

Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Tibia Kırıklarının Eksternal Fiksatör ile Tespitinin Malzeme ve Geometri Unsurları Yönünden Değerlendirilmesi

Hüseyin Furkan BÜLBÜL [a,*], Talip ÇELİK [b], Arif ÖZKAN [b]

[a] *Makine Mühendisliği ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*
[b] *Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE*
** Sorumlu yazarın e-posta adresi: h.furkanbulbul@hotmail.com*

ÖZET

Bilgisayar destekli uygulamalar temel olarak, 3B tarama verilerinin ya da radyoloji görüntülerinin yazılımlar yardımıyla işlenmesi sonrasında elde edilen modelin uygulamaları ile işlev bulmaktadır. Bu amaç ve yöntemler ile teşhis-tedavi planlamasının yapılması, mevcut uygulamaların geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Aynı zamanda bu tarz çalışma ve uygulamalar, kemik/yumuşak doku yapılarının anatomik olarak yük taşıma uygunluklarını hesaplamak için de uygun yöntemlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi de bu tip bir uygulama ara yüzü olup, son yıllardaki yazılımların çözüm konusunda gösterdiği doğru sonuçlar nedeniyle ortopedi ve mekanik alanında sıklıkla tercih edilmektedir. Ortopedi alanında, kol ve bacak kırıklarının tedavisinde kullanılan harici tespit sistemleri doğal vücut hareketlerini kısıtlamasından ötürü yetersiz kalmaktadır. Hâlihazırda bulunan veya temin edilebilen harici tespit elemanlarının hepsi kendine has kullanım alanına sahiptir. Bu sebeple karakteristik tür ve kısıtlamalara sahiptirler. Bu çalışmada alt ekstremite kemiklerinden tibianın harici tespit sistemleri ile kırık tespiti sonrasındaki yük taşıma miktarı farklı malzemeye sahip Ilizarov tipi eksternal fiksatör üstünden değerlendirilecektir. Böylelikle harici tespit sistemlerine bir kıyaslama ile öneriler sunulmuş olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Alt ekstremite, Eksternal fiksatör malzemeleri, Harici tespit sistemi, Sonlu elemanlar, Tibia*.

Evaluation of Tibia Fractures by External Fixation in terms of Materials and Geometry Elements

ABSTRACT

Computer aided applications basically function by application of 3D scan data or model obtained after processing of radiology images with software. It is aimed to make diagnosis-treatment planning with these aims and methods and to develop existing applications. At the same time, such studies and applications are also suitable methods for calculating the anatomical load bearing suitability of bone / soft tissue structures. The finite element method is an application interface of this type and it is frequently preferred in the field of orthopedics and mechanics due to the correct results of the software in the last years. In the field of orthopedics, external fixation systems used in the treatment of arm and leg fractures are insufficient due to the limitation of natural body movements. All of the external fasteners already available or available have their own area of use. For this reason they have characteristic

Geliş: 16/10/2017, Düzeltme: 12/02/2018, Kabul: 22/06/2018

types and restrictions. In this study, external fixation systems of the lower extremity bones and external fixation systems of Ilizarov type with different material loadings after fracture fixation will be evaluated. In this way, a comparison with external detection systems is presented.

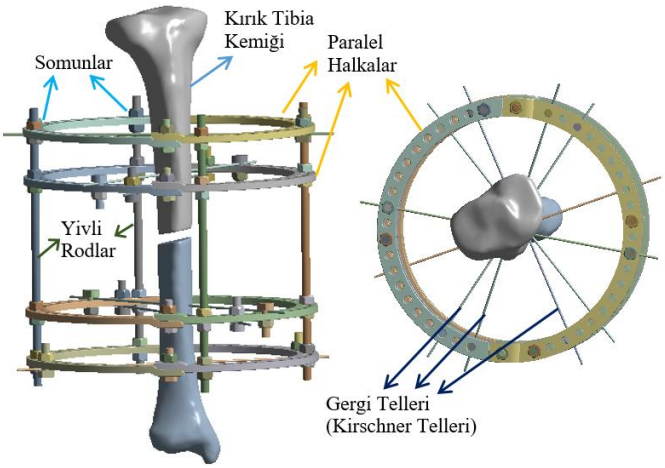
Keywords: *External fixation, Finite element analysis, Fixator materials, Lower extremity, Tibia.*

I. GİRİŞ

Eksternal fiksatörler, kırıklarda uygulanan tedavi yöntemlerinden biridir [1]. Bu fiksasyonların uygulanmasında yapılan pek çok çalışma vardır. Bu çalışmada önceki çalışmaların sonuçlarından yararlanılmıştır [2-4]. Kırık oluşumu, yüksek enerjili olayların kemik yapısında meydana getirdiği deformasyonların sonucu oluşmaktadır. Kırıkların tedavi süresince, kemiğin işlevini yerine getirmesi için kullanılan fiksasyon sistemlerinin uygulanması için bazı ön hazırlıklar gerekmektedir. Bu hazırlıklar kemik üstünde yapılan işlemler olabileceği gibi fiksasyon sistemi üzerinde yapılacak işlemlerde olabilir.

Güvenli ve verimli eksternal fiksatör uygulamaları için üç önemli nokta vardır. Bunlar; vücut anatomisine istenmeyen bir zarar vermekten kaçınmak, gerekli prosedürlerin tamamlanası sonucu aralarındaki geçişin uygun olup olmadığı konusunda karar kılmak ve hasta ile tedavi arasındaki ilişkiyi takip edebilmektir. Hasta ile tedavi süreci arasındaki ilişki çoğunlukla fiksasyon sisteminin elemanlarıyla alakalıdır. Bu elemanlar sistemin rijitliğini sağlayarak tedavi sürecinin olumlu yönde ilerlemesini sağlamalıdır. Tek taraflı fiksatürlerin rijit elemanları az olduğu için bu konuda daha avantajlıdırlar [1, 5-7].

Eksternal fiksatörler, kemik kırıklarının sabitlenmesinde kullanılan, minimal invasiv (en az girişimsel) olan ve sık kullanılan bir yöntemdir. Özellikle femur ve tibia kırıklarının tedavisinde kullanılan bu yöntem, 1950'li yıllarda Gavril Ilizarov tarafından geliştirilmiştir. Genel olarak Ilizarov sistemleri; kırıkların tespiti, boy uzatma, kemik düzeltme işlemleri için kullanılır. Ilizarov tipi eksternal fiksatör, Şekil 1'de görüldüğü üzere gergi telleri (Kirschner wire), paralel halkalar ve vidalı rodlardan oluşur. Gergi telleri kemik içinden geçerek halkaya bağlanır ve halkalar birbirlerine rodlar vasıtası ile tutturulur. Tasarım olarak birçok parçadan oluşan ve dairesel bir tasarıma sahip olan bu yöntemde birçok varyasyonla sabitleme yapılabilir. Şekil 1'de görülen Ilizarov tipi eksternal fiksatör, iki halka kırık hattının üstüne ve iki halka altına bağlanarak yapılmıştır. Bu varyasyonlar kırık yerine göre değişiklik gösterebilir. Bu varyasyonlara göre sistemin rijitliği ve stabilitesi değişiklik gösterir [8].



Şekil 1. *Ilizarov sisteminin genel görünüşü ve parçaları*

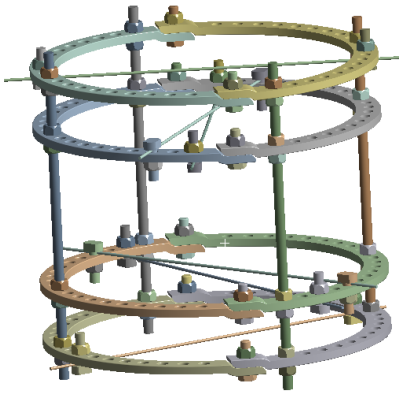
Kırık hattının belirli bir hareket miktarı aralığında olması (<1 mm) kemiği iyileşmesi sürecinde olumlu etki gösterir [9]. Ilizarov tipi eksternal fiksatör rijitliği bu hareket miktarını belirleyen önemli bir faktördür. Eksenel yüklenmelerde sistemin sahip olduğu tel sayısı, halkaların çapı, rodların ve sistem parçalarının mekanik özellikleri hareket miktarını belirleyen önemli parametrelerdir [10]. Bu parametreler üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, bir çalışmada eksenel yük altında halka çapının sistem rijitliği en önemli faktör olduğu belirtilmiştir [8]. Diğer bir çalışmada kirschner tellerinin ön gerilme (pretension) değerlerinin sistemin lineer olmayan davranışlarını önemli derecede etkilediği savunulmuştur [11]. Aynı zamanda iki halkalı ve dört halkalı sistemlerin rijitliği ve stabilitesini değerlendiren çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değerlendirme yapılmıştır [10].

Bu çalışmada, Ilizarov tipi harici (eksternal) fiksatör rijitliğini ve stabilitesini etkileyen bir faktör olan malzeme özellikleri yönünden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Ilizarov tipi eksternal fiksatör için üç farklı malzemeye ait (316L Paslanmaz Çelik, Ti6Al4V ve CoCrMo alaşımları) özellikler atanarak sistemin rijitliği ve stabilitesi değerlendirilmiştir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

A. ÜÇ BOYUTLU BİLGİSAYARLI MODELLEME

Ilizarov tipi eksternal fiksatörü oluşturan parçalar (Şekil 2) SolidWorks yazılımı yardımıyla 3 boyutlu (3B) katı model olarak elde edilmiştir. Bu modeller oluşturulurken parçaların geometrik ölçüleri üretici firma kataloglarından alınmıştır. Kullanılan Ilizarov tipi eksternal fiksatöre ait halka çapı 90 mm, gergi teli çapı 1.8 mm ve yivli rod çapı 6 mm olarak modellenmiştir.



Şekil 2: *Ilizarov tipi eksternal fiksatöre ait donanımsal parçalar*

Bu çalışmada kullanılan tibia modeli için, Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi hastanesindeki bir hastadan alınan bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüleri kullanılmıştır. BT görüntüleri MIMICS 10.01 programı kullanılarak tibia kemiği 3B olarak modellenmiştir. Elde edilen tibia modeli, MIMICS programında STL (Steriolithography) formatında kaydedilerek Gemagic Studio 10 programına aktarılmıştır. Geomagic tersine mühendislik programında tibia üzerinde gerekli düzeltmeler yapılmış ve tibia kemiği orta bölgesinde kırık oluşturulmuştur. Kırık yüzeyler arası 5 mm olarak belirlenmiştir. Kırık oluşturulan tibia modeli IGES formatında SolidWorks programına aktarılmıştır.

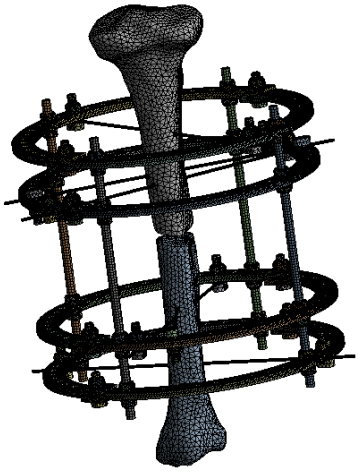
B. SONLU ELEMANLAR MODELİ OLUŞTURMA

Kırık tibia ve Ilizarov tipi eksternal fiksatör modeline klinikte uygulandığı gibi, SolidWorks programı ile birleştirme işlemi uygulanmıştır. Kemik ve Ilizarov tipi eksternal fiksatör modeli Ansys Workbench yazılımına STEP formatında aktarılmıştır. Malzeme özellikleri bütün modellerde lineer ve izotropik kabul edilmiştir. Modeller için kullanılan lineer malzeme özellikleri literatürden alınmış ve Tablo 1'de verilmiştir. Ilizarov tipi eksternal fiksatör için üç farklı malzeme özelliği seçilmiştir. Bunlar 316L paslanmaz çelik, Ti6Al4V ve CoCrMo alaşımlarıdır.

Tablo 1*. Kullanılan malzeme özellikleri [12-15].*

Malzeme	**Poisson Oranı (v)**	**Elastikiyet Modülü (E)** (*GPa*)	**Akma Mukavemeti** *(MPa)*
Paslanmaz Çelik (316L)	0,25	190	205
Kobalt Krom Molibden (CoCrMo)	0,32	200	720
Titanyum Alaşım (Ti_6Al_4V)	0,32	110	800

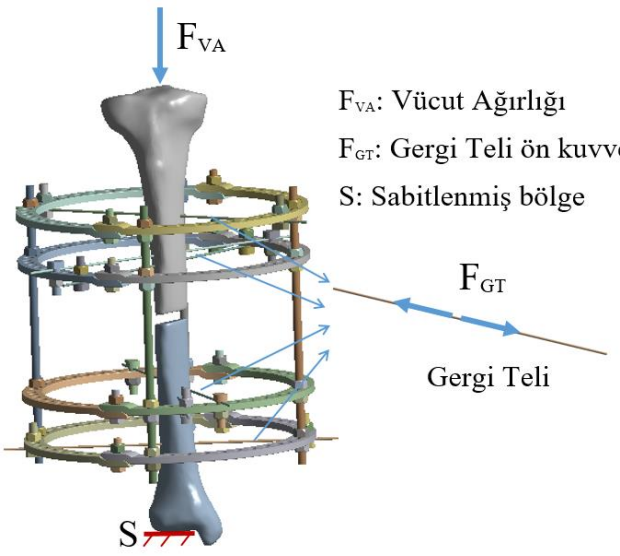
Kontak yüzeyleri için, Ansys Workbench yazılımında tanımlanmış bonded tip (yapışık) kontak türü seçilmiştir. Ağ örgüsü (mesh) yakınsama çalışması yapılmış ve en uygun eleman boyutları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma sonucu, kemik modeli için 4 mm, rodlar için 2mm, gergi telleri için 0.3 mm ve halkalar için 2 mm element boyutları belirlenmiştir. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) için eleman tipi Solid186 (hexahedron-dominant) ve Solid187 (tetrahedron) seçilmiştir. Toplamda üç farklı sonlu elemanlar modeli için eleman ve node sayıları sırasıyla 505 000 ve 1 501 078 olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar modeli Şekil 3'de gösterilmektedir.



***Şekil 3**. İlizarov Sistemi Sonlu Elemanlar Modeli.*

C. KUVVET VE SINIR ŞARTLARI

SEA için literatürden alınan sınır şartları tanımlanmıştır. Tibia kemiğinin diz eklemi tarafından (proksimal) kuvvet uygulanmış, ayak eklemi tarafından (distal) sabitlenmiştir. Ayrıca gergi telleri için tellerin her birine telin doğrultusunda gergi kuvveti tanımlanmıştır (Şekil 4). Vücut ağırlığından kaynaklı yük, hasta Ilizarov tipi eksternal fiksatör uygulanması sonrası bütün vücut ağırlığını veremeyeceği için 100 N olarak tanımlanmıştır. Ayrıca gergi telleri sabitleme sırasında ön yük verilmektedir. Bu değer literatürden 500 N olarak alınmıştır [9].



***Şekil 4.** Kuvvet ve sınır şartları.*

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada tibia kırığı tedavisi için Ilizarov halka tipi fiksatör uygulaması yapılmıştır. Gerçeğe yakınlığı ve uygulanabilirliği ile pek çok yöntemin önüne geçmekle beraber, diğer fiksatör yöntemlerine nazaran kemiği her yönden desteklemesiyle de avantajlıdır. Malzeme yönünden üç farklı kombinasyonun karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Bu tür karşılaştırılmaların yapılması, oluşan gerilmeleri ve yer değiştirme miktarlarını belirlemek açısından önemlidir. Bulunan değerlerin tedavi sürecine etkileri kaçınılmazdır. Enfeksiyonun önlenmesi için gerekli bakımların yapılması gerekir. Normal uzunlukta olması ekstremitenin hizalanması ve rotasyonu tedavi sürecinde hastanın konforunu arttırır. Bunun yanında fiksatör sabitleme esnasında oluşan kemik ve yumuşak doku hasarı en aza indirgenmelidir.

Ilizarov tipi eksternal fiksatör, kırık stabilizasyonunun sonucu meydana gelen gerilmelerin dağılımı yanında doku büyümesinin ve doku yenilenmesinin etkileri de göz önüne alınmalıdır. Açık tibia tedavilerinde, kırıklara uygulanan fiksasyonların toplam %90'ı istenilen sonuçları vermiştir [16].

Bir sistemde kullanılan güvenlik katsayısı ileriki dönem hasar riski açısından çok önemlidir. Güvenlik katsayısı, sistemin maruz kaldığı yükler sonucunda yani çalışma koşullarına göre sistemin dayanım miktarı olarak tanımlanabilir [17]. Güvenlik katsayısı, tasarımı yapılan sistemlerin insan hayatı gibi önemli faktörlere etkisine göre değişkenlik gösterir. Örneğin ağırlığın önemli olduğu bir sistemde düşük tutulurken can güvenliğinin ön planda olduğu bir sistemde daha yüksek güvenlik katsayısı belirlenir.

Eksternal fiksatörlerin kullanım amacı kırık hattını sabitleyerek, kırık hattındaki kemikler arası etkileşimi optimum seviyede tutarak kırık iyileşmesini hızlandırmaktır. Burada kırık iyileşmesi kırık hattındaki mikro hareketler ile sağlanır. Ayrıca, kırık hattında ki kırık yüzeylerinin birbirine uyguladığı basınç da kırık iyileşmesi açısından çok önemlidir. Bu da kırık sabitleme ile stabilitenin sağlanmasına bağlıdır. Bu sebeple ilizarov ile sabitlemelerde gergi teli kullanım adeti ve malzeme türü önemlidir [6]. Bu çalışmada kırığın her iki tarafında üç adet olmak üzere toplam altı adet gergi teli kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan model üzerinde elde edilen maksimum gerilme değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerlere göre sistemi oluşturan elemanların gerilme değerleri dikkate alınarak bu elemanların güvenlik katsayıları hesaplanmış ve Tablo 3'te belirtilmiştir. Bu değerlendirme kriterlerine göre sistemi oluşturan parçaların mekanik dayanımları değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre maksimum Von Mises gerilme değeri CoCrMo alaşımlı malzeme kullanıldığında elde edilmiş ve 723.2 MPa olarak hesaplanmıştır. Minimum Von Mises gerilme değeri ise Ti6Al4V alaşımlı malzemelerden elde edilmiş olup 374.5 Mpa olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. *Ilizarov tipi eksternal fiksatör parçalarında oluşan maksimum gerilme değerleri*

	316L ***(MPa)***	**Ti6Al4V** ***(MPa)***	**CoCrMo** ***(MPa)***
Gergi Telleri	635.4	374.5	723.2
Rodlar	8.8	5.2	374.5
Halkalar	141.1	82.9	160.5
Kemik	87.5	68.9	92.8

Tablo 3. *Ilizarov tipi eksternal fiksatör parçalarında oluşan güvenlik faktörleri*

	316L/Güvenlik Faktörü	**Ti6Al4V/Güvenlik Faktörü**	**CoCrMo/Güvenlik Faktörü**
Gergi Telleri	0.32	2.14	0.99
Rodlar	23.3	153.8	2.14
Halkalar	1.45	9.65	4.49

Sistemin hasar riski güvenlik faktörü ile belirtilebilir. Gergi telleri için sonlu elemanlar modeli üzerinden elde edilen en düşük güvenlik katsayısı 316L paslanmaz çelik kullanılan fiksatörde, 0.32 olarak hesaplanmıştır. Bu değeri güvenlik katsayısı 0.99 olan CoCrMo alaşımlı gergi teli takip etmiştir. Gergi telleri arasında en yüksek güvenlik faktörü ise Ti6Al4V alaşımlı gergi tellerinde 2.14 olarak elde edilmiştir.

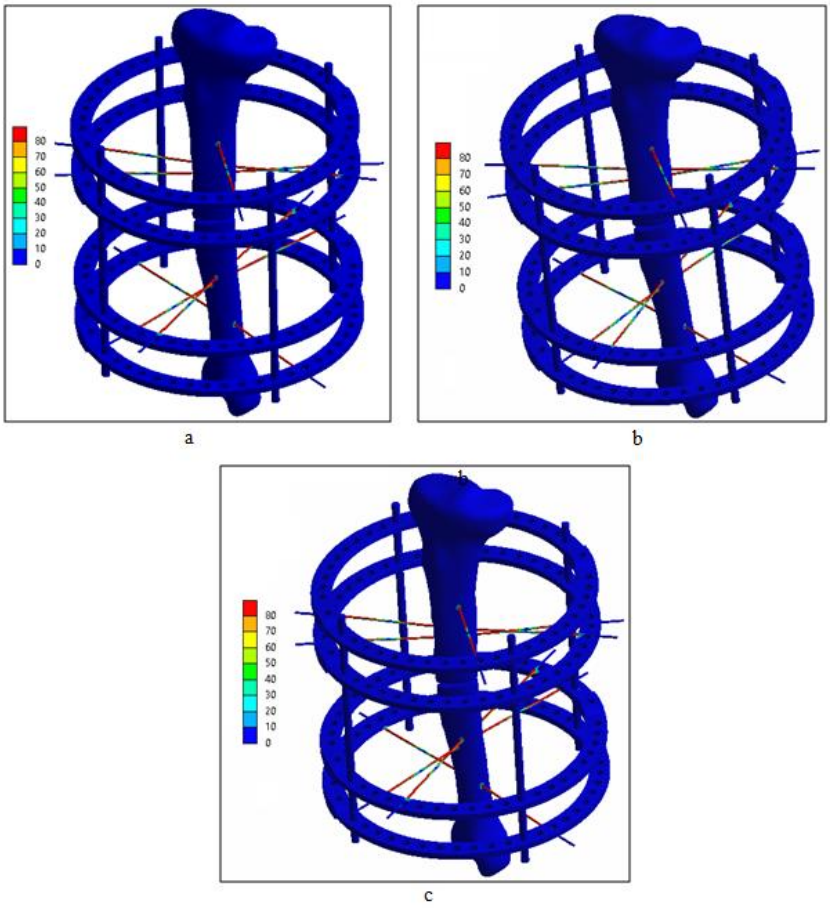
Rodlar için sonlu elemanlar modeli üzerinden elde edilen güvenlik katsayılarına baktığımızda en düşük değer CoCrMo alaşımı kullanılan fiksatörde, 2.14 olarak hesaplanmıştır. Bu değeri güvenlik katsayısı 23.3 olan 316L paslanmaz çelik alaşımlı rodlar takip etmiştir. Rodlar arasında en yüksek güvenlik faktörü ise Ti6Al4V alaşımlı rodlarda, 153.8 olarak elde edilmiştir.

Halkalar için sonlu elemanlar modeli üzerinden elde edilen güvenlik katsayılarına baktığımızda en düşük değer 316L paslanmaz çelik alaşımı kullanılan fiksatörde, 1.45 olarak hesaplanmıştır. Bu değeri güvenlik katsayısı 4.49 olan 316L paslanmaz çelik alaşımlı halkalar takip etmiştir. Halkalar arasında en yüksek güvenlik faktörü ise Ti6Al4V alaşımlı gergi tellerinde 9.65 olarak elde edilmiştir.

En düşük güvenlik faktörü, gerilmelerin en yüksek olduğu gergi tellerinde elde edilmiştir. Tablolardan elde edilen verilere göre gergi tellerindeki gerilme değerleri karşılaştırıldığında Ti6Al4V alaşımlı sistemin dayanımı diğer malzeme türlerinin kullanıldığı sisteme göre daha iyidir. Diğer yönden sadece CoCrMo alaşımının dayanımı Ti6Al4V alaşımına göre daha yüksektir. Güvenlik faktörü de eklenince Ti6Al4V alaşımının tercih edilebilirliği daha yüksek olmaktadır.

Kemikte oluşan gerilmeler incelendiğinde Ti6Al4V malzeme kullanımında hesaplanan gerilmenin en az olduğu görülmektedir. Bunu 316L paslanmaz çelik ve CoCrMo alaşımlı malzeme kullanımları takip etmiştir. Kemikte oluşan yüksek gerilmeler hasar oluşma riskini arttırır. Bu da tedavi amaçlı kullanımlarda istenmeyen sonuçlar ortaya çıkartacağı için uygulamaya bakılmaksızın tercih edilmez. Kemiklerde hasar oluşma riski tedavinin başarısız sonuçlanmasına neden olur [5]. Bu sebeple kemiğe aktarılan yük ve buna bağlı gerilme değerleri kabul edilebilir olmalıdır.

Şekil 5'te görülen bu sonuçlara göre sistemin Ti6Al4V alaşım malzemesi kullanılarak oluşturulması sistemin stabilitesi ve rijitliği için önem arz etmektedir. Diğer yönden sistemin halkaları ve rodları 316L paslanmaz çelikten olup, gergi tellerinin Ti6Al4V alaşımı kullanılması sistemin stabilitesi ve dayanımı için yeterli olacaktır.



a) *316L paslanmaz çelik,* ***b)*** *Ti6Al4V alaşımı,* ***c)*** *CoCrMo alaşımı*
Şekil 5. *İlizarov sistemi sonlu elemanlar analiz sonuçları.*

Halihazırda ilizarov fiksatörleri için kullanılan 316L paslanmaz çelik alaşımının, malzeme türü yönünde yapılan çalışma sonucunda gergi telleri için yeterli olmadığını göstermiştir. Bu sebeple paslanmaz çelik kullanımı gerekiyorsa, gergi telleri için daha kalın teller kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada maliyet hesabı yapılmadığı için maliyet açısından yaklaşıldığında kesin bir yargıya varılamaz. Bunun yanında Ti6Al4V alaşımı ile gergi telleri kullanımında yeterli mukavemeti sağlamasından dolayı sonuçlar için daha uygundur.

Rodlar ve halkalar için bulunan güvenlik faktörü sistem için uygun bulunmuştur. Gergi telleri kemik içerisinden geçtiği için güvenlik faktörü olarak kullanılan malzemenin önemi büyük ölçüde artmıştır. 316L paslanmaz çelik ve CoCrMo alaşımlı gergi telleri kullanmak kemik üzerindeki gerilmeleri arttırır. Tablo 2'de kemik üzerinde oluşan maksimum gerilme değerleri bu durumu göstermektedir. Kırık hattının bu şekilde yüksek gerilme değerlerine maruz kalması iyileşmeyi ve iyileşme sürecini etkiler. Ti6Al4V alaşımı ile yapılan kombinasyonlar bu üç malzeme türü arasında kemik üzerinde oluşan gerilme değerinin diğer malzeme türlerine göre en az olmasını sağlamıştır.

IV. SONUÇ

Elde edilen sonuçlar neticesinde, halka tipi fiksatörün farklı malzeme türlerine göre, tibianın medial bölgesindeki kırık için halka tipi fiksatörün mukavemet değerlendirmesi sonucunda gerek güvenlik faktörü ile birlikte hesaplanan mukavemet değerleri gerekse yer değiştirme değerlerine göre Ti6Al4V

malzemesinin çalışmada seçilen diğer malzemelere göre daha uygun değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

Farklı malzeme türlerinde, medial bölgedeki kırık için halka tipi fiksatör değerlendirilmiştir. Buna göre tibia üzerindeki kırık ve Ilizarov tipi eksternal fiksatör ölçülerinin standart kabul edilmesi durumunda, cerrahi açıdan en ideal malzemelerin halkalar için 316L paslanmaz çelik, gergi telleri için Ti6Al4V alaşımı ile sağlandığı sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, tibia ve Ilizarov tipi eksternal fiksatör üzerindeki gerilme değerleri ve güvenlik faktörleri de bu sonucu destekler niteliktedir. Kırık hattının farklılık göstermesi durumunda ise malzeme tercihi değişkenlik gösterebilir. CoCrMo alaşımı yanında 316L paslanmaz çelikte kullanılabileceği gibi önemli olanın kemik içinden geçen çubukların malzemelerindeki gerilme ve yer değiştirme değerleri olduğu görülmüştür. Birbirleriyle etkileşimleri düşünüldüğünde konumlanmış montaj ile en ideal olarak bu değerlerin elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin sağladığı çoklu model üzerinde çalışabilme avantajı bu çalışmada da kullanılarak uygulama sayısı çoğaltılmış ve pek çok farklı konum için değerlendirme imkanı sonucunda hedeflenen sonuçlara erişilmiştir. Eksternal iskelet fiksasyonun da elde edilen sonuçların gerçek ortam uygulamaları ve literatürdeki benzerliği bu durumu desteklemektedir.

TEŞEKKÜR: Modelleme ve tasarım aşamasındaki desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği bölümüne teşekkürlerimizi sunarız.

V. KAYNAKLAR

[1] B. Fleming, D. Paley, T. Kristiansen, "A biomechanical analysis of the ilizarov external fixator," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 241, pp. 95-105, 1989.

[2] A. Aydın, İ. D. Akçalı, E. Avşar, M. Kerem Ün, H. Mutlu, T. İbrikçi, Ö. S. Biçer, C. Özkan, A. Durmaz, "Tekil olmayan fiksatör otomasyonu," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 30, s. 2, ss. 81-92, 2015.

[3] C. P. Pal, H. Kumar, D. Kumar, K. S. Dinkar, C. Mittal, and N. K. Singh, "Comparative study of the results of compound tibial shaft fractures treated by ilizarov ring fixators and limb reconstruction system fixators," *Chinese Journal of Traumatology*, vol. 18, no. 6, ss. 347-351, 2015.

[4] D. Paley and D.C. Maar, "Ilizarov bone transport treatment for tibial defects". *Journal of orthopaedic trauma*, vol. 14, no. 2, ss. 76-85, 2000.

[5] F. Behrens and K. Searls, "External fixation of the tibia. Basic concepts and prospective evaluation," *Bone & Joint Journal*, vol. 68, no. 2, ss. 246-254, 1986.

[6] A. Mitousoudis, E. Magnissalis, and S. Kourkoulis. "A biomechanical analysis of the ilizarov external fixator," *in European Physical Journal web of conferences*, Greece, 2010, pp. 21002.

[7] S.M. Perren, "Evolution of the internal fixation of long bone fractures: The scientific basis of biological internal fixation: Choosing a new balance between stability and biology," *Bone & Joint*

Journal, vol. 84, no. 8, pp. 1093-1110, 2002.

[8] B. Gasser, B. Boman, D. Wyder, and E. Schneider, "Stiffness characteristics of the circular ilizarov device as opposed to conventional external fixators," *Journal of biomechanical engineering*, vol. 112, no. 1, pp. 15-21, 1990.

[9] N. Bishop, E. M. Van Rhijn, I. Tami, R. Corveleijn, E. Schneider, and K. Ito, "Shear does not necessarily inhibit bone healing," *Clinical orthopaedics and related research*, vol. 443, p. 307-314, 2006.

[10] T. Toumanidou, L. Spyrou, and N. Aravas. "A finite element model of the ilizarov fixator system," in Biomedical Engineering, 2011 10th International Workshop on, no. 1-4. 2011.

[11] A. Podolsky and E.Y. Chao, "Mechanical performance of ilizarov circular external fixators in comparison with other external fixators," *Clinical orthopaedics and related research*, vol. 293, pp. 61-70, 1993.

[12] I. Ionescu, T. Conway, A. Schonning, M. Almutairi, and W. D. Nicholson, "Solid modeling and static finite element analysis of the human tibia," *in Sonesta Beach Resort in Key Biscayne Summer Bioengineering Conference*, Florida, USA, 2003.

[13] M. Niinomi, "Mechanical properties of biomedical titanium alloys," *Materials Science and Engineering*, vol. 243, no. 1-2, pp. 231-236, 1998.

[14] Y. Liu, X. Zhao, L. C. Zhang, D. Habibi, and Z. Xie, "Architectural design of diamond-like carbon coatings for long-lasting joint replacements," *Materials Science and Engineering*, vol. 33, no. 5, pp. 2788-2794, 2013.

[15] H. J. Al-Hail, T. E. Sokrab, N. J. Al-Moslamani, and F. R. Miyares, "Hypothalamic hamartoma presenting with gelastic seizures, generalized convulsions, and ictal psychosis," *Neurosciences (Riyadh)*, vol. 15, pp. 43-35, 2016.

[16] S. Naique, M. Pearse, and J. Nanchahal, "Management of severe open tibial fractures: The need for combined orthopaedic and plastic surgical treatment in specialist centres," *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, vol. 88, no. 3, pp. 351-357, 2006.

[17] R.G. Budynas and J.K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, 8th ed., New York, USA: McGraw-Hill New York, 2008.