakasının, alınan EDS analizinden de açıkça görüldüğü üzere (Şekil 3i), kırıldığı ve ortaya çıkan aşınma atıklarının abrasyon etkisi ile birlikte yüzeyde plastik deformasyona sebep olduğu görülmektedir (Şekil 3f).



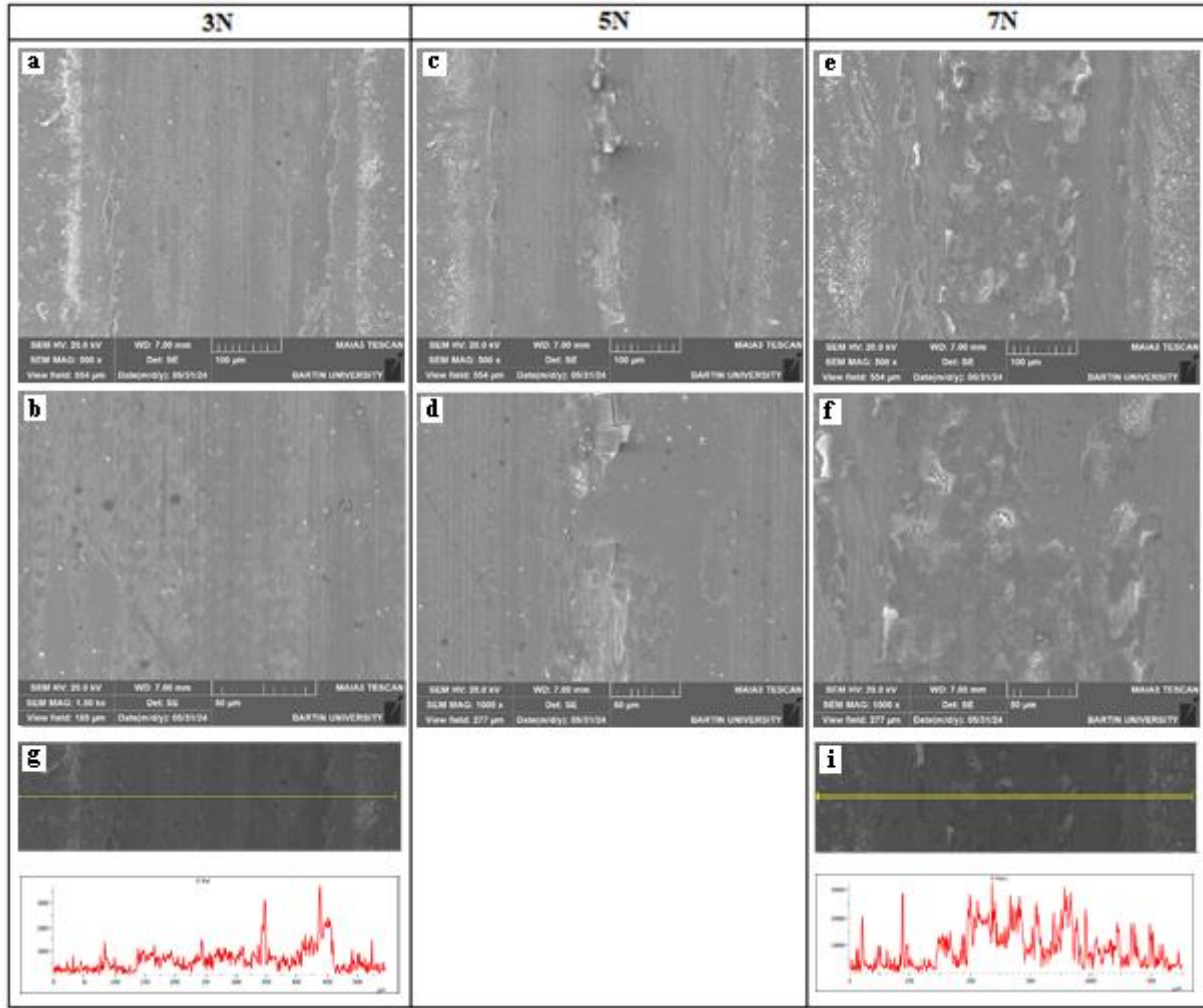
Şekil 3. 6 mm/s kayma hızı ve farklı yükler altındaki aşınma testleri sonrasında alınan (a-f) SEM görüntüleri (b,d ve f sırasıyla a,c,e nin 2kx büyütülmüş görüntüleridir), (g-i) EDS çizgi analizleri



Şekil 4. 7.5 mm/s kayma hızı ve farklı yükler altındaki aşınma testleri sonrasında alınan (a-f) SEM görüntüleri (b,d ve f sırasıyla a,c,e nin büyütülmüş görüntüleridir), (g-i) EDS çizgi analizleri

Kayma hızının artması ile 3N'luk yükte bile aşınma izinin merkez bölgesinde daha fazla hasarın meydana geldiğini söylemek mümkündür (Şekil 4a-b). Bu merkez bölgede aşırı oksidasyon delaminasyon ve plastik deformasyon ana aşınma mekanizmaları olurken, kenar bölgelerindeki oksidasyonun daha az olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 4g'de verilen EDS analizinde de görülmektedir. Yükün 5N'a çıkarılması ile merkez bölgenin biraz daha genişlediği (Şekil 4c-d) ve yine oksidasyon ve plastik deformasyon baskın aşınma mekanizmaları olurken bu bölgenin sağ ve solu mikro çizilmelere maruz kalmıştır. En yüksek yük olan 7N altındaki aşınma yüzey morfolojisi ise (Şekil 4e-f) 5N'luk yük ile benzerlik taşımaktadır. Ancak aşınma yüzeyinin sağında ve solunda daha fazla aşınma artışı dikkat çekmektedir.

Şekil 5(a-f)'de en yüksek kayma hızı olan 9 mm/sn kayma hızında ve 3, 5 ve 7N'luk yükler altında aşındırılmış numunelerin yüzeyinden yine iki farklı büyütmede alınmış SEM aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Kayma hızının artması yüzeyde oksidasyon tipi aşınma mekanizmasını tetiklemiştir. Diğer aşınma mekanizmaları benzerlik göstermektedir. Şekil 5'te verilen EDS çizgi analizlerinde özellikle 3 N yük altında önemli bir oksit katmanı oluşmazken, 7 N luk yükte yüzeyde oluşan oksidasyon dikkat çekicidir ve yüzeydeki oksidasyona bağlı aşınma izlerinin oluşumunu destekler niteliktedir.



Şekil 5. 9 mm/s kayma hızı ve farklı yükler altındaki aşınma testleri sonrasında alınan (a-f) SEM görüntüleri (b,d ve f sırasıyla a,c,e nin büyütülmüş görüntüleridir), (g-i) EDS çizgi analizleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada ekstra sert Hardox 600 çeliği üzerinde üç farklı yük ve üç farklı kayma hızında kuru-kayma aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

1. Yükün artması ile numune hacim kaybının arttığı ancak sürtünme katsayısı değerinin düştüğü görülmüştür.
2. 6 ve 7.5 mm/s kayma hızlarında uygulanan tüm yüklerde, 9 mm /s lik kayma hızında ise en yüksek yük (7N) altında yüzeyin tamamen sürtünme kaynaklı oksit tabakası ile kaplandığı görülmüştür.
3. Yükün artması ile önce delaminasyon, sonrasında adhezyon ve plastik deformasyon tipi aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir.
4. Kayma hızının da aşınma mekanizmasının değişiminde etkili olduğu anlaşılmıştır.

Kaynaklar

1. Bhakat, A. K., Mishra, A. K. & Mishra, N. S. (2007). Characterization of wear and metallurgical properties for development of agricultural grade steel suitable in specific soil conditions. *Wear*, 263(1-6), 228-233.
2. Bialobrzeska, B. & Konat, L. (2017). Comparative analysis of abrasive-wear resistance of brinar and hardox steels. *Tribologia- Finnish Journal of Tribology*, 272, 7-16.
3. Deng, X. -T., Wang, Z. -D., Han, Y., Zhao, H. & Wang, G. -D. (2014). Microstructure and Abrasive Wear

- Behavior of Medium Carbon Low Alloy Martensitic Abrasion Resistant Steel. *J. Iron Steel Res. Int.*, 21, 98–103.
4. **Günen, A., Küçük, Y., Er, Y., Çay, V. V., Öge, M. & Gök, M. S. (2015).** Effect of the powder particle size on the wear behavior of boronized AISI 304 stainless steel. *Materials Testing*, 57(5), 468-473.
 5. **Huang, L., Hua, X., Wu, D., Jiang, Z. & Ye, Y. (2019).** A study on the metallurgical and mechanical properties of a GMAW-welded al-mg alloy with different plate thicknesses, *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 438-445.
 6. **Konat, L. & Napiórkowski, J. (2019).** The Effect of the Method And Parameters of the Heat Treatment on Abrasive Wear Resistance of 38GSA Steel. *Tribologia- Finnish Journal of Tribology*, 285, 61–69.
 7. **Kucuk, Y., Oge, M., Gok, M. S. & Karaoglanli, A. C. (2018).** Ferrochromium slag as a protective coating material against oxidation for caster rolls. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15, 1240-1247.
 8. **Kucuk, Y. (2012).** Investigation of Abrasiveness Property of Blast Furnace Slag on Ceramic Coatings via the Abrasive Slurry Wear Method. *Tribology Transactions*, 55(6), 762–771.
 9. **Küçük, Y., Erdoğan, A., Kurşuncu, B. & Gök, M. S. (2023a)** Effects of surface roughness and counter body variables on the dry sliding wear behavior of AISI 4140 steel based on the elastoplastic flattening model. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 11(2), 025002.
 10. **Küçük, Y., Altaş, E. & Topcu, M. E. (2023b).** A comparative analysis of the effect of laser surface treatment on the dry sliding wear behavior of ductile cast irons with different microstructures. *Optik*, 274, 170540.
 11. **Küçük, Y. (2020a).** Effect of counterbody on the dry sliding wear performance of plasma sprayed calcia-stabilized zirconia coating. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 92, 105284.
 12. **Küçük, Y. (2020b).** Effect of counter body on wear behavior of plasma-sprayed TiO₂-45Cr₂O₃ coating. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 9(1), 237–252.
 13. **Küçük, Y. & Öge, M. (2022).** Elevated Temperature Wear Behavior of FeCr Slag Coating as an Alternative Coating Material for Caster Rolls. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 58, 119–128.
 14. **Ligier, K., Zemlik, M., Lemecha, M., Konat, L. & Napiórkowski, J. (2022).** Analysis of Wear Properties of Hardox Steels in Different Soil Conditions. *Materials*, 15, 7622.
 15. **Ojala, N., Valtonen, K., Heino, V., Kallio, M., Aaltonen, J., Siitonen, P. & Kuokkala, V.-T. (2014).** Effects of composition and microstructure on the abrasive wear performance of quenched wear resistant steels. *Wear*, 317, 225–232.
 16. **Öge, M., Küçük, Y., Öge, T. Ö., Günen, A., Kanca, Y. & Gök, M. S. (2023).** Effect of boriding on high temperature tribological behavior of CoCrMo alloy. *Tribology International*, 187, 108697.
 17. **Öge, M., Kucuk, Y., Gok, M. S. & Karaoglanli, A. C. (2019).** Comparison of dry sliding wear behavior of plasma sprayed FeCr slag coating with Cr₂O₃ and Al₂O₃-13TiO₂ coatings. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 16, 2283-2298.
 18. **Rendón, J. & Olsson, M. (2009).** Abrasive wear resistance of some commercial abrasion resistant steels evaluated by laboratory test methods. *Wear*, 267(11), 2055-2061.
 19. **Rojacz, H., Katsich, C., Kirchgäßner, M., Kirchmayer, R. & Badisch, E. (2022).** Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys. *Wear*, 492–493, 204183.
 20. **Tchoumi, T., Peyraut, F. & Bolot, R. (2016).** Influence of the welding speed on the distortion of thin stainless steel plates - numerical and experimental investigations in the framework of the food industry machines, *J Mater Process Technol.*, 229, 216-229.
 21. **Valtonen, K., Ojala, N., Haiko, O. & Kuokkala, V. -T. (2019).** Comparison of various high-stress wear conditions and wear performance of martensitic steels. *Wear*, 426–427, 3–13.
 22. **Xu, C., Guo, N., Zhang, X., Jiang, H., Tan, Y. & Zhou, L. (2020).** Influence of welding speed on weld pool dynamics and welding quality in underwater wet FCAW, *Journal of Manufacturing Processes*, 55, 381-388.
 23. **Zemlik, M., Konat, L. & Bialobrzaska, B. (2025).** Analysis of the possibilities to increase abrasion resistance of welded joints of Hardox Extreme steel. *Tribology International*, 201, 110271.