

Kalça Protezinin Aşınma Özellikleri Üzerinde Çoklu Tabakalı Kaplanması Etkilerinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Nümerik Analizi

Erkan BAHÇE¹ , A. Kemal ASLAN^{2*} , M. Sami GÜLER³ , Neşe ÇAKIR¹ ,
Ender EMİR¹ 

¹Inönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya

²Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, Tunceli

³Ordu Üniversitesi, TBMYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ordu

(Geliş Tarihi/Recived Date: 22.05.2017; Kabul Tarihi/Accepted Date: 08.10.2017)

Öz

Total kalça protezi uygulamalarında kullanılan metal alaşımlarının kullanım sürelerinin artırılmasına yönelik çalışmalar gelişen tıp ve malzeme teknolojileriyle beraber devam etmektedir. Metal alaşımları vücut sıvısı içerisinde bulunan çeşitli iyonlar, mineraller ve proteinlerle etkileşime girerek korozyon ve metal iyonizasyonuna uğramaktadır. Bunun sonucunda ise polietilen bileşen kullanım ömründen erken aşınmaya maruz kalmaktadır. Kalça protezlerinde kullanılan metal bileşenlerin korozyon dayanımının artırılması ve iyonizasyonun önlenmesi için seramik bileşenlerle kaplanmaktadır. Bu çalışmada kalça protezlerinde yaygın olarak kullanılan metal-polietilen çifti Ti6Al4V-ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen bileşenlerinin aşınma özellikleri incelenmiştir. Metal femur başının çoklu tabakalı kaplanması ve tabaka sayısının polietilen asetabular linerin aşınması üzerindeki etkileri nümerik olarak ANSYS programı yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, metal femur başının çoklu tabakalı kaplanması polietilen bileşeninin aşınma dayanımını artıracakları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kalça Protezi, Bio malzeme, Ti6Al4V, Çoklu tabakalı kaplama, Aşınma, ANSYS

Numerical Analysis of Effect of Multilayer Coating on the Wear Properties of Hip Prosthesis by Finite Element Method

Abstract

Researches on increasing the lifetime of metal alloys used in total hip replacement applications, continue in parallel with developing medicine and material engineering. Metal alloys expose to the corrosion and ionization by interacting with the ions, proteins, and minerals in the body fluid. As a result of this, polyethylene component of the hip prosthesis exposes to early wear. Metal components of the hip prosthesis are coated with ceramic materials in order to avoid metal ionization and enhance the corrosion resistance. In this study, the wear properties of widely used Ti6Al4V-UHMWPE metal-polyethylene couple in the hip prosthesis is investigated. The effect of the coating of metal femoral head and the effect of layer number on the wear of polyethylene acetabular liner is numerically studied by ANSYS software. Results showed that the multilayer coating of metal femoral head will increase the wear resistance of the polyethylene component.

Keywords: Hip; Bio material, Ti6Al4V, Multilayer coating, Wear, ANSYS

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: akaslan@munzur.edu.tr

1.Giriş

Dünya nüfusunda yaşam sürelerinin artması ile birlikte, kalça protezi kullanımı artmakta ve dünya genelinde her yıl ortalama bir milyon üzerinde kalça protezi operasyonu yapılmaktadır (Holzwarth & Cotogno,2012). Uygun cerrahi teknik ve modern protez tasarımları kullanılarak yapılan kalça protezlerinin ömürleri başarılı operasyonlarda günümüzde 15 ile 20 yıl arasındadır.

Protez ömrü; cerrahi hatalar, protezin kişiye göre uyumluluğu, kişinin yaşamındaki hareket sıklığı ve yönleri, malzemedeki aşınma, korozyon direnci, imalat esnasında oluşan form hataları ve malzemenin biyouyumluluğu ve metal iyonizasyonuna bağlı olarak azalmaktadır (Hesketh ve ark., 2013). Protezin ömrü üzerinde, bu faktörlerden metal-metal ve metal-polietilen malzeme çiftinde oluşan metal iyonizasyonu önemli bir etkiye sahiptir (Silva ve ark. 2005). Total kalça protezinde kullanılan metal alaşımları vücut sıvısı içinde metal iyonizasyonuna uğrayarak hem vücutta alerjik reaksiyonlara, hemde metalin korozyona uğrayarak erken aşınmasına neden olmaktadır. Aşınma sonucu ortaya çıkan partiküller kemik implant birleşim bölgesinde dokuların içinde ve çevresinde birikerek zamanla osteolize neden olmakta ve bunun sonucunda implant gevşemektedir. Metal iyonizasyonu ve korozyondan kaynaklanan bu tür sorunların giderilmesi için implantlarda kullanılan metal ve alaşımları seramik malzemelerle kaplanmaktadır (Rahaman ve ark., 2007).

Kalça protezlerinde metal malzemeler olarak paslanmaz çelik ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, CoCr ve alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır (Mckee ve ark., 1996; Long&Rack, 1998). İfade edilen bu metallerin aşınma ve korozyon dayanımlarını artırmak, metal iyonizasyonunu indirmek için yüzeyleri seramik ince filmlerle kaplamalar uygulanmaktadır (Rahaman ve ark., 2007 ; McEntire ve ark., 2015). Ayrıca femur bileşeninde biyouyumluluk ve yüksek aşınma direncine sahip olan TiN, CrN, elmas benzeri karbon (DLC) kaplama gibi nitrürlü seramik kaplamalarda uygulanmaktadır (Cui ve ark., 2017; Gilewicz ve ark., 2016). Son zamanlarda özellikle metal iyonizasyonunu önlemek, bununla beraber metal bileşenlerin korozyon direncini artırmak ve implant bileşenlerinin temas halinde olan parçalarının aşınma dayanımını artırmak için çok daha düşük sürtünme katsayıları veren nitrürlü ve çok tabakalı kaplamalar üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Ortega-Saenz ve ark. CoCr femur başı kalça protezine tabakalı TiN / CrN bilayerına sahip 3 periyotlu , CrN tek katmanlı ve DLC (elmas benzeri karbon) tek katmanlı kaplama olmak üzere 3 ayrı şekilde çok katmanlı kaplamaları PVD kaplama yöntemiyle uygulamışlardır. Çalışmaları sonucunda kaplanmış femur başının aşınma oranının kaplanmamışa göre, DLC kaplamayla 5 kat, TiN/CrN kaplamayla 28 kat ve CrN kaplamayla 55 kat azaldığını tespit etmişlerdir (Ortega-Saenz ve ark., 2013).

Khanna ve ark. Ti6Al4V alaşımı üzerine Al-metal tozlarını N₂ atmosferinde soğuk püskürtme ile biriktirme yöntemiyle kaplama yapmışlardır. Bu çalışma ile geliştirilen yeni yoğun ve sert α -alumina/Ti alaşımının, yapay kalça eklemine güvenilir yatak yüzeylerini üretmek için potansiyel olarak kullanılabilirliğini belirlemişlerdir (Khanna ve ark., 2015). Yine Khanna ve ark. bir diğer çalışmalarında kalça protez rulmanlarının

yüzeylerinin iyileştirilmesi amacıyla yüksek tokluğa sahip Ti-6Al-4V alaşımı üzerine yoğun ince bir α -alumina tabakası kaplayarak, α -alumina /Ti, hibrid alaşımı tasarlamışlardır. Al metaline ısı işlemleri uygulandıktan sonra soğuk püskürtme ile femur başını yapışkan özelliği gösterecek şekilde α -alumina tabakasıyla kaplamışlardır. Bu kaplamayı, seramik-seramik tipi çimentosuz yapay kalça eklemine yatak yüzeyleri olarak potansiyel kullanımı için geliştirmişlerdir (Khanna ve ark. 2016).

Good ve ark. düşük kırılma riski ve mükemmel abrasif aşınma direnci sağlayan, oksidasyon işlemiyle yüzeyi seramiğe dönüştürerek, OxZr (oksitlenmiş zirkonyum) metali ile kalça protezi üretmişlerdir. Ürettikleri bu kalça protezi ile CoCr kalça protezine testler uygulamışlar ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu testlerin sonucunda, OxZr kalça protezinin daha fazla aşınma direnci gösterdiğini ve daha uzun kullanım ömrü sağladığını belirlemişlerdir (Good ve ark., 2005).

Bal ve ark. kalça implantlarının aşınma özelliğini azaltmak amacıyla Al_2O_3 femur başı ve asetabular yuva, Co-Cr femur başı ve Si_3N_4 asetabular yuva üreterek farklı kombinler şeklinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kalça simülasyonu ile yapılan testler sonucu Si_3N_4 bileşeninin Al_2O_3 bileşenine göre daha iyi bir kırılma tokluğu gösterdiği görülmüştür. CoCr alaşımının femur başı olarak ve Si_3N_4 'ün asetabular yuva olarak seçildiği kombinasyon yatak aşınmasının azaltılmasına yardımcı olmuştur (Bal ve ark., 2008).

Perumal ve ark. ortopedik implantlarda biouyumluluk açısından çok tercih edilen Ti elementine Al_2O_3 , %8 İtiryum stabilize edilmiş zirconia (8YSZ), ağırlıkça %40 Al_2O_3 - ve %8 YSZ katkılı olarak üç ayrı plazma püskürtmeyle kaplama yapmışlar ve yaptıkları kaplamaların aşınma direncini belirlemek için testler yapmışlardır. Testler sonucunda en yüksek aşınma direncini ağırlıkça %40 Al_2O_3 - ve %8 YSZ gösterdiğini belirlemişlerdir (Perumal ve ark., 2014).

Bunun yanında günümüzde, belirli koşullar altında malzeme davranışlarını belirlemek amacıyla birçok çalışmalar yapılmaktadır ve bu çalışmalar içinde ANSYS analizleri deneysel işlemlere göre daha az maliyet ve zaman sunmaktadır. Özellikle biyomedikal anlamda canlı üzerinde veya laboratuvarında deneyler yapılmak yerine gerçeğe yakın değerler sunan ANSYS analizleri daha çok tercih edilmektedirler (Taylor&Prendergast, 2015). Artroplasti alanında kullanılan implant malzemelerinin belirli yükler altında statik ve dinamik analizleri yapılarak aşınma özelliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelendiği birçok çalışmalar yapılmıştır (Pakhaliuk ve ark., 2015; Zameer & Haneef, 2015; Lin ve ark., 2016). Bu konu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde ise;

Pakhaliuk ve ark. kalça protezlerinde kullanılan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) malzemeli asetabular liner ile seramik veya metal malzemeli femur başı kombinasyonlarını ANSYS ile modellemişler ve belirli koşullar altında analizi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda elde ettikleri aşınma miktarlarıyla ve matematiksel olarak hesaplanmış aşınma miktarları karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir (Pakhaliuk ve ark., 2015).

Zhang ve ark. Total diz protezlerinde insert aşınmasını belirlemek için femur insert eklemine ANSYS ile modellemişlerdir. Modellemeye belirli yükler uygulayarak elde

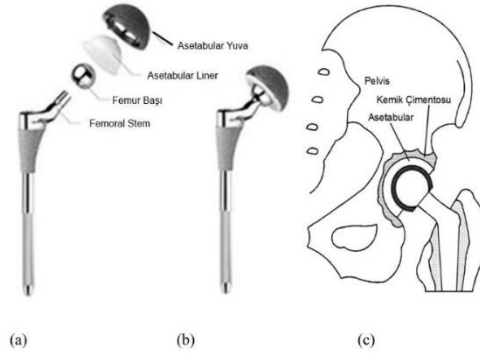
ettikleri sonuçları, matematiksel olarak hesaplanmış aşınma sonuçlarıyla karşılaştırarak modelin ve analizlerinin doğruluğunu kanıtlamışlardır (Zhang ve ark., 2017).

Bu çalışmada ise kalça protezlerinde metal-polietilen çifti olarak kullanılan Ti6Al4V-ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen bileşenlerinin aşınma özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı; bu kalça protezi çiftine değişen katman sayılarında ve periyotlarda nitrür bileşikli seramik kaplamalar yapılarak, kaplamaların polietilenin aşınma özellikleri üzerine etkilerinin sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programında analiz edilmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Total kalça artroplastisi (TKA) bileşenleri; (uyluk kemiği) femura sabitlenen stem, stem ucuna takılan doğal kemikteki femur başının yerini alan femur kafası, karşı tarafta ise femur kafasının içine girdiği asetabular liner bileşeni ve bu linere yataklık yapan kalça kemiğine çimentolu ya da çimentosuz sabitlenmiş asetabular bileşen olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. Bu bileşenlerin tek tek ve eklemlenmiş hali Şekil 1. 'de verilmiştir.



Şekil 1: Kalça Protezi bileşenleri a) Patlatılmış görüntüsü b) Montaj görüntüsü c) Eklemlenmiş görüntü
Figure 1: Components of hip prosthesis a) Exploded b) Assembled c) Jointed image

Bu çalışmada, asetabular bileşen malzemesi olarak ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kullanıldı. Femur başının, kaplamasız, tek tabakalı, çok tabakalı kaplanması ve çok tabakalı kaplamaların periyotlarının değiştirilmesi durumunda aşınma üzerindeki etkileri analitik olarak incelenmiştir. Analizlerde kullanılan total kalça implantı bileşenlerinin malzemeleri olarak Ti6Al4V alaşımı femur bileşeniyle ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen asetabular liner, yapılan literatür incelemelerine dayanarak uygulamada ki kullanım yaygınlıkları da dikkate alınarak seçilmiştir. Femur başı bileşenin tek tabakalı ve çok tabakalı kaplanmasında malzeme seçimi için ise literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak yüksek aşınma direnci ve iyi korozyon dayanımı gibi özelliklerinden dolayı CrN ve TiN malzemeleri seçilmiştir (Li ve ark., 2006; Okumiya &

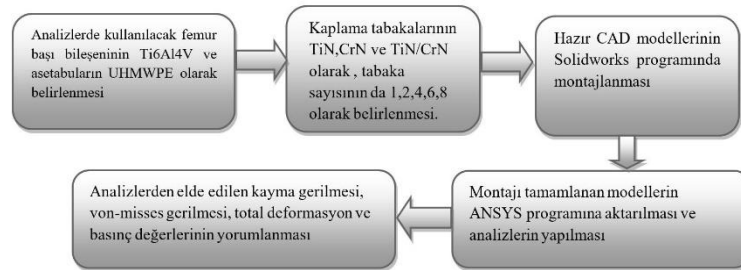
Griepentrog, 1999; Holleck&Schier,1995; Z.G. Zhang ve ark., 2009; Aihua ve ark., 2012; Hübler ve ark., 2001). TiN/CrN ve CrN/TiN periyodu ise, bu periyotla yapılan çok tabakalı kaplamalarda yüksek aşınma direnci ve yüksek sertliğinden dolayı tercih edilmiştir (Ou ve ark., 2016; Huang ve ark., 2013; Ou ve ark., 2015; Gallegos-Cantú ve ark., 2015). Analizlerde kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1: Analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri (Davim, 2013; Fahrenheitz,2014)
Chart 1: Mechanical Properties of materials which were used in the analyzes (Davim, 2013; Fahrenheitz,2014)

Malzeme	Young Modülü(Gpa)	Poisson oranı
Ti6Al4V	110	0.342
TiN	590	0.25
CrN	290	0.22
UHMWPE	69	0.29

2.2 Metot

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımından yapılmış femur başı ile eklenmiş ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen malzemesinden yapılmış asetabular bileşenin aşınması, sonlu elemanlar metoduyla yapısal analizi gerçekleştirilerek, kaplamaların aşınmaya etkilerinin nümerik analizi ANSYS ile araştırıldı. Çalışmanın organizasyon şeması Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2: Çalışmanın akış şeması
Figure 2: Flowchart of the study

Ticari bir firmadan alınan analizlerde kullanılan femur- asetabular bileşenlerinin CAD modelleri Solidworks programına taşınarak burada montaj ilişkileri tanımlandı. Ardından elde edilen montajlı model ANSYS 2016 programının Workbench arayüzüne

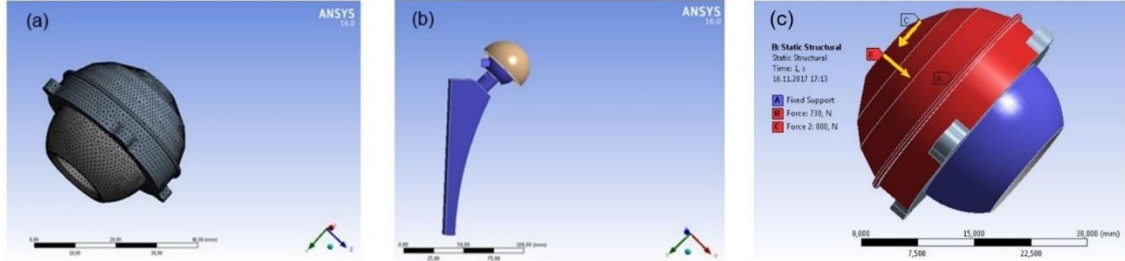
yüklenildi. Ansys programında, kaplama analizlerinin yapılabilmesi amacıyla ACP (ANSYS Composite PrepPost) kompozit arayüzü kullanılarak, femur başı bileşeni üzerine belirli kalınlıklarda ve tabaka sayılarında katmanlama yoluyla kaplama yapıldı. Analizler için malzeme seçiminde izotropik malzeme seçimi yapılarak tüm kaplama tabakaları da dahil tüm malzemeler için bir elastikiyet modülü değeri ve poisson oranı kullanıldı. Daha sonra model programın Static Structural ara yüzüne aktarılıp burada 1 mm boyutunda meshleme işlemi yapıldı ve sabitleme noktaları belirlendi. Meşleme metodu polietilen bileşen için tetrahedrons, kaplanan parça için ise triangels metoduyla iki parçaya da farklı metotlarda iki farklı tipte meşleme yapıldı. İşlem sonucunda 67964 element sayısında, 101526 düğüm noktası oluşturularak analizler gerçekleştirildi. Şekil 3a.'da meshlemenin ekran görüntüsü Şekil 3b' de ise montajlanmış halde sabitleme noktalarının ekran görüntüleri verilmiştir. Analizler için asetabular bileşenden femur bileşenine doğru Y ekseninde aksenal olarak ISO 14242-2 standartına uygun olarak 800 N değerinde statik kuvvet uygulandı kuvvetin uygulanması şekil 3c'de görülebilmektedir.

Uygulanan statik kuvvet altında asetabular bileşende meydana gelen kontak basıncı, kayma gerilmesi, Von-Mises gerilme değerleri ve toplam deformasyon değerleri elde edilerek; kaplama ve kaplama tabaka sırası ve sayılarının bu dört ayrı değere etkileri incelenilmiştir. Kaplamasız, TiN kaplamalı, CrN kaplamalı femur başlarının polietilen bileşende oluşturduğu yapısal özelliklerinin analiz sonuçları sırasıyla A1, A2, A3 olarak kodlanmıştır. Çok tabakalı kaplamalı TiN/CrN serilerinden oluşan femur bileşenlerinin polietilene etkilerinin analiz sonuçları periyot numaralarına göre B1, B2, B3 ve B4 olarak

Çizelge 2: Analiz kodları ve kaplama özellikleri
Chart 2: Codes of the Analyzes and properties of the coatings

Kod	Kaplama Malzemesi	Kaplama kalınlığı(μm)	Kaplamanın periyodu
A1	Kaplamasız	-	-
A2	TiN	4	-
A3	CrN	4	-
B1	TiN/CrN	2/2	1
B2	TiN/CrN	1/1	2
B3	TiN/CrN	0.66/0.66	3
B4	TiN/CrN	0.5/0.5	4
C1	CrN/TiN	2/2	1
C2	CrN/TiN	1/1	2
C3	CrN/TiN	0.66/0.66	3
C4	CrN/TiN	0.5/0.5	4

kodlanmışken, kaplama dizini sırası değiştirilerek elde edilen CrN/TiN kaplamalarının periyotlarına göre polietilende oluşan analiz sonuçları ise C1, C2, C3 ve C4 olarak kodlanmıştır. Çizelge 2.'de analiz kodlamaları, malzemeleri, kalınlık ve periyotları görülmektedir.



Şekil 3: Modelin a) meşlenmiş b) sabitlenmiş montajlanmış ekran görüntüsü c) Kuvvetlerin uygulanması
Figure 3: a) meshed b) fixed and assembled, screen image of the model c) Applying the forces

3. Bulgular ve Tartışmalar

3.1. Kayma gerilmesi

Analizler sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir. Femur başının kaplanmadığı A1 analizi için ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilende meydana gelen kayma gerilmesi değeri 2.902 MPa olarak hesaplanmıştır. TiN kaplamalı A2 analizinde bu değer 0.879 MPa iken, CrN kaplamalı A3 için ise bu değer 0.942 MPa olarak elde edilmiştir. Kayma gerilmesi değerlerinin, A1 analizinden elde edilen sonuca kıyasla; tek tabaka kaplamalı A2 analizinde yaklaşık % 69 oranında , A3 analizinde ise yaklaşık %67 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3: Kayma gerilmeleri analizleri sonuçları
Chart 3: Results of Shear Stress Analyzes

Analiz	Kayma Gerilmesi (Mpa)	Analiz	Kayma Gerilmesi (Mpa)	Analiz	Kayma Gerilmesi (Mpa)
A1	2,9029	B1	0,92042	C1	0,88114
A2	0,87968	B2	0,62671	C2	0,84967
A3	0,94251	B3	0,60433	C3	0,58665
		B4	0,85467	C4	0,8182

Polietilenin, TiN/CrN kaplama sırasına sahip femur başı bileşeniyle etkileşimde olduğu B serisi numunelerinde kayma gerilmeleri değerleri B1, B2, B3 ve B4 analizleri için sırasıyla 0.920 MPa, 0.626 MPa, 0.604 MPa ve 0.854 MPa olarak hesaplanmıştır. Periyot sayısının 3 'ün üzerine çıkması durumunda sabit toplam kalınlıkta kayma gerilme değerinin tekrar artmaya başladığı görülmüştür.

CrN/TiN kaplama sırasına ait serisi numunelerde ise bu değerler yine C1, C2, C3, C4 analizleri için sırasıyla 0.881 MPa, 0.849 MPa, 0.586 MPa ve 0.818 MPa olarak hesaplanmıştır. Kullanılan kaplama nitrürlerinin sırası değiştirildiğinde de polietilende meydana gelen kayma gerilme değerlerinin kaplamasız femur başlı bileşenli polietilenin kayma gerilmesi değerine göre belirgin biçimde düştüğü görülmüştür.

B ve C serileri için kayma gerilmeleri değerleri karşılaştırıldığında, aynı tabaka sayısına sahip numuneler arasında 2 numaralı numuneler dışında CrN/TiN dizilimli C grubunun kayma gerilmesi değerlerinin daha düşük çıktığı görülmektedir.

Yapılan kayma gerilmeleri analizleri sonucunda kaplama yapılmasının ve kaplama tabaka sayısının belli oranda artırılmasının polietilen bileşende oluşan kayma gerilmesi değerlerini belirgin oranlarda düşürdüğü görülmüştür. Analizler incelendiğinde, B ve C serilerinin her ikisinde de kaplama tabaka sayısının 6 olduğu durumda en düşük kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir.

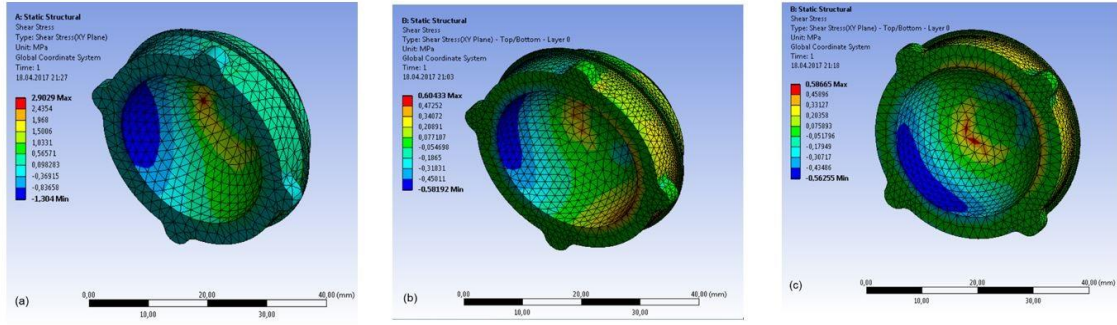
3.2. Von-Mises Gerilmeleri

Analizlerde elde edilen von-Mises gerilmeleri bu bölümde incelenmiş ve analizlerin sonuçları Çizelge 4. 'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kaplama yapılmamış femur başı ile eklemli polietilenin analizi A1 için elde edilen von-Mises eşdeğer gerilme değeri 6,593 MPa' dır. Tek tabaka TiN kaplamalı femur başı ile eklemli A2 için 1.866 MPa değerinde iken CrN kaplamalı A3 analizinde ise bu değer 1.999 MPa olarak hesaplanmıştır. Femur başına kaplama yapılmasıyla von-Mises değerlerinin kaplamasız duruma göre A2 için % 71 oranında, A3 için ise % 69 oranında düştüğü görülmüştür.

Çizelge 4: Von-Mises gerilmeleri analiz sonuçları
Chart 4: Results of Von-Mises Stress analyzes

Analiz	Von – Mises (MPa)	Analiz	Von – Mises (MPa)	Analiz	Von – Misses (MPa)
A1	6,593	B1	1,866	C1	1,866
A2	1,866	B2	1,781	C2	1,799
A3	1,999	B3	1,718	C3	1,755
		B4	1,733	C4	1,732

Analizlerde polietilen bileşenlerde meydana gelen von-Mises eşdeğer gerilmelerinin ekran görüntüleri Şekil 4.' te verilmiştir. Şekiller incelendiğinde A1 numunesinde meydana gelen eşdeğer gerilme yuvarının iç kısmında belirli bir bölgede yoğunlaşmışken, kaplamanın etkisiyle diğer iki analizde de %70 oranlarında düşen değerlerle birlikte eşdeğer gerilme yuvarının içerisinde daha yayılı bir hal almış olup, maksimum değerler aldığı bölgelerin ise asetabular linerin tam çapı boyunca iç kısımlarında düzenli bir şekilde yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 4: von-Mises Gerilme Analizi Ekran Görüntüleri a) A1 b) A2 c) A3
Figure 4: Screen images of von-Mises Stress Analyze of a) A1 b) A2 c) A3

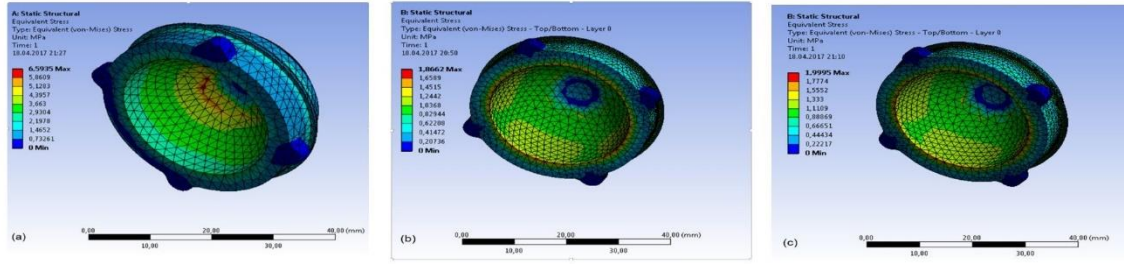
B serisi analizlerin sonuçları incelendiğinde, kaplamasız femurla eklemli A1 numunesine göre sıra ile B1, B2, B3 ve B4 için Von-Mises gerilmesi değerleri yaklaşık olarak %71, %73, %74 ve %73,5 oranlarında düştüğü belirlenmiştir. B serisi analiz sonuçları kendi içinde değerlendirildiğinde ise Von-Mises eşdeğer gerilme değerlerinin artan tabaka sayısı ile beraber 6 tabakaya kadar azaldığı görülmektedir. CrN/TiN kaplama periyotlu analizlerin olduğu C serisi numunelerde ise artan tabaka sayısına paralel olarak gerilme değerleri azalmıştır.

B serisi için en düşük von-Mises değeri 1,7181 MPa ile B3 analizinde elde edilirken C serisi için ise 1,7329 MPa değeriyle C4’ de elde edilmiştir. B ve C serileri karşılaştırıldığında ise elde edilen eşdeğer gerilme sonuçlarının aynı numaralı numuneler için çok yakın değerler olduğu gözle çarpılmaktadır.

3.3. Toplam Deformasyon

Analiz sonuçları incelendiğinde, A1 analizinde polietilen bileşende meydana gelen toplam deformasyon miktarı 3,976 µm olarak hesaplanmışken, A2 analizi sonucunda bu değer kaplamanın etkisiyle %57 oranında azaldığı görülmüş olup benzer şekilde A3 analizinde CrN tek tabakalı kaplamalı femur başıyla eklemli polietilenin deformasyon oranı da %68 azaldığı görülmektedir.

Şekil 5. ‘ de analizlerde elde edilen deformasyon sonuçlarının ANSYS ekran görüntüleri verilmiştir. A1 analizinde deformasyon bölgeleri yuvanın orta kısmından içeri doğru yayılmışken kaplama yapılmasının etkisiyle deformasyon yayılımı özellikle polietilen linerin çevresini saran kemer çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Deformasyonların bu bölgede yoğunlaşması burada kullanılan kemer sayesinde deformasyonların önlenmesini sağlayacaktır.



Şekil 5: Deformasyon analizi ekran görüntüleri a) A1 b) A2 c) A3
Figure 5: Screen images of total deformation analyzes of a) A1 b) A2 c) A3

Çoklu tabakalı kaplamalı B grubunun sonuçları incelenildiğinde; TiN/CrN kaplamalı femur başıyla eklemli polietilenin analizi B1’de deformasyon oranı 1,691 μm iken, bu değer B2 için 1,437 μm , B3 için 1,386 μm ve B4 için ise 1,57 μm olarak hesaplanmıştır. Kaplama bileşenini ve toplam kalınlığını değiştirmeden tabaka sayısını değiştirmiş altı tabakalı kaplamaya kadar deformasyon oranının belirgin bir şekilde düştüğü, bundan sonraki sekiz tabakalı kaplamada ise bu oranın tekrar yükselmeye başladığı görülmüştür. Kaplamasız femur başının polietilen bileşende meydana getirdiği deformasyon oranı ile karşılaştırıldığında ise ciddi bir düşüşün olduğu görülmüştür.

C serisi için elde edilen deformasyon oranları incelendiğinde; B serisinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde artan tabaka sayısı ile beraber 6 tabakaya kadar deformasyon miktarları azalmakta ve tabaka sayısı 8 olduğunda ise tekrar deformasyon miktarlarının artmakta olduğu görülmektedir. Bunun dışındaki serilerde çok fazla bir farkın olmadığı görülmüştür. Kaplama bileşenlerinin sırasının değiştirilmesi halinde de deformasyon oranının kaplamasız femur başına göre belirgin bir oranda düştüğü görülmüştür. En düşük deformasyon oranlarının elde edildiği B3 ve C3 analizlerinin sonuçları birbirine oldukça yakın değerlerde bulunmuştur. Analizlerden elde edilen toplam deformasyon oranları sonuçları Çizelge 5. de verilmiştir.

Çizelge 5: Toplam deformasyon analizi sonuçları
Chart 5: Results of the total deformation analyzes

Analiz	Toplam Deformasyon (μm)	Analiz	Toplam Deformasyon (μm)	Analiz	Toplam Deformasyon (μm)
A1	3,976	B1	1,691	C1	1,699
A2	1,691	B2	1,437	C2	1,63
A3	1,812	B3	1,386	C3	1,353
		B4	1,57	C4	1,57

3.4. Basınç

Aşınma mekanizmasında etkili olan diğer bir parametre femur ile asetabular ara yüzündeki temas basıncıdır. Bu basınç değerinin artması durumunda UHMWPE ‘de aşınma derinliği ve sürtünme kuvvetleri artacağından yaptığımız analizlerde oluşan basınç değerlerinin aşınma üzerindeki etkisi bu başlıkta incelenmiştir. Analizler sonucu elde edilen kontak basınç değerleri Çizelge 6.’da verilmiştir.

Çizelge 6: Kontak basıncı analizi sonuçları
Chart 6: Results of contact pressure analyzes

Analiz	Basıncı (MPa)	Analiz	Basıncı (MPa)	Analiz	Basıncı (MPa)
A1	4.593	B1	2.886	C1	2.862
A2	2.873	B2	2.863	C2	2.760
A3	3.078	B3	2.760	C3	2.826
		B4	2.680	C4	2.658

Kontak basınçları incelendiğinde kaplamasız femur başı A1 için basınç değeri 4.593 MPa olarak hesaplanmıştır. Kaplama yapılan A2 'de basınç değeri 2.873 MPa iken A3 'de bu değer 3.078 MPa olarak hesaplanmıştır.

B serisi için elde edilen sonuçlara bakıldığında zaman çizelge de görüleceği üzere tabaka sayısı arttıkça polietilende oluşan basıncında azaldığı görülmüştür. C serisi için elde edilen değerler incelendiğinde ise; en iyi basınç değerinin kaplama sayısının sekiz olduğunda elde edildiği diğer kaplama sayılarında ise genel bir yargıya ulaşılamadığı görülmüştür.

4.Sonuç

Bu çalışmada kalça protezlerinde kullanılan metal-polietilen çiftinde metal femur başına sabit kaplama kalınlığında kaplama yapılması ve kaplama periyotlarının değiştirilmesi ile polietilen bileşende zamanla oluşan aşınmayı etkileyen faktörler sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programında incelenmiştir.

Kontak basıncı analiz sonuçlarına bakılarak, kaplama yapılmasıyla düşen basınç değerlerinin birbiriyle temas halinde olan parçalar arasında sürtünme kuvvetlerini azaltacağından polietilen bileşende meydana gelecek aşınma hızını azaltacağı düşünülmektedir. Tabaka sayısının basınca etkileri, TiN/CrN periyotlu B serisinde artan tabaka sayısına ters orantılı olarak basıncın azaldığı ve böylelikle aşınma hızını görece düşük miktarlarda azaltacağı düşünülmektedir. CrN/TiN periyotlu seri için ise 6 tabakalı kaplama dışında benzer yorum yapılabilir. Lucia Mendizabal ve ark. saf Titanyum altlık malzemeler üzerine tekli ve çoklu tabakalı TaN kaplamaları HPPMS (Yüksek güçlü puls manyetik sıçratma) fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle kaplama yaptıkları çalışma sonucunda; tribokorozyon testlerinde malzeme kaybını saf titanyum için 0,4 mm³ iken çoklu tabakalı TaN kaplamalı numunede 1,55x10⁻³ mm³ ' e kadar düştüğünü tespit etmişlerdir (Mendizabal ve ark., 2015). Analizlerde elde edilen sonuçlar literatürde yapılmış çoklu tabakalı kaplama çalışmalarında elde edilen sonuçlarla tutarlılık göstermektedir (Hübler ve ark. 2001; Li ve ark., 2006).

Polietilen bileşende meydana gelen maksimum kayma gerilme analizleri sonuçları incelendiğinde, kaplama yapılmasının kayma gerilmelerini belirgin biçimde düşürdüğü görülmüştür. Kaplama tabaka sayısının ise analizlerden elde edilen sonuçlara göre 6 seçilmesi durumunda en düşük kayma gerilme değerleri verdiği görüldü. Maksimum kayma gerilmesi değerleri aşıldıktan sonra malzemede plastik şekil değişimi başladığından ve aşınma da bir tür plastik şekil değişimi olduğundan, çalışmada seçili

malzeme çiftinde femur başına kaplama yapılmasının polietilenin aşınma ömrünü artıracakı düşünölmektedir. Ortega Saenz ve arkadaşlarının bu kaplama periyoduyla yaptıkları çalışma sonucunda CoCr alaşımı altlık malzemenin aşınma dayanımının 28 kat azaldığını tespit etmiş olmaları bu bulguları destekler niteliktedir. Von-Mises gerilme analizleri ve toplam deformasyon analizi sonuçlarında bu gözlemleri desteklemektedir.

Çalışma sonucunda;

*Yapılan nümerik analizlerin sonuçlarına dayanarak, total kalça protezlerinde kullanılan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenle eklemli Ti6Al4V femur başı bileşenine kaplama yapılmasının polietilen aşınma hızını azaltacağı, elde edilen verilere dayanarak öngörülmektedir

*Kaplama bileşenlerinin sırasının değıştirilmesinin (TiN/CrN veya CrN/TiN şeklinde) tek tabakalı kaplamada aşınma üzerinde belirgin bir etki yaratmayacağı düşünölmektedir

*Çoklu tabakalı kaplama yapılmasının ise, analiz sonuçlarına dayanarak hem TiN/CrN ve hem de CrN/TiN serilerinde optimum 6 tabaka sayısında en iyi aşınma özellikleri sağlayacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

1. Aihua L, Jianxin D, Haibing C, Yangyang C & Jun Z (2012). Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 31: 82–88
2. Bal B S, Khandkar A, Lakshminarayanan R, Clarke I, Hoffman A A & Rahaman M N (2008). Testing of silicon nitride ceramic bearings for total hip arthroplasty. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 87(2): 447-454
3. Cui W, Qin G, Duan J & Wang H (2017). A graded nano-TiN coating on biomedical Ti alloy: Low friction coefficient, good bonding and biocompatibility. *Materials Science and Engineering: C* 71: 520-528
4. Davim J P (2013). *Biomaterials and Medical Tribology*. Woodhead Publishing, UK
5. Fahrenholtz W G, Wuchina E J, Lee W E & Zhaou Y (2014). *Ultra-High Temperature Ceramics Materials for Extreme Environment Applications*. John Wiley & Sons, New Jersey
6. Gallegos-Cantú S, Hernandez-Rodriguez M A L, Garcia-Sanchez E, Juarez-Hernandez A, Hernandez-Sandoval J & Cue-Sampedro R (2015). Tribological study of TiN monolayer and TiN/CrN (multilayer and superlattice) onCo–Cr alloy. *Wear* 330-331: 439–447
7. Gilewicz A, Chmielewska P, Murzynski D, Dobruchowska E & Warcholinski B (2016). Corrosion resistance of CrN and CrCN/CrN coatings deposited using cathodic arc evaporation in Ringer's and Hank's solutions. *Surface and Coatings Technology* 299: 7-14

8. Good V, Widding K, Hunter G & Heuer D (2005). Oxidized zirconium: a potentially longer lasting hip implant. *Materials & Design* 26 (7) : 618-622
9. Hesketh J, Meng Q, Dowson D & Neville A (2013). Biotribocorrosion of metal-on-metal hip replacements: How surface degradation can influence metal ion formation. *Tribology International* 65: 128-137
10. Holleck H, Schier V (1995). Multilayer PVD coatings for wear protection. *Surface and Coatings Technology* 76-77: 328-336
11. Holzwarth U & Cotogno G (2012). Total hip arthroplasty- State of the Art, Challenges and Prospects, Publications Office of the European Union
12. Huang M D, Liu Y, Meng F Y, Tong L N & Li P (2013). Thick CrN/TiN multilayers deposited by arc ion plating. *Vacuum* 89: 101-104
13. Hübler R, Cozza A, Marcondes T L, Souza R B & Fiori F F (2001). Wear and corrosion protection of 316-L femoral implants by deposition of thin films. *Surface and Coatings Technology* 142-144: 1078-1083
14. Khanna R, Kokubo T, Matsushita T, Nomura Y, Nose N, Oomori Y & Takadama H (2015). Novel artificial hip joint: A layer of alumina on Ti-6Al-4V alloy formed by micro-arc oxidation. *Materials Science and Engineering: C*, 55: 393-400
15. Khanna R, Kokubo T, Matsushita T & Takadama H (2016). Fabrication of dense α -alumina layer on Ti-6Al-4V alloy hybrid for bearing surfaces of artificial hip joint. *Materials Science and Engineering: C* 69: 1229-1239
16. Li D.J., Liu F, Wang M X, Zhang J J & Liu Q X (2006). Structural and mechanical properties of multilayered gradient CrN/ZrN coatings. *Thin Solid Films* 506– 507: 202 – 206
17. Lin Y T, Wu J S S & Chen J H (2016). The study of wear behaviours on abducted hip joint prostheses by an alternate finite element approach. *Computer methods and programs in biomedicine* 131: 143-155
18. Long M & Rack, H J (1998). Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective. *Biomaterials* 19 (18): 1621-1639
19. McEntire B J, Bal B S, Rahaman M N, Chevalier J & Pezzotti G (2015). Ceramics and ceramic coatings in orthopaedics. *Journal of the European Ceramic Society* 35 (16): 4327-4369
20. Mckee GK & Ferrar J. W J (1996). Bone Jt. Surg, 48: 245
21. Mendizabal L., Lopez A., Bayón R., Herrero-Fernandez P., Javier Barriga J., Javier J. Gonzalez J.J. (2016). Tribocorrosion response in biological environments of multilayer TaN films deposited by HPPMS. *Surface and Coatings Technology* 295: 60-69.
22. Ortega-Saenz J A, Alvarez-Vera M & Hernandez-Rodriguez M A L (2013). Biotribological study of multilayer coated metal-on-metal hip prostheses in a hip joint simulator. *Wear* 301(1) : 234-242

23. Okumiya M & Griepentrog M (1999). Mechanical properties and tribological behavior of TiN–CrAlN and CrN–CrAlN multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology* 112: 123–128
24. Ou Y X , Lin J, Che H L, Moore J J, Sproul W D & Lei M K (2015). Mechanical and tribological properties of CrN/TiN superlattice coatings deposited by a combination of arc-free deep oscillation magnetron sputtering with pulsed dc magnetron sputtering. *Thin Solid Films* 594:147–155
25. Ou Y X, Lin J, Tonga S, Sproul W D & Lei M K (2016). Structure, adhesion and corrosion behavior of CrN/TiN superlattice coatings deposited by the combined deep oscillation magnetron sputtering and pulsed dc magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology* 293: 21–27
26. Pakhaliuk V, Polyakov A, Kalinin M & Kramar V (2015). Improving the Finite Element Simulation of Wear of Total Hip Prosthesis' Spherical Joint with the Polymeric Component. *Procedia Engineering* 100: 539-548
27. Perumal G, Geetha M, Asokamani R & Alagumurthi N (2014). Wear studies on plasma sprayed Al₂O₃–40wt% 8YSZ composite ceramic coating on Ti–6Al–4V alloy used for biomedical applications. *Wear* 311(1): 101-113
28. Rahaman M N, Yao A, Bal B S, Garino J P & Ries M D (2007). Ceramics for prosthetic hip and knee joint replacement. *Journal of the American Ceramic Society* 90(7): 1965-1988
29. Silva M, Heisel C & Schmalzried T P (2005). Metal-on-metal total hip replacement. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 430: 53-61
30. Taylor M & Prendergast P J (2015). Four decades of finite element analysis of orthopaedic devices: where are we now and what are the opportunities?. *Journal of biomechanics* 48(5): 767-778
31. Zameer S, & Haneef M (2015). Fatigue Life Estimation of Artificial Hip Joint Model Using Finite Element Method. *Materials Today: Proceedings* 2(4-5): 2137-2145
32. Zhang J, Chen Z, Wang L, Li D & Jin Z A (2017). Patient-specific wear prediction framework for an artificial knee joint with coupled musculoskeletal multibody-dynamics and finite element analysis. *Tribology International* 109: 382-389
33. Zhang Z G, Rapaud O, Allain N, Mercs D, Baraket M, Dong C & Coddet C (2009). Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings. *Applied Surface Science* 255: 4020–4026