

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ BOYUTLU SIRALI TARAMA VERİLERİNİN İŞLENMESİLE ELDE  
EDİLEN MEKANİK MODELLERDEKİ FARKLILIKLARIN GÖRÜNTÜ  
İŞLEM PROSEDÜRLERİ KAPSAMINDA İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Filiz ALTINTAŞ**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Mekanik**

**MANİSA 2013**

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ BOYUTLU SIRALI TARAMA VERİLERİNİN İŞLENMESİ İLE ELDE  
EDİLEN MEKANİK MODELLERDEKİ FARKLILIKLARIN GÖRÜNTÜ  
İŞLEM PROSEDÜRLERİ KAPSAMINDA İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Filiz ALTINTAŞ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 Ocak 2013**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2013**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç.Dr. B. Gültekin SINIR**

**Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç.Dr. Erkan DOĞAN**

**Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALAYBEYOĞLU**

**MANİSA 2013**

| <b>İÇİNDEKİLER</b>   | <b>Sayfa No</b> |
|--|-----------------|
| SEMBOL LİSTESİ   | II              |
| ŞEKİL LİSTESİ  | III             |
| ÇİZELGE LİSTESİ  | IV              |
| KISALTMALAR LİSTESİ  | V               |
| TEŞEKKÜR   | VI              |
| ÖZET   | VII             |
| ABSTRACT   | VIII            |
| 1. GİRİŞ   | 1               |
| 2. MATERYAL VE METOD   | 4               |
| 3. EŞİK DEĞER SEÇİMİNİN MALZEMENİN DOĞAL FREKANSI<br>ÜZERİNDEKİ ETKİSİ   | 9               |
| 4. MİKRO-BT GÖRÜNTÜLERİNİN DİLİM KALINLIĞININ SONLU ELEMAN<br>MODELLERİNİN DOĞAL FREKANS DEĞERLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ | 19              |
| MİKRO-BT GÖRÜNTÜLERİNİN DİLİM KALINLIĞININ SONLU ELEMAN<br>MODELLERİNİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ         | 28              |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER  | 35              |
| KAYNAKLAR  | 37              |
| EKLER  | 39              |
| ÖZGEÇMİŞ   | 44              |

## SEMBOL LİSTESİ

|                  |                                 |
|------------------|---------------------------------|
| $E$              | Elastisite Modülü               |
| $P_z$            | Z yönündeki Yük                 |
| $\nu$            | Poisson Oranı                   |
| $\bar{\delta}_x$ | X Yönündeki Deplasman           |
| $\bar{\delta}_y$ | Y Yönündeki Deplasman           |
| $\theta_x$       | X Yönündeki Dönme               |
| $\theta_y$       | Y Yönündeki Dönme               |
| $\theta_z$       | Z Yönündeki Dönme               |
| $\mu$            | Voksel Kenar Uzunluğu           |
| $\rho$           | Birim Hacimdeki Kütle Yoğunluğu |

| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>   | <b>Sayfa No</b> |
|--|-----------------|
| Şekil 2.1. Voksel ve piksel  | 4               |
| Şekil 2.2. Doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4'ün şekli  | 6               |
| Şekil 2.3. Mikro-BT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesi<br>(Eşik Değer Uygulaması)       | 6               |
| Şekil 2.4. Mikro-BT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesi<br>(Dilim Kalınlığı Uygulaması)  | 7               |
| Şekil 3.1. Sistemin eşik değer verilmemiş ve üç farklı eşik değer verilmiş<br>(X-Y düzlemindeki) görüntüleri | 9               |
| Şekil 3.2. (123-255) Eşik Değer Aralığında Solid Modelin Görünümü  | 10              |
| Şekil 3.3. (133-255) Eşik Değer Aralığında Solid Modelin Görünümü  | 10              |
| Şekil 3.4. (143-255) Eşik Değer Aralığında Solid Modelin Görünümü  | 11              |
| Şekil 3.5. Üç Farklı Eşik Değerli sistemin ABAQUS Programındaki Görüntüleri                                  | 11              |
| Şekil 3.6. Doğal Titreşim modu Frekans Değerleri   | 13              |
| Şekil 4.1. BT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesindeki işlem sırası                      | 20              |
| Şekil 4.2. Solid Modelin Görünümü  | 21              |
| Şekil 4.3. Doğal Titreşim Modu Frekans Değerleri   | 22              |
| Şekil 5.1. Solid modelin görünümü  | 28              |
| Şekil 5.2. Farklı dilim kalınlıklarındaki modelin görünümü   | 29              |
| Şekil 5.3. Burkulma Modu Yük Değerleri   | 32              |
| Şekil E.1.1. Eşik Değer (123-255) 20. Mod Görüntüsü  | 39              |
| Şekil E.1.2. Eşik Değer (133-255) 20. Mod Görüntüsü  | 39              |
| Şekil E.1.3. Eşik Değer (143-255) 20. Mod Görüntüsü  | 40              |
| Şekil E.2.1. 0,037 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü  | 41              |
| Şekil E.2.2. 0,074 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü  | 41              |
| Şekil E.2.3. 0,111 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü  | 42              |
| Şekil E.2.4. 0,148 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü  | 42              |
| Şekil E.3.1. 0,037 mm Dilim Kalınlığında 4. Burkulma Modunun Görünümü  | 43              |
| Şekil E.3.2. 0,148 mm Dilim Kalınlığında 4. Burkulma Modunun Görünümü  | 43              |

| <b>ÇİZELGE LİSTESİ</b>   | <b>Sayfa No</b> |
|--|-----------------|
| Çizelge 3.1. Üç farklı eşik değerdeki eleman sayıları ve toplam model hacimleri  | 12              |
| Çizelge3.2. Üç farklı Eşik Değerdeki Doğal Frekans Modu Değerleri ve (133-255) Baz Modeline Göre Yüzde Farklılıkları             | 12              |
| Çizelge3.3. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi (1.ve 5. Mod Aralığı)                             | 14              |
| Çizelge3.4. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi (6.ve 10. Mod Aralığı)                            | 15              |
| Çizelge3.5. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi (11.ve 15. Mod Aralığı)                           | 16              |
| Çizelge3.6. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi (16.ve 20. Mod Aralığı)                           | 17              |
| Çizelge 4.1. Dört Farklı Dilim Kalınlığında Oluşan Doğal Frekans Modu Değerleri ve 0,037mm Baz Modeline Göre Yüzde Farklılıkları | 21              |
| Çizelge 4.2. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi ( 1. ve 5. Mod Aralığı)                              | 23              |
| Çizelge 4.3. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi ( 6.ve 10. Mod Aralığı)                              | 24              |
| Çizelge 4.4. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi ( 11. ve 15. Mod Aralığı)                            | 25              |
| Çizelge 4.5. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi ( 16. ve 20. Mod Aralığı)                            | 26              |
| Çizelge 5.1. Farklı dilim kalınlıklarındaki yapısal değerler   | 30              |
| Çizelge 5.2. Voksel Boyutları için Burkulma Yükleri  | 30              |
| Çizelge 5.3. Burkulma Yükleri ve Mod Şekilleri   | 33              |

## KISALTMALAR LİSTESİ

|     |   |
|-----|---|
| BT  | Bilgisayarlı Tomografi                  |
| MRI | Manyetik Rezonans                       |
| 3B  | Üç Boyutlu                              |
| ROI | Region Of Interest ( İlgilenilen Bölge) |

## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinde sunulan çalışma 2012 yılında Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı'nda hazırlanmıştır.

Tezimin hazırlanması sırasında yaptığı çalışmalarla yoluma ışık tutan, bilgisini ve desteğini esirgemeyerek beni yönlendiren sevgili eşim Gökhan Atıntaş'a minnettarım.

Çalışmalarımı yönlendiren ve araştırmalarım sırasında katkılarını esirgemeyen Hocam Yrd. Doç. Dr. B. Gültekin Sınır'a saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam için verdiği öneriler ve destek için Araştırma Görevlisi Abdülkerim ERGÜT'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyerek bu seviyelere gelmemi sağlayan ve yüksek lisans eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen adını sayamadığım herkese çok teşekkür ederim.

Filiz ALTINTAŞ

Manisa,2012



## ÖZET

Bu tez çalışmasında iki boyutlu sıralı tarama verilerinin işlenmesi ile elde edilen mekanik modellerdeki farklılıklar görüntü işlem prosedürleri kapsamında İncelenmiştir.

Hasarsız görüntüleme teknikleri ile elde edilen dataların temel girdi olarak kullanıldığı voksel tabanlı sonlu elemanlar metodları 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 (MRI) gibi görüntüleme tekniklerinden elde edilen görüntü kalitesinden doğrudan etkilenmekte olup yapılan bu tez çalışmasında, 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. Ayrıca bu kemik dokusunun dört farklı dilim kalınlığına sahip Mikro-BT görüntü datası kullanılarak voksel tabanlı sonlu elemanlar boyut etkisinden arındırılmış modeller elde edilerek doğal titreşim modları incelenmiştir. Aynı kemik dokusunun dilim kalınlıklarının sonlu eleman modellerinin burkulma davranışına olan etkileri incelenmiştir. İncelenen modlarda doğrudan anizotropik vokseller kullanılmıştır. Bu sebeple önceki titreşim örneğinden farklı olarak sonuçlar sonlu eleman boyut etkisinden arındırılmamıştır.

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.

Elde edilen sonuçlar incelenen parametrelerin kompleks geometrilere örnek olarak seçilen trabeküler kemik dokusunun doğal titreşim davranışı üzerinde çok önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Sonuçlar mutlaka göz önünde bulundurulması gereken görüntü datası kalitesinin pratik uygulamalardaki önemini de ortaya koymaktadır.

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

## **ABSTRACT**

In this study, differences in mechanical models which are obtained by performing two dimensional scanning data are investigated in the scope of image processing procedures.

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. Furthermore, natural vibration modes of models that are free from voxel based finite elements size effect by using Micro-BT imaging data of this bone tissue having four different slice thicknesses are investigated. Finite elements models effects of slice thicknesses of the same bones tissue on buckling behavior are also investigated. Anisotropic voxels are directly used in analyzed modes. For this reason, the results are not free from size effect unlike the previous vibration example.

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.

Obtained results reveal that, investigated parameters have significant effect on natural vibration of d trabecular bone tissue which is selected as an example of complex geometries. The results also present the importance of imaging data that shall be taken into consideration in practical applications.

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

## 1.0. GİRİŞ

Bilgisayarlı Tomografi (BT) ve Manyetik Rezonans (MRI), 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 metodları tıp, mekanik, inşaat sektörü ve malzeme mühendisliği gibi bazı branşlarda karşılaşılan mikro ve nano ölçekteki problemlerin çözümlenmesinde artan bir kullanım alanına sahiptir. Bu görüntüleme tekniklerinin belki de en önemli üstünlüğü üzerlerinde mekanik deneylerin yapılamayacağı canlı dokularında taşıyıcı modellerin oluşturulmasında kullanılacak bilgiyi sağlayabilmesidir.

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

Zhang ve Arkadaşlarının (2005) görüntü verilerinden doğrudan hacimsel ağların kaliteli ve uyarlanabilir bir şekilde elde edilmesini sağlayan bir algoritma elde etmişlerdir. Yine Zhang ve arkadaşları (2010) heterojen malzemelerden oluşan kompozit bölgelerin ağlarını tetrahedral ve hexahedral elemanlardan oluşan ağların otomatik olarak elde edilmesini sağlayan bir algoritma sunmuşlardır.

Yüksek çözünürlüklü sıralı görüntü verilerinden türetilen sonlu eleman modelleri mikro- mekanik yaklaşımlara imkan sağlamış olup bu modellerin kullanılması ile elde edilen sonuçlar klasik yöntemler ile elde edilen sonuçlardaki hata paylarının değerlendirilmesinde önemli bir standart olarak kabul görmektedir.

Pahr ve Zysset (2009) BT datalarından elde edilen mikro sonlu eleman modellerinin gelişmiş sürekli sonlu eleman modelleri ile karşılaştırılarak doğruluklarını incelenmiştir.

Soenke ve arkadaşlarının (2007) çalışmalarında rekonstrüksiyon prosedürleri sonlu eleman prosedürleri ile bağlı olarak ele alınmış ve bu konuda kapsamlı bir literatür araştırması sunmuşlardır.

Chevalier ve arkadaşlarının (2007) 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.

Hara ve arkadaşlarının (2002) 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.

Kemik yapısının mikro mimarisi ile yapılan çalışmalar arttıkça mikro mimarinin detaylarının öneminin arttığını Lai ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmalarında ortaya koymuşlardır.

Griffith ve Genant (2008) değerli 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.

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.

Genant ve Jiang (2006) yılındaki çalışmalarında trabeküler yapıdaki kemik dokusunu esas alarak hasarsız görüntüleme tekniklerini birbirleri ile karıştırmışlardır. Sonuçlar özellikle trabeküler kemik dokusunun incelenmesi sırasında kullanılması gereken çözünürlük değerleri hakkında bilgilendiricidir.

Klasik voksel tabanlı sonlu elemanlar metodlarında dilim kalınlıklarının değişimi voksellerin kübik yapısını değiştirmekte olup sonlu elemanlar açısından uygun görülmeyen boyutsal oranlara sahip dikdörtgen yapıda voksellerin oluşmasına sebep olmaktadır. Klasik voksel tabanlı sonlu elemanlar metodunda karşılaşılan bu durumdan kaçınmak için Altıntaş ve Erdem (2012) yapmış oldukları çalışmalarında kemik dokusunun doğal titreşim analizini önerdikleri modifiye edilmiş voksel tabanlı sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Bu metoda göre dilim kalınlığı veya plandaki piksel tek bir eleman ile geçilmek zorunda olmayıp kübik yapısı korunan uygun sayıdaki voksel eleman ile doldurularak modeller oluşturulmaktadır. Yapılan bu çalışmada mikro yapıdaki datanın dilim kalınlığı değerinin sonlu eleman modellerinin ortaya koyduğu doğal titreşim davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konulmuştur.

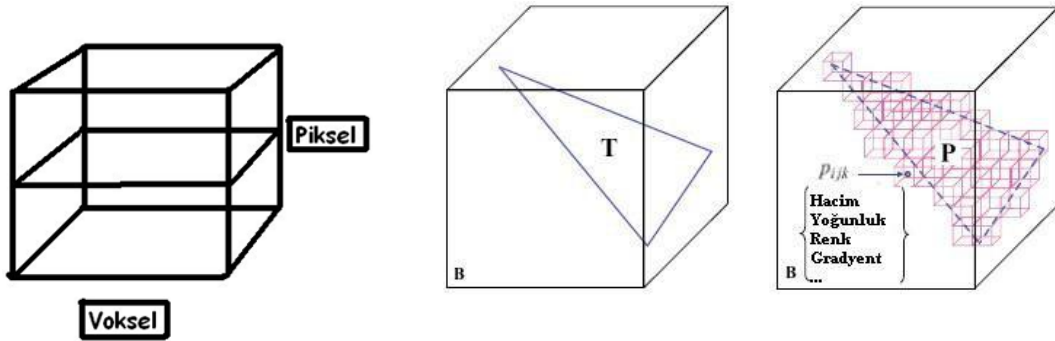
Yapılan bu tez çalışmasında tersine mühendislik yöntemlerinde sıklıkla kullanılmaya başlayan Mikro-BT görüntüleme tekniği ile elde edilen görüntüler kullanılarak 3 boyutlu gerçekçi modeller oluşturulmuştur.

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 tez çalışmasında görüntüleme sistemlerinin eşik değer ve dilim kalınlığı seçiminin mikro yapıların doğal titreşim davranışına olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2.0. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında kullanılan malzeme ve metodlar hakkında bilgi vermeden önce, görüntünün nasıl oluştuğuna ve görüntü elemanlarının görevlerine biraz değinilecek olursa; MRI yada BT 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 volümüdür. Piksel ise ekrana yansıyan iki boyutlu alandır ve vokselden kaynaklanan sinyal, ekranda (görüntüde) piksele düşen alanda, parlaklık (intensite) olarak yansır.



Şekil 2.1. 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.

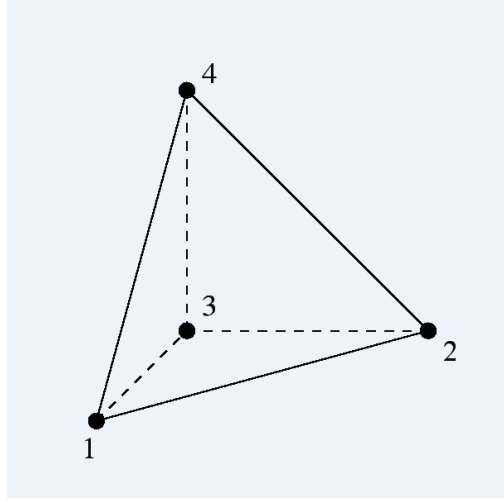
Voksel veri yapısı, modelleme için kullanılacak bir veri yapısı türüdür. Bu veri yapısı, bilgisayar donanımında yaşanan hızlı gelişmelerle kullanışlı hale gelmiş yeni bir veri yapısıdır. Bir voksel, altı yüze, sekiz köşeye ve on iki kenara sahip olan dörtgenel bir küp olarak tanımlanabilir. Voksel bir 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.

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.

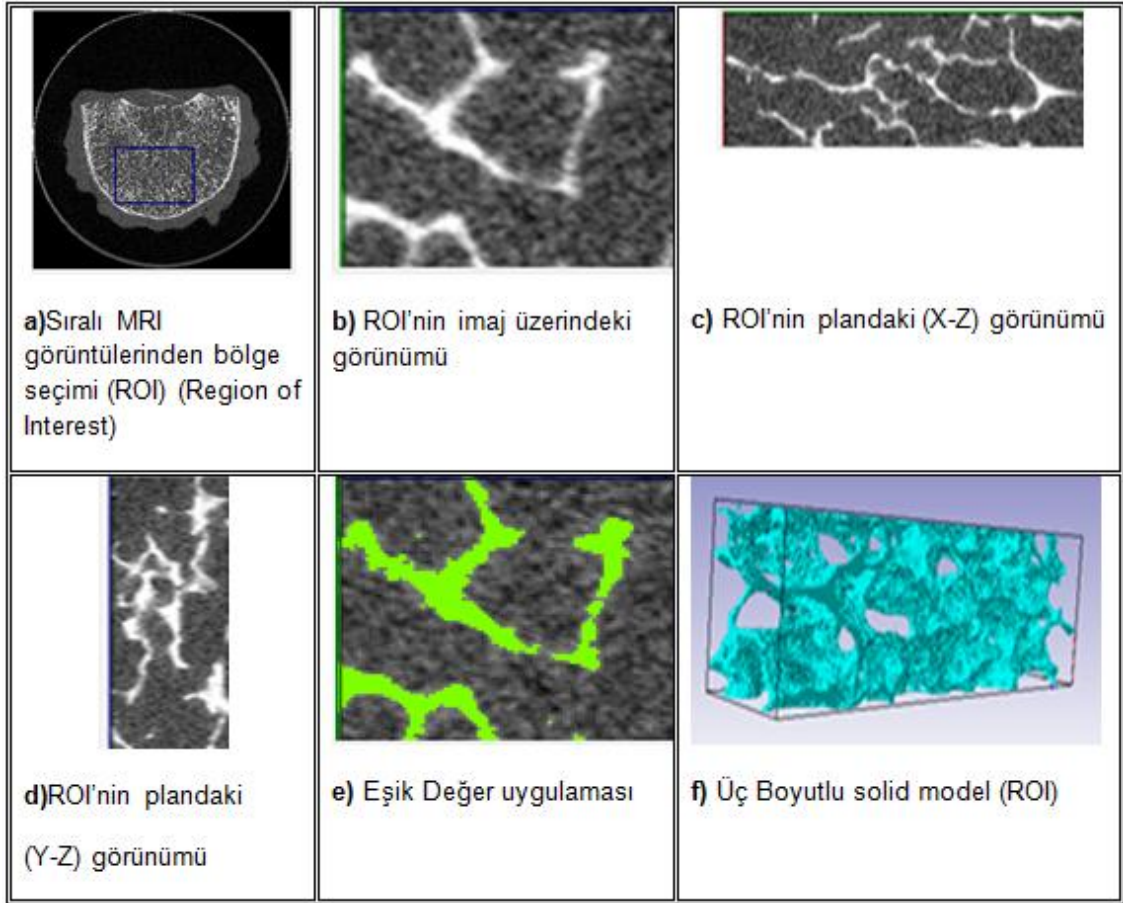
Bu çalışmada elde edilen numunelerin, doğal titreşim ve burkulma analizleri yapılmıştır. Söz konusu analizlerin yapılabilmesi için ABAQUS® programına aktarılan numunelerin doğal titreşim analizi için malzeme özellikleri ve sınır koşulları, burkulma analizi için ise malzeme özellikleri, sınır koşulları, yükün konumu ve yönü 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 (2012) tarafından CUBOID-SI2FE isimli bir MATLAB® scripti geliştirilmiştir. CUBOID-SI2FE bünyesinde threshold, rekonstrüksiyon ve kendine özgü bir floodfill algoritmasını barındıran Altıntaş (2011-a) tarafından oluşturulmuş kompakt bir yazılım olup, sıralı Mikro-BT görüntü 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 vokselere 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 değeri 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.



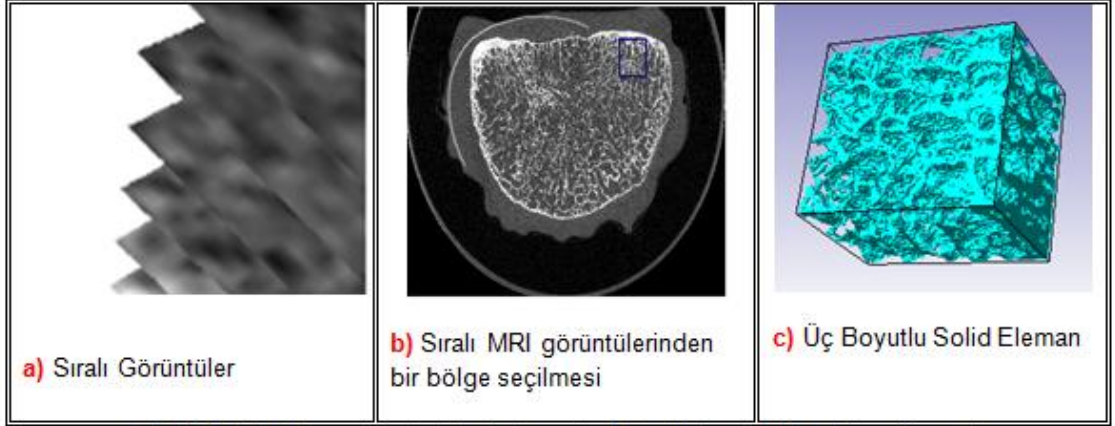
Şekil 2.2. Doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4'ün şekli

Aşağıda söz konusu işlem sırası şekiller ile gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Mikro-BT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesi (Eşik Değer Uygulaması)





**Şekil 2.4. Mikro-BT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesi (Dilim Kalınlığı Uygulaması)**

Seçilen çalışma bölgesinin (ROI), ABAQUS® programında girilen malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir.

Doğal Frekans Analizindeki Malzeme Değerleri:

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

Elastisite Modülü = 17200 N/mm<sup>2</sup>

Poisson Oranı = 0,295

Burkulma Analizindeki Malzeme Değerleri:

Kütle Yoğunluk Değeri =  $1,75 \cdot 10^{-9}$  ton/mm<sup>3</sup>

Elastisite Modülü = 17250 N/mm<sup>2</sup>

Poisson Oranı = 0,28

Üçüncü ve dördüncü bölümde, incelenen parametreye göre alınan bazı değerler değiştirilerek, bu değerlerin değişiminin doğal titreşim analizinde neleri değiştirdiğine bakılmıştır.

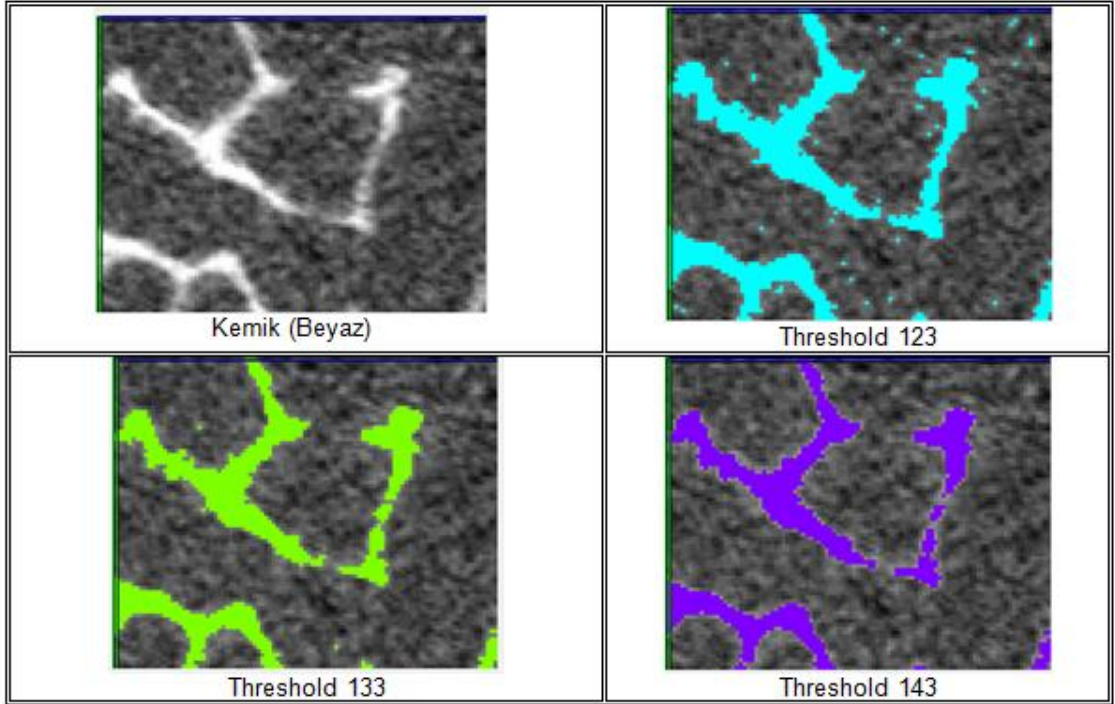
Üçüncü bölümde gözün yanılma sınırı sayılabilecek değerlerde eşik değerleri seçilerek doğal frekans değerleri ve mod yapıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. (3,663\*2,96\*12,025)mm boyutlarındaki model üzerinde görsel doğrulama yapılarak belirlenen bu eşik değer aralığı kemik dokusuna ait voksellerin belirlenmesinde kullanılır, bu sayede taşıyıcı dokular diğer dokulardan ayrılır. Dördüncü bölümde, Mikro-BT görüntülerinin dilim kalınlığının sonlu eleman

modelinin doğal frekans değerleri ve mod yapıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı model dilim kalınlıkları 0,037 mm, 0,074 mm, 0,111 mm ve 0,148 mm seçilerek oluşturulmuştur. Bu bölümde incelenen (6,32\*6,993\*4,995)mm boyutlarındaki model sonlu elemanlar boyut etkisinden arındırılmıştır. Beşinci bölümde ise, Mikro-BT görüntülerinin dilim kalınlığının sonlu eleman modelinin burkulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada incelenen (3,7\*3,7\*4,551) mm boyutlarındaki model sonlu eleman boyut etkilerinden arındırılmadan dilim kalınlığının burkulma değerleri ve mod yapıları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

### 3.0. EŞİK DEĞER SEÇİMİNİN MALZEMENİN DOĞAL FREKANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

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. Çalışmanın bu kısmında görsel farklılıklardan kaynaklanabilecek eşik değer farklılıklarının elde edilen modellere ve dolayısı ile analiz sonuçlarına olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu bölümde, aynı (L3) omuru numunesine ait Mikro-BT data setinde bulunan ardışık görüntü dosyaları 0,037 mm'lik eşit aralıklar ile sıralanarak planda (ROI) çalışma alanı seçilmiştir. Aynı eleman modeli üzerinde sadece eşik değerler değiştirilerek işlemler yapılmıştır.



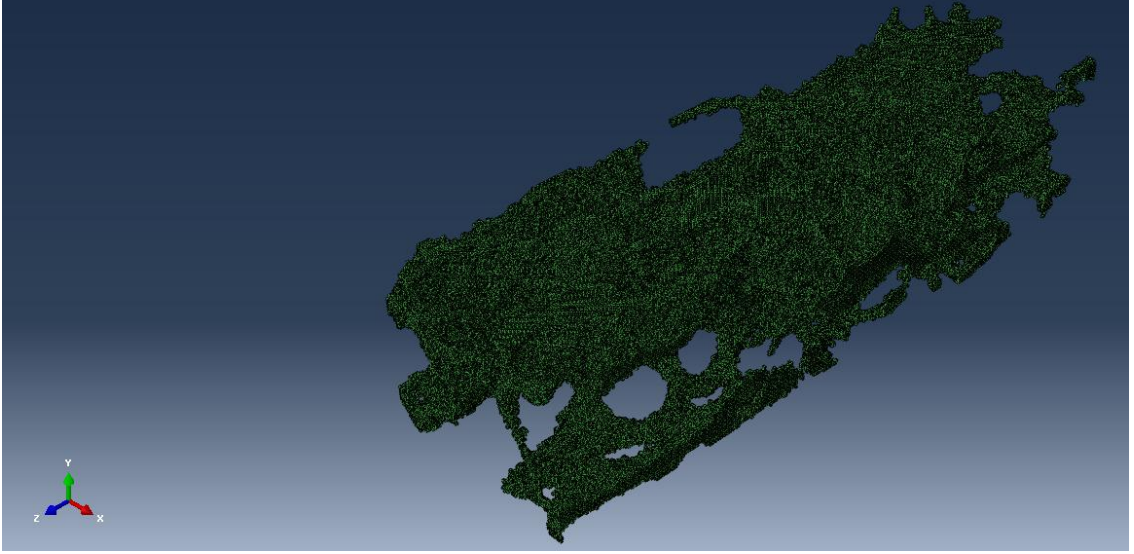
Şekil 3.1. Sistemin eşik değer verilmemiş ve üç farklı eşik değer verilmiş (X-Y düzlemindeki) görüntüleri

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

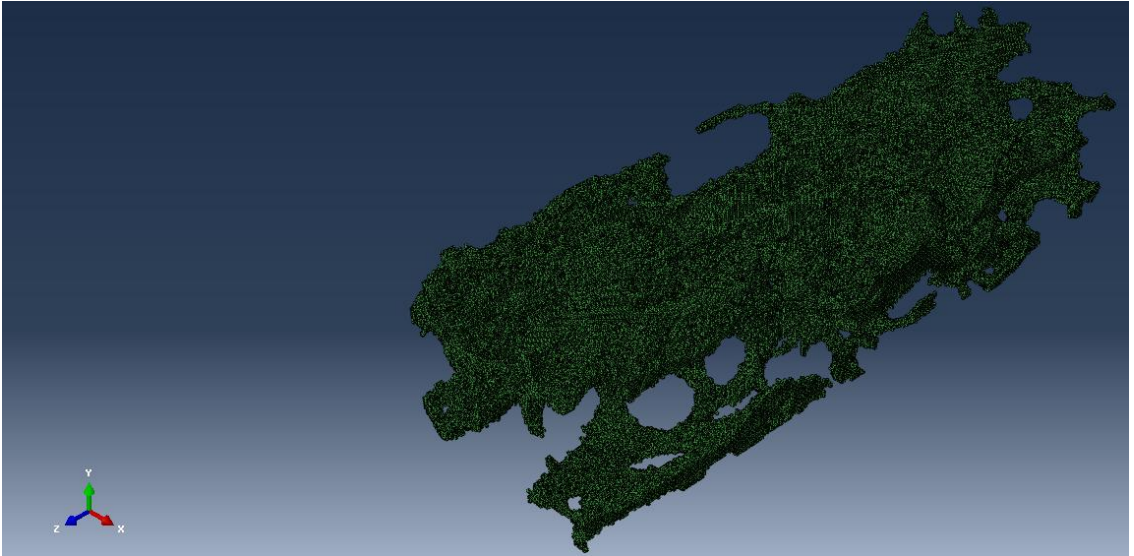
Kütle Yoğunluk Değeri =  $1,81 \cdot 10^{-9}$  ton/mm<sup>3</sup>

Elastisite Modülü = 17200 N/mm<sup>2</sup>

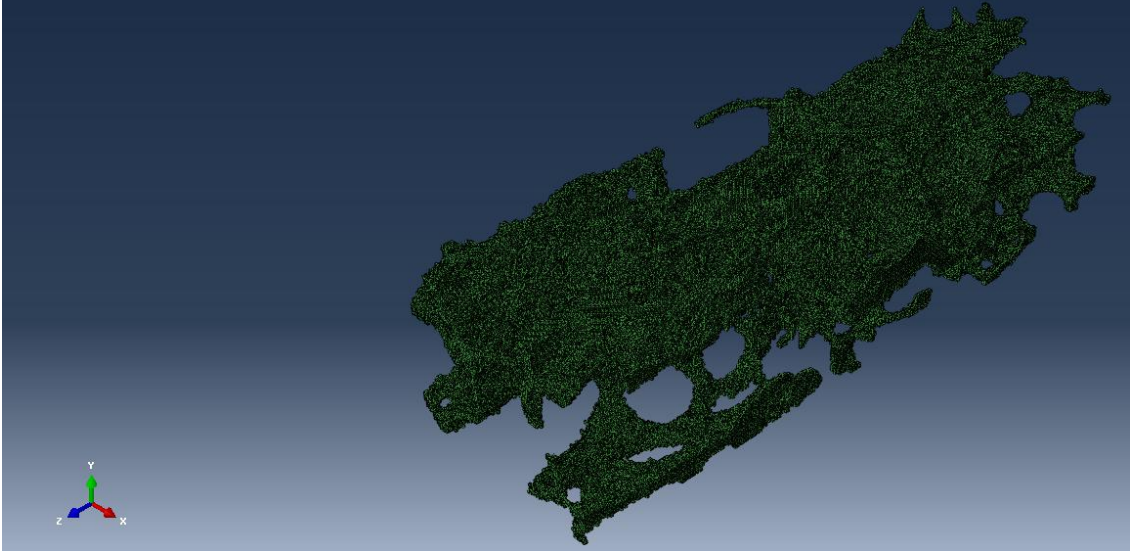
Poisson Oranı = 0,295



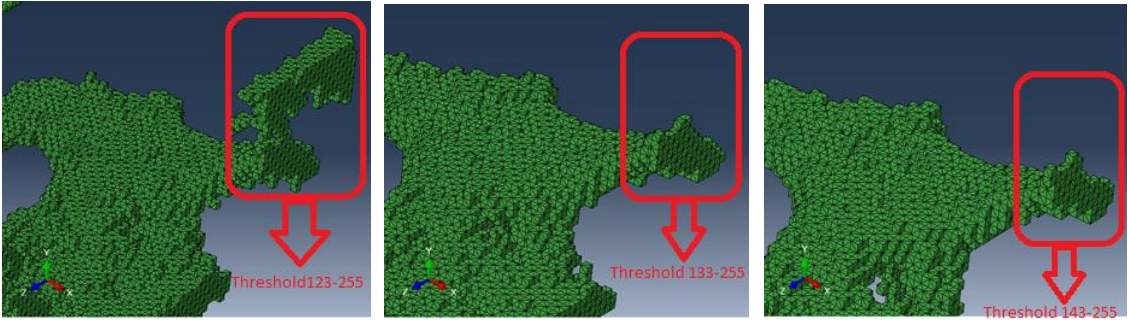
**Şekil 3.2. (123-255) Eşik Değer Aralığında Solid Modelin Görünümü**



**Şekil 3.3. (133-255) Eşik Değer Aralığında Solid Modelin Görünümü**



**Şekil 3.4. (143-255) Eşik Değer Aralığında Solid Modelin Görünümü**



**Şekil 3.5. Üç Farklı Eşik Değerli sistemin ABAQUS Programındaki Görüntüleri**

Şekil 3.5.'de Threshold yani eşik değer 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 grilik skalasında 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,  $\pm 10$  tolerans aralığında doğal frekans modlarında nelerin değiştiğine bakılmıştır.

**Çizelge 3.1. Üç farklı eşik değerdeki eleman sayıları ve toplam model hacimleri**

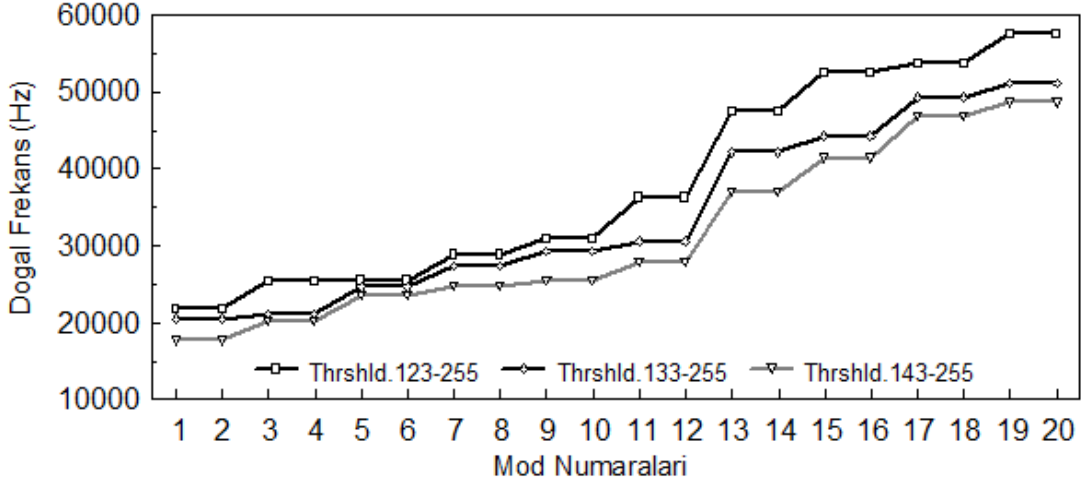
| Threshold   | 123-255 | 133-255 | 143-255 |
|---|---------|---------|---------|
| Eleman Sayısı<br>(tetrahedral C3D4)                 | 5631620 | 4974470 | 4442980 |
| Toplam Model<br>Hacmi mm <sup>3</sup><br>(Yaklaşık) | 57,05   | 50.39   | 45,01   |

Çizelge 3.1.'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 ve baz alınan modele göre yüzde farkları Çizelge3.2.'de verilmiştir.

**Çizelge3.2. Üç farklı eşik değerdeki doğal frekans modu değerleri ve (133-255) Baz modeline göre yüzde farklılıkları**

|                       | Doğal Frekans Değerleri (Hz) |                         |                         | Yüzde Farklar |           |          |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|-----------|----------|
|                       | Eşik Değer<br>(123-255)      | Eşik Değer<br>(143-255) | Eşik Değer<br>(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 3.6. Doğal Titreşim modu Frekans Değerleri**

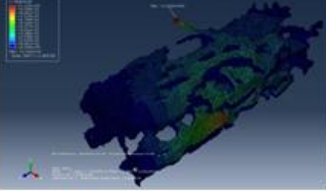
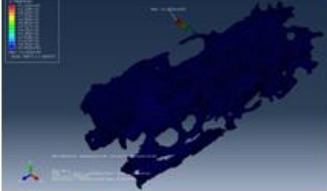

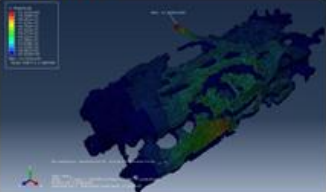




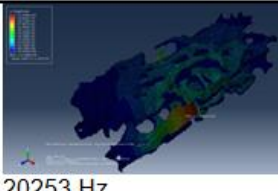
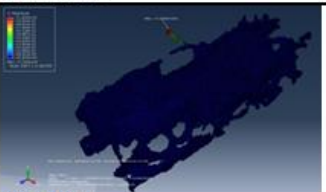
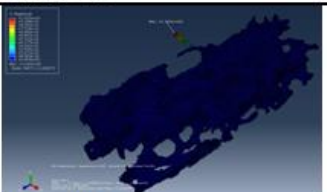
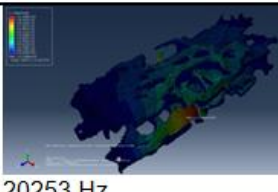

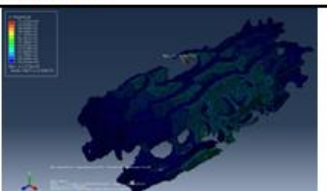

Her üç model de aynı adım aralığına sahip olduğundan, pratikte gözün tolerans aralığı olabilecek üç farklı eşik değeri verilerek oluşturulmuş olduğundan eleman sayısı ve model hacmi değişmektedir.

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

Çizelge3.3. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi

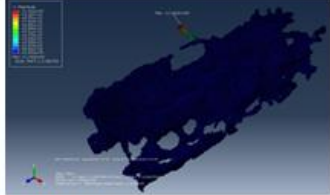
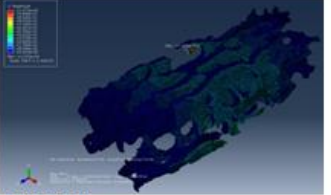

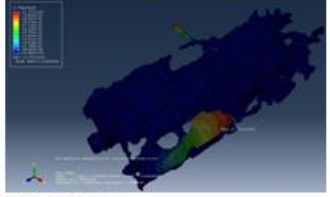
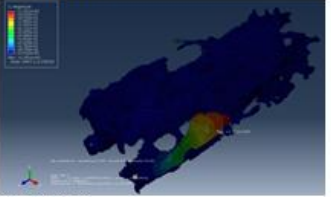

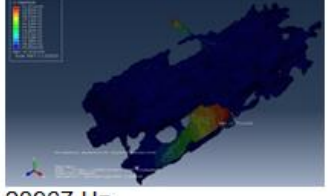
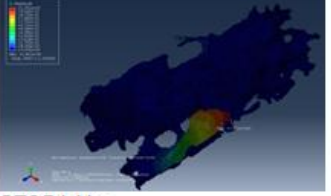

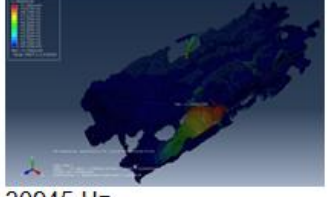
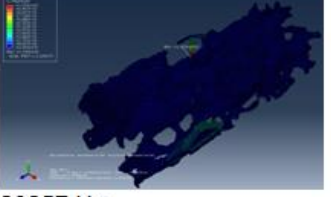

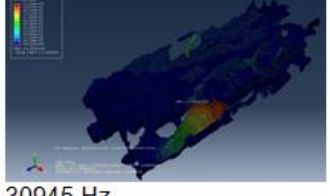
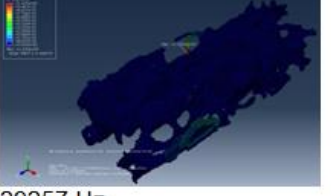

(1. ve 5. Mod Aralığı)

| Eşik Değer ler | 123-255   | 133-255  | 143-255   |
|----------------|---|--|---|
| Mod 1          | <br>21891 Hz   | <br>20538 Hz   | <br>17694 Hz   |
| Mod 2          | <br>21891 Hz   | <br>20538 Hz   | <br>17694 Hz   |
| Mod 3          | <br>25429 Hz  | <br>21173 Hz  | <br>20253 Hz  |
| Mod 4          | <br>25429 Hz | <br>21173 Hz | <br>20253 Hz |
| Mod 5          | <br>25583 Hz | <br>24616 Hz | <br>23556 Hz |



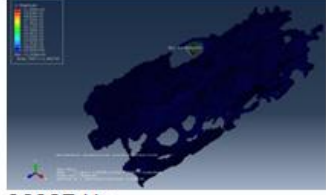
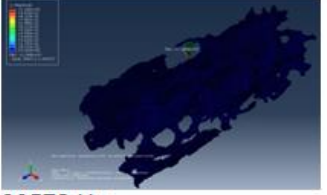
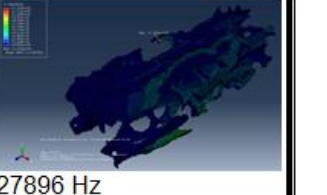


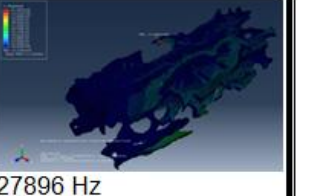
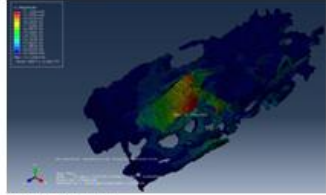
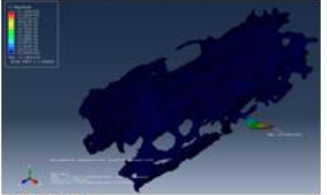
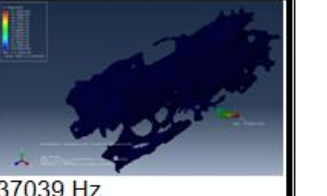
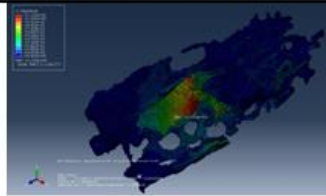

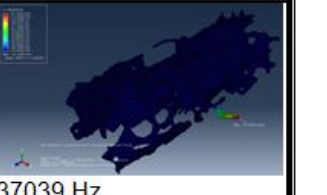
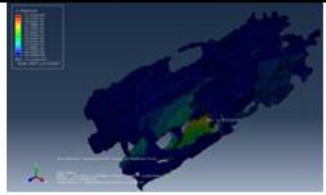
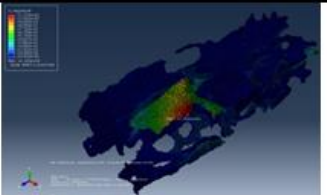
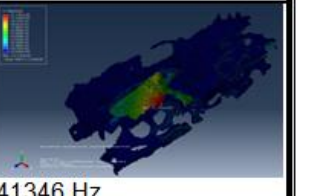
Çizelge3.4. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi

(6.ve 10. Mod Aralığı)

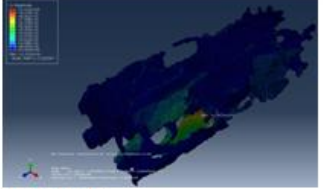
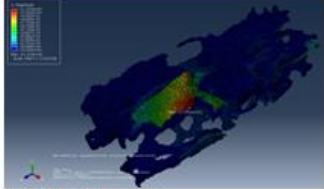
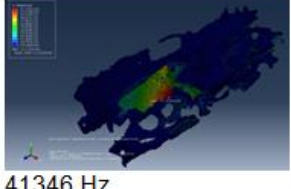
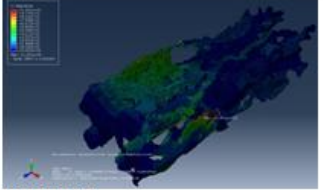
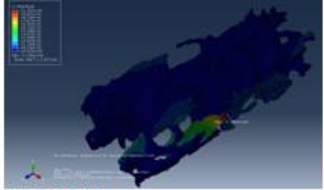
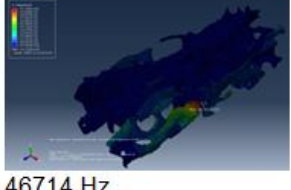
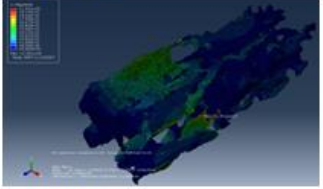
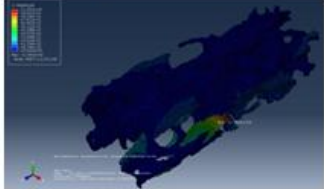
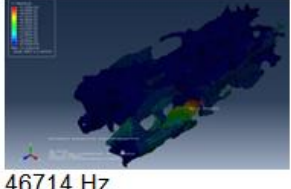
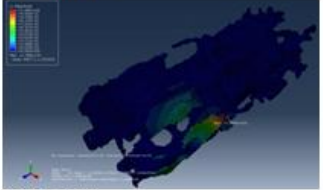
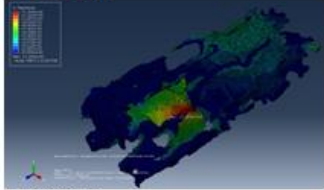
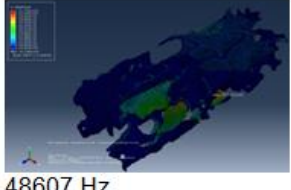
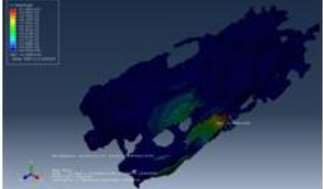
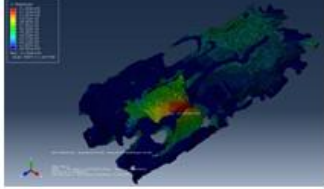
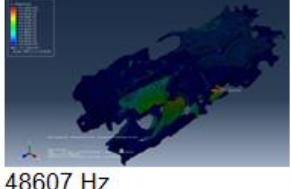
| Eşik Değerler | 123-255   | 133-255  | 143-255   |
|---------------|---|--|---|
| Mod 6         | <br>25583 Hz   | <br>24616 Hz   | <br>23556 Hz   |
| Mod 7         | <br>28967 Hz   | <br>27354 Hz   | <br>24682 Hz   |
| Mod 8         | <br>28967 Hz  | <br>27354 Hz  | <br>24682 Hz  |
| Mod 9         | <br>30945 Hz | <br>29257 Hz | <br>25502 Hz |
| Mod 10        | <br>30945 Hz | <br>29257 Hz | <br>25502 Hz |

Çizelge3.5. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi

(11.ve 15. Mod Aralığı)

| Eşik Değerler | 123-255   | 133-255  | 143-255   |
|---------------|---|--|---|
| Mod 11        | <br>36387 Hz   | <br>30572 Hz   | <br>27896 Hz   |
| Mod 12        | <br>36387 Hz   | <br>30572 Hz   | <br>27896 Hz   |
| Mod 13        | <br>47537 Hz  | <br>42097 Hz  | <br>37039 Hz  |
| Mod 14        | <br>47537 Hz | <br>42097 Hz | <br>37039 Hz |
| Mod 15        | <br>52650 Hz | <br>44242 Hz | <br>41346 Hz |

**Çizelge3.6. EşikDeğer Seçiminin Malzemenin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi**  
**(16.ve 20. Mod Aralığı)**

| Eşik Değerler | 123-255   | 133-255  | 143-255   |
|---------------|---|--|---|
| Mod 16        | <br>52650 Hz   | <br>44242 Hz   | <br>41346 Hz   |
| Mod 17        | <br>53758 Hz   | <br>49293 Hz   | <br>46714 Hz   |
| Mod 18        | <br>53758 Hz  | <br>49293 Hz  | <br>46714 Hz  |
| Mod 19        | <br>57654 Hz | <br>51008 Hz | <br>48607 Hz |
| Mod 20        | <br>57654 Hz | <br>51008 Hz | <br>48607 Hz |

Çizelge 3.3., 3.4., 3.5. ve 3.6.'ya bakıldığında aynı modelin sadece 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; 20. moda bakıldığında, mod numarası aynı olmasına rağmen tüm mod şekillerinin ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu yerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. (Bkz. Ek1 )

Bu durum başka bir şekilde değerlendirilecek olursa, bir cisim araya bir diğerinde 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.

#### 4.0. MİKRO-BT GÖRÜNTÜLERİNİN DİLİM KALINLIĞININ SONLU ELEMAN MODELLERİNİN AİT DOĞAL TİTREŞİM DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Sonlu eleman modeli oluşturulacak numunelerin çoğu kez görüntü dataları farklı dilim kalığında olabilmektedir ve bu dilim kalığının modellerin mekanik davranışlarını etkiledikleri düşünülmektedir. Çünkü dilim kalığı artıkça numunenin yapısındaki detaylar hakkındaki bilgi azalmaktadır, gerçekte olmayan yeni bağlantılar veya olan bağlantıların ortadan kalkması gibi durumlar ortaya çıkabilmektedir. Ancak bu durumların malzemenin mekanik davranışına olan etkilerinin ne şekilde olduğunun tespiti hakkında bir karara varmak için bu çalışma yapılmıştır.

Farklı dilim kalınlıklı görüntü datalarının aynı numuneden elde edilecek modellerin mekanik davranışları üzerindeki etkileri incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın bu kısmında görüntü datasının dilim kalığının küçük olması durumu ile büyük olması durumu sonlu eleman boyut etkisinden arındırılarak incelenmiştir.

Herbir modelin dilim kalığı farklıdır, ancak sonlu eleman büyüklükleri aynıdır. Bu sayede herbir farklı modelde ki sonlu eleman boyut farklılıklarından kaynaklanacak olan sapmaların önüne geçilmiştir. Sadece dilim kalığına bağlı olarak ortaya çıkacak olan dış geometrilerin ve modellerin mekanik davranışları incelenmiştir.

İlk model voxel tabanlı sonlu elemanlar methoduna göre yapılmış olup, Altıntaş ve Erdem (2012) tarafından önerilen modifiye edilmiş voxel tabanlı sonlu elemanlar methodu kullanılmıştır.

Bu bölümde, L3 omuru numunesine ait Mikro-BT data setinde bulunan ardışık görüntü dosyaları, ilk önce ardışık olarak hiçbir dilim atlanmadan malzeme özellikleri girilerek ABAQUS® programında üç boyutlu solid model oluşturulmuş ve oluşan elemanın ilk 20 doğal frekans modu hesaplanmıştır. Daha sonra dilimlerden birer, ikişer ve üçer atlamalı olarak görüntü dataları çıkartılmış, çıkartılan data yerine aynı sayıda varolan bir önceki görüntü datası bozulmamış numunedeki dilim kalığında kopyalanarak eleman boyutu korunmuş ve herbir sistem için doğal frekans değerleri hesaplanmıştır.

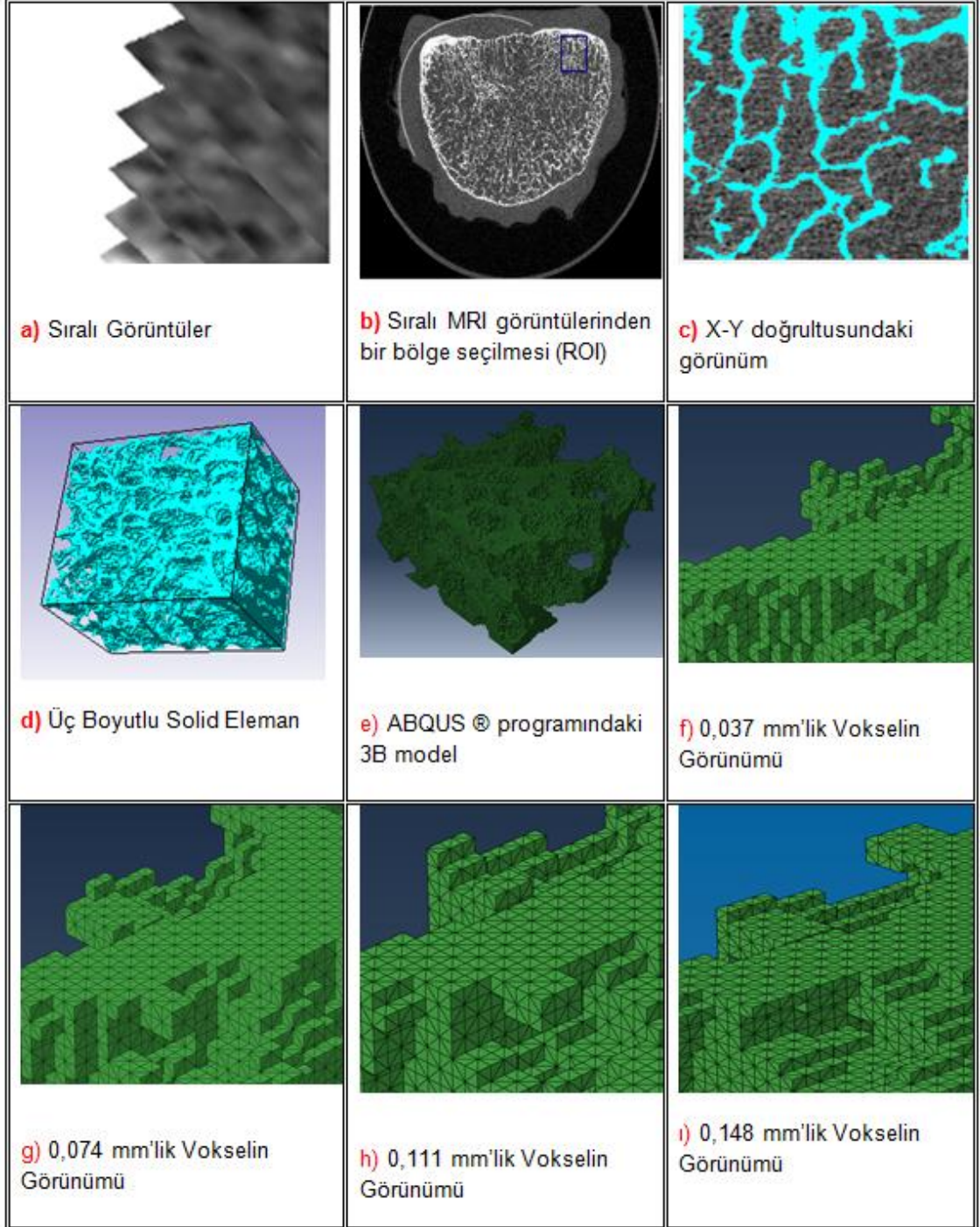
ABAQUS® programında üç boyutlu solid eleman haline getirilen 6,327 mm\*6,993 mm\*4,995 mm boyutlarındaki parçanın malzeme özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

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

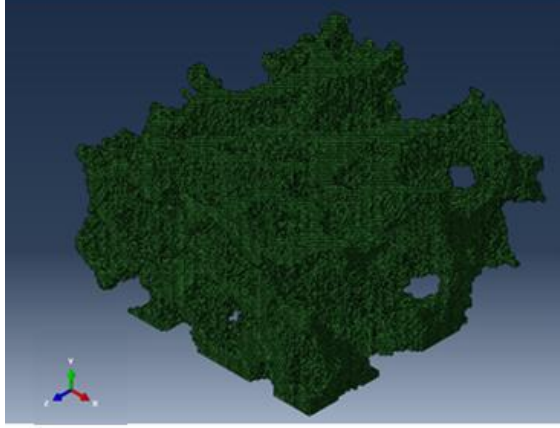
Elastisite Modülü = 17200 N/mm<sup>2</sup>

Poisson Oranı = 0,295

Aşağıda söz konusu işlem sırası şekiller ile gösterilmektedir.



**Şekil 4.1.** BT görüntülerinin işlenerek 3B solid modelin elde edilmesindeki işlem sırası

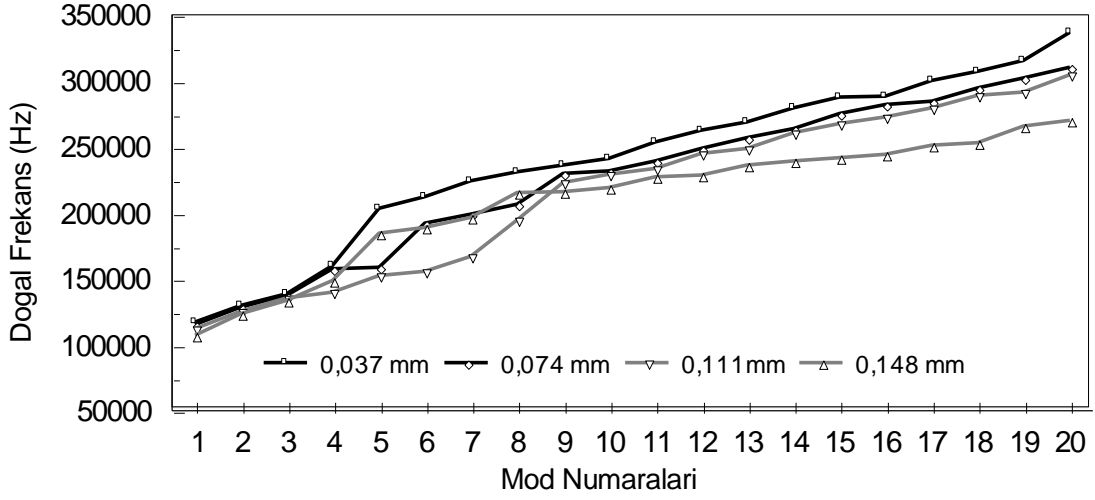


**Şekil 4.2. Solid Modelin Görünümü**

Dört farklı dilim kalınlığı verilerek oluşturulmuş sistemlerin ABAQUS® programında hesaplanmış ilk yirmi doğal frekans moduna ait frekans değerleri çizelge 4.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 4,1. Dört Farklı Dilim Kalınlığında Oluşan Doğal Frekans Modu Değerleri ve 0,037 mm Baz Modele Göre Yüzde Farkları**

| Dilim Kalınlığı<br>(mm) | Doğal Frekans Değerleri (Hz) |              |              |              | Yüzde Farklar |           |           |          |
|-------------------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------|-----------|----------|
|                         | 0,037<br>(a)                 | 0,074<br>(b) | 0,111<br>(c) | 0,148<br>(d) | (b) / (a)     | (c) / (a) | (d) / (a) |          |
| DOĞAL FREKANS MODLARI   | 1                            | 117894       | 115916       | 112566       | 107450        | %-1,677   | %-4,519   | %-8,858  |
|                         | 2                            | 129990       | 128817       | 125996       | 123905        | %-0,902   | %-3,072   | %-4,681  |
|                         | 3                            | 138905       | 137691       | 135550       | 133944        | %-0,873   | %-2,415   | %-3,571  |
|                         | 4                            | 160151       | 157623       | 140176       | 148997        | %-1,578   | %-12,472  | %-6,964  |
|                         | 5                            | 203848       | 158829       | 152376       | 184779        | %-22,084  | %-25,250  | %-9,354  |
|                         | 6                            | 212605       | 192223       | 156103       | 189286        | %-9,586   | %-26,576  | %-10,968 |
|                         | 7                            | 224618       | 199499       | 167253       | 196613        | %-11,182  | %-25,538  | %-12,467 |
|                         | 8                            | 231584       | 206720       | 195077       | 215592        | %-10,736  | %-15,764  | %-6,905  |
|                         | 9                            | 236735       | 230062       | 223562       | 216502        | %-2,818   | %-5,564   | %-8,546  |
|                         | 10                           | 241457       | 232327       | 229509       | 219664        | %-3,781   | %-4,948   | %-9,025  |
|                         | 11                           | 254059       | 239796       | 233949       | 227415        | %-5,614   | %-7,915   | %-10,487 |
|                         | 12                           | 263017       | 249321       | 245082       | 228884        | %-5,207   | %-6,818   | %-12,977 |
|                         | 13                           | 268901       | 257400       | 249123       | 236565        | %-4,277   | %-7,355   | %-12,025 |
|                         | 14                           | 279696       | 264420       | 261018       | 239779        | %-5,461   | %-6,677   | %-14,271 |
|                         | 15                           | 288034       | 275412       | 268133       | 241888        | %-4,382   | %-6,909   | %-16,021 |
|                         | 16                           | 288686       | 282567       | 273185       | 244954        | %-2,119   | %-5,369   | %-15,148 |
|                         | 17                           | 300669       | 284612       | 279928       | 251617        | %-5,340   | %-6,898   | %-16,314 |
|                         | 18                           | 307581       | 295025       | 289433       | 253626        | %-4,082   | %-5,900   | %-17,541 |
|                         | 19                           | 315500       | 302579       | 292060       | 266061        | %-4,095   | %-7,429   | %-15,670 |
|                         | 20                           | 336940       | 310782       | 304832       | 270258        | %-7,763   | %-9,529   | %-19,790 |



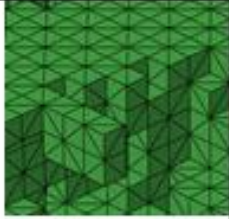
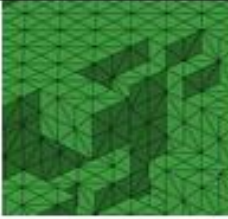
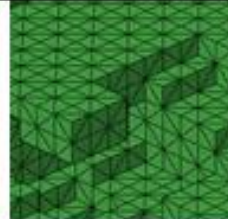
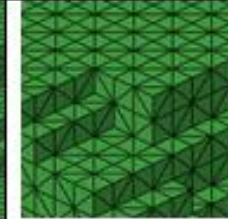

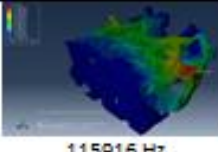
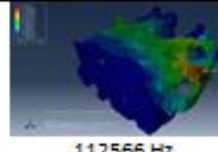
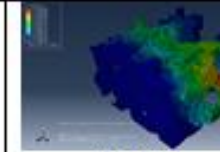
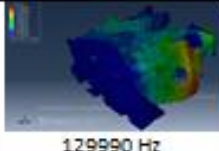
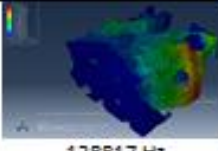

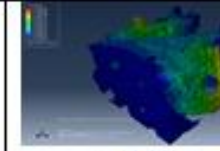
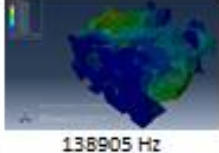
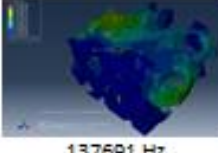
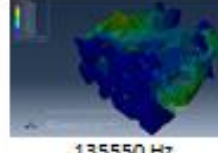
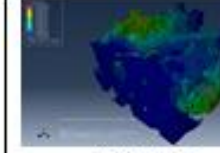
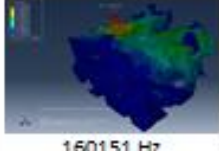


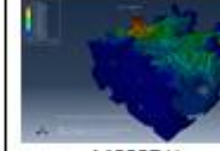




**Şekil 4.3. Doğal Titreşim Modu Frekans Değerleri**

Şekil 4.3.'de görülen grafikte, dilim kalınlıkları farklı 0,148 mm, 0,111 mm, 0,074 mm ve 0,037 mm olan modellerden türetilen dış geometri sınırları ve hacimleri aynı olmasına rağmen sonlu eleman boyutları  $0,037 \times 0,037 \times 0,037 \text{ mm}^3$ 'e düşürülen modeller karşılaştırılmış olup, sonlu eleman boyutu düşürülmüş modellerin doğal titreşim modlarına ait frekans değerleri genel olarak daha düşük değerlerde ortaya çıkmasına rağmen, buna uymayan modlarda vardır. Örnek vermek gerekirse, dilim kalınlığı 0,148 mm olan modelin ilk 3 doğal titreşim modu, dilim kalınlığı 0,111 mm olan modelden daha düşüktür. Bu durum tüm modlar için geçerli olmayıp yüksek modlarda karmaşık ve düzensiz bir durum gözlenmektedir. Ancak incelenen kalınlıktaki tüm modlar dilim kalınlığının artması ile genel olarak daha yüksek frekans değerlerinde ortaya çıkmaktadırlar.

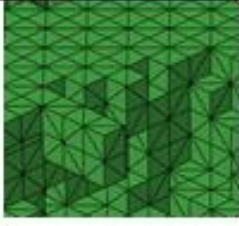

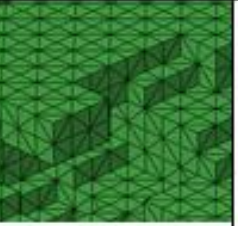
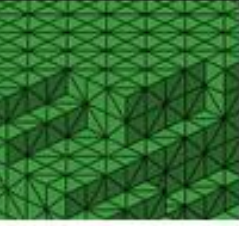





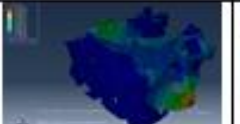




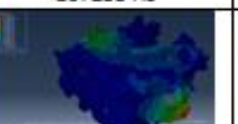





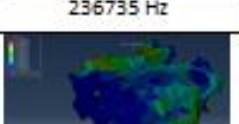



Şekil 4.3.'daki grafiğe ait doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu bölgeler çizelge 4.2.' de sunulmuştur.




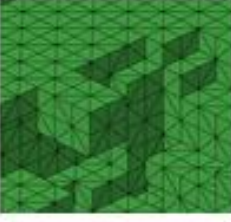
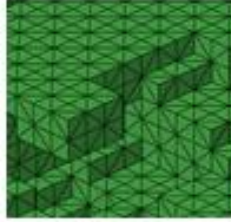
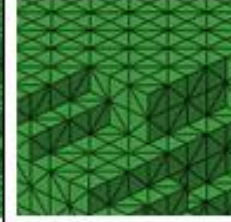
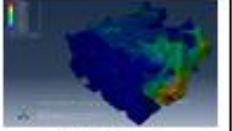
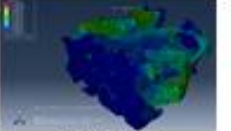
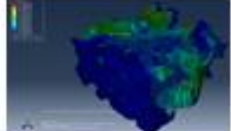


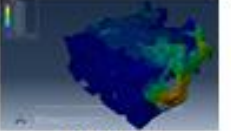
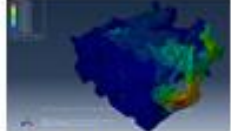

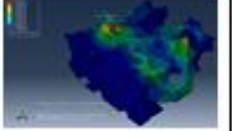
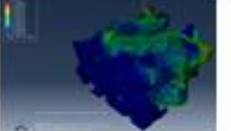
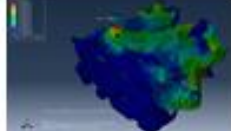


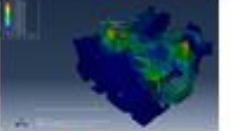
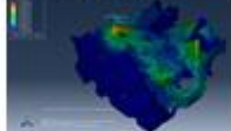
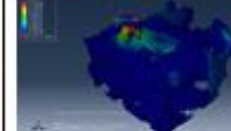
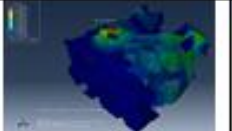



**Çizelge 4.2. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi**  
**( 1. ve 5. Mod Aralığı)**

|                     |  |  |   |  |
|---------------------|--|--|---|--|
| Ağ Tipi             |                 |                 |                 |                 |
| Dilim kalınlığı     | 0,037mm  | 0,074 mm   | 0,111mm   | 0,148 mm   |
| Sonlu Eleman Boyutu | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037   | 0,037x0,037x0,037  |
| Mod 1               | <br>117894 Hz   | <br>115916 Hz   | <br>112566 Hz   | <br>107450 Hz   |
| Mod 2               | <br>129990 Hz  | <br>128817 Hz  | <br>125996 Hz  | <br>123905 Hz  |
| Mod 3               | <br>138905 Hz | <br>137691 Hz | <br>135550 Hz | <br>133944 Hz |
| Mod 4               | <br>160151 Hz | <br>157623 Hz | <br>140176 Hz | <br>148997 Hz |
| Mod 5               | <br>203848 Hz | <br>158829 Hz | <br>152676 Hz | <br>184779 Hz |



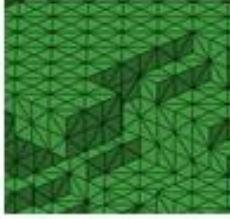
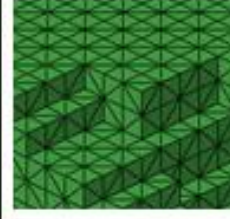
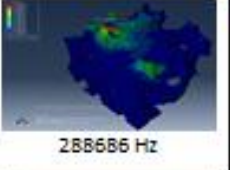


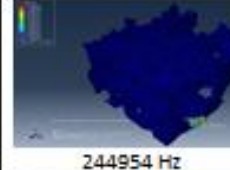


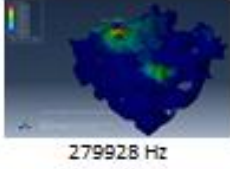
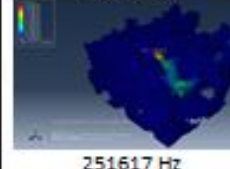
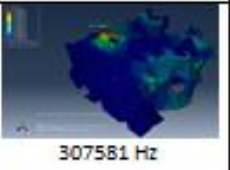

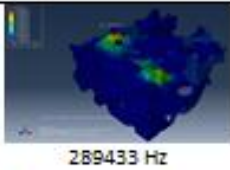
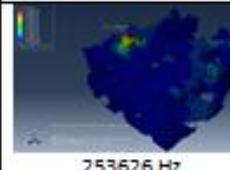
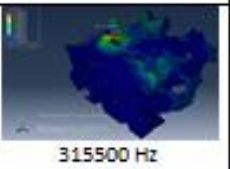
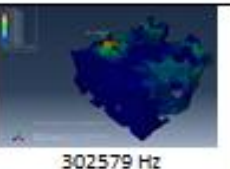
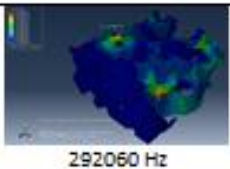
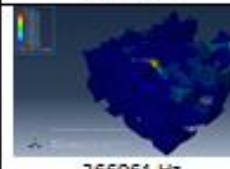
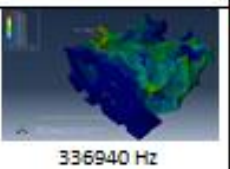
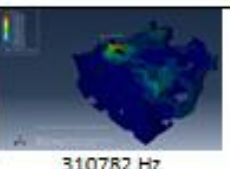
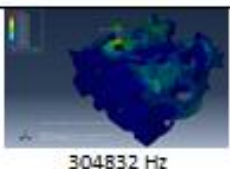
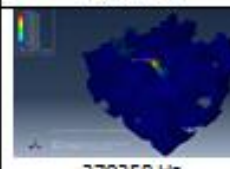
**Çizelge 4.3. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi**  
**( 6. ve 10. Mod Aralığı)**

|                     |  |  |   |  |
|---------------------|--|--|---|--|
| Ağ Tipi             |                 |                 |                 |                 |
| Dilim kalınlığı     | 0,037 mm   | 0,074 mm   | 0,111 mm  | 0,148 mm   |
| Sonlu Eleman Boyutu | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037   | 0,037x0,037x0,037  |
| Mod 6               | <br>212605 Hz   | <br>192223 Hz   | <br>156103 Hz   | <br>189286 Hz   |
| Mod 7               | <br>224618 Hz  | <br>199499 Hz  | <br>167253 Hz  | <br>196613 Hz  |
| Mod 8               | <br>231584 Hz | <br>206720 Hz | <br>195077 Hz | <br>215592 Hz |
| Mod 9               | <br>236735 Hz | <br>230062 Hz | <br>223562 Hz | <br>216502 Hz |
| Mod 10              | <br>241457 Hz | <br>232327 Hz | <br>229509 Hz | <br>219664 Hz |

**Çizelge 4.4. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi**  
**( 11. ve 15. Mod Aralığı)**

|                     |  |  |   |  |
|---------------------|--|--|---|--|
| Ağ Tipi             |                 |                 |                 |                 |
| Dilim kalınlığı     | 0,037 mm   | 0,074 mm   | 0,111 mm  | 0,148 mm   |
| Sonlu Eleman Boyutu | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037   | 0,037x0,037x0,037  |
| Mod 11              | <br>254059 Hz   | <br>239796 Hz   | <br>233949 Hz   | <br>227415 Hz   |
| Mod 12              | <br>263017 Hz  | <br>249321 Hz  | <br>245082 Hz  | <br>228884 Hz  |
| Mod 13              | <br>268901 Hz | <br>257400 Hz | <br>249123 Hz | <br>236565 Hz |
| Mod 14              | <br>279696 Hz | <br>264420 Hz | <br>261018 Hz | <br>239779 Hz |
| Mod 15              | <br>288034 Hz | <br>275412 Hz | <br>268133 Hz | <br>241888 Hz |

**Çizelge 4.5. Dilim kalınlığının Modelin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkisi**  
**( 16. ve 20. Mod Aralığı)**

|                     |  |  |   |  |
|---------------------|--|--|---|--|
| Ağ Tipi             |                 |                 |                 |                 |
| Dilim kalınlığı     | 0,037 mm   | 0,074 mm   | 0,111 mm  | 0,148 mm   |
| Sonlu Eleman Boyutu | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,037   | 0,037x0,037x0,037  |
| Mod 16              | <br>288686 Hz   | <br>282567 Hz   | <br>273185 Hz   | <br>244954 Hz   |
| Mod 17              | <br>300669 Hz  | <br>284612 Hz  | <br>279928 Hz  | <br>251617 Hz  |
| Mod 18              | <br>307581 Hz | <br>295025 Hz | <br>289433 Hz | <br>253626 Hz |
| Mod 19              | <br>315500 Hz | <br>302579 Hz | <br>292060 Hz | <br>266061 Hz |
| Mod 20              | <br>336940 Hz | <br>310782 Hz | <br>304832 Hz | <br>270258 Hz |

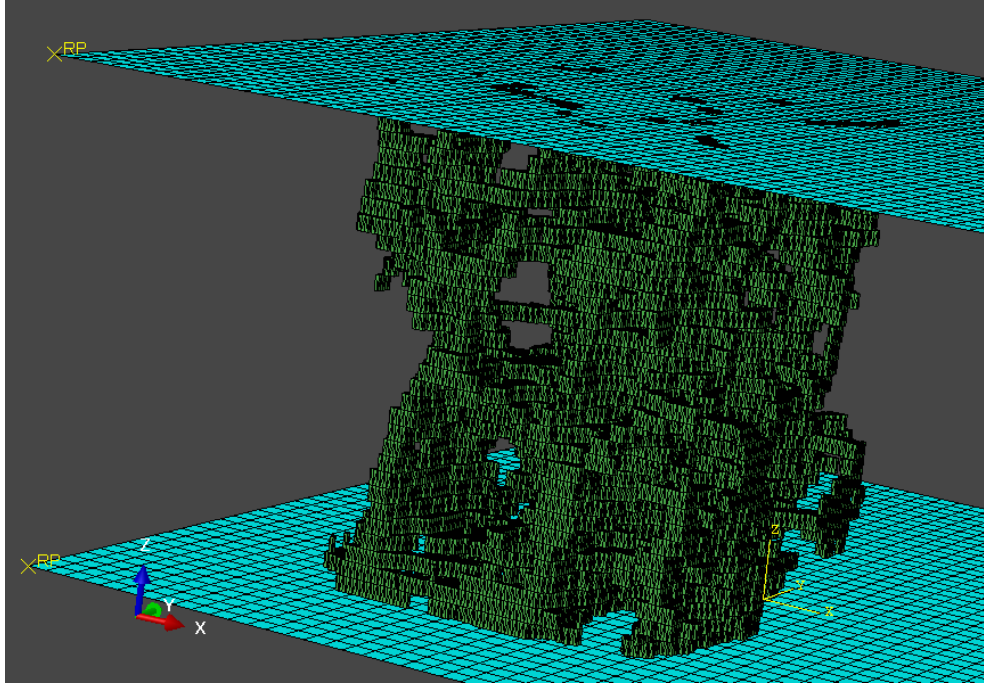
Çizelge 4.2., 4.3., 4.4. ve 4.5.'e bakıldığında farklı dilim kalınlıklarında aynı mod numarasında mod şekilleri ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu bölgelerin aynı olmadığı görülmektedir. Bunların aynı mod olabilmesi için tam olarak aynı bölgesinin aynı hareketi yapması gerekmektedir.

Örneğin, 7. Moda bakıldığında, mod numarası aynı olmasına rağmen tüm mod şekillerinin ve mod şekillerinin en büyük şekil değişimlerinin olduğu yerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.(Bkz. Ek.2)

Bu, bir diğer bakış açısı ile bir cisim araya bir diğerinde olmayan ilave mod almıştır. Bu durumun oluşması, incelenen parametrenin yani dilim kalınlığının doğal titreşim davranışı üzerindeki etkisi sadece sayısal değer olarak değil aynı zamanda mod yapılarının sıralamalarını değiştirecek kadar önemlidir.

## 5.0. MİKRO-BT GÖRÜNTÜLERİNİN DİLİM KALINLIĞININ SONLU ELEMAN MODELLERİNİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bu bölümde, dilim kalınlıklarının sonlu eleman modellerinin burkulma davranışına olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. 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.



Şekil 5.1. Solid modelin görünümü

Yapılan çalışma bir özdeğer özvektör problemi olup, malzeme özellikleri, etkililen yük ve sınır koşulları aşağıda açıklanmaktadır. Uygulanan  $P_z$  yükü referans noktasından etkililmiştir.

RP (Üst)

$\delta_x = \delta_y = 0$  deplasman

$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$  dönme

$P_z = 1$  N

RP (alt)

$\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0$  deplasman

$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$  dönme

Burkulma Analizindeki Malzeme Değerleri:

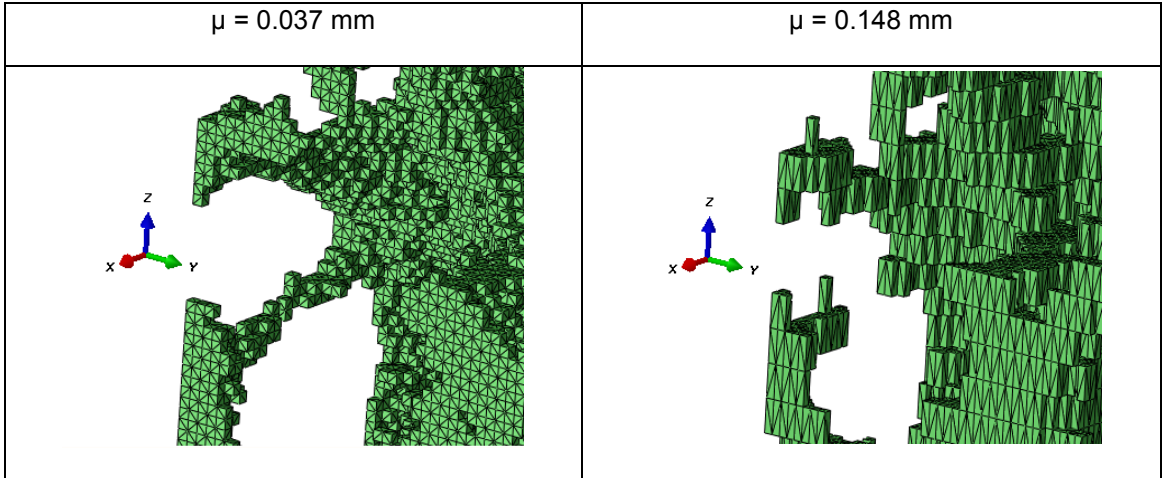
Kütle Yoğunluk Değeri ( $\rho$ ) =  $1,75 \cdot 10^{-9}$  ton/mm<sup>3</sup>

Elastisite Modülü (E) = 17250 N/mm<sup>2</sup>

Poisson Oranı ( $\nu$ ) = 0,28

Ele alınan numune iki plak arasında sıkıştırılmış olup, altta ki plak ankastre mesnet olarak modellenerek rijit hale getirilmiştir. Üstteki plağın ise sadece z doğrultusunda hareketine izin verilmiş olup yükte bu doğrultuda etkilmiştir.

Alt ve üstteki levhalar rijittir. Bu levhalar rijit olduğu için üzerlerinde gerilme oluşmaz, esneme olmaz. Numune ile levhalar temas noktalarından birbirine bağlanmıştır. Numunenin levhaların içerisinde geçmemesi için model oluşturulurken düğüm noktaları birbirine bağlanmıştır.



**Şekil 5.2. Farklı dilim kalınlıklarındaki modelin görünümü**

Elde edilen sonuçlar yorumlanırken dilim kalınlığının modelin morfolojisini ne şekilde etkilediğinin de bilinmesi faydalı olacaktır. Aynı çalışma bölgesinin 0.037 mm ve 0.148 mm lik dilim kalınlıklarının kullanılarak elde edilmiş solid modellerdeki görünüşleri şekil 5.2.'de verilmiştir. Model geometrilerinin morfolojik olarak incelenmesi durumunda 0.037 mm aralıklı taramadan elde edilen modelin üzerinde olan bir bölümün 0.148 mm tarama aralığına sahip modelde olmadığı veya bunun tersinin olduğu geometrik yapılar görülmektedir.

**Çizelge 5.1. Farklı dilim kalınlıklarındaki yapısal değerler**

|                                     | Voksel Boyutu (mm) |                   |                    |                    |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
|                                     | 0,037x0,037x0,037  | 0,037x0,037x0,074 | 0,037x0,037x0,0111 | 0,037x0,037x0,0148 |
|                                     | (a)                | (b)               | (c)                | (d)                |
| <b>Yüzey alanı (mm<sup>2</sup>)</b> | 254.948885         | 239.487392        | 231.20494          | 229.542972         |
| <b>Hacim (mm<sup>3</sup>)</b>       | 8.49633197         | 8.54617423        | 8.5596987          | 8.67483268         |

Fakat genel olarak Çizelge 5.2. deki sonuçlarla, Çizelge 5.1. deki (alan hacim) yapısal görünüm birlikte değerlendirilirse adım aralığının sık olduğu Çizelge 5.1.a daki solid modelin Çizelge 5.1. b deki ne göre daha büyük bir yüzey alanına sahip olması sebebi ile daha çok ayrıntıyı barındırdığı anlaşılmaktadır. Öte yandan daha az ayrıntılı olan Çizelge 5.1. b deki model daha az yüzey alanına sahip olmasına rağmen Çizelge 5.1.a ya göre daha büyük bir hacme sahiptir.

**Çizelge 5.2. Voksel Boyutları için Burkulma Yükleri**

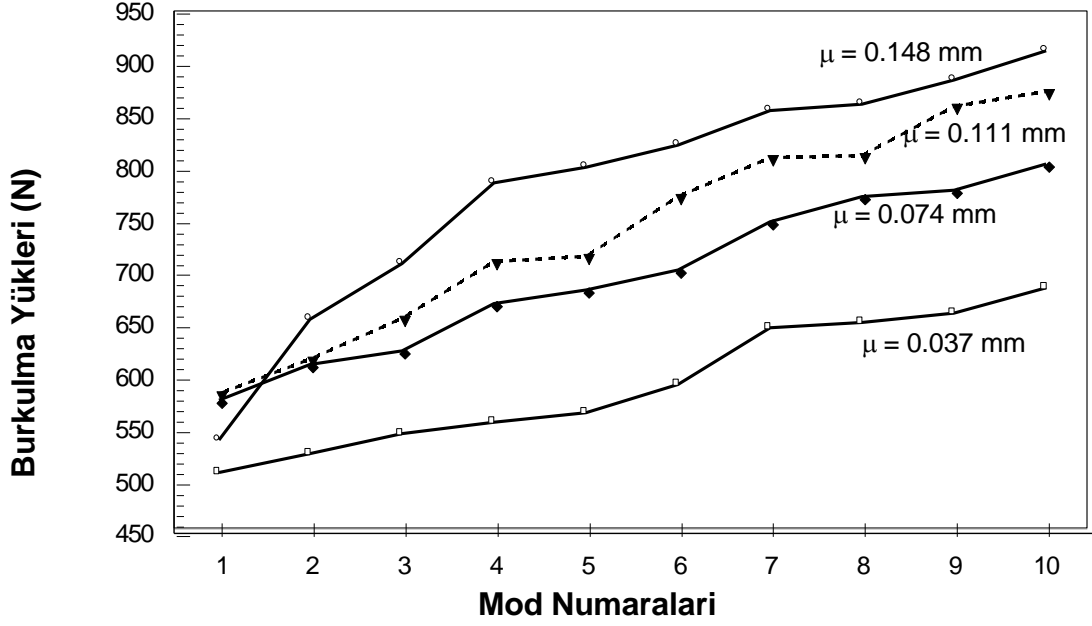
|                         |    | Voksel Boyutları (mm) |                   |                   |                   |
|-------------------------|----|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                         |    | 0,037x0,037x0,037     | 0,037x0,037x0,074 | 0,037x0,037x0,111 | 0,037x0,037x0,148 |
| <b>Burkulma Modları</b> | 1  | 508.79                | 577.57            | 584.29            | 539.79            |
|                         | 2  | 527.14                | 611.85            | 616.80            | 655.58            |
|                         | 3  | 546.14                | 625.49            | 656.08            | 708.12            |
|                         | 4  | 556.56                | 670.78            | 710.85            | 785.98            |
|                         | 5  | 565.86                | 683.09            | 715.23            | 800.76            |
|                         | 6  | 592.79                | 702.38            | 772.54            | 821.77            |
|                         | 7  | 647.30                | 748.37            | 810.15            | 855.37            |
|                         | 8  | 652.43                | 773.24            | 811.75            | 861.18            |
|                         | 9  | 661.14                | 778.34            | 858.84            | 884.04            |
|                         | 10 | 685.45                | 803.60            | 873.33            | 912.78            |



Çizelge 5.1.'de farklı,yönlere bağlı boyut oranına sahip vokseller kullanılarak elde edilmiş modellerin temel geometrik özellikleri verilmiştir. Dilim Kalınlığının artması ile birlikte toplam yüzel alanı % 9.965 azalmış, hacim ise % 2.101 oranında artmıştır. Bu sonuçlar aynı kemik yapısının farklı ROI nin kullanıldığı Altıntas (2011-b) çalışmadaki sonuçlar ile uyumludur.

Çizelge 5.2. de ise ilk on moddaki burkulma yükleri dilim kalınlığına bağlı olarak verilmiştir ve tablo incelendiğinde dilim kalınlığı azaldıkça ilk on burkulma modu aralığı daralmıştır. Birinci mod hariç diğer tüm modların ortaya çıktığı burkulma yükleri dilim kalınlığının artması ile artmıştır.

Burkulma problemlerinin sonuçları doğrudan yapısal rijitlik ile bağlantılıdır. Fakat yapısal rijitlik değerleri hacim ve yüzey alanı değerlerinden dolayı olarak etkilensede malzemenin yapısal dağılım şekli ve biçiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Özellikle biyolojik yapılar söz konusu olduğunda doğal bir optimizasyon söz konusudur. Örneğin en az malzeme ve dolayısı ile en az ağırlıkla en çok yükü taşıyabilecek mikro taşıyıcı mimariler sıklıkla araştırma konusu olmaktadır. Bu sebeple sadece en kesit alanı toplam yüzey alanı ve toplam hacim gibi geometrik büyüklüklerin tek başına doğrudan sistemin mekanik davranışını belirleyebileceğini özellikle organik yapılar için bir kural olarak söylenmesi doğru olmayabilir. Bunun yerine konuyla ilgili teorik model sonuçlarını incelemek tek başına geometrik tanımlamalara bakmaktan daha doğru sonuçlar verebilir.



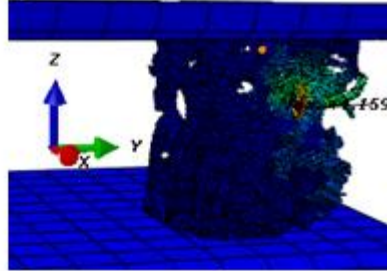
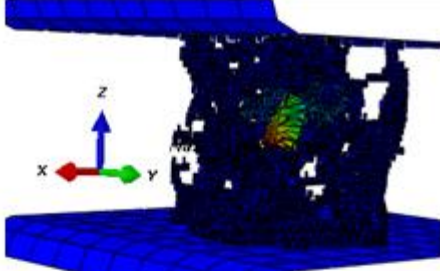
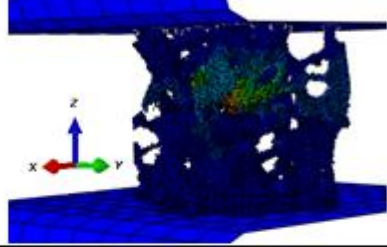
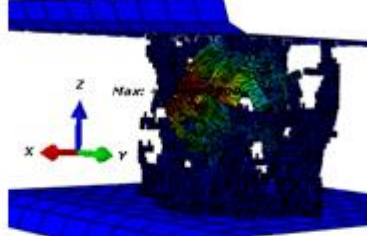
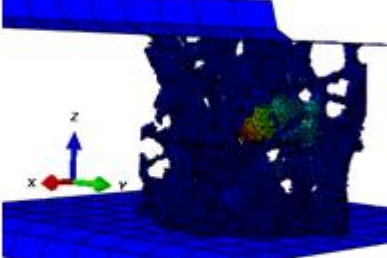
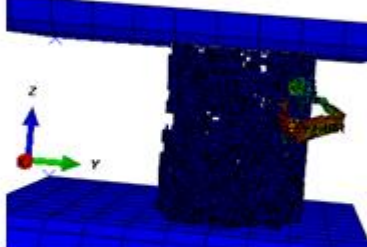
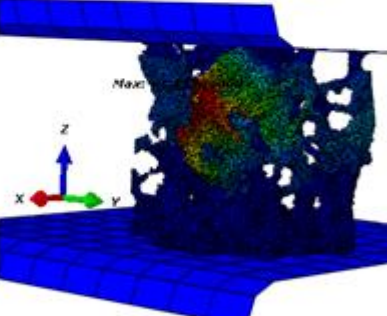
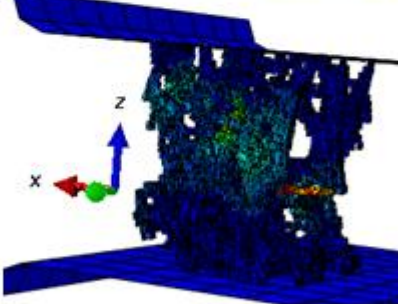
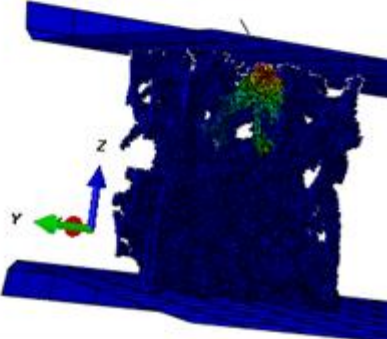
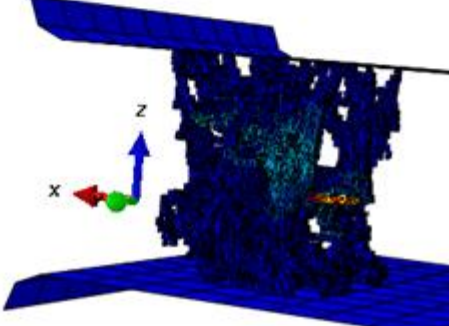
**Şekil 5.3. Burkulma Modu Yük Değerleri**

Bu ve benzeri düzensiz değerleri anlamlandırabilmek için mod yapılarının değişim trendlerinin daha açık görülebilmesi için Şekil 5.3.'ün incelenmesi faydalı olabilir. Grafik incelenirse birinci burkulma moduna ait yük değerleri diğer modlara ait yük değerlerine göre düzensizlik göstermektedir ve burkulma yükü değerlerinin sıralaması diğer modlardan farklıdır. Birinci burkulma modu hariç inceleme kapsamındaki diğer modlar için konuşulması gerekirse modelin hassasiyeti azaldıkça (dilim kalınlığı arttıkça) burkulma yüklerinin artması tehlikeli bir durumu işaret eder. Bir diğer deyişle çalışma hassaslaştıkça burkulma yüklerine yukarıdan yakınsama olurki bu durum analizden elde edilen yük taşıma kapasitesini gerçektekenden fazla olarak tespit edilmesi demektir.

Altıntaş (2011-b) tarafından incelenen doğal titreşim probleminin yapısı da bu çalışmada incelenen problem gibi bir özdeğer özvektör problemidir. Her ne kadar incelenen büyüklükler tamamen farklı olsada sistematik açıdan özdeğerlerin özvektörlerden bağımsız olarak incelenmemesi gerektiği Altıntaş tarafından açıkça ortaya konmuştur.

Bu çalışmada burkulma yüklerine eşlik eden burkulma modu şekilleride incelenmiş olup Çizelge 5.3. de burkulma yükü değeri ilgili mod şekli ile birlikte sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Burkulma Yükleri ve Mod Şekilleri

| BURKULMA YUKLERI VE ŞEKILLERİ |   |                          |  |
|-------------------------------|---|--------------------------|--|
|                               | $\mu = 0.037 \text{ mm}$  | $\mu = 0.148 \text{ mm}$ |  |
| Mode 1-508.79 N.              |    | Mode 1-539.79 N.         |    |
| Mode 2-527.14 N.              |    | Mode 2-655.58 N.         |    |
| Mode 3-546.14 N.              |   | Mode 3-708.12 N.         |   |
| Mode 4-556.56 N.              |  | Mode 4-785.98 N.         |  |
| Mode 5-565.86 N.              |  | Mode 5-800.76 N.         |  |

Çizelge 5.3.' de mod şekilleri ile burkulma yükü değerleri beraberce değerlendirildiğinde oldukça ilginç sonuçlar ortaya çıkmıştır. Şöyleki standart prizmatik cisimlerdeki mod yapılarından farklı olarak genel bir mod yapısından bahsedilememektedir ve aynı mod numarasına sahip olan mod şekilleri birbirlerinden farklı mod yapılarına aittir. Farklı modeller farklı mod yapılarına sahiptir. Bu sebeple sadece mod numarasına ve burkulma yükü değerine bakarak bir yorumda bulunmak yanlış çıkarımlara yol açabilir.

Örneğin, 4. moda bakıldığında, mod numarası aynı olmasına rağmen tüm mod şekillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.( Bkz. Ek 3)

Bu durum, başka bir deyişle bir cismin araya bir diğerinde olmayan ilave mod almış olduğunun göstergesidir. Bu durumun oluşması, incelenen parametrenin yani dilim kalınlığının burkulma davranışı üzerindeki etkisi sadece sayısal değer olarak değil aynı zamanda mod yapılarının sıralamalarını değiştirecek kadar önemlidir.

## 6.0. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, Mikro-BT görüntülerinden solid model oluşturulması sırasında kullanılan görüntü işlem prosedürleri kapsamında kullanılan parametrelerin voksel tabanlı sonlu eleman modellerinin doğal titreşim ve burkulma davranışları 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.

Aynı şekilde dilim kalınlığında değişmesi doğal frekans değerlerini etkilemiştir. Dilim kalınlıkları farklı 0,148mm, 0,111 mm, 0,074 mm, 0,037 mm olan modellerden türetilen dış geometri sınırları ve hacimleri aynı olmasına rağmen sonlu eleman boyutları 0,0037x0,037x0,037 mm<sup>3</sup>'e düşürülen modeller karşılaştırılmış olup, sonlu eleman boyutu düşürülmüş modellerin doğal titreşim modlarına ait frekans değerleri genel olarak daha düşük değerlerde ortaya çıkmasına rağmen, buna uymayan modlarda vardır. Ayrıca dilim kalınlığı değişiminde sadece doğal frekans değerlerinin değil, aynı zamanda farklı eşik değerinde aynı mod numarasındaki mod şekillerinin ve en büyük şekil değiştirmenin olduğu bölgelerin aynı olmadığı görülmüştür.

Dilim kalınlığı değişiminin burkulma analizi üzerinde etkisi incelendiğinde ise, dilim kalınlığı azaldıkça ilk on burkulma modlarının ortaya çıktığı yük aralığı daralmıştır. Birinci mod hariç diğer tüm modların ortaya çıktığı burkulma yükleri dilim kalınlığının artması ile artmıştır.

Burkulma yükü değerleri ile mod şekilleri birlikte değerlendirildiğinde oldukça ilginç sonuçlar ortaya çıkmıştır. Şöyle ki, standart prizmatik cisimlerdeki mod yapılarından farklı olarak genel bir mod yapısından bahsedilememektedir ve aynı mod numarasına sahip olan mod şekilleri birbirinden farklı mod yapılarına aittir. Farklı modeller farklı mod yapılarına sahiptir. Bu sebeple sadece mod numarasına ve burkulma yükü değerine bakarak bir yorumda bulunmak yanlış çıkarımlara yol açabilir. Başka bir deyişle bir cismin araya bir diğerinde olmayan ilave mod almış olduğunun göstergesidir. Bu durumun oluşması, incelenen parametrelerin yani dilim kalınlığının burkulma davranışı üzerindeki etkisi sadece sayısal değer olarak değil aynı zamanda mod yapılarının sıralamalarını değiştirecek kadar önemlidir.

Bu tez çalışmanın genel sonucu olarak söylenebilirki, voksel tabanlı sonlu elemanlar uygulamalarında görüntü işlem parametrelerinin doğru olarak seçilmesinin her ikisinde birer özdeğer çözümü gerektiren doğal titreşim ve burkulma problemlerinde sadece nümerik olarak değil aynı zamanda modal davranışlar açısından da önemli olduğu ortaya konulmuştur.

Yapılan bu çalışmanın sonuçlarının sadece teorik değil aynı zamanda pratik uygular açısından da önemli olduğu düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

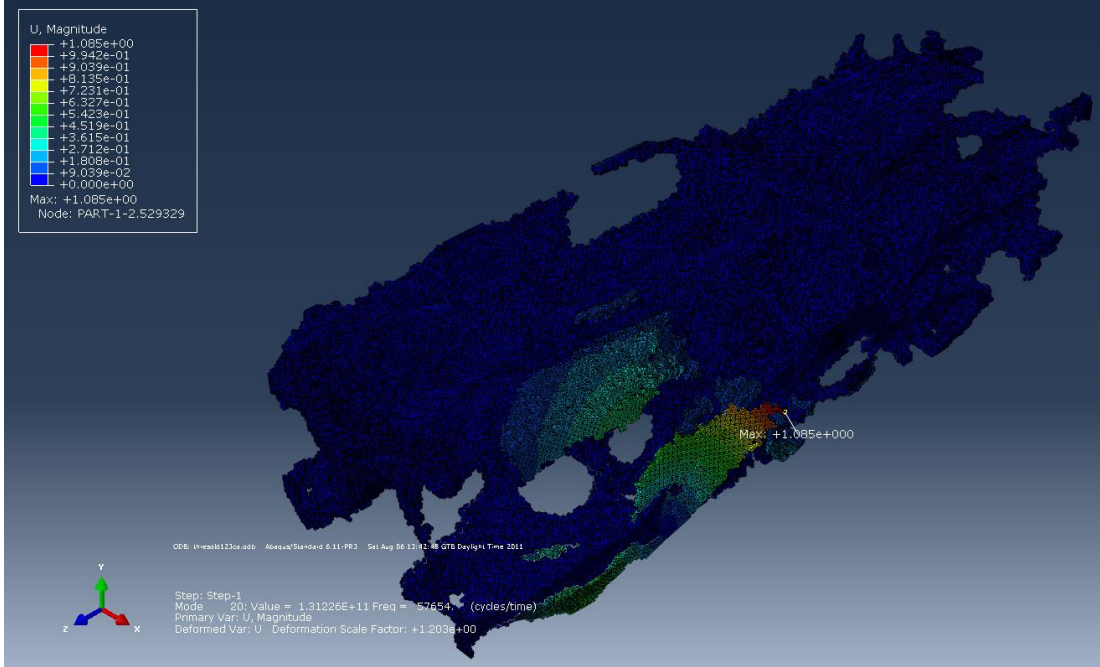
1. Zhang, Y., Bajaj, C. and Sohn, B. "3D finite element meshing from imaging data", *Comput. Method Appl. M.*, **194**, pp. 5083–5106 (2005).
2. Zhang, Y., Hughes, T.J.R. and Bajaj C.L. "An automatic 3D mesh generation method for domains with multiple materials", *Comput. Method Appl. M.*, **199**, pp. 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. Griffith, J., F. and Genant, H., K. "Bone mass and architecture determination: state of the art", *J. Clin. Endocrinol.Metab.*, **22(5)**, pp. 737-764 (2008).
9. Genant, H.K. and Jiang, Y. "Advanced imaging assessment of bone quality", *Annals New York Academy of Sciences*, 1068, pp. 410–428 (2006).
10. 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 ).
11. Altintas, G. "Node-id based non-recursive flood fill algorithm for non-uniform discrete solid domains ", *2<sup>nd</sup> World Conference On Information Technology*, November 23-27 Antalya, Turkey (2011-a).

12. 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 Kuşadası – TURKEY (2011-b).

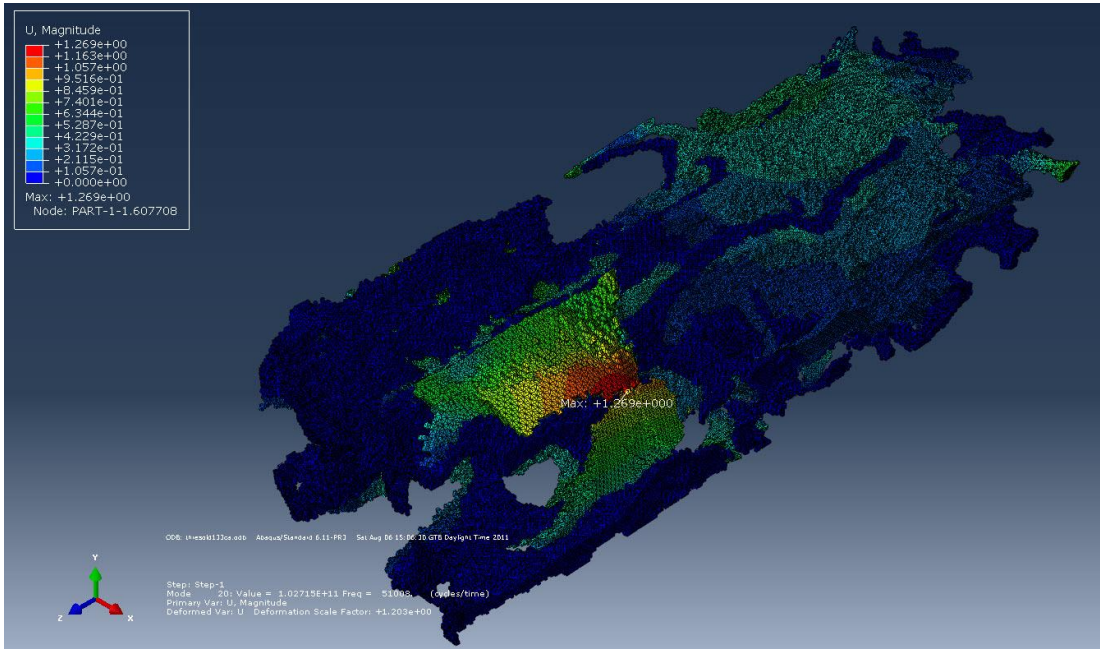


## EKLER

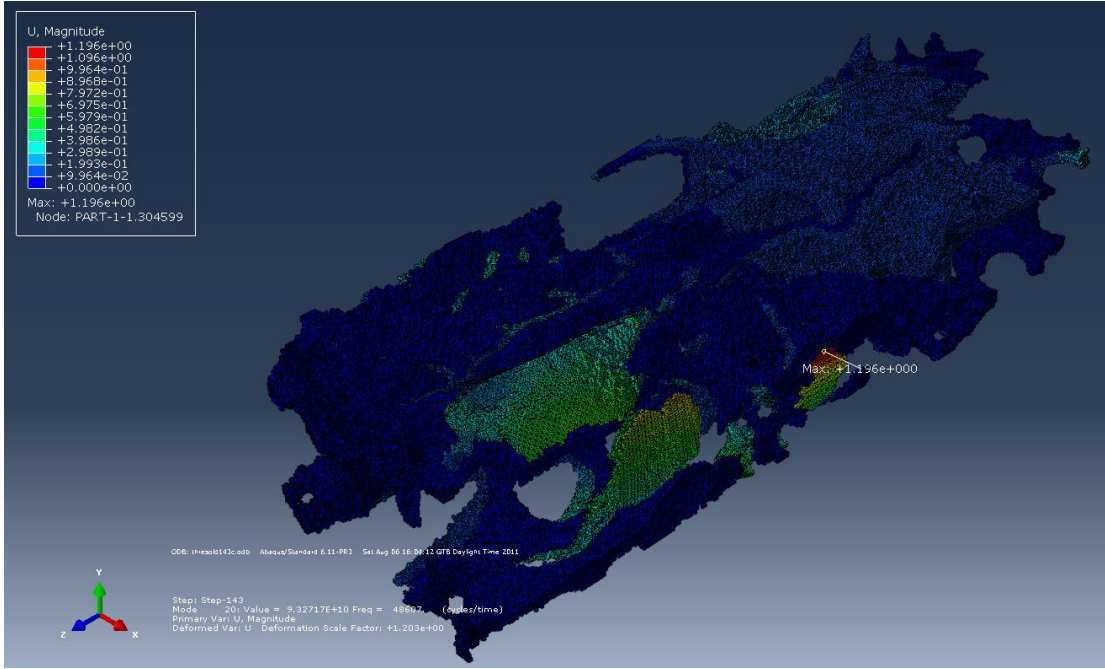
## EK 1



Şekil E.1.1. Eşik Değer (123-255) 20. Mod Görüntüsü

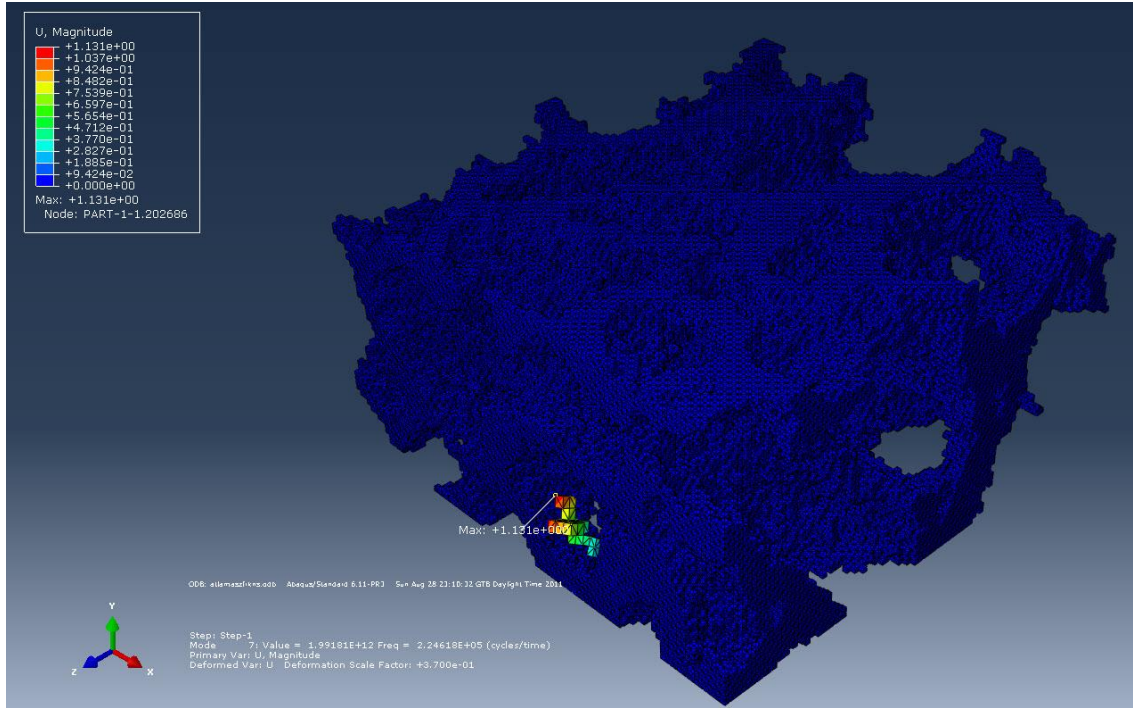


Şekil E.1.2. Eşik Değer (133-255) 20. Mod Görüntüsü

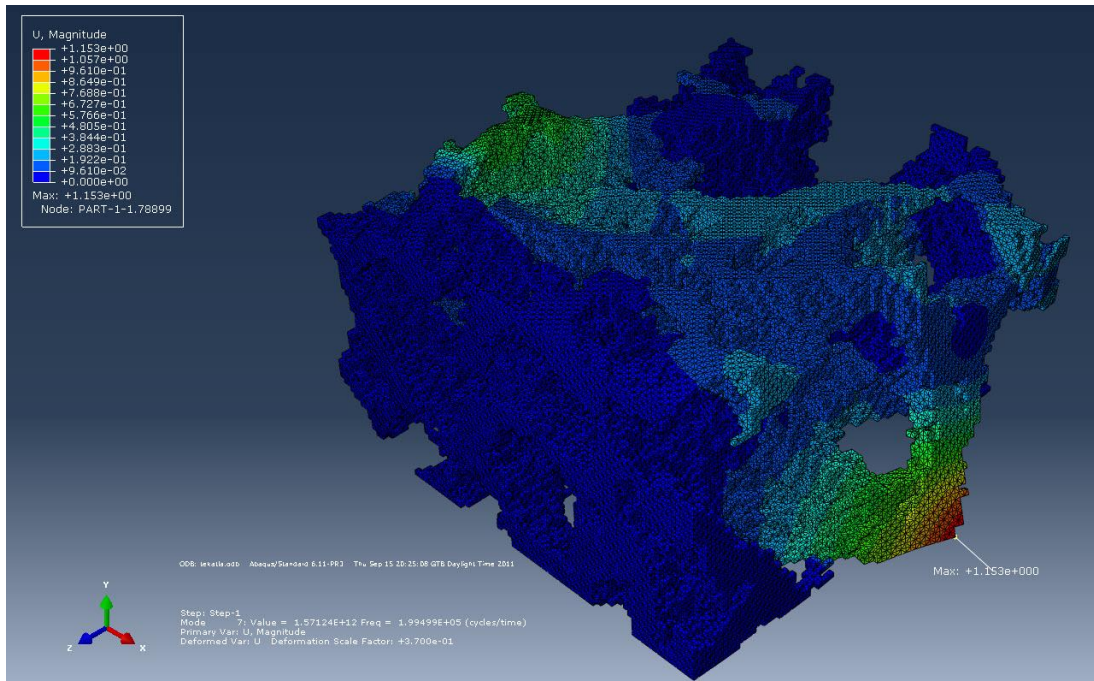


Şekil E.1.3. Eşik Değer (143-255) 20. Mod Görüntüsü

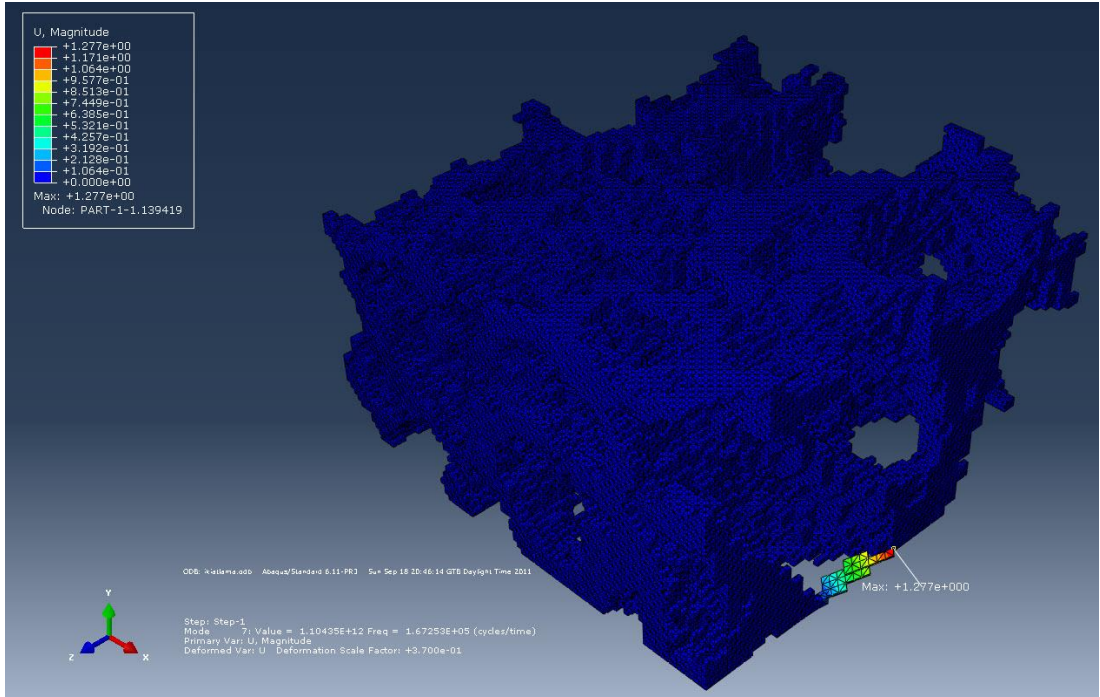
## EK 2



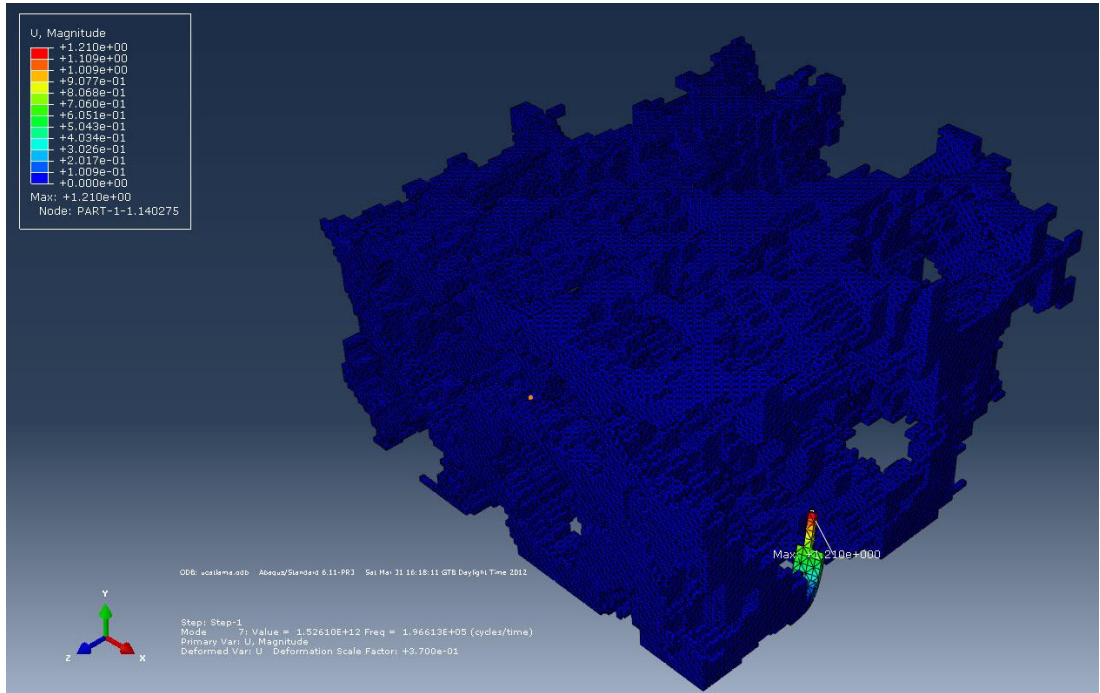
Şekil E.2.1. 0,037 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü



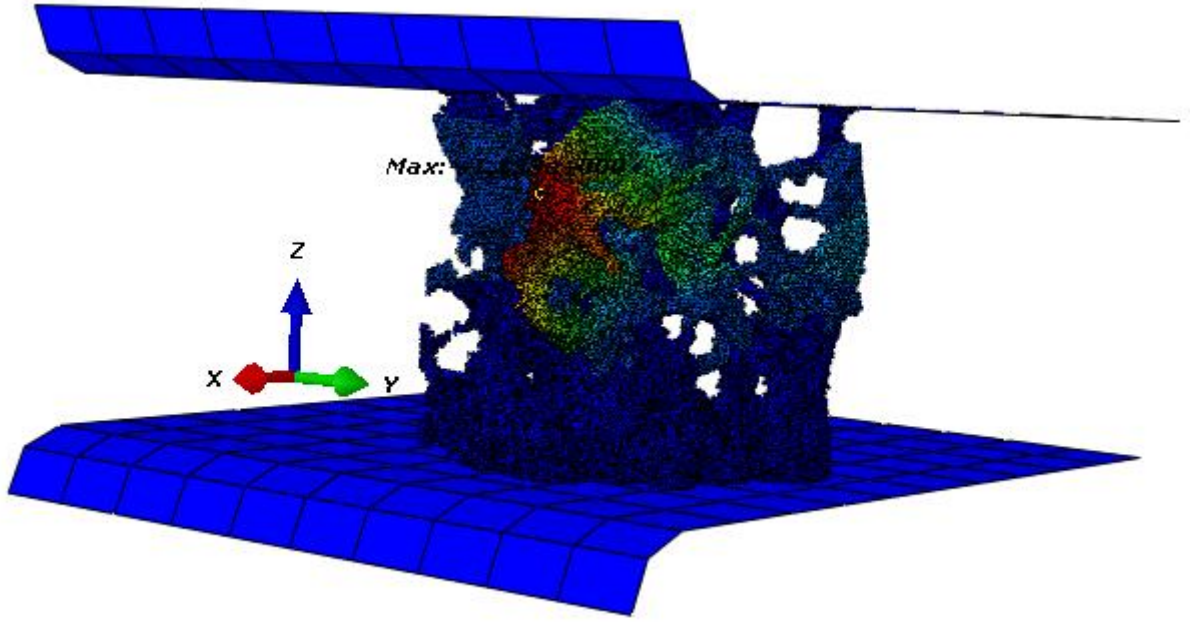
Şekil E.2.2. 0,074 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü



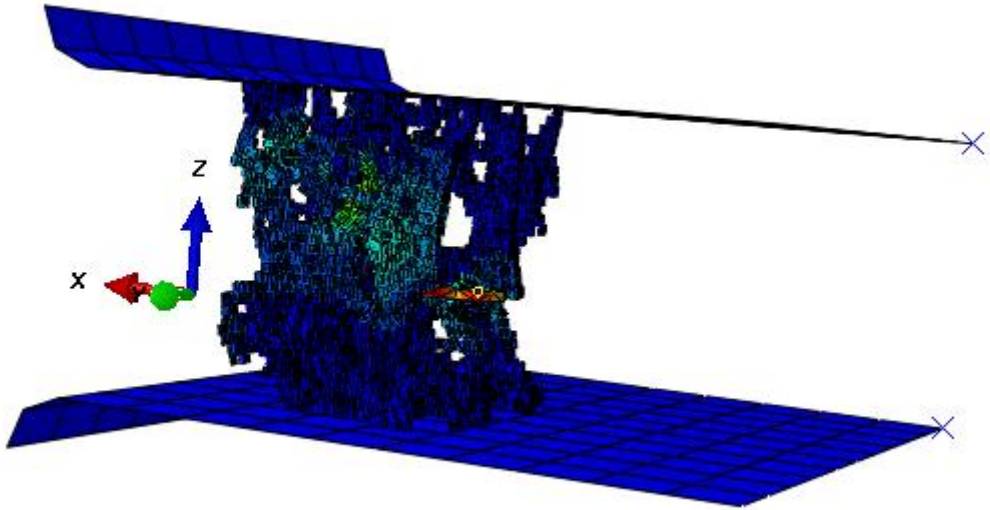
**Şekil E.2.3. 0,111 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü**



**Şekil E.2.4. 0,148 mm Dilim Kalınlığındaki 7. Modun Görüntüsü**

**EK 3**

Şekil E.3.1. 0,037 mm Dilim Kalınlığında 4. Burkulma Modunun Görünümü



Şekil E.3.2. 0,148 mm Dilim Kalınlığında 4. Burkulma Modunun Görünümü

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi : 29 Nisan 1982  
Doğum Yeri : Çanakkale / Merkez

**İnşaat Mühendisliği Eğitimleri**

|               |             |  |
|---------------|-------------|--|
| Lisans        | 2005 - 2008 | Manisa Celal Bayar Üniversitesi<br>Mühendislik Fakültesi<br>İnşaat Mühendisliği                                      |
| Yüksek Lisans | 2009 - 2012 | Manisa Celal Bayar Üniversitesi<br>Fen Bilimleri Enstitüsü<br>İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı<br>Mekanik Programı |