

DEĞER SEÇİMİNİN VOKSEL TABANLI SONLU ELEMAN MODELLERİNİN DOĞAL TİTREŞİM DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Filiz ALTINTAŞ^{1*}, B. Gültekin SINIR¹

¹Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140 Manisa, TÜRKİYE

Özet: Hasarsız görüntüleme teknikleri ile elde edilen dataların temel girdi olarak kullanıldığı voxel tabanlı sonlu eleman metotları tıp, mekanik ve malzeme mühendisliği gibi çeşitli branşlarda karşılaşılan mikro ve nano ölçekteki problemlerin çözümlenmesinde artan bir kullanım alanına sahiptir. Voxel tabanlı sonlu eleman modelleri bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans (MR) gibi görüntüleme tekniklerinden elde edilen görüntü kalitesinden doğrudan etkilenmekte olup yapılan bu çalışmada, söz konusu etkilerin mikro ölçekte kompleks geometriye sahip yapıların doğal titreşim analizi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, vertebral trabecular kemik dokusunun Mikro-BT görüntü datası kullanılarak aynı dilim kalınlığına sahip sadece eşik değerleri gözün yanılma aralığı sayılabilecek değerlerde değiştirilmiş üç modelin doğal titreşim modları incelenmiştir. Söz konusu sonlu eleman modellerinin ortaya koyduğu doğal titreşim davranışları sadece sayısal değer farklılıkları değil, bunun yanında aynı mod numarasına sahip olmalarına rağmen, mod şekilleri ile en büyük şekil değiştirmelerin olduğu yerlerin aynı olmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Voxel tabanlı sonlu elemanlar metodu, Dilim Kalınlığı, Poroz Malzeme, Doğal Frekans*

INVESTIGATION ON EFFECT OF TRESHOLD VALUES ON NATURAL VIBRATION BEHAVIOR OF VOXEL BASED FINITE ELEMENT MODELS

Abstract: Voxel based finite elements methods (VB-FE) in which obtained data by non-damaged imaging techniques are used as main input have an increasing area of usage while solving micro and nano scaled problems in several fields as medicine, mechanical and material engineering. Voxel based finite elements models are directly effected by image quality obtained by imaging techniques as computed tomography and magnetic resonance. In this study, effects of related subjects on natural vibration analysis of structures which have micro scaled complex geometry are investigated. For this purpose, natural vibration modes of three models which have same slice thickness and whose thresholds are changed in small values by using Micro-BT imaging data of vertebral trabecular bone tissue are studied. Natural vibration behaviors of related finite elements models have numerical differences. Besides, although they have same mode numbers, the places where mode shapes and biggest deformations occur are also different.

Keywords: *Voxel based finite elements method, slice thickness, porous material, natural frequency*

*Filiz ALTINTAŞ
filizuygur@hotmail.com

1. GİRİŞ

Bilgisayarlı Tomografi (BT) ve Manyetik Rezonans (MR), son yıllardaki gelişmeler neticesinde bir çığır açmış en modern teknolojilerden olmuştur. Bu hasarsız görüntüleme teknikleri ile elde edilen dataların temel girdi olarak kullanıldığı voksel tabanlı sonlu elemanlar metotları tıp, mekanik, inşaat sektörü ve malzeme mühendisliği gibi bazı branşlarda karşılaşılan mikro ve nano ölçekteki problemlerin çözülmesinde artan bir kullanım alanına sahiptir. Bu görüntüleme tekniklerinin belki de en önemli üstünlüğü üzerlerinde mekanik deneylerin yapılamayacağı canlı dokularında taşıyıcı modellerin oluşturulmasında kullanılabilecek bilgiyi sağlayabilmesidir.

Bu çalışma kapsamında yapılan incelemenin daha iyi anlaşılabilmesi için, BT ve MR görüntülerinden üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmasında malzemelerin mekanik özellik ve davranışlarının incelendiği aşağıdaki referans taramasının sunulması faydalı olacaktır.

Zhang ve Arkadaşlarının görüntü verilerinden doğrudan hacimsel ağların kaliteli ve uyarlanabilir bir şekilde elde edilmesini sağlayan bir algoritma elde etmişlerdir [1]. Yine Zhang ve arkadaşları heterojen malzemelerden oluşan kompozit bölgelerin ağlarını tetrahedral ve heksahedral elemanlardan oluşan ağların otomatik olarak elde edilmesini sağlayan bir algoritma sunmuşlardır [2]. Yüksek çözünürlüklü sıralı görüntü verilerinden türetilen sonlu eleman modelleri mikro-mekanik yaklaşımlara imkân sağlamış olup bu modellerin kullanılması ile elde edilen sonuçlar klasik yöntemler ile elde edilen sonuçlardaki hata paylarının değerlendirilmesinde önemli bir standart olarak kabul görmektedir. Phar ve Zysset BT datalarından elde edilen mikro sonlu eleman modellerinin gelişmiş sürekli sonlu eleman modelleri ile karşılaştırılarak doğruluklarını

incelenmiştir [3]. Soenke ve arkadaşlarının çalışmalarında rekonstrüksiyon prosedürleri sonlu eleman prosedürleri ile bağlı olarak ele alınmış ve bu konuda kapsamlı bir literatür araştırması sunmuşlardır [4]. Chevalier ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma oldukça bilgilendirici olup, voksel tabanlı sonlu elemanlar metodu ile süngerimsi kemik yapısına ait fiziksel özellikler, kemik dokusunun hacmi Mikro-BT tabanlı rekonstrüksiyonlar kapsamında incelenmiştir. Yapmış oldukları nümerik hesaplamaların nano ölçekli deneylerinde içinde bulunduğu mekanik testler ile doğruluğunu incelemişlerdir [5]. Hara ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarında Bilgisayarlı Tomografi verilerinin eşik değer metoduyla segmentasyonu sırasında eşik değer değerinin ve eşik değer seçiminin doku modülü üzerinde çok önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır [6]. Kemik yapısının mikro mimarisi ile yapılan çalışmalar arttıkça mikro mimarinin detaylarının önemini arttırdığını Lai ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında ortaya koymuşlardır [7]. Bir tersine mühendislik uygulaması olan görüntülerden sonlu elemanların elde edilmesi bir birinden farklı çok sayıda adımı ve her bir adımın çok sayıda farklı parametre içermesi sebebi ile parametrelerin belirlenmesine bağlı olarak ortaya çıkan modellerin analiz sonuçlarında çok büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Özellikle görüntülerin sahip olduğu çözünürlükler, dilim kalınlıkları ve uyum parametreleri voksel tabanlı sonlu elemanlar metodu söz konusu olduğunda kritik önem taşırlar. Yapılan bu çalışmada tersine mühendislik yöntemlerinde sıklıkla kullanılmaya başlayan Mikro-BT görüntüleme tekniği ile elde edilen görüntüler kullanılarak 3 boyutlu gerçekçi modeller oluşturulmuştur.

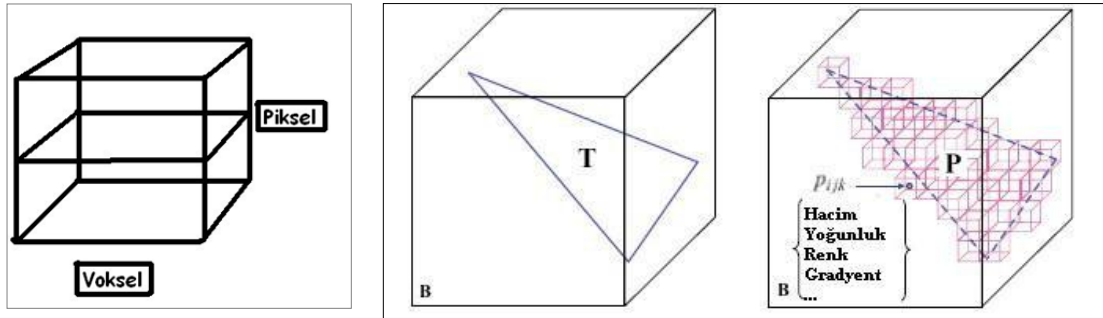
Mikro ölçekte yapısal detaylara sahip olan cisimlerin mekanik davranışlarının belirlenmesinde homojenize edilmiş malzeme

özelliklerinin ve yaklaşık geometrilerin kullanılması yaygın bir yaklaşımdır. Ancak cismin mikro ve nano ölçekteki davranışlarının önemli olduğu problem tiplerinde yaklaşık yöntemler uygulayarak genel davranışlarını belirlemek yerine mikro lokal özelliklerin göz önüne alınarak çalışılması amaca daha uygun bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte mikro ölçekte yapılan uygulamalarda artmıştır ve yapıların mikro ölçekteki titreşim davranışları makro ölçektekinden oldukça farklı olabilmektedir. Bu farklılık özellikle mikro yapının hesaba dahil edilmesi ile ortaya çıkmakta olup mikro yapının tespitinde kullanılan yöntemlerde yer alan parametreler yapının elde edilmesinde mutlaka en doğru şekilde kullanılmasını gerektirir.

Bu amaçla yapılan çalışmada görüntüleme sistemlerinin eşik değer seçiminin mikro yapıların doğal titreşim davranışına olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL METOT

Bu çalışmada kullanılan malzeme ve metotlar hakkında bilgi vermeden önce, görüntünün nasıl oluştuğuna ve görüntü elemanlarının görevlerine biraz değinilecek olursa; MR görüntüsü devamlı şekilde büyütülürse, en sonunda bir takım karelere ulaşılır. Bu kareler, bilgisayarın görüntü oluşturmak için kullanmak zorunda olduğu voksel ve piksellerdir. Voksel, sinyalin alındığı esas doku birim hacmidir. Piksel ise ekrana yansıyan iki boyutlu alandır ve vokselden kaynaklanan sinyal, ekranda (görüntüde) piksele düşen alanda, parlaklık olarak yansır.



Şekil 1. Voksel ve piksel

Vokseller ve pikseller, örnek veriyi hacimsel veri grupları veya görüntülerle gösterir. Hacimsel veride, örnek veriler 3B olarak temsil edilir. Bu anlamda hacimsel veri, sayısal görüntünün karşılığıdır. Voksel veri yapısı, modelleme için kullanılabilir bir veri yapısı türüdür. Bu veri yapısı, bilgisayar donanımında yaşanan hızlı gelişmelerle kullanışlı hale gelmiş yeni bir veri yapısıdır. Bir voksel, altı yüze, sekiz köşeye ve on iki

kenara sahip olan dörtgensel bir küp olarak tanımlanabilir. Voksel bir birim hacmidir 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. Bu 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 floodfill algoritması kullanılarak, kesinlikle kemik dokusu olduğundan emin olunan bir alan işaretlenerek floodfill algoritması uygulanmış, böylelikle sanki kemik dokusu olan yerlerden bir sıvı dökülmüş gibi bağlantılı tüm yerler işaretlenmiş olur. Böylece bağlantısı olmayan parçalar tespit edilerek, modelden ayrılır ve model tek parça halinde ABAQUS® programına aktarılır. Bu çalışmada elde edilen numunelerin, doğal titreşim analizleri yapılmıştır. Söz konusu analizlerin yapılabilmesi için ABAQUS® programına aktarılan numunelerin doğal titreşim analizi için malzeme özellikleri ve sınır koşulları, belirtilerek analizler yapılmıştır. Ancak numunelerin 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 ve Erdem [8] tarafından CUBOID-SI2FE isimli bir MATLAB® scripti geliştirilmiştir. CUBOID-SI2FE bünyesinde eşik değer, rekonstrüksiyon ve kendine özgü bir floodfill algoritmasını barındıran Altıntaş [9] tarafından oluşturulmuş kompakt bir yazılım olup, sıralı MR görüntüsü dosyalarını direkt

olarak ABAQUS® programının kullanabileceği hale getirmektedir. CUBOID-SI2FE tarafından gerçekleştirilen işlemler aşağıda anlatılmaktadır.

Mikro BT data setlerinde yer alan görüntü dataları ilk olarak 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 voksellere atanır. (Piksellerin skala ki değerleri 0 ile 255 arasındadır. Tam beyazın eşik değeri 255, tam siyahın ise 0'dır. Kullanılan Mikro-BT görüntü dosyalarında kemikler beyaz renktedir.) Göz ile kontrol edilerek, uygun olduğu düşünülen bir eşik değer kemik dokusuna ait voksellerin belirlenmesinde kullanılır ve bu işlem sayesinde kemik dokusu diğer dokulardan ayrılırlar.

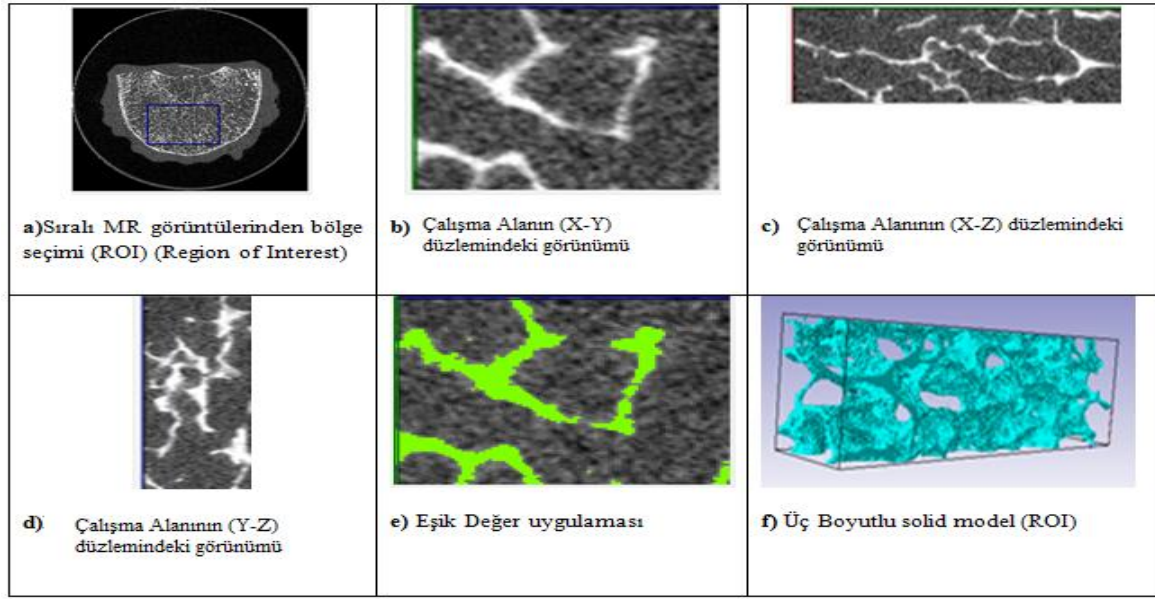
Kemik dokusu olarak işaretlenmiş voksel elemanların bu aşamada analizlerde kullanmak için ABAQUS® girdi dosyasına çevrilmesi, CUBOID-SI2FE Matlab scripti tarafından voksel elemanlarının, doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4 olarak tanımlanması yapılarak eleman ve düğüm nokta numaraları yeniden düzenlenerek, datanın ABAQUS® programında işlenebilecek hale gelmesi sağlanmış olur.

Seçilen çalışma bölgesinin {Region Of Interest (ROI) }, ABAQUS® programında girilen malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir. Doğal Frekans Analizindeki Malzeme Değerleri:

Kütle Yoğunluk Değeri = $1,81 \cdot 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$

Elastisite Modülü = 17200 N/mm^2

Poisson Oranı = 0,295



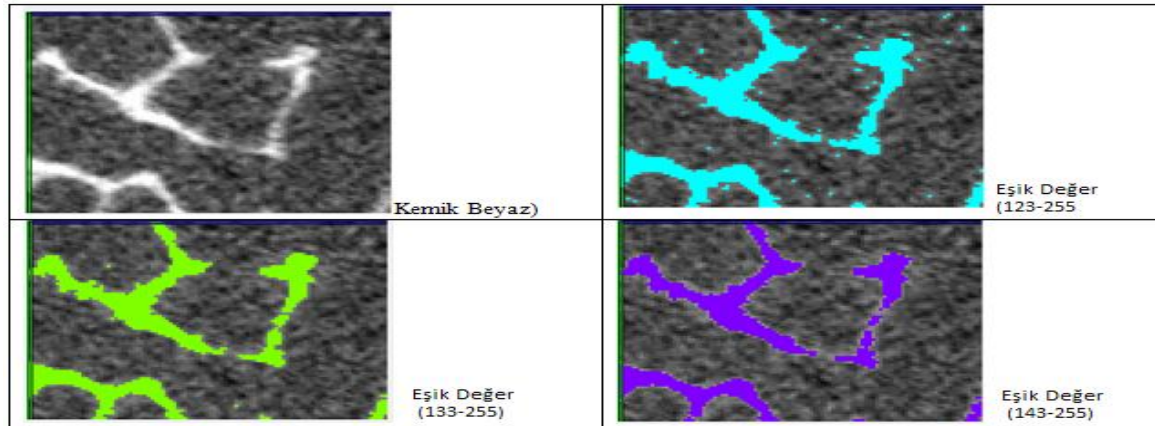
Şekil 2. MR görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesi

Bu tarz çalışmalarda kemik dokusu veya malzeme seçimi görsel onaylama eşliğinde eşik değer algoritmasının uygulanmasını gerektirir. Ancak görsel onaylama süreci sırasında kişisel farklılıklar sebebi ile eşik değer seçim kararlarında küçük oynamalar olmaktadır. Çalışma kapsamında görsel farklılıklardan kaynaklanabilecek eşik değer farklılıklarının elde edilen modellere ve dolayısı ile analiz sonuçlarına olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, gözün yanılma sınırı sayılabilecek değerlerde eşik değerleri seçilerek doğal frekans

değerleri ve mod yapıları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

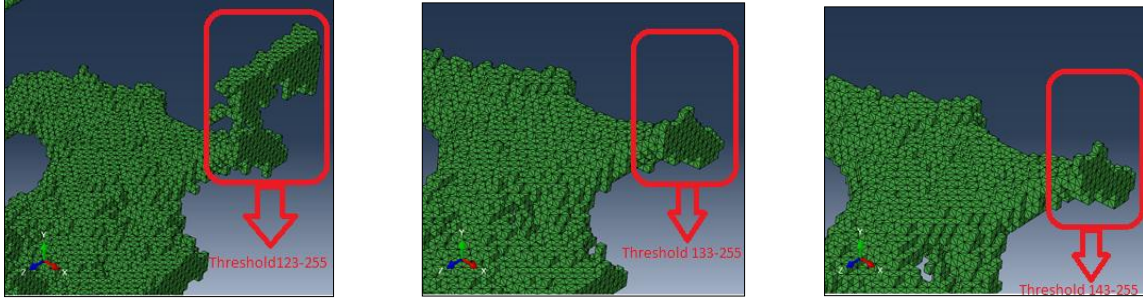
3. EŞİK DEĞER SEÇİMİNİN MALZEMENİN DOĞAL FREKANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Aynı (L3) omuru numunesine ait Mikro-BT data setinde bulunan ardışık MR görüntü dosyaları 0,037 mm'lik eşit aralıklar ile sıralanarak planda {Region Of Interest (ROI)} ilgilenilen bölge seçilmiştir. Aynı eleman modeli üzerinde sadece eşik değerler değiştirilerek işlemler yapılmıştır.



Şekil 3. Sistemin eşik değer verilmemiş ve üç farklı eşik değer verilmiş (X-Y düzlemindeki) görüntüleri

Her üç eşik değerli sistem ayrı ayrı ABAQUS® programında çözülmüştür. ABAQUS® programında üç boyutlu solid eleman haline getirilen 3,663 mm*2,96 mm*12,025 mm boyutlarındaki dikdörtgen parçanın malzeme özellikleri belirlenmiştir



Şekil 4. Üç Farklı Eşik Değerli sistemin ABAQUS Programındaki Görüntüleri

Şekil 4.'te Eşik Değer (Threshold) denilen büyüklüğü gözün tolerans aralığı olabilecek üç farklı değer verildiğinde aynı alanda meydana gelen farklılık çok net gösterilmektedir. Görsel doğrulama yapılarak belirlenen bu eşik değer aralığı kemik dokusuna ait voksellerin belirlenmesinde kullanılır, bu sayede taşıyıcı dokular diğer dokulardan ayrılır. Piksellerin gri skalada ki

değerleri 0 ile 255 arasındadır. Tam beyazın eşik değeri 255, tam siyahın ise 0'dır. Kullandığımız Mikro-BT görüntü dosyalarında kemikler beyaz renktedir. Bu nedenle 123-255, 133-255, 143-255 aralıkları kullanılmıştır. Bu çalışmada 133, eşik değer olarak alınmış olup, ± 10 tolerans aralığında doğal frekans modlarında nelerin değiştiğine bakılmıştır.

Çizelge 1. Modellere ait eleman sayıları ve toplam model hacimleri

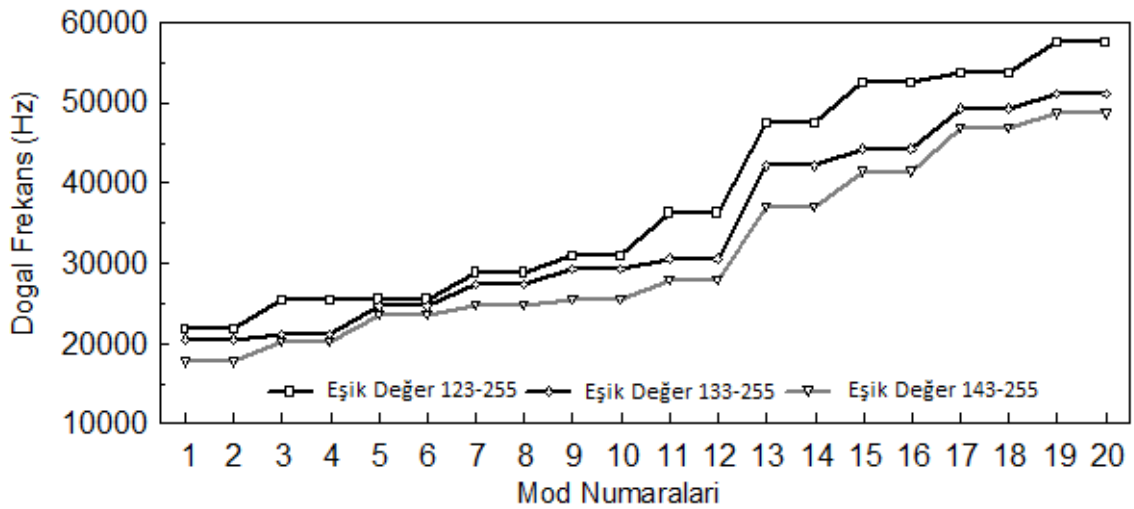
Eşik Değer	123-255	133-255	143-255
Eleman Sayısı (tetrahedral C3D4)	5631620	4974470	4442980
Toplam Model Hacmi (Yaklaşık) (mm ³)	57,05	50.39	45,01

Çizelge 1 'de görüldüğü üzere, eşik değer seçimi eleman sayısı ve model hacmini değiştirmektedir. Seçilen eşik değerlerden en küçük olanında eleman sayısı ve toplam model hacminin en büyük olduğu

görülmektedir. Üç farklı eşik değer verilerek oluşturulmuş sistemlerin ABAQUS® programında hesaplanmış ilk yirmi doğal frekans moduna ait frekans değerleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Üç farklı eşik değerdeki doğal frekans modu değerleri ve (133-255) Baz modeline göre yüzde farklılıkları

		Doğal Frekans Değerleri (Hz)			Yüzde Farklar	
		Eşik Değer (123-255)	Eşik Değer (143-255)	Eşik Değer (133-255)	(a) / (c)	(b) / (c)
		(a)	(b)	(c)		
DOĞAL FREKANS MODLARI	1	21891	17694	20538	%6,587	%-13,847
	2	21891	17694	20538	%6,587	%-13,847
	3	25429	20253	21173	%20,101	%-4,345
	4	25429	20253	21173	%20,101	%-4,345
	5	25583	23556	24616	%3,928	%-4,306
	6	25583	23556	24616	%3,928	%-4,306
	7	28967	24682	27354	%5,896	%-9,768
	8	28967	24682	27354	%5,896	%-9,768
	9	30945	25502	29257	%5,769	%-12,834
	10	30945	25502	29257	%5,769	%-12,834
	11	36387	27896	30572	%19,020	%-8,753
	12	36387	27896	30572	%19,020	%-8,753
	13	47537	37039	42097	%12,922	%-12,015
	14	47537	37039	42097	%12,922	%-12,015
	15	52650	41346	44242	%19,004	%-6,545
	16	52650	41346	44242	%19,004	%-6,545
	17	53758	46714	49293	%9,058	%-5,232
	18	53758	46714	49293	%9,058	%-5,232
	19	57654	48607	51008	%13,029	%-4,707
	20	57654	48607	51008	%13,029	%-4,707



Şekil 5. Doğal Titreşim modu Frekans Değerleri

Her üç model de aynı adım aralığına sahip olduğundan, pratikte gözün tolerans aralığı olabilecek üç farklı eşik değeri verilerek oluşturulmuş olduğundan eleman sayısı ve model hacmi değişmektedir. En küçük (Eşik Değer 123-255) değerinde, doğal frekans değerleri en büyük çıkmıştır. Bu çalışmada Thresold değerleri büyüdükçe

doğal frekans değerlerinin küçüldüğü görülmüştür. Beyaz tonların kemik olarak gösterildiğinin bu çalışmaya özel olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 5.'deki grafiğe ait doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu bölgeler aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 3. Doğal Frekans Değerleri ve Mod Şekilleri

Doğal Frekans Değerleri ve Mod Şekilleri					
Eşik Değer (123-255)		Eşik Değer (133-255)		Eşik Değer (143-255)	
Mode 1- 21891 Hz		Mode 1- 20538 Hz		Mode 1- 17694 Hz	
Mode 2- 21891 Hz		Mode 2- 20538 Hz		Mode 2- 17694 Hz	
Mode 3- 25429 Hz		Mode 3- 21173 Hz		Mode3- 20253 Hz	
Mode 4- 25429 Hz		Mode 4- 21173 Hz		Mode 4- 20253 Hz	
Mode 5- 25583 Hz		Mode 5- 24616 Hz		Mode5- 23556 Hz	

Çizelge 3.'e bakıldığında aynı modelin, eşik değerlerin gözün yanılma sınırlarında değiştirilerek oluşturulmuş modellerinde sadece doğal frekans değerlerinin değişmediği, bununla birlikte aynı mod numarasında mod şekillerinin ve bu mod şekillerinin en büyük şekil değiştirmelerinin olduğu bölgelerinin aynı olmadığı

görülmektedir. Bunların aynı mod olabilmesi için tam olarak aynı bölgesinin aynı hareketi yapması gerekmektedir. Örneğin ; 5. moda bakıldığında, mod numarası aynı olmasına rağmen tüm mod şekillerinin ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu yerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Bu durum başka bir şekilde değerlendirilecek olursa, bir cisim araya bir diğesinde olmayan ilave mod almıştır. Bu durumun oluşması, eşik değer seçiminin doğal titreşim davranışı üzerindeki etkisinin sadece sayısal değer olarak değil, aynı zamanda mod yapılarının sıralamalarını değiştirecek kadar önemlidir.

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Mikro-BT görüntülerinden solid model oluşturulması sırasında kullanılan görüntü işlem prosedürleri kapsamında kullanılan parametrelerin voksel tabanlı sonlu eleman modellerinin doğal titreşim davranışlarına etkisi üzerinde durulmuştur.

Eşik değer incelemesinin sonuçları ortaya koymuştur ki, voksel tabanlı sonlu eleman modellerinin doğal titreşim davranışları sadece doğal frekans değerlerini değil, aynı zamanda mod şekillerinin sıralamasını da değiştirmiştir. Gözün tolerans aralığı sayılabilecek eşik değerlerinde doğal frekans değerlerinin ne kadar çok değiştiği, eşik değer büyüdükçe doğal frekans değerinin küçüldüğü görülmüştür.

Hatta sadece doğal frekans değerlerinin değil, aynı zamanda farklı eşik değerinde aynı mod numarasındaki mod şekillerinin ve en büyük şekil değişiminin olduğu bölgelerin aynı olmadığı görülmüştür.

Bu çalışmanın genel sonucu olarak söylenebilir ki, voksel tabanlı sonlu elemanlar uygulamalarında görüntü işlem parametrelerinin doğru olarak seçilmesinin bir özdeğer çözümü gerektiren doğal titreşim problemlerinde sadece nümerik olarak değil aynı zamanda modal davranışlar açısından da önemli olduğu ortaya konulmuştur.

Bu nedenle, yapılan bu çalışmanın sonuçlarının sadece teorik değil aynı zamanda pratik uygulamalar açısından da önemli olduğu düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1]. Zhang, Y., Bajaj, C. and Sohn, B. “3D finite element meshing from imaging data”, *Comput. Method Appl. M.*, 194, pp. 5083–5106 (2005).
- [2]. Zhang, Y., Hughes, T.J.R. and Bajaj C.L. “An automatic 3D mesh generation method for domains with multiple materials”, *Comput. Method Appl. M.*, 199, pp. 405-415 (2010).
- [3]. Pahr, D.H. and Zysset, P.K. “A comparison of enhanced continuum FE with micro FE models of human vertebral bodies”, *J. Biomech.*, 42, pp. 455–462 (2009).
- [4]. Soenke H.B., Wolfram S., Wolfhard S. and Fabian K. ”Small animal computed tomography imaging”, *Current Medical Imaging Reviews*, 3, pp. 45-59 (2007).
- [5]. Chevalier, Y., Pahr, D., Allmer, H., Charlebois, M. and Zysset, P. “Validation of a voxel-based FE Method for prediction of the uniaxial apparent modulus of human trabecular bone using macroscopic mechanical tests and nanoindentation”, *J. Biomech.*, 40, pp. 3333-3340 (2007).
- [6]. Hara, T., Tanck, E., Homminga, J. and Huiskes, R. “The influence of micro-computed tomography threshold variations on the assessment of structural and mechanical trabecular bone properties”, *Bone*, 31, pp. 107–109 (2002).
- [7]. 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*, 37, pp. 274 – 282 (2005).
- [8]. Altintas, G. and 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, pp. 318 – 322 (2012).
- [9]. Altintas, G. “Node-id based non-recursive flood fill algorithm for non-uniform discrete solid domains “, *2nd World Conference On Information Technology*, November 23-27 Antalya, Turkey (2011).

Geliş Tarihi:07.01.2013

Kabul Tarihi:31.01.2013

