

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPLEKS GEOMETRİYE SAHİP MALZEMELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ GÖRÜNTÜ İŞLEM DESTEKLİ SONLU ELEMANLAR
METODU İLE İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnşaat Yüksek Mühendisi Abdulkerim ERGÜT

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Mekanik

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPLEKS GEOMETRİYE SAHİP MALZEMELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ GÖRÜNTÜ İŞLEM DESTEKLİ SONLU ELEMANLAR
METODU İLE İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnşaat Yüksek Mühendisi Abdulkerim ERGÜT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Nisan 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Nisan 2013

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Gökhan ALTINTAŞ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Erdoğan ÖZKAYA (CBÜ)

Doç.Dr. Bengi ARISOY (EÜ)

Doç.Dr. Oktay DEMİRDAĞ (PAÜ)

Yrd.Doç.Dr. B.Gültekin SINIR (CBÜ)

MANİSA 2013

İÇİNDEKİLER	Sayfa No
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
TEŞEKKÜR	XIV
ÖZET	XV
ABSTRACT	XVI
1. GİRİŞ	1
2.KONU KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR	3
3. MATERYAL VE METOD	8
3.1 Görüntü Analizi Ve Görüntü Alma	8
3.1.1 Görüntünün Sayısallaştırılması	8
3.1.2 Görüntü Analizi	8
3.1.2.1 Görüntü Alma	9
3.1.2.2 Görüntü İşleme	11
3.1.2.2.1 Gri-Düzey Skala	12
3.1.2.2.2 Histogram	13
3.1.2.2.3 Eşik Değer Segmentasyonu	13
3.1.2.2.4 Çözünürlük	14
3.1.3 Görüntünün Bilgisayarlı Tomografi ile Elde Edilmesi	14
3.1.3.1 Bilgisayarlı Tomografinin Temelleri ve Cihazın Bileşenleri	15
3.1.3.2 Bilgisayarlı Tomografi Cihazının Çalışma Prensibi	16
3.1.3.3 X-Ray Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerini Etkileyen	
Değişkenler	16
3.2 Sonlu .Elemanlar Metodu	17
3.2.1 Sonlu Elemanlar C3D4 Elemanı	17

3.2.2 Sonlu Elemanlar C3D8 Elemanı	21
3.3 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking)	25
3.3.1 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Çatlak Doğrultuları	25
3.3.2 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Çatlak Belirleme	26
3.3.3 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Çekme Sertleşmesi	26
3.3.3.1 Kırılma Sonrası Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi	26
3.3.3.2 Kırılma Çatlama Enerji Kriteri	27
3.3.4 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Karakteristik	
Çatlak Boyu	28
3.3.4.1 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Kesme Engelleme Modeli	28
4. ANALİZ	31
4.1 Beton Numunesi İçin Yapılan Analizler	31
4.1.1 Beton Numunesinin Oluşturulması	31
4.1.2 Gerçek Beton Numunesine Üç Nokta Deneyi Yapılması	31
4.1.3 Gerçek Beton Numunesine Yapılan Üç Nokta Deneyi Sonuçları	32
4.1.4 Beton Numunesine Ait Görüntü Alımı Ve Görüntü Verileri	33
4.1.5 Beton Numunesine Ait Görüntülere Eşik Değer Uygulanması	33
4.1.6 Beton Numunesine Ait Sonlu Elemanlar Modelinin Elde Edilmesi	37
4.1.7 Beton Numunesine Ait Sonlu Eleman Özellikleri ve Geometrik	
Özellikler	39
4.1.8 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman	
Modeline Malzeme Parametrelerinin Atanması	39
4.1.9 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman	
Modeline Analiz Tipinin Girilmesi	41

4.1.10 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modelinin Üç Nokta Deney Simülasyonunun Oluşturulması	41
4.1.11 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeline Yapılan Üç Nokta Deneyi Sonuçları	41
4.1.12 Gerçek Beton Numunesine Yapılan Üç Nokta Deney İle Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeline Yapılan Üç Nokta Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	43
4.1.13 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeli Üzerinde En Büyük Asal Gerilme Değerlerinin Gösterilmesi	52
4.2 Mercan Numunesi İçin Yapılan Analizler	56
4.2.1 Mercan Numunesi Görüntü Alma ve Görüntü Verileri	56
4.2.2 Mercan Numunesine Ait Görüntülere Eşik Değer Uygulaması	56
4.2.3 Mercan Numunesine Ait Görüntülerden 3B Katı Modelin Elde Edilmesi	58
4.2.4 Mercan Numunesine Ait Görüntülerden Sonlu Eleman Modelin Elde Edilmesi	58
4.2.5 Mercan Numunesine Ait Sonlu Eleman Modeli Üzerinde Yapılan Geometrik Analizler	59
4.2.6 Mercan Numunesine Ait Sonlu Eleman Modeli Üzerinde Yapılan Eksenel Yükleme Deneyi	61
4.2.7 Simülasyon Sonuçlarına Bağlı Olarak Homojenizasyon Yöntemi İle Görünür Elastisite Modülünün Tayini	65
5. SONUÇLAR	66

KAYNAKLAR	68
EKLER	71
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 2B Beton BT Görüntüsü (Morgan et. al., 1980)	3
Şekil 2.2 2B Betonarme BT Görüntüsü (Martz et.al., 1993)	4
Şekil 2.3 2B Harç Görüntüsü (Landis et. al., 2003)	4
Şekil 2.4 3B Yüzey Çatlak Görüntüsü (Zhang, 2004)	5
Şekil 2.5 Tetrahedral Ağ Görüntüsü (Zhang et. al. 2005)	5
Şekil 3.1 Sayısallaştırma işleminde temel aşamalar (Yaman vd., 2001)	9
Şekil 3.2 Görüntünün Optik Formda Alınması, Analog Forma Dönüştürme ve Dijital Forma Dönüştürme Aşamaları (Yaman vd., 2001)	10
Şekil 3.3 Piksel ve Vokselin Şematik Gösterimi	11
Şekil 3.4 Gerçek boyutlu resim (264x58 piksel)	14
Şekil 3.5 Boyutları İki Kat Arttırılmış Resim (528x116 piksel)	14
Şekil 3.6 Doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4	18
Şekil 3.7 Doğrusal heksahedral eleman tipi C3D8	21
Şekil 3.8 Kırılma sonrası gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	26
Şekil 3.9 Kırılma sonrası gerilme-deplasman ilişkisi	27
Şekil 3.10 Kırılma sonrası gerilme-deplasman ilişkisi	27
Şekil 3.11 Kesme engelleme modelinin parçalı lineer formu	29
Şekil 3.12 Kesme engelleme modelinin kuvvet yasası formu	30
Şekil 4.1 Beton Numuneye Ait Üç Nokta Deney Düzeneği	29
Şekil 4.2 Beton Numuneye Ait Üç Nokta Deney Sonucu Oluşan Kuvvet-Zaman Grafiği	29
Şekil 4.3 Beton Numunelerin Bilgisayarlı Tomografi ile Görüntülenmesi	30
Şekil 4.4 Beton Numunesine Ait Bilgisayarlı Tomografi En Kesit Görüntüleri	31

Şekil 4.5 Beton Numunesinde Ait 2B Görüntülere Eşik Değer Uygulaması	31
Şekil 4.6 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen 3B Katı Model	33
Şekil 4.7 Doğrusal heksahedral eleman tipi C3D8	35
Şekil 4.8 Sonlu Eleman Modeline Abaqus® Programında Malzeme Özelliklerinin Atanması	37
Şekil 4.9 Sonlu Eleman Modelinin Abaqus® Programında Analiz Tipinin Girilmesi	38
Şekil 4.10 Sonlu Elemanlar Modelin ABAQUS® Programında Yüklenmesi ve Mesnetlenmesi	39
Şekil 4.11 Sonlu elemanlar Modeline Ait Kuvvet-Deplasman İlişkisi	40
Şekil 4.12 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=0)	41
Şekil 4.13 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=2,1sn)	42
Şekil 4.14 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=5,95sn)	43
Şekil 4.15 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=9,8sn)	44
Şekil 4.16 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=12,6sn)	45
Şekil 4.17 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=16,45sn)	46
Şekil 4.18 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=19sn)	47
Şekil 4.19 Üç Nokta Deney Sonrası Kuvvet-Deplasman İlişkisi	48
Şekil 4.20 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=1,05sn)	49
Şekil 4.21 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=2,10sn)	49
Şekil 4.22 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=3,15sn)	50
Şekil 4.23 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=4,90sn)	50
Şekil 4.24 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=5,95sn)	50
Şekil 4.25 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=7,70sn)	51
Şekil 4.26 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı(T=9,80sn)	51

Şekil 4.27 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı($T=12,6sn$)	51
Şekil 4.28 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı($T=16,45sn$)	52
Şekil 4.29 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı($T=19,0sn$)	52
Şekil 4.30 2B Mercan Numunesi Görüntülerine Eşik Değer Uygulaması	54
Şekil 4.31 Mikro-BT Görüntülerinin İşlenerek 3B Katı Modelin Elde Edilmesi	55
Şekil 4.32 Mercan Numunesine Ait Sonlu Eleman Modeli (Eşik Değeri 110-255 arası)	56
Şekil 4.33 Model Hacminin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimine	57
Şekil 4.34 Model Yüzey Alanının Eşik Değer Aralığına Göre Değişimine	57
Şekil 4.35 Porozitenin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimine	58
Şekil 4.36 Mercan Numunelerinin Mesnetlenme Durumları	59
Şekil 4.37 Yönlere Bağlı Deplasmanın Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi	60
Şekil 4.38 Yönlere Bağlı Von Mises Gerilme Değerinin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi	61
Şekil 4.39 Yönlere Bağlı Maks. Gerilme Değerinin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi	61
Şekil 4.40 Yönlere Bağlı Min Gerilme Değerinin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi	62
Şekil 4.41 Yönlere Bağlı Görünür Elastisite Modülünün Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi	62
Şekil E.1 Beton Numune-2, Üç Nokta Deney Düzeneği	69
Şekil E.2 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen 3B Katı Model	70
Şekil E.3 Sonlu Eleman Meshi Geçirilmiş Modeller	71
Şekil E.4 Katı Modelin ABAQUS® Programında Yüklenmesi ve Mesnetlenmesi	72
Şekil E.5 Üç Nokta Deney Sonuçları ($T=0$)	72
Şekil E.6 Üç Nokta Deney Sonuçları ($T=5,25sn$)	73
Şekil E.7 Üç Nokta Deney Sonuçları ($T=10,5sn$)	74

Şekil E.8 Üç Nokta Deney Sonuçları ($T=15,9\text{sn}$)	75
Şekil E.9 Üç Nokta Deney Sonuçları ($T=22,1\text{sn}$)	76
Şekil E.10 Üç Nokta Deney Sonuçları ($T=26\text{sn}$)	77

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Beton Numunesine Ait Malzeme Konfigürasyonu	17
Çizelge 4.2 Modelin Temel Geometrik Özellikleri ve Sonlu Eleman Özellikleri	26
Çizelge 4.3 Malzeme Özellikleri	27
Çizelge E.1 Modelin Temel Geometrik Özellikleri ve Sonlu Eleman Özellikleri	61
Çizelge E.2 Malzeme Özellikleri	61

KISALTMALAR LİSTESİ

BT	Bilgisayarlı Tomografi
Mikro-BT	Mikro Bilgisayarlı Tomografi
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
ROI	Region Of Interest (ilgilenilen bölge)
u, v, z	Eleman deplasman fonksiyonları
X, Y, Z	Kartezyen koordinatlar
r, s, t	Doğal koordinatlar
C_{ij}	Sabit katsayı
S_i	Şekil fonksiyonu
a_i, b_i, c_i, d_i	Katsayı
V	Hacim
u	Herhangi bir noktadaki deplasman
S	Şekil Fonksiyonu matrisi
a	Katsayılar matrisi
ε	Şekil değişikliği
σ	Gerilme
D	Elastisite matrisi
$P(x)$	Dijital görüntü histogramı
r_k	k'ıncı gri seviye
nk	gri seviyeye sahip toplam piksel adedi
n	görüntü üzerindeki toplam piksel adedi

C3D4	Doğrusal tetrahedral sonlu eleman tipi
C3D8	Doğrusal heksahedral sonlu eleman tipi
G_f^I	Gerekli enerjinin çatlak birim alanı
σ_{tu}^I	Kırılma gerilmesi
u_{n0}	Çatlak normal deplasmanı
G	Çatlamamış malzemenin kayma modülü
G_c	Çatlak sonrası kayma modülü
e_{nn}^{ck}	Çatlak açılma şekil değişikliği
ρ	Kesme engelleme faktörü
e_{max}^{ck}	En büyük çatlak açılma şekil değişikliği

TEŞEKKÜR

İlginç ve önemli bir konuda tez hazırlamamı sağlayan danışmanım sayın Doç.Dr. Gökhan ALTINTAŞ'a tez hazırlama sırasında iyi niyet, yüksek anlayış, teknik yönlendirmeler ve katkılardan dolayı minnettarım.

Ayrıca tez çalışmam sırasında manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eşime teşekkür ederim.

ABDULKERİM ERGÜT

ÖZET

KOMPLEKS GEOMETRİYE SAHİP MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ GÖRÜNTÜ İŞLEM DESTEKLİ SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

Bu tez kapsamında kompleks geometriye sahip malzemelerin mekanik özellikleri görüntü işlem destekli sonlu elemanlar metodu ile incelenmeye çalışılmıştır.

Tersine mühendislik uygulamaları, hesaplama kapasitesinin ve ölçüm tekniklerinin hassasiyetinin artması ile günümüzde önem kazanmıştır ve daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle uygulamaları tıp, inşaat ve malzeme mühendisliği gibi bir çok branşta kullanım alanına sahiptir. Tersine mühendislik üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım, bilgisayar destekli üretim ve bilgisayar destekli mühendislik için varolan parçaların üç boyutlu sanal modellerinin oluşturulması için kullanılan bir metod haline gelmiştir. Tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak beton numunesi ve mercan numunesi üzerinde incelemeler yapılmıştır.

Karmaşık geometriye sahip agrega, su, çimento ve kum karışımından oluşan beton numunesinin görüntü verileri bilgisayarlı tomografi ile elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler ile tersine mühendislik yöntemleri yardımıyla voksel tabanlı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan 3 boyutlu katı modele ABAQUS® programında üç nokta eğme deneyi yapılarak, gerçek numune üzerinde yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Poroz malzeme yapısına ve karmaşık bir geometriye sahip mercan numunesi üzerinde en önemli görüntü işleme parametrelerinden biri olan eşik değeri değişiminin geometrik özelliklere, eksenel yükleme deneyine ve yönlere bağlı elastisite modülü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Makro kabuller çerçevesinde kullanılan elastisite modülü değerleri ile gerçek elastisite modülü değerleri arasındaki farklılıkları ve ilişkileri voksel tabanlı sonlu elemanlar metodu kullanılarak ortaya konulmuştur. Gerçekçi geometri tanımlamaları Mikro-Bilgisayarlı Tomografi cihazları kullanılarak yapılmıştır. Seçilen parametreler ışığı altında yapılan analizlerle poroz malzemeler ile homojen malzemelerin elastisite modülleri arasındaki ilişki elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelenen parametrelerin kompleks geometrilere örnek olarak seçilen beton ve mercan numunesinin mekanik özellikleri üzerinde çok önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Sonuçlar mutlaka göz önünde bulundurulması gereken görüntü verileri seçiminin pratik uygulamalardaki önemini de ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tersine mühendislik, Voksel tabanlı sonlu elemanlar metodu, Bilgisayarlı tomografi, Poroz malzeme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS HAVING COMPLEX GEOMETRY BY IMAGE PROCESSING SUPPORTED FINITE ELEMENTS METHOD

In the scope of this thesis, mechanical behavior of the materials having complex geometry are investigated by image processing supported finite elements method

Reverse engineering applications become important with the development in calculation capacity and sensitivity of measurement techniques. Reverse engineering applications are used in many areas such as medical, civil and material engineering. Reverse engineering has become a method which is used in three dimensional computer aided design, computer aided production and three dimensional virtual models for computer aided engineering. Investigations are performed on concrete and coral specimen by using reverse engineering methods.

Image data of concrete specimen which is formed of aggregate having complex geometry, water, cement and sand is obtained by computed tomography. With the obtained data, voxel based finite elements method is formed by reverse engineering methods. 3 points bending test is applied to the three dimensional solid model in ABAQUS[®] program and compared with the experimental results. Carrying properties are investigated after analyses.

Effect of change in threshold value on coral specimen having porous material structure and complex geometry on geometrical properties, static analyses and directional elasticity module is investigated. Differences and relationships between elasticity module which is used in within the scope of macro acceptance and real elasticity module values are presented by using voxel based finite elements method. Realistic geometry definitions are made by micro computed tomography devices. The relationship between elasticity modules of homogenous and porous materials are obtained in the analyses in the light of selected parameters.

Obtained results reveal that investigated parameters have remarkable effects on carrying properties of concrete and coral specimen which have complex geometries. The results also show the importance of image data choice which must be taken into consideration on practical applications.

Key Words: Reverse engineering, Voxel based finite elements method, Computed tomography, Porous material

1. GİRİŞ

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

Bu tez kapsamında bir çok method ve farklı disiplinler bir arada kullanılarak orijinal bir çalışma yapılmıştır. Karmaşık geometriye sahip malzemelerden oluşan beton numunesi ile karmaşık bir geometriye sahip poroz mercan numunesinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu tip malzemeler gerek geometrik formları gerekse de kimyasal özellikleri sebebi ile mikro mekanik tasarımlardan, tıbbi uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sahip oldukları karmaşık geometrik formları sebebi ile poroz malzemelerin mekanik analizleri genellikle çeşitli homojenizasyon işlemlerinden sonra yapılır. Mikro mimarideki detayların homojenize edilerek makro yapısal analizlerde kullanılması zaman ve hesaplama açısından büyük bir tasarruf sağladığı bilinen bir gerçektir. Bununla beraber günümüzde gelişen teknoloji ve tersine mühendislik teknikleri sayesinde malzemelerin mikro mimari detayları da modellere dahil edilerek son derece gerçekçi analizlerin yapılması mümkün olmakta ve bu çözüm tekniği yaygınlaşmaktadır.

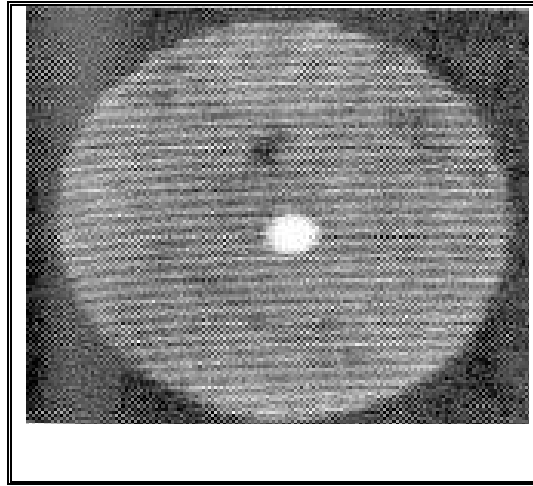
Tez çalışması sırasında yapılan analizlerin birinci kısmında çimento, su, kum ve agrega karışımından elde edilen beton numunesi için hesaplamalar yapılmıştır. Oluşturulan beton numunesi, bilgisayarlı tomografi taramasından geçirilmiştir ve sıralı görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak 3 boyutlu katı model haline getirilmiştir. Daha sonra katı model sonlu eleman modeline dönüştürülerek analiz yapılacak duruma getirilmiştir. Gerçek numune üzerinde yapılan deney ile tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak elde edilen model üzerinde yapılan deney analizler bölümünün de sunulmuştur.

Mikro ölçekte yapısal detaylara sahip olan mercan numunesi üzerinde yapılan geometrik ve statik analizler, analiz bölümünün ikinci kısmında yer almaktadır. Cisimlerin mikro ve nano ölçekteki davranışlarının önemli olduğu problem tiplerinde homojenizasyon tekniklerini uygulayarak genel davranışlarını belirlemek yerine mikro lokal özelliklerin göz önüne alınarak çalışılması amaca daha uygun bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. Gelişen teknoloji ve bilgisayar gücü, tersine mühendislik teknikleri ile birlikte kullanılarak mikro ölçekte hassas çözümler gerektiren problemlerin, geometri ve malzeme homojenizasyonu yapılmadan gerçek geometri ve malzeme özellikleri ile ele alınmasına imkan vermektedir. Makro ölçekteki katı mekanik problemlerinin ele alınmasında büyük kolaylık sağlayan homojenizasyon işlemlerinde kullanılan malzeme özellikleri ve geometrik parametreler mikro ölçekteki çalışmalarda değer ve özellik açısından büyük farklılıklar göstermektedirler. Porozite oranının bilinmesi ile malzemelerin gerçek kütle değerlerini hesaplamak kolay olmasına rağmen mikro yapıdaki değişiklikler malzeme değişme dahi yapının rijitliğini ve bağlı özelliklerinde büyük değişikliklere yol açabilmektedir. Mikro detayların analizlere kısmen dahil durumlarda bile poroz malzemelerin makro ve mikro düzeydeki elastisite modülü değerleri arasında büyük farklılıklar olduğu ortaya konulmuştur.

2.KONU KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

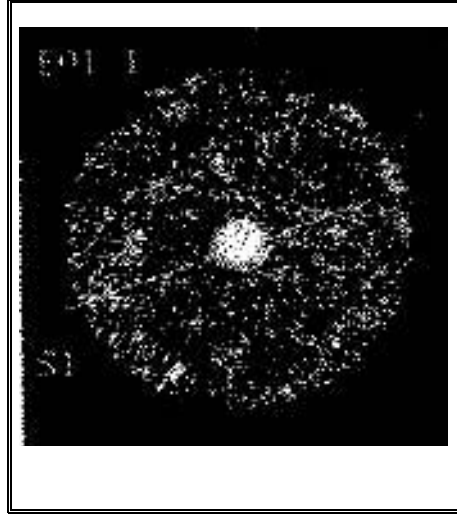
X-Ray Bilgisayarlı Tomografi teknolojisi ilk olarak sağlık uygulamalarında kullanılmak için geliştirilmiştir. İlk X ray BT taraması 1972 yılında İngiltere de G. N. Hounsfield tarafından maksimum çözünürlüğü 80x80 piksel olarak insan beyninin taranmasında kullanılmıştır. Teknoloji 1973 yılında Amerika Birleşik Devletleri' de Georgetown Üniversitesinde tüm insan vücut görüntüsünü alabilmek için geliştirilmiştir. X-Ray BT cansız örnekleri görüntülemek için yüksek enerji seviyeleri ve daha hızlı bilgisayarlar sayesinde geliştirilmiştir.

1980 yılında Teksas Üniversitesindeki bir grup bilim adamları ve mühendisler tarafından beton değerlendirilmesi için BT kullanılmıştır (Morgan et. al., 1980). Şekil 2.1 de görülen 2B görüntüleri oluşturmak için 662-keV gama ışınları kullanmışlar fakat 3B rekonstrüksiyon girişimleri olmamıştır. Bu süreçte elde edilen görüntüler inceleme amaçlı kullanılmıştır, BT ile değerlendirmenin erken olduğu görülmüştür.



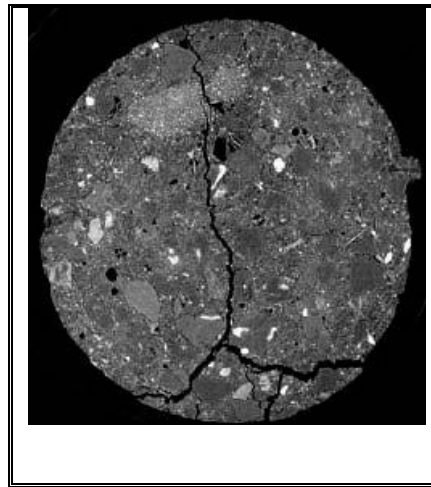
Şekil 2.1 2B Beton BT Görüntüsü (Morgan et. al., 1980)

1993 yılında, benzer bir deney, Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir (Martz et. al. 1993). Bu sefer beton ve çelik, her malzemenin zayıflama faktörleri (emilen X ışını oranı) göz önüne alınarak görüntülenmiştir. 2B görüntüler oluşturmak için kullanılan zayıflama faktörleri malzeme yoğunluğu ile kabaca orantılı alınmıştır. Düşük enerji kaynakları ile yapılan her iki çalışmada da oluşan bulanık görüntüler nedeniyle uygulamada kullanılmamıştır (Şekil 2.2).



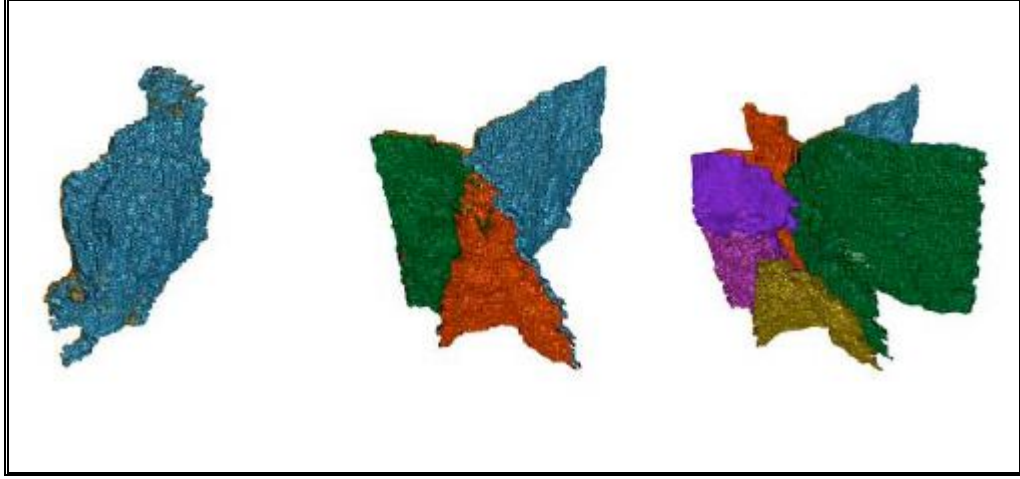
Şekil 2.2 2B Betonarme BT Görüntüsü (Martz et.al., 1993)

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. Yüksek enerjili radyasyon kaynakları, gelişmiş görüntüleme teknikleri ve gelişmiş BT algoritmaları ile BT teknolojisinde büyük gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmeler 2003 yılında Landis ve arkadaşları tarafından harç örnekleri üzerindeki çatlak yayılımını incelemek için mikro X-ray BT taramaları ile kullanılmıştır. Şekil 2.3 de basit bir örnek gösterilmektedir. Landis ve arkadaşları basınç altındaki harçta oluşan çatlakları gözlemlemek ve kırılma analizi hesaplarını gerçekleştirmek için yüksek çözünürlüklü (1024piksel X 1024piksel) görüntüler elde etmiştir. 4mm çaplı silindir harç numuneleri kullanılmıştır ve mikro BT imkanları yüksek çözünürlüklü görüntü sağlamıştır.



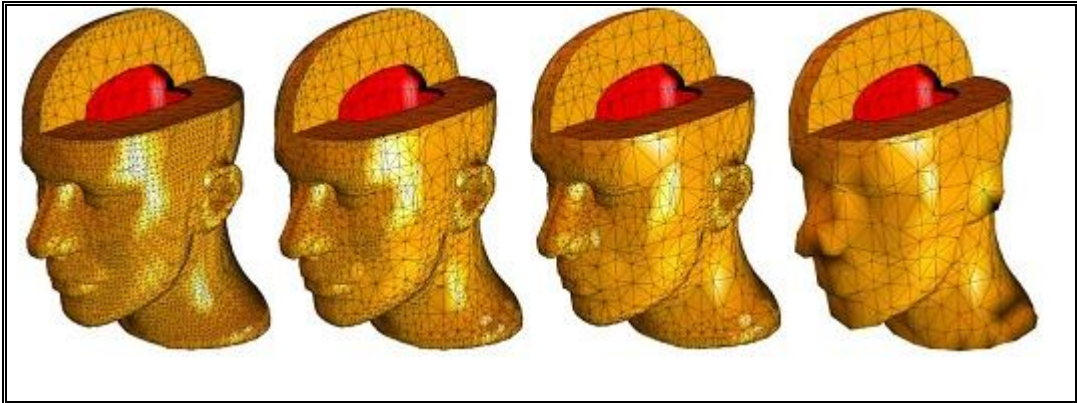
Şekil 2.3 2B Harç Görüntüsü (Landis et. al., 2003)

Zhang (2004) tarafından inşaat mühendisliğinde görüntü işleme alanında önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu tez yük altındaki küçük sıkıştırmalara maruz örneklerde çatlak ayıklama odaklıdır (Şekil 2.4). Görüntü kaydı tekniği kullanılarak yapısal değişiklikler izlenmiş ve yüzey çatlakları ve değerleri dönüştürülmüştür.



Şekil 2.4 3B Yüzey Çatlak Görüntüsü (Zhang, 2004)

Zhang ve Arkadaşlarının (2005) görüntü verilerinden doğrudan hacimsel ağların kaliteli ve uyarlanabilir bir şekilde elde edilmesini sağlayan bir algoritma elde etmişlerdir (Şekil 2.5). 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.



Şekil 2.5 Tetrahedral Ağ Görüntüsü (Zhang et. al. 2005)

Sıralı görüntü verilerinden elde edilen 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.

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

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

Ho ve Hutmacher (2006) farklı scaffold yapılarındaki mikro detayların ele alınmasında kullanılan içlerinde Mikro-BT destekli yaklaşımlarında bulunduğu farklı teknikleri yaptıkları çalışmalarında sunmuşlardır. Mikro-BT tekniğinin diğer oturmuş pek çok tekniğe oranla yeni olmasına rağmen üç boyutlu geometrilerin tanımlanmasındaki başarısı gibi pek çok avantaja sahip olduğu bu çalışmada gösterilmiştir.

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.

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.

Harrison ve arkadaşları (2008) çalışmalarında mikro detayların analizlere kısmen dahil durumlarda bile poroz malzemelerin makro ve mikro düzeydeki elastisite modülü değerleri arasında büyük farklılıklar olduğunu ortaya koymuşlardır.

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

Saxena ve Ramakrishnan (2007) yaptıkları çalışmalarında, mikro detayları dikkate alarak çözümlerin mekaniğin çeşitli problemlerinde farklı ölçeklerde ele alarak karşılaştırmalı çözümler yapmışlardır.

Farklı ölçeklerdeki çalışmalarda elde edilen malzeme parametrelerinin değerce değişiklik gösterdiği malzeme tiplerinden olan poroz malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi hususunda çok sayıda vibro-akustik uygulamayı da içeren yaklaşımlar önerilmektedir. Renault ve arkadaşları (2011) yapmış oldukları çalışmalarında viskoelastik poroz malzemelerin yapısal sönümü ve elastisite modülünün dinamik ölçümü için özel bir teknik geliştirmişlerdir. Bu tekniğin en büyük avantajı deney düzeneğinin basit oluşu ve ölçümlerin güvenilir olmasıdır.

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.

Altıntaş (2011) yapmış olduğu çalışmasında dilim kalınlığı değişiminin Mikro-BT tabanlı trabeküler kemik modellerinin doğal frekans analizlerine olan etkilerini incelemiştir.

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 incelemiştir. 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 verilerin dilim kalınlığı değerinin sonlu eleman modellerinin ortaya koyduğu doğal titreşim davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışmalardan farklı olarak bu tez kapsamında gerçek beton numunesi yapılan üç nokta deney sonuçları ile tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu eleman modeli üzerinde yapılan üç nokta deney sonuçları incelenecektir. Ayrıca tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen mercan numunesi üzerinde geometrik analiz ve eksenel yükleme deneyi analizi yapılacaktır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Görüntü Analizi ve Görüntü Alma

Gelişen teknoloji ile bilgisayar ve görüntüleme teknolojileri hızlı bir gelişme süreci içine girmiştir. Bu gelişmeler, dijital görüntülerin alınması, elde edilen verilerin işlenmesi ve ilgi alanlarındaki öznelitliklerden sayısal bilgilerin elde edilmesine yönelik bir çok uygulamayı da beraberinde getirmiştir. Görüntü analizi olarak isimlendirilen bu yöntemleri farklı bilim dallarında uygulama alanı bulunmaktadır. Özellikle inşaat ve malzeme mühendisliğinin pek çok dalında ve tıbbi uygulamalar gibi bir çok branşta kullanımlar giderek artmaktadır. Materyallerin doğal görüntüsü sürekli değişen gölge ve renk serilerinden oluşur. Fotografik görüntülerde ise gölgeler koyudan açığa, renkler ise kırmızıdan, sarıya ve yeşile doğru değişim gösterir. Bunun anlamı farklı gölgeler ve renkler karışarak, bozulmaksızın orijinal sahneyi meydana getirmektir.

3.1.1 Görüntünün Sayısallaştırılması

Bilgisayarla görme, görüntü veya görüntü setleri üzerinden bilgilerin teorik ve algoritmik olarak bilgisayar tarafından çıkarılıp incelenmesini sağlayan bir bilimdir. Görüntü üzerindeki nesneler, nesnelerin konumu, yönlendirmeleri ve boyutları ile ilgili kavramları içerir (Baxes,1994). Sayısal görüntüde ise normal fotografik görüntü öncelikle bireysel parlaklık değerlerine sahip noktalara bölünmelidir. Görüntünün sayısallaştırılması, kameradaki görüntünün optik-elektrik mekanizma ile elektriksel mekanizma ile elektrik sinyallere dönüştürülmesi işlemidir (Yaman vd., 2001).

3.1.2 Görüntü Analizi

Renkli ya da gri seviyelerde görüntüler elde etmek ve doğal gelişmenin bir sonucu olarak görüntüleri analiz etme ihtiyacı, bu görüntülerden bazı ölçüm ya da yaklaşım yöntemleri ile veriler elde edilebileceğini göstermiştir. Görüntü analizleri resimsel sonuçlar üretmek yerine, bazı ölçüm işlemleri kullanarak genellikle orijinal görüntü karakteristiklerine dayanan sayısal ve grafiksel bilgilerin elde edilmesini sağlarlar. Bu şekilde nesnelerin görüntüleri sadece 'resim' olmaktan çok, saf nitel bilgilerdir.

Görüntü analizinin iki temel evresi vardır. Bunlar:

-Görüntü alma

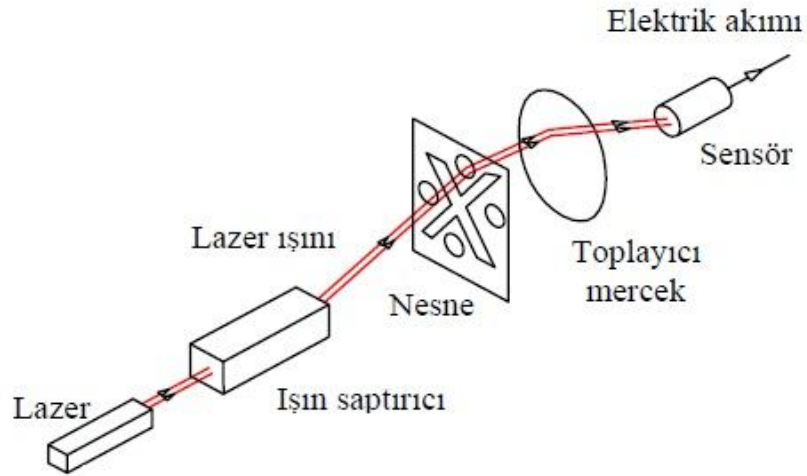
-Görüntü işleme

Bu evrelerin her biri, görüntü verilerinin istenilen amaç doğrultusunda kullanılabilmesi için uzmanlık ve bilgi gerektirir. Eğer veri işlemenin her bir evresinin etkileri tam olarak anlaşılmamışsa, ciddi olarak çarpıtılmış sonuçlara ulaşılabilecektir. Bu nedenle her bir aşamaya eşit önemin verilmesi gerekmektedir (Topal, 2008).

3.1.2.1 Görüntü Alma

Görüntü alma, bir diğer tanımla sayısallaştırma, kameradaki görüntünün optik elektrik mekanizma ile elektriksel sinyallere dönüştürmesi işlemidir. Bir görüntüyü sayısallaştırırken örnekleme ve nicelendirme denilen işlemler gerçekleştirilir. Görüntü alımının temel amacı, görüntü segmentasyonu ve öznelilik ölçüm işlemleri için filtrelenmiş bir görüntü üretmektir.

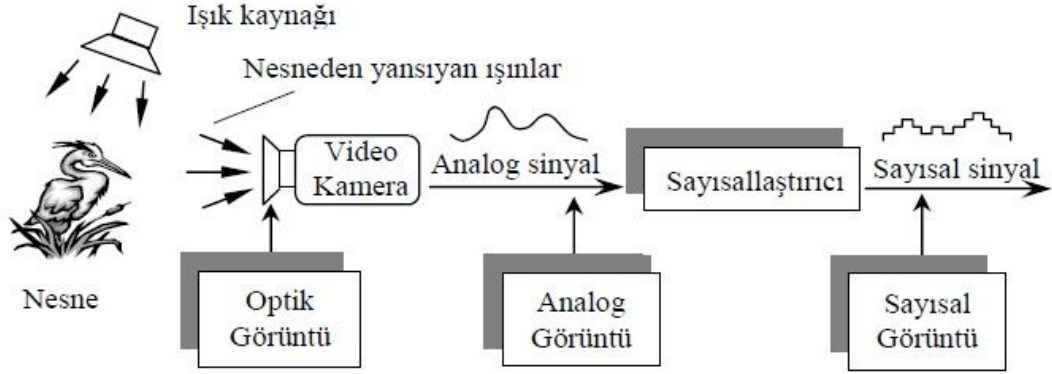
Sayısallaştırma işleminde temel aşamaların bir örneği Şekil 3.1 de görüldüğü gibidir. Mercekte oluşan görüntü kameranın sensörleri üzerine odaklanır. Bu ışık elemanları üzerinde ışığın durumuna göre elektrik sinyalleri üretilir. Bu sinyaller, bilgisayar ortamına görüntü aktarılmasında kullanılan analog sinyallerdir. Sinyalleri üreten sistemler vakum tüp, yarı iletken sensör gibi yapılardan oluşmaktadır (Yaman vd., 2001) .



Şekil 3.1 Sayısallaştırma işleminde temel aşamalar (Yaman vd., 2001)

Şekil 3.2 de görüntü yakalama evreleri kabaca gösterilmiştir. Burada bir ışık kaynağı ile aydınlatılmış nesne mevcuttur. Nesneden yansıyan ışınlar optik formda kameraya aktarılır. Nesneyi tanımlayan bu ışınlar, kamerada elektrik sinyallerine dönüştürülür. Böylece görüntü analog forma çevrilmiş olur. Analog sinyaller bir sayısal dönüştürücüde sayısal sinyallere dönüştürülür. Son aşamada sayısal formda dönüştürülen görüntü artık bilgisayar ortamına aktarılarak işlenecek hale getirilmiş olur. Bu işlem için görüntü sensörü ve bu sensörün üretmiş olduğu sinyalleri dijital forma dönüştürebilecek sistemlere ihtiyaç vardır. Sensörlerden elde

edilmiş sinyaller hala analog formda ise, analog-sayısal dönüştürücüler ile sayısal hale getirilebilir(Yaman vd., 2001).



Şekil 3.2 Görüntünün Optik Formda Alınması, Analog Forma Dönüştürme ve Dijital Forma Dönüştürme Aşamaları (Yaman vd., 2001)

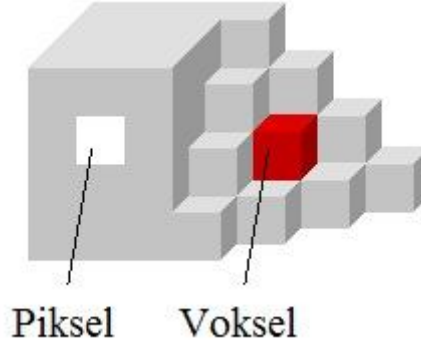
Bir kameranın temel amacı bir görüntüyü oluşturmaktır. Bu görüntü çoğunlukla büyütülmüş olup, kameranın çözünürlük kapasitesi tarafından kontrol edilir. Görüntü almak amacıyla kullanılan mikroskoplarda (optik, stereo, SEM), görüntünün netliği bakımından iyi ve kesintisiz aydınlatmaya, bunun yanında istenilen özelliklerin yeterli bir biçimde çözümlenebilmesi amacıyla uygun bir büyütme ve mükemmel odaklamaya ihtiyaç vardır.

Görüntü sayısallaştırılırken sonlu bir matris, sayısal bir dizi veya bir fonksiyon gibi düşünülür. Görüntü iki boyutlu $f(x,y)$ şeklinde bir fonksiyon olarak tanımlanır. Tanımlanan bu iki boyutlu $f(x,y)$ de x ve y koordinatları gösterir f ise o koordinattaki noktanın gri seviyesini veren bir fonksiyondur (Gray ve Neuhoff, 1998).

Görüntü iki boyutlu bir fonksiyon olduğundan yatay düzlem x , dikey düzlem y eksenini olarak adlandırılır. Bir görüntü fonksiyonunu, $f(x,y)$, bilgisayarda işlemeye uygun hale getirebilmek için, fonksiyonu hem uzaysal koordinatlar olarak, hem de genlik olarak sayısallaştırmak gerekir.

Bir sayısal görüntü, satır ve sütun indisleri görüntü içerisinde herhangi bir noktayı tanımlayan elemanlardan meydana gelmiş bir matris olarak göz önüne alınabilir. Bu matrisin her bir elemanının sayısal değeri, kendisine karşılık gelen noktadaki gri seviye değerine eşittir. Bu sayısal dizinin veya matrisin her bir elemanına görüntü elemanı, resim elemanı veya piksel denir (Haralick ve Shapiro, 1993). Piksel bir sayısal görüntünün en küçük elemanıdır. Voksel ise bir pikselin 3 boyutlu (3B) karşılığıdır; piksel bir noktayı 2 boyutlu (2B) olarak tanımlarken, voksel bir noktayı 3 boyutlu uzayda tanımlayan grafik bilgisidir. Voksel bir birim hacimdir ve sayısal resim elemanı olan piksele üçüncü bir boyut ekler. Pikselleri bir görüntüdeki kare birim

elemanları olarak düşünürsek, vokseller de 3B uzayda kübik birim elemanlar olarak düşünülebilir (Şekil 3.3). Vokseller, 3B uzaydaki her noktanın geometrik, fiziksel ve radyometrik özelliklerini tanımlar. Bu veriler üç boyutlu bir matriste saklanır. Her voksel, renk, matlık, yoğunluk ve ısı gibi bazı ölçülebilir özellikleri ifade eden sayısal bir değere sahiptir.



Şekil 3.3 Piksel ve Vokselin Şematik Gösterimi

3.1.2.2 Görüntü İşleme

Çeşitli tekniklerle ve yöntemlerle dış ortamdan elde edilen resimlerin, bilgisayar ortamında anlaşılacak bir biçime dönüştürülerek elde edilen görüntülerin, farklı teknikler kullanılarak değişiklikler yapılmasına görüntü işleme denir. Dış ortamdaki bir görüntünün elde edilen resminin bilgisayar ortamına aktarılması işlemine resmin veya görüntünün sayısallaştırılması denir. Sayısallaştırılan bu görüntülerin üzerinde çeşitli teknik ve yöntemlerle yapılan işlemlerin bütününe ise dijital görüntü işleme adı verilmektedir.

Görüntü işleme temelde parlaklık, kontrast, renk vb. görüntüye ait bilgilerin değiştirilmesi; manyetik alan, görüntüleme sırasındaki hatalı donanım ayarlarının kullanılması gibi nedenlerle oluşan görüntü kirliliklerinin giderilmesi, detayları daha belirgin hale getirilmesi gibi görüntü kalitesinin iyileştirilmesine yönelik işlemleri ifade eder ve sonuç olarak yeni bir görüntü elde edilir.

Görüntü işlemenin tanımı hakkında yapılan çalışmalarda farklı açıklamalar yapılmıştır. Bu tanımlamalara aşağıda değinilmiştir.

Bir görüntü, x ve y olarak adlandırılan koordinat uzayına ait iki boyutlu olan bir $f(x,y)$ fonksiyon olarak tanımlanabilir. (x,y) koordinatının herhangi bir çiftindeki fonksiyonun genliği görüntünün o noktadaki gri seviyesi veya şiddeti olarak adlandırılır. Bahsedilen x,y ve fonksiyonun genliği, sonlu ve ayırık miktarda olduğu zaman görüntüye dijital görüntü denir (Gonzalez ve Woods, 2002).

Görüntü işleme ölçülmüş veya kaydedilmiş olan dijital görüntü verilerini, elektronik ortamda amaca uygun olacak şekilde değiştirmeye yönelik olarak yapılan bilgisayar çalışmasıdır (Yılmaz, 2007).

Görüntü işleme; insan gözü ile yapılan işlemlerin, görüntüleme cihazları ve akıllı yazılımlar kullanan makinelerle yapılmasını amaçlayan bir bilim dalıdır (Çayırılı, 2006).

Görüntü işleme, görüntü üzerinde yapılan değişiklikleri ifade eder ve bilgisayarlar kullanılarak sayısal ortamda gerçekleştirilir. Sayısal görüntü işleme bir görüntünün ve özelliklerinin değiştirilmesi için kullanılan çok çeşitli teknikleri içerir. En basit düzeyde, görüntü işleme görüntüdeki piksellerin fiziksel olarak yerlerinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilir (Göçeri, 2006).

Görüntü işleme, insan gözünün algılama sistemi; görüntü yakalama, gruplama ve analiz konusunda bilinen en karmaşık sistemdir. Işığın çok kanallı ve pankromatik dalga boyları birer algılama sistemi olan gözler yardımı ile algılanır. Görülebilen spektrum tanımı; insan gözünün görebileceği elektromanyetik dalga boyu aralığını tanımlar. İnsan gözü ile görülebilen alana ait dalga boyları 400nm ile 700nm arasındadır (Gonzales ve Woods, 2007). İnsan gözünün çevresindeki nesneleri 3 boyutlu görmesinin nedeni, aslında sağ ve sol gözlerimizin farklı şeyleri görüyor olmasından kaynaklanmaktadır. İnsanlar, dinamik olarak paralel ve çok spektrumlu analog görüntü işlemeyi gözleri ve beyin yardımıyla sürekli olarak yapmaktadır. Gözlerimizle iki ayrı açıdan alınan görüntüler beyin yardımı ile birleştirilerek 3B görüntü oluşur. Bu şekilde, derinlik bilgisi (3.boyut bilgisi) algılanır. Bilgisayarda görüntü işlemek için ise görüntünün bilgisayar ortamına uygun getirilmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme işlemine sayısallaştırma (digitizing) adı verilir.

Yukarıda verilen tanımlamaların ışığı altında görüntü işlemeyi kısaca elde edilen görüntünün bilgisayar yardımıyla işlenmesi ve yorumlanması olarak tanımlaya biliriz.

3.1.2.2.1 Gri-Düzey Skala

Görüntü üzerindeki aydınlatma değerlerinin farklı seviyelerde olması, piksel düzeylerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu şekilde ifadelerde görüntü siyah-beyaz renk tonlarından meydana geliyorsa, görüntü üzerindeki her bir nokta gri-düzey skala üzerindeki renk değerleriyle ifade edilir. Görüntü üzerindeki noktalar farklı olduğundan, her bir aydınlatma düzeyi için gerekli bitlerin yerleşimi farklıdır (Yaman vd., 2001).

3.1.2.2.2 Histogram

Histogram, görüntü üzerindeki piksellerin değerlerinin grafiksel ifadesidir. Buna görüntü histogramı veya gri-düzey histogramı denir (Castelman, 1996). Görüntü histogramı, görüntünün her bir noktasındaki piksellerin tespiti ile bu piksellerin sayısının ne olduğunu gösterir. Bu sayede histogram üzerinden görüntü ile ilgili çeşitli bilgilerin çıkartılması sağlanır (Yaman vd., 2001).

Görüntü üzerindeki nerede yerleştiği tam olarak çıkartılamaz. Fakat görüntünün aydınlık-karanlık bölge değerlerinden görüntü hakkında genel bilgiler elde edilebilir. Uygulanmak istenen eşik değerleri tahmin edilebilir. Matematiksel olarak, bir dijital görüntü histogramı denklem 3.1 de verildiği gibi tanımlanabilir.

$$P(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (3.1)$$

Burada ; r_k : k'inci gri seviye, n_k : bu gri seviyeye sahip toplam piksel adedi ve n : görüntü üzerindeki toplam piksel adedi olarak tanımlanmıştır (Yaman vd., 2001).

3.1.2.2.3 Eşik Değer Segmentasyonu (Threshold)

Eşik değer işlemi, görüntü işlemenin en önemli adımlarından biridir. Özellikle görüntüdeki farklı yoğunluktaki malzemelerin ayırt edilmesi, görüntü içindeki nesnenin kapalı ve ayrık bölgelerinin belirginleştirilmesi gibi durumlarda kullanılır. Piksellere ayrılmış görüntünün, ikili yapıdaki görüntüye kadar düzenlenmesini içerir. Basit olarak, eşik değer işlemi görüntü üzerindeki piksel değerlerinin belirli bir değere göre atılması ve yerine diğer değerlerin yerleştirilmesi işlemidir. Böylece görüntü üzerindeki nesnelerin arka planı ile nesne hatlarının çıkartılması sağlanır (Yaman, 2000).

Bilgisayarlı tomografiden elde edilen görüntü verileri ilk olarak piksellere dilim kalınlığı belirtilerek 3 boyutlu vksel elemanlar oluşturulur. Oluşturulan voksellerin köşe nokta numaraları ABAQUS® girdi dosyalarının veri yapısına uygun olarak verilir ve piksellerin gri skaladaki değerleri ilgili vokselere atanır. Piksellerin skala ki değerleri 0 ile 255 arasındadır. Tam siyah eşik değeri 0, tam beyazın ise 255'dir. Göz ile kontrol edilerek, uygun olduğu düşünülen bir eşik değeri numunelerin dokusuna ait voksellerin belirlenmesinde kullanılır ve bu işlem sayesinde numunelerin dokusu diğer dokulardan ayrılırlar.

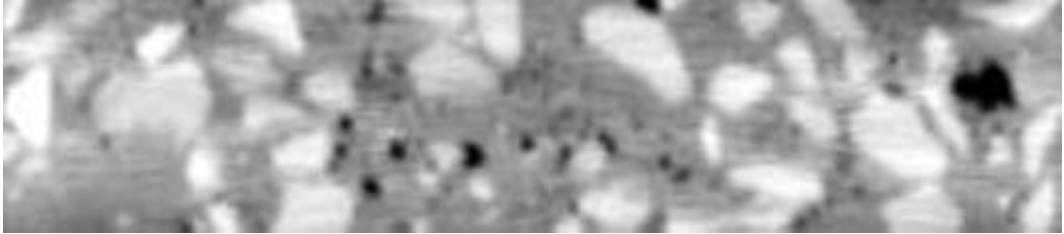
3.1.2.2.4 Çözünürlük

Çözünürlük görüntüdeki tüm detayların ayırt edilebilmesidir. Sayısal görüntünün örnekleme frekans miktarı, çözünürlük için iyi bir veridir. Sayısal görüntülerin çözünürlüğünü açıklamada inç başına düşen nokta miktarı veya inç başına düşen piksel miktarı olarak ta adlandırabilir. Genelde örnekleme frekansının artırılması çözünürlüğün artırılmasına yardımcıdır.

Çözünürlük sayısal bir görüntüyü geçek boyutlarından daha büyük boyutlara çevirdiğimiz zaman daha iyi anlaşılır. Aynı resmi iki farklı çözünürlükte sayısallaştırdığımız zaman, sayısallaşan iki resmin boyutlarını büyüttüğümüz de çözünürlüğü yüksek olan resmin görüntüsünde belirgin bir değişiklik olmaz. Fakat çözünürlüğü düşük olan resim büyütüldüğü zaman resmin görüntüsünde ise bulanıklaşma meydana gelir. Şekil 3.4 de gerçek boyutlarında ki bir görüntü, Şekil 3.5 de ise gerçek boyutlarından daha büyük boyutlandırılan aynı resmin görüntüsündeki bozulmalar görülmektedir.



Şekil 3.4 Gerçek boyutlu resim (264x58 piksel)



Şekil 3.5 Boyutları İki Kat Arttırılmış Resim (528x116 piksel)

Ayrıca çözünürlük bir pikselin boyutunu da etkilemektedir. Piksel boyutları, genişlik ve yüksekliğin her ikisinin de çözünürlük ile çarpımıyla açıklanabilir (Edizer, 2006).

3.1.3 Görüntünün Bilgisayarlı Tomografi ile Elde Edilmesi

Bu tez kapsamında elde edilen görüntüler bilgisayarlı tomografi sayesinde gerçekleşmiştir. BT cihazı; görüntüsü alınmak istenen cismin herhangi bir bölgesinin kesit görüntüsünü oluşturma kabiliyetine sahip bir cihazdır. Bu cihaz görüntülerini oluşturmada konvansiyonel X-ışını cihazlarda rastladığımız X-ışını tüplerinin bir benzerini kullanır. Ancak diğer X-ışını cihazlarının aksine bu cihazın sürekli dönmekte olan bir Gantry'ye bağlıdır. Sürekli dönen bu tüp ve tam karşısına yerleştirilmiş dedektör vasıtasıyla cihaz her açıdan cismin

görüntülerini alarak bunları bilgisayarda işler ve görüntüsü istenen bölümün kesit görüntüsünü oluşturmuş olur.

3.1.3.1 Bilgisayarlı Tomografinin Temelleri ve Cihazın Bileşenleri

Bilgisayarlı Tomografi cihazını incelediğimizde üç ana kısımdan oluştuğunu görmekteyiz. Bu üç ana kısmı maddeler halinde sıraladığımızda;

- Gantry
- Kabinetler
- Görüntü İşleme ve Operatör Bilgisayarları

Bilgisayarlı tomografi cihazının ilk ve en önemli bileşeni olan Gantry'yi basit olarak ifade etmek gerekirse dönen bir halkadır. Bu halkanın bir ucunda gelişmiş ve yüksek kapasiteli bir X-ışını tüpü, tam zıt ucunda da bu X-ışın tüpünden gelen ışınları algılayabilecek bir dedektör bulunur. Gantry belirli bir hızla dönerek ve belirli periyotlarla ışın göndererek; dedektörden sinyalleri alır ve görüntülerini oluşturmak üzere kabinetlere gönderir.

BT cihazının ikinci bileşeni olan kabinetler, gantrynin devir daim sürekliliğini sağlayan komponentleri taşırlar, bunun yanında görüntü bilgisayarı ile gantrynin veri akışı için arayüzü oluşturur. Kabinetlerde gantrynin hareketi ve çalışma periyodu için kontrol kartları, BT cihazına güç sağlayan kaynakların kontrol kartları bulunur.

Cihazın üçüncü ve son bileşeni ise Görüntü İşlem ve Operatör Bilgisayarlarıdır. BT cihazında bulunan bilgisayar sayısı dördür. Bu bilgisayarlar BT cihazının görüntülerini oluşturan ve cihazın ana bileşenlerinden birisidir. BT cihazının ürettiği verileri görünür ve elle tutulur hale getiren parçalardır. Cihazın dedektörlerinden alınan veriler iletim hatları aracılığıyla Görüntü İşlem Bilgisayarına gelir. Bu bilgisayar bir tür sinyal işleyicisi olarak çalışır ve gelen bu sinyalleri yorumlar. Yorumlanan bu sinyallerden görüntüleri oluşturarak çıkışında bağlı olan Operatör Bilgisayarına iletir. Bu bilgisayardan görüntüler üzerinde ayarlamalar yapılabilir, bu görüntülerin çıktıları alınabilir ya da sekanslar tekrarlanabilir.

3.1.3.2 Bilgisayarlı Tomografi Cihazının Çalışma Prensibi

Bilgisayarlı tomografi (computerized tomography) kelime anlamıyla; eski yunanca kelimeler olan TOMO (kesit) ve GRAPHY (görüntü) 'den oluşmuştur. Anlamı bilgisayarlı kesit görüntüsü oluşturmaktır. Bilgisayarlı Tomografi 1972 yılında Hounsfield ve Ambrose adında iki bilim adamı tarafından tüm bilim dünyasına tanıtıldı.

BT'nin temeli röntgen cihazlarında kullandığımız X-Ray TUBE (X-Işını Tüpü) teknolojisine benzer bir yapıya dayanır. BT cihazı anlaşılacağı üzere kesit görüntülerini MR cihazının aksine manyetik dalgalar yerine; X-ışınları kullanarak yapar. Bu özelliğiyle BT cihazı kurulumunun yanı sıra özel yalıtıma da ihtiyaç duyar.

Bilgisayarlı tomografi x-ışını (röntgen) kullanılarak görüntüsü istenen cismin incelenen bölgesinin kesitsel görüntüsünü oluşturmaya yönelik radyolojik teşhis yöntemidir. İnceleme sırasında cisim bilgisayarlı tomografi cihazının masasında hareket etmeksizin yatırılır. İstenilen görüntüyü elde etmek için ihtiyaç duyulan kesitlere uygun gelecek şekilde masa manuel ya da uzaktan kumanda ile cihazın "gantry" adı verilen açıklığına sokulur. Bir bilgisayara bağlı olan bu Cihaz; X-ışını tüpünü masa uygun kesit pozisyonuna geldiği anda aktifleştirerek gantry'de bulunan dedektörleriyle cisimden geçen ve görüntü bilgilerini taşıyan X-ışını demetlerini absorbe eder. Dedektörden gelen veriler bir analog dijital çevirici kullanılarak sayısal verilere dönüştürülür ve bu görüntü bilgileri BT cihazının görüntü bilgisayarlarında işlenerek BT görüntüleri oluşturulur. Sonuçta cismin birbiri ardı sıra kesitsel görüntüleri oluşturulmuş olur. Oluşturulan görüntüler bilgisayar ekranından izlenebilir ya da bu görüntüler filme aktarılabilceği gibi gerektiğinde tekrar bilgisayar ekranına getirmek üzere optik diskte de depolanabilir.

3.1.3.3 X-Ray Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerini Etkileyen Değişkenler

Bir çok değişken X-ray BT işlemi sırasında görüntü kalitesini etkileyebilir. Reconstruction (yeniden yapılandırma) başlamadan önce görüntünün genel etkinliği ve kalitesi görüntü değişkenleri ile belirlenir. Bu değişkenler görüntülenecek resim sayısını azaltmak ve görüntü kalitesini artırmak için ayarlanabilir. En kritik değişkenler kalibrasyon, dilim kalınlığı, görüntüleme sayısı, entegrasyon süresi ve filtreleme olarak sayılabilir.

3.2 Sonlu Elemanlar Metodu

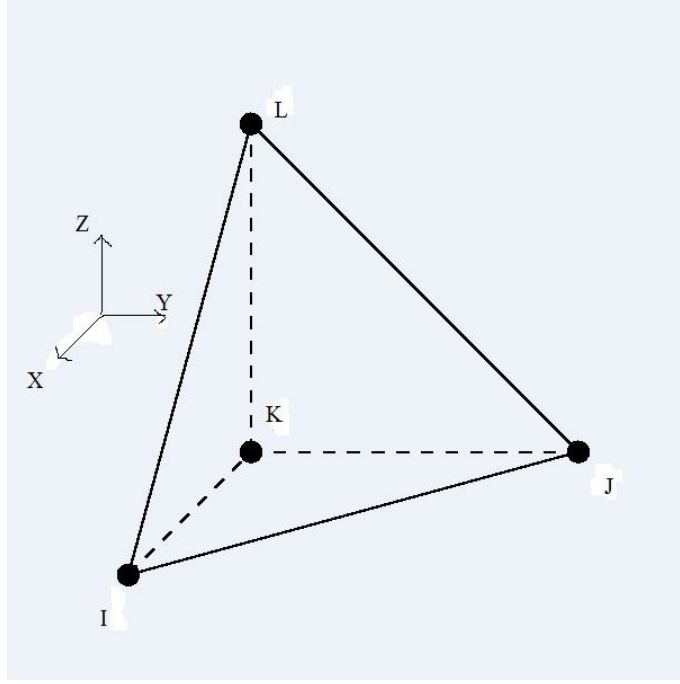
Teknolojinin gelişmesine paralel olarak bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle kuramsal incelemelerde sayısal çözümler giderek daha fazla önem arz etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemlerinden en sık kullanılanı, en etkin ve sistematik olanıdır. Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılmaması, hatta kesin sonuca bile ulaşılması mümkündür.

Sonlu elemanlar yönteminde, sürekli ortamlardan oluşan sistemler üzerinde, sonlu elemanlar ağı ile hayali düğümler oluşturulmaktadır. Bu düğümlerde denge, süreklilik ve uygunluk şartları ile eleman rijitlik, kütle matrisleri ve yük vektörleri oluşturulur. Kodlama tekniği ile sistemin kütle ve rijitlik matrisleri oluşturularak, sistemin hareket denklemi elde edilir. Hareket denkleminin uygun bir yöntemle çözülmesi ile deplasmanlar ve gerilmeler hesaplanabilir. Sonlu elemanlar yönteminde, ağ modelindeki her eleman komşusu olan diğer elemanlara gerçekte sonsuz sayıda nokta ile bağlı olmasına rağmen bu yöntemde sadece düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanır. Böylece deplasmanların uygunluğunun sadece bu noktalarda sağlanması yeterli olacaktır. Sonlu elemanlar yönteminin en büyük avantajlarından biri ise sistematikliği ve her türlü yapıya aynı şekilde uygulanabilmesidir.

Sonlu elemanlar yönteminde işlem hacminin büyümesi dezavantaj olarak görünse de bilgisayar yardımıyla bu problem aşılmaktadır. Son yıllarda, yeterli hassasiyette sonuçlar veren ve bu tez kapsamında da kullanılan ABAQUS® gibi sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir çok hazır paket program mevcuttur.

3.2.1 Sonlu Elemanlar C3D4 Elemanı

Tez kapsamında yapılan analizlerde ABAQUS® programı kullanılmıştır. Mercan numunesi üzerinde yapılan analizler sırasında sonlu eleman tipi olarak doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4 (Şekil 3.6) kullanılmıştır. C3D4 eleman tipi sadece köşelerde nokta barındırmaktadır.



Şekil 3.6 Doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4

Bu eleman tipi katı mekanik problemlerinde kullanılan en basit üç boyutlu eleman tipidir. Bu eleman köşelerde dört adet noktaya sahiptir ve her nokta lokal X,Y ve Z doğrultusunda 3 serbestlik derecesine sahiptir. Eleman dört uçlu olduğundan, yer değiştirmesinin her bir bileşeninin değişimi, aşağıdaki gibi dört sabitle tanımlanan bir polinom olarak varsayılabilir.

$$u(X,Y,Z)= C_{11}+ C_{12}X+ C_{13}Y+ C_{14}Z \quad (3.1)$$

$$v(X,Y,Z)= C_{21}+ C_{22}X+ C_{23}Y+ C_{24}Z$$

$$w(X,Y,Z)= C_{31}+ C_{32}X+ C_{33}Y+ C_{34}Z$$

Burada, C_{11} , C_{21} ve C_{31} ; sırasıyla X, Y ve Z eksenleri boyunca rijit cisim ötelemelerini göstermektedir. Her düğüm noktasındaki deplasmanlar aşağıdaki şartlara uygun olması gerekir:

$$X=X_I \quad Y=Y_I \quad \text{ve} \quad Z=Z_I \quad \text{de} \quad u=u_I$$

$$X=X_J \quad Y=Y_J \quad \text{ve} \quad Z=Z_J \quad \text{de} \quad u=u_J$$

$$X=X_K \quad Y=Y_K \quad \text{ve} \quad Z=Z_K \quad \text{de} \quad u=u_K$$

$$X=X_L \quad Y=Y_L \quad \text{ve} \quad Z=Z_L \quad \text{de} \quad u=u_L$$

Benzer şekilde aşağıdaki şartlarda yazılabilir :

$$X=X_I \quad Y=Y_I \quad \text{ve} \quad Z=Z_I \quad \text{de} \quad v=v_I$$

$$X=X_J \quad Y=Y_J \quad \text{ve} \quad Z=Z_J \quad \text{de} \quad v=v_J$$

$$X=X_K \quad Y=Y_K \quad \text{ve} \quad Z=Z_K \quad \text{de} \quad v=v_K$$

$$X=X_L \quad Y=Y_L \quad \text{ve} \quad Z=Z_L \quad \text{de} \quad v=v_L$$

$$X=X_I \quad Y=Y_I \quad \text{ve} \quad Z=Z_I \quad \text{de} \quad w=w_I$$

$$X=X_J \quad Y=Y_J \quad \text{ve} \quad Z=Z_J \quad \text{de} \quad w=w_J$$

$$X=X_K \quad Y=Y_K \quad \text{ve} \quad Z=Z_K \quad \text{de} \quad w=w_K$$

$$X=X_L \quad Y=Y_L \quad \text{ve} \quad Z=Z_L \quad \text{de} \quad w=w_L$$

Yukarıda verilen düğüm noktalarındaki şartlar denklem (3.1) de yerine yazılırsa 12 bilinmeyenli 12 denklem elde edilir.

$$u_I = C_{11} + C_{12}X_I + C_{13}Y_I + C_{14}Z_I \quad (3.2)$$

$$u_J = C_{11} + C_{12}X_J + C_{13}Y_J + C_{14}Z_J$$

$$u_K = C_{11} + C_{12}X_K + C_{13}Y_K + C_{14}Z_K$$

$$u_L = C_{11} + C_{12}X_L + C_{13}Y_L + C_{14}Z_L$$

$$v_I = C_{21} + C_{22}X_I + C_{23}Y_I + C_{24}Z_I$$

$$v_J = C_{21} + C_{22}X_J + C_{23}Y_J + C_{24}Z_J$$

$$v_K = C_{21} + C_{22}X_K + C_{23}Y_K + C_{24}Z_K$$

$$v_L = C_{21} + C_{22}X_L + C_{23}Y_L + C_{24}Z_L$$

$$w_I = C_{31} + C_{32}X_I + C_{33}Y_I + C_{34}Z_I$$

$$w_J = C_{31} + C_{32}X_J + C_{33}Y_J + C_{34}Z_J$$

$$w_K = C_{31} + C_{32}X_K + C_{33}Y_K + C_{34}Z_K$$

$$w_L = C_{31} + C_{32}X_L + C_{33}Y_L + C_{34}Z_L$$

Denklemlerdeki C bilinmeyen katsayıları bulunup denklem (3.1) de yerine yazıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$u = S_1 u_I + S_2 u_J + S_3 u_K + S_4 u_L \quad (3.3)$$

$$v = S_1 v_I + S_2 v_J + S_3 v_K + S_4 v_L$$

$$w = S_1 w_I + S_2 w_J + S_3 w_K + S_4 w_L$$

Şekil fonksiyonları ise aşağıdaki gibidir

$$S_1 = 1/6 V (a_I + b_I X + c_I Y + d_I Z) \quad (3.4)$$

$$S_2 = 1/6 V (a_J + b_J X + c_J Y + d_J Z)$$

$$S_3 = 1/6 V (a_K + b_K X + c_K Y + d_K Z)$$

$$S_4 = 1/6 V (a_L + b_L X + c_L Y + d_L Z)$$

Burada V tetrahedral elemanın hacmidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & X_I & Y_I & Z_I \\ 1 & X_J & Y_J & Z_J \\ 1 & X_K & Y_K & Z_K \\ 1 & X_L & Y_L & Z_L \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

Herhangi bir noktadaki deplasmanı hesaplamak için aşağıdaki matris formu kullanılır.

$$\mathbf{u} = \mathbf{S} \mathbf{a} \quad (3.6)$$

Şekil değişikliğini hesaplamak için aşağıdaki matris formu kullanılır.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \mathbf{u} \quad (3.7)$$

Hooke yasasına göre gerilme bileşenleri,

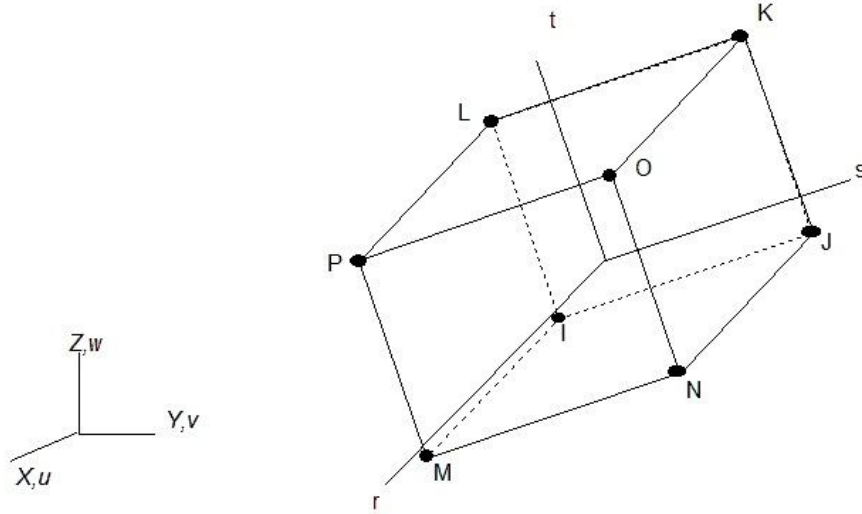
$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.8)$$

İle tanımlanır. $\mathbf{D}$ (6x6) elastisite matrisidir.

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{vmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{vmatrix} \quad (3.9)$$

3.2.2 Sonlu Elemanlar C3D8 Elemanı

Beton numunesi üzerinde yapılan analizler sırasında sonlu eleman tipi olarak doğrusal heksahedral eleman tipi C3D8 (Şekil 3.7) kullanılmıştır. C3D8 eleman tipi sadece köşelerde nokta barındırmaktadır. Bu eleman tipi birinci dereceden bir eleman olmakla beraber genel amaçlara iyi cevap vermektedir.



Şekil 3.7 Doğrusal heksahedral eleman tipi C3D8

Bu eleman köşelerde sekiz adet noktaya sahiptir ve her nokta lokal X,Y ve Z doğrultusunda 3 serbestlik derecesine sahiptir. Eleman sekiz uçlu olduğundan, yer değiştirmesinin her bir bileşeninin değişimi, aşağıdaki gibi sekiz sabitle tanımlanan bir polinom olarak varsayılabilir.

$$u(X, Y, Z) = C_{11} + C_{12}X + C_{13}Y + C_{14}Z + C_{15}XY + C_{16}XZ + C_{17}YZ + C_{18}XYZ \quad (3.10)$$

$$v(X, Y, Z) = C_{21} + C_{22}X + C_{23}Y + C_{24}Z + C_{25}XY + C_{26}XZ + C_{27}YZ + C_{28}XYZ$$

$$w(X, Y, Z) = C_{31} + C_{32}X + C_{33}Y + C_{34}Z + C_{35}XY + C_{36}XZ + C_{37}YZ + C_{38}XYZ$$

Burada, C_{11} , C_{21} ve C_{31} ; sırasıyla X, Y ve Z eksenleri boyunca rijit cisim ötelemelerini göstermektedir. Her düğüm noktasındaki deplasmanlar aşağıdaki şartlara uygun olması gerekir:

$$X=X_I \quad Y=Y_I \quad \text{ve} \quad Z=Z_I \quad \text{de} \quad u=u_I$$

$$X=X_J \quad Y=Y_J \quad \text{ve} \quad Z=Z_J \quad \text{de} \quad u=u_J$$

$$X=X_K \quad Y=Y_K \quad \text{ve} \quad Z=Z_K \quad \text{de} \quad u=u_K$$

$$X=X_L \quad Y=Y_L \quad \text{ve} \quad Z=Z_L \quad \text{de} \quad u=u_L$$

$$X=X_M \quad Y=Y_M \quad \text{ve} \quad Z=Z_M \quad \text{de} \quad u=u_M$$

$$X=X_N \quad Y=Y_N \quad \text{ve} \quad Z=Z_N \quad \text{de} \quad u=u_{JN}$$

$$X=X_O \quad Y=Y_O \quad \text{ve} \quad Z=Z_O \quad \text{de} \quad u=u_O$$

$$X=X_P \quad Y=Y_P \quad \text{ve} \quad Z=Z_P \quad \text{de} \quad u=u_P$$

Benzer şekilde aşağıdaki şartlarda yazılabilir :

$$X=X_I \quad Y=Y_I \quad \text{ve} \quad Z=Z_I \quad \text{de} \quad v=v_I$$

$$X=X_J \quad Y=Y_J \quad \text{ve} \quad Z=Z_J \quad \text{de} \quad v=v_J$$

$$X=X_K \quad Y=Y_K \quad \text{ve} \quad Z=Z_K \quad \text{de} \quad v=v_K$$

$$X=X_L \quad Y=Y_L \quad \text{ve} \quad Z=Z_L \quad \text{de} \quad v=v_L$$

$$X=X_M \quad Y=Y_M \quad \text{ve} \quad Z=Z_M \quad \text{de} \quad v=v_M$$

$$X=X_N \quad Y=Y_N \quad \text{ve} \quad Z=Z_N \quad \text{de} \quad v=v_N$$

$$X=X_N \quad Y=Y_N \quad \text{ve} \quad Z=Z_N \quad \text{de} \quad v=v_N$$

$$X=X_O \quad Y=Y_O \quad \text{ve} \quad Z=Z_O \quad \text{de} \quad v=v_O$$

$$X=X_I \quad Y=Y_I \quad \text{ve} \quad Z=Z_I \quad \text{de} \quad w=w_I$$

$$X=X_J \quad Y=Y_J \quad \text{ve} \quad Z=Z_J \quad \text{de} \quad w=w_J$$

$$X=X_K \quad Y=Y_K \quad \text{ve} \quad Z=Z_K \quad \text{de} \quad w=w_K$$

$$X=X_L \quad Y=Y_L \quad \text{ve} \quad Z=Z_L \quad \text{de} \quad w=w_L$$

$$X=X_M \quad Y=Y_M \quad \text{ve} \quad Z=Z_M \quad \text{de} \quad w=w_M$$

$$X=X_N \quad Y=Y_N \quad \text{ve} \quad Z=Z_N \quad \text{de} \quad w=w_N$$

$$X=X_O \quad Y=Y_O \quad \text{ve} \quad Z=Z_O \quad \text{de} \quad w=w_O$$

$$X=X_P \quad Y=Y_P \quad \text{ve} \quad Z=Z_P \quad \text{de} \quad w=w_P$$

Yukarıda verilen düğüm noktalarındaki şartlar denklem (3.6) da yerine yazılırsa 24 bilinmeyenli 24 denklem elde edilir.

$$u_I = C_{11} + C_{12}X_I + C_{13}Y_I + C_{14}Z_I + C_{15}X_IY_I + C_{16}X_IZ_I + C_{17}Y_IZ_I + C_{18}X_IY_IZ_I \quad (3.11)$$

$$u_J = C_{11} + C_{12}X_J + C_{13}Y_J + C_{14}Z_J + C_{15}X_JY_J + C_{16}X_JZ_J + C_{17}Y_JZ_J + C_{18}X_JY_JZ_J$$

$$u_K = C_{11} + C_{12}X_K + C_{13}Y_K + C_{14}Z_K + C_{15}X_KY_K + C_{16}X_KZ_K + C_{17}Y_KZ_K + C_{18}X_KY_KZ_K$$

$$u_L = C_{11} + C_{12}X_L + C_{13}Y_L + C_{14}Z_L + C_{15}X_LY_L + C_{16}X_LZ_L + C_{17}Y_LZ_L + C_{18}X_LY_LZ_L$$

$$u_M = C_{11} + C_{12}X_M + C_{13}Y_M + C_{14}Z_M + C_{15}X_MY_M + C_{16}X_MZ_M + C_{17}Y_MZ_M + C_{18}X_MY_MZ_M$$

$$u_N = C_{11} + C_{12}X_N + C_{13}Y_N + C_{14}Z_N + C_{15}X_NY_N + C_{16}X_NZ_N + C_{17}Y_NZ_N + C_{18}X_NY_NZ_N$$

$$u_O = C_{11} + C_{12}X_O + C_{13}Y_O + C_{14}Z_O + C_{15}X_OY_O + C_{16}X_OZ_O + C_{17}Y_OZ_O + C_{18}X_OY_OZ_O$$

$$u_P = C_{11} + C_{12}X_P + C_{13}Y_P + C_{14}Z_P + C_{15}X_PY_P + C_{16}X_PZ_P + C_{17}Y_PZ_P + C_{18}X_PY_PZ_P$$

$$v_I = C_{21} + C_{22}X_I + C_{23}Y_I + C_{24}Z_I + C_{25}X_IY_I + C_{26}X_IZ_I + C_{27}Y_IZ_I + C_{28}X_IY_IZ_I$$

$$v_J = C_{21} + C_{22}X_J + C_{23}Y_J + C_{24}Z_J + C_{25}X_JY_J + C_{26}X_JZ_J + C_{27}Y_JZ_J + C_{28}X_JY_JZ_J$$

$$v_K = C_{21} + C_{22}X_K + C_{23}Y_K + C_{24}Z_K + C_{25}X_KY_K + C_{26}X_KZ_K + C_{27}Y_KZ_K + C_{28}X_KY_KZ_K$$

$$v_L = C_{21} + C_{22}X_L + C_{23}Y_L + C_{24}Z_L + C_{25}X_LY_L + C_{26}X_LZ_L + C_{27}Y_LZ_L + C_{28}X_LY_LZ_L$$

$$v_M = C_{21} + C_{22}X_M + C_{23}Y_M + C_{24}Z_M + C_{25}X_MY_M + C_{26}X_MZ_M + C_{27}Y_MZ_M + C_{28}X_MY_MZ_M$$

$$v_N = C_{21} + C_{22}X_N + C_{23}Y_N + C_{24}Z_N + C_{25}X_NY_N + C_{26}X_NZ_N + C_{27}Y_NZ_N + C_{28}X_NY_NZ_N$$

$$v_O = C_{21} + C_{22}X_O + C_{23}Y_O + C_{24}Z_O + C_{25}X_OY_O + C_{26}X_OZ_O + C_{27}Y_OZ_O + C_{28}X_OY_OZ_O$$

$$v_P = C_{21} + C_{22}X_P + C_{23}Y_P + C_{24}Z_P + C_{25}X_PY_P + C_{26}X_PZ_P + C_{27}Y_PZ_P + C_{28}X_PY_PZ_P$$

$$\begin{aligned}
w_I &= C_{31} + C_{32}X_I + C_{33}Y_I + C_{34}Z_I + C_{35}X_IY_I + C_{36}X_IZ_I + C_{37}Y_IZ_I + C_{38}X_IY_IZ_I \\
w_J &= C_{31} + C_{32}X_J + C_{33}Y_J + C_{34}Z_J + C_{35}X_JY_J + C_{36}X_JZ_J + C_{37}Y_JZ_J + C_{38}X_JY_JZ_J \\
w_K &= C_{31} + C_{32}X_K + C_{33}Y_K + C_{34}Z_K + C_{35}X_KY_K + C_{36}X_KZ_K + C_{37}Y_KZ_K + C_{38}X_KY_KZ_K \\
w_L &= C_{31} + C_{32}X_L + C_{33}Y_L + C_{34}Z_L + C_{35}X_LY_L + C_{36}X_LZ_L + C_{37}Y_LZ_L + C_{38}X_LY_LZ_L \\
w_M &= C_{31} + C_{32}X_M + C_{33}Y_M + C_{34}Z_M + C_{35}X_MY_M + C_{36}X_MZ_M + C_{37}Y_MZ_M + C_{38}X_MY_MZ_M \\
w_N &= C_{31} + C_{32}X_N + C_{33}Y_N + C_{34}Z_N + C_{35}X_NY_N + C_{36}X_NZ_N + C_{37}Y_NZ_N + C_{38}X_NY_NZ_N \\
w_O &= C_{31} + C_{32}X_O + C_{33}Y_O + C_{34}Z_O + C_{35}X_OY_O + C_{36}X_OZ_O + C_{37}Y_OZ_O + C_{38}X_OY_OZ_O \\
w_P &= C_{31} + C_{32}X_P + C_{33}Y_P + C_{34}Z_P + C_{35}X_PY_P + C_{36}X_PZ_P + C_{37}Y_PZ_P + C_{38}X_PY_PZ_P
\end{aligned}$$

Denklemlerdeki C bilinmeyen katsayıları bulunup denklem (3.7) de yerine yazıldığında şekil fonksiyonları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
u &= 1/8 [u_I(1-s)(1-t)(1-r) + u_J(1+s)(1-t)(1-r) + u_K(1+s)(1+t)(1-r) + u_L(1-s)(1+t)(1-r) \\
&+ u_M(1-s)(1-t)(1+r) + u_N(1+s)(1-t)(1+r) + u_O(1+s)(1+t)(1+r) + u_P(1-s)(1+t)(1+r)] \\
v &= 1/8 [v_I(1-s)(1-t)(1-r) + v_J(1+s)(1-t)(1-r) + v_K(1+s)(1+t)(1-r) + v_L(1-s)(1+t)(1-r) \\
&+ v_M(1-s)(1-t)(1+r) + v_N(1+s)(1-t)(1+r) + v_O(1+s)(1+t)(1+r) + v_P(1-s)(1+t)(1+r)] \\
w &= 1/8 [w_I(1-s)(1-t)(1-r) + w_J(1+s)(1-t)(1-r) + w_K(1+s)(1+t)(1-r) + w_L(1-s)(1+t)(1-r) \\
&+ w_M(1-s)(1-t)(1+r) + w_N(1+s)(1-t)(1+r) + w_O(1+s)(1+t)(1+r) + w_P(1-s)(1+t)(1+r)]
\end{aligned}
\quad (3.12)$$

Herhangi bir noktadaki deplasmanı hesaplamak için aşağıdaki matris formu kullanılır.

$$u = Sa \quad (3.13)$$

Şekil değişikliğini hesaplamak için aşağıdaki matris formu kullanılır.

$$\varepsilon = Su \quad (3.14)$$

Hooke yasasına göre gerilme bileşenleri,

$$\sigma = D\varepsilon \quad (3.15)$$

3.3 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking)

Tez kapsamında beton numune üzerinde yapılan analizlerde ABAQUS® programında gevrek kırılma (Brittle Cracking) modeli kullanılmıştır. Gevrek kırılma, keskin bir çatlak ilerleyerek malzemeyi çatlak ucunda oluşan küçük lokal deformasyonlarla kırması olarak tanımlanmaktadır. Bu model gevrek özelliklere sahip beton modellemesi için kullanılmaktadır. Ayrıca bu model camsı, yarı camsı ve gevrek malzemelerde de kullanılır. Bu model çekme gerilmesinden kaynaklı çatlakların hakim olduğu uygulamalar için tasarlanmıştır. Basınç davranışının her zaman doğrusal elastik olduğunu varsaymaktadır.

Bu modelde önceden çatlama için malzeme özellikleri tanımlanmış doğrusal elastik malzemeler kullanılır. En popüler kullanım alanı basınç altında doğrusal elastik davranış gösteren gevrek malzemelerdir. Modelin tasarlanma amacı betonarme yapılar olmasına rağmen beton içinde çok sık kullanılan bir modeldir. Model kırılma kriterlerine ulaşan elemanların silinmesine izin vererek çatlakların görünmesini sağlar.

3.3.1 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Çatlak Doğrultuları

ABAQUS® çatlak modeli; sabit, ortogonal çatlakları, sonlu elemanlar modelindeki bir malzeme noktasında mevcut olan doğrudan gerilme bileşenlerinin sayısı ile sınırlandırılmış o malzeme noktasındaki maksimum çatlak sayısı ile kabul eder (üç boyutlu, düzlemsel deformasyon, aksisimetrik problemlerde en fazla üç çatlak, düzlemsel gerilme ve kabuk problemlerinde iki çatlak, kiriş ya da çatı makası problemlerinde tek çatlak).

İçten, bir defa çatlaklar noktadan olur, bütün vektör ve tensörlerin değerli miktarlarda bileşen formları döndürülür böylece çatlak vektör yönelimi olarak tanımlanan yerel sistem içinde uzanırlar (çatlak yüzey normalleri). Bu model çatlak yüzey normal vektörlerinin dik olmasını böylece bu yerel çatlak sisteminin dikdörtgen kartezyen olmasını sağlar.

3.3.2 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Çatlak Belirleme

Gevrek kırılma (Brittle Cracking) modelinde çatlak başlangıcını belirlemek için basit bir Rankine kriteri kullanılır. Bu kriter bir çatlakın gevrek bir malzemeye ait maksimum asal çekme gerilmelerinin çekme dayanımını aştığı zaman oluştuğunu ifade eder. Her ne kadar çatlak belirleme sadece Mod 1 çatlak hususlarına bağlı olsa da, sonraki çatlak davranışı hem mod 1 (çekme yumuşaması/ sertleşmesi) hem Mod 2 (kesme yumuşaması/ kalıcılığı) davranışlarını içerir.

Rankine kriteri çatlak biçimi oluştuğu anda, ilk çatlakın oluştuğunu varsayar. Çatlak yüzey normali maksimum asal çekme gerilmeleri doğrultusunda alınır. Sonraki çatlaklar aynı noktadaki

mevcut çatlak yüzey normallerinin yönlerine dik olan maksimum asal çekme gerilmeleri yönündeki çatlak yüzey normalleri ile oluşabilir.

Herhangi bir noktada çatlak oluştuğunda hesaplamanın geri kalanı boyunca çatlak düzeltilemez. Bununla beraber çatlak kapanması ve yeniden açılması çatlak yüzey normallerinin yönleri boyunca yer alabilir. Model çatlama ile ilgili herhangi bir kalıcı şekil değiştirmeyi ihmal eder. Yani çatlaklar karşısında basınç gerilmesi oluşmaya başladığında çatlakların tamamen kapanacağını varsayılabilir.

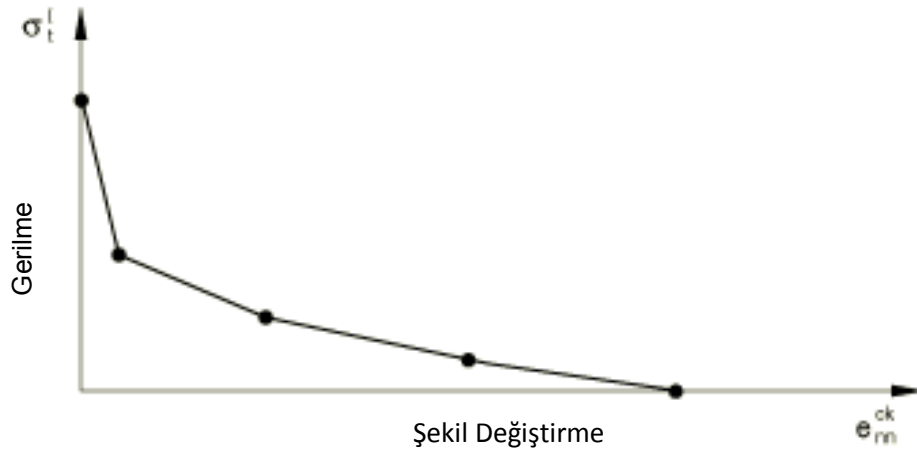
3.3.3 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Çekme Sertleşmesi

Gevrek kırılma (Brittle Cracking) modelinde çekme sertleşmesi iki farklı yolla belirlenebilir. Birincisi kırılma sonrası gerilme-şekil değiştirme ilişkisi vasıtasıyla, ikincisi ise kırılma enerjisi uygulayarak çatlak boyunca kırılma sonrası gerilme davranışı belirlenebilir.

3.3.3.1 Kırılma Sonrası Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi

Betonarmede kırılma sonrası davranış özellikleri genellikle kırılma sonrası gerilmenin çatlak boyunca şekil değiştirme fonksiyonu olarak verilmesi demektir (Şekil 3.8).

Sonlu elemanlar tahminlerinin ağ incelendiğinde, ağ incelmeye dar çatlak gruplarına yol açtığından, tek bir çözüme yakınsamamasından dolayı az donatı olduğu veya hiç donatı olmadığı durumlarda, sonuçlarda ağ hassasiyeti sunar, çünkü ağ hassasiyeti daha dar çatlak şeritlerine neden olur.



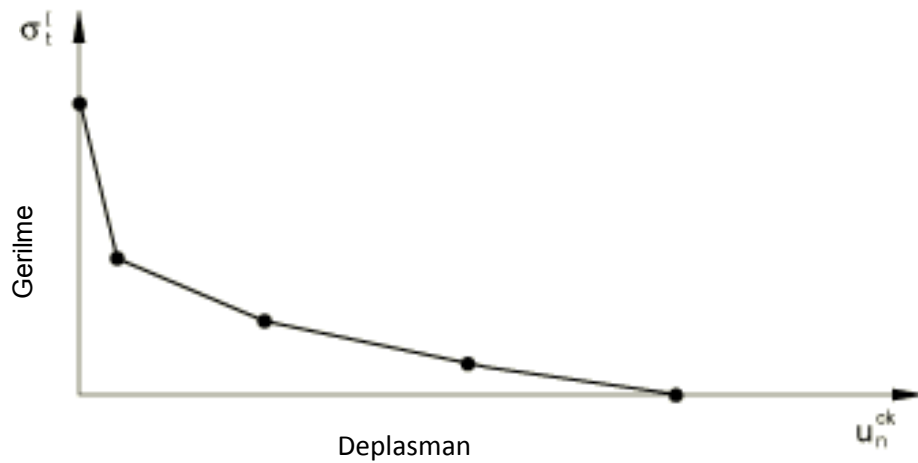
Şekil 3.8 Kırılma sonrası gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Betonarme için pratik hesaplarda ağdaki her elemanın genellikle donatı içerdiği kabul edilir. Bu durumda çatlak modelinde bu etkileşime benzetmek için tanıtılan “çekme sertleşmesinin” makul bir değerde sağlanması şartıyla donatı ve beton arasındaki etkileşim bu etkiyi azaltma

eğilimindedir. Bu, donatı yoğunluğu, donatı ve beton arasındaki bağın kalitesi, donatı çapına nazaran beton agrega boyutu ve ağ gibi parametrelere bağlı, çekme sertleşmesi etkisinin tahminine bağlıdır. Oldukça ayrıntılı bir ağ ile modellenmiş göreceli olarak ağır betonarme için makul bir başlangıç noktası, kırılmadan sonra şekil değiştirme yumuşamasının, toplam gerilme, kırılmadaki gerilmenin yaklaşık on katı olduğunda gerilmeyi, doğrusal olarak sıfıra indirdiği kabul edilebilir. Standart betonlardaki çatlama şekil değiştirme genellikle 10^{-4} olduğunda, toplam şekil değiştirme yaklaşık 10^{-3} iken, çekme sertleşmesinin gerilmeyi sıfıra indirmesi kabul edilebilir bir durumdur. Bu parametre her bir özel durum için ayarlanmalıdır. Statik uygulamalarda çok küçük çekme sertleşmesi modelin toplam tepkisindeki geçici kararsız davranışını tanıtmak için betondaki yerel çatlakların iş görmezliğine neden olacaktır. Birkaç pratik tasarım bu tür davranışlar gösterebilir. Böylece analiz modelindeki bu tür tepkinin varlığı, genellikle çekme sertleşmesinin herhangi bir sebebe bağlı olmadan düşük olacağını gösterir.

3.3.3.2 Kırılma Enerji Çatlama Kriteri

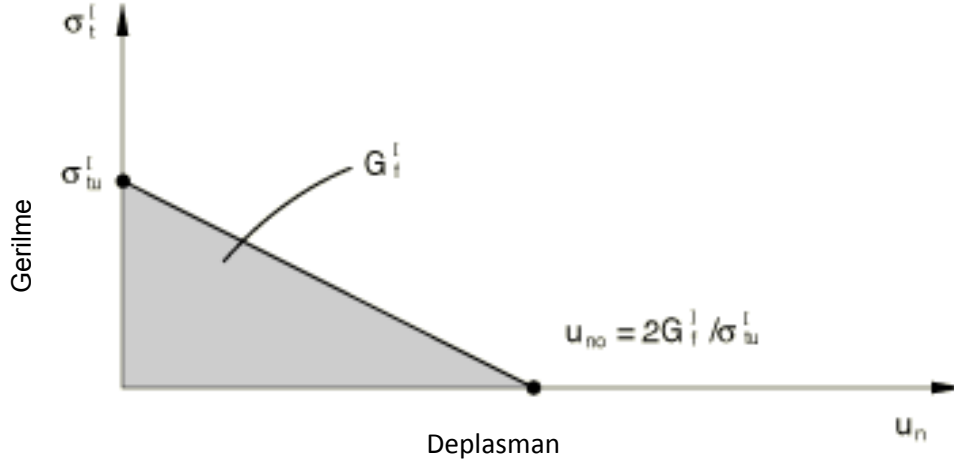
Modelde belirli bölgelerinde donatı olmadığı zaman yukarıda açıklanan gerilme pekleşmesi sonuçlarda makul ağ duyarlılığına neden olacaktır. Buna rağmen, Hillerborg's (1976) kırılma enerji önerisi birçok pratik uygulamadaki eksiklikleri gidermede yeterli kabul edilmektedir. Hillerborg modelde malzeme parametresi olarak alınan (G_f') gerekli enerjinin çatlak birim alanının birtakım gevrek kırılma kavramları kullandığını tanımlamıştır. Bu yaklaşımla, betonun gevrek kırılma davranışı yük-gerilmeden ziyade yük-deplasman ilişkisi ile vasıflandırılmıştır. Gerilme altındaki beton numune kesiti karşılıklı boyunca çatlatacaktır, daha sonra yüklemenin çoğu, numunenin boyundan bağımsız şekilde yeterli miktarda çatlak açarak ayrılacaktır (böylece elastik gerilme küçük olacaktır).



Şekil 3.9 Kırılma sonrası gerilme-deplasman ilişkisi

Kırılma enerji çatlama modeli Şekil 3.9 da gösterildiği şekilde çatlakın karşısındaki deplasmanın tabular fonksiyon olarak yük kırılmalarını belirleyerek oluşturulabilir.

Alternatif olarak, mod 1 kırılma enerjisi G_f^I malzeme özelliği olarak belirlenebilir, bu durumda kırılma gerilmesi σ_{tu}^I mod 1 kırılma enerjisi ile ilişkili olarak tanımlanır. Bu model kırılma dayanımında doğrusal bir kayıp olduğunu varsayar (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Kırılma sonrası gerilme-deplasman ilişkisi

Burada çatlak normal deplasmanı

$$u_{n0} = 2G_f^I / \sigma_{tu}^I \quad (3.16)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

3.3.4 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Modelinde Karakteristik Çatlak Boyu

Bir sonlu eleman modelinde gerilme-yer değiştirme kavramının uygulanması sırasında malzemenin bulunduğu noktada karakteristik uzunluk tanımlamak gerekir. Karakteristik çatlak uzunluğu eleman geometri ve formülasyonuna dayanmaktadır : bu birinci dereceden bir eleman için tipik bir eleman üzerindeki çizgi uzunluğudur ; ikinci dereceden bir eleman için tipik uzunluğun yarısıdır. Kiriş ve kafes sistemlerde karakteristik uzunluk elemanın eksen boyuna uzanır.

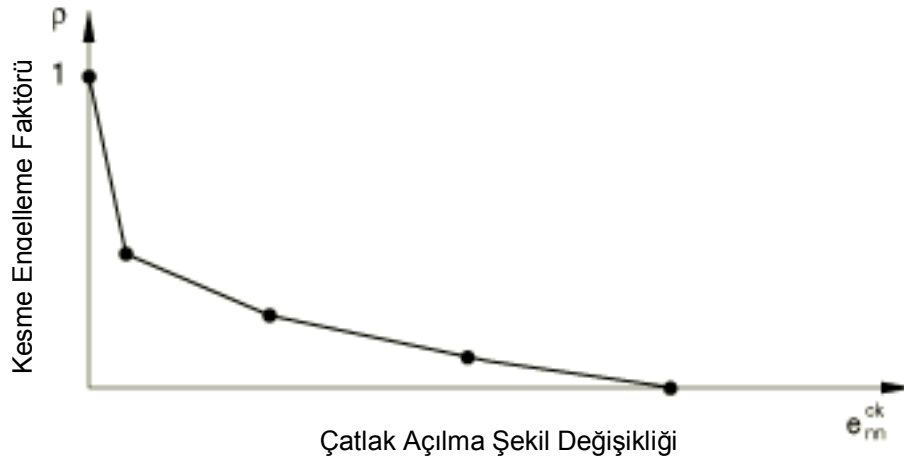
3.3.4.1 Gevrek Kırılma (Brittle Cracking) Kesme Engelleme Modeli

Çatlak modelinin geleceği için çatlak başlangıcında Mod I önemli olmasına rağmen, çatlak sonrasında Mod I in yanı sıra Mod II de önem kazanır. Mod II kayma davranışı çatlak açılması miktarına bağlıdır. Özellikle çatlak açıldıkça çatlak kayma modülü azalır.

Bu modelde G_c çatlak sonrası kayma modülü çatlamamış kayma modülünün bir kısmı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$G_c = \rho(e_{nn}^{ck}) G \quad (3.17)$$

Burada G çatlamamış malzemenin kayma modülü, $\rho(e_{nn}^{ck})$ kesme engelleme faktörü ise (e_{nn}^{ck}) çatlak açılma şekil değişikliğine bağlıdır. Bu değişimin parçalı lineer formu Şekil 3.11 de verilmiştir.

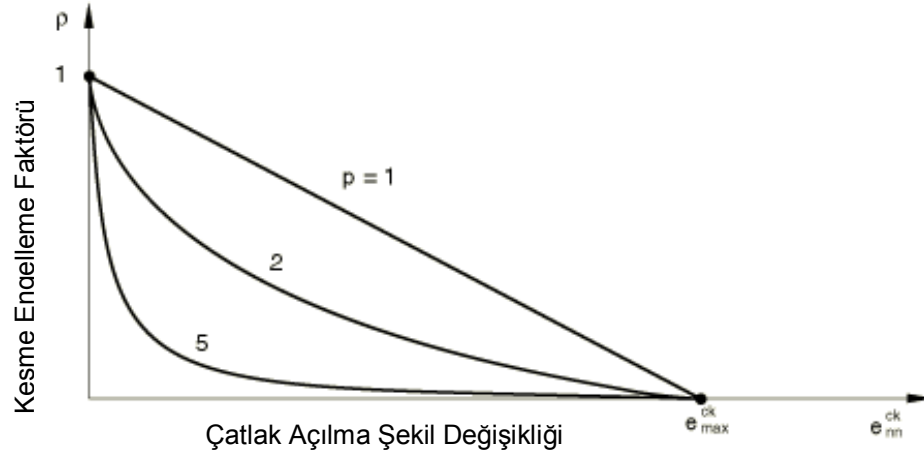


Şekil 3.11 Kesme engelleme modelinin parçalı lineer formu

Alternatif olarak kesme engelleme modelinde kuvvet yasası formu da aşağıdaki gibi tanımlanabilir :

$$\rho(e_{nn}^{ck}) = [1 - (e_{nn}^{ck} / e_{nn}^{ck_{max}})]^p \quad (3.18)$$

Burada p ve $e_{nn}^{ck_{max}}$ malzeme parametreleridir. Şekil 3.12 de görülen form $p \rightarrow 1$ iken $e_{nn}^{ck} \rightarrow 0$ (çatlak öncesi duruma karşılık gelen) ve $p \rightarrow 0$ iken $e_{nn}^{ck} \rightarrow e_{nn}^{ck_{max}}$ (agregat kilidinin tam kaybına karşılık gelen) gereksinimini karşılar.



Şekil 3.12 Kesme engelleme modelinin kuvvet yasası formu

4. ANALİZ

4.1 Beton Numunesi İçin Yapılan Analizler

Bu bölümde oluşturulan gerçek beton numunesine yapılan üç nokta eğme deneyi ile tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen voksel tabanlı sonlu elemanlar modeline yapılan üç nokta eğme deneyi sonuçları incelenecektir.

4.1.1 Beton Numunesinin Oluşturulması

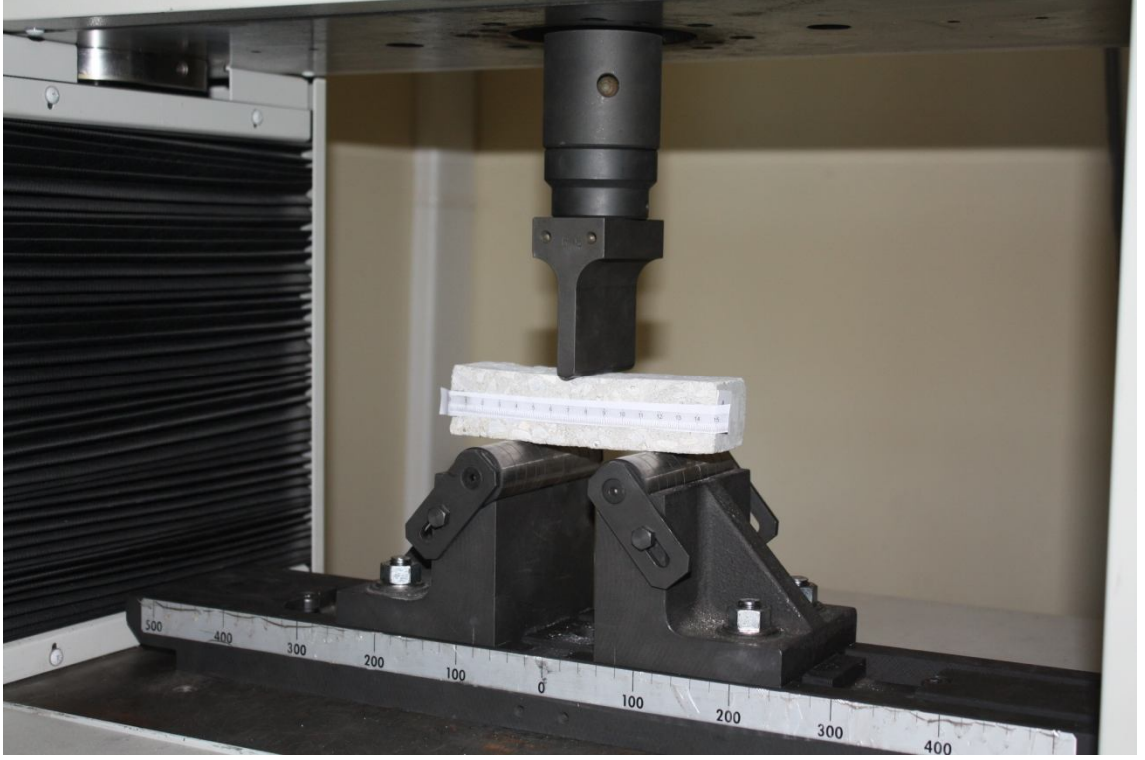
Analizler için 3 adet 15cm x 15cm x 15cm boyutlarında küp beton numunesi hazırlanmıştır. Beton numunesi karışımında kullanılan malzeme miktarları çizelge 4.1 de verilmiştir. Granülometri düzenlemesi yapılan agregalar ön karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Burada amaç agrega tane dağılımı homojenliğini sağlamaktır. Oluşturulan numuneler BT'de tarandıktan sonra numune içindeki dağılımın istenilen ölçüde görülemediği tespit edilmiştir. Bunun üzerine küp numuneler mermer kesme makinesi yardımı ile kesilerek toplam 36 adet dikdörtgen en kesitli numune haline dönüştürülmüştür. Numunenin boyutları kesme işleminden sonra 3,4cm x 3,8cm x 15cm olmuştur.

Çizelge 4.1 Beton Numunesine Ait Malzeme Konfigürasyonu

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento	3,76
Su	3,2
Agrega	11,76
Kum	13,77

4.1.2 Gerçek Beton Numunesine Üç Nokta Deneyi Yapılması

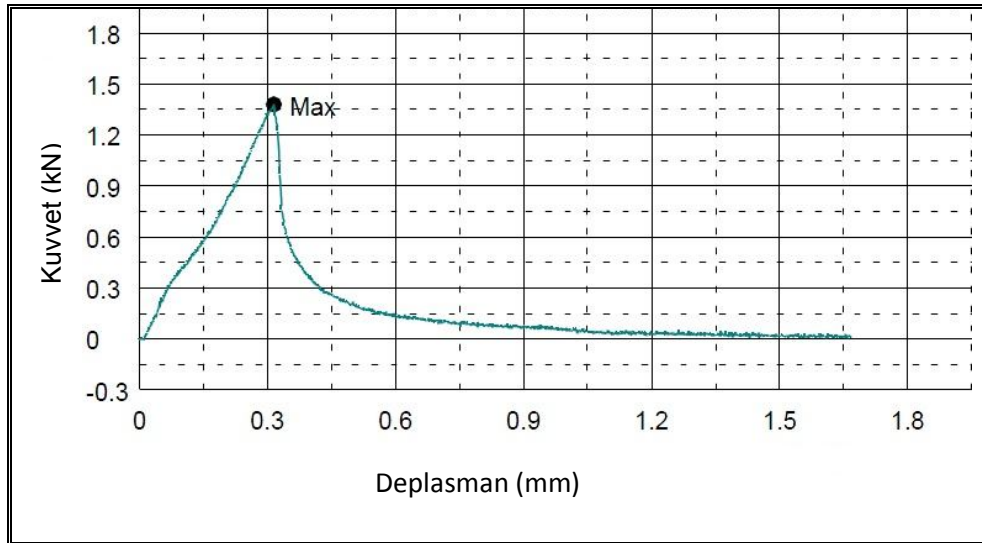
Şekil 4.1' de beton numuneye ait üç nokta deney düzeneği görülmektedir. Numuneler Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarın da bulunan AUTOGRAPH marka 100 ton kapasiteli çekme cihazında, eğme deneyi aparatları kullanılarak üç nokta deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deney sırasında yükleme hızı dakikada 1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 4.1 Beton Numuneye Ait Üç Nokta Deney Düzeneği

4.1.3 Gerçek Beton Numunesine Yapılan Üç Nokta Deneyi Sonuçları

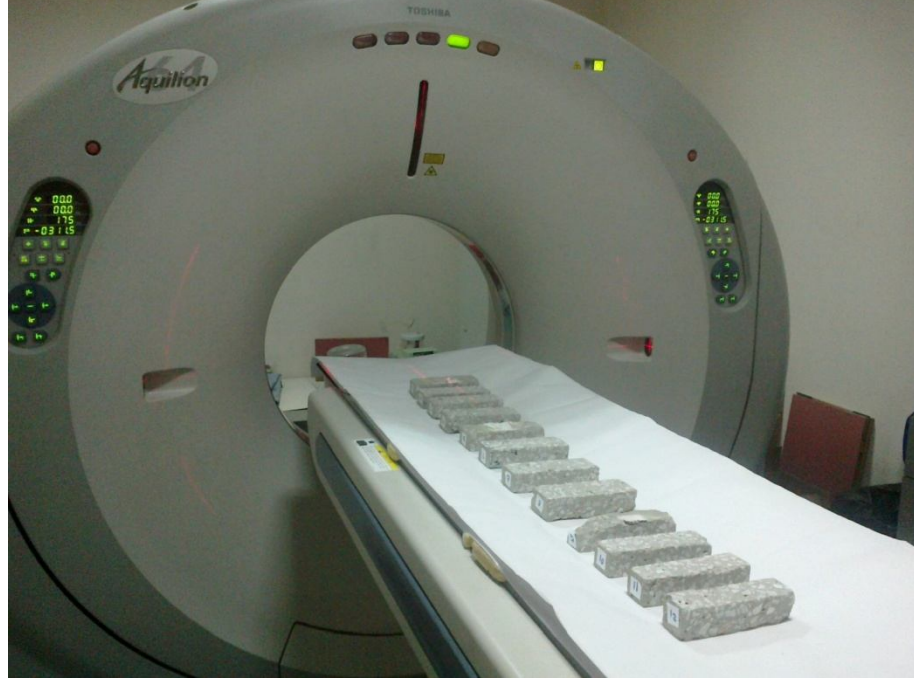
Beton numunesine yapılan üç nokta deneyi sırasında yük değeri 1,38125 kN'a ulaştığında numune kırılmıştır. Beton numunede oluşan maksimum deplasman miktarı 0,315 mm olarak tespit edilmiştir. Kuvvetin zamanla değişimi Şekil 4.2'de ki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.2 Beton Numuneye Ait Üç Nokta Deney Sonucu Oluşan Kuvvet-Zaman Grafiği

4.1.4 Beton Numunesine Ait Görüntü Alımı Ve Görüntü Verileri

Bu tez çalışması kapsamında tomografi görüntüleri 64 dedektörlü Toshiba-Aquilion bilgisayarlı tomografi cihazından elde edilmiştir. Numunelerin görüntülenme anında ki durumu Şekil 4.3 de gösterilmiştir.

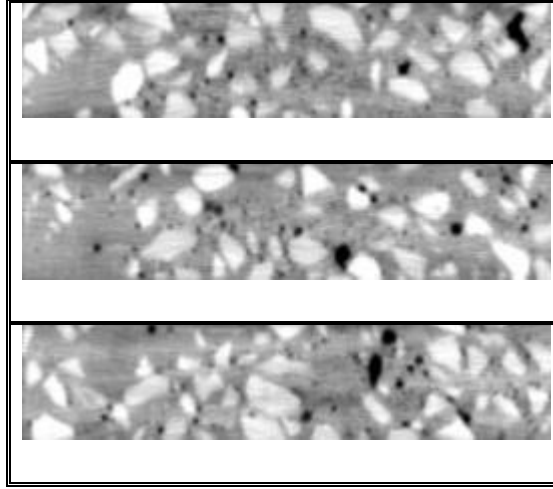


Şekil 4.3 Beton Numunelerin Bilgisayarlı Tomografi ile Görüntülenmesi

Görüntü alma sırasında görüntüleme parametreleri olarak 120 kV ışın dozu, 275 mAS rotasyon zamanı, 0.5 mm kesit kalınlığı, 0.4 mm artım miktarı ve 64x0.5 dedektör kolimasyonu kullanılmıştır. Beton numunesinin görüntülerinin çözünürlüğü ise 512x512 pikseldir.

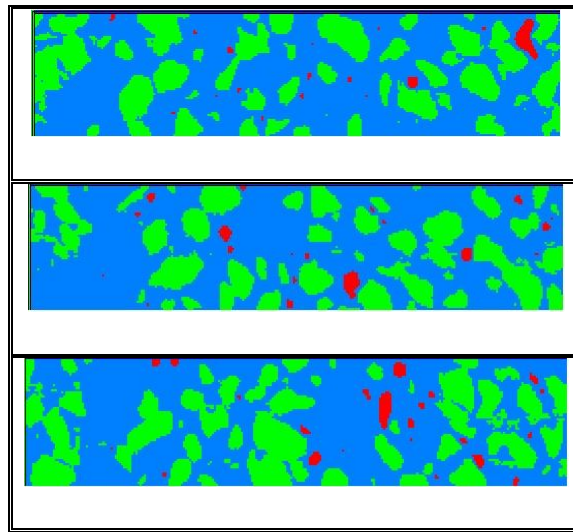
4.1.5 Beton Numunesine Ait Görüntülere Eşik Değer Uygulanması

Bilgisayarlı tomografi taraması sonucunda elde edilen beton numuneye ait görüntüler katı modelin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Katı modelin oluşturulmasında ALTINTAŞ (2012) tarafından geliştirilen CUBOID-SI2FE isimli bir MATLAB® scripti kullanılmıştır. CUBOID-SI2FE programı içerisinde eşik değer, rekonstrüksiyon ve kendine özgü bir floodfill algoritması bulunmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde BT sonucunda elde edilen sıralı görüntülerden katı model oluşturulabilmektedir. Program tarafından gerçekleştirilen işlemler aşağıda kısaca anlatılmaktadır.



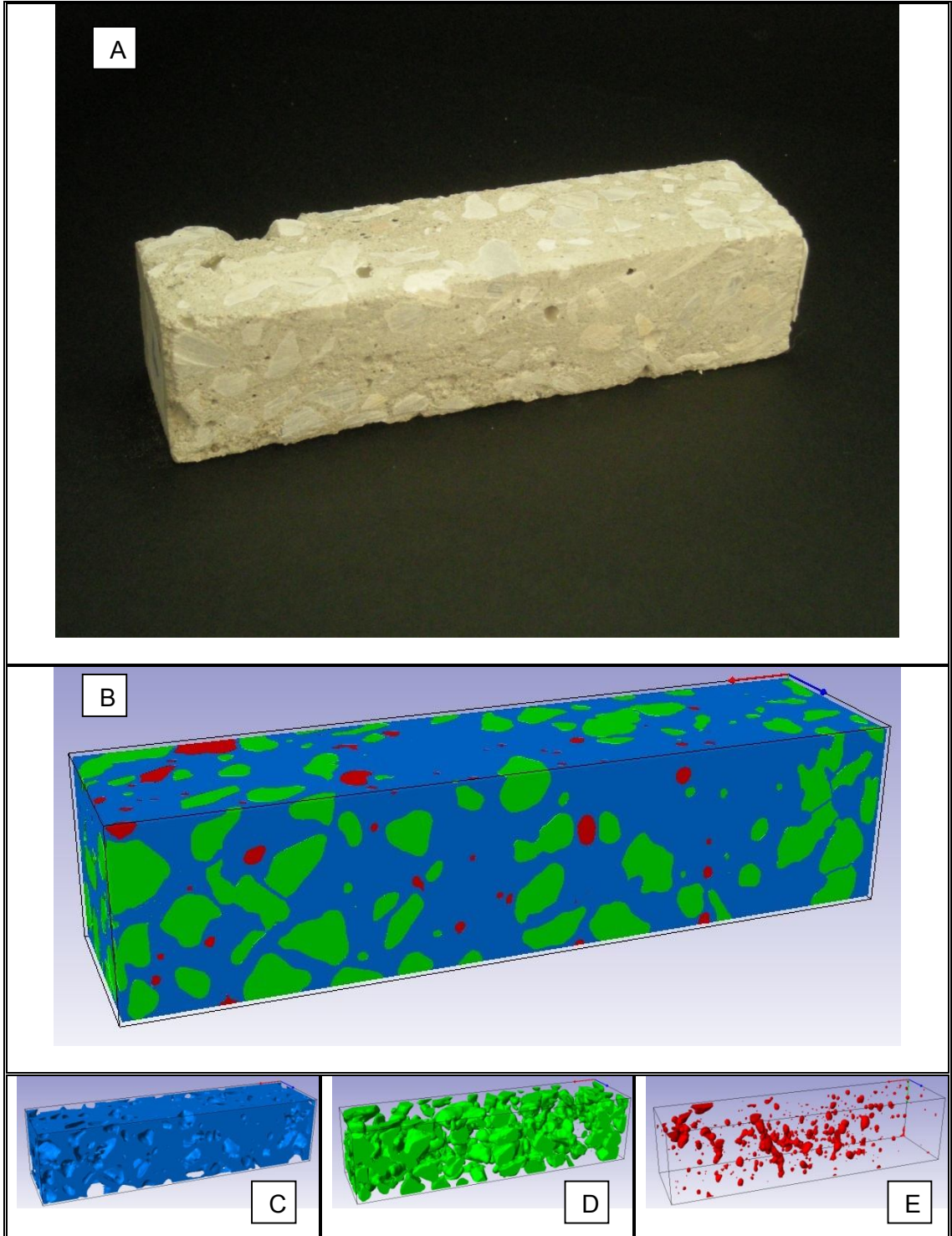
Şekil 4.4 Beton Numunesine Ait Bilgisayarlı Tomografi En Kesit Görüntüleri

Şekil 4.4 de agrega, su, kum ve çimentodan oluşan beton numunesinin farklı en kesitlerdeki BT görüntüleri görülmektedir. CUBOID-SI2FE scripti ile BT veri setlerinde yer alan görüntü verileri ilk olarak dilim kalınlıkları verilerek 3 boyutlu vokseller oluşturulur. Oluşturulan voksellerin köşe nokta numaraları ABAQUS® girdi dosyalarının veri yapısına uygun olarak verilir. Daha sonra gri skaladaki değerler ilgili voksellere atanır. Piksellerin skalada ki değerleri 0 ile 255 arasındadır. Tam siyahın eşik değeri 0 iken tam beyazın eşik değeri 255' dir. Beton numunesinde agrega, iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımı ve hava boşluğunun bir birinden ayrılması için 3 farklı eşik değeri verilir. İri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımı için eşik değer aralığı 160-255, agrega için eşik değer aralığı 60-159 ve hava boşluğu için eşik değer aralığı 0-59 alınmıştır. Bu eşik değerler görsel confirmasyon yoluyla belirlenmiştir. Eşik değeri atanmış 2 boyutlu görüntüler Şekil 4.5 de verilmiştir.



Şekil 4.5 Beton Numunesinde Ait 2B Görüntülere Eşik Değer Uygulaması

2 boyutlu görüntülerin birleştirilerek 3 boyutlu katı elemanın oluşturulma işlemi CUBOID-SI2FE scripti tarafından yapılmıştır. 3 boyutlu katı elemanın oluşturulması sırasında 140 adet sıralı BT görüntüsü kullanılmıştır. Şekil 4.2 de tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen 3B katı model ve gerçek beton numunesi görülmektedir. Şekil 4.2-A da gerçek beton numunesi, Şekil 4.2-B de oluşturulan beton numunesinin 3 boyutlu görüntüsü, Şekil 4.2-C de betonun iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımının 3B görüntüsü, Şekil 4.2-D de betonun içinde ki agregaların 3B görüntüsü ve Şekil 4.2-E de betonun içinde ki hava boşluğunun 3B görüntüsü verilmiştir.



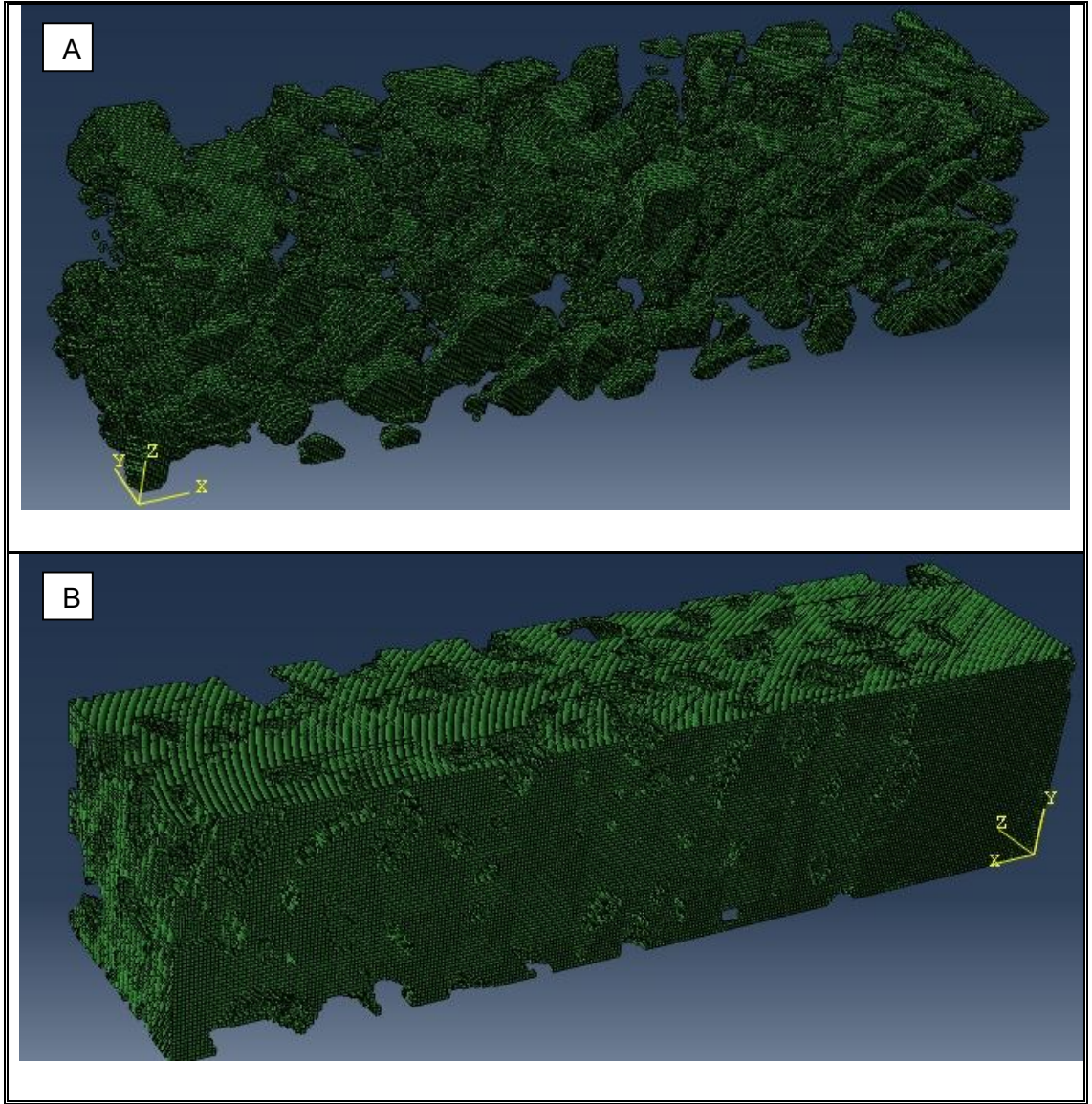
Şekil 4.6 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen 3B Katı Model

4.1.6 Beton Numunesine Ait Sonlu Elemanlar Modelinin Elde Edilmesi

Tez kapsamında yapılan analizlerde ABAQUS® programı kullanılmıştır. BT sonucunda elde edilen görüntülerin ABAQUS® programına aktarılması için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması gerekir. Sonlu elemanlar modeli ise bir takım görüntü işlem, vokselizasyon ve format dönüşümü işlemleri ile mümkün olmaktadır. 3B katı modeli elde edilen beton numunesi yine CUBOID-SI2FE scripti kullanılarak sonlu elemanlar modeline dönüştürülmektedir. CUBOID-SI2FE programı içerisinde eşik değer, rekonstrüksiyon ve kendine özgü bir floodfill algoritması bulunmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde BT sonucunda elde edilen sıralı görüntüler ABAQUS® programına direkt aktarabilecek hale getirilmektedir.

CUBOID-SI2FE scripti tarafından oluşturulan voksel elemanlara doğrusal heksahedral eleman tipi C3D8 tanımlanması ile eleman ve düğüm noktaları yeniden düzenlenmiştir.

Şekil 4.7 de eleman tipi ve düğüm noktaları düzenlenerek sonlu elemanlar ağı geçirilen modeli görülmektedir. Şekil 4.7-A da beton içindeki agreganın sonlu elemanlar ağı geçirilmiş modeli ve Şekil 4.7-B de ise iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımının sonlu elemanlar ağı geçirilmiş modeli verilmiştir.



Şekil 4.7 Sonlu Eleman Ağı Geçirilmiş Modeller

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 iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımının dokusu olduğundan emin olunan bir alan işaretlenerek floodfill algoritması uygulanmış, böylelikle sanki iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımının dokusu olan yerlerden bir sıvı dökülmüş gibi bağlantılı tüm yerler işaretlenmiş olur. Böylece bağlantısı olmayan parçalar tespit edilerek, modelden ayrılır ve model tek parça haline getirilmiştir.

4.1.7 Beton Numunesine Ait Sonlu Eleman Özellikleri ve Geometrik Özellikler

Sonlu elemanlar ağı geçirilmiş modelin agrega, iri agreganın dahil edilmediği beton harcı ve boşluk için sonlu eleman özellikleri ve temel geometrik özellikleri Çizelge 4.2 de verilmiştir. Modelin temel geometrik özellikleri ele alındığında en büyük hacim ve yüzey alanının iri agreganın dahil edilmediği beton harcında olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar özelliklerine bakıldığında sonlu eleman nokta sayısı ve sonlu eleman sayısı en fazla iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımındadır.

Çizelge 4.2 Modelin Temel Geometrik Özellikleri ve Sonlu Eleman Özellikleri

Faz	Hacim (mm ³)	Hacimsel Oran	Yüzey Alanı (mm ²)	H.O/ Y.A.O	Sonlu Eleman Toplam Nokta Sayısı	Sonlu Eleman Sayısı
İri Agreganın Dahil Edilmediği Beton Harcı	1,32E+05	67,37%	6,89E+04	188,07%	1115973	949081
Agrega	7,93E+04	30,80%	5,12E+04	115,77%	580331	432795
Boşluk	4,54E+03	1,83%	6,59E+03	53,35%		
Toplam	2,16E+05					

Sonlu eleman sayısı ve nokta sayısının model için çok büyük olması işlem hacmini arttırmaktadır. İşlem hacminin çok büyük olması nedeniyle işlemcisi 1.60 GHz, RAM'i 4 GB ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayar bile analizler için yeterli olamamaktadır. Tez kapsamında yapılan analizler için işlemcisi 3.33 GHz, RAM'i 24 GB ve 64 bit işletim sistemine sahip server kullanılmıştır.

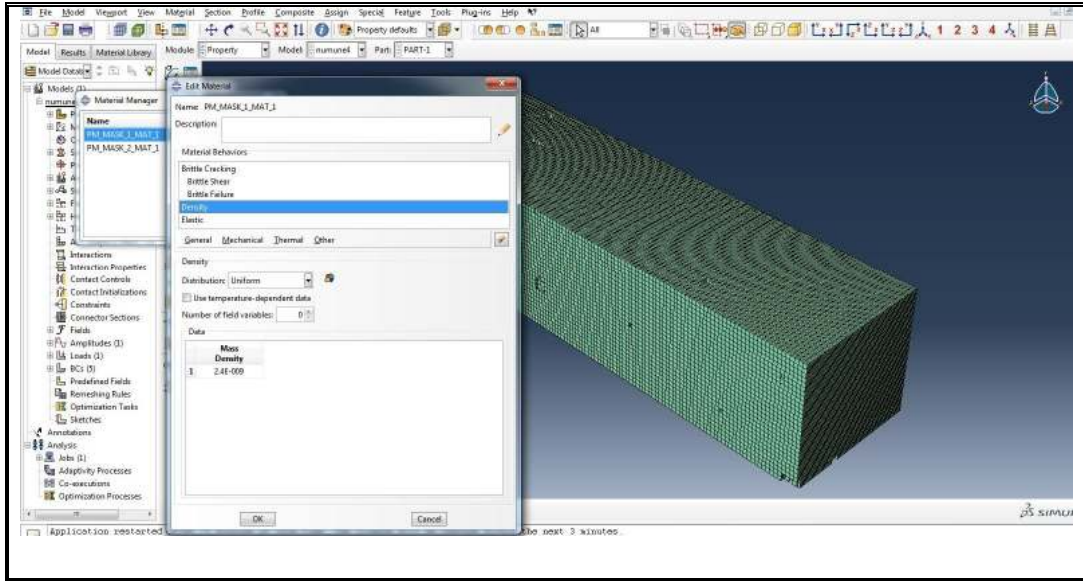
4.1.8 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeline Malzeme Parametrelerinin Atanması

Analizler için CUBOID-SI2FE scripti tarafından oluşturulan sonlu eleman modelleri agrega ve iri agreganın dahil edilmediği beton harcı karışımı için ABAQUS® programı tarafından tanınacak INP dosyası içinde ayrı ayrı bölüm olarak kaydedilmiştir. Her bir bölüm için malzeme özellikleri çizelge 4.3 de ki gibi kullanılmıştır.

Çizelge 4.3 Abaqus® Programında Kullanılan Malzeme Özellikleri

Malzeme Özelliği	Agrega	İri Agreganın Dahil Edilmediği Beton Harcı Karışımı
Elastisite Modülü (N/mm^2)	$28,6 \times 10^4$	$28,6 \times 10^3$
Poisson Oranı	0,15	0,15
Birim Hacim Ağırlık(ton/mm^3)	$2,4 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-9}$

Malzeme özelliklerinin ABAQUS® programında sonlu eleman modeline atanması işlemi “Property” modülü altında yapılmaktadır. Şekil 4.8 de sonlu eleman modeline ABAQUS® programında malzeme özelliklerinin atanması işlemi görülmektedir.

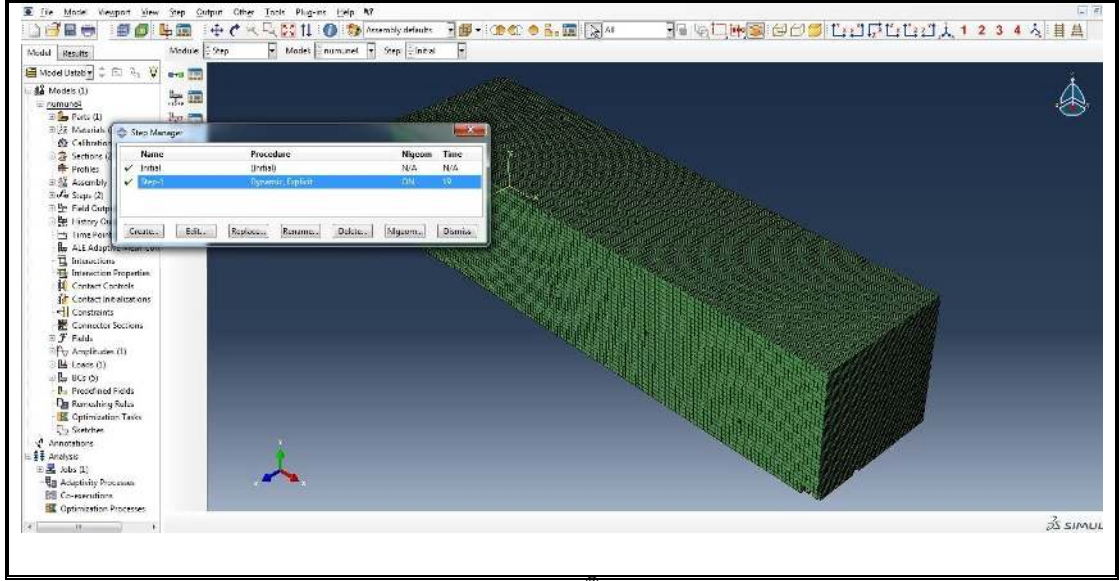
**Şekil 4.8** Sonlu Eleman Modeline Abaqus® Programında Malzeme Özelliklerinin Atanması

Analiz sonuçlarında çatlakların görülebilmesi için ABAQUS® programında “Brittle Cracking” modeli kullanılmıştır. Bu model gevrek özelliklere sahip beton modellemesi için kullanılmaktadır. Ayrıca bu model camı, yarı camı ve gevrek malzemelerde de kullanılır. Brittle Cracking modeli çekme gerilmesinden kaynaklı çatlakların hakim olduğu uygulamalar için tasarlanmıştır. Basınç davranışının her zaman doğrusal elastik olduğunu varsaymaktadır.

Bu modelde önceden çatlama için malzeme özellikleri tanımlanmış doğrusal elastik malzemeler kullanılır. En popüler kullanım alanı basınç altında doğrusal elastik davranış gösteren gevrek malzemelerdir. Modelin tasarlanma amacı betonarme yapılar olmasına rağmen beton içinde çok

4.1.9 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeline Analiz Tipinin Girilmesi

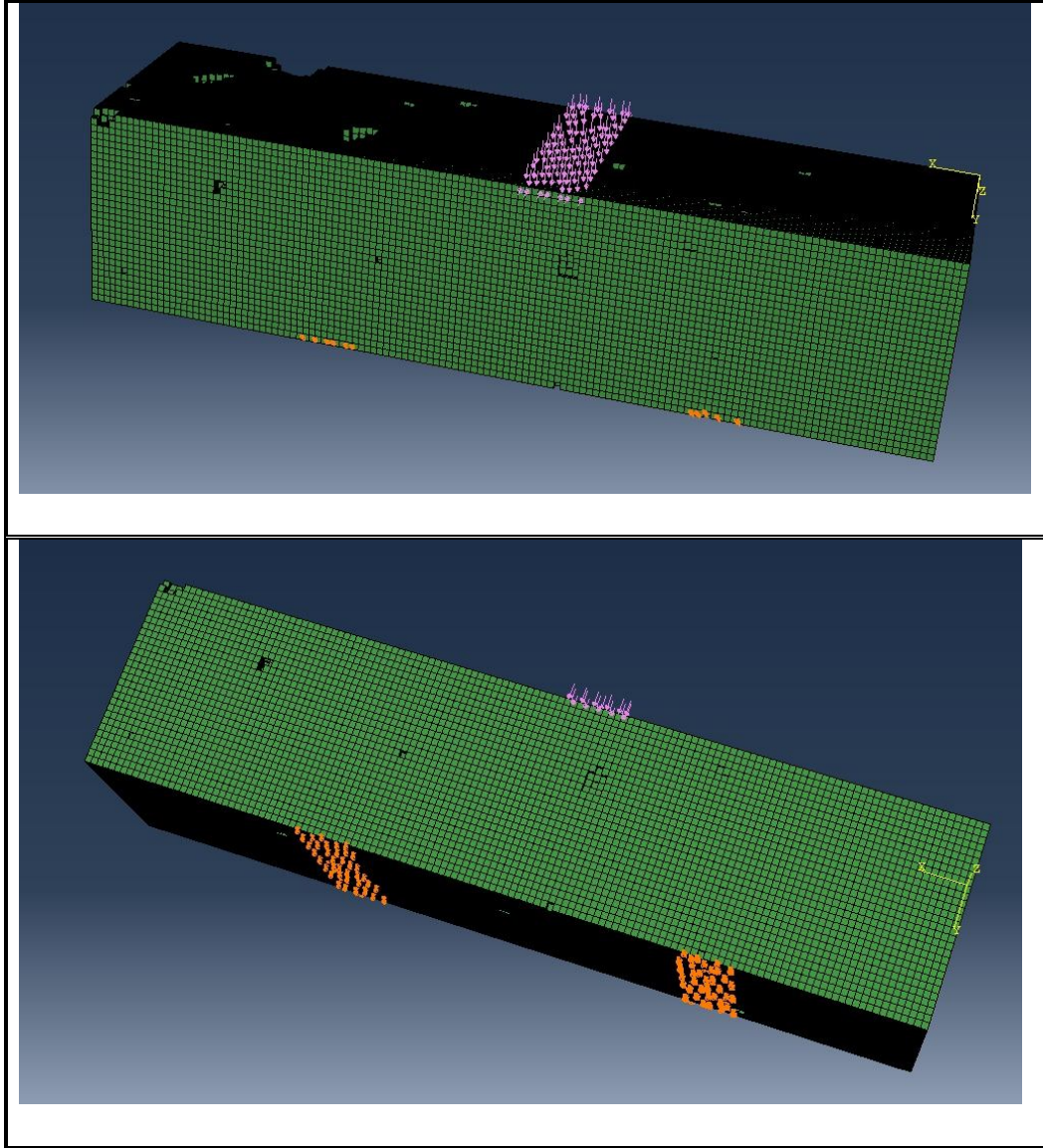
Malzeme özellikleri girilen sonlu eleman modelinin analiz tipinin girilmesi işlemi “Step” modülü altında yapılmaktadır. Şekil 4.9 da sonlu eleman modelinin analiz tipinin atanması işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Sonlu Eleman Modelinin Abaqus® Programında Analiz Tipinin Girilmesi

4.1.10 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modelinin Üç Nokta Deney Simülasyonunun Oluşturulması

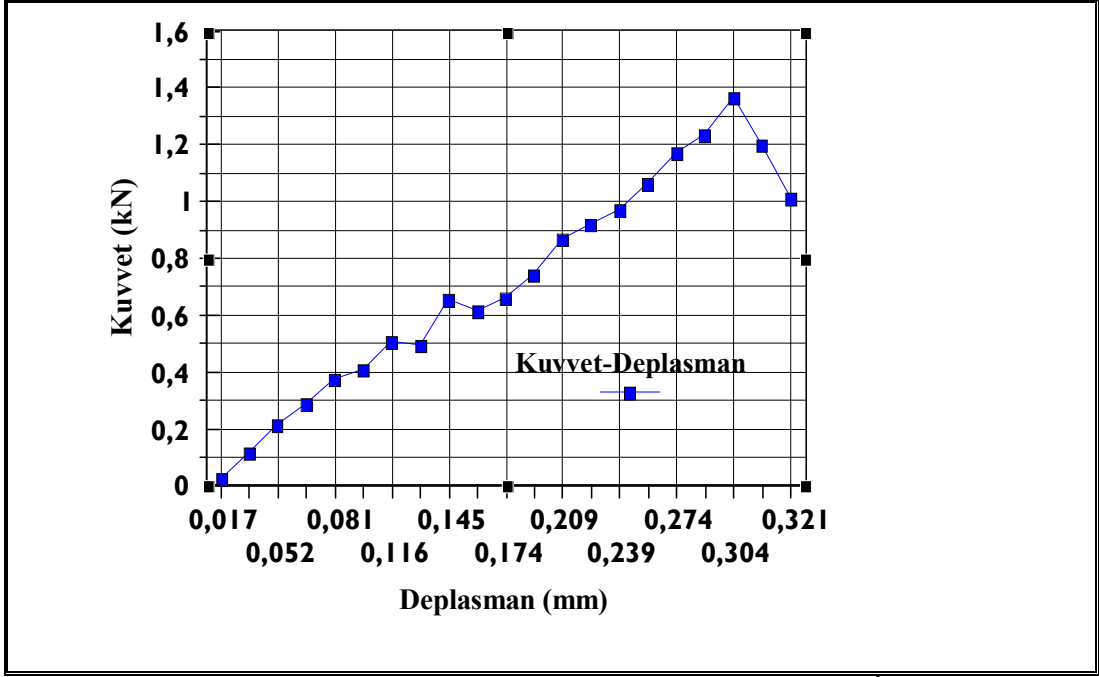
Malzeme özellikleri ve analizi tipi belirlenen sonlu eleman modelinin ABAQUS® programında yükleme durumu ve mesnetlenme koşulları belirlenmiştir. Şekil 4.10 da sonlu eleman modeline ait deney simülasyonu verilmiştir. Tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu elemanlar modeli “Job” modülünde analiz edilmiştir.



Şekil 4.10 Sonlu Elemanlar Modelin ABAQUS® Programında Yükleneşi ve Mesnetlenmesi

4.1.11 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeline Yapılan Üç Nokta Deneyi Sonuçları

Şekil 4.11 de tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu elemanlar modeline yapılan üç nokta eğilme deneyi sonucu oluşan kuvvet-deplasman grafiği verilmektedir.

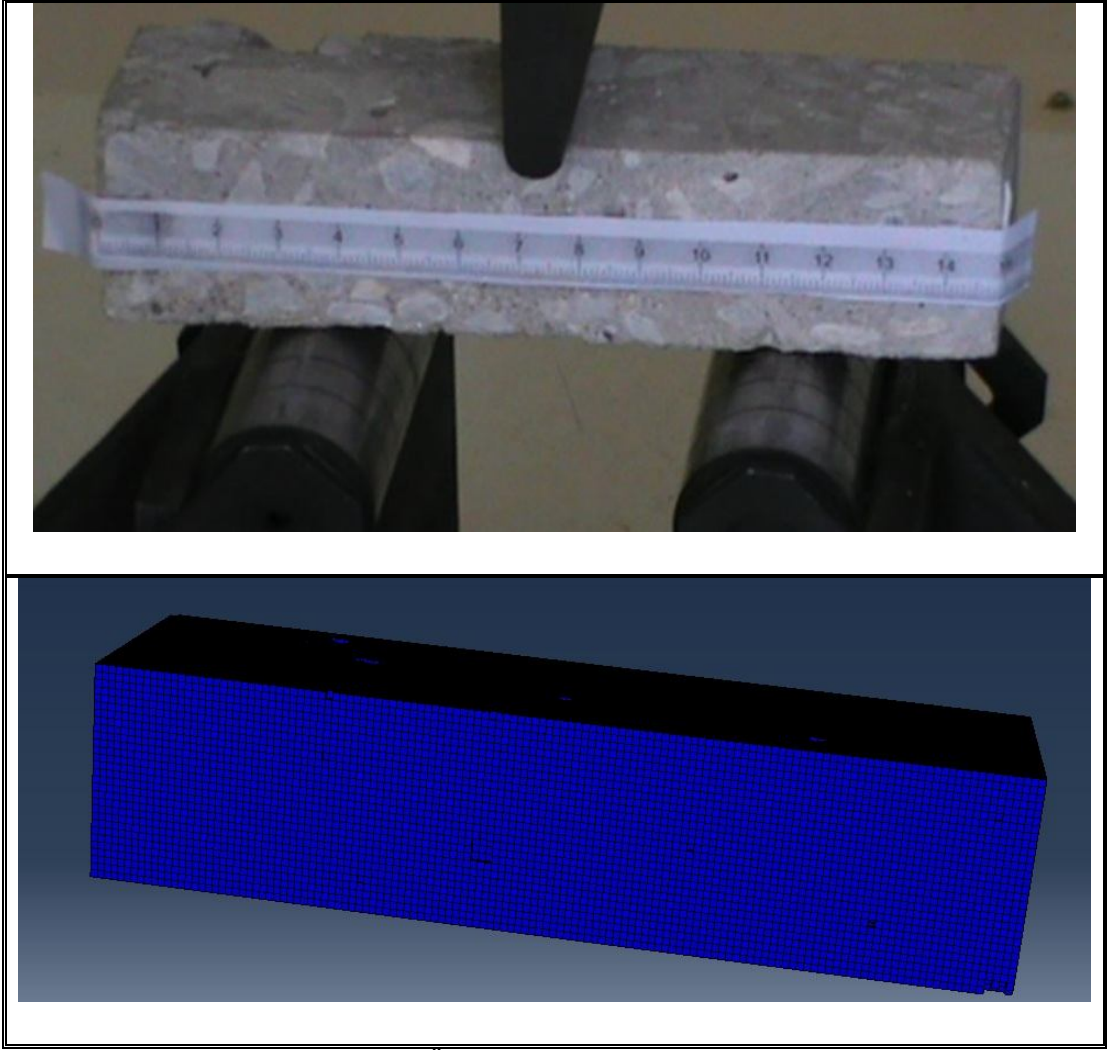


Şekil 4.11 Sonlu elemanlar Modeline Ait Kuvvet-Deplasman İlişkisi

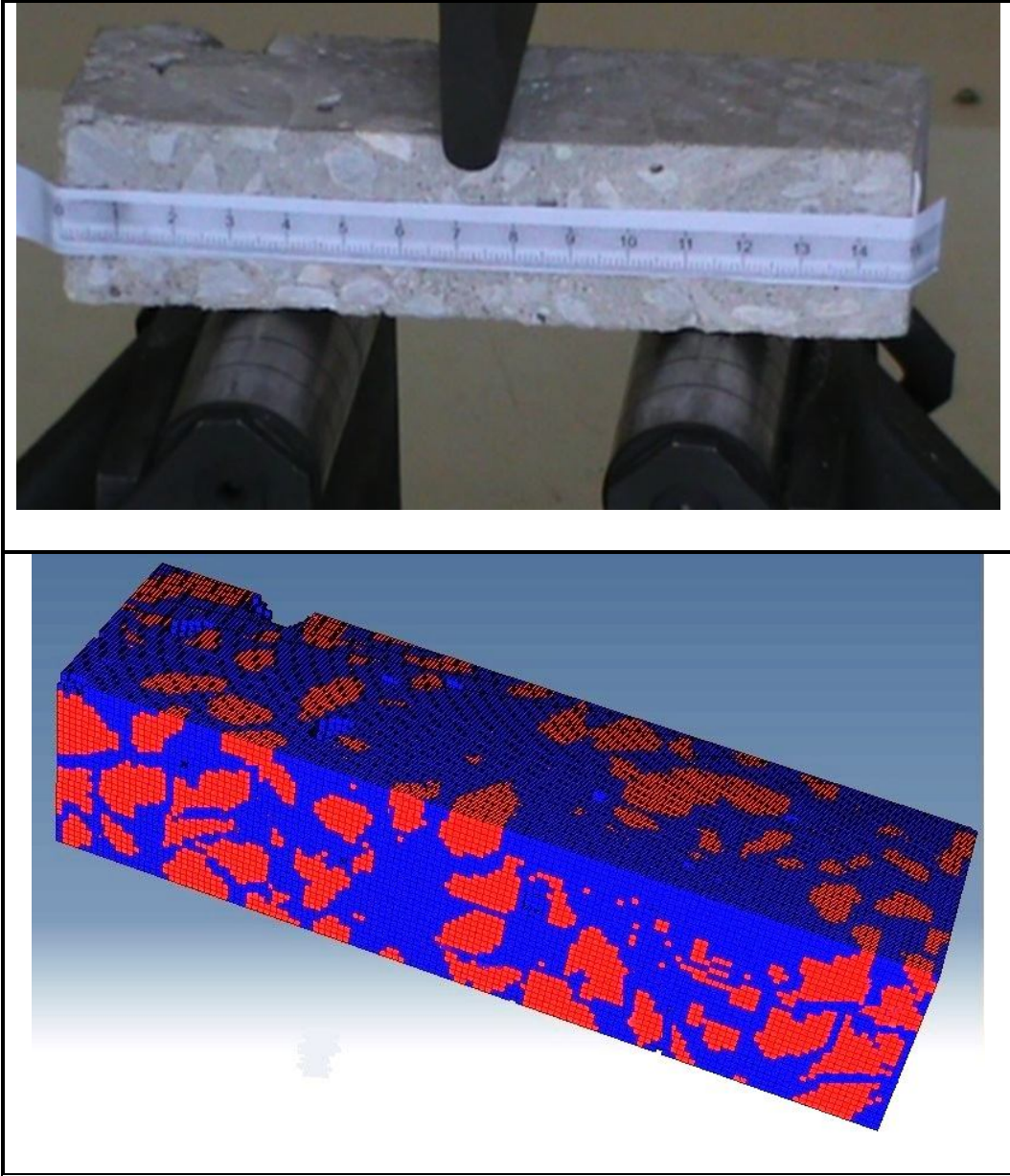
Tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu elemanlar modeline yapılan üç nokta eğilme deneyi sonucunda en büyük kuvvetin uygulandığı sırada oluşan maksimum deplasman miktarı 0,304 mm olarak görülmektedir.

4.1.12 Gerçek Beton Numunesine Yapılan Üç Nokta Deney İle Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeline Yapılan Üç Nokta Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

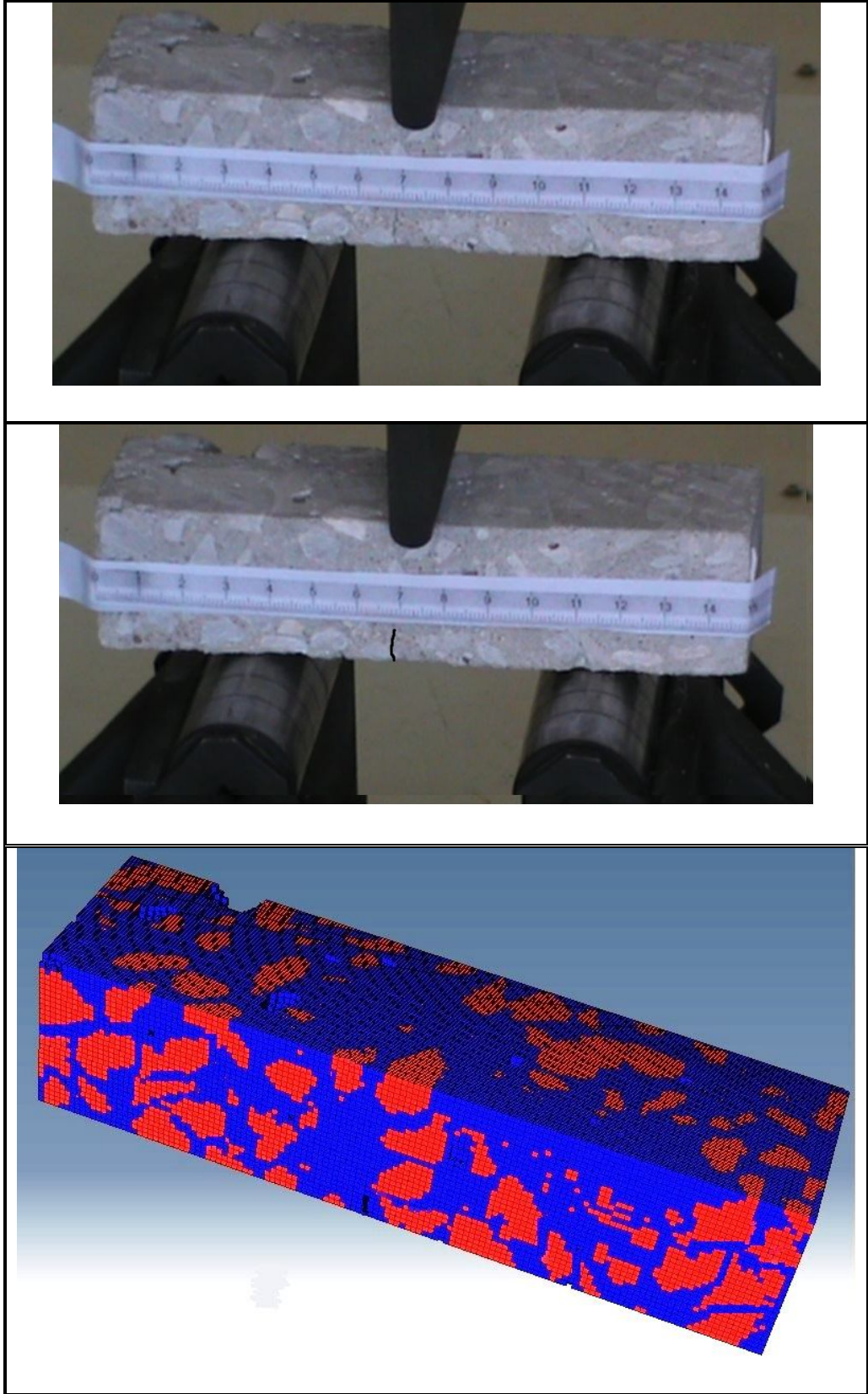
Tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu elemanlar modeline ABAQUS® programında yapılan analiz sonucu oluşan çatlakların zamanla değişimi ile gerçek beton numunesine yapılan deney sonucu oluşan çatlakların zamanla değişimleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve Şekil 4.18 de verilmiştir.



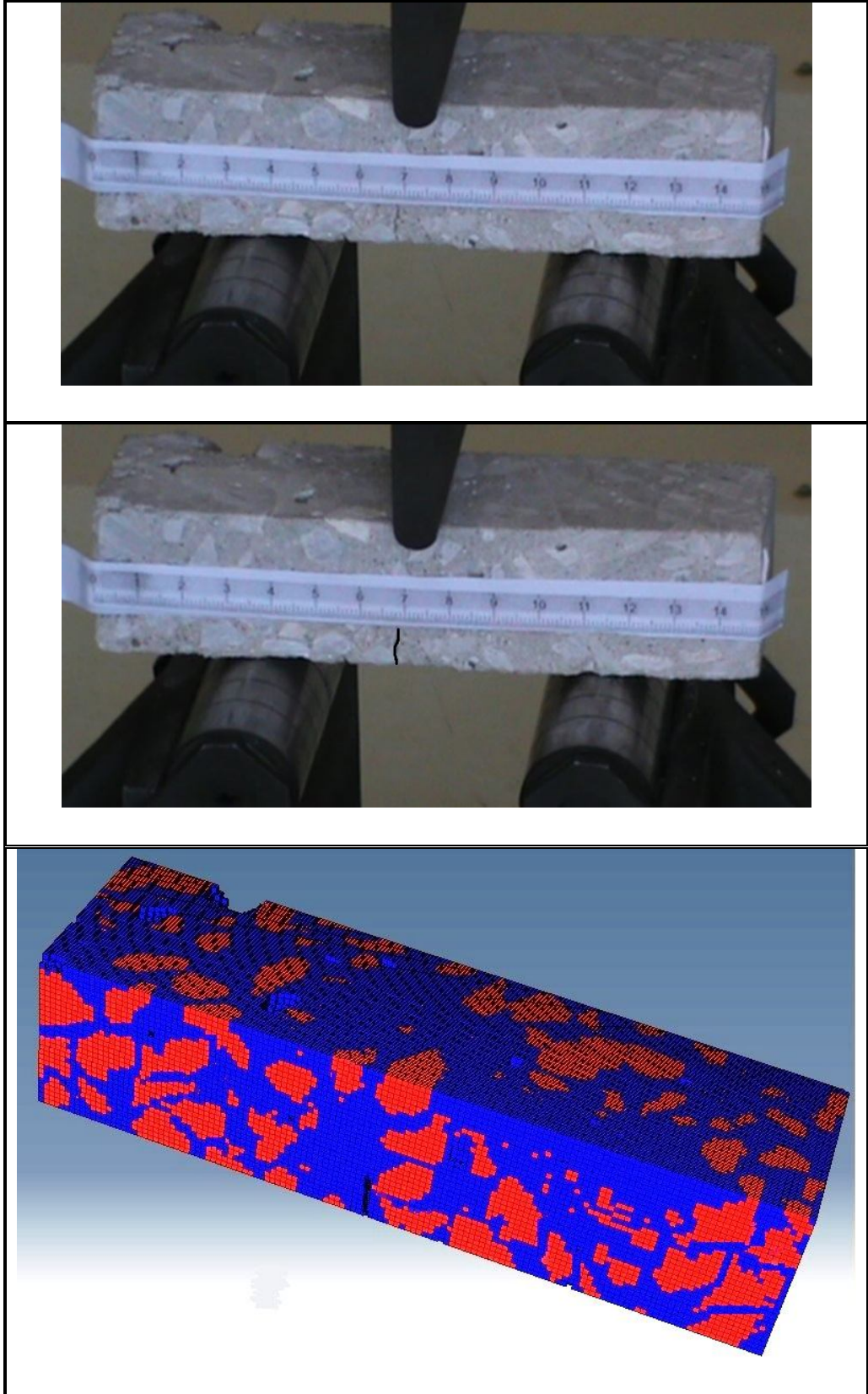
Şekil 4.12 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=0)



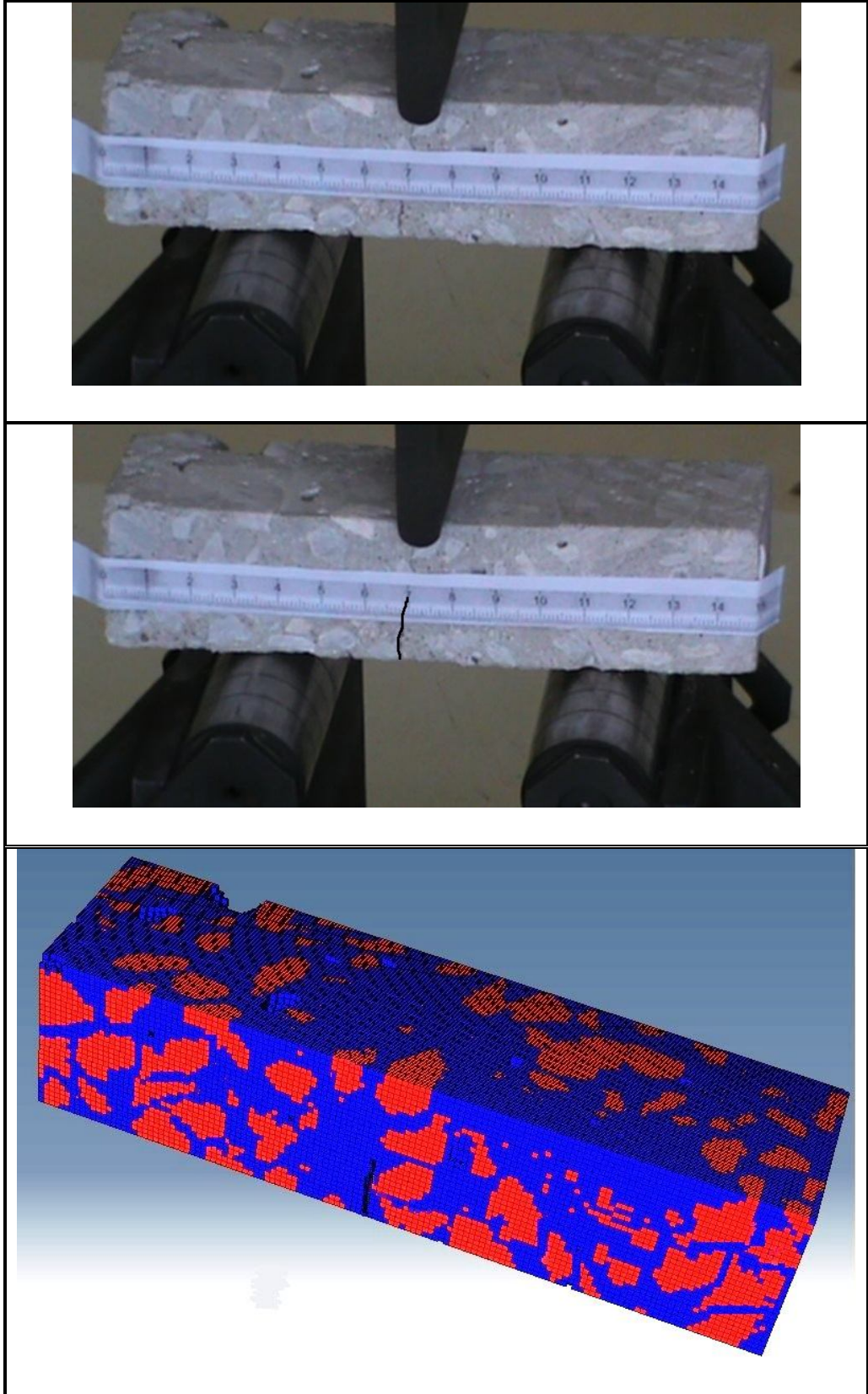
Şekil 4.13 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=2,1sn)



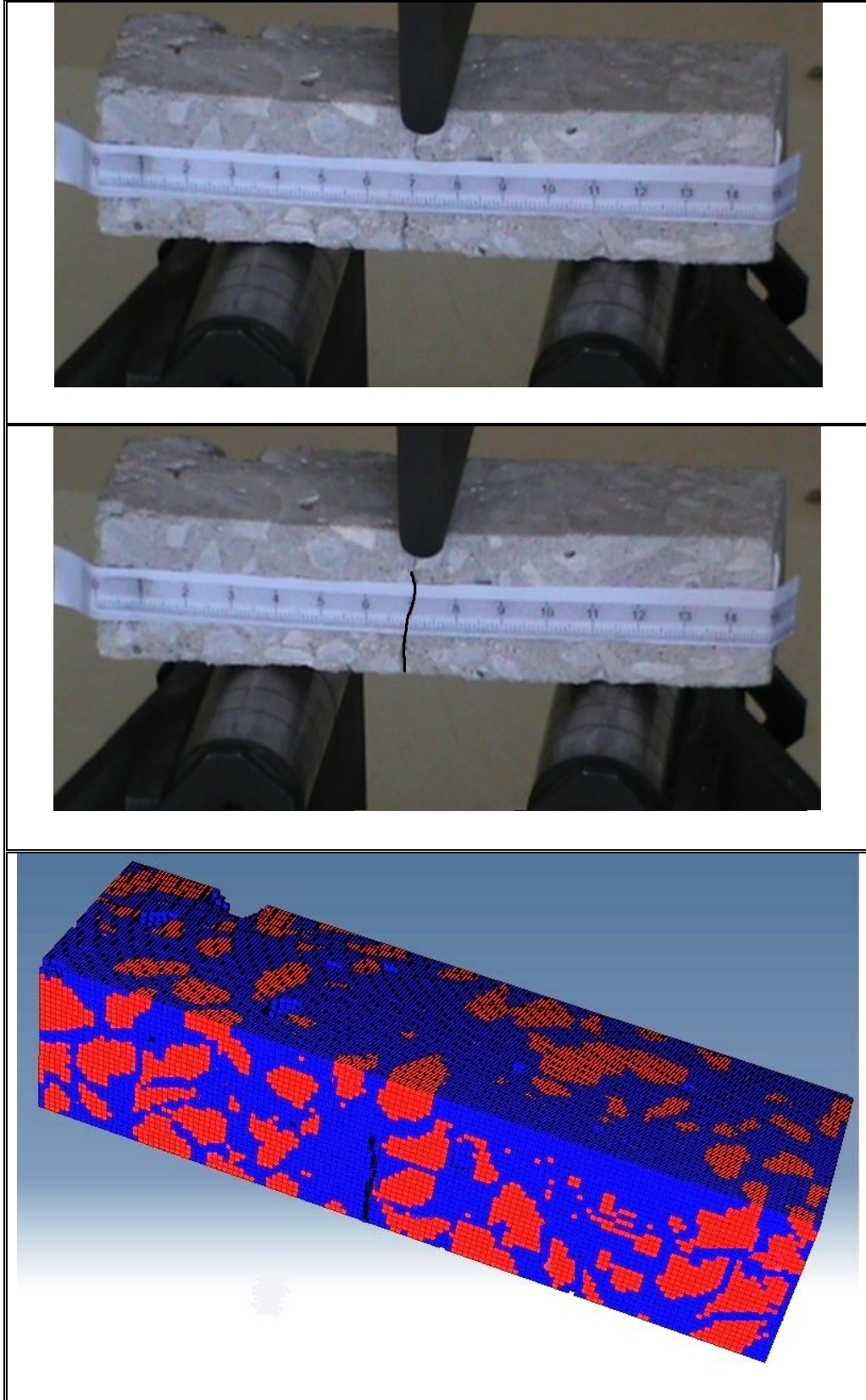
Şekil 4.14 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=5,95sn)



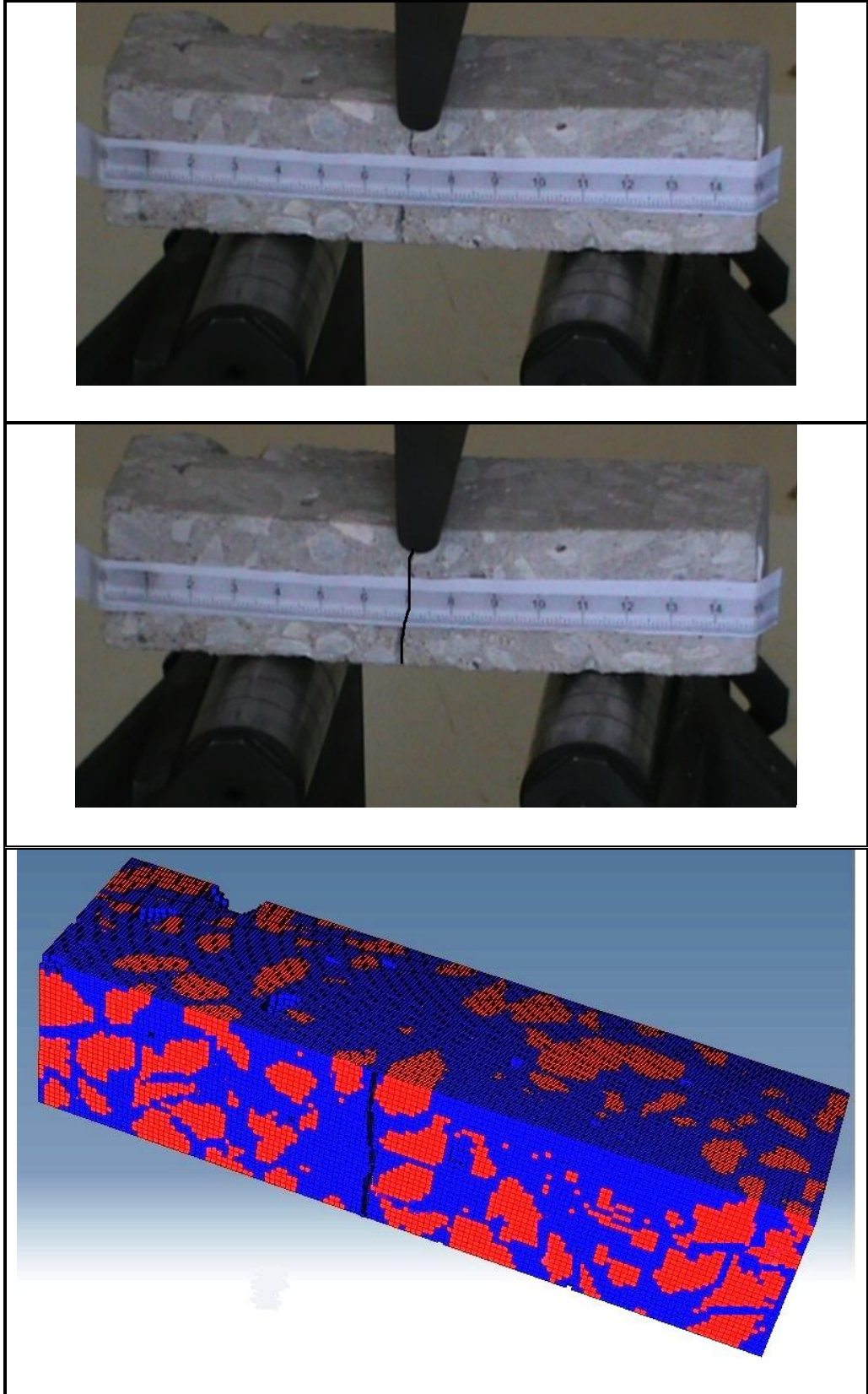
Şekil 4.15 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=9,8sn)



Şekil 4.16 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=12,6sn)

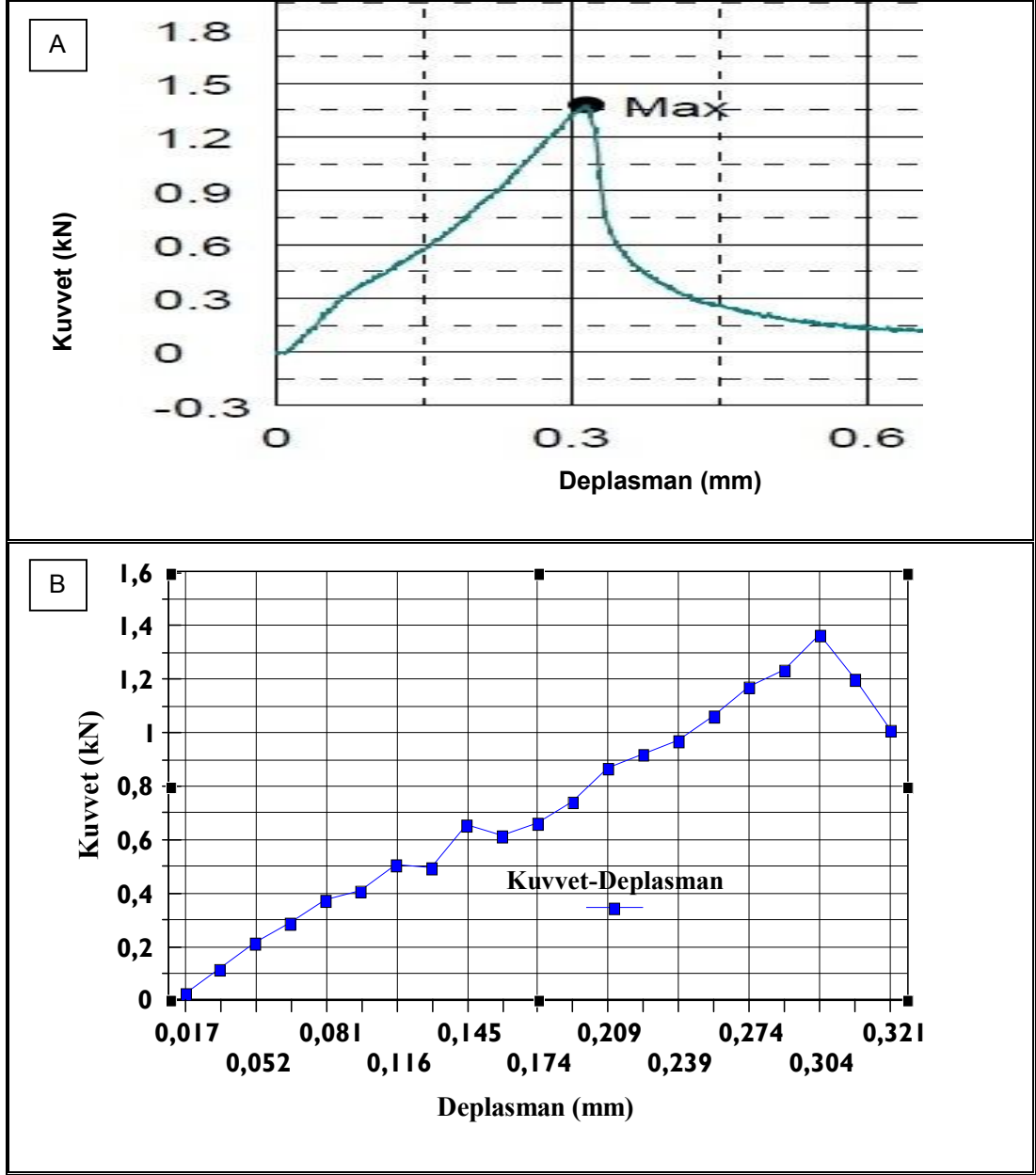


Şekil 4.17 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=16,45sn)



Şekil 4.18 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=19sn)

Gerçek beton numunesi üzerinde yapılan üç nokta deneyi ile ABAQUS® programında tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu eleman modeli üzerinde yapılan üç nokta deney görüntüleri incelendiğinde aynı zaman diliminde modellerin hemen hemen aynı tepkileri verdiği görülmektedir.

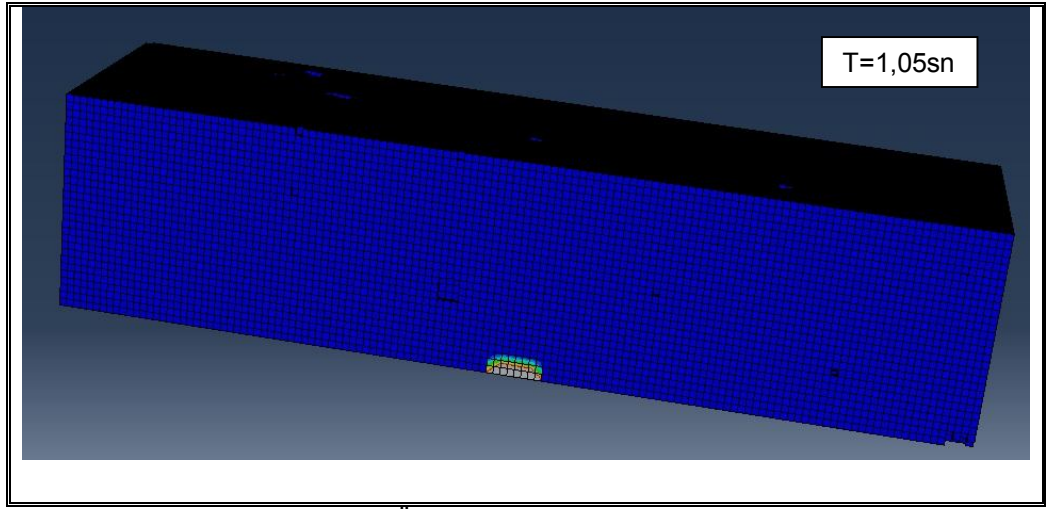


Şekil 4.19 Üç Nokta Deney Sonrası Kuvvet-Deplasman İlişkisi

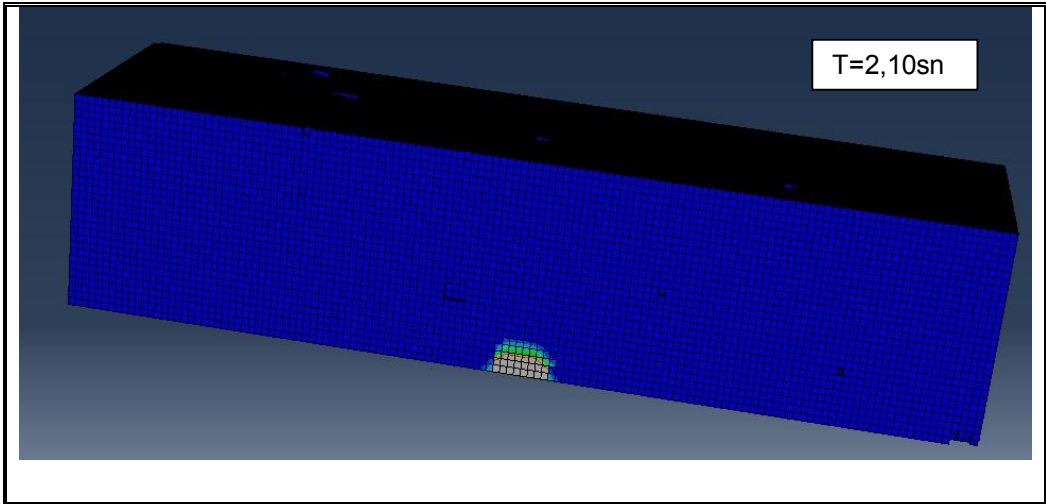
Şekil 4.19-A da gerçek numuneye yapılan deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi, Şekil 4.19-B de ise tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen sonlu eleman modeli üzerinde yapılan üç nokta deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi görülmektedir. Eğriler dikkatli incelendiğinde birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

4.1.13 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen Sonlu Eleman Modeli Üzerinde En Büyük Asal Gerilme Değerlerinin Gösterilmesi

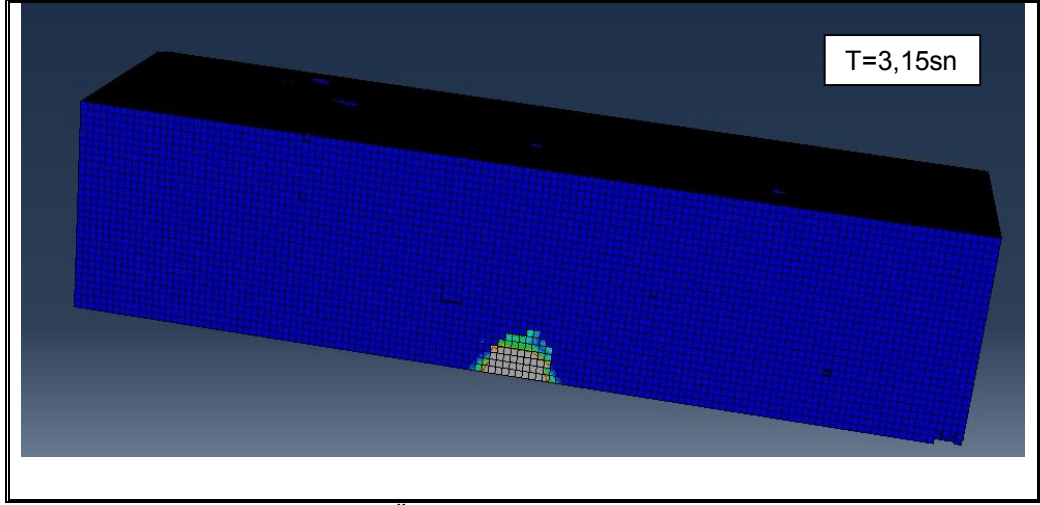
ABAQUS® programında yapılan analiz sonucunda model üzerinde oluşan en büyük asal gerilmenin zamanla değişimi elde edilmiştir. Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29 da zamanın değişmesiyle birlikte en büyük asal gerilme dağılımı renk skalasının özelleştirilmesiyle gösterilmiştir. Maksimum gerilme hipotezine göre meydana gelen en büyük asal gerilme malzemenin akma veya kopma mukavemetine eşit olduğunda elemanda akma veya kopma meydana gelmektedir.



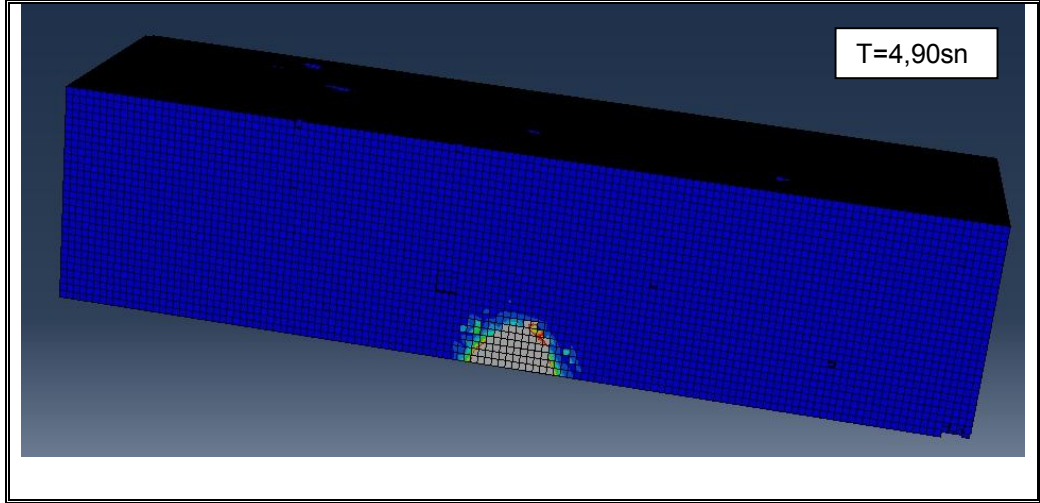
Şekil 4.20 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=1,05sn)



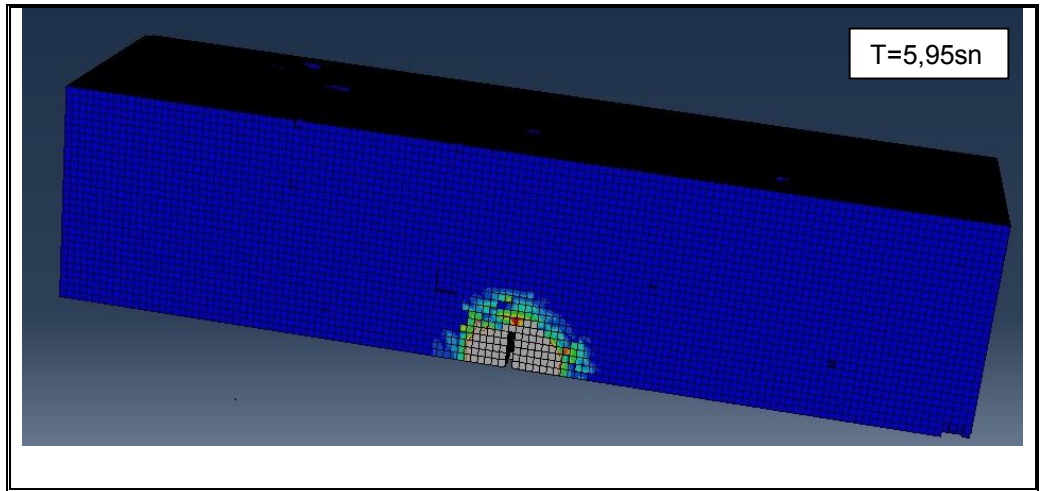
Şekil 4.21 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=2,10sn)



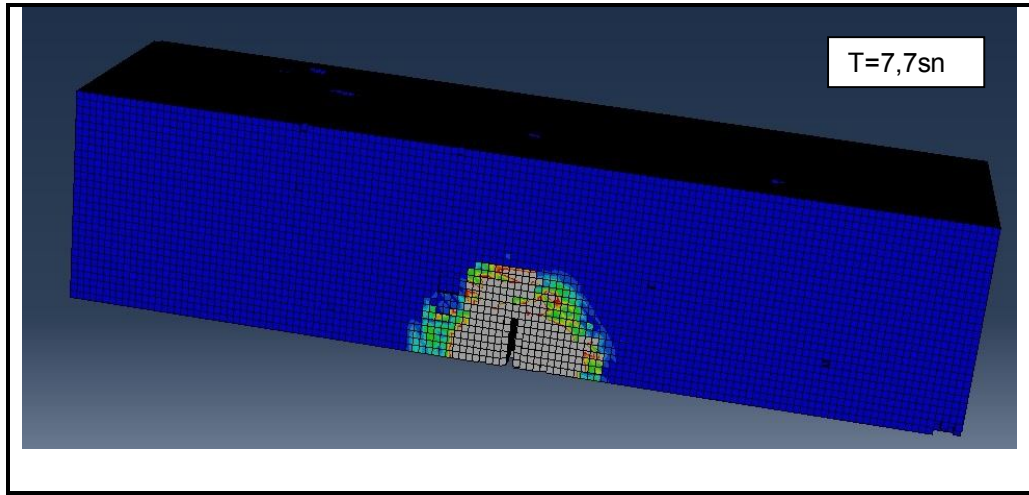
Şekil 4.22 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=3,15sn)



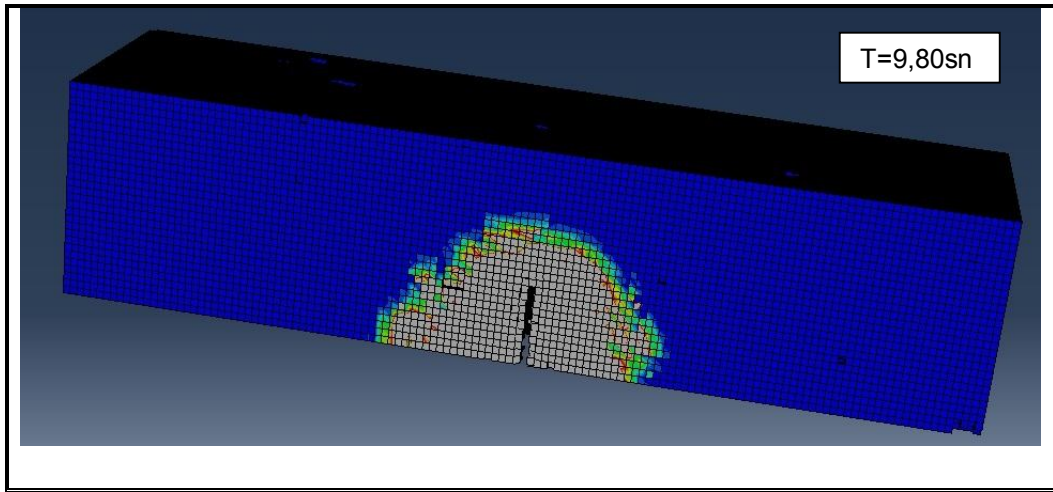
Şekil 4.23 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=4,90sn)



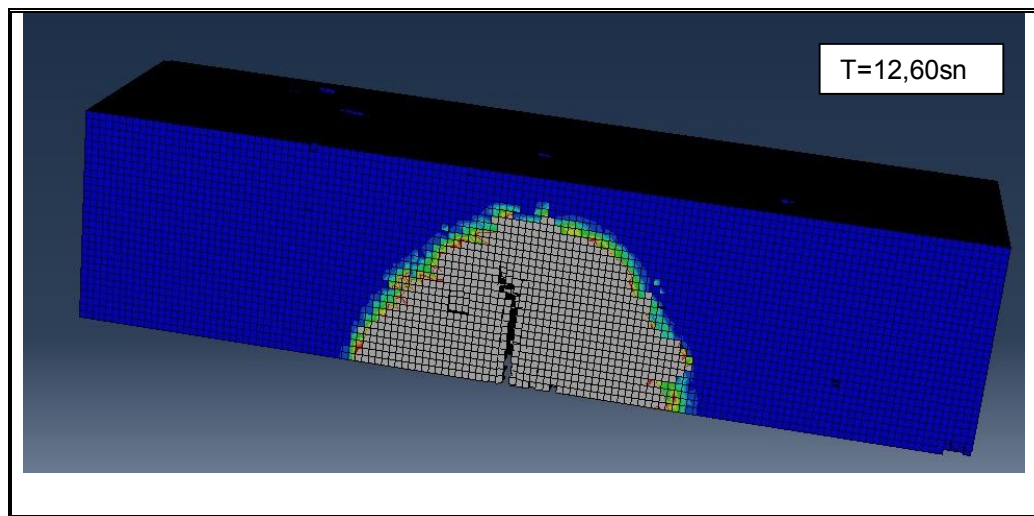
Şekil 4.24 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=5,95sn)



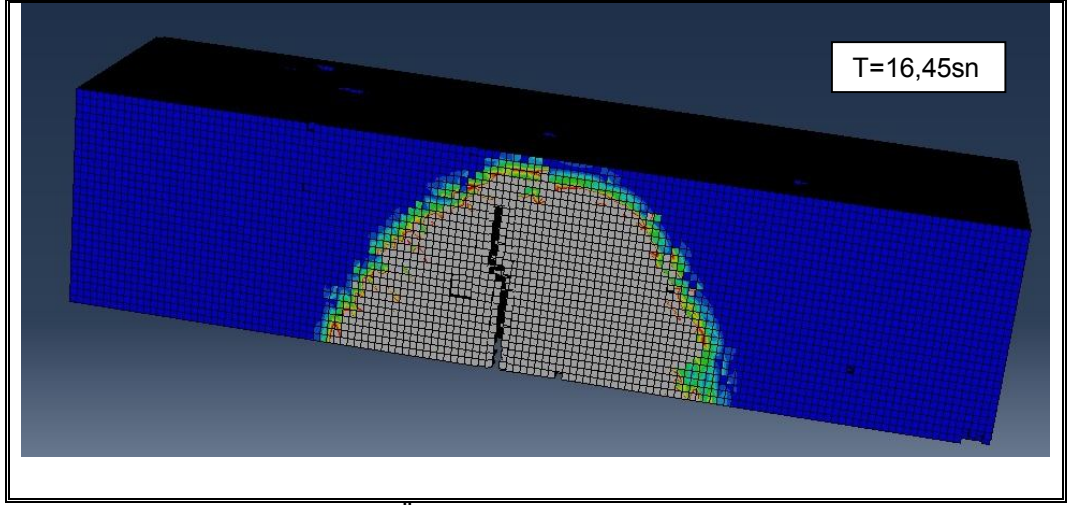
Şekil 4.25 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=7,7sn)



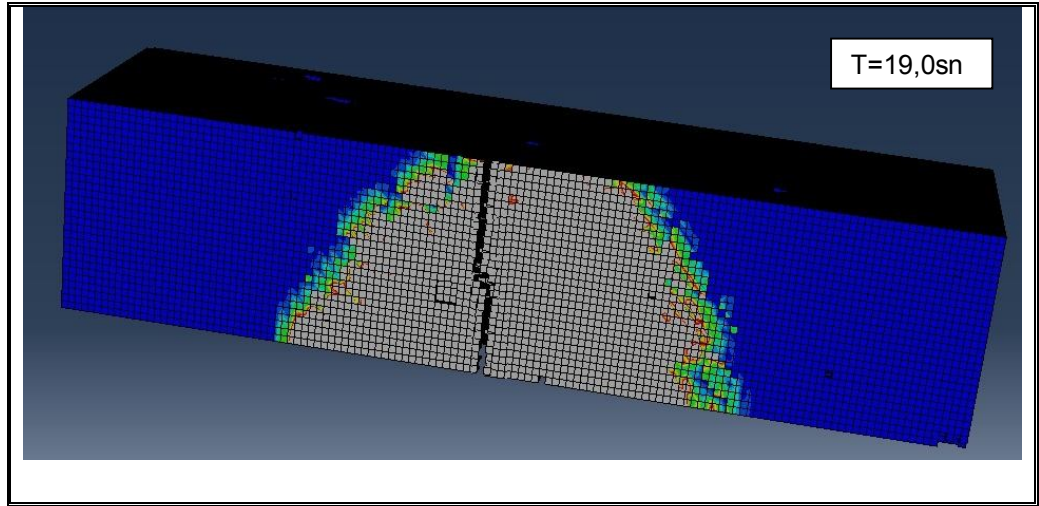
Şekil 4.26 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=9,80sn)



Şekil 4.27 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=12,60sn)



Şekil 4.28 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=16,45sn)



Şekil 4.29 Sonlu Eleman Modeli Üzerindeki En Büyük Asal Gerilme Dağılımı (T=19,0sn)

Beton numunesine ait ikinci bir örnek ekler kısmında verilmiştir. Elde edilen çizelgeler Ek-1 de, şekiller ise Ek-2 de sunulmuştur.

4.2 Mercan Numunesi İçin Yapılan Analizler

Bu bölümde kompleks geometriye sahip “red coral” (kırmızı mercan) numunesi üzerinde yapılan çalışmalara yer verilecektir. Mercanın yapısal geometrisi göz önüne alındığında poroz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Poroz malzemeler çok farklı sınıflarda ele alınabilirler. Geometrik özellikler genelde suni üretilmiş yapıda ve periyodik yapılarda olabileceği gibi, özellikle doğal poroz malzemeler de sıklıkla karşılaşılan heterojen yapıda da olabilirler. Bunun dışında poroz bölgelerin kapalı veya birbiri ile bağlantılı olması yapısal pek çok özelliği etkileyebilir.

Mercan numunesinin yapısal detaylarını daha iyi yakalayabilmek için mikro ölçekte çalışma yapılması uygun görülmüştür. Bu amaçla görüntüleme tekniği olarak mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-BT) kullanılmıştır. Mikro ölçekte yapısal detaylara sahip mercanın mekanik davranışlarının belirlenmesinde homojenize edilmiş malzeme özelliklerinin ve yaklaşık geometrinin kullanılması yaygın bir yaklaşımdır. Bu amaçla cismin mikro ve nano ölçekteki davranışlarının önemli olduğu problem tiplerinde yaklaşık yöntemler uygulayarak genel davranışlarını belirlemek yerine, mikro lokal özelliklerin göz önüne alınarak çalışılmasının daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir.

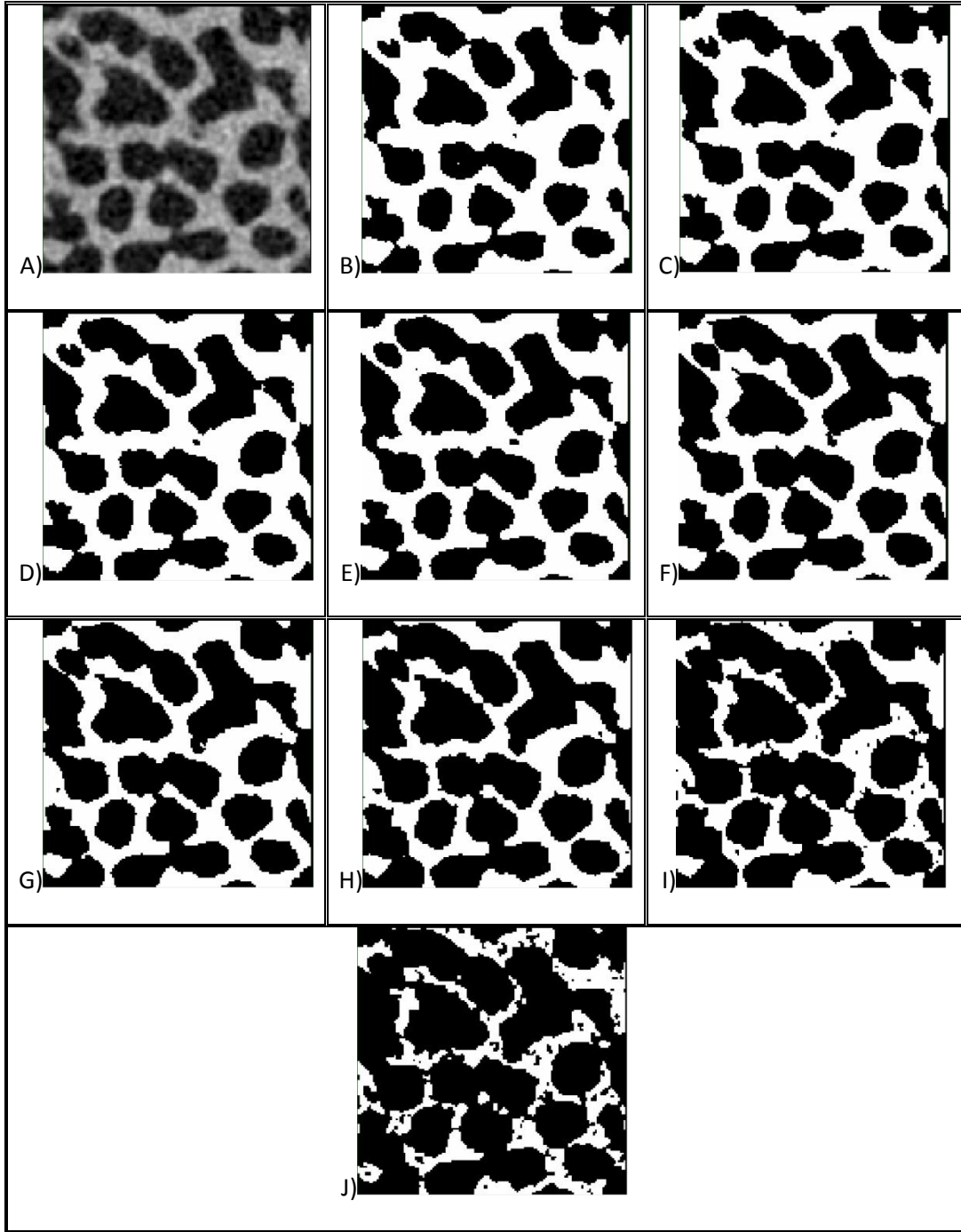
Mikro-BT taramasından geçirilen mercan numunesinin voksel tabanlı sonlu eleman modeli oluşturulurken yapılan eşik değer seçiminin malzemenin geometrik özelliklerine ve eksenel yükleme altındaki davranışına olan etkileri bu bölümde araştırılmıştır.

4.2.1 Mercan Numunesi Görüntü Alma ve Görüntü Verileri

Mercan numunesinin görüntüleri Skyscan1172 marka Mikro-BT cihazından elde edilmiştir. Görüntü alma sırasında görüntüleme parametreleri olarak 100 kV ışın dozu, 100 mAS rotasyon zamanı, 0.0175 mm kesit kalınlığı, 0.00175 mm artım miktarı kullanılmıştır. Mercan numunesine ait görüntülerin çözünürlüğü ise 2000x2000 pikseldir.

4.2.2 Mercan Numunesine Ait Görüntülere Eşik Değer Uygulaması

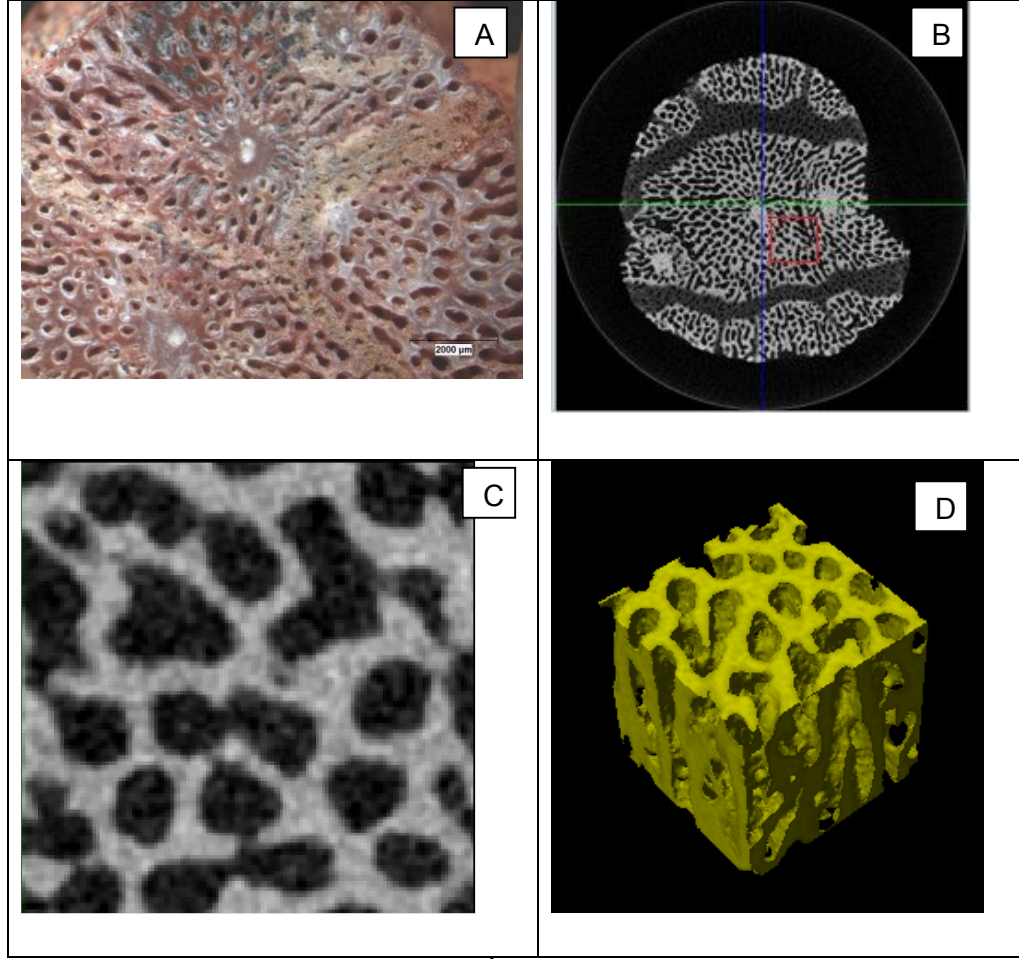
Şekil 4.30 da numune üzerinde eşik değer seçimleri görülmektedir. Tam beyazın eşik değeri 255, tam siyahın ise 0'dır. Şekil 4.30-A da mikro-BT görüntüsü, Şekil 4.30-B,C,D,E,F,G,I,J de sırasıyla eşik değer aralıkları üst limit 255 olmak üzere alt limit 70,80,90,100,110,120,130,140 ve 150 alınmıştır.



Şekil 4.30 2B Mercan Numunesi Görüntülerine Eşik Değer Uygulaması

4.2.3 Mercan Numunesine Ait Görüntülerden 3B Katı Modelin Elde Edilmesi

Şekil 4.31 de Mikro-BT görüntülerinin işlenerek 3B katı modelin elde edilmesinin aşamaları gösterilmiştir. Şekil 4.31-A da mercan numunesi, Şekil 4.31-B de Mikro-BT görüntülerinden bölge seçimi (region of interest), Şekil 4.31-C de seçilmiş bölgenin resim üzerindeki görünümü ve Şekil 4.31-D de üç boyutlu katı model gösterilmiştir.



Şekil 4.31 Mikro-BT Görüntülerinin İşlenerek 3B Katı Modelin Elde Edilmesi

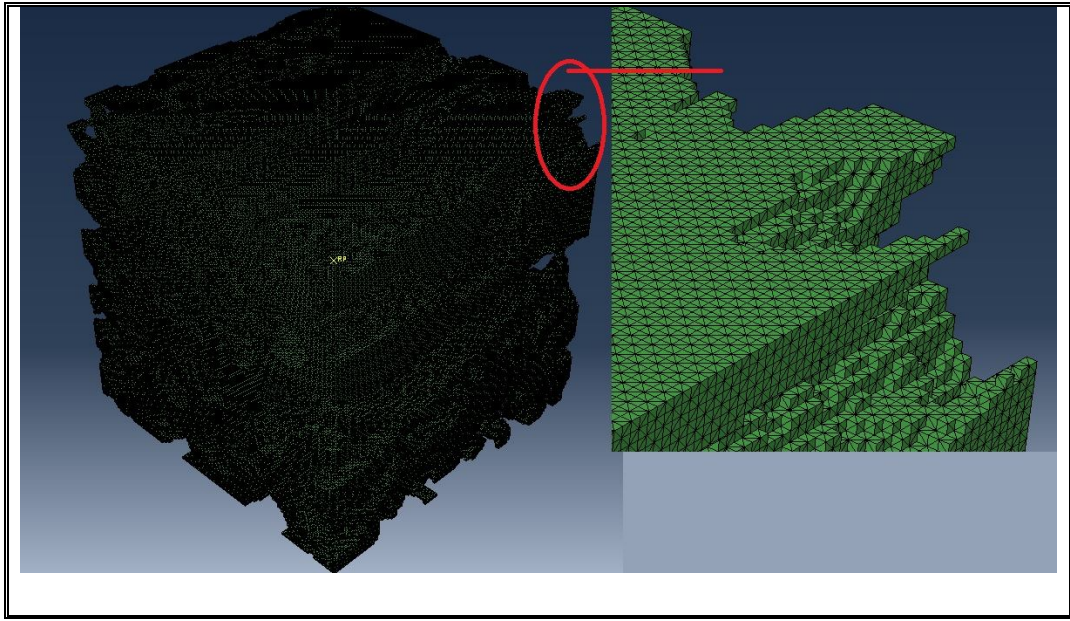
Eşik değeri seçimi yapılan sıralı mikro-BT görüntülerinden 3B katı model elde işlemi sırasında beton numunesinde olduğu gibi CUBOID-SI2FE Matlab scripti kullanılmıştır.

4.2.4 Mercan Numunesine Ait Görüntülerden Sonlu Eleman Modelin Elde Edilmesi

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 mercan dokusu olduğundan emin olunan bir alan işaretlenerek floodfill algoritması uygulanmış, böylelikle sanki

mercan dokusu olan yerlerden bir sıvı dökülmüş gibi bağlantılı tüm yerler işaretlenmiş olur. Böylece bağlantısı olmayan parçalar tespit edilerek, modelden ayrılır ve model tek parça haline getirilmiştir. Daha sonra CUBOID-SI2FE Matlab scriptinde voksel elemanlara doğrusal tetrahedral eleman tipi C3D4 olarak tanımlama yapılarak eleman ve düğüm noktaları yeniden düzenlenmiştir. Böylelikle numunenin ABAQUS® programında işlenebilecek hale gelmesi sağlanmış olur.

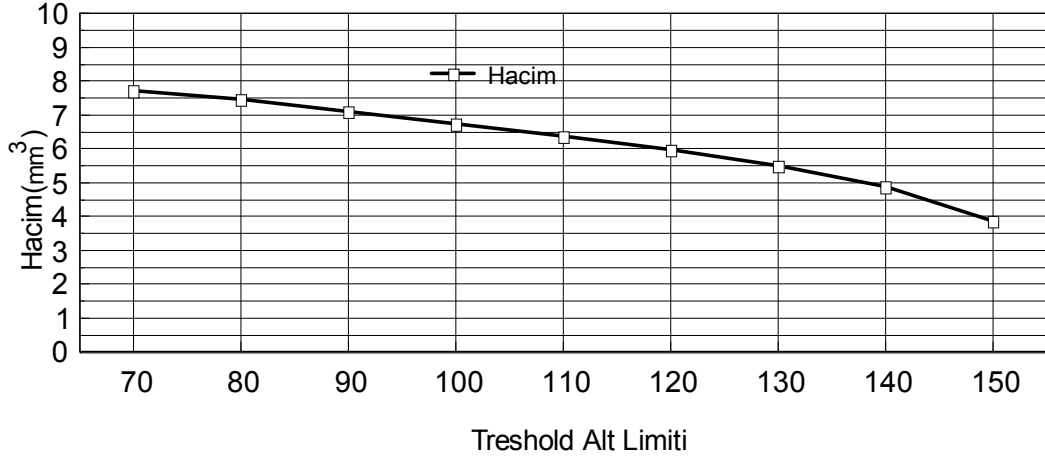
Şekil 4.32 de eşik değeri 110-255 arası olan mercan numunesine ait 3B sonlu eleman modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.32 Mercan Numunesine Ait Sonlu Eleman Modeli (Eşik Değeri 110-255 arası)

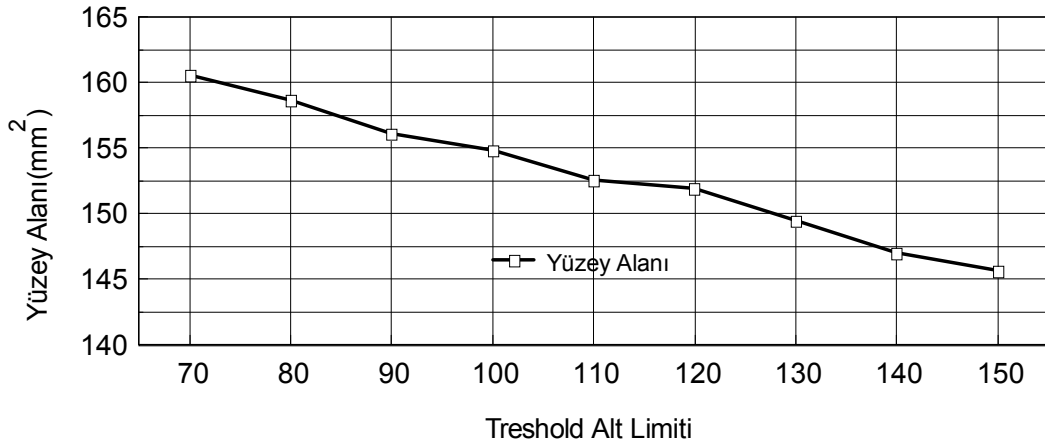
4.2.5 Mercan Numunesine Ait Sonlu Eleman Modeli Üzerinde Yapılan Geometrik Analizler

Bu bölümde mikro-BT görüntülerinden eşik değer değerlerine bağlı olarak elde edilmiş modellere ait geometrik özellikler üzerinde analizler yapılacaktır. Şekil 4.33 de eşik değer aralığı değişiminin model hacmine olan etkileri gösterilmektedir. Eşik değer aralığının daralmasıyla birlikte beklendiği gibi model hacminde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. İncelenen aralıkta model hacmin de % 49,83 azalma meydana gelmiştir.

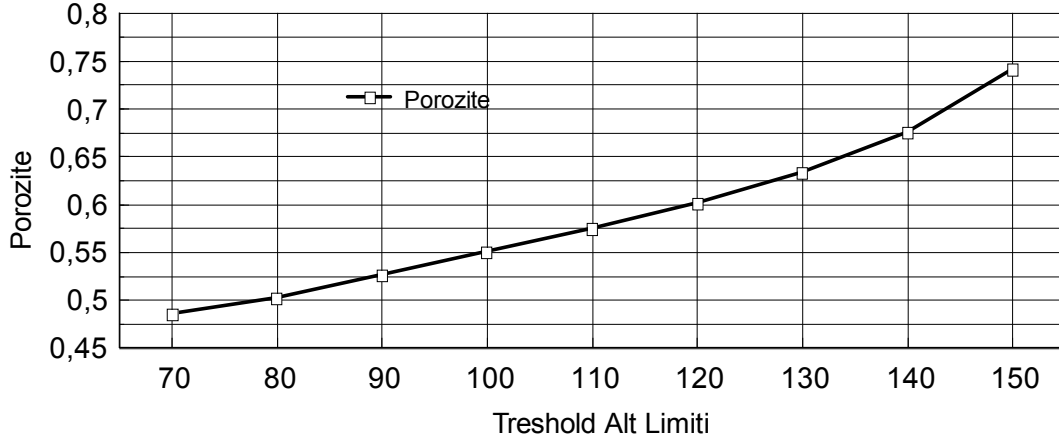


Şekil 4.33 Model Hacminin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi

Şekil 4.34 de eşik değer aralığı değişiminin model yüzey alanına olan etkileri gösterilmektedir. Eşik değer aralığının daralmasıyla birlikte modelin yüzey alanında azalma meydana geldiği görülmektedir. İncelenen aralıkta model yüzey alanında ki azalma miktarı % 34,28 dir. Yüzey alanında ki azalmanın hacim azalmasına tam olarak eşlik etmiyor olması ile yüzeysel detayların hacme göre daha iyi korunduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 4.34 Model Yüzey Alanının Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi

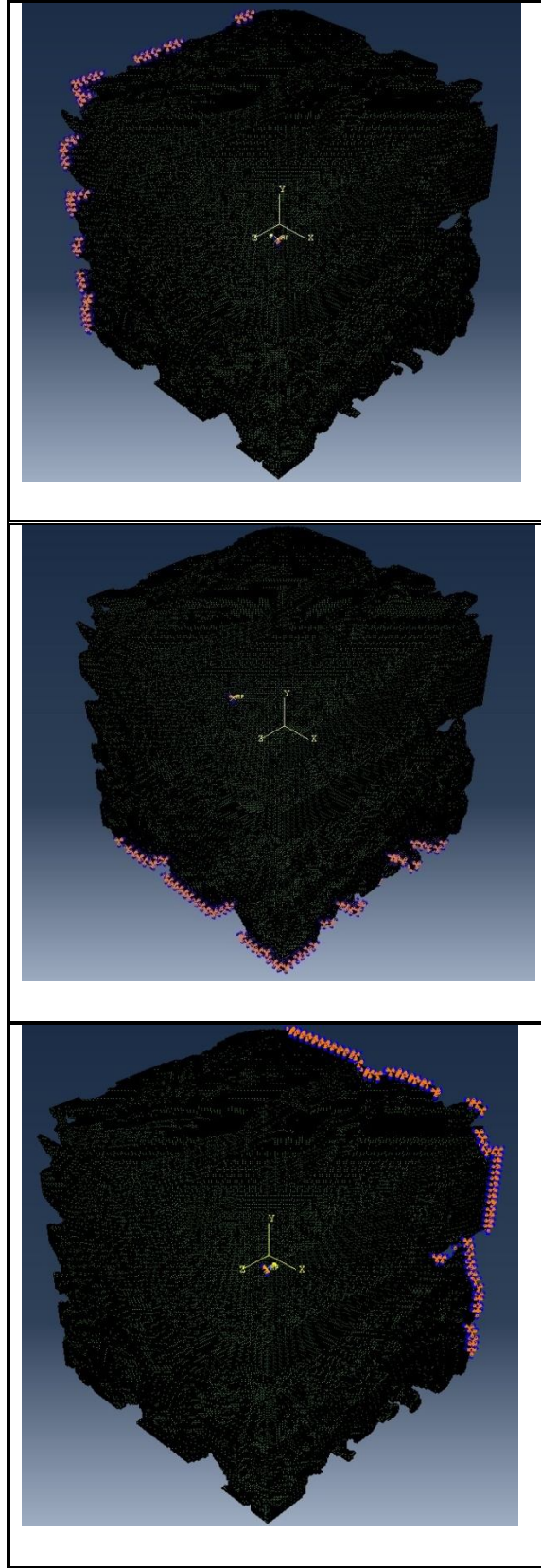


Şekil 4.35 Porozitenin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi

Şekil 4.35 de porozitenin eşik değer aralığına göre değişimi sunulmuştur. Porozite deki değişimin hacimdeki değişim miktarına paralel olduğu görülmektedir. Model hacim değişimine benzer şekilde porozitede eşik değer aralığı değişiminden önemli ölçüde etkilenmiştir.

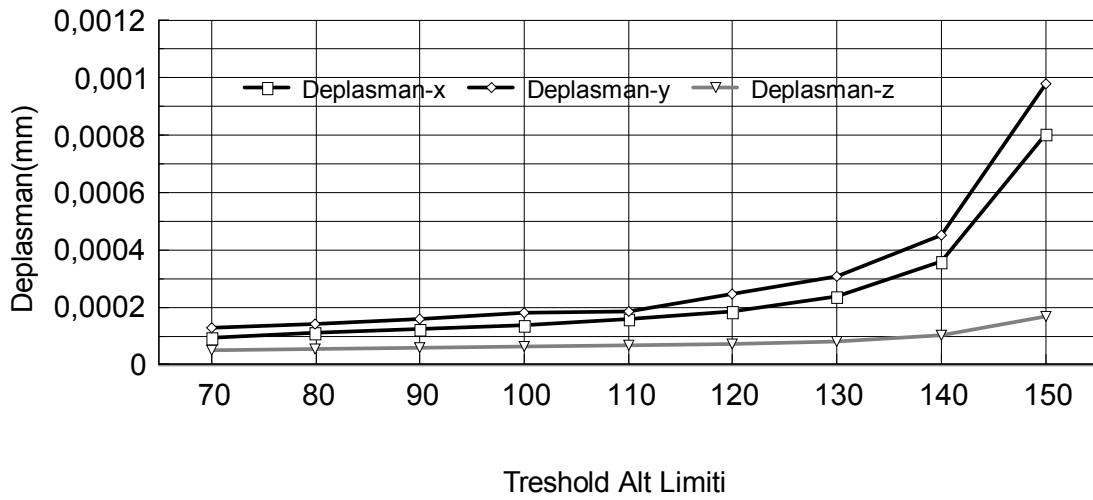
4.2.6 Mercan Numunesine Ait Sonlu Eleman Modeli Üzerinde Yapılan Eksenel Yükleme Deneyi

Bu bölümde farklı eşik değerleri için elde edilen mercan numunesine ait sonlu eleman modeli üzerinde ABAQUS® programında eksenel yükleme deneyi yapılacaktır. Model her üç yön için ayrı ayrı modellenmiştir. Modeller tek tarafından ankastre mesnetlenmiş ve diğer taraftan 1 newtonluk tek eksenli yüklemeye maruz kalacak biçimde Şekil 4.36 daki gibi yüklenmiştir. Uygun mesnetlenmenin sağlanabilmesi için cismin mesnetlenecek bölgesinin en altındaki tüm noktalar mesnetlenmiştir. Yük gelecek bölge ise aynı hizadaki tüm noktaların aynı şekilde ötelenmesi için tüm noktalar birbirine bağlanmış olup yükün etki noktası ayrıca sadece düşey yüklemeye müsaade edecek şekilde mesnetlenmiştir. Bu sayede rijitleştirilen bölgenin sadece ötelenme yapmasına müsaade edilmiş olup bölgede herhangi bir rotasyon oluşmamaktadır. Her üç doğrultuya ait yapılan analiz geometrileri Şekil 4.36 da sunulmuştur.



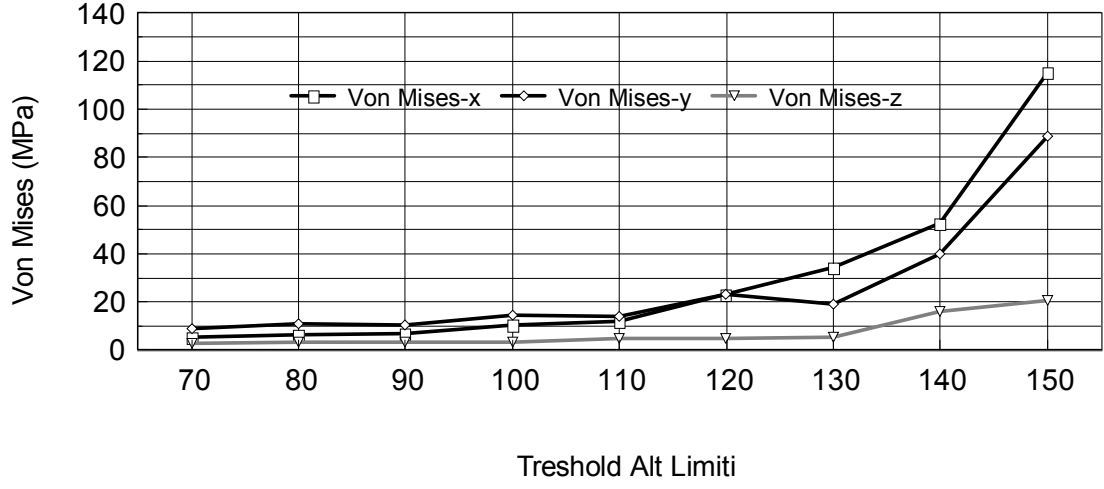
Şekil 4.36 Mercan Numunelerinin Mesnetlenme Durumları

Üç doğrultuda da çıkan gerilmelerin numunenin elastik sınırlar dışında davranmasına sebep olmayacak değerlerde yapılan yükleme sonrası her üç yön için eşik değer aralığı değişimine göre elde edilen deplasmanlar Şekil 4.37 de ki gibi elde edilmiştir. Küçük yüklemeler kullanılarak cismin elastik sınırları içinde yapılan yükleme sonuçları göstermiştir ki heterojen ve poroz yapıya sahip cisim her üç doğrultuda da farklı deplasmanlar yapmıştır. Ayrıca eşik değer aralığı değişimiyle mercan kolunun doğrultusu olan z eksenindeki deplasmanlar çok az artmışken, x ve y ekseninde ki deplasmanlar çok daha fazla artmıştır. Özellikle eşik değer alt limitinin 110 olduğu değerden sonra x ve y ekseninde ki deplasmanlar büyük istikrarsızlık göstermektedir.

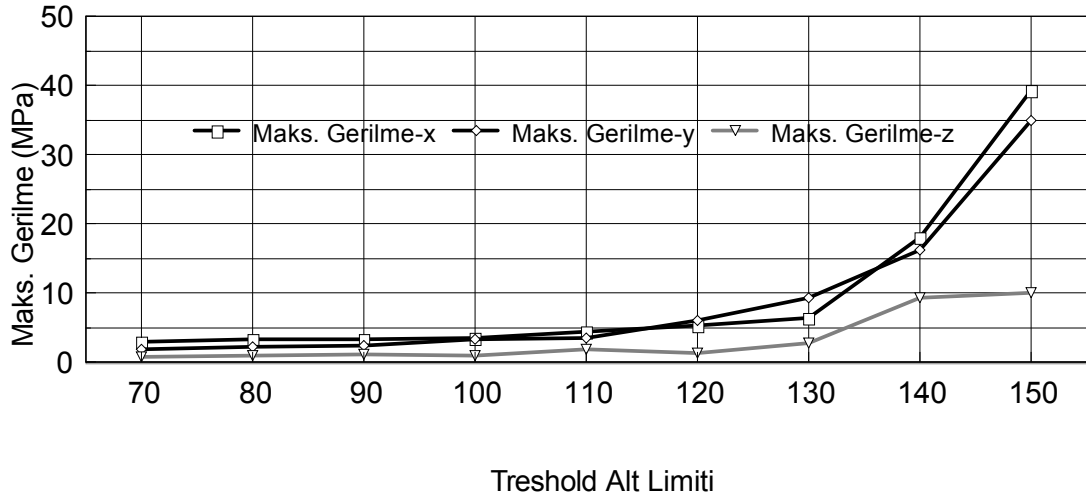


Şekil 4.37 Yönlere Bağlı Deplasmanın Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi

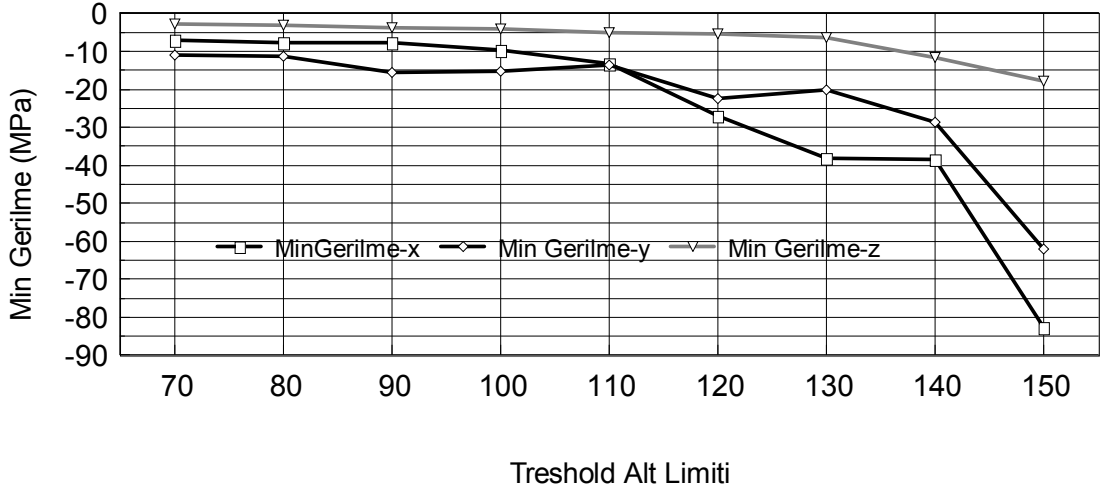
Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40 de sırasıyla X, Y ve Z yönlerinde ki Von Mises, maks. ve min. gerilme değerinin eşik değer aralığına göre değişimi gösterilmiştir. Eşik değer aralığının artmasıyla cisimde oluşan gerilme değeri artmaktadır. Eşik değer alt limitinin 110 dan büyük değerleri için deplasmanlarda ki değişime benzer şekilde büyük değişiklikler göstermektedir. Tüm gerilme türleri için mercan eksenine olan z eksenine doğrultusunda x ve y eksenine göre daha düşük gerilmeler meydana gelmiştir. Mercan eksenine dik doğrultuları gösteren ve yaklaşık silindirik simetriye uygun olan x ve y doğrultularındaki gerilmeler ise z eksenindeki gerilmelerden oldukça farklı olarak ve birbirlerine göreceli olarak yakın değerler almışlardır.



Şekil 4.38 Yönlere Bağlı Von Mises Gerilme Değerinin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi



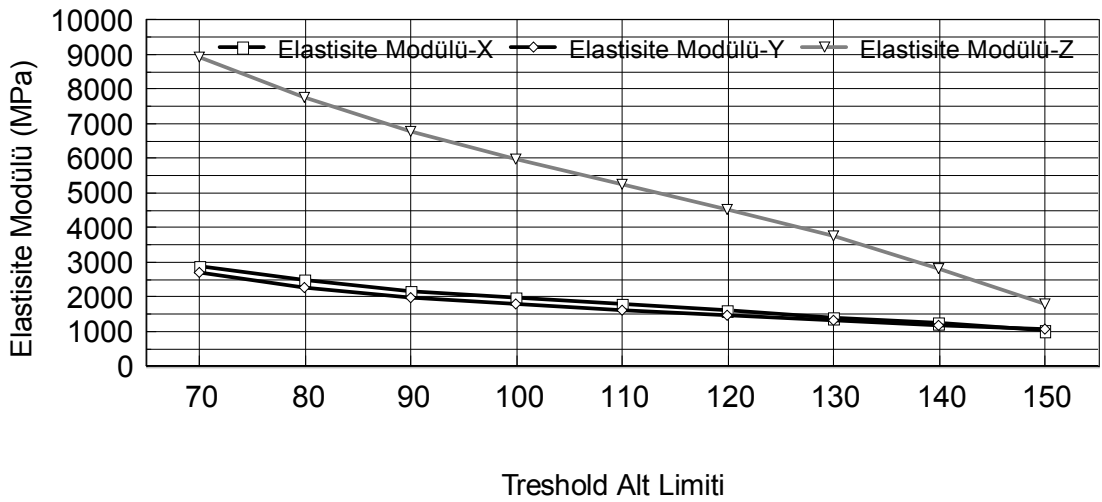
Şekil 4.39 Yönlere Bağlı Maks. Gerilme Değerinin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi



Şekil 4.40 Yönlere Bağlı Min Gerilme Değerinin Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi

4.2.7 Simülasyon Sonuçlarına Bağlı Olarak Homojenizasyon Yöntemi İle Görünür Elastisite Modülünün Tayini

Şekil 4.41 de yönlere bağlı elastisite modülünün farklı olabileceği ihtimali üzerinde durularak daha önce sabit elastisite modülü alınarak elde edilen deplasman değerlerine, poroz malzemeye aynı dış geometriye sahip oluşturulan homojen modelin aynı deplasman miktarını verene kadar elastisite modülü değiştirilerek analiz yapılmıştır. Aynı deplasman miktarına ulaşıncaya elastisite modülü değeri kaydedilmiştir.



Şekil 4.41 Yönlere Bağlı Görünür Elastisite Modülünün Eşik Değer Aralığına Göre Değişimi

Şekil 4.41 dikkatle incelendiğinde mercanın elastisite modülünün yönlere bağlı olarak birbirinden farklı çıktığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında kompleks geometriye sahip malzemelerin mekanik özellikleri görüntü işlem destekli sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir.

Analizleri yapılan beton ve mercan numunelerinin görüntü verileri BT ve Mikro-BT taramaları sonucu elde edilmiştir. Elde edilen görüntü verilerinden tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak 3B voksel tabanlı sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller ABAQUS® programı yardımıyla analiz edilmiştir.

Beton numunesi, hava boşluğu, agrega ve iri agreganın dahil edilmediği beton harcı birleşiminden oluşan parçalar olarak modellenmiştir. Oluşturulan 3B sonlu eleman modeli ile gerçek modele üç nokta deneyi yapılmıştır. 3B sonlu eleman modeli üzerinde yapılan deney sonucu gerçek numuneye benzer şekilde çıkmıştır. Kırılma gerçek numunede olduğu gibi iri agreganın dahil edilmediği beton harcı birleşiminde meydana gelmiştir. Kırılma süreleri ve en büyük deplasman değerleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır.

Mercan numunesi için eşik değer aralığı değişimine bağlı olarak ABAQUS® programında geometrik analiz ve eksenel yükleme deneyi yapılmıştır. Yapılan geometrik analizler ile eşik değer aralığının azalmasıyla model hacminde azalma meydana gelmiştir. Modelin yüzey alanı da eşik değer aralığının azalmasıyla düşmüştür. Model hacminin azalmasıyla, modelin yüzey alanının azalma miktarlarının birbirinden farklı olduğu görülmüş ve eşik değer aralığının azalmasıyla yüzey detaylarının hacme göre daha iyi korunduğu sonucu çıkarılmıştır. Modelin porozite oranı da eşik değer aralığının azalmasıyla artmıştır.

Mercan numunesi için yapılan eksenel yükleme deneyi her üç yönde de eşik değer aralığı değişimine bağlı olarak elde edilmiştir. Yapılan deplasmanlarda özellikle eşik değer aralığının azalmasına bağlı olarak büyük değer değişiklikleri ortaya çıkmıştır. Özellikle eşik değer alt limitinin 110 ve daha büyük olduğu değerler için mercan eksenine dik doğrultulardaki deplasmanlar büyük değişiklik göstermiştir. Ayrıca eşik değer aralığı değişimine bağlı olarak modelde oluşan gerilme değerleri elde edilmiştir. Gerilme değerleri de deplasmanlara benzer şekilde mercan eksenine dik doğrultularda daha büyük çıkmıştır.

Mercan numunesinin yönlere bağlı elastisite modüllerinin farklı olabileceği düşünülerek sabit elastisite modülü değerleri altında elde edilen deplasman değerleri göz önüne alınarak, poroz malzemeye aynı dış geometriye sahip oluşturulan homojen modele poroz malzemeye aynı deplasman değerini verene kadar elastisite modülü değiştirilerek analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda yönlere bağlı olarak elastisite modülü değerlerinin birbirinden farklı çıktığı

gösterilmiştir. Ayrıca mercan eksenı doğrultusunda elastisite modülü değışiminin diğerk doğrultulara göre daha fazla olduğu ortaya çıkarılmıştır.

KAYNAKLAR

1. ABAQUS® Analysis User's Manual
2. Altintas G. "Effect of slice thickness variation on free vibration properties of micro-ct based trabecular bone models", 2nd International Symposium on Computing in Science & Engineering, June 1-4 (2011) Kuşadası – TURKEY.
3. 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).
4. Baxes, A.G. "Digital image processing principles and applications", John Wiley and Sons, Inc., USA (1994).
5. Castelman, R.K. "Digital image processing", prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA (1996).
6. 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 nano indentation", *J. Biomech.*, **40**, pp. 3333-3340 (2007).
7. Çayırılı M. "Yanma olayının modellenmesi ve görüntü işleme yoluyla yanma performansının optimizasyonu", Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi , Isparta (2006).
8. Edizer E. Sayısal Görüntü İşleme Yöntemi ile Tane Boyut Dağılımı Analizi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, 235s, Adana (2006).
9. Gray, R.M. and Neuhoof, D.L. "Quantization" in *IEEE Transactions On Information Theory*, 44,6 (1998)
10. Genant, H.K. and Jiang, Y. "Advanced imaging assessment of bone quality", *Annals New York Academy of Sciences*, 1068, pp. 410–428 (2006).
11. 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).
12. Gonzalez, R.C. ve Woods, R.E., "Digital Image Processing SE", Prentice-Hall, International Inc., Upper Saddle River, New Jersey (2002)
13. Gonzalez, R.C. ve Woods, R.E., "Digital Image Processing", 3rd edition, Pearson Educational International, Prentice Hall (2007).

14. Göçeri E. Vivual C# 2005 Kullanılarak Çok Boyutlu Görüntüler için Jpeg 2000 Standardını Destekleyen Görüntü işleme Uygulaması, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66, Denizli (2006).
15. 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).
16. Haralick, R.M. and Shapiro, L.G. "Computer and robot vision" Addison Wesley Publishing Co., USA (1993).
17. Ho, S.T. and Hutmacher, D.W. "A comparison of micro ct with other techniques used in the characterization of scaffolds". *Biomaterials* 27: 1362–1376 (2006).
18. 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).
19. Landis, E, Nagy, E, Keane, D "Microstructure and Fracture in three dimensions", *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 70, pp 911-925 (2003).
20. Martz, H. E., Scheberk, D. J., Roberson, G. P., Monteiro, P.J.M., "Computerized Tomography Analysis of Reinforced Concrete", *Materials Journal of the American Concrete Institute*. Volume 90, Issue 3, pp. 259-264 (1993).
21. Morgan, I.L., Ellinger, H., Klinksiek, R., Thompson, J. N., "Examination of concrete by computerized tomography", *Journal of the American Concrete Institute*. Volume 77, Issue 1, pp. 23-27(1980).
22. 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).
23. Renault, A., Jaouen, L. and Sgard, F. "Characterization of elastic parameters of a coustical porous materials from beam bending vibrations". *Journal of Sound and Vibration* 330: 1950–1963 (2011).
24. Saxena, S. and Ramakrishnan, N. "A comparison of micro, meso and macroscale fem analysis of ductile fracture in a CT specimen (Mode I)". *Computational Materials Science* 39: 1–7 (2007).
25. Soenke H.B., Wolfram S., Wolfhard S. and Fabian K. "Small animal computed tomography imaging", *Current Medical Imaging Reviews*, **3**, pp. 45-59 (2007).
26. Topal, A. , "Agregaların geometrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yeni görüntü analiz yöntemleri geliştirilmesi" Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, (2008).

27. Yaman, K., "Görüntü İşleme Yönteminin Ankara Hızlı Raylı Ulaşım Sistemi Güzergahında Sefer Aralıklarının Optimizasyonuna Yönelik Olarak İncelenmesi". Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2011).
28. Yaman, K., Sarucan, A., Atak, M., Aktürk, N., "Dinamik çizelgeleme için görüntü işleme ve arıma modelleri yardımıyla veri hazırlama". Gazi Üniv. Mim. Fak. Der. 16(1): 19–40 (2001).
29. Yılmaz, A., "Kamera kullanılarak görüntü işleme yoluyla gerçek zamanlı güvenlik uygulaması," Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 102, İstanbul, (2007).
30. Zhang, T., "Identification of Structural Changes from Volumetric Image Sequence", Ph.D. thesis, Rensselaer Polytechnic Institute (2004).
31. Zhang, Y., Bajaj, C. and Sohn, B. "3D finite element meshing from imaging data", *Comput. Method Appl. M.*, **194**, pp. 5083–5106 (2005).
32. 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).

EKLER

Ek-1

Çizelge E.1 Modelin Temel Geometrik Özellikleri ve Sonlu Eleman Özellikleri

Faz	Hacim (mm ³)	Hacimsel Oran	Yüzey Alanı (mm ²)	H.O/Y.A .O	Toplam Nokta Sayısı	Sonlu Eleman Sayısı
su+kum+çimento	1,61E+05	66,60%	8,89E+04	180,99%	1331153	1140471
agrega	7,68E+04	31,79%	6,69+04	114,80%	619782	453954
boşluk	3,90E+03	1,61%	8,54E+03	45,64%		
toplam	2,42E+05					

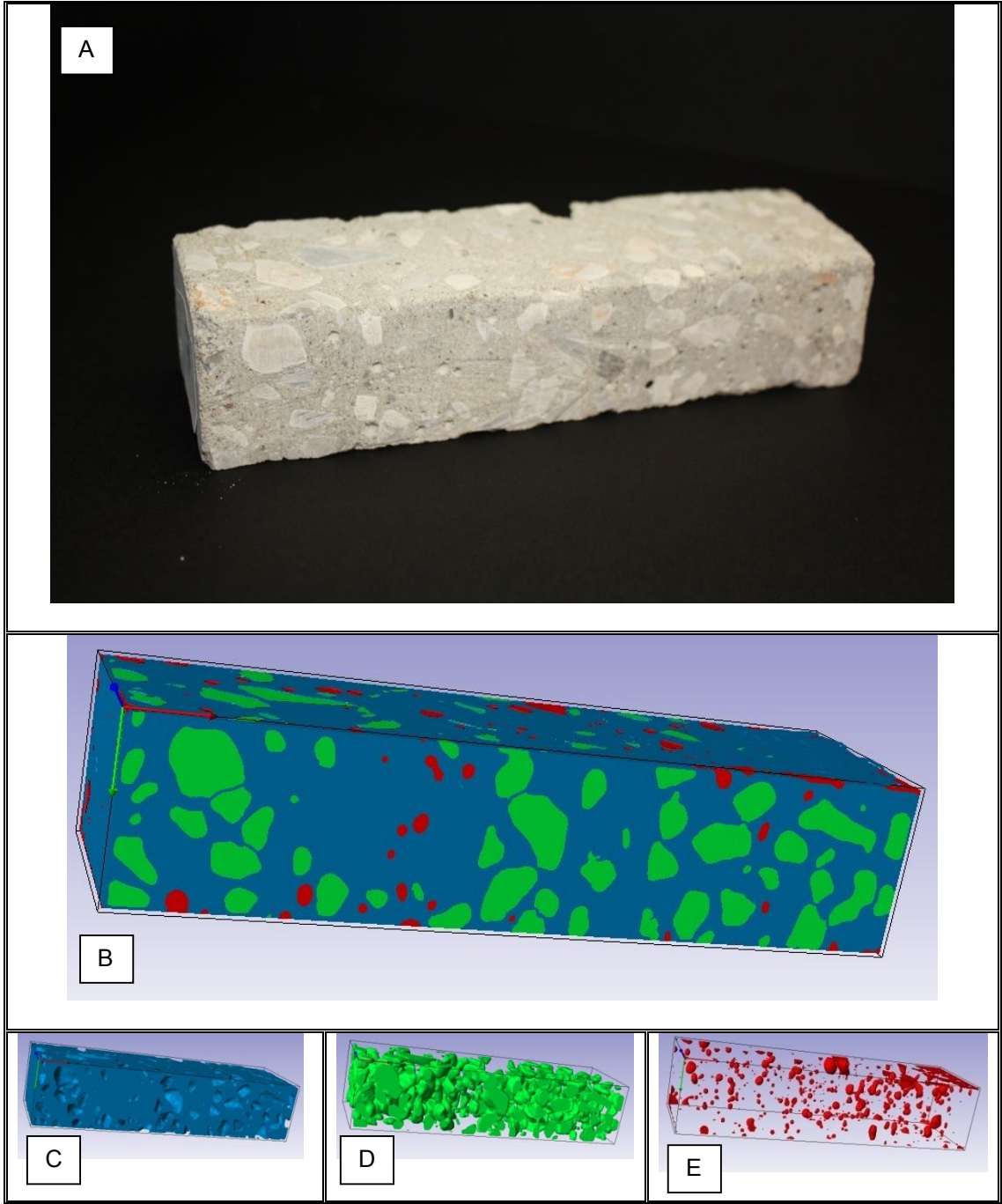
Çizelge E.2 Malzeme Özellikleri

Malzeme Özelliği	Agrega	İri agreganındahil edilmediği beton harcıKarışımı
Elastisite Modülü (N/mm ²)	28,6e4	28,6e3
Poisson Oranı	0,15	0,15
Birim Hacim Ağırlık(ton/mm ³)	2,4e-9	2,7e-9

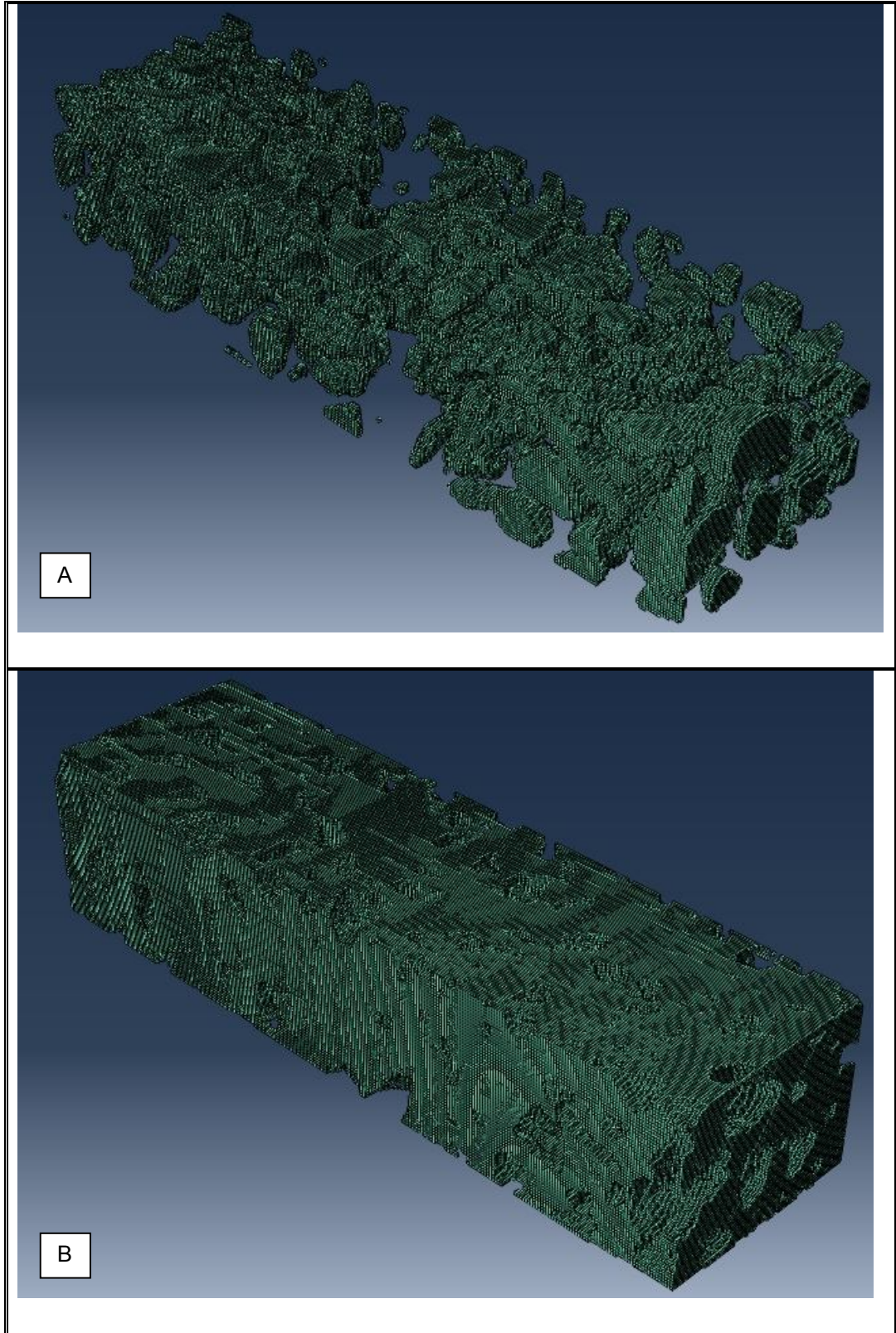
Ek-2



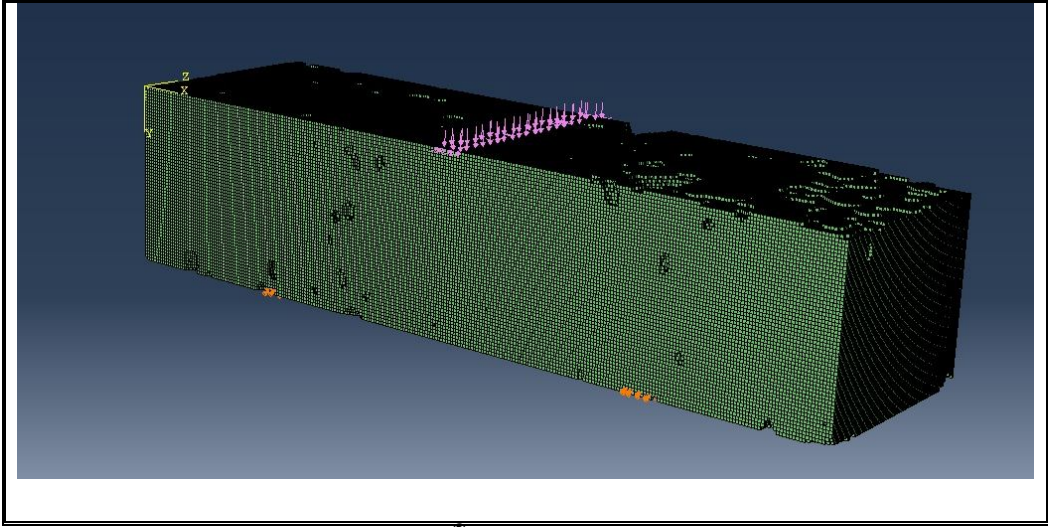
Şekil E.1 Beton Numune-2, üç nokta Deney Düzeneği



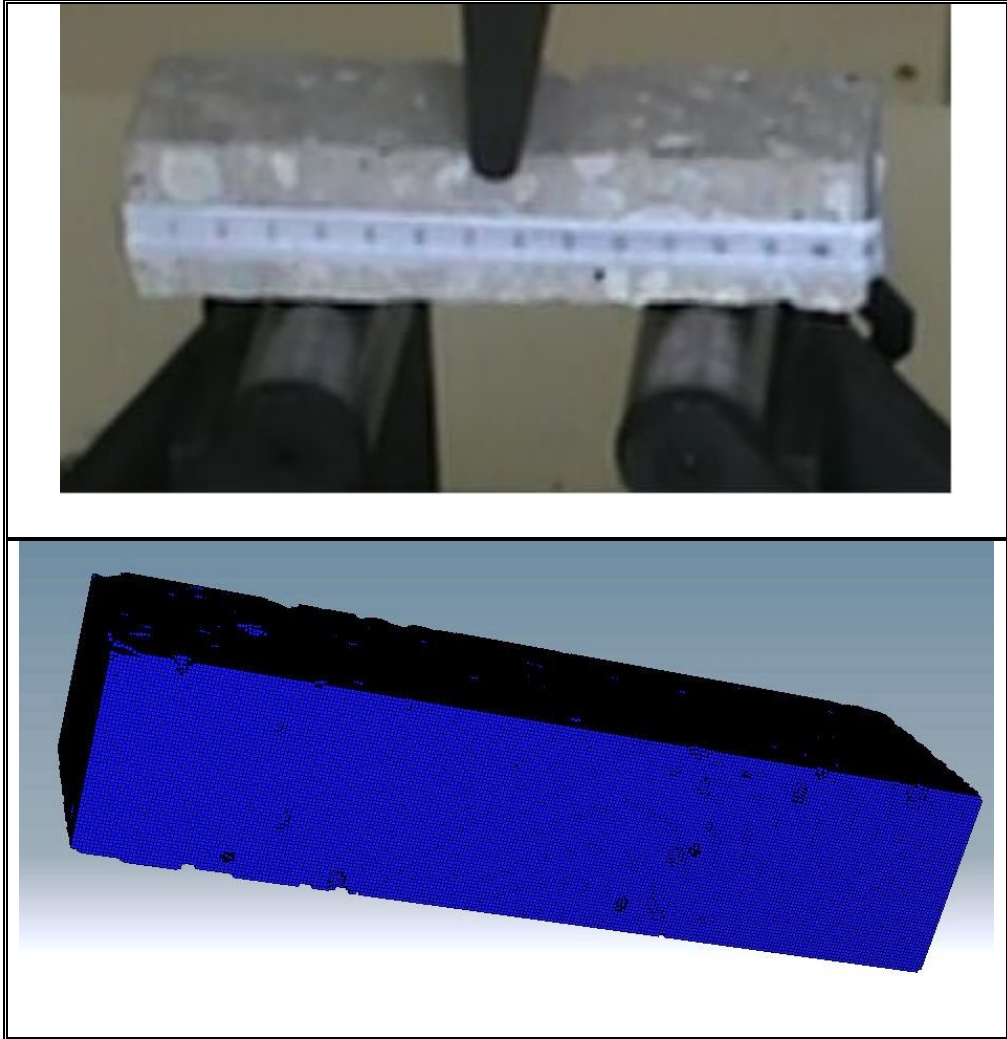
Şekil E.2 Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Elde Edilen 3B Katı Model (Numune-2)



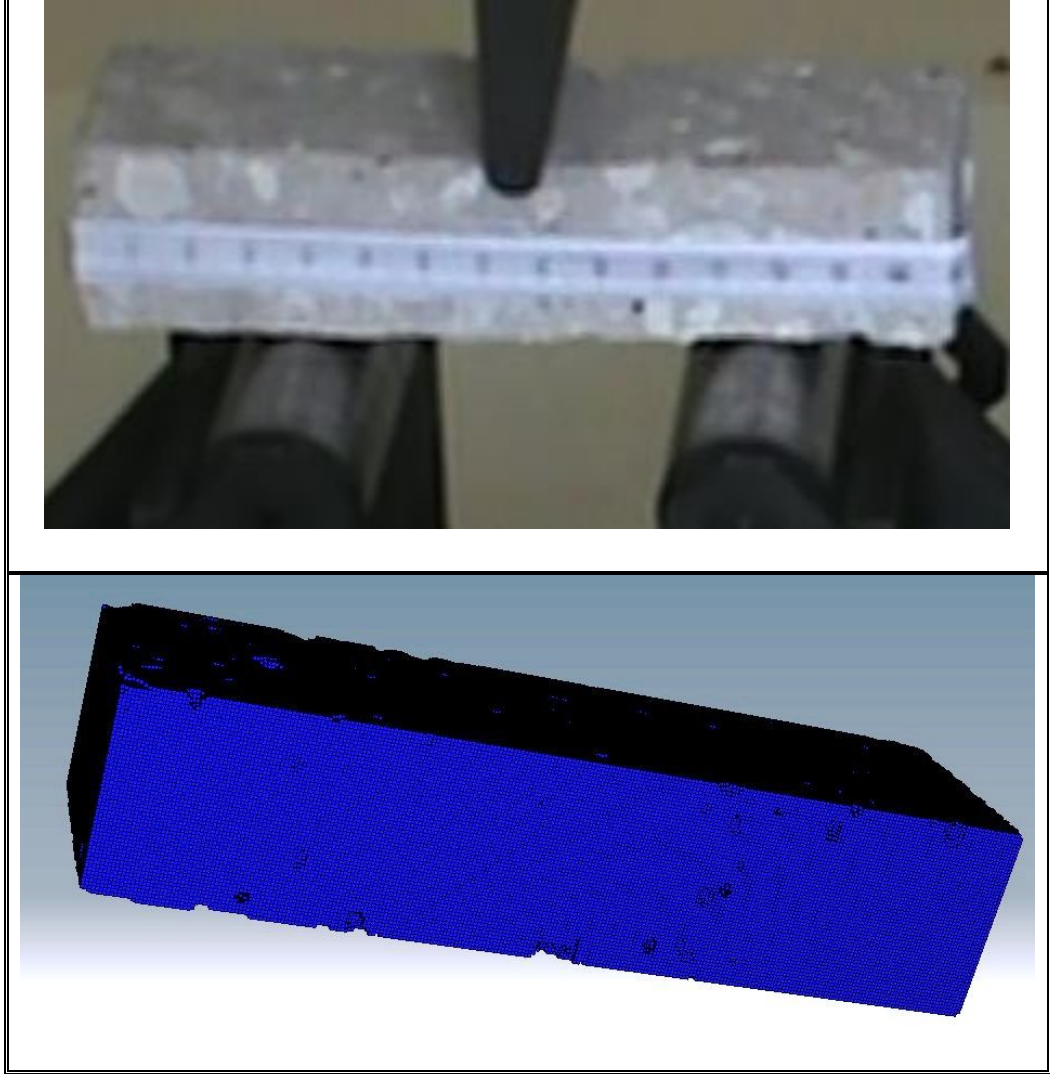
Şekil E.3 Sonlu Eleman Ağı Geçirilmiş Modeller



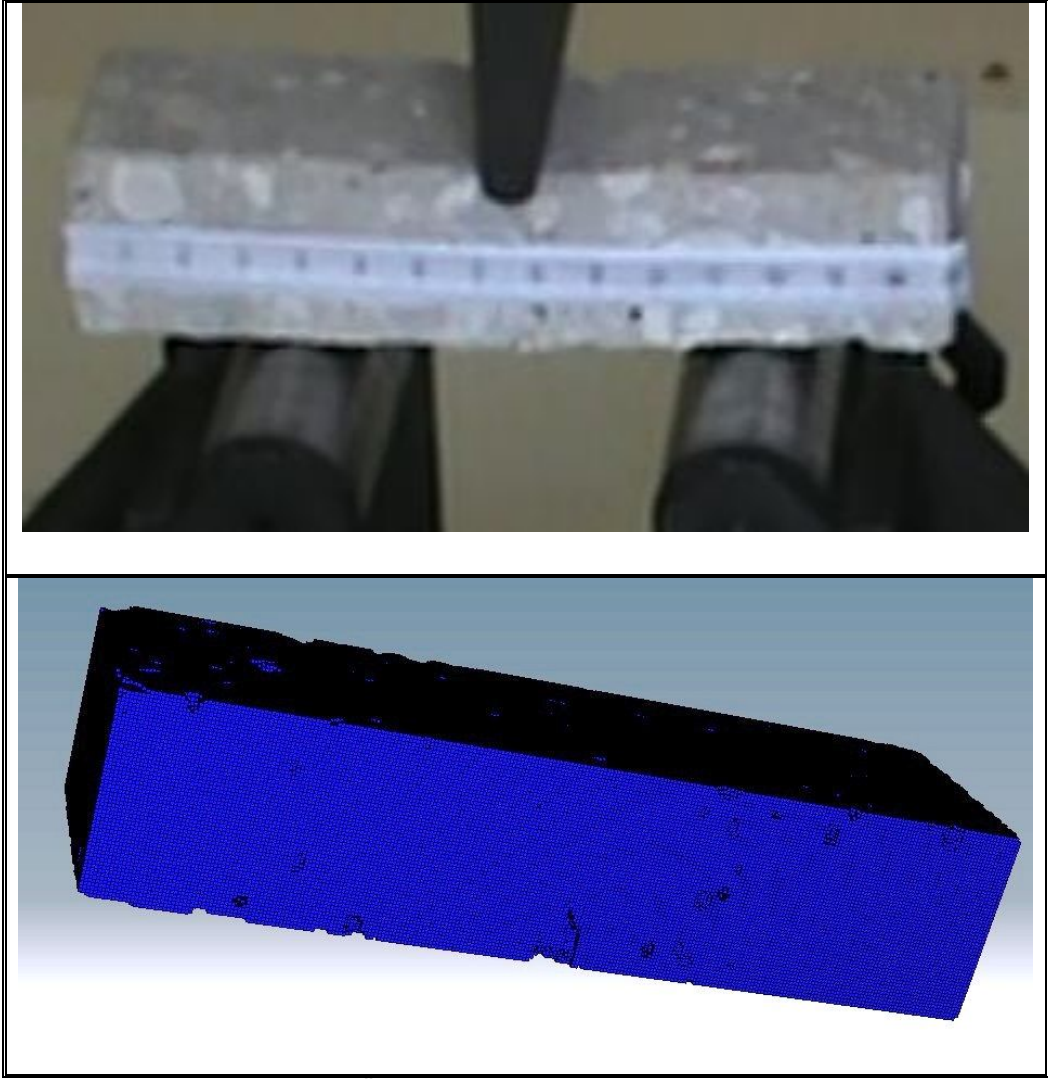
Şekil E.4 Solid Modelin ABAQUS® Programında Yükleneşi ve Mesnetlenmesi



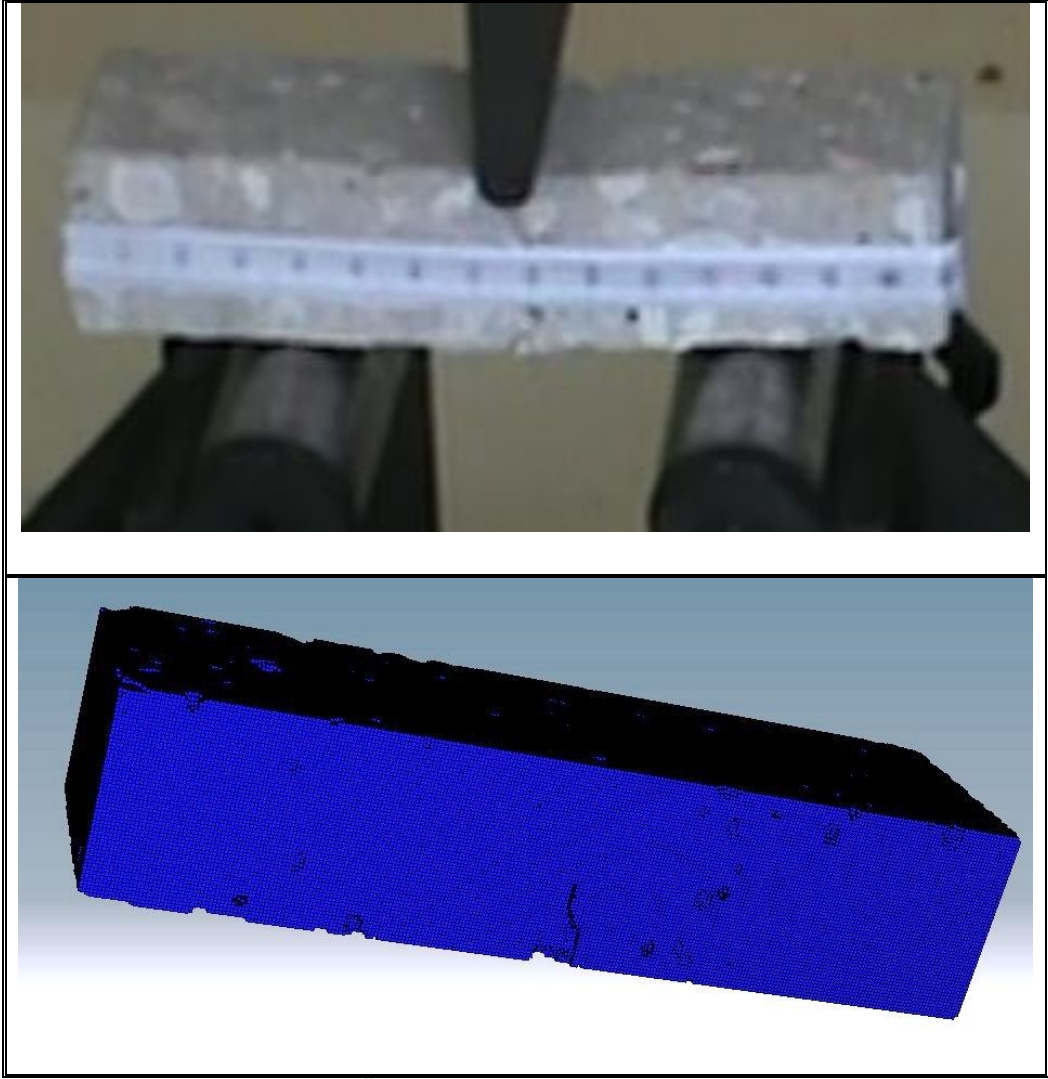
Şekil E.5 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=0)



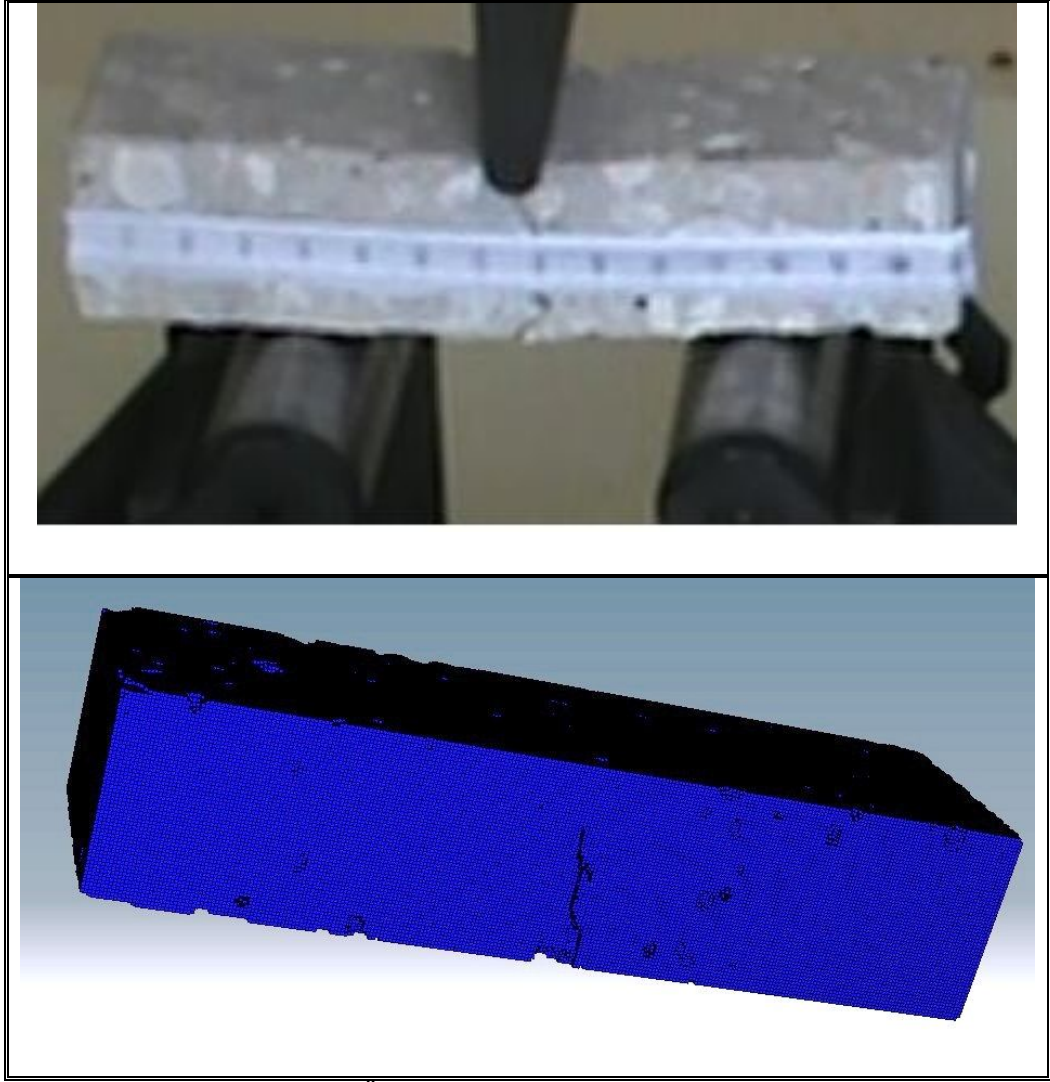
Şekil E.6 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=5,25sn)



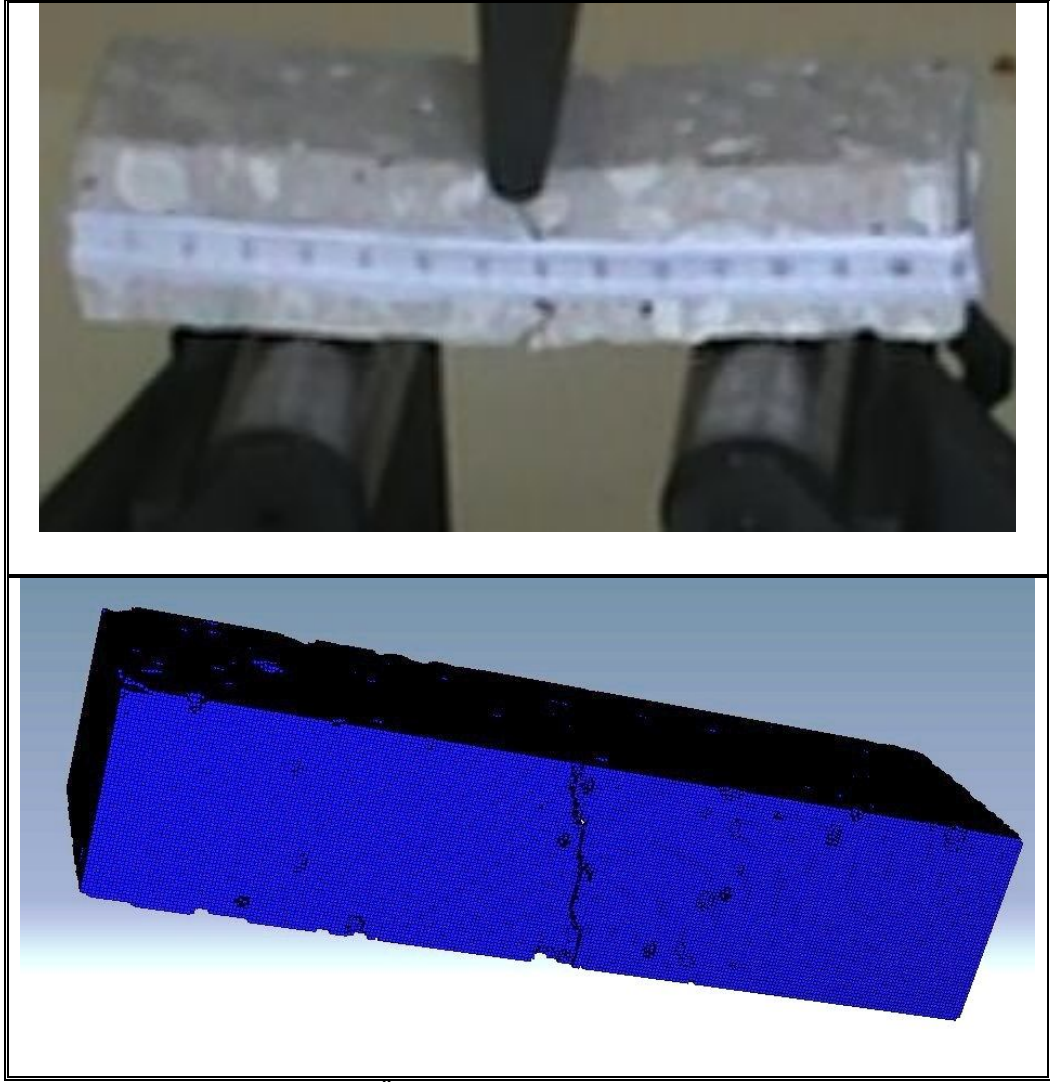
Şekil E.7 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=10,5sn)



Şekil E.8 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=15,9sn)



Şekil E.9 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=22,1sn)



Şekil E.10 Üç Nokta Deney Sonuçları (T=26sn)

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler :**

Adı : Abdülkerim
Soyadı : ERGÜT
Doğum tarihi ve yeri : 1982- Zara/SİVAS
Medeni durumu : Evli
Email : abdulkerim@ergut.com

Eğitim Bilgileri :

Ortaöğretim : Kongre Lisesi (2000)- Sivas
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (2004)- İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi (2008)- Fen Bilimleri Enstitüsü (Yapı)

İşyeri Bilgileri :

Beğen İnşaat : Saha Mühendisi (2004)
Taş Yapı İnşaat : Şantiye Mühendisi (2005)
C.B.Ü. Fen Bil.Ens. : Araştırma Görevlisi (2005-2008)
C.B.Ü. Müh. Fak. : Araştırma Görevlisi (2009-Devam)