

Mikro-CT Çözünürlüğünün Voksel Tabanlı Model ve Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkileri

Osman Berat Güner^{1*}, Gökhan Altıntaş², Abdulkerim Ergüt³

¹Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye, obguner@gmail.com

²Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye, gokhan.altintas@cbu.edu.tr

³Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye, abdulkerim.ergut@cbu.edu.tr

*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş / Recieved: 1 Temmuz (July) 2014
Kabul / Accepted: 1 Aralık (December) 2015
DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.46138>

Özet

Çalışma konusu bilimin pek çok alanında kullanılan yöntemlerin bir arada kullanılmasını gerektiren güncel bir konudur. Tıp, malzeme ve uçak-uzay teknolojilerinin kullanıldığı pek çok alanda bu konu kapsamında kullanılan metotlar kullanılmaktadır. Öncelikle iki boyutlu tomografi taraması yapılan malzemelerin, elde edilen görüntüleri piksel piksel işlenerek üç boyutlu solid model haline getirilmesi işlemi yapılmıştır. Bu işlem aşamasının ilk kısmı ağırlıklı olarak treshhold segmentasyonunun ve algoritmasının kullanılmasıyla yapılmıştır. Her iki algoritmanın seçinlik parametreleri ve sonlu eleman modellerinin geometrik morfolojisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar modellerinin çözümleri ABAQUS® paket programı yardımıyla yapılmıştır. Farklı çözünürlük seçimi ile elde edilen modellerin analizleri sonucunda doğal frekansın, burkulma yükünün ve statik analiz değerlerinin değiştiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler — Tersine mühendislik, Vokselizasyon, Mikro-BT, Sonlu elemanlar metodu, Burkulma.

Effect of Micro-CT Resolutions of Voxel Based Model and Analysis Results

Abstract

The subject of paper is a contemporary subject that requires the use of a combination of the methods used in many fields of science. Medicine, material and air space technologies used in the methods used within the scope of this paper is used in many areas. Within the scope of this paper the images, obtained from materials subjected to two dimensional tomography scanning, were processed pixel by pixel into three-dimensional solid model. Phase of the first part of this process required the usage of predominantly Threshold segmentation and flood fill algorithm. The optional parameters and the geometric morphology of finite element models of both algorithms were examined in detail. ABAQUS® software program was carried out using solutions of finite element models. The change of the natural frequencies, buckling loads and the values of static analysis of the models, obtained from selection of different resolution, are presented by the results.

Keywords — Reverse Engineering, Voxelization, Micro-CT, Finite Elements Method, Buckling

1 Giriş

Bu çalışma kapsamında kullanılan yöntemler bilimin pek çok alanında kullanılan yöntemlerin bir arada kullanılmasını gerektiren güncel bir konudur. Tıp, malzeme ve uçak-uzay teknolojilerinin kullanıldığı pek çok alanda bu proje kapsamında kullanılan metotlar kullanılmaktadır.

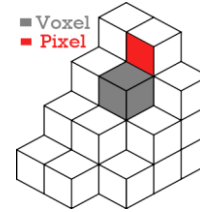
Gelişen teknoloji ile birlikte hesaplama kapasitesinin ve ölçüm tekniklerinin hassasiyetinin artması ile tersine mühendislik uygulamaları günümüzde her zamankinden daha çok kullanılmakta olup giderek artan bir öneme sahiptir. Tersine mühendislik uygulamaları bilgisayar destekli tasarımın popüler hale gelmesiyle birlikte daha sık kullanılmaya başlamıştır. Tersine mühendislik üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım, bilgisayar destekli üretim ve bilgisayar destekli mühendislik için var olan parçaların üç boyutlu sanal modellerinin oluşturulması için kullanılan bir metot haline gelmiştir. Tersine mühendislik işlemi bir objenin ölçümü ve ardından üç boyutlu model olarak oluşturulmasını içerir. Bu modellerin oluşturulması için birçok görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır. Son yıllardaki gelişmelerle beraber en çok kullanılan görüntüleme teknikleri bilgisayarlı tomografi (CT) ve manyetik rezonans (MR) dır. Bu görüntüleme yöntemleriyle meso ölçeğin yanı sıra nano ve mikro ölçekte ki geometrilerde de incelemeler yapılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan incelemelerin daha iyi anlaşılabilmesi için kısa bir literatür taraması yapıldığında son yıllarda çalışma konusunun popüler bir konu olduğu görülmektedir [1-9]. Griffith ve Genant çalışmalarında kemik yoğunluğunun kemik mukavemetine olan etkisinin önemli olduğunu belirtmekle birlikte bunun tek başına yeterli olmadığını özellikle kemik mikro mimarisine ait özelliklerinde kemik mukavemetinde mutlaka dikkate alınması gereken parametreler olduğunu ortaya koymuşlardır [10]. Lai ve Ark. çalışmalarında kemik yapısının mikro mimarisinin detayları ile ilgili çalışma yapmıştır [11]. Genant ve Jiang çalışmalarında trabecular yapıdaki kemik dokusunu esas alarak non invazive görüntüleme tekniklerini birbirleri ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar özellikle trabecular kemik dokusunun incelenmesi sırasında kullanılması gereken çözünürlük değerleri hakkında bilgilendiricidir[12]. Teo ve ark. CT dilim yoğunluğunun domuz vertebra süngerimsi kemiğinin mikro yapısının ve mekanik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir [13]. Altıntaş ise yapmış olduğu çalışmada Micro-CT ile taranmış trabeküler kemik mo-

dellerinde dilim kalınlığı değişiminin serbest titreşim özelliklerine olan etkilerini incelemiştir[14].

2 Materyal ve Metod

Bu çalışmada kullanılan malzeme ve metotlar hakkında bilgi vermeden önce, CT ve MR dan elde edilen görüntülerin detaylarına değinelim. CT görüntüleri büyütüldüğünde bir takım karelere ulaşılır. Bu kareler, voksel ve piksellerden (şekil-1) oluşmaktadır. Bilgisayarda ki görüntüler voksel ve pikseller sayesinde olmaktadır. Voksel bir pikselin 3 boyutlu karşılığıdır; piksel bir noktayı 2 boyutlu olarak tanımlarken, voksel bir noktayı 3 boyutlu uzamda tanımlayan grafik bilgisidir. Voksel bir birim hacimdir ve sayısal resim elemanı olan piksele üçüncü bir boyut ekler. Pikselleri bir görüntüdeki kare birim elemanları olarak düşünürsek, vokseller de 3B uzayda kübik birim elemanlar olarak düşünülebilir. Vokseller, 3B uzaydaki her noktanın geometrik, fiziksel ve radyometrik özelliklerini tanımlar. Bu veriler üç boyutlu bir matriste saklanır. Her voksel, renk, matlık, yoğunluk ve ısı gibi bazı ölçülebilir özellikleri ifade eden sayısal bir değere sahiptir.



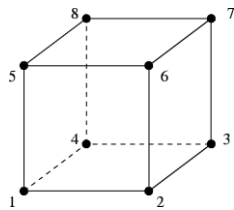
Şekil 1 Voksel ve pikselin gösterimi

Voksel elemanlar birleşerek üç boyutlu sonlu eleman modelinin oluşmasına yardımcı olurlar. Bu aşamada hesaplamaların yapılabilmesi için analiz yapılacak olan modelin tek parça olarak ABAQUS® programına aktarılması gerekmektedir. Rijitlik matrisi sağlanmaz ise program çözüm yapmamaktadır. Bu nedenle seçilen örneklere floodfill algoritması uygulanmış olup böylelikle örneğin kendi içerisinde bir bütünlük sağlanmıştır. Floodfill algoritması sayesinde bağlantısı olmayan parçalar tespit edilerek, modelden ayrılır. Bu sayede model tek parça halinde ABAQUS® programına aktarılabilir.

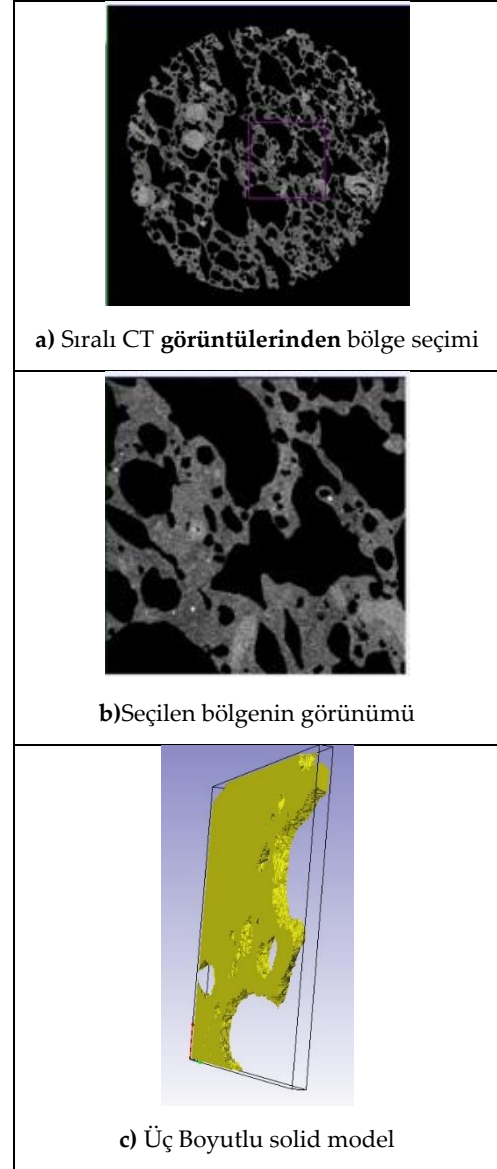
Analizlerin yapılabilmesi ABAQUS® programı tarafından çözümlenmesi yapılacak bir sonlu eleman modeline dönüştürülmesi bir dizi görüntü işlem,

vokselizasyon ve format dönüşümü işleminin uygulanması ile mümkündür. Bu amaçla Altıntaş tarafından CUBOID-SI2FE isimli bir MATLAB® scripti geliştirilmiştir[14, 15, 16, 17]. CUBOID-SI2FE bünyesinde threshold, rekonstrüksiyon ve kendine özgü bir floodfill algoritmasını barındıran kompakt bir yazılım olup, sıralı MR görüntüsü dosyalarını direkt olarak ABAQUS® programının kullanabileceği hale getirmektedir. CUBOID-SI2FE tarafından gerçekleştirilen işlemler aşağıda anlatılmaktadır.

Micro-CT data setlerinde yer alan görüntü dataları ilk olarak piksellere dilim kalınlığı belirtilerek 3B voksel elemanlar oluşturulur. Oluşturulan voksellerin köşe nokta numaraları ABAQUS® girdi dosyalarının data yapısına uygun olarak verilir ve piksellerin gri skaladaki değerleri ilgili vokselere atanır. Piksellerin skala ki değerleri 0 ile 255 arasındadır. Tam siyah eşik değeri 0, tam beyazın ise 255'dir. Göz ile kontrol edilerek, uygun olduğu düşünülen bir eşik değer numunelerin dokusuna ait voksellerin belirlenmesinde kullanılır ve bu işlem sayesinde numunelerin dokusu diğer dokulardan ayrılırlar(şekil-3 ve şekil-4). Numune dokusu olarak işaretlenmiş voksel elemanların bu aşamada analizlerde kullanmak için ABAQUS® girdi dosyasına çevrilmesi, CUBOID-SI2FE Matlab scripti tarafından voksel elemanlarının, doğrusal hexahedral eleman tipi C3D8 (şekil-2) olarak tanımlanması yapılarak eleman ve düğüm nokta numaraları yeniden düzenlenerek, datanın ABAQUS® programında işlenebilecek hale gelmesi sağlanmış olur.



Şekil-2 Doğrusal hexahedral eleman tipi C3D8



Şekil-3 CT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesi

Bu çalışma kapsamında temel olarak çözünürlük değerlerine bağlı olarak modellerin yapısı ve özellikleri ile söz konusu modellerin analizlere verdikleri cevaplar incelenmiştir. Tablo2 kullanılan numune özellikleri verilmektedir. Sadece çözünürlüğün diğer parametrelerden etkilenmeden analizlerini yapabilmek için surface smooting yapılmadan doğrudan voxel tabanlı sonlu elemanlar metodu değişiklik yapmadan kullanılmıştır.

Tablo-1 Malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Numune-3
Yoğunluk (t/mm ³)	2,65E-10
Elastisite (N/mm ²)	32000
Poisson	0,31

3 Analiz

Çalışma kapsamında çözünürlüğün voksel tabanlı model ve analiz sonuçları üzerindeki etkileri ele alınacaktır. Sonlu eleman modeli oluşturulacak numunenin çoğu kez görüntü dataları farklı dilim kalınlığında olmaktadır. Bu dilim kalınlığının modelin mekanik davranışlarını etkilediği düşünülmektedir. Çünkü dilim kalınlığı arttıkça numunenin yapısındaki detaylar hakkındaki bilgi azalmaktadır, var olan görüntüler ortadan kalkmakta veya olmayan yeni bağlantılar ortaya çıkabilmektedir. Bu durumların model üzerindeki etkileri, doğal frekans analizi ve burkulma analizi üzerindeki etkileri dört ayrı başlık altında aşağıda incelenmiştir.

3.2.1 Model Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde, numuneye ait Micro-CT data setinde bulunan ardışık CT görüntü dosyaları eşit aralıklar ile sıralanarak planda çalışma alanları seçilmiştir. Numune modeli için iki farklı dilim kalınlığı değeri alınarak incelemeler yapılmıştır.

Bu analizde kullanılan numunemizin boyutları 1,3979mm*1,3979mm*2,2027 mm boyutlarına sahip dikdörtgen bir parçadır. Bu parçanın malzeme özellikleri ise yoğunluk= 2,65E-10(t/mm³), elastisite= 31500 (N/mm²) ve poisson = 0,31 olarak belirlenmiştir. Threshold değeri 70-255 olan ve dilim kalınlıkları 0,04236mm ve 0,02118mm alınarak elde edilen numunelerin toplam nokta sayısı, eleman sayısı ve yaklaşık hacimleri tablo-2 de verilmiştir.

Tablo-2 İki farklı dilim kalınlığındaki nokta sayısı, eleman sayısı ve yaklaşık hacim

Dilim Kalınlığı	0,04236 mm	0,02118mm
Toplam Nokta Sayısı	34800	210431
Eleman Sayısı (hexahedral C3D8)	17422	136705
Toplam Model Hacmi (yak.)	1,3242 mm ³	1,2989 mm ³

Tablo-2 de iki farklı dilim kalınlığı için elde edilen değerlere bakıldığında dilim kalınlığı azaldığı zaman nokta sayısının yaklaşık 6 kat arttığı, eleman sayısının yaklaşık 7,8 kat arttığı fakat yaklaşık hacmin 0,02 kat azaldığı görülmektedir.

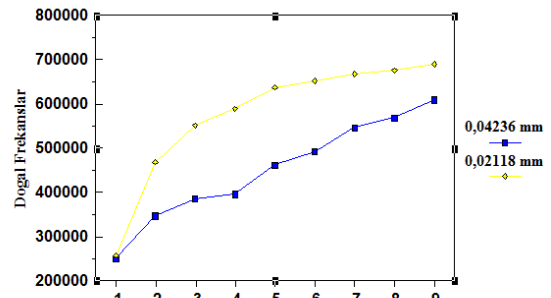
3.2.2 Doğal Frekans Üzerindeki Etkileri

Bu aşamada farklı dilim kalınlıkları seçimi ile oluşturulan modelin doğal frekanslara olan etkileri incelenmiştir. Dilim kalınlıkları 0,04236mm ve 0,02118mm için elde edilen numunelerin ayrı ayrı ABAQUS® programında üç boyutlu solid modelleri oluşturulmuş ve oluşan elemanların ilk dokuz doğal frekans değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler tablo-3 de verilmiştir.

Tablo-3 İlk dokuz mod için doğal frekans değerleri

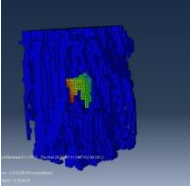
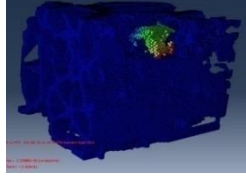
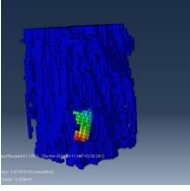
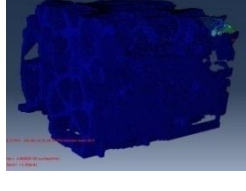
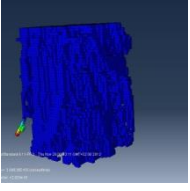
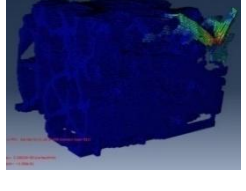
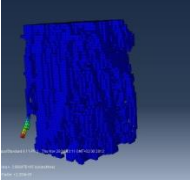
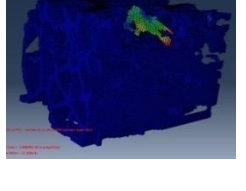
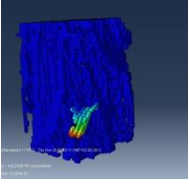

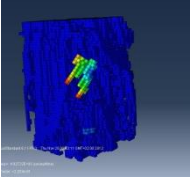
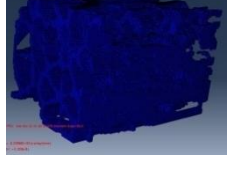
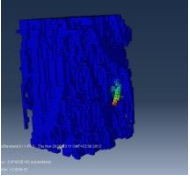
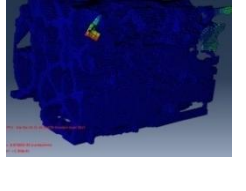
Dilim Kalınlığı	0,04236mm	0,02118mm
1.Doğal Frk.	251523 HZ	257666 HZ
2.Doğal Frk.	347181 HZ	468363 HZ
3. Doğal Frk.	386839 HZ	551631 HZ
4. Doğal Frk.	396547 HZ	589629 HZ
5. Doğal Frk.	462205 HZ	638568 HZ
6. Doğal Frk.	492722 HZ	652906 HZ
7. Doğal Frk.	547403 HZ	667502 HZ
8. Doğal Frk.	570040 HZ	675201 HZ
9. Doğal Frk.	609193 HZ	689653 HZ

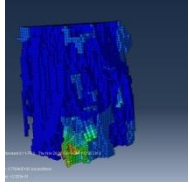
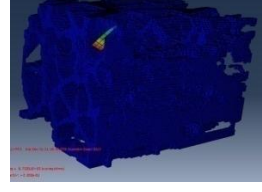
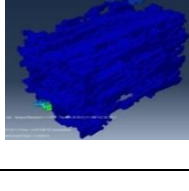

Şekil-4 de 2 farklı dilim aralığı için elde edilen numunelerin ilk dokuz modunda oluşan doğal frekans değerleri verilmiştir. Dilim kalınlığı küçük olan (0,02118mm) değerinde doğal frekanslar en büyük çıkmıştır. Dilim kalınlığının düşmesiyle birlikte doğal frekans değerlerinin düştüğü görülmektedir

**Şekil-4** İlk dokuz mod için doğal frekans değerleri

Şekil-4'deki grafiğe ait doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu bölgeler tablo-4' de sunulmuştur.

Tablo-4 İlk dokuz mod şekilleri

Dilim Kalınlıkları	0,04236mm	0,02118mm
Mod1		
Mod2		
Mod3		
Mod4		
Mod5		
Mod6		
Mod7		

Mod8		
Mod9		

Tablo-4'e bakıldığında aynı modelin sadece eşik dilim kalınlıkları farklı alınmasıyla oluşturulmuş modellerinde doğal frekans değerlerinin değiştiği görülmektedir. Buna ek olarak aynı mod numarasında mod şekillerinin ve bu mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu bölgelerinin aynı olmadığı görülmektedir. Bunların aynı mod olabilmesi için tam olarak aynı bölgesinin aynı hareketi yapması gerekmektedir.

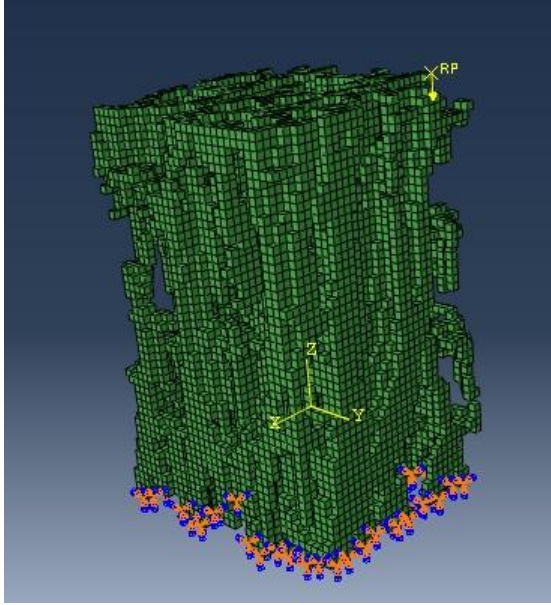
5. moda bakıldığında, mod numarası aynı olmasına rağmen tüm mod şekillerinin ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu yerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Kısaca özetlersek, bir cisim araya bir diğerinde olmayan ilave mod almıştır. Bu durumun oluşması, dilim aralıklarının farklı seçiminin doğal titreşim davranışı üzerindeki etkisinin sadece sayısal değer olarak değil, aynı zamanda mod yapılarının sıralamalarını değiştirecek kadar önemlidir.

3.2.3 Burkulma Davranışı Üzerindeki Etkileri

Bu aşamada farklı dilim kalınlıkları seçimi ile oluşturulan modellerin burkulma davranışına olan etkileri incelenmiştir. İncelenen modlarda doğrudan anizotropik vokseller kullanılmıştır. Bu sebeple önceki titreşim örneğinden farklı olarak sonuçlar sonlu eleman boyut etkisinden arındırılmamıştır. Bu durum güncel problemlerde gözardı edilerek yapılan analizlere karşılık gelmektedir. 3.2.1 de özellikleri verilen numuneler için ilk beş moda karşılık gelen burkulma yükleri incelenecektir.

Numunenin threshold aralık değeri 70-255 olarak alınmış olup dilim kalınlıkları 0,04236mm ve 0,02118mm için burkulma yükleri incelenmiştir.



Şekil-5 Numunenin yüklenmiş ve mesnetlenmiş görünümü

Şekil-5 de görüldüğü gibi sistem altta x,y,z yönünde hem dönme hem de deplasman değeri sıfır olacak şekilde sınır koşulları verilmiştir. Sistem üstte ise x,y,z yönünde dönme sıfır ve x,y yönünde deplasman sıfır olacak şekilde sınır koşulları verilmiştir. Daha sonra z yönünde 1 N luk yük uygulanarak tablo37 de verilen ilk beş moda karşılık gelen burkulma yükleri hesaplanmıştır.

Tablo-5 İlk beş moda karşılık gelen burkulma yükleri

D.K.	0,04236mm	0,02118mm
Burkulma yükleri (N)	79,202	24,588
	102,4	33,011
	106,02	38,819
	111,86	53,906
	125,58	55,789

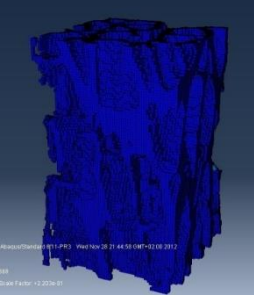
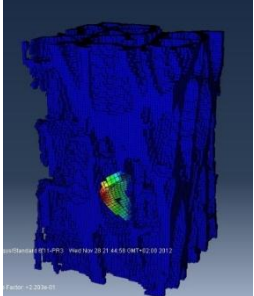
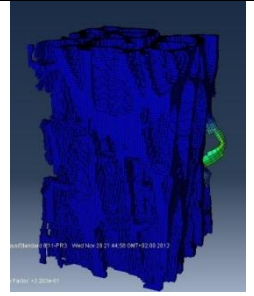
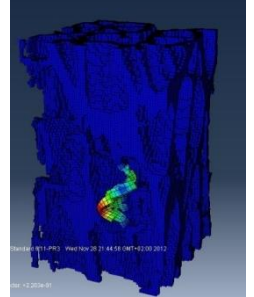
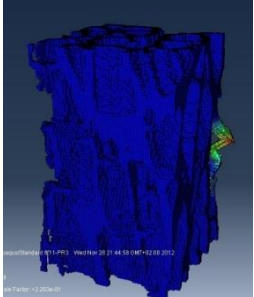
Tablo-5 e bakıldığında 1., 2. ve 3.moda karşılık gelen burkulma yükü dilim kalınlığı azaldıkça yaklaşık 0,65 kat azalmaktadır. Diğer modlara karşılık gelen burkulma yükleri ise dilim kalınlığı azaldıkça yaklaşık 0,50 kat azalmaktadır.

Tablo-6 da mod şekilleri ve o modlara karşılık gelen kuvvetler görülmektedir. Dilim kalınlığının değişmesiyle mod şekillerini etkilendiği tablo-6 da açıkça görülmektedir.

Tablo-5a İlk beş moda karşılık gelen burkulma yükleri ve şekilleri

$\mu = 0.04236 \text{ mm}$	
Mode 1-79,202 N.	
Mode 2-102,4 N.	
Mode 3-106,02 N.	
Mode 3-111,86 N.	
Mode 3-125,58N.	

Tablo-5b İlk beş moda karşılık gelen burkulma yükleri ve şekilleri

$\mu = 0.02118 \text{ mm}$	
Mode 1-24,588 N.	
Mode 2-33,011 N.	
Mode 3-38,819 N.	
Mode 3-53,906 N.	
Mode 3-55,789 N.	

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında mikro yapıların tersine mühendislik yöntemleri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve model geometrileri incelenmiştir.

Çözünürlüğün voksel tabanlı model ve analiz sonuçları üzerindeki etkisi de oluşturulan 5 ayrı numune üzerinde ele alınmıştır. Farklı dilim kalınlıkları alınarak oluşturulan modellerde dilim kalınlığının artırılmasıyla nokta sayısının 0,84 kat azaldığı, model eleman sayısının 0,86 kat azaldığı ve model hacminin ise 0,02 oranında azaldığı elde edilmiştir. Farklı dilim kalınlığı seçiminin eşik değer seçimine göre model nokta sayısında ve eleman sayısında çok daha fazla etkin olduğu ama model hacminde çok fazla değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Doğal frekans için yapılan analizlerde dilim kalınlığı büyük olan değerlerde doğal frekanslar en büyük çıkmıştır. Dilim kalınlığının düşmesiyle birlikte doğal frekans değerlerinin düşmüştür. Yapılan burkulma analizlerinde dilim kalınlığının artmasıyla burkulma yükü artmıştır.

5 Kaynaklar

[1]Berger M., Levine J.A., Nonato L.G., Taubin G., Silva C.T. An End-to-End Framework for Evaluating Surface Reconstruction, SCI Technical Report, No. UUSCI-2011-001, SCI Institute, University of Utah, 2011.

[2]CIBC. Note: BioImage: A SCIRun Power App for processing and visualizing medical image volumes. Scientific Computing and Imaging Institute (SCI), 2011.

[3]CIBC. Note: BioPSE: Problem Solving Environment for modeling, simulation, image processing, and visualization for biomedical computing applications. Scientific Computing and Imaging Institute (SCI), 2011.

[4]Ha .L.K., Krueger J., Comba J., Joshi S., Silva C.T. Optimal Multi-Image Processing Streaming Framework on Parallel Heterogeneous Systems. In Proceedings of Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization 2011

[5]Kim S.H., Fonov V., Piven J., Gilmore J., Vachet C., Gerig G., Collins D.L., Styner M. Spatial Intensity Prior Correction for Tissue Segmentation in the Developing human Brain. In Proceedings of IEEE ISBI 2011, pp. (to appear). 2011.

[6]Valerio P., Xavier T., Hans H., Julien T. Topological Methods in Data Analysis and Visualization: Theory, Algorithms, and Applications (Mathematics and Visualization). Springer, 2011.

[7]Rosen P., Popescu V. An Evaluation of 3-D Scene Exploration Using a Multiperspective Image Framework. In Visual Computer 27 (Computer Graphics International 2011), Vol. 27, No. 6-8, Springer-Verlag New York, Inc., pp.

[8]Schott M., Grosset A.V.P, Martin T., Pegoraro V., Smith S.T., Hansen C.D. Depth of Field Effects for Interactive Direct Volume Rendering. In Proceedings of Eurographics/IEEE Symposium on Visualization 2011, Vol. 30, No. 3

[9]Shi F., Shen D., Yap P.-T., Fan Y., Cheng J.-Z., An H., Wald L.L., Gerig G., Gilmore J.H., Lin W. CENTS: Cortical Enhanced Neonatal Tissue Segmentation. In Human Brain Mapping HBM, Vol. 32, No. 3, Note: ePub 5 Aug 2010, pp. 382--396. March, 2011

[10]Griffith J. F. and Genant H. K. Bone mass and architecture determination: state of the art, J. Clin. Endocrinol.Metab.,2008,22(5), pp. 737-764 .

[11]Lai Y. M., Quinb H.Y., Lee K.K.H. And Chan K.M. Regional differences in trabecular BMD and micro-architecture of weight-bearing bone under habitual gait loading—A pQCT and microCT study in human cadavers. Bone, 2005,37, pp. 274 – 282 .

[12]Genant H.K.and Jiang,Y. Advanced imaging assessment of bone quality, Annals New York Academy of Sciences,2006, 1068,pp.410–428 .

[13]Teo J.C.M., Si-Hoe K.M., Keh J.E.L. and Teoh S.H. Relationship between CT intensity, micro-architecture and mechanical properties of porcine vertebral cancellous bone, Clin.Biomech,2006, 21, pp.235-244.

[14]Altintas G. Effect of slice thickness variation on free vibration properties of micro-ct based trabecular bone models, 2nd International Symposium on Computing in Science & Engineering, June 1-4 (2011) Kuşadası – TURKEY.

[15]Altintas G., Erdem R. T. Effect of micro-ct slice intensity on natural vibration behavior of cancellous bone models based on reverse engineering techniques, Procedia Technology, 1, 2012 , 318 – 322,

[16]Altintas G. Effect of slice step size on prediction of natural vibrationproperties of bone tissue. Mathematical and Computational Applications,2012, 17(3), pp. 235-243.

[17]Altintas G. Node-id based non-recursive flood fill algorithm for non-uniform discrete solid domains . 2nd World Conference On Information Technology, November23-27 Antalya, Turkey (2011).

[18]ABAQUS® Analysis User's Manual