



İnsan ve Koyun Femur Kemığının Mekanik Özelliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırılması

Yılmaz GÜVERCİN¹ Murat YAYLACI^{2*}

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Ortopedi ve Travmatoloji Bölümü, Rize, Türkiye

²Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Rize, Türkiye

Geliş/Received: 05.06.2021

Kabul/Accepted: 08.08.2021

Yayın/Published: 31.12.2021

Atıf yapmak için: Güvercin, Y. & Yaylacı, M. (2021). İnsan ve Koyun Femur Kemığının Mekanik Özelliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırılması. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 6(4), 599-603.

How to cite: Güvercin, Y. & Yaylacı, M. (2021). Comparison of Mechanical Properties of Human and Sheep Femoral Bone by Finite Element Method. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 6(4), 599-603.

*ID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-1685>
ID: <https://orcid.org/0000-0003-1861-2083>

***Sorumlu yazarın:**

Murat YAYLACI
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat
Mühendisliği Bölümü, Rize, Türkiye
✉: murat.yaylaci@erdogan.edu.tr

Öz: İnsan ve hayvan sağlığı araştırmalarında sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilen analiz çalışmaları, bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle birlikte önem kazanmıştır. SEY analiz çalışmaları fare, köpek, tavşan, domuz, at ve koyun gibi hayvanlarda yapılmaktadır. Bu hayvanlarda bulunan kemiklerin modelleme çalışmaları büyük hayvanlarda yapılması daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu çalışmanın amacı, insan ve koyun femurlarının katı modellemelerinin oluşturulup, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir paket program yardımıyla gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon değerlerinin karşılaştırılmasıdır. Analizler sonucunda koyun femurundaki mekanik değerlerin insan femurundakilere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Department of Orthopaed & Traumatol

Anahtar kelimeler: Femur, koyun, sonlu elemanlar yöntemi.

Comparison of Mechanical Properties of Human and Sheep Femoral Bone by Finite Element Method

***Corresponding author's:**

Murat YAYLACI
Recep Tayyip Erdoğan University,
Department of Civil Engineering, Rize,
Turkey
✉: murat.yaylaci@erdogan.edu.tr

Abstract: Analysis studies using the finite element method (FEM) in human and animal health research have gained importance with the development of computer technology. FEM analysis studies are performed on animals such as mice, dogs, rabbits, pigs, horses and sheep. Modeling studies of the bones found in these animals give more accurate results in large animals. The aim of this study is to create solid models of human and sheep femurs and compare the stress, strain and deformation values with the help of a package program using the finite element method. As a result of the analyzes, it was determined that the mechanical values in the sheep femur were lower than those in the human femur.

Keywords: Femur, finite element method, sheep.

GİRİŞ

Bilimsel araştırmalarda hayvan modellerinin kullanılması hem hayvan hem de insan sağlığı açısından önemli bir adımdır. Özellikle koyun kemikleri çeşitli biyomedikal araştırma alanlarında tercih edilen en uygun hayvan modelleridir. (Hettwer vd., 2019; Shea vd., 2002). Bunun sebebi koyun femurunun kortikal ve spongios kemik içermesi, yapısının kısmen insana benzemesi, ucuz olması ve kolay elde edilir olmasıdır. İnsan femuru vücudun en uzun ve kuvvetli kemiğidir. Uzunluğu insan boyunun

yaklaşık %25'i kadardır. İnsan femuru öne doğru hafif eğrilik gösterir ve alt ucu üst uca nazaran biraz daha arkada bulunur. Femur boynu ile femur cisimi arasında yetişkinlerde 123°-137°'lik bir açı vardır. Buna femur boynu açısı denir. Femur boynunun aksı ile femur cisminin aksı arasında 3°-17°'lik öne (anteversiyon) açılması mevcuttur (Atik vd., 2012). Buna karşın ölçtüğümüz koyun femurunda femur boynu kısa, trokhander majör daha uzun, femur korteksi daha kalındır.

Koyunların mandibula, femur tibia, maksiller sinus gibi organları bilimsel biyomekanik araştırmalar için kullanılmıştır (Newman vd., 1995; Lucchini vd., 1996; Chappard vd., 1999, Oheim vd., 2012). Koyun femuru kullanılarak yapılmış çeşitli çalışmalar kemik greftinin değerlendirilmesi (Hettwer vd., 2019), serotoninin kemik etkileri (Jin vd., 2019), hormonal analizler (Ding vd., 2012), kemik kanlanması değerlendirilmesi (Shea vd., 2002), implant uygulamaları (Mayr vd., 2002) gibi örnekler verilebilir. Yaptığımız literatür araştırmalarında koyun femuru ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmasına rağmen mekanik özelliklerinden bahseden çalışmalara az rastlanılmıştır (Bergmann vd., 1999, Brennan vd., 2009, Gujar ve Warhatkar, 2020).

Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizler, herhangi bir geometrik modelin farklı yükler ve gerilmeler altında bilgisayar ortamında değerlendirmesine imkân sağlar. Bu yöntemin canlı dokuda yapılan deneyi doğrulayabilmek ve doku veya organ varyasyonlarında sayısal ölçüm yapabilmek gibi kullanım avantajları vardır. Son yıllarda, üç boyutlu yapısal mekaniği inceleyebilme olanağı nedeniyle araştırmacıların sonlu elemanlar yöntemine ilgisi gittikçe artmaktadır. İskelet sistemindeki kas, tendon, kemik, kıkırdak gibi sert veya yumuşak dokuların SEY incelenmesi yapılabilmektedir (Han vd., 2020; Vetter vd., 2010; Mazoochian vd., 2012; Freutel vd., 2014).

Biyomekanik ilkeler, insan ve koyun femur mevcut tasarımlarının değerlendirilmesine ve modellenmesine yardımcı olur. SEY, gerçekleştirilen analiz sırasında kemik üzerinde oluşacak gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon miktarlarının tahmin edilmesi ve değerlendirilmesi için mühendislik alanından kemik mekaniğine uyarlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, incelenen femurun karmaşık biyomekaniklerini açıklayan ve sayısal sonuçlar veren bir yöntemdir.

Model olarak koyun seçmekteki amacımız deneysel kemik ve kıkırdak çalışmalarının daha çok koyun femuru üzerinde yapılmasıdır. Literatürde koyun femurunun mekanik özelliklerinden bahseden birkaç çalışma olmasına rağmen (Bergmann vd., 1999) insan ve koyun femuru arasında mekanik özellikler açısından karşılaştırılmalı bir çalışma görülmektedir. Bu

kapsamda bu çalışmada insan ve koyun femuru için analizler yapılmış ve elde edilen gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları uygulamada yol gösterici olacaktır.

MATERYAL VE METOT

Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, paket programlar yardımıyla yapılan analizlerde daha hızlı ve gerçeğe yakın çözümler elde edilmektedir. Bu paket programların çalışma prensibi sonlu elemanlar yöntemine dayanmaktadır. Yapılan bu çalışmada SolidWorks (2018) programında, koyun ve insan femur kemiklerinin katı modellemeleri oluşturularak ANSYS Workbench (2016) programına aktarılmasıyla sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

Femur kemiklerine ait geometriler bilgisayarlı tomografi ile görüntülenen kemik dokuların SolidWorks programıyla daha basite indirgenerek katı cisme dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Solidworks yazılımında katı modeli oluşturulan koyun ve insan femurları Şekil 1'de de görüldüğü gibi ANSYS Workbench programına analiz işlemi için aktarılmıştır.



Şekil 1. Geometrilerin ANSYS Workbench yazılımına alınması.
Figure 1. Importing geometries into ANSYS Workbench software.

Analizi gerçekleştirmek için sisteme girilmesi gereken veriler programa tanıtılmıştır. Femurlar için kullanılan malzeme özellikleri literatürden alınmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan veriler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri.

Table 1. Material properties.

Kaynak	Femur	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Vetter vd., 2011)	Koyun	1,475	11000	0,30
Tu vd., 2009	İnsan	2,1	17000	0,35

Yapılan ağ optimizasyonu çalışması sonucunda analiz için optimum ağ eleman boyutu seçilmiştir. Ağ eleman boyutu 4 mm' den 2 mm' ye kadar değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ağ eleman boyutu 4 mm' lik ilk yapıdan 2 mm' ye yaklaştıkça gerilmeler değişmektedir.

Ağ boyutunun 2 mm' den daha küçük olması durumunda sonuçlarda önemli ölçüde bir değişiklik meydana gelmemektedir. Bu nedenle bu çalışmadaki tüm modellerin analizi için 2 mm ağ boyutu uygulanmıştır. Femur modellerinin ağ yapıları oluşturulduktan sonra eleman ve

düğüm noktaları sayıları Tablo 2’de ve ağ görüntüsü Şekil 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Eleman ve düğüm noktası sayısı.

Table 2. Number of elements and nodes.

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı
İnsan Femuru	103669	60067
Koyun Femuru	102602	59867

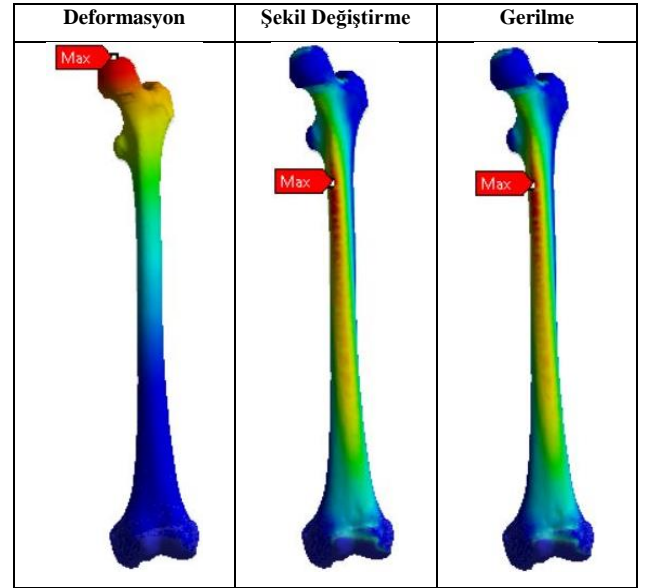


Şekil 2. Üç boyutlu modelin ağ yapısı.
Figure 2. Mesh structure of the three-dimensional model.

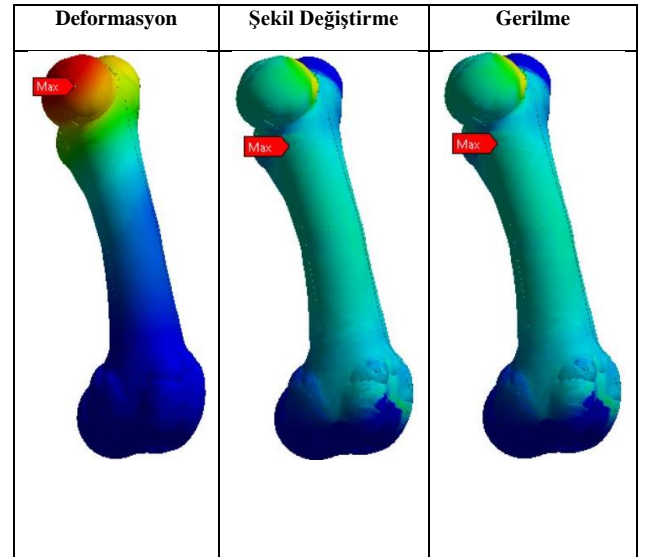
Sınır şartları ve yüklemeler Vetter vd., (2011) ile Dhanopia ve Bhargava, (2017) çalışmalarında belirtilen değerler kullanılmıştır. Malzeme özellikleri, sınır şartları, yüklemeler gibi gerekli olan tüm veriler ANSYS Workbench yazılımında tanımlanmasının ardından statik yapısal analizler tamamlanmış ve elde edilen sonuçlar bulgular kısmında anlatılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada insan ve koyun femurunun her bölgesinde gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon değerlerini elde etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Tüm modellerde materyal olarak insan ve koyun femuruna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. İnsan ve koyun femuru için analiz sonuçlarının gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon görüntüleri ve sayısal değerleri Şekil 3-4 ve Tablo 3’te gösterilmiştir. Verilere göre en yüksek gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon değerleri koyun femurunda tespit edilmiştir. İnsan femuru değerlerinin gerilme için 19,719 MPa, şekil değiştirme için $11,602 \cdot 10^{-4}$ ve deformasyon için 3,8052 mm olduğu görülmektedir. Koyun femuru değerleri ise gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon değerleri sırasıyla 1,9438 MPa, $1,7936 \cdot 10^{-4}$ ve 0,031382 mm’dir. Maksimum değerler dikkate alındığında insan ve koyun femuru değerleri arasında yaklaşık 10 kat fark bulunmaktadır.



Şekil 3. İnsan femur sonuçları.
Figure 3. Human femur results.



Şekil 4. Koyun femur sonuçları.
Figure 4. Sheep femur results.

Tablo 3. İnsan ve koyun femurundaki en büyük değerler.

Table 3. The maximum values in human and sheep femur.

Model	Deformasyon (mm)	Şekil Değiştirme (10^{-4})	Gerilme (MPa)
İnsan Femuru	3,8052	11,602	19,719
Koyun Femuru	0,031382	1,7936	1,9438

SONUÇ

Koyun femuru ortopedik araştırmalar için yaygın olarak kullanılan bir kemiktir. Bu SEY çalışmasında insan ve koyun femurlarına hareketsiz durumda uygulanan sırasıyla 750 N ve 550 N yükleme altında femurlarda oluşacak gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon değerlerini değerlendirmek amaçlanmıştır. Sayısal sonuçlar ele alındığında koyun femurunda oluşan mekanik değerler daha düşüktür. Literatürde, her iki femuru belirli bir yük altında SEY ile analiz eden karşılaştırmalı çalışma bulunmamaktadır.

Koyunlar, insan modelleriyle ve diğer hayvan modelleriyle uzun kemik boyutları, yüklenme yönü, temas basıncı ve implant kullanım elverişliliği gibi nedenlerle kıyaslanabilir. Özellikle ortopedik çalışmalar için uygun bir modeldir (Simpson vd., 2016). Yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde kemik oranı, boyut ve mikro yapısı bakımından insan ve koyun arasında birçok benzerlik olduğu görülmektedir (Lill vd., 2003; Turner vd., 2002). Fakat koyun femuru bazı yapısal özellikleri nedeniyle insan femurundan ayrılır. Bunlar trokhander majörün daha geniş ve yüksek olması, femur boynunun daha kısa olması, femur başının daha küçük olması, femur shaftının korteksinin ince olması ve koyun arka bacağına binen yük aksının değişik olması gibi durumlardır (Crocker vd., 2009). Küçük hayvan (fare, tavşan) modellerinin ise küçük iskelet boyutları, insana sınırlı benzeyen kemik yapıları ve sınırlı yaşam beklentileri gibi durumları olduğundan dolayı çalışmamız büyük hayvan modelinde yapılmıştır (Komori, 2015).

SEY' e dayalı paket programlar yardımıyla yapılan analizlerde, yapısal model üç boyutlu olarak değerlendirildiğinden araştırmacılara avantaj sağlamaktadır. Bu tarz sayısal analizler, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçları kontrol edebildiği için, insan ve hayvanlarda iskelet sistemi araştırmalarında da yaygın olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptirler (Ohyama vd., 2017).

Yapılan bu çalışmada geometrisi modellenen insan ve koyun femurlarının literatüre dayanarak malzeme özellikleri ve yüklenme koşulları tanımlanmıştır. Karşılaştırma kriterleri olarak malzeme özellikleri, femurların geometrik yapısı ve yüklenme koşulları dikkate alınmıştır.

Her iki modelde de femur başı en çok deforme olan bölgedir. Yüklenme değerleri birbirine yakın olmasına rağmen insan femur başının 10 kat daha fazla deformasyona uğradığı görülmektedir. Bu durum her iki modelin femur başının biyomekanik açıdan kıyaslama çalışmalarında göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir. Femurların geometrik yapısı, malzeme özellikleri ve yüklenme koşulları deformasyon farkına neden olacaktır. Koyun femurunda oluşan deformasyonun düşük olmasının temel nedeni ise 4 ekstremiteyi kullandığı için gelen yük daha az olması olarak ifade edilebilir. Koyun modeli kullanılarak femur boynuna uygulanan osteotomi çalışmaları ya da implant çalışmalarında, deformasyon düşük değerlerde olacak ve insan uygulamalarında yanılıya neden olacaktır.

Gerilme ve şekil değiştirme değerleri, insan femurunun geometrik yapısı nedeniyle femur shaftının orta-proksimalinde medial kortekste maksimum değerlere ulaşmıştır. Koyun femurunda ise maksimum değerlerin, femur boyunun hemen altında medial kortekste olduğu

görülmektedir. Yapılan implant çalışmalarında özellikle femoral stem yerleşim kıyaslamalarında medial kortekste insanda daha fazla gerilme ve şekil değiştirme meydana gelebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- ANSYS 16.0, (2016).** Swanson Analysis Systems Inc., Houston PA, USA.
- Atik, F., Özkan, A. & Uygur İ. (2012).** İnsan uyluk kemiği ve kalça protezinin gerilme ve deplasman davranışının kıyaslanması. *Sakarya University Journal of Science*, **16**(3), 249-253.
- Bergmann, G., Graichen, F. & Rohlmann, A. (1999).** Hip joint forces in sheep. *J Biomech.*, **32**(8), 769-777. DOI: [10.1016/s0021-9290\(99\)00068-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(99)00068-8)
- Brennan, O., Kennedy, O.D., Lee, T.C., Rackard, S.M. & O'Brien, F.J. (2009).** Biomechanical properties across trabeculae from the proximal femur of normal and ovariectomised sheep. *J Biomech.*, **42**(4), 498-503. DOI: [10.1016/j.jbiomech.2008.11.032](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.11.032)
- Chappard, D., Aguado, E., Huré, G., Grizon, F. & Basle, M.F. (1999).** The early remodeling phases around titanium implants: a histomorphometric assessment of bone quality in a 3- and 6-month study in sheep. *Int. J. Oral Maxillofac Implants*, **14**(2), 189-196.
- Crocker, S.L., Clement, J.G. & Donlon, D. (2009).** A comparison of cortical bone thickness in the femoral midshaft of humans and two non-human mammals. *Homo.* **60**(6), 551-65. DOI: [10.1016/j.jchb.2009.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jchb.2009.07.003)
- Ding, M., Danielsen, C.C. & Overgaard, S. (2012).** The effects of glucocorticoid on microarchitecture, collagen, mineral and mechanical properties of sheep femur cortical bone. *J. Tissue Eng. Regen Med.*, **6**(6), 443-50. DOI: [10.1002/term.448](https://doi.org/10.1002/term.448)
- Freutel, M., Schmidt, H., Dürselen, L., Ignatius, A. & Galbusera, F. (2014).** Finite element modeling of soft tissues: material models, tissue interaction and challenges. *Clinical Biomechanics*, **29**(4), 363-72. DOI: [10.1016/j.clinbiomech.2014.01.006](https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.01.006)
- Gujar, R.A., & Warhatkar, H.N. (2020).** Estimation of mass apparent density and Young's modulus of femoral neck-head region. *Journal of Medical Engineering & Technology*, **44**(7), 378-388. DOI: [10.1080/03091902.2020.1799093](https://doi.org/10.1080/03091902.2020.1799093)
- Han, P.F., Zhang, R., Gao, Y.Y., Li, P., Wei, X.C. & Lv, Z. (2020).** Mini Domuz ve Koyun Diz Eklemlerinin 3 Boyutlu Geometrik Modellerinin Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Oluşturulması ve Simülasyonu. *Med. Sci. Monit.*, **26**, 1-12. DOI: [10.12659/MSM.921540](https://doi.org/10.12659/MSM.921540)
- Hettwer, W., Horstmann, P.F., Bischoff, S., Güllmar, D., Reichenbach, J.R., Poh, P.S.P., van Griensven, M., Gras, F. & Diefenbeck, M. (2019).** Establishment and effects of allograft and synthetic bone graft substitute treatment of a critical size metaphyseal bone defect model in the

- sheep femur. *APMIS*, *127*(2), 53-63. DOI: [10.1111/apm.12918](https://doi.org/10.1111/apm.12918)
- Jin, L., Sun, H., Dan, S., Li, S., Zhang, C., Zhang, C., Ren, X., Shan, D. & Ling, S. (2019).** Serotonin regulates maternal calcium homeostasis during the perinatal period of sheep. *J Anim Sci.*, *97*(12), 5009-5015. DOI: [10.1093/jas/skz346](https://doi.org/10.1093/jas/skz346)
- Komori, T. (2015).** Animal models for osteoporosis. *Eur J Pharmacol*, *759*, 287-294.
- Lill, C.A., Hessein, J., Schlegel, U., Eckhardt, C., Goldhahn, J. & Schneider, E. (2003).** Biomechanical evaluation of healing in a non-critical defect in a large animal model of osteoporosis. *J. Orthop. Res.*, *21*, 836-842.
- Lucchini, J.P., Aurelle, J.L., Therin, M., Donath, K. & Becker, W. (1996).** A pilot study comparing screw-shaped implants. Surface analysis and histologic evaluation of bone healing. *Clin. Oral Implants Res.*, *7*(4), 397-404. DOI: [10.1034/j.1600-0501.1996.070414.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1996.070414.x)
- Mayr, H.O., Suedkamp, N.P., Hammer, T., Hein, W., Hube, R., Roth, P.V. & Bernstein, A. (2015).** β -Tricalcium phosphate for bone replacement: stability and integration in sheep. *Journal of Biomechanics*, *48*(6), 1023-1031. DOI: [10.1016/j.jbiomech.2015.01.040](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.01.040)
- Mazoochian, F., Hölzer, A., Jalali, J., Schmidutz, F., Schröder, C., Woiczinski, M., Maierl, J., Augat, P. & Jansson, V. (2012).** Finite element analysis of the ovine hip: development, results and comparison with the human hip. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.*, *25*(4), 301-316. DOI: [10.3415/VCOT-11-09-0132](https://doi.org/10.3415/VCOT-11-09-0132)
- Newman, E., Turner, A.S., & Wark, J.D. (1995).** The potential of sheep for the study of osteopenia: current status and comparison with other animal models. *Bone*, *16*, 277-284. DOI: [10.1016/8756-3282\(95\)00026-a](https://doi.org/10.1016/8756-3282(95)00026-a)
- Oheim, R., Amling, M., Ignatius, A. & Pogoda, P. (2012).** Large animal model for osteoporosis in humans: the ewe. *Eur. Cells Mater.*, *24*, 372-385.
- Ohyama, T., Yasuda, H., Shibuya, N., Tadokoro, S., Nakabayashi, S., Namaki, S., Hara, Y., Ogawa, T. & Ishigami, T. (2017).** Three-dimensional finite element analysis of the effects of implant diameter and photofunctionalization on peri-implant stress. *Journal of Oral Science*, *59*(2), 273-278. DOI: [10.2334/josnusd.16-0144](https://doi.org/10.2334/josnusd.16-0144)
- Shea, J.E., Hallows, R.K., Ricks, S. & Bloebaum, R.D. (2002).** Microvascularization of the hypermineralized calcified fibrocartilage and cortical bone in the sheep proximal femur. *Anat. Rec.*, *268*(4), 365-370. DOI: [10.1002/ar.10173](https://doi.org/10.1002/ar.10173)
- Simpson, A.H. & Murray, I.R. (2016).** Main differences in osteoporotic fracture models: which should I use? *Injury*, *47*, 15-20.
- Solidworks. (2018).** Dassault Systèmes Solidworks Corporation. Waltham MA, USA.
- Tu, Y.K., Liu, Y.Ç., Yang, W.J., Chen, L.W., Hong, Y.Y., Chen, Y.C. & Lin, L.C. (2009).** Temperature rise simulation during a kirschner pin drilling in bone. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, ICBBE 2009 3rd International Conference on. Beijing 2009, p. 1-4.
- Turner, A.S. (2002).** The sheep as a model for osteoporosis in humans. *Vet. J.*, *163*, 232-239.
- Vetter, A., Liu, Y., Witt, F., Manjubala, I., Sander, O., Epari, D.R., Fratzi, P., Duda, G.N. & Weinkamer, R. (2011).** The mechanical heterogeneity of the hard callus influences local tissue strains during bone healing: A finite element study based on sheep experiments. *Journal of Biomechanics*, *44*, 517-523.