

Plazma Püskürtme Kaplama Yöntemiyle Üretilmiş HA ve TiO₂ Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Muhammet Karabaş^{1*}, Yusuf Kayalı²

¹Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bil. Ve Müh. Böl., Hakkari

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, A.N.S Kampüsü, Teknoloji Fak., Metalurji ve Malz. Müh. Böl., Afyonkarahisar

Geliş / Received: 22.02.2019, Kabul / Accepted: 15.12.2019

Özet

Hidroksiapatit (HA) biyoseramik kaplamalar medikal implant uygulamalarında biyoyumluluğu ve korozyon direncini arttırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat HA kaplamalar zayıf mekanik özellikleri sebebiyle saldırgan ortamlarda kolayca hasar alabilmektedir. Bu çalışmada tek katman HA, TiO₂ ve çift katman HA/TiO₂ kaplamalar plazma püskürtme yöntemi ile üretilmiştir. Kaplamaların kuru ortamda ve SBF ortamında aşınma davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde tek katman HA kaplamanın en zayıf aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Fakat TiO₂ ile çift katman kaplama dizaynı sonucunda aşınma dayanımında iyileşmeler meydana gelmiştir. Tek katman TiO₂ kaplamada ise aşınma deneyleri sonucunda en az malzeme kaybı meydana geldiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidroksiapatit, Plazma püskürtme, Aşınma

Wear Behaviour of HA-TiO₂ Coatings Fabricated by Plasma Spray

Abstract

Hydroxyapatite (HA) bioceramic coatings are widely used in medical implants in order to improve biocompatibility and corrosion resistance. But, HA coatings suffers from poor mechanical properties in aggressive environment. In this study, Single layer HA, TiO₂ and double layer HA/TiO₂ coatings were fabricated by plasma spray. Wear behavior of coatings in dry and SBF environment was investigated. As a result, the single layer HA coating had the weakest wear resistance. However, abrasion resistance improved as a result of the double layer coating design with TiO₂. In the case of single-layer TiO₂ coating, the least material loss occurred as a result of the wear tests.

Keywords: Hydroxyapatite, Plasma Spray, Wear

1. Giriş

Günümüzde insan ömrünün uzaması ile dokularda meydana gelen hasarları önlemek için biyoyumlu malzemelere ihtiyaç sürekli artmaktadır. Özellikle sert dokularda kullanılan implantlar büyük oranda metalik malzemelerden üretilmektedir. Çünkü metalik malzemeler medikal uygulamalar için gerekli olan mekanik özelliklere sahiptir. Paslanmaz çelik, Co-Cr alaşımları, titanyum ve alaşımları medikal uygulamalarda yaygın

olarak kullanılan metalik malzemelerdir. Ti6Al4V alaşımı ise birçok medikal ve diş uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Y. H. Li ve ark., 2014; Temenoff & Mikos, 2008). Bununla birlikte, metalik malzemeler kemik dokusu ile direkt temas ettiğinde güvenilir olmamakta veya implantın kemik dokusuna uyum sağlaması uzun sürelerde olmaktadır.

Seramik ve polimer biyoyumlu malzemeler özellikle gerilme ve yük altında metalik malzemeler kadar mekanik olarak kararlı değildir. Fakat metalik malzemeler zamanla vücutta korozyona uğrayarak toksik etki oluşturabilmekte ve mekanik stabiliteleri zayıflayabilmektedir (Fathi & Doostmohammadi, 2009; Y. H. Li ve ark., 2014). Bu durumun önüne geçmek için metalik malzemelerin yüzeylerine biyoyumlu seramik Hidroksiapatit (HA) kaplanmakta ve metalik malzemeler korozyona karşı direnci artırılabilir (Heimann, 2016). Bu kaplamalar metalik malzemelerin üzerine sol-jel (Baptista ve ark., 2016), elektroforetik biriktirme (Farnoush & Rezaei, 2017), aerosol biriktirme (Kim ve ark., 2011), yüksek hızlı oksiyakıt (Khor ve ark., 2003), plazma püskürtme (Cannillo ve ark., 2008; Lu ve ark., 2004) ve soğuk püskürtme (Villardell ve ark., 2015; Zuhailawati ve ark., 2015) gibi yöntemlerle kaplanabilmektedir. Fakat plazma püskürtme kemik dokusuna yakın poroziteli ve yapışma mukavemeti yüksek kaplamaların üretiminde ticari olarak en çok kullanılan tekniktir. Geleneksel poroziteli mikroyapı HA kaplamaların kemik dokusu ile uyum sağlamasını oldukça hızlandırmaktadır (Heimann, 2016). Fakat poroziteli yapı vücut sıvısının metalik altlık ile temas etmesine izin vermekte ve kaplama-altlık aralığında korozyona sebebiyet vererek mekanik dayanımın ve yapışmanın zayıflamasına sebep olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için araştırmacılar HA ile metalik altlık arasında bir ara katman ile çift katmanlı kaplamaları ve HA ile Ti, TiO₂, YSZ, Alumina gibi seramiklerin kompozit yapılarını denemişlerdir (Sola ve ark., 2016). Ayrıca araştırmacılar Ti, TiO₂, YSZ, Alumina gibi seramikleri HA kaplamalar için bağ katman olarak denemişler ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir (Karimi ve ark., 2015; H. Li ve

ark., 2002; Mittal ve ark., 2013; Palanivelu & Kumar, 2014). HA seramik katman ile metalik altlık arasında tokluğu ve korozyon direnci yüksek bir ara katmanın bulunması özellikle yük altında HA seramik kaplamanın altlık ile temas ettiği bölgelerde çatlak oluşumunu engellediği bildirilmiştir (C. C. Chen ve ark., 2006; Lu ve ark., 2004). Ayrıca termal genleşme katsayısı metalik implant malzemelerine yakın olan bir ara bağ katman kaplamanın varlığı, kaplama-implant arayüzünde termal genleşme uyumsuzluğu kaynaklı gerilme oluşumunu azaltıcı etki yapmakta ve çatlak oluşumunu engelleyerek kaplamaların uzun süre mekanik ve fiziksel özelliklerini korumasına yardımcı olmaktadır (F. Chen ve ark., 2007). Kompozit kaplama yapısı ise HA kaplamaların mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağladığı farklı çalışmalarda belirtilmiştir (Sola ve ark., 2016).

Bu çalışmada implant malzemesi olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı malzemelerinin yüzeylerine plazma püskürtme kaplama yöntemiyle hidroksiapatit (HA) ve TiO₂ tozları kullanılarak tek katmanlı ve çift katmanlı biyoyumlu seramik kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamaların kuru ortamda ve SBF ortamında aşınma davranışları incelenmiştir.

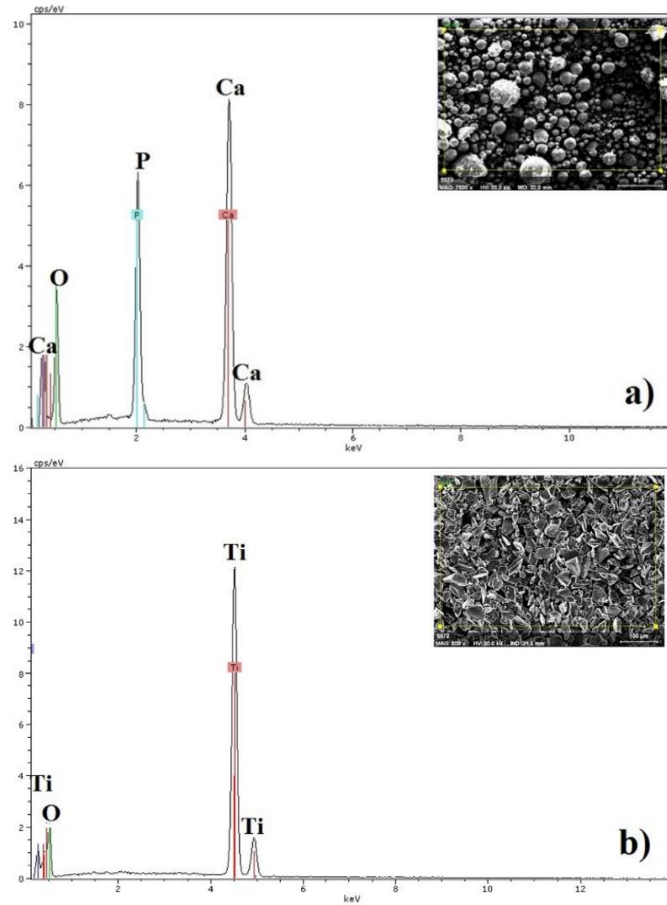
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmadan altlık malzeme olarak 8 mm kalınlığında ve 25 mm çapında Ti6Al4V atlıklar kullanılmıştır. Kaplama üretim işlemine geçmeden önce altlık malzemeler çift taraflı bant yardımıyla bir plakaya yapıştırılmış ve kumlama işlemine tabii tutulmuştur. Böylece kumlama işlemi sebebiyle oluşması muhtemel farklı yüzey pürüzlülük seviyelerinin önüne geçilmiştir. Kumlama işleminde 50-80 mesh alümina kumu numune yüzeylerinde 200 mm

mesafeden 90 ° açıyla püskürtülmüştür. Kumlanarak yüzeyi pürüzlendirilen numuneler kumlama kaynaklı kirlilikleri gidermek amacıyla teknik etanol içerisinde ultrasonik temizleyicide 30 dk temizlenmiştir. Temizlenen numuneler döner tabla tutucuya yerleştirilmiş ve kaplama işlemi için hazır hale getirilmiştir.

Kaplama malzemesi olarak Metco tarafından ticari olarak sunulan Amdry

6210 TiO₂ ve püskürtmeli kurutma ile üretilmiş HA tozları kullanılmıştır. Şekil 1'de temin edilen HA ve TiO₂ tozlarının SEM-EDX görüntüleri verilmiştir. TiO₂ tozları açılı ve köşeli şekilde iken HA tozu küresel şekildedir. EDX analizlerinde ise toz bileşimlerinden farklı bir elemente ait pike rastlanmamıştır ve toz bileşimlerinin stokiometrik aralıklarda olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan a) HAP b) TiO₂ tozlarının SEM-EDX görüntüleri.

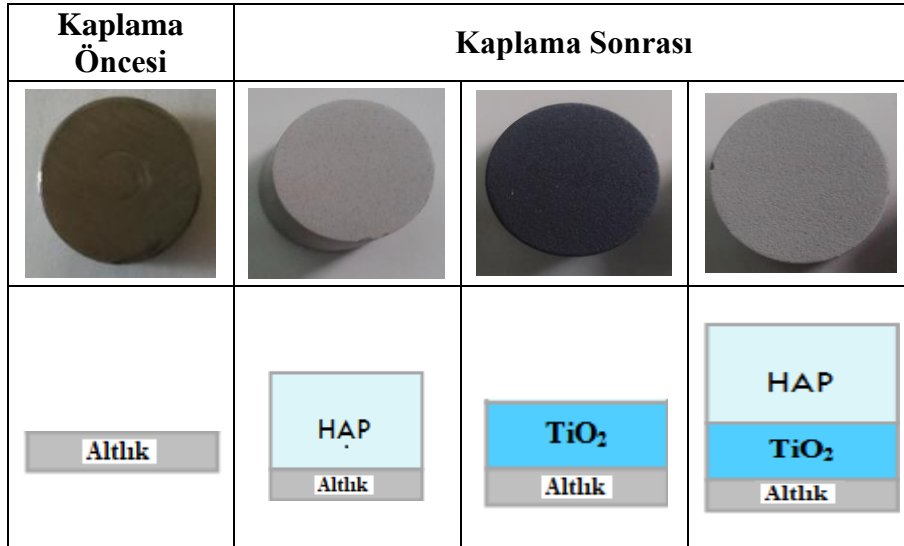
Kaplamaların üretiminde Sulzer Metco 9MB plazma tabancası kullanılmış ve 730C nozül olarak seçilmiştir. Kaplama

tabancası üç eksenli bir CNC robota bağlanarak istenen hız ve hareket ayarlanmıştır. Çizelge 1'de plazma püskürtme işlem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 1. Plazma püskürtme parametreleri.

Parametreler	
Akım (A)	500
Birincil gaz akış hızı, Ar (L/dk)	42,5
İkincil gaz akış hızı, H ₂ (L/dk)	7
Toz besleyici gaz hızı, Ar (L/dk)	6,4
Paso sayısı	12
Püskürtme mesafesi(mm)	75
Tabanca hızı (mm/min)	600
Döner tabla hızı (rpm)	100

Plazma spreylendirme kaplama öncesi ve sonrası Ti6Al4V altlıkların makro resimleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Altlık malzemelerin kaplama öncesi ve sonrası yüzey resimleri.

Üretilen kaplamaların aşınma testleri oda sıcaklığında, kuru ve SBF çözeltisi içerisinde, 5N yük altında, 0.3 m/s kayma hızında, 8mm çapında WC-Co aşındırıcı bilge kullanılarak yapılmıştır. Aşınma öncesi ve sonrasında kaplama yüzeyleri SEM ve profilometre ile karakterize edilerek aşınma mekanizması anlaşılmasına çalışılmıştır. Kaplamaların aşınma hızı profilometre ile elde edilen aşınma hacim verileri ile aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

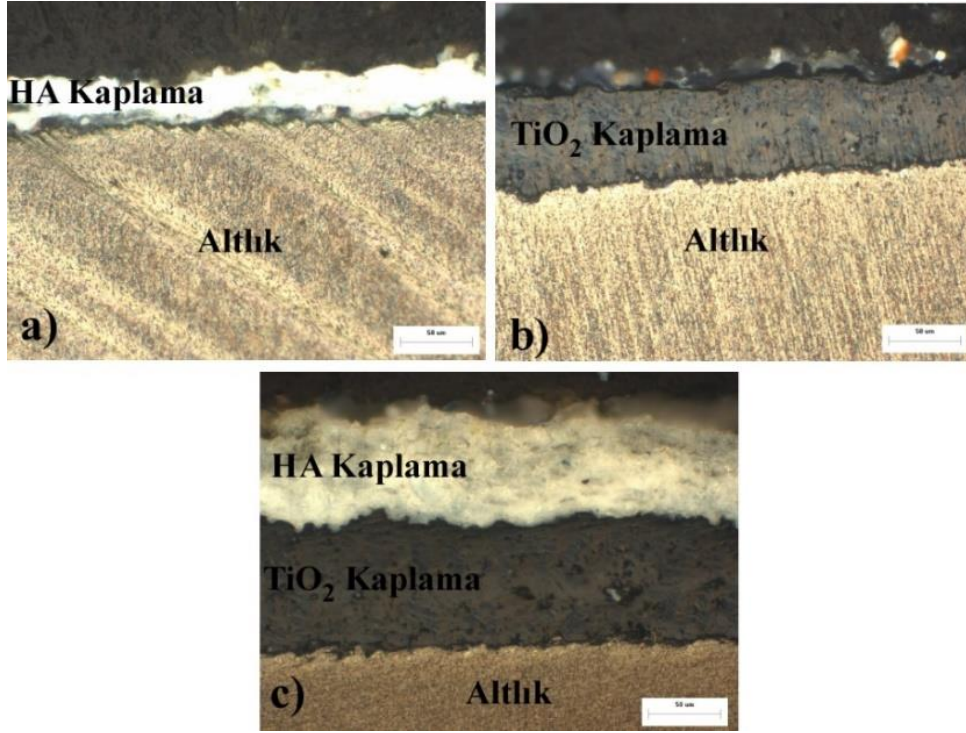
Aşınma hızı=Aşınan hacim miktarı / (Uygulan yük x Kayma mesafesi), mm³/Nm

3. Bulgular

Şekil 3’te 3 farklı kaplamaya ait kesit optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Ti6Al4V altlıklar üzerinde kaplama üretim işlemi sonrasında sürekli ve yoğun bir kaplama tabakası başarılı şekilde üretilmiştir. Kaplamalar ile altlık malzeme arasında sürekli bir yapışma sağlanmış olup, kaplama mikroyapısının sürekliliğini

bozan herhangi bir etmene rastlanmamıştır. Ayrıca mikroyapı resimlerinden kaplama kalınlıkları yaklaşık olarak tek katman HA

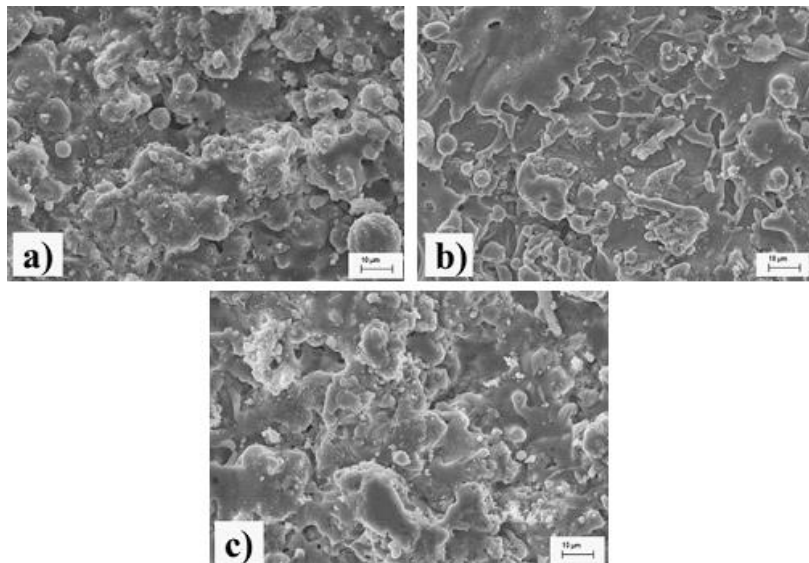
için 50-70 µm, TiO₂ 80-100 µm ve çift katman HA/TiO₂ için ise 120-140 µm aralıklarında ölçülmüştür.



Şekil 3. Kaplamaların kesit optik mikroskop görüntüleri; a) HA, b) TiO₂ d) HA/TiO₂.

Şekil 4'te ise üretilen kaplamaların yüzey SEM resimleri görülmektedir. Tüm kaplamalar için plazma püskürtme işlemi ile üretilen kaplamalara ait doğal mikro yapısal özelliklerden olan pürüzlü ve poroziteli yüzey yapısının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Üretimde kullanılan toz

mikroyapısı sebebiyle HA esaslı tek ve çift katman kaplama yüzeyleri daha pürüzlü ve ergimemiş partikül içerirken, TiO₂ partiküllerinin köşeli ve karmaşık geometrik yapısı daha az ergimemiş partikül içeren ve az pürüzlü bir yüzey yapısı oluşmasına sebep olmuştur.

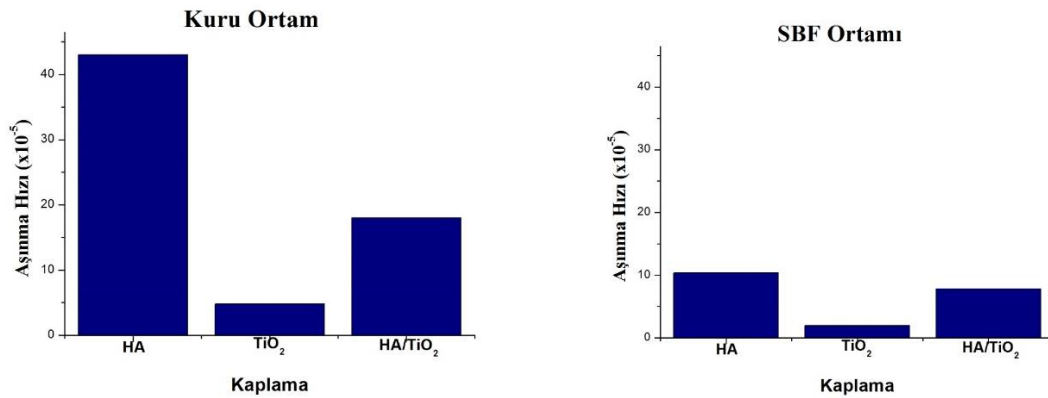


Şekil 4. Kaplamaların yüzey SEM resimleri; a) HA, b) TiO₂ d) HA/TiO₂.

Şekil 5 üç farklı kaplama ve iki farklı ortam için hesaplanan aşınma hızı değerlerini gösteren grafikler verilmiştir. Tüm kaplamalar için kuru ortamda aşınma hızı SBF ortamındaki aşınma hızından yüksektir. Bu durumun sebebi SBF çözeltisinin aşınma deneyleri esnasında yağlayıcı etkisidir. SBF çözeltisi sürtünen yüzeyleri yağlayarak direkt katı-katı temasını engellemekte ve aşınma hızını azaltmaktadır (Khun ve ark., 2016). Her iki ortamda da en yüksek aşınma hızı değerine tek katman HA kaplamalar, en düşük aşınma hızı değerine ise TiO₂ kaplamalar sahiptir. Bu durum HA kaplamaların kırılma tokluğu gibi zayıf mekanik özelliklerine bağlıdır. Ayrıca plazma püskürtme ile üretilen kaplamaların geleneksel mikroyapısal özelliklerinden olan gözenekli mikroyapı ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen splat morfolojisi de bu durumun ortaya çıkmasında etkili rol oynamaktadır (Khun ve ark., 2016). Fakat HA biyoseramik katman ile altlık arasında TiO₂ bağ katman kaplamaların üretilmesi sonucu her iki ortamda da aşınma hızlarında bir miktar azalma meydana gelmiştir. Aşınma hızındaki bu değişimin sebebi şu şekilde açıklanabilir; HA

kaplamalar ile altlık arasında bağ katman kaplama üretimi neticesinde bu kaplamaların yapışma mukavemeti gibi mekanik özelliklerinde iyileşmeler meydana geldiği bilinmektedir (Heimann, 2016). HA kaplamaların bağ katman kaplamaya iyi mekanik tutunma ile yapışma mukavemetinin yüksek olması ve TiO₂ bağ katmanın yüksek kırılma tokluğu, elastisite modülü gibi iyi mekanik özellikleri sayesinde, özellikle yanal kuvvetlerin söz konusu olduğu gerilmeler altında çatlak oluşumu ve ilerlemesi azalacak ve böylece kaplamalardan malzeme kaybı azalacaktır. Bu durum da kaplamaların aşınma hızlarının azalmasına sebebiyet verecektir.

Şekil 6'da kaplamalara ait kuru ortamda elde edilen aşınma izlerinin SEM resimleri ve profilometre ölçüm sonuçları verilmiştir. Verilen karakterizasyon sonuçları incelendiğinde aşınma hasarı sonucu en fazla malzeme kaybının tek katman HA kaplamada olduğu görülmektedir. Bu kaplamada yaklaşık 40 µm derinliğinde bir aşınma izi oluşmuş olup, aşınma izinin alanı 28,5 mm² olarak belirlenmiştir.



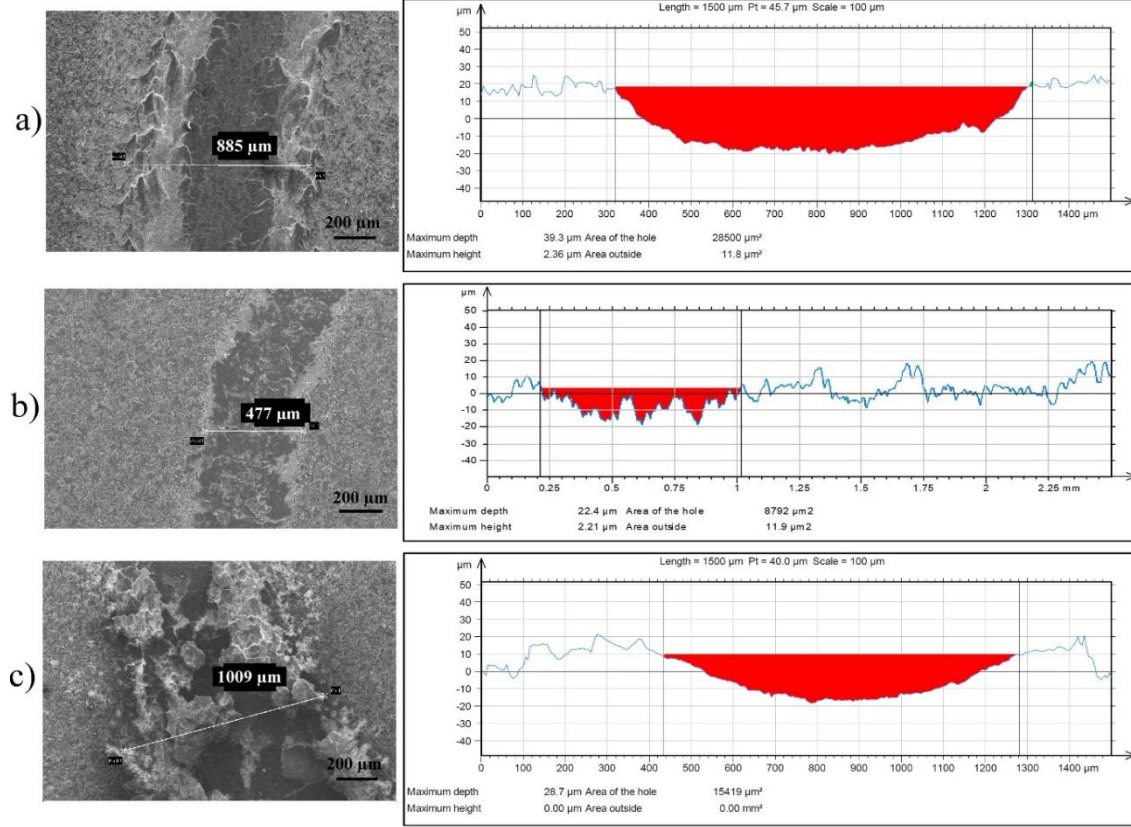
Şekil 5. Kaplamaların kuru ortamda ve SBF ortamında aşınma hızı grafikleri.

En az aşınma hasarı ise TiO₂ esaslı kaplamada meydana gelmiştir ve aşınma iz derinliği 22,4 µm, aşınma izi alanı ise

yaklaşık 8,8 mm² olarak ölçülmüştür. Altlık malzeme ile HA arasında bir ara katman olarak TiO₂ kaplama HA üst

katman kaplamada meydana gelen malzeme kaybını azaltmış ve aşınma izi derinliği 28,7 μm , aşınan bölgenin alanı ise 15,5 mm^2 olarak ölçülmüştür. Tüm

kaplamalar için elde edilen SEM görüntüleri ve profilometre sonuçları kaplamalardan hesaplanan aşınma hızı değerleri ile tutarlı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Kuru ortamda kaplamaların aşınma izlerinin SEM resimleri ve profilometre analizi sonuçları, a) HA, b)TiO₂, c)HA/TiO₂.

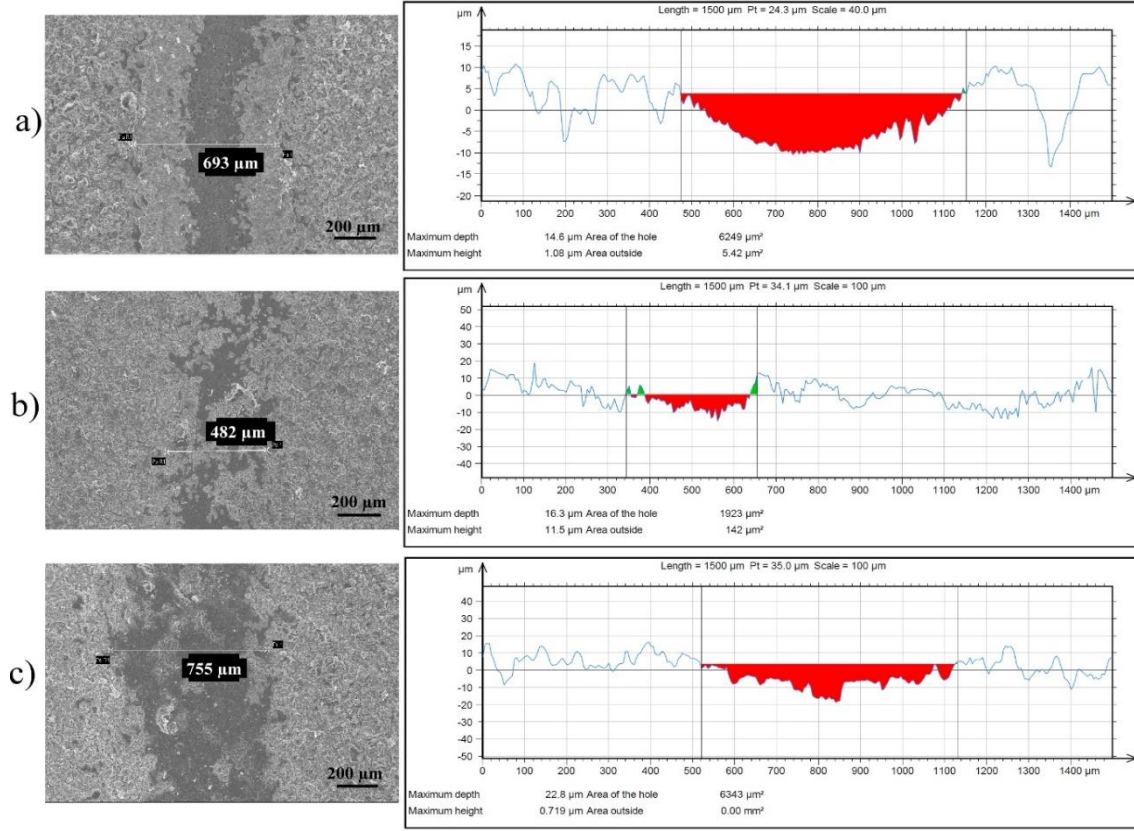
Şekil 7’de ise SBF ortamında yapılan aşınma deneyleri sonucu elde edilen aşınma izlerine ait SEM resimleri ve profilometre ölçüm sonuçları görülmektedir. Elde edilen sonuçlar hesaplanan aşınma hızı değerleri ile karşılaştırıldığında her iki hesaplama ve karakterizasyon sonuçlarının birbiri ile tutarlı olduğu belirlenmiştir. Aşınma izlerinden elde edilen profilometre sonuçlarına göre kuru ortamda olduğu gibi en fazla aşınma hasarının tek katman HA kaplamada meydana geldiği, aşınma derinliğinin yaklaşık 14,5 μm olduğu, aşınan bölgenin alanı ise 6 mm^2 olduğu belirlenmiştir. En az aşınma hasarının meydana geldiği TiO₂ kaplamada ise aşınma izi derinliği 16,5 μm ve aşınma izi

alanı ise yaklaşık olarak 2 mm^2 olarak ölçülmüştür. HA/TiO₂ çift katman kaplamada ise aşınma izi derinliği 23 μm , aşınma izi alanı ise 6,5 mm^2 olarak ölçülmüştür.

Genel olarak elde edilen SEM resimleri profilometre değerleri ve hesaplanan aşınma hızı değerlerinin birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Her iki ortamda da en yüksek aşınma hızı değerine sahip olan HA kaplamada aşınma izi derinliği ve alanı en yüksek değerde olup, aşınma hızı en düşük olan TiO₂ kaplamada aşınma izi derinliği ve aşınma izi alanı en düşük değerlerde ölçülmüştür. HA esaslı biyoseramik kaplama ile altlık malzeme arasına TiO₂ esaslı bir ara katman uygulanması sonucu

ise HA esaslı kaplamaların aşınma dayanımında bir miktar iyileşmeler elde edilmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasında

etkili olan etkenler aşınma hızlarının değerlendirildiği kısımda irdelenmiştir.



Şekil 6. SBF ortamda kaplamaların aşınma izlerinin SEM resimleri ve profilometre analizi sonuçları, a)HA , b)TiO₂, c)HA/TiO₂.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada Ti4Al6V alaşımı üzerine plazma püskürtme yöntemi ile tek katman HA, TiO₂ ve çift katman HA/TiO₂ kaplamalar üretilmiş ve aşınma dayanımları incelenmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde HA kaplamaların zayıf mekanik özellikleri sebebiyle aşınma direncinin çok zayıf olduğu, fakat altlık malzeme ile HA kaplama arasında TiO₂ esaslı bağ katman kaplamanın uygulanması sonucu HA'ın aşınma dayanımında iyileşmeler meydana geldiği anlaşılmıştır. Tek katman TiO₂ kaplama ise en yüksek aşınma direncine sahiptir. Fakat korozyon dayanımı, biyouyumluluk gibi özellikler

düşünülürken, aşınmanın söz konusu olduğu saldırgan ortamlarda HA kaplamaların TiO₂ veya farklı bir bağ katman kaplama ile kullanılmasının daha uygun olduğu kesindir.

5. Kaynaklar

Baptista, R., Gadelha, D., Bandeira, M., Arteiro, D., Delgado, M. I., Ferro, A. C., & Guedes, M. (2016). Characterization of titanium-hydroxyapatite biocomposites processed by dip coating. *Bulletin of Materials Science*, 39(1), 263-272. doi:10.1007/s12034-015-1122-6

Cannillo, V., Lusvarghi, L., & Sola, A. (2008). Production and characterization of plasma-sprayed TiO₂-hydroxyapatite

- functionally graded coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(11), 2161-2169. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2008.02.026
- Chen, C. C., Huang, T. H., Kao, C. T., & Ding, S. J. (2006). Characterization of functionally graded hydroxyapatite/titanium composite coatings plasma-sprayed on Ti alloys. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 78(1), 146-152.
- Chen, F., Lam, W., Lin, C., Qiu, G., Wu, Z., Luk, K., & Lu, W. J. J. o. B. M. R. P. B. A. B. (2007). Biocompatibility of electrophoretical deposition of nanostructured hydroxyapatite coating on roughen titanium surface: in vitro evaluation using mesenchymal stem cells. 82(1), 183-191.
- Farnoush, H., & Rezaei, Z. (2017). Effect of suspension stability on bonding strength and electrochemical behavior of electrophoretically deposited HA-YSZ nanostructured composite coatings. *Ceramics International*, 43(15), 11885-11897. doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.036
- Fathi, M. H., & Doostmohammadi, A. (2009). Bioactive glass nanopowder and bioglass coating for biocompatibility improvement of metallic implant. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1385-1391. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.03.051
- Heimann, R. B. (2016). Plasma-Sprayed Hydroxylapatite-Based Coatings: Chemical, Mechanical, Microstructural, and Biomedical Properties. *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(5), 827-850. doi:10.1007/s11666-016-0421-9
- Karimi, S., Mahzoon, F., Javadpour, S., & Janghorban, K. (2015). Study of wear and corrosion behavior of cathodic plasma electrolytic deposition of zirconia-hydroxyapatite on titanium and 316L stainless steel in Ringer's solution. *International Journal of Materials Research*, 106(6), 614-620. doi:10.3139/146.111229
- Khor, K. A., Li, H., & Cheang, P. (2003). Processing-microstructure-property relations in HVOF sprayed calcium phosphate based bioceramic coatings. *Biomaterials*, 24(13), 2233-2243. doi:10.1016/S0142-9612(03)00027-9
- Khun, N. W., Li, Z., Khor, K. A., & Cizek, J. (2016). Higher in-flight particle velocities enhance in vitro tribological behavior of plasma sprayed hydroxyapatite coatings. *Tribology International*, 103, 496-503. doi:https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.08.006
- Kim, S.-G., Hahn, B.-D., Park, D.-S., Lee, Y.-C., Choi, E.-J., Chae, W.-S., . . . Choi, J.-Y. (2011). Aerosol deposition of hydroxyapatite and 4-hexylresorcinol coatings on titanium alloys for dental implants. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 69(11), e354-e363.
- Li, H., Khor, K. A., & Cheang, P. (2002). Titanium dioxide reinforced hydroxyapatite coatings deposited by high velocity oxy-fuel (HVOF) spray. *Biomaterials*, 23(1), 85-91. doi:Doi 10.1016/S0142-9612(01)00082-5
- Li, Y. H., Yang, C., Zhao, H. D., Qu, S. G., Li, X. Q., & Li, Y. Y. (2014). New Developments of Ti-Based Alloys for Biomedical Applications. *Materials*, 7(3), 1709-1800. doi:10.3390/ma7031709
- Lu, Y. P., Li, M. S., Li, S. T., Wang, Z. G., & Zhu, R. F. (2004). Plasma-sprayed hydroxyapatite plus titania composite bond coat for hydroxyapatite coating on titanium substrate. *Biomaterials*, 25(18), 4393-4403. doi:10.1016/j.biomaterials.2003.10.092
- Mittal, M., Nath, S. K., & Prakash, S. (2013). Improvement in mechanical properties of plasma sprayed hydroxyapatite coatings by Al₂O₃ reinforcement. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological*

Applications, 33(5), 2838-2845.
doi:10.1016/j.msec.2013.03.005

Palanivelu, R., & Kumar, A. R. (2014). Scratch and wear behaviour of plasma sprayed nano ceramics bilayer Al₂O₃-13 wt%TiO₂/hydroxyapatite coated on medical grade titanium substrates in SBF environment. *Applied Surface Science*, 315, 372-379.
doi:10.1016/j.apsusc.2014.07.167

Sola, A., Bellucci, D., & Cannillo, V. (2016). Functionally graded materials for orthopedic applications - an update on design and manufacturing. *Biotechnology Advances*, 34(5), 504-531.
doi:10.1016/j.biotechadv.2015.12.013

Temenoff, J. S., & Mikos, A. G. (2008). *Biomaterials : the intersection of biology and materials science*: Upper Saddle River.

Vilardell, A. M., Cinca, N., Concustell, A., Dosta, S., Cano, I. G., & Guilemany, J. M. (2015). Cold spray as an emerging technology for biocompatible and antibacterial coatings: state of art. *Journal of Materials Science*, 50(13), 4441-4462.
doi:10.1007/s10853-015-9013-1

Zuhailawati, H., Sivakumar, R., Dhindaw, B. K., & Noor, S. N. F. M. (2015). Cold spray deposition of hydroxyapatite powder onto magnesium substrates for biomaterial applications AU - Hasniyati, M. *Surface Engineering*, 31(11), 867-874.
doi:10.1179/1743294415Y.0000000068