



Alınış tarihi (Received): 31.08.2022

Kabul tarihi (Accepted): 28.10.2022

## Yürüyüş Döngüsü ile Birlikte Sürekli Dinamik Yükleme Altında Diz Implant Polietilen Insert Üzerindeki Aşınma

Alaettin ÖZER<sup>1,\*</sup>, Çağla ÖCAL<sup>1</sup>, Halil Burak MUTU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

<sup>2</sup>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye

\*Sorumlu yazar: [alaettin.ozer@bozok.edu.tr](mailto:alaettin.ozer@bozok.edu.tr)

**ÖZET:** Vücudumuzun yükünü taşıyan diz eklemleri zamanla aşınmaya ve görevini yerine getiremez duruma gelmekte, ağrı ve acıya neden olmaktadır. Günlük aktiviteleri kısıtlanan hastalar için çözüm Total Diz Artroplastisinde (TDA) bulunmuştur. Bu, Femur ve Tibia kemik kırık dokularının yerine geçen metal bileşenler ve menisküs yerine geçen polietilen insert kullanılarak implantın yerleştirildiği bir ameliyattır. Burada kullanılan metaller sert ve polietilen de metallere nispeten daha yumuşak olduğundan bir aşınma problemi oluşturmaktadır. Bu aşınmanın belirlenmesi ve implantın ömrünün hesaplanması da çözülmesi gereken problemlerden biridir. Bu çalışmada dinamik yükleme altındaki polietilen insertin yürüyüş döngüsündeki fleksiyon açısının değişimi dikkate alınarak aşınması çalışılmıştır. Bu amaçla Fleksiyon, Anterior-Posterior (AP) öteleme ve Internal-Eksternal (IE) rotasyon hareketleri ile birlikte Sonlu Elemanlar modeli oluşturulmuştur. Aşınma modeli olarak temas basıncından bağımsız Archard aşınma modeli kullanılmıştır. Literatürden elde edilen gerçekçi yüklemeler altında insert yüzeyindeki basınç ve aşınma miktarları elde edilmiştir. Her üç durum için devir sayısı arttıkça basıncın azaldığı aşınma miktarının ise arttığı görülmüştür. AP ötelemesi ve özellikle IE rotasyonun artan çevrimle birlikte Polietilen insert üzerindeki aşınmayı azalttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** –Total Diz Artroplastisi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Aşınma, Yürüyüş Döngüsü, Sürekli Dinamik Yükleme.

## Wear of Knee Implant Polyethylene Insert Surface under Continuous Dynamic Loading with Gait Cycle

**ABSTRACT:** Knee joints, which carry the weight of our body, wear out over time and become unable to fulfill their duties, causing pain and suffering. For patients whose Daily activities are restricted, the solution has been found in Total Knee Arthroplasty. It is an operation in which the implant is placed by using metal components replacing the femur and tibia bone cartilage tissues and a polyethylene insert replacing the meniscus. The metals used here are hard and softer than polyethylene metals, it creates a wear problem. Modeling this wear and calculating the life time of the implant is one of the problems to be solved. In this study, a finite element model was created by considering the variation of the flexion angle in the gait cycle of the polyethylene insert under dynamic loading. A finite element model including Flexion, Anterior-posterior translation and Internal-external rotation was created. Archard wear model was used as independent from contact pressure. Maximum contact pressure and wear distributions on the insert surface were obtained under more real loadings from literature. It is obtained that contact pressure decreases and wear increases with increasing cycle for both three conditions. It is discovered that AP translation and especially IE rotation decrease the wear on the Polyethylene insert with increasing cycle.

**Keywords**– Alumina, Graphene/Epoxy, UHMWPE, 7.62x63 M2 (AP), Ceramic/Composite Armor.

## 1. Giriş

İnsanların diz eklemlerinde ve menüsküs yapısında zamanla aşınmalar oluşur ve bu aşınmalar sonucunda kıkırdak doku hasar görür. Kıkırdak dokunun incelenmesi ve zamanla yok olmasıyla diz kemikleri birbirine temas ederler ve bu temas insalarda acı ve ağrıya neden olur. İnsanların diz ekleminde oluşan bu hasar; yürüme, koşma, oturma, kalkma, merdiven inip çıkma gibi günlük aktivitelerini yapmakta zorlanır ve bazen yapamaz hale gelebilirler. Diz eklemi hasara uğrayan hastalara Total Diz Artroplasti ameliyatıyla diz implantı uygulanır ve bu ağrıların azalması ve yok olması hedeflenir. Diz eklemi vücudun en büyük ve en karmaşık eklemidir. Diz implantının ömrü çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Diz implantının ömrünü araştırmak için diz eklemi matematiksel bir model oluşturarak incelenmektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan matematiksel modelde polietilen insert üzerine etkiyen basınç ve aşınma miktarı incelenmektedir.

Diz implantı femur ve tibia kemiklerinin eklem başlarına metal malzeme ve iki metal bileşen arasına nispeten daha yumuşak menisküs görevi gören polietilen malzeme kullanılır. Bu çalışmada femoral bileşen için krom-kobalt alaşımı, tibial bileşen için titanyum-alüminyum-vanadyum alaşımı kullanılmıştır. Godest ve ark. (2002), total diz ekleminde, tek bir analizde, hem kinematik hem de iç gerilmeleri modellemek için Explicit Sonlu Elemanlar yaklaşımını kullanmışlardır. Diz aşınma simülasyonunda tek bir yürüyüş döngüsü için diz eklemi değişimini modellemişler ve sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda elde ettikleri verilerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Baldwin ve ark. (2012) üç kadavra örneğinde deneysel IE ve varus-valgus gevşeklik testleri ve ardından dinamik diz bükülme ve yürüme simülasyonları yapmışlardır. Daha sonra manyetik rezonans görüntülerinden ve CAD geometrisinden sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Model doğrulamasını, diz bükme aktivitesi sırasında her 51 femur fleksiyonunda ve yürüyüş döngüsünün her %5'inde deneysel ölçümlere öngörülen tibial femoral ve patella femoral kinematiklerini aküatör tepkilerini karşılaştırarak yapmışlardır.

Zang ve ark. (2019) IE Rotasyon ve AP Ötelemenin diz implantındaki aşınmasını temas basıncına bağlı ve temas basıncından bağımsız iki farklı model oluşturarak incelemişlerdir. Çapraz kesmenin aşınma üzerindeki etkisini de dikkate alarak çalışmalarını yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda IE Rotasyonu çapraz kesmeyi ve aşınmayı önemli derecede etkilediğini bulmuşlardır ancak rotasyonun yönünün etkisini az olarak nitelendirmişlerdir. İleri yönlü AP temas basıncından bağımsız aşınmayı azaltırken, temas basıncına bağlı aşınmayı arttırdığını görmüşlerdir ancak AP'nin yönünü değiştirdiklerinde iki aşınma modelinde zıt aşınma eğilimleri gözlemlemişlerdir.

Suh ve ark. (2017) duruş fazlı yürüyüş döngüsü yükleme koşulları altında varus ve valgus hizalama bozukluğunun tibial bileşen üzerindeki biyomekanik etkisini araştırmışlardır. Valgus çok varus hizalamasında, medial tarafa göre, daha büyük toplam temas gerilmesinin olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle valgus hizalamasında bağ kuvvetindeki artışı göstermişler ve bununla birlikte medial yan bağda oluşan kuvvetin de arttığını göstermişlerdir. Varus ve valgus hizalamasının TDA' de aşınma ve bağ stabilitesini etkileyeceğini bulmuşlardır.

Koluaçık ve ark. (2019) post-cam'deki düz-düz, konveks-konkav ve konkav-konveks olmak üzere üç farklı geometrik temas alanının von Misses gerilmesine ve temas basıncına etkilerini sonlu elemanlar analizi ile araştırılarak aşınma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda temas yüzeyi alanının artmasının von misses gerilmesi ve temas basıncını azalttığı ve buna bağlı olarak da aşınma miktarının azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, analiz sonuçlarına göre de aşınmanın konkav-konveks temasa dayalı tasarımlarda en düşük olduğu belirlenmiştir.

Bütün bunlarla birlikte diz implant Polietilen insert üzerindeki aşınma çok daha gerçekçi ve kadavra deneyleriyle doğrulanmış dinamik yüklemeler, yürüyüş döngüsü ile birlikte dinamik fleksiyon-ekstansiyon, dinamik AP öteleme ve IE rotasyon etkileri altında çalışılması çok daha gerçekçi sonuçların alınmasına ve bu sonuçların ışığında daha doğru uygulamaların yapılmasına yol açacaktır.

İşte bu çalışmada, fleksiyon açısı, AP öteleme ve IE rotasyon etkileri altında diz implant Polietilen insert yüzeyindeki maksimum temas basıncı ve aşınma miktarı etkileri kadavra deneyleriyle doğrulanmış yüklemeler ve Archard'ın aşınma modeli kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, kadavra deneyleriyle doğrulanmış yüklemeye birlikte yürüyüş döngüsü dinamik fleksiyon için kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Aşınma Modeli

Archard aşınma modeli (Archard, 1953), aşınmayı simüle etmek için, sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte kullanıldığında oldukça iyi sonuçlar veren, yaygın olarak kullanılan bir kaymalı aşınma modelidir. Archard'ın orijinal modeline göre, temas yüzeyindeki temas basıncı ve kayma hızı, aşınmaya bağlı oluşan hacim kaybı oranına bağlıdır. Kullanılan sonlu elemanlar yazılımı, bu modelin, temas basıncı ve hızı üzerindeki doğru model bağımlılığına izin veren geliştirilmiş bir versiyonunu kullanır. Aşınma, normal temas doğrultusunun tersi olan yüzeyin içinde meydana gelir. Sonuç olarak, Ansys' te düğüm noktasındaki aşınma oranı şu şekilde verilir:

$$W = \frac{K}{H} P^m V^n \quad (1)$$

Burada K aşınma katsayısı, H malzeme sertliği, P temas basıncı, V bağıl kayma hızı, m basınç üssü ve n hız üssüdür.

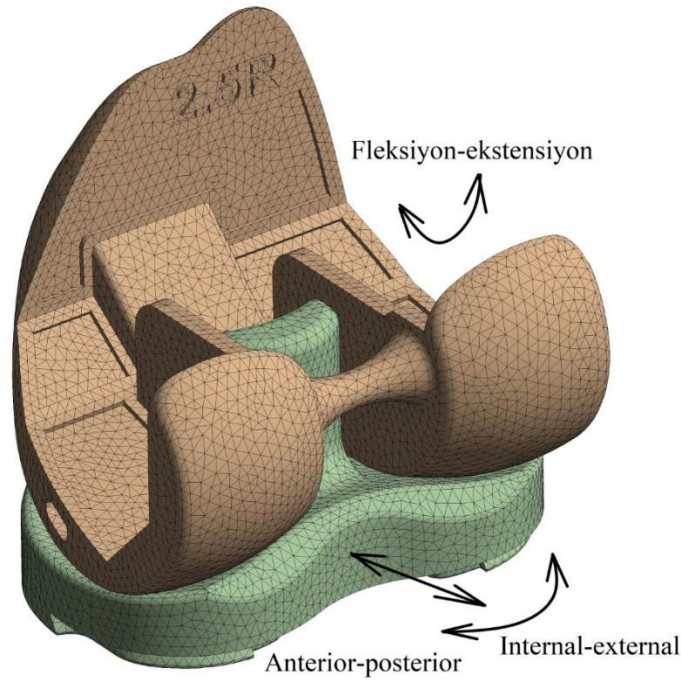
### 2.2. Sonlu Elemanlar Modeli, Analizler, Malzeme ve Dinamik Yükleme

Diz implantı oluşturan parçaların en önemlisi belkide yüksek dayanımlı Polietilenden (PE) yapılan ve dizdeki menüsküs işlevini gören Insert olarak adlandırılan parçadır. Diğer parçalar genellikle yüksek sertlikli metal parçalar iken bu PE Insert adı verilen parçanın belli ölçüde, nispeten daha yumuşak ve aşınmaya dayanıklı ve darbe sönümleyebilen bir yapıda olması istenir. Bu nedenle Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE)' den yapılır.

Bu çalışmada, kadavra deneyleriyle doğrulanmış yüklemeler (Wünschel, 2013) altında ve yürüyüş döngüsünün (Şekil 1) dinamik açısal değişimleriyle değişen fleksiyon açılarında, insert üzerindeki temas basınçları ve aşınma değerleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak

elde edilmiştir. Bu amaçla Fleksiyon, Fleksiyon+AP Öteleme ve Fleksiyon+IE rotasyon olarak üç farklı analiz modeli oluşturulmuştur. Her bir analiz için sırasıyla 100 bin (b), 1 milyon (m), 3 milyon, 10 milyon, 20 milyon ve 30 milyon çevrim sayısı uygulanarak analizler yapılmıştır.

Bu çalışmada, Mikron Makine (Yenimahalle/Ankara/Türkiye)' den elde edilen bir 3 boyutlu (3B) 2.5 numara sağ diz katı modeli kullanılmıştır (Şekil 2). Bu katı model kullanılarak Sonlu Elemanlar Yapısal Modeli oluşturulmuştur. Bu 3B diz katı modeli bir hastaya ait femur ve tibia katı modelleri ile SpaceClaim Yazılımı aracılığıyla birleştirilmek suretiyle analizlerde kullanılacak modeller elde edilmiştir. Femur ve tibia ile birleştirilen diz modelinde, Femur bileşeni-Femur ve Tibia bileşeni-Tibia birleşme yerleri gerçekte olduğu gibi tamamıyla bağlı olarak düşünülmüştür. Femur bileşeni ile PE Insert arasındaki temas alanı ve yeri fleksiyon açısına göre değişmekle birlikte sürekli ve dinamik olduğundan sürtünmeli olarak düşünülmüş olup sürtünme katsayısı olarak daha önce literatürde yayınlanmış çalışmalarda (Suh ve ark., 2017) olduğu gibi 0.04 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 1.** Analizlerde kullanılan diz implant 3B sonlu elemanlar modeli ve dizdeki hareketler.  
**Figure 1.** Knee implant 3D finite element model used in the analysis and movements in the knee.

Diz implant PE Insert üzerindeki aşınma etkisini incelemek için kullanılan sabit ve değişken yüklemeler, literatürde yayınlanmış çalışmalardan elde edilen, değişik şartlarda dize gelen yüklemeleri belirlemeye ve doğrulamaya yönelik olarak kadavra ile yapılmış deneylerde elde edilmiş yüklemelerdir (Wünschel, 2013). Bu yüklemeler, femura düşey doğrultuda 50 N ve hamstringe 10 N olarak etkiyen sabit kuvvetler ile lineer olarak artan ve 90 derece fleksiyonda 600 N' a ulaşan quadriceptuator kuvvetidir. Kuvvetlerin uygulama yönleri ve doğrultuları ise yine gerçek çalışma şartlarına uygun olarak alınmıştır (Kornozek, 2013). Quadriceptuator kuvveti yürüyüş döngüsüne (Sridar, 2017) göre yeniden düzenlenmiş ve modele adapte edilmiştir. Ayrıca, Bu analizlerde kullanılan AP öteleme ve IE rotasyon verileri de yine literatürdeki çalışmalardan alınmıştır (Wünschel ve ark., 2011).

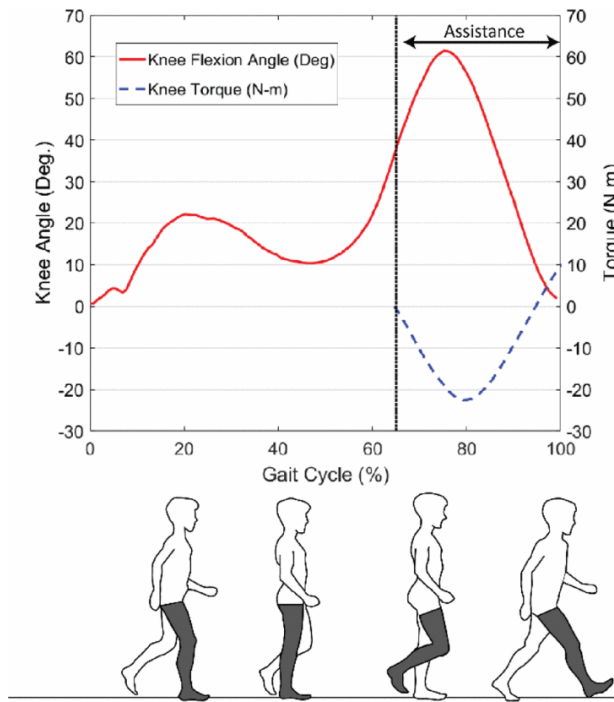
### 2.3. Diz Eklemi Hareket Mekanizması

Diz eklemi sagittal ekseninde rotasyonel fleksiyon-ekstansiyon hareketi, horizontal ekseninde rotasyonel IE hareketi ve AP yönde öteleme hareketi yapmaktadır. Bu çalışmada fleksiyon, fleksiyon+AP ve fleksiyon+IE hareketlerinin aşınmaya etkisi incelenmektedir.

Wünschel (2011) yaptığı çalışmada fleksiyon açısının değişimiyle AP öteleme hareketinin değişimi ve IE hareketinin rotasyonel değişimini incelemiştir. Bu çalışmada Wünschel'in elde ettiği veriler kullanılmış, ara değerler ise doğrusal interpolasyon yöntemiyle hesaplanmıştır.

### 2.4. Yürüyüş Döngüsü

Yürüyüş döngüsü, bir ayağın yere temas ettiği andan başlayarak aynı ayağın ikinci kez yere temas ettiği ana kadarki yürüyüş hareketidir. Sridar (2017) yaptığı çalışmada bir yürüyüş döngüsü boyunca fleksiyon açısının değişimini araştırmış ve Şekil 1'deki verileri elde etmiştir. Bu çalışmada fleksiyonunaçısısal değişimi için Sridar'ın elde ettiği veriler kullanılmaktadır.



**Şekil 2.** Yürüyüş döngüsü boyunca fleksiyon açısının değişimi (Sridar, 2017).  
**Figure 2.** Variation of flexion angle throughout the gait cycle (Sridar, 2017).

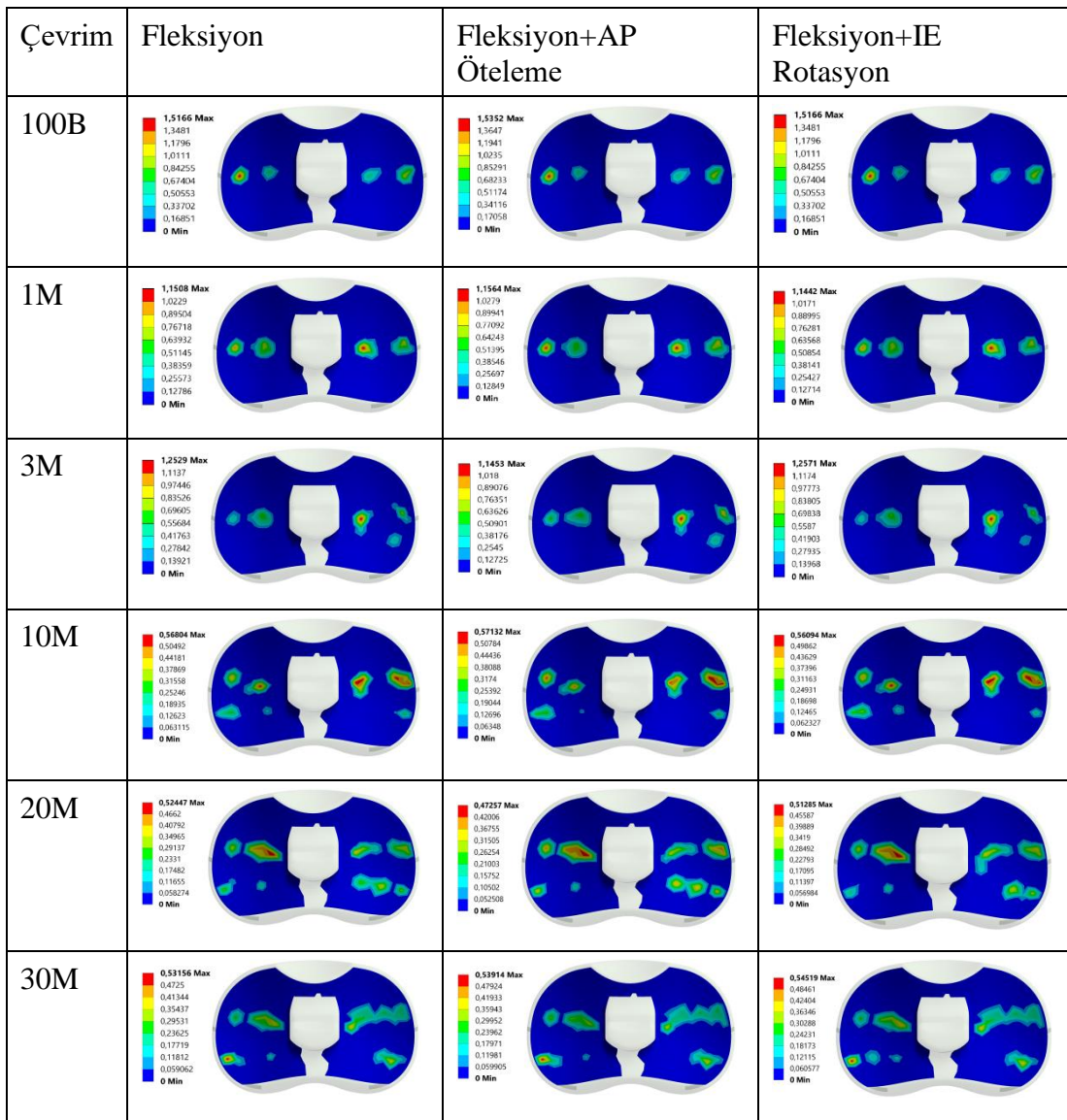
### 2.5. Malzeme Özellikleri

Diz implantı, femur ve tibiabileşmeleri ile polietilen insert olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Femur bileşeni için krom-kobalt alaşımı seçilmiştir. Krom-kobalt alaşım özelliği olarak, elastisitemodülü (E) 195 GPa, poisson oranı ( $\nu$ ) ise 0,3 olarak kullanılmıştır. Tibia bileşeni için Ti6Al4V titanyum-alüminyum-vanadyum alaşımı seçilmiştir. Bu alaşımın malzeme özelliği olarak, elastisite modülü (E) 115 GPa, poisson oranı ( $\nu$ ) ise 0,3 olarak

kullanılmıştır. İnsert için UHMWPE seçilmiştir. UHMWPE'nin malzeme özelliği olarak, elastisite modülü (E) 685 MPa, poisson oranı ( $\nu$ ) ise 0,47 olarak kullanılmıştır (Suh ve ark., 2017).

### 3. Bulgular ve Tartışma

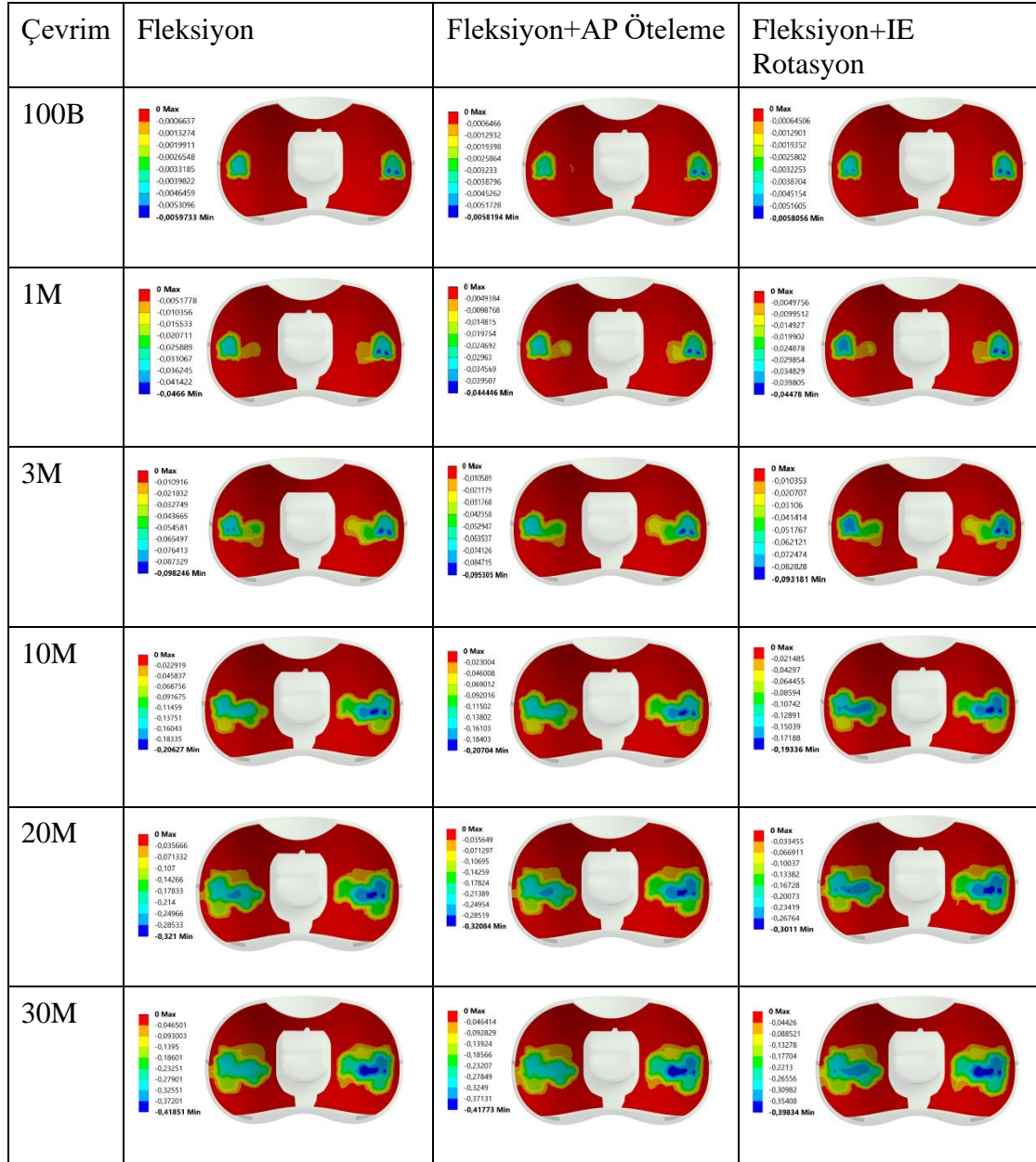
Bu çalışmada, dizde, fleksiyonun yürüyüş döngüsünün açısal değişimine uygun olarak değiştiği farklı çevrim sayılarında Fleksiyon, Fleksiyon+AP Öteleme, Fleksiyon+IE Rotasyon hareketlerinin Polietilen insert üzerindeki temas basıncı (Şekil 3) ve aşınma miktarı (Şekil 4) olarak etkileri elde edilmiştir. Sadece fleksiyon için 100b den 1m a çevrim 10 kat arttığında aşınma yaklaşık 8 kat artmakta buna karşın basınç 1.5 kat azalmaktadır. Çevrim 1m dan 3m a 3 kat arttığında aşınma 2 kat artarken basınç 0.1 MPa kadar artmaktadır.



**Şekil 3.** Fleksiyon, Fleksiyon+AP öteleme ve Fleksiyon+IE rotasyon için çevrime göre polietilen insert üzerindeki maksimum temas basıncı dağılımları.

**Figure 3.** Maximum contact pressure distributions on the polyethylene insert according to the cycle for Flexion, Flexion+Aptranslation and Flexion+IE rotation.

Burada çevrimle birlikte aşınma miktarları düzenli olarak artmaya devam ederken çevrim 30m olduğunda 20m a göre basıncın çok küçük bir oran da olsa arttığı görülmektedir. Sadece fleksiyon durumunda 100 bin devir için maksimum temas basıncı 1.5166 MPa iken 30milyon devirdeki basınç 0.5316 MPa' a düşmektedir. Bu durum beklendiği gibi devir sayısı arttıkça aşınmanın artması ve buna bağlı olarak temas alanının artmasıyla açıklanabilir. Bunun ispatını devir sayılarına karşılık gelen aşınma miktarlarının artışından görebiliriz. 100bin devir için sadece fleksiyondaki aşınma miktarı 0.005973 mm iken 30milyon devirde bu değer 0.41851 mm' ye çıkmaktadır (Tablo 1).



**Şekil 4.** Fleksiyon, Fleksiyon+AP öteleme ve Fleksiyon+IE rotasyon için çevrime göre polietilen insert üzerindeki aşınma miktarı dağılımları.

**Figure 4.** Wear rate distributions on the polyethylene insert according to the cycle for Flexion, Flexion+AP translation and Flexion+IE rotation.

**Tablo 1.** Fleksiyon, Fleksiyon+APTranslasyon ve Fleksiyon+IE Rotasyon yürüyüş döngüsü için maksimum temas basıncı ve aşınma verileri.

**Table 1.** Maximum contact pressure and wear data for Flexion, Flexion+APTranslation and Flexion+IE Rotation gait cycle.

Çevrim	Fleksiyon		Fleksiyon+AP öteleme		Fleksiyon+IE rotasyon	
	Basınç (MPa)	Aşınma (mm)	Basınç (MPa)	Aşınma (mm)	Basınç (MPa)	Aşınma (mm)
100b	1.5166	0.005973	1.5352	0.0058194	1.5166	0.005856
1m	1.1508	0.0466	1.1564	0.044446	1.1442	0.04478
3m	1.2529	0.098246	1.1453	0.095305	1.2571	0.093181
10m	0.56804	0.20627	0.57132	0.20704	0.56094	0.19336
20m	0.52447	0.321	0.47257	0.32084	0.51285	0.3011
30m	0.53156	0.41851	0.53914	0.41773	0.54519	0.39834

Fleksiyon+AP öteleme analizleri sonucunda elde edilen verilerde aşınma değerlerinin sadece fleksiyondaki gibi çevrimle birlikte arttığı, ancak aşınma miktarlarının 100b, 1m ve 3m çevrimlerde daha az olduğu görülmektedir. Bununla birlikte basınç değerleri de azalmaktadır. Yani AP ötelemesi insert üzerindeki aşınmayı azaltmakta, basıncı ise artırmaktadır. Aşınma değerleri daha yüksek çevrimlerde fleksiyondaki değerlere yakın olmakla birlikte nispeten daha az oldukları görülmektedir.

Fleksiyon+IE rotasyon analizlerinde de, diğer analizlerde olduğu gibi, çevrimle birlikte aşınmanın arttığı görülmektedir. Buna karşın, IE rotasyonunun insert üzerindeki aşınmayı AP ötelemesine göre daha fazla azalttığı aşınma değerlerinden görülmektedir. Bu değerler özellikle yüksek çevrimlerde belirgin iken 30m çevrimde Fleksiyon ile Fleksiyon+IE rotasyon arasındaki aşınma farkı 0.02mm olmaktadır.

Temas basıncının, aşınma miktarıyla ters orantılı olarak çevrim sayısı arttıkça düzenli bir şekilde azalması beklenir. Ancak, buna karşın özellikle düşük çevrimlerde az da olsa arttığı görülmektedir. Bu durum Fleksiyon ve Fleksiyon+IE rotasyonda belirgin olmakla birlikte Fleksiyon+AP ötelemede çok belirgin değildir. Yüksek çevrimlerde ise bu belirsizlik pek görülmemektedir. Bunun sebebi olarak düşük çevrimlerde aşınmanın temas yüzeyinde oluşturduğu düzensiz değişimler gösterilebilir. Fleksiyona eklenen AP Öteleme ve IE rotasyon her devirde aşınmayı azaltıcı yönde etkilemiştir.

Bu çalışma ile yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerle çizilen, devir miktarına göre aşınma miktarı dağılımlarının Kawanabe ve ark. (2000)' nın yapmış oldukları deneysel çalışmalarla niteliksel olarak benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu durum seçilen aşınma modeline bağlı olarak doğru sonuç alındığını da ortaya koymaktadır.

İlave olarak, aşınma miktarı dağılımları Zhang (2017)' ın yapmış oldukları sayısal çalışma ile her ne kadar yüklenme girdileri farklı olsa da, 15bin devire kadar niteliksel olarak benzerlik



göstermektedir. Buna karşın, farklı olarak, bu çalışmada devir sayısı (cycle) arttıkça eğitim azalmasına rağmen aşınma artmaya devam etmektedir.

Bu çalışma sonucunda elde edilen, PE insert üzerindeki aşınma bölgesi ve bu bölgenin devir sayısı ile birlikte değişimi yine Zhang (2017)' in literatürden bir aşınma modeli kullanarak elde etmiş olduğu, insert üzerinde devir sayısına göre aşınma bölgeleri değişimi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Kadavra deneyleriyle doğrulanan yüklemeler, AP Öteleme ve IE Rotasyon verileri ile Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılan çalışmayla Fleksiyon sırasında doğrusal yön değiştiren AP ötelemesinin ve açısal değişim yapan IE rotasyonunun hem temas basıncı hem de aşınma üzerinde etkisinin olduğu belirlenmiştir. AP Ötelemesi ve özellikle IE rotasyonu artan çevrimle birlikte Polietilen insert üzerindeki aşınmayı azaltmaktadır. Daha önceki benzer çalışmalardan farklı olarak devir sayısı arttıkça aşınma miktarının artmaya devam ettiği görülmektedir. Bu durum, fleksiyon ile birlikte değişen yüklemeler, AP öteleme ve IE rotasyon değerlerinin PE insert üzerindeki aşınma etkilerini değiştirdiği savını güçlendirmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- Archard, J.F., 1953, "Contact and rubbing of flat surfaces," *Journal of Applied Physics* 24 (8), 981–988.
- Baldwin, M. A., Clary, C. W., Fitzpatrick, C. K., Deacy, J. S., Maletsky, L. P., & Rullkoetter, P. J. (2012). Dynamic finite element knee simulation for evaluation of knee replacement mechanics. *Journal of Biomechanics*, 45(3), 474–483.
- Godest, A. C., Beaugonin, M., Haug, E., Taylor, M., & Gregson, P. J. (2002). Simulation of a knee joint replacement during a gait cycle using explicit finite element analysis. *Journal of Biomechanics*, 35(2), 267–275.
- Kawanabe, K., Clarke, I. C., Tamura, J., Akagi, M., Good, V. D., Williams, P. A., and Yamamoto, K., 2001, "Effects of A–P Translation and Rotation on the Wear of UHMWPE in a Total Knee Joint Simulator," *J. Biomed. Mater. Res. Part B* 54 (3), 400–406.
- Koluçak, S., Can, M., Bahçe, E., Emir, E., 2019, "Bağ Kesen Total Diz Protezinde Post Geometrisinin Konveks ve Konkav Durumunun Aşınmaya Etkisinin SEA ile Araştırılması," *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 2019; 9 (1): 45-57
- Sridar, S., Nguyen, P. H., Zhu, M., Lam, Q. P., & Polygerinos, P. (2017, September). Development of a soft-inflatable exosuit for knee rehabilitation. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3722–3727). IEEE.
- Suh D.S., Kang K.T., Son J., Kwon O.R., Baek C., Koh Y.G., 2017, "Computational study on the effect of malalignment of the tibial component on the biomechanics of total knee arthroplasty: A Finite Element Analysis," *Bone Joint Res.* 6(11), 623–630.
- Wünschel, M., Lo, J., Dilger, T., Wülker, N., & Müller, O. (2011). Influence of bi- and tri-compartmental knee arthroplasty on the kinematics of the knee joint. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 12(1), 1–7.
- Zhang, J., Chen, Z., Gao, Y., Zhang, X., Guo, L., & Jin, Z. (2019). Computational wear prediction for impact of kinematics boundary conditions on wear of total knee replacement using two cross-shear models. *Journal of Tribology*, 141(11), 111201.
- Zhang, J., Chen, Z., Wang, L., Li, D., and Jin, Z., 2017, "A Patient-Specific Wear Prediction Framework for an Artificial Knee Joint with Coupled Musculoskeletal Multibody-Dynamics and Finite Element Analysis," *Tribol. Int.*, 109, 382–389.