T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BETONARME AYAKLI SU DEPOLARININ ÇEŞİTLİ ETKİLEŞİMLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİNİN OLUŞTURULACAK BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Doktora Tezi

Olgun KÖKSAL

Danışman

Prof. Dr. Zeki KARACA

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı tarafından 1649B031702008 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Olgun KÖKSAL tarafından, **Prof. Dr. Zeki KARACA** danışmanlığında hazırlanan **"BETONARME AYAKLI SU DEPOLARININ ÇEŞİTLİ ETKİLEŞİMLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİNİN OLUŞTURULACAK BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 19.6.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı **Üniversitesi** **Ana Bilim/Ana Sanat Dalı**	**Sonuç**
Başkan	Prof. Dr. Erdal KILIÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Zeki KARACA Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Sertaç TUHTA Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Erdem TÜRKELİ Ordu Üniversitesi Teknik Bilimler MYO İnşaat Böl.	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Furkan GÜNDAY Giresun Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

29 /05/ 2023
Olgun KÖKSAL

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: BETONARME AYAKLI SU DEPOLARININ ÇEŞİTLİ ETKİLEŞİMLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİNİN OLUŞTURULACAK BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 29.05.2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 8

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

29 /05/ 2023
Prof.Dr. Zeki KARACA

ÖZET

BETONARME AYAKLI SU DEPOLARININ ÇEŞİTLİ ETKİLEŞİMLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİNİN OLUŞTURULACAK BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Olgun KÖKSAL
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doktora, Haziran/2023
Danışman: Prof. Dr. Zeki KARACA

Betonarme ayaklı su depoları, su dağıtım şebekesindeki basıncın yetersiz olduğu bölgelerde suyun depolanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, deprem yer hareketi etkisindeki betonarme ayaklı su deposunun, çeşitli sıvı-yapı etkileşim sistemleri dikkate alınarak dinamik davranışı inceleyen bir yazılım geliştirmektir. Sıvı-yapı etkileşiminin modellemesi sırasında sıvının modellenmesinde Westergaard yaklaşımı ve Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (DPH) yaklaşımı kullanılmıştır. DPH yöntemi ile depo içerisindeki sıvının doğrusal olmayan modellenmesi yapılmıştır. Deponun yarı ve tam dolu olması durumu için zamana bağlı hidrodinamik basınçlar bu yöntem ile elde edilmiştir. Elde edilen hidrodinamik basınçlar duvarın iç kısmına dış kuvvet olarak uygulanmıştır. Westergaard yaklaşımında da yarı ve tam dolu durum için depo duvarlarına kütle eklemesi yapılmıştır. MATLAB programlama dili ile geliştirilen yazılım sayesinde, deponun taşıyıcı sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemini esas alan MATLAB PDE araç kutusu kullanılarak modellenmiştir. Matematik modellerin zamana bağlı çözümlerini gerçekleştirebilmek için dinamik yoğunlaştırma yapılmıştır. Hareket denklemi durum-uzay biçiminde düzenlenmiştir. Kısmi diferansiyel denklemlerin zamana bağlı çözümleri Runge-Kutta yöntemine dayanan ODE45 fonksiyonları yardımıyla çözülmüştür. Hem geliştirilen yazılımın doğrulaması hem de sonlu elemanların modelinin doğrulaması yapılmıştır. Westergaard yaklaşımı ve DPH yöntemi kullanılarak, deponun boş, yarı dolu ve tam dolu durumu düşünülerek toplam on model için zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında deprem yer hareketi etkisindeki betonarme ayaklı su depolarının zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri geliştirilen yazılım ile kişisel bilgisayarlarda kısa sürelerde gerçekleştirilmiştir. Sıvı-yapı etkileşim sisteminin ve doğrusal olmayan analizin gerçek davranışa uygun seçilmesi durumunda, yer değiştirmelerin, şekil değiştirmelerin ve gerilmelerin daha gerçekçi olarak belirlendiği ve çok daha azaldığı görülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Doğrusal olmayan salınım, Düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği, Ayaklı su deposu, Sonlu elemanlar yöntemi, Zaman tanım alanında analiz

ABSTRACT

NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE ELEVATED WATER TANKS UNDER VARIOUS INTERACTIONS WITH COMPUTER SOFTWARE TO BE CREATED

Olgun KÖKSAL
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering
Ph.D., June/2023
Supervisor: Prof. Dr. Zeki KARACA

Reinforced concrete elevated water tanks are used to store water in areas where the pressure in the water distribution network is insufficient. The main objective of this study is to develop a software to study the dynamic behavior of a reinforced concrete elevated water tank under earthquake ground motion considering various fluid-structure interaction systems. During the modeling of the fluid-structure interaction, the Westergaard approach and the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) approach are used to model the fluid. Nonlinear modeling of the liquid in the tank was performed with the SPH method. The time dependent hydrodynamic pressures for half and full tanks were obtained with this method. The obtained hydrodynamic pressures were applied to the inside of the wall as an external force. In the Westergaard approach, mass is added to the tank walls for the half and full cases. With the software developed in MATLAB programming language, the structural system of the tank was modeled using the MATLAB PDE toolbox based on the Finite Element method. Dynamic condensation was performed to realize the time-dependent solutions of the mathematical models. The equation of motion is organized in state-space form and the time-dependent solutions of the partial differential equations are solved using ODE45 functions based on the Runge-Kutta method. Both the validation of the developed software and the validation of the finite element model were performed. Using the Westergaard approach and SPH method, linear and nonlinear analyses were performed in time domain for a total of ten models considering empty, semi-filled and fully filled conditions of the warehouse and the analysis results were compared.

As a result, in this thesis, the linear and nonlinear analyses of reinforced concrete water tanks in time domain under earthquake ground motions were performed in a short time on personal computers with the software developed. It is seen that if the fluid-structure interaction system and the nonlinear analysis are selected in accordance with the actual behavior, the displacements, deformations and stresses are determined more realistically and are much reduced.

Keywords: Nonlinear sloshing, Smoothed particle hydrodynamics method, Elevated water tank, Finite element method, Time history analysis

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tezin çalışma konusunu bana öneren ve tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zeki KARACA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Emekli olması nedeniyle tez izleme komitesi üyeliğinden ayrılan ve tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. A. Azer KASIMZADE'ye çok teşekkür ediyorum.

Tez komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Erdal KILIÇ'a ve Sayın Doç. Dr. Sertaç TUHTA'ya katkı ve emekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavında görev alan Sayın Doç. Dr. Erdem TÜRKELİ'ye ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Furkan GÜNDAY'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmam sırasında TÜBİTAK BİDEB 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmem nedeniyle BİDEB yöneticilerine teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM), 4015592023 numaralı desteğiyle sağlanmıştır. Bu nedenle İTÜ UheM yöneticilerine sunmuş oldukları imkân için teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana gösterdikleri ilgi, destek ve anlayışları için aileme sonsuz teşekkür ederim. Bu çalışmanın bundan sonra yapılacak çalışmalara yardımcı olmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Olgun KÖKSAL

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **i**
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI ..... **ii**
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI ..... **ii**
ÖZET ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **ix**
1. GİRİŞ **23**
1.1. Sıvı Depoları 23
1.1.1. Ayaklı Su Depoları 24
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı 27
1.3. Literatür Araştırması 28
2. SIVI-YAPI ETKİLEŞİM SİSTEMLERİ **35**
2.1. Ayaklı Su Depoları İçin Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin İncelenmesi 35
2.1.1. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinde Analitik Yaklaşımlar 37
2.1.2. Sayısal Yöntemlerle Kullanılan Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemleri 41
2.2. Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (DPH) Yöntemi ile Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin İncelenmesi 46
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ **50**
3.1. Dört Yüzlü (Tetrahedral) Sonlu Eleman 50
4. SİSMİK ANALİZ YÖNTEMLERİ **55**
4.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz 55
4.1.1. Sönümlü Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Sistemlerin Denklemlerinin Kurulması 55
4.1.2. Runge-Kutta Yöntemi 55
4.1.3. Sönümlü Çok Serbestlik Dereceli Doğrusal Sistemlerin Denklemlerinin Kurulması 58
4.1.4. Sönüm Matrisinin Kurulması 59
4.2. Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi 60
4.2.1. Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi ile Hareket Denkleminin Yazılması 61
4.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz 62
4.4. Doğrusal Olmayan Analiz İçin Bouc-Wen Histeretik Modeli 64
4.4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Bouc-Wen Histeretik Modelinin Kullanılması 67
4.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde Bouc-Wen Histeretik Modelinin Kullanılması 67
5. MATLAB KISMİ DİFERANSİYEL DENKLEM ARAÇ KUTUSU **69**
5.1. Doğrusal Elastisite Denklemleri 70
5.2. Üç Boyutlu Doğrusal Elastisite Denklemleri 71
6. MATERYAL VE YÖNTEM **73**
6.1. Çalışma Kapsamında Oluşturulan Modeller ve Uygulamalar 73
6.1.1. Yer Hareketi Bilgileri 74
6.1.2. Betonarme Ayaklı Su Deposunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi 75

6.2. Yazılım ve Model Doğrulama 76
6.2.1. Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Sistem İçin Doğrulama 76
6.2.2. Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Olmayan Sistem İçin Doğrulama 78
6.2.3. Sonlu Eleman Modeli İçin Doğrulama 81
6.2.4. Analizlerde Kullanılan Modeller 82
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 250
7.1. Westergaard Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Sonuçları 250
7.2. DPH Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizlerin Sonuçları 253
7.3. Westergaard Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizlerin Sonuçları 256
7.4. DPH Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizlerin Sonuçları 259
7.5. Zaman Tanım Alanında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması 262
7.6. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerine Göre Karşılaştırmalar 265
7.6.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizler 265
7.6.2. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizler 268
7.7. Taşıyıcı Sistem Davranışına Göre Karşılaştırmalar 271
7.7.1. Westergaard Yaklaşımının Dikkate Alındığı Analizler 271
7.7.2. DPH Yaklaşımının Dikkate Alındığı Analizler 273
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 275
KAYNAKLAR 278
EKLER 283
EK-1 MATLAB PDE Araç Kutusu Akış Şeması 283
EK-2 Serbest Titreşim Analizi Program Kodları 284
EK-3 Zaman Taım Alanında Doğrusal Analiz Program Kodları(Boş Depo) 285
EK-4 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Program Kodları(Boş Depo) 291
EK-5 Zaman Taım Alanında Doğrusal Analiz Program Kodları(Yarım ve Tam Dolu Depo-Westergaard ve DPH Yaklaşımı) 297
EK-6 Zaman Taım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Program Kodları(Yarı ve Tam Dolu Depo-Westergaard ve DPH Yaklaşımı) 303
ÖZ GEÇMİŞ 309

SİMGELER VE KISALTMALAR

a_m : En büyük yer ivmesi

A_c : Dinamik matris

B_c : Giriş matrisi

$[B]$: Kinematik matris

$[C]$: Sönüm matrisi

$[D]$: Direkt transmisyon matrisi

$[d]$: Giriş etkisi matrisi

ε_x : x yönündeki şekil değiştirme

ε_y : y yönündeki şekil değiştirme

ε_z : z yönündeki şekil değiştirme

ε_v : Hacimsel şekil değiştirme

$f_{\oplus}$: Deprem kuvveti

$F(r)$: İntegrasyon fonksiyonu

γ_{xy} : xy yönündeki açısal şekil değiştirme

γ_{yz} : yz yönündeki açısal şekil değiştirme

γ_{zx} : zx yönündeki açısal şekil değiştirme

d_{maks} : Dalga yüksekliği

$[H]$: Yaklaşım vektörü

h : Su yüksekliği

$[K]$: Rijitlik matrisi

K_c : Yoğunlaştırılmış rijitlik matrisi

m : Kütle

m_i : İmpuls kütlesi

m_a : Depo ayak kütlesi

m_{bh} : Depo boş hazne kütlesi

m_c : Salınım kütlesi

m_s : Statik durumdaki su kütlesi

$[M]$: Kütle matrisi

$[M]^*$: Eklenmiş kütle matrisi

M_c : Yoğunlaştırılmış kütle matrisi

P : Su basıncı

$P_i(z)$: İmpuls etkisinden oluşan hidrodinamik basınç

$\{\overline{S}^{[m]}\}$	: İç kuvvet vektörü
T_c	: Dönüşüm matrisi
c	: Sönüm katsayısı
k	: Rijitlik katsayısı
ü	: Rölatif ivme
u̇	: Rölatif hız
u	: Rölatif yer değiştirme
$\{U_*\}$	: Yer değiştirme vektörü
F_e	: Kuvvet
ξ	: Sönüm oranı
ω_n	: Açısal frekans
Δt	: Zaman aralığı
α	: Rayleigh sönüm katsayısı
β	: Rayleigh sönüm katsayısı
t	: Zaman
ρ	: Suyun yoğunluğu
$\ddot{u}_g$	: Deprem yer hareketi ivmesi
W	: Ağırlık fonksiyonu
y	: Giriş vektörü
z	: Durum vektörü
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
DPH	: Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Depoların Sınıflandırılması (Doğangün, 1989) 23
Şekil 1.2. Ayaklı su deposunun (a) Çerçeve taşıyıcı sistemli ve (b) silindirik kabuk taşıyıcı sistemli tasarımlarına ait düşey kesitler (Livaoğlu, 2005) 24
Şekil 1.3. Karayolları 7.Bölge Müdürlüğü ayaklı su deposu (Atakum/SAMSUN) 24
Şekil 1.4. Dereköy mahallesi ayaklı su deposu (19 Mayıs/SAMSUN) 25
Şekil 1.5. 19 Mayıs Polis Meslek Yüksekokulu (Atakum/SAMSUN) 25
Şekil 1.6. DSİ 71.Şube Müdürlüğü ayaklı su deposu (Atakum/SAMSUN) 26
Şekil 1.7. Kavak Anadolu Lisesi yerleşkesi (Kavak/SAMSUN) 26
Şekil 1.8. 1960 Şili depreminde yıkılmış Puetro Varas oteline ait ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011) 31
Şekil 1.9. 1980 yılında El-Asnam depreminde yıkılmış ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011) 31
Şekil 1.10. 2003 İran Bam depreminde hasar almış ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011) 32
Şekil 1.11. 2007 yılında Peru depreminde hasar alan ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011) 32
Şekil 2.1. İdealize edilmiş tek serbestlik dereceli sistem (Cimellaro ve Marasco, 2018) 37
Şekil 2.2. Tek serbestlik dereceli ayaklı su depoları (a) betonarme silindirik kabuk taşıyıcı sistem (b) betonarme çerçeve taşıyıcı sistem (c) betonarme ya da çelik kafes çaprazlı çerçeve (d) yığma taşıyıcı sistem (e) tek serbestlik dereceli mekanik model (Livaoğlu ve Doğangün, 2006) 38
Şekil 2.3. Ayaklı su deposunun mekanik ve matematik modeli (Livaoğlu, 2005) 39
Şekil 2.4. Westergaard yaklaşımına göre duvar yüksekliği boyunca hidrodinamik basınç dağılımları (Yıldız, 2009) 42
Şekil 2.5. W(r) DPH Yöntemine ait Kernel fonksiyonu (Sampath vd., 2016) 47
Şekil 3.1. Tetrahedral sonlu elemanın geometrisi (Kasımzade, 2018) 51
Şekil 4.1. Deprem etkisindeki tek serbestlik dereceli sönümü sistem (Cimellaro ve Marasco, 2018) 55
Şekil 4.2. k_i katsayılarının tanımlanması ve ortalama eğimin belirlenmesi (Cimellaro ve Marasco, 2018) 57
Şekil 4.3. Çok serbestlik dereceli doğrusal sistem (Armouti, 2015) 58
Şekil 4.4. Doğal frekans ile modal sönüm oranlarının değişimi (a) kütle orantılı sönüm ve rijitlik orantılı sönüm (b) Rayleigh sönümü (Chopra, 2007) 59
Şekil 4.5. Elastoplastik kuvvet-yer değiştirme grafiği (Chopra, 2007) 62
Şekil 4.6. Elastik ve elastoplastik sistem (Chopra, 2007) 62
Şekil 4.7. Normalize edilmiş kuvvet- yer değiştirme ilişkisi (Chopra, 2007) 62
Şekil 4.8. Bouc-Wen modelin şeması (Kasımzade vd., 2019) 65
Şekil 4.9. Histeretik model (Kasımzade vd., 2019) 65
Şekil 4.10. Histeretik modelin temel geometrik oranları (Kasımzade vd., 2019) 66
Şekil 4.11. Yüksek başlangıç rijitlikli histeretik model (Kasımzade vd., 2019) 66
Şekil 4.12. Histeretik sönüm modeli (Kasımzade vd., 2019) 66

Şekil 4.13. Tek serbestlik dereceli sistem. 67
Şekil 4.14. Çok serbestlik dereceli sistem..... 68
Şekil 6.1. 1000m^3'lük betonarme ayaklı su deposunun düşey kesiti ve detayları (Livaoğlu, 2005)..... 73
Şekil 6.2. Kocaeli depremi(1999,YPT330) ivme grafiği (PEER, 2023)..... 74
Şekil 6.3. Betonarme ayaklı su deposunun (a) fotoğrafı, (b) matematik modeli ve (c) sonlu eleman modeli..... 75
Şekil 6.4. Tetrahedral sonlu eleman modeli..... 75
Şekil 6.5. Dinamik yük etkisindeki 5 serbestlik dereceli sistem örneği..... 77
Şekil 6.6. 5.kattaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi..... 77
Şekil 6.7. Beş serbestlik dereceli sistemin yer değiştirmesinin zamana bağlı değişimi..... 77
Şekil 6.8. Kocaeli depremi(1999, YPT330) ivme grafiği 78
Şekil 6.9. Kocaeli depremi(1999, YPT330) normalleştirilmiş ivme-zaman grafiği 78
Şekil 6.11. Tek serbestlik dereceli sistemin hız-zaman grafiği..... 79
Şekil 6.10. Tek serbestlik dereceli sistemin yer değiştirme-zaman grafiği..... 79
Şekil 6.12. Tek serbestlik dereceli sistemin inelastik kuvvet/ mg- zaman değişimi..... 79
Şekil 6.13. Tek serbestlik dereceli sistemin düktilite-zaman grafiği 80
Şekil 6.14. Tek serbestlik dereceli sistemin z=f/f_y-u=d/d_y grafiği 80
Şekil 6.15. Tek serbestlik dereceli sistemin z=f/fy-zaman grafiği..... 80
Şekil 6.16. Geliştirilen yazılıma ve ANSYS yazılımına ait serbest titreşim analizi sonuçları 81
Şekil 6.17. Tez çalışması kapsamında yapılan analizler..... 82
Şekil 6.18. Betonarme ayaklı su deposunun boş durumu 83
Şekil 6.19. ***Model-1'***de x yönündeki yer değiştirme..... 84
Şekil 6.20. ***Model-1'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi..... 85
Şekil 6.21. ***Model-1'***de x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 85
Şekil 6.22. ***Model-1'***de y yönündeki yer değiştirme..... 86
Şekil 6.23. ***Model-1'***de z yönündeki yer değiştirme..... 86
Şekil 6.24. ***Model-1'***de x yönündeki hız..... 87
Şekil 6.25. ***Model-1'***de y yönündeki hız..... 87
Şekil 6.26. ***Model-1'***de z yönündeki hız..... 88
Şekil 6.27. ***Model-1'***de x yönündeki ivme..... 88
Şekil 6.28. ***Model-1'***de y yönündeki ivme..... 89
Şekil 6.29. ***Model-1'***de z yönündeki ivme..... 89
Şekil 6.30. ***Model-1'***de x yönündeki şekil değiştirme 90
Şekil 6.31. ***Model-1'***de xy yönündeki şekil değiştirme 90
Şekil 6.32. ***Model-1'***de xz yönündeki şekil değiştirme..... 91
Şekil 6.33. ***Model-1'***de yx yönündeki şekil değiştirme 91

Şekil 6.34. ***Model-1'***de y yönündeki şekil değiştirme 92
Şekil 6.35. ***Model-1'***de yz yönündeki şekil değiştirme..... 92
Şekil 6.36. ***Model-1'***de zx yönündeki şekil değiştirme..... 93
Şekil 6.37. ***Model-1'***de zy yönündeki şekil değiştirme..... 93
Şekil 6.38. ***Model-1'***de z yönündeki şekil değiştirme..... 94
Şekil 6.39. ***Model-1'***de x yönündeki normal gerilme 94
Şekil 6.40. ***Model-1'***de xy yönündeki kayma gerilmesi 95
Şekil 6.41. ***Model-1'***de xz yönündeki kayma gerilmesi 95
Şekil 6.42. ***Model-1'***de yx yönündeki kayma gerilmesi 96
Şekil 6.43. ***Model-1'***de y yönündeki normal gerilme 96
Şekil 6.44. ***Model-1'***de yz yönündeki kayma gerilmesi 97
Şekil 6.45. ***Model-1'***de zx yönündeki kayma gerilmesi 97
Şekil 6.46. ***Model-1'***de zy yönündeki kayma gerilmesi 98
Şekil 6.47. ***Model-1'***de z yönündeki normal gerilme 98
Şekil 6.48. ***Model-1'***de Von Mises gerilmesi 99
Şekil 6.49. Betonarme ayaklı su deposunun boş durumu 99
Şekil 6.50. ***Model-2'***de x yönündeki yer değiştirme..... 101
Şekil 6.51. ***Model-2'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi..... 101
Şekil 6.52. ***Model-2'***de x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 102
Şekil 6.53. ***Model-2'***de y yönündeki yer değiştirme..... 102
Şekil 6.54. ***Model-2'***de z yönündeki yer değiştirme..... 103
Şekil 6.55. ***Model-2'***de x yönündeki hız..... 103
Şekil 6.56. ***Model-2'***de y yönündeki hız..... 104
Şekil 6.57. ***Model-2'***de z yönündeki hız..... 104
Şekil 6.58. ***Model-2'***de x yönündeki ivme..... 105
Şekil 6.59. ***Model-2'***de y yönündeki ivme..... 105
Şekil 6.60. ***Model-2'***de z yönündeki ivme..... 106
Şekil 6.61. ***Model-2'***de x yönündeki şekil değiştirme 106
Şekil 6.62. ***Model-2'***de xy yönündeki şekil değiştirme 107
Şekil 6.63. ***Model-2'***de xz yönündeki şekil değiştirme..... 107
Şekil 6.64. ***Model-2'***de yx yönündeki şekil değiştirme 108
Şekil 6.65. ***Model-2'***de y yönündeki şekil değiştirme 108
Şekil 6.66. ***Model-2'***de yz yönündeki şekil değiştirme..... 109
Şekil 6.67. ***Model-2'***de zx yönündeki şekil değiştirme..... 109
Şekil 6.68. ***Model-2'***de zy yönündeki şekil değiştirme..... 110
Şekil 6.69. ***Model-2'***de z yönündeki şekil değiştirme..... 110
Şekil 6.70. ***Model-2'***de x yönündeki normal gerilme 111

Şekil 6.71. ***Model-2'***de xy yönündeki kayma gerilmesi 111
Şekil 6.72. ***Model-2'***de xz yönündeki kayma gerilmesi 112
Şekil 6.73. ***Model-2'***de yx yönündeki kayma gerilmesi 112
Şekil 6.74. ***Model-2'***de y yönündeki normal gerilme 113
Şekil 6.75. ***Model-2'***de yz yönündeki kayma gerilmesi 113
Şekil 6.76. ***Model-2'***de zx yönündeki kayma gerilmesi 114
Şekil 6.77. ***Model-2'***de zy yönündeki kayma gerilmesi 114
Şekil 6.78. ***Model-2'***de z yönündeki normal gerilme 115
Şekil 6.79. ***Model-2'***de Von Mises gerilmesi 115
Şekil 6.80. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu..... 116
Şekil 6.81. ***Model-3'***te x yönündeki yer değiştirme..... 117
Şekil 6.82. ***Model-3'***te x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi..... 118
Şekil 6.83. ***Model-3'***te x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 118
Şekil 6.84. ***Model-3'***te y yönündeki yer değiştirme..... 119
Şekil 6.85. ***Model-3'***te z yönündeki yer değiştirme..... 119
Şekil 6.86. ***Model-3'***te x yönündeki hız..... 120
Şekil 6.87. ***Model-3'***te y yönündeki hız..... 120
Şekil 6.88. ***Model-3'***te z yönündeki hız..... 121
Şekil 6.89. ***Model-3'***te x yönündeki ivme..... 121
Şekil 6.90. ***Model-3'***te y yönündeki ivme..... 122
Şekil 6.91. ***Model-3'***te z yönündeki ivme..... 122
Şekil 6.92. ***Model-3'***te x yönündeki şekil değiştirme 123
Şekil 6.93. ***Model-3'***te xy yönündeki şekil değiştirme 123
Şekil 6.94. ***Model-3'***te xz yönündeki şekil değiştirme 124
Şekil 6.95. ***Model-3'***te yx yönündeki şekil değiştirme 124
Şekil 6.96. ***Model-3'***te y yönündeki şekil değiştirme 125
Şekil 6.97. ***Model-3'***te yz yönündeki şekil değiştirme 125
Şekil 6.98. ***Model-3'***te zx yönündeki şekil değiştirme 126
Şekil 6.99. ***Model-3'***te zy yönündeki şekil değiştirme 126
Şekil 6.100. ***Model-3'***te z yönündeki şekil değiştirme 127
Şekil 6.101. ***Model-3'***te x yönündeki normal gerilme 128
Şekil 6.102. ***Model-3'***te xy yönündeki kayma gerilmesi 128
Şekil 6.103. ***Model-3'***te xz yönündeki kayma gerilmesi 129
Şekil 6.104. ***Model-3'***te yx yönündeki kayma gerilmesi 129
Şekil 6.105. ***Model-3'***te y yönündeki normal gerilme 130
Şekil 6.106. ***Model-3'***te yz yönündeki kayma gerilmesi 130
Şekil 6.107. ***Model-3'***te zx yönündeki kayma gerilmesi 131

Şekil 6.108. ***Model-3'***te zy yönündeki kayma gerilmesi 131
Şekil 6.109. ***Model-3'***te z yönündeki normal gerilme 132
Şekil 6.110. ***Model-3'***te Von Mises gerilmesi 132
Şekil 6.111. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu..... 133
Şekil 6.112. ***Model-4'***te x yönündeki yer değiştirme..... 134
Şekil 6.113. ***Model-4'***te x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi..... 135
Şekil 6.114. ***Model-4'***te x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 135
Şekil 6.115. ***Model-4'***te y yönündeki yer değiştirme..... 136
Şekil 6.116. ***Model-4'***te z yönündeki yer değiştirme..... 136
Şekil 6.117. ***Model-4'***te x yönündeki hız..... 137
Şekil 6.118. ***Model-4'***te y yönündeki hız..... 137
Şekil 6.119. ***Model-4'***te z yönündeki hız..... 138
Şekil 6.120. ***Model-4'***te x yönündeki ivme..... 138
Şekil 6.121. ***Model-4'***te y yönündeki ivme..... 139
Şekil 6.122. ***Model-4'***te z yönündeki ivme..... 139
Şekil 6.123. ***Model-4'***te x yönündeki şekil değiştirme 140
Şekil 6.124. ***Model-4'***te xy yönündeki şekil değiştirme 140
Şekil 6.125. ***Model-4'***te xz yönündeki şekil değiştirme 141
Şekil 6.126. ***Model-4'***te yx yönündeki şekil değiştirme 141
Şekil 6.127. ***Model-4'***te y yönündeki şekil değiştirme 142
Şekil 6.128. ***Model-4'***te yz yönündeki şekil değiştirme 142
Şekil 6.129. ***Model-4'***te zx yönündeki şekil değiştirme 143
Şekil 6.130. ***Model-4'***te zy yönündeki şekil değiştirme 143
Şekil 6.131. ***Model-4'***te z yönündeki şekil değiştirme 144
Şekil 6.132. ***Model-4'***te x yönündeki normal gerilme 144
Şekil 6.133. ***Model-4'***te xy yönündeki kayma gerilmesi 145
Şekil 6.134. ***Model-4'***te xz yönündeki kayma gerilmesi 145
Şekil 6.135. ***Model-4'***te yx yönündeki kayma gerilmesi 146
Şekil 6.136. ***Model-4'***te y yönündeki kayma gerilmesi 146
Şekil 6.137. ***Model-4'***te yz yönündeki kayma gerilmesi 147
Şekil 6.138. ***Model-4'***te zx yönündeki kayma gerilmesi 147
Şekil 6.139. ***Model-4'***te zy yönündeki kayma gerilmesi 148
Şekil 6.140. ***Model-4'***te z yönündeki normal gerilme 148
Şekil 6.141. ***Model-4'***te Von Mises gerilmesi 149
Şekil 6.142. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu..... 149
Şekil 6.143. ***Model-5'***te x yönündeki yer değiştirme..... 151
Şekil 6.144. ***Model-5'***te x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi..... 151

Şekil 6.145. ***Model-5'***te x yönünde şekil değiştirmiş taşıyıcı sistem 152
Şekil 6.146. ***Model-5'***te y yönündeki yer değiştirme 152
Şekil 6.147. ***Model-5'***te z yönündeki yer değiştirme 153
Şekil 6.148. ***Model-5'***te x yönündeki hız 153
Şekil 6.149. ***Model-5'***te y yönündeki hız 154
Şekil 6.150. ***Model-5'***te z yönündeki hız 154
Şekil 6.151. ***Model-5'***te x yönündeki ivme 155
Şekil 6.152. ***Model-5'***te y yönündeki ivme 155
Şekil 6.153. ***Model-5'***te z yönündeki ivme 156
Şekil 6.154. ***Model-5'***te x yönündeki şekil değiştirme 156
Şekil 6.155. ***Model-5'***te xy yönündeki şekil değiştirme 157
Şekil 6.156. ***Model-5'***te xz yönündeki şekil değiştirme 157
Şekil 6.157. ***Model-5'***te yx yönündeki şekil değiştirme 158
Şekil 6.158. ***Model-5'***te y yönündeki şekil değiştirme 158
Şekil 6.159. ***Model-5'***te yz yönündeki şekil değiştirme 159
Şekil 6.160. ***Model-5'***te zx yönündeki şekil değiştirme 159
Şekil 6.161. ***Model-5'***te zy yönündeki şekil değiştirme 160
Şekil 6.162. ***Model-5'***te z yönündeki şekil değiştirme 160
Şekil 6.163. ***Model-5'***te x yönündeki normal gerilme 161
Şekil 6.164. ***Model-5'***te xy yönündeki kayma gerilmesi 161
Şekil 6.165. ***Model-5'***te xz yönündeki kayma gerilmesi 162
Şekil 6.166. ***Model-5'***te yx yönündeki kayma gerilmesi 162
Şekil 6.167. ***Model-5'***te y yönündeki normal gerilme 163
Şekil 6.168. ***Model-5'***te yz yönündeki kayma gerilmesi 163
Şekil 6.169. ***Model-5'***te zx yönündeki kayma gerilmesi 164
Şekil 6.170. ***Model-5'***te zy yönündeki kayma gerilmesi 164
Şekil 6.171. ***Model-5'***te z yönündeki normal gerilme 165
Şekil 6.172. ***Model-5'***te Von Mises gerilmesi 165
Şekil 6.173. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu 166
Şekil 6.174. ***Model-6'***da x yönündeki yer değiştirme 167
Şekil 6.175. ***Model-6'***da x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi 168
Şekil 6.176. ***Model-6'***da x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 168
Şekil 6.177. ***Model-6'***da y yönündeki yer değiştirme 169
Şekil 6.178. ***Model-6'***da z yönündeki yer değiştirme 169
Şekil 6.179. ***Model-6'***da x yönündeki hız 170
Şekil 6.180. ***Model-6'***da y yönündeki hız 170
Şekil 6.181. ***Model-6'***da z yönündeki hız 171

Şekil 6.182. ***Model-6'***da x yönündeki ivme 171
Şekil 6.183. ***Model-6'***da y yönündeki ivme 172
Şekil 6.184. ***Model-6'***da z yönündeki ivme 172
Şekil 6.185. ***Model-6'***da x yönündeki şekil değiştirme 173
Şekil 6.186. ***Model-6'***da xy yönündeki şekil değiştirme 173
Şekil 6.187. ***Model-6'***da xz yönündeki şekil değiştirme 174
Şekil 6.188. ***Model-6'***da yx yönündeki şekil değiştirme 174
Şekil 6.189. ***Model-6'***da y yönündeki şekil değiştirme 175
Şekil 6.190. ***Model-6'***da yz yönündeki şekil değiştirme 175
Şekil 6.191. ***Model-6'***da zx yönündeki şekil değiştirme 176
Şekil 6.192. ***Model-6'***da zy yönündeki şekil değiştirme 176
Şekil 6.193. ***Model-6'***da z yönündeki şekil değiştirme 177
Şekil 6.194. ***Model-6'***da x yönündeki normal gerilme 177
Şekil 6.195. ***Model-6'***da xy yönündeki kayma gerilmesi 178
Şekil 6.196. ***Model-6'***da xz yönündeki kayma gerilmesi 178
Şekil 6.197. ***Model-6'***da yx yönündeki kayma gerilmesi 179
Şekil 6.198. ***Model-6'***da y yönündeki normal gerilme 179
Şekil 6.199. ***Model-6'***da yz yönündeki kayma gerilmesi 180
Şekil 6.200. ***Model-6'***da zx yönündeki kayma gerilmesi 180
Şekil 6.201. ***Model-6'***da zy yönündeki kayma gerilmesi 181
Şekil 6.202. ***Model-6'***da z yönündeki normal gerilme 181
Şekil 6.203. ***Model-6'***da Von Mises gerilmesi 182
Şekil 6.204. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu 182
Şekil 6.205. DualSPHysics programı ile hidrodinamik su basınçlarının elde edilmesi 184
Şekil 6.206. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) olması durumundaki hidrodinamik basınçlar 185
Şekil 6.207. ***Model-7'***de x yönündeki yer değiştirme 185
Şekil 6.208. ***Model-7'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi 186
Şekil 6.209. ***Model-7'***de x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 186
Şekil 6.210. ***Model-7'***de y yönündeki yer değiştirme 187
Şekil 6.211. ***Model-7'***de z yönündeki yer değiştirme 187
Şekil 6.212. ***Model-7'***de x yönündeki hız 188
Şekil 6.213. ***Model-7'***de y yönündeki hız 188
Şekil 6.214. ***Model-7'***de z yönündeki hız 189
Şekil 6.215. ***Model-7'***de x yönündeki ivme 189
Şekil 6.216. ***Model-7'***de y yönündeki ivme 190
Şekil 6.217. ***Model-7'***de z yönündeki ivme 190
Şekil 6.218. ***Model-7'***de x yönündeki şekil değiştirme 191

Şekil 6.219. ***Model-7'***de xy yönündeki şekil değiştirme 191
Şekil 6.220. ***Model-7'***de xz yönündeki şekil değiştirme..... 192
Şekil 6.221. ***Model-7'***de yx yönündeki şekil değiştirme 192
Şekil 6.222. ***Model-7'***de y yönündeki şekil değiştirme 193
Şekil 6.223. ***Model-7'***de yz yönündeki şekil değiştirme..... 193
Şekil 6.224. ***Model-7'***de zx yönündeki şekil değiştirme..... 194
Şekil 6.225. ***Model-7'***de zy yönündeki şekil değiştirme..... 194
Şekil 6.226. ***Model-7'***de z yönündeki şekil değiştirme..... 195
Şekil 6.227. ***Model-7'***de x yönündeki normal gerilme 195
Şekil 6.228. ***Model-7'***de xy yönündeki kayma gerilmesi 196
Şekil 6.229. ***Model-7'***de xz yönündeki kayma gerilmesi 196
Şekil 6.230. ***Model-7'***de yx yönündeki kayma gerilmesi 197
Şekil 6.231. ***Model-7'***de y yönündeki normal gerilme 197
Şekil 6.232. ***Model-7'***de yz yönündeki kayma gerilmesi 198
Şekil 6.233. ***Model-7'***de zx yönündeki kayma gerilmesi 198
Şekil 6.234. ***Model-7'***de zy yönündeki kayma gerilmesi 199
Şekil 6.235. ***Model-7'***de z yönündeki normal gerilme 199
Şekil 6.236. ***Model-7'***de Von Mises gerilmesi 200
Şekil 6.237. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu..... 200
Şekil 6.238. ***Model-8'***de x yönündeki yer değiştirme..... 201
Şekil 6.239. ***Model-8'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi..... 202
Şekil 6.240. ***Model-8'***de x yönündeki yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 202
Şekil 6.241. ***Model-8'***de y yönündeki yer değiştirme..... 203
Şekil 6.242. ***Model-8'***de z yönündeki yer değiştirme. 203
Şekil 6.243. ***Model-8'***de x yönündeki hız..... 204
Şekil 6.244. ***Model-8'***de y yönündeki hız..... 204
Şekil 6.245. ***Model-8'***de z yönündeki hız..... 205
Şekil 6.246. ***Model-8'***de x yönündeki ivme..... 205
Şekil 6.247. ***Model-8'***de y yönündeki ivme..... 206
Şekil 6.248. ***Model-8'***de z yönündeki ivme..... 206
Şekil 6.249. ***Model-8'***de x yönündeki şekil değiştirme 207
Şekil 6.250. ***Model-8'***de xy yönündeki şekil değiştirme 207
Şekil 6.251. ***Model-8'***de xz yönündeki şekil değiştirme..... 208
Şekil 6.252. ***Model-8'***de yx yönündeki şekil değiştirme 208
Şekil 6.253. ***Model-8'***de y yönündeki şekil değiştirme 209
Şekil 6.254. ***Model-8'***de yz yönündeki şekil değiştirme..... 209
Şekil 6.255. ***Model-8'***de zx yönündeki şekil değiştirme..... 210

Şekil 6.256. ***Model-8'***de zy yönündeki şekil değiştirme 210
Şekil 6.257. ***Model-8'***de z yönündeki şekil değiştirme 211
Şekil 6.258. ***Model-8'***de x yönündeki normal gerilme 211
Şekil 6.259. ***Model-8'***de xy yönündeki kayma gerilmesi 212
Şekil 6.260. ***Model-8'***de xz yönündeki kayma gerilmesi 212
Şekil 6.261. ***Model-8'***de yx yönündeki kayma gerilmesi 213
Şekil 6.262. ***Model-8'***de yz yönündeki kayma gerilmesi 213
Şekil 6.263. ***Model-8'***de zx yönündeki kayma gerilmesi 214
Şekil 6.264. ***Model-8'***de zy yönündeki kayma gerilmesi 214
Şekil 6.265. ***Model-8'***de z yönündeki normal gerilme 215
Şekil 6.266. ***Model-8'***de Von Mises gerilmesi 215
Şekil 6.267. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu 216
Şekil 6.268. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) olması durumundaki hidrodinamik basınçlar 217
Şekil 6.269. ***Model-9'***da x yönündeki yer değiştirme 218
Şekil 6.270. ***Model-9'***da x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi 218
Şekil 6.271. ***Model-9'***da x yönünde şekil değiştirmiş taşıyıcı sistem 219
Şekil 6.272. ***Model-9'***da y yönündeki yer değiştirme 220
Şekil 6.273. ***Model-9'***da z yönündeki yer değiştirme 220
Şekil 6.274. ***Model-9'***da x yönündeki hız 221
Şekil 6.275. ***Model-9'***da y yönündeki hız 221
Şekil 6.276. ***Model-9'***da z yönündeki hız 222
Şekil 6.277. ***Model-9'***da x yönündeki ivme 222
Şekil 6.278. ***Model-9'***da y yönündeki ivme 223
Şekil 6.279. ***Model-9'***da z yönündeki ivme 223
Şekil 6.280. ***Model-9'***da x yönündeki şekil değiştirme 224
Şekil 6.281. ***Model-9'***da xy yönündeki şekil değiştirme 224
Şekil 6.282. ***Model-9'***da xz yönündeki şekil değiştirme 225
Şekil 6.283. ***Model-9'***da yx yönündeki şekil değiştirme 225
Şekil 6.284. ***Model-9'***da y yönündeki şekil değiştirme 226
Şekil 6.285. ***Model-9'***da yz yönündeki şekil değiştirme 226
Şekil 6.286. ***Model-9'***da zx yönündeki şekil değiştirme 227
Şekil 6.287. ***Model-9'***da zy yönündeki şekil değiştirme 227
Şekil 6.288. ***Model-9'***da z yönündeki şekil değiştirme 228
Şekil 6.289. ***Model-9'***da x yönündeki normal gerilme 228
Şekil 6.290. ***Model-9'***da xy yönündeki kayma gerilmesi 229
Şekil 6.291. ***Model-9'***da xz yönündeki kayma gerilmesi 229
Şekil 6.292. ***Model-9'***da yx yönündeki kayma gerilmesi 230

Şekil 6.293. ***Model-9'***da y yönündeki normal gerilme 230
Şekil 6.294. ***Model-9'***da yz yönündeki kayma gerilmesi 231
Şekil 6.295. ***Model-9'***da zx yönündeki kayma gerilmesi 231
Şekil 6.296. ***Model-9'***da zy yönündeki kayma gerilmesi 232
Şekil 6.297. ***Model-9'***da z yönündeki normal gerilme 232
Şekil 6.298. ***Model-9'***da Von Mises gerilmesi 233
Şekil 6.299. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu 233
Şekil 6.300. ***Model-10'***da x yönündeki yer değiştirme 234
Şekil 6.301. ***Model-10'***da x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi 235
Şekil 6.302. ***Model-10'***da x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem 235
Şekil 6.303. ***Model-10'***da y yönündeki yer değiştirme 236
Şekil 6.304. ***Model-10'***da z yönündeki yer değiştirme 236
Şekil 6.305. ***Model-10'***da x yönündeki hız 237
Şekil 6.306. ***Model-10'***da y yönündeki hız 237
Şekil 6.307. ***Model-10'***da z yönündeki hız 238
Şekil 6.308. ***Model-10'***da x yönündeki ivme 238
Şekil 6.309. ***Model-10'***da y yönündeki ivme 239
Şekil 6.310. ***Model-10'***da z yönündeki ivme 239
Şekil 6.311. ***Model-10'***da x yönündeki şekil değiştirme 240
Şekil 6.312. ***Model-10'***da xy yönündeki şekil değiştirme 240
Şekil 6.313. ***Model-10'***da xz yönündeki şekil değiştirme 241
Şekil 6.314. ***Model-10'***da yx yönündeki şekil değiştirme 241
Şekil 6.315. ***Model-10'***da y yönündeki şekil değiştirme 242
Şekil 6.316. ***Model-10'***da yz yönündeki şekil değiştirme 242
Şekil 6.317. ***Model-10'***da zx yönündeki şekil değiştirme 243
Şekil 6.318. ***Model-10'***da zy yönündeki şekil değiştirme 243
Şekil 6.319. ***Model-10'***da z yönündeki şekil değiştirme 244
Şekil 6.320. ***Model-10'***da x yönündeki normal gerilme 244
Şekil 6.321. ***Model-10'***da xy yönündeki kayma gerilmesi 245
Şekil 6.322. ***Model-10'***da xz yönündeki kayma gerilmesi 245
Şekil 6.323. ***Model-10'***da yx yönündeki kayma gerilmesi 246
Şekil 6.324. ***Model-10'***da y yönündeki normal gerilme 246
Şekil 6.325. ***Model-10'***da yz yönündeki kayma gerilmesi 247
Şekil 6.326. ***Model-10'***da zx yönündeki kayma gerilmesi 247
Şekil 6.327. ***Model-10'***da zy yönündeki kayma gerilmesi 248
Şekil 6.328. ***Model-10'***da z yönündeki normal gerilme 248
Şekil 6.329. ***Model-10'***da Von Mises gerilmesi 249

Şekil 7.1. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-1,3,5***) 250
Şekil 7.2. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), ***Model-1,3,5*** 250
Şekil 7.3. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), ***Model-1,3,5*** 251
Şekil 7.4. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), ***Model-1,3,5*** 251
Şekil 7.5. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), ***Model-1,3,5*** 251
Şekil 7.6. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (pozitif), ***Model-1,3,5***..... 252
Şekil 7.7. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (negatif), ***Model-1,3,5*** 252
Şekil 7.8. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-1,3,5***) 252
Şekil 7.9. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-1,7,9***) 253
Şekil 7.10. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), (***Model-1,7,9***)..... 253
Şekil 7.11. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), (***Model-1,7,9***)..... 254
Şekil 7.12. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), (***Model-1,7,9***) 254
Şekil 7.13. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), (***Model-1,7,9***)..... 254
Şekil 7.14. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (pozitif), (***Model-1,7,9***) 255
Şekil 7.15. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (negatif), (***Model-1,7,9***) 255
Şekil 7.16. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-1,7,9***) 255
Şekil 7.17. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-2,4,6***) 256
Şekil 7.18. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), (***Model-2,4,6***)..... 256
Şekil 7.19. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), (***Model-2,4,6***)..... 257
Şekil 7.20. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), (***Model-2,4,6***) 257
Şekil 7.21. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), (***Model-2,4,6***)..... 257
Şekil 7.22. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (pozitif), (***Model-2,4,6***)..... 258
Şekil 7.23. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (negatif), (***Model-2,4,6***) 258
Şekil 7.24. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-2,4,6***) 258
Şekil 7.25. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-2,8,10***) 259
Şekil 7.26. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), (***Model-2,8,10***)..... 259
Şekil 7.27. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), (***Model-2,8,10***)..... 260
Şekil 7.28. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), (***Model-2,8,10***) 260
Şekil 7.29. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), (***Model-2,8,10***)..... 260
Şekil 7.30. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (pozitif), (***Model-2,8,10***)..... 261
Şekil 7.31. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (negatif), (***Model-2,8,10***) 261
Şekil 7.32. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-2,8,10***) 261
Şekil 7.33. ***Model-1 ve Model-2***'de hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi 262
Şekil 7.34. ***Model-3 ve Model-4***'te hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi 263
Şekil 7.35. ***Model-5 ve Model-6***'da hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi 263

Şekil 7.36. ***Model-7 ve Model-8***'de hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi 264

Şekil 7.37. ***Model-9 ve Model-10***'da hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi 265

Şekil 7.38. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler 266

Şekil 7.39. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler 266

Şekil 7.40. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler 269

Şekil 7.41. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler..... 269

Şekil 7.42. Doluluk oranlarına ve Westergaard yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler 272

Şekil 7.43. Doluluk oranlarına ve Westergaard yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler 272

Şekil 7.44. Doluluk oranlarına ve DPH yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler 274

Şekil 7.45. Doluluk oranlarına ve DPH yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler 274

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Durum-uzay modelinin bileşenlerinin açıklaması (Kasımzade ve Tuhta, 2012).. 59
Tablo 6.1. Su deposunun geometrik özellikleri 74
Tablo 6.2. Betonarme ayaklı su deposunun malzeme özellikleri..... 74
Tablo 6.3. Betonarme ayaklı su deposunun sonlu eleman modeli özellikleri..... 76
Tablo 6.4. Serbest titreşim analizi sonuçları 81
Tablo 6.5. Analiz modelleri 82
Tablo 6.6. Yarım dolu ayaklı su deposunun DPH Yöntemi parametreleri 184
Tablo 6.7. Tam dolu ayaklı su deposunun DPH Yöntemi parametreleri 217
Tablo 7.1. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim yaklaşımlarına göre zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçlarının karşılaştırılması 265
Tablo 7.2. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim yaklaşımlarına göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması..... 268
Tablo 7.3. Doluluk oranlarına ve Westergaard yaklaşımına göre zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması 271
Tablo 7.4. Doluluk oranlarına ve DPH yaklaşımına göre zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması 273

1. GİRİŞ

İnsanlar ve diğer canlılar için temel besin kaynağı olan su günümüzde artan nüfusla birlikte hem kirlenmekte hem de giderek azalmaktadır. Hayat kaynağımız olan su, deprem, sel, yangın, patlama, salgın hastalıklar gibi istenmeyen durumlarda ilk olarak talep edilen temel ihtiyaç maddesidir. Bu nedenle temiz içme suyunun standartlara uygun şekilde elde edilip güvenli bir şekilde depolanması gerekmektedir. Dünyada su depolamak için kullanılan birçok yapı bulunmaktadır. Örneğin, su yollarına bentler, teknolojinin gelişmesiyle birlikte büyük baraj gölleri inşa edilmiştir. Ayrıca şehir merkezlerinde su basınçlarına, saklama koşullarına göre gerek gömme gerekse ayaklı su depoları inşa edilmektedir. Ayaklı su depoları, büyük enerji ile su pompalama yerine, suyun yerçekimine bağlı olarak gerekli basınca ulaşmasını sağlamada tercih edilmektedir.

Deprem, sel gibi doğa olaylarından sonra kullanılmak için inşa edilen birçok ayaklı su deposu bulunmaktadır. Bu doğa olaylarından sonra elektrik enerjisinin temin edilememesi durumlarında bile hidrostatik basınç etkisiyle ayaklı su depoları ihtiyaçlara cevap verebilmektedir.

1.1. Sıvı Depoları

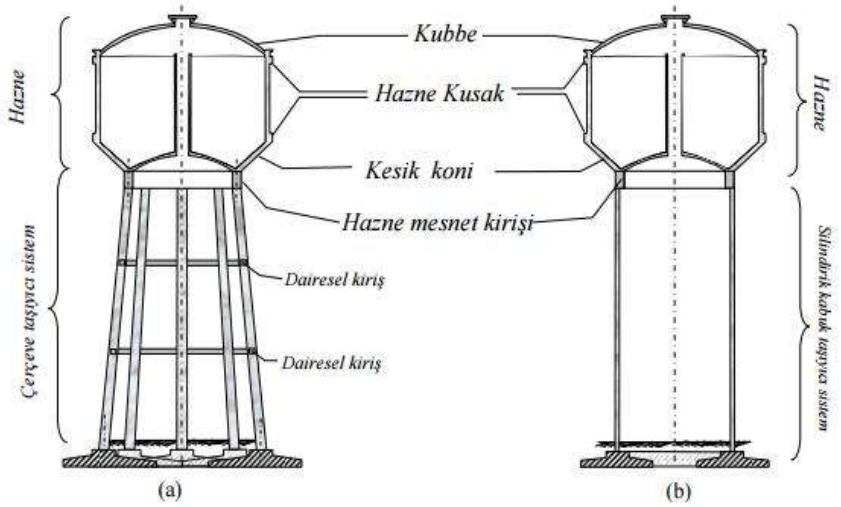
Sıvı depoları, kullanım amacına, malzemeye, geometriye ve zemindeki yerleşimlerine göre çeşitli şekillerde inşa edilmektedir. Şekil 1.1'de sıvı depolarının sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 1.1. Depoların Sınıflandırılması (Doğangün, 1989)

1.1.1. Ayaklı Su Depoları

Ayaklı su depoları, şehir merkezlerine yakın şebekedeki gerekli basıncı sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Ayaklı su depoları, taşıyıcı ayaklar ve ayaklar üstüne konulan bir hazneden oluşmaktadır. Ayaklı su depolarının hazneleri için silindirik, konik, küresel ve küp gibi değişik mimari geometriler kullanılabilmektedir. Ayaklar için ise çerçeve sistem ve silindirik kabuk şeklinde tasarımlar bulunmaktadır (Şekil 1.2). Türkiye'de İller Bankası, Devlet Su İşleri ve belediyeler tarafından inşa edilen betonarme ayaklı su depoları Şekil 1.3-Şekil 1.7'de verilmektedir.



Şekil 1.2. Ayaklı su deposunun (a) Çerçeve taşıyıcı sistemli ve (b) silindirik kabuk taşıyıcı sistemli tasarımlarına ait düşey kesitler (Livaoğlu, 2005)



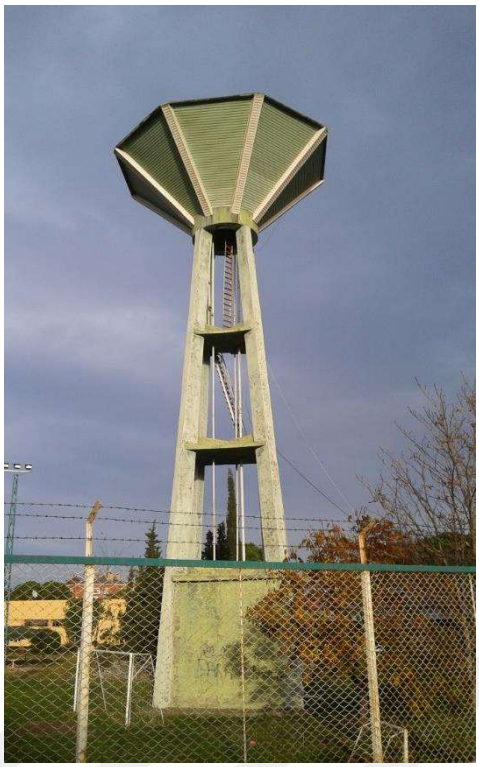
Şekil 1.3. Karayolları 7.Bölge Müdürlüğü ayaklı su deposu (Atakum/SAMSUN)



Şekil 1.4. Dereköy mahallesi ayaklı su deposu (19 Mayıs/SAMSUN)



Şekil 1.5. 19 Mayıs Polis Meslek Yüksekokulu (Atakum/SAMSUN)



Şekil 1.6. DSİ 71.Şube Müdürlüğü ayaklı su deposu (Atakum/SAMSUN)



Şekil 1.7. Kavak Anadolu Lisesi yerleşkesi (Kavak/SAMSUN)

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tez çalışmasının temel amacı, içme suyunun depolanmasını sağlayan betonarme ayaklı su depolarının çeşitli sıvı-yapı etkileşim sistemleri dikkate alınarak zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik hesaplarını MATLAB yazılımında geliştirilen program vasıtasıyla kişisel bilgisayarda hızlı bir biçimde gerçekleştirmektir.

Bu amaç doğrultusunda, insanlar ve diğer canlılar için hayati öneme sahip olan suyu depolamak için kullanılan ayaklı su depolarını, ülkemiz ve dünya standartlarına uygun şekilde dinamik yöntemlerle çözümleyebilecek bir yazılım üretilmesi hedeflenmiştir. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak yapı sistemlerinin dinamik çözümlemeleri yapılabilmektedir. Ancak sıvı-yapı etkileşimlerinin önemli olduğu ayaklı su depolarının dinamik çözümlerinde zaman tanım alanında analizlerde bilgisayar özelliklerinin yeterli özellikte olması gerekmektedir. Kişisel bilgisayarlarda tasarlanan modellerin zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlemesi ise çok uzun zaman gerektirmekte bilgisayar kapasitesi yetersizliği sebebiyle bazen imkânsız olmaktadır.

Ülkemizde toplam 30 adet büyükşehir belediyesi, 51 adet il belediyesi, 519 adet büyükşehir ilçe belediyesi, 403 adet ilçe belediyesi, 388 adet belde belediyesi olmak üzere toplam 1391 adet belediye bulunmaktadır ("e-içişleri projesi," 2023). Nüfusumuzun çoğunluğunun da şehir merkezlerinde olduğunu düşündüğümüzde, buralarda giderek artan bir su ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca şehir merkezlerindeki arsaların imar durumları düşünüldüğünde yine buralarda yapı stoğunun çoğunluğunu yüksek yapılar oluşturmaktadır. Bu nedenle hem yoğunluğun olduğu yerlerde su ihtiyacının doğru belirlenmesi hem de suyun güvenli bir şekilde depolanması gerekmektedir.

Türkiye'de su ihtiyaçlarını belirlemek ve içme suyu projelerini hazırlamakla görevli kamu kurum ve kuruluşları; DSİ, İller Bankası, İl Özel İdareleri ve belediyelerdir. Bu kurum ve kuruluşlar içme sularının depolanmasında kullanılan ayaklı su depolarının önceden hazırlanmış tip projelerini kullanmaktadırlar. Tip projelerde parametreler bellidir. Bu parametrelerin dışına çıkarak en uygun çözümlemeyi elde etmek günümüzdeki teknolojiyle mümkündür. Ayrıca değişen yerel zemin şartları ayaklı su depolarının temel tipini de değiştirmektedir. Bu nedenle ülkemizin deprem gerçeği, şehir estetiği, yaz aylarında artan su ihtiyacı için yeni parametreler belirleyip ona

göre projelendirmenin yapılması gerekmektedir. Uluslararası düzeyde kabul görmüş olan yazılımlarda ayaklı su depolarının hesap ve tasarımı yapılabilmektedir. Ancak ülkemizde ve dünyada kullanılan deprem yönetmeliklerinde zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerin yapılması istenmektedir. Bunun için bu yönetmeliklere uygun etkin ve kullanılabilir bir yazılıma ihtiyaç bulunmaktadır.

Geliştirilecek bir yazılım ile sıvı-yapı etkileşiminin dikkate alındığı, su ihtiyaçlarına cevap verilecek ve güvenli ayaklı su depoları inşa edilecektir. Bu yazılım ile, ülkemiz ve dünya standartlarına uygun emniyetli, ekonomik, estetik ve sürdürülebilir ayaklı su depoları inşa etmek mümkün olacaktır. Bu amaçla ayaklı su deposunun taşıyıcı sistem kısmı için Sonlu Elemanlar Yöntemi, sıvı-yapı etkileşimli sistem çözümlemesi için düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği yöntemi kullanılmıştır.

1.3. Literatür Araştırması

Literatür incelendiğinde betonarme ayaklı su depoları ile ilgili birçok araştırma ulusal ve uluslararası düzeyde yapılmıştır. Ancak ayaklı su depolarının hesaplanmasında malzeme ve geometri yönünden doğrusal olmayan çözümler araştırılmaya devam etmektedir. Ayrıca sıvı-yapı-zemin etkileşimini dikkate alan çalışmalar da bulunmaktadır. Ayaklı su depoları ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmektedir:

Housner (1963), 1960 yılında Şili depremlerinde hasar alan ayaklı su depolarının dinamik davranışlarını incelemiştir. İncelemeler sonucunda, suyun hazne kısmına göre hareketinin ve haznenin de zemine göre hareketinin dinamik hesaplarda göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir.

Steinbrugge ve Rodrigo (1963), 1960 yılında meydana gelen Şili depremlerinde diğer önemli yapılar gibi ayaklı su depolarının da hasar aldığını yapmış olduğu çalışmasında belirtmiştir. Çalışmasında yapısal hasarların nedenleri ve zeminlerin depo üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

Ermutlu (1964), 1963 yılında Türkiye Bursa ilinde yapım sırasında rüzgâr yükleri etkisiyle tamamen hasar alıp yıkılan 50m^3 kapasiteli ve 25m yüksekliğindeki ayaklı su deposunun incelemesini yapmıştır.

Dieterman (1986), depoların dinamik yükler altındaki davranışını incelemek için, salınımı ve çok kütleli sistem yaklaşımını dikkate alan analitik bir model hazırlamıştır. Bu model üzerinde deponun ötelenme ve dönme tepkilerini incelemiştir.

Resheidat ve Sunna (1986), yapmış oldukları çalışmada deponun zemine ankastre olarak mesnetlenmediği kabulünü yaparak ve zemini sonlu elemanlara bölerek deprem analizi gerçekleştirmişlerdir. Deprem etkisinin dikdörtgen ayaklı su deposu üzerindeki davranışının incelendiği bu çalışmada, deponun tam dolu olduğu kabul edilip, eklenmiş kütle yaklaşımına (Westergaard yöntemi) göre sonuçlar elde edilmiştir.

Doğangün (1989), betonarme sıvı depolarına ait statik ve dinamik hesap yöntemleri ve projelendirme ilkelerini içeren kapsamlı bir tez çalışması hazırlamıştır. Ayaklı su depolarının statik ve deprem hesaplarını içeren örneklere yer vererek çeşitli karşılaştırmalar yapmıştır.

Leonard vd. (1990), ayaklı su depolarının statik çözümlemesi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.

Haroun ve Temraz (1992), yapmış oldukları çalışmada salınımın ihmal edildiği tek kütleli sistem ile analizler gerçekleştirmişlerdir.

Knoy (1995), yapmış olduğu çalışmada çeşitli depremlerin etkisindeki beş adet ayaklı su deposunun dinamik davranışlarını incelemiştir. Deprem kuvvetlerine karşı düktilitenin önemini vurgulamıştır.

Lee ve Dawe (1996), yapmış oldukları çalışmada, Kanada'da kullanıldığı ilk yıllarda yıkılan ayaklı su deposunu incelemişlerdir.

Asthana ve Sridhar (1997), ayaklı su depolarında sıvı-yapı etkileşimi için eklenmiş kütle yaklaşımı dikkate alınarak araştırmalar yapmışlardır.

Doğangün vd. (1997), farklı ayaklara sahip betonarme ayaklı su depoları için eklenmiş kütle yaklaşımı ve iki kütleli sistem yaklaşımına göre deprem analizleri yapmışlardır. Sonlu elemanlar ve analitik yöntemlere göre taşıyıcı sistemler modellenmiş ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Deponun boş ve dolu durumları da dikkate alınarak yer değiştirmeler, taban kesme kuvvetleri ve taban momentleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre deponun tam dolu olması durumunda çerçeve modellerde yönetmelik sınırlarının aşıldığı, tek ayaklı modellerde ise en büyük yer değiştirmenin yönetmelik sınırlarını aşmadığı görülmüştür.

Marashi ve Shakib (1997), yapmış oldukları deneysel çalışmada depoların titreşim etkileri altındaki davranışlarını incelemişlerdir.

Dutta vd. (2000), ayaklı depo sistemlerinin davranışı ve bu taşıyıcı sistemlerin rijitlikleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Dutta vd. (2004), ayaklı su depolarında yapı-sıvı-zemin etkileşimini dikkate alarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu analizler sonucunda, zemine ankastre bağlı kabul edilen deponun ayaklarında hesaplanan taban kesme kuvvetlerinin yanlış değerlendirmelere neden olabileceğine varmışlardır. Depoya ait taban kesme kuvvetlerinin az hesaplanmasının güvenli olmayan tasarıma yol açacağını belirtmişlerdir. Taban kesme kuvvetinin fazla hesaplanmasının da ekonomik olmayan tasarıma neden olacağını belirtmişleridir. Zemin elastikiyetinin dikkate alınmamasının kolonlarda eksenel gerilmelere neden olduğu ve bunun da burulma etkisinin yanlış değerlendirilmesine neden olduğu açıklanmıştır.

Livaoğlu (2005), deprem yer hareketi etkisindeki betonarme ayaklı su deposunun sıvı-yapı-zemin etkileşim sistemleri dikkate alınarak analizlerini gerçekleştirmiştir. Sıvı-yapı-zemin etkileşim sistemleri için toplam sekiz model geliştirmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında sıvı-yapı-zemin etkileşiminde doğrusal olmayan davranışın deponun davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Demirören (2005), DSİ'ne ait 25m yüksekliğinde ve 75m^3 kapasitedeki betonarme ayaklı su deposu projesi üzerinde eşdeğer deprem yükü ve mod birleştirme yöntemlerine göre dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, betonarmede kullanılan S220 ve S420 inşaat demiri kullanılması durumundaki değişimler incelenmiştir. İncelemeler sonucunda S220 yerine S420 kullanılması durumunda deprem etkisinin iki kat azaldığı sonucuna varılmıştır.

Livaoğlu ve Doğangün (2006), yaptıkları çalışmada çeşitli betonarme ayaklı su depoları üzerinde Eurodode-8 ve ACI-371R-98 yönetmeliklerine göre dinamik analizler gerçekleştirilerek depoya ait yer değiştirmeler, taban kesme kuvvetleri ve taban momentleri elde edilmiştir. Analizler sonucunda Eurocede-8'in, ACI-371R-98'de önerilen modelden daha uygun olduğu görülmüştür.

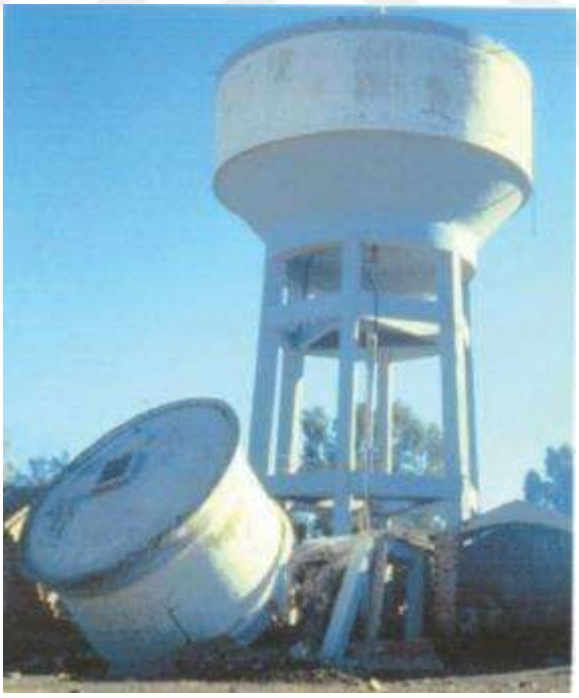
Nazari (2009), hazırlamış olduğu tez çalışmasında modern kompozit ayaklı su depolarının sismik analizini gerçekleştirmiştir. İncelenen ayaklı su deposuna giderek artan yatay itme kuvvetleri uygulanarak yapının sismik performansı araştırılmıştır. Ayaklı deponun taşıyıcı sisteminin modellenmesinde Sonlu Elemanlar Yöntemi

kullanılarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda tepki modifikasyon faktörünün deponun tasarımını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Yıldız (2009), betonarme sıvı depolarına ait Eurocode-8, ACI 350 gibi farklı yönetmeliklere göre deprem analizleri gerçekleştirerek sonuçları karşılaştırmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda Eurocode-8'e göre yapılan analiz sonuçlarının daha güvenilir olduğu fikrine varılmıştır.



Şekil 1.8. 1960 Şili depreminde yıkılmış Puetro Varas oteline ait ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011)



Şekil 1.9. 1980 yılında El-Asnam depreminde yıkılmış ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011)

Soheil vd. (2011), yapmış oldukları çalışmada, dünyada meydana gelmiş büyük depremlerde hasar alan betonarme ayaklı su depolarını incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda, 1960 yılında Şili depremlerinde deponun kolon ve kiriş

birleşim bölgelerinde hasarlar nedeniyle (Şekil 1.8), 1980 yılında Cezayir El-Asnam depreminde depodaki burulma etkileri nedeniyle (Şekil 1.9), 2001 yılında Hindistan Bhuj depreminde 680m^3'lük betonarme ayaklı su deposunun oluşan eksenel çatlaklar nedeniyle, 2003 yılında İran Bam depreminde betonarme ayaklı su deposunun kolon kiriş birleşim bölgelerinde oluşan hasar nedeniyle (Şekil 1.10), 2007 yılında Peru depreminde 1400m^3 kapasiteli betonarme ayaklı su deposunun kolon kiriş birleşim bölgelerindeki çatlaklar nedeniyle ya hasar aldığı ya da tamamen yıkıldığı belirtilmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.10. 2003 İran Bam depreminde hasar almış ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011)



Şekil 1.11. 2007 yılında Peru depreminde hasar alan ayaklı su deposu (Soheil vd., 2011)

Livaoğlu (2013), yapmış olduğu çalışmada, 1971 yılında San Fernando Kalifornia depreminde, Japonya'da 1978 yılında yaşanan İzu-Oshima ve Miyagi depreminde, 1987 yılında Alaska Whittier depreminde hasar alan ayaklı su depolarının olduğunu belirtmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınarak deponun salınım etkilerinin belirlenmesinin gerektiği yapılan çalışmada açıklanmaktadır.

İnce (2012), yapmış olduğu tez çalışmasında, dikdörtgen kesitli ayaklı su deposundaki su çalkantısının yapının davranışını nasıl etkilediğini incelemiştir. Ayaklı deponun kısmen dolu olması durumunda Akışkanın Hacmi Yöntemi kullanılarak, yapının dinamik davranışı araştırılmıştır. Yapının geometrisi ve periyodu değiştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Gurkalo (2016), yapmış olduğu tez çalışmasında betonarme ayaklı su deposunun sismik yükler altında malzeme yönünden doğrusal olmayan analizini gerçekleştirmiştir. Bunun için tepki spektrumu ve zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda depo ayakları üzerindeki çatlakların yapının rijitliğini doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır.

Shakib ve Alemzadeh (2017), betonarme ayaklı su deposunun toplam altı adet yatay ve düşey deprem yer hareketi etkisindeki davranışını incelemişlerdir. Sıvı-yapı etkileşimi için tek ve iki kütleli sistem dikkate alınmıştır. Hem yatay hem düşey deprem etkilerinden oluşan taban kesme kuvveti, taban momenti ve çalkalanma değerleri üzerinde karşılaştırma yapılmıştır.

Aydoğan (2020), yapmış olduğu çalışmada betonarme ayaklı su deposunun fiber malzeme ile güçlendirilmesini araştırmıştır. Çalışma kapsamında ayaklı depoda oluşan hasar çeşitleri açıklanmıştır. Araştırmanın sonucunda FRP ile ayaklı deponun güçlendirilmesine öncelik verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ghateh (2021), yapmış olduğu tez çalışmasında betonarme ayaklı su depolarının doğrusal olmayan analizini gerçekleştirmiştir. Tek ayaklı depoların modellemesinde Sonlu Elemanlar Yöntemini, sismik analizde ise Pushover Analiz Yöntemini kullanmıştır. Ayrıca ayaklı su deposunun sismik performansını ve tepki modifikasyon faktörünü doğrulamak için olasılıksal yöntem kullanmıştır. Çalışmanın sonuçları, tank boyutunun, silindirik kabuk yüksekliğinin, temel periyodun ve silindirik kabuk yüksekliğinin çapa oranının, betonarme silindirik kabuk duvarının dayanımını ve süneklik faktörünü önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları, dikkate alınan maksimum deprem şiddeti altında, hafif ve orta boy tank modellerinin önemli hasarlar yaşamadığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, ağır tank boyutundaki modeller hafif ve orta tank boyutlarına kıyasla daha fazla hasar görmektedir. Bu çalışmanın sonuçlarında ayrıca, silindirik kabuk duvarı açıklıklarının mevcut tasarım kılavuzlarına göre tasarlanması durumunda, açıklıklı ve açıklıksız silindirik kabuk duvarlarından neredeyse aynı

doğrusal olmayan sismik tepki davranışının beklendiğini ortaya koymaktadır. Son olarak, dolu tank durumu için Sonlu Elemanlar Yöntemiyle hesaplanan silindirik kabuk duvarının maksimum kayma mukavemetinin, mevcut tasarım kılavuzlarına dayalı olarak belirlenen nominal kayma mukavemetinden, mevcut kılavuz ve standartlardan elde edilen nominal kayma mukavemetine kıyasla daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

Mali ve Desai (2021), 29.2m yüksekliğindeki çeşitli betonarme ayaklı su deposu modelleri üzerinde doğrusal dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Deprem etkisinden ziyade rüzgâr etkisinin etkili olduğu bölgelerde tam dolu durumdaki yer değiştirme, taban kesme kuvveti değerlerinin, boş durumdakine göre daha fazla olduğu çalışma sonucunda ortaya çıkmıştır.

Ayman vd. (2021), çalışmalarında betonarme çerçeve ayaklı su deposunun doğrusal olmayan analizi ile ilgili araştırma yapmışlardır. Deponun boş, yarı ve tam dolu durumlarına göre ve sıvı-yapı etkileşim sistemleri dikkate alınarak toplam dokuz model üzerinde sismik performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda deponun hasar sınır durumları belirlenmiştir. Bu sınır durumları incelendiğinde çapraz ve radyal konfigürasyonlu modeller, temel konfigürasyonlu modellere göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Soumya vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada rüzgâr yükleri etkisindeki dairesel kesitli betonarme ayaklı su deposunun davranışını sıvı-yapı etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Rüzgâr etkisinin anlaşılabilmesi için, enine ve boyuna rüzgâr akışları modellenmiştir. Bu modellerde ayaklı depoya yakın ve uzak olan binaların etkisi de incelenmiştir. Binalara yakın olan depoların rüzgâr kaynaklı yer değiştirmesinin, uzak olanlara göre daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Görüldüğü gibi önceki yıllarda yapılan çalışmalarda sıvı-yapı etkileşimi bütün depolarda dikkate alınmaktadır. Ancak bu çalışmalarda betonarme ayaklı su depolarında hem taşıyıcı sistemin doğrusal olmaması hem de sıvı-yapı etkileşiminin doğrusal olmaması durumuna göre yapılan çalışmaların sayısının azlığı dikkat çekmektedir.

2. SIVI-YAPI ETKİLEŞİM SİSTEMLERİ

Dinamik etki altındaki bir akışkanın hareketi, içinde bulunduğu katı yapının şekil değiştirmesine neden olur. Bu şekil değiştirme aynı zamanda akışkanında da hareketini etkilemektedir. Dinamik yükler altında, sıvının yapıyı, yapının da sıvıyı etkilediği sistemlere sıvı-yapı etkileşim sistemleri denilmektedir. Günümüzde, sıvı-yapı etkileşim sistemleri hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin en çok araştırılan konularındandır. Bunun nedeni hem sıvı hem de katının bir arada tasarlandığı yapı sistemlerinin mühendislik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılmasıdır. Sıvı-yapı etkileşimini içeren ayaklı su depolarının deprem etkisi altındaki davranışı karmaşık bir problemdir. Bu karmaşıklığın nedeni sıvının ve yapının davranış mekanizmalarının kesin olarak belirlenememesinde yatmaktadır. Deprem etkisi altındaki bir ayaklı su deposunda sıvı yapının yapı da sıvının davranışını etkilemektedir. Bu durumda analitik yöntemleri kullanmak için birçok varsayım yapılmaktadır. Söz konusu davranışı modellemek için deneysel bir yol izlemek ise hem masraflı hem de uzun zaman alan bir çalışma olmaktadır. Sıvı-yapı etkileşim sistemlerinde deprem etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışın gerçekçi bir şekilde modellenmesi ve çözümlenmesi için sayısal yöntemlerin kullanılması gerekmektedir (Akgül, 2014; Özdemir, 2010).

2.1. Ayaklı Su Depoları İçin Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin İncelenmesi

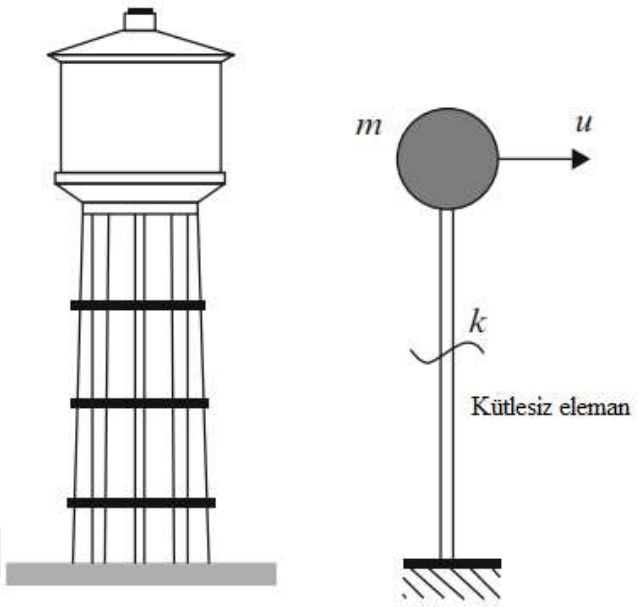
Su depolamak için inşa edilen ayaklı su depolarında, su kütlesinin fazla olması nedeniyle hem statik yüklerde hem de dinamik yüklerde artışlar meydana gelmektedir. Herhangi bir dinamik yük depoya etkimediği durumlarda su, hazne cidarına hidrostatik basınç uygulamaktadır. Ancak depoya dinamik bir yük etkidiğinde ise su, hazne cidarlarına hidrodinamik basınçlar uygulamaktadır. Bu durumda su (sıvı) katının (yapının) davranışını etkilemekte, yapı da sıvının davranışını etkilemektedir. Sıvı- yapı etkileşim sistemleri olarak adlandırılan bu sistemler için çeşitli kabuller yapılarak gerçek duruma en yakın modellemeler yapılmak istenmektedir (Doğangün, 1989; Yıldız, 2009).

Ayaklı su depolarının dinamik bir yük etkisi altında kalması durumunda, depo içindeki suyun bir kısmı depo ile beraber hareket etmektedir. Bu kısma impuls kütlesi denilmektedir. Geriye kalan kısım ise depo ve impuls kütlesinden farklı frekanslara sahip olarak salınım yapmaktadır. Bu kısma ise salınım kütlesi denilmektedir (Doğangün, 1989).

Ayaklı su deposu içerisindeki su kütlesinin tek kütleli olarak kabul edildiği ve salınımın da ihmal edildiği çalışmalar (Haroun ve Ellaithy, 1985), çok kütleli sistem yaklaşımının kullanıldığı çalışmalar (Livaoğlu ve Doğangün, 2007), eklenmiş kütle yaklaşımının dikkate alındığı çalışmalar (Doğangün Durmuş vd., 1997). Bu çalışmalarda sıvı deposunun duvarına statik halde etki eden basınç, hidrostatik basınç olarak ifade edilmektedir. Ancak deprem kaynaklı yer hareketleri depo içindeki suyu çalkalamaktadır. Bu durumda suyun duvara uyguladığı basınç hidrodinamik basınç haline gelmektedir. Ayaklı depo içindeki su salınım yaparak ana taşıyıcı sistemden farklı bir davranış göstermektedir. Ayaklı depoların dinamik hesapları yapılırken hidrodinamik basınçların gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için hidrodinamik basıncın duvar yüzeyindeki dağılımını çeşitli kabullere göre yapan Westergaard Yöntemi (Westergaard, 1931), Hoskins ve Jacobsen Yöntemi (Hoskins ve Jacobsen, 1934), Werner-Sundguist Yöntemi (Werner ve Sundquist, 1949), Housner Yöntemi (Housner, 1963), Haroun Yöntemi (Haroun ve Ellaithy, 1985) gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Ayrıca ağa bağlı (Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sonlu Hacim Yöntemi) ya da ağdan bağımsız yöntemler de bulunmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemini esas alan birçok çalışma da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda sıvı bir sonlu eleman kabul edilerek bir ağ oluşturulup dinamik davranış modellenmektedir. Ancak bu modellemelerde zaman tanım alanında analizler yapılırken çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Ağsız yöntemlerde ise sıvı bir parçacık olarak düşünülerek modelleme yapılmaktadır. Lagrange yaklaşımını esas alarak sıvının parçacık hareketi incelemek istenirse Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (DPH) Yöntemi kullanılmaktadır (Cossins, 2010; Liu ve Liu, 2003; Monaghan, 1992; Sunara vd., 2021; Trimulyono ve Hashimoto, 2019). Bu yöntem ile bir tankın içerisindeki suyun dinamik etkiler altındaki davranışı inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır (Gomez-Gesteira vd., 2010; Güray ve Yazici, 2015; Kusić vd., 2018; Monaghan, 1994; Narayanaswamy, 2008; Sampath vd., 2016; Sunara vd., 2021; Trimulyono ve Hashimoto, 2019).

2.1.1. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinde Analitik Yaklaşımlar

2.1.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemi Yaklaşımı



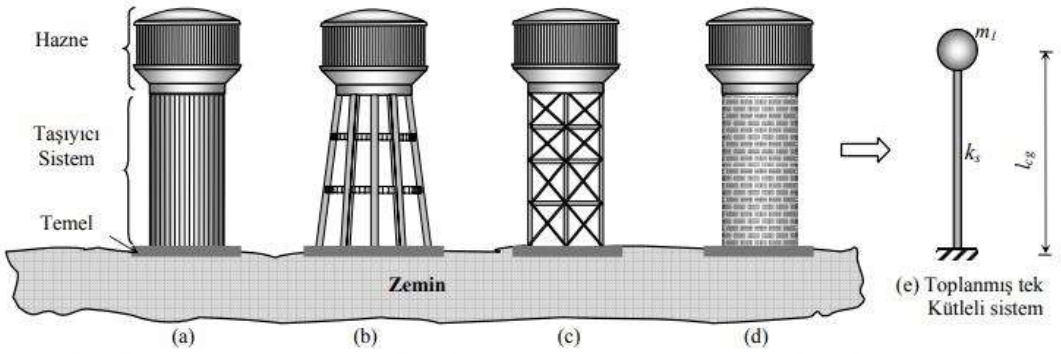
Şekil 2.1. İdealize edilmiş tek serbestlik dereceli sistem (Cimellaro ve Marasco, 2018)

Dinamik yük altında sadece dönme ya da yer değiştirme serbestliğine sahip olan sistemler tek serbestlik dereceli sistemler olarak kabul edilmektedir. Ayaklı su depoları da bazı kabüller yapıldığında tek serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenebilmektedir (Şekil 2.1). Eğer ayaklı su deposunun hazne kısmı tamamen su ile dolu ise teorik olarak suyun yapı ile beraber hareket ettiği kabul edilmektedir. Ancak suyun salınım yapması durumunda su ve yapının beraber hareket etmesi kabülü gerçek davranıştan uzaklaşmaktadır. Bir başka kabül ise depo haznesinin yüksekte olmasını sağlayan ayakların kütlesiz eleman olarak düşünülmesidir. Bu kısmın hem geometrisi hem de hangi malzemeden yapıldığı taşıyıcı sistemin rijitliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yaklaşım genel olarak standartlarda kullanılmaktadır. Tek serbestlik dereceli sistem için önemli olan taşıyıcı sistem rijitliği, çerçeve sistemler için aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Dutta vd., 2000; Livaoğlu, 2005).

$$k_s = \frac{12.E_{cl}.I_{cl}.N_{cl}}{h_{cl}^3}\left[\frac{1}{\frac{2.I_{cl}N_p(4N_P^2-1)}{A_cR_s^2}+N_p+2\left(N_p-1\frac{E_{cl}I_{cl}/h_{cl}}{E_bI_b/L}\right)}\right] \quad \textbf{(2.1)}$$

Burada E_{cl}, ayaklı su deposunun taşıyıcı sisteminin kolonuna ait elastisite modülünü, h_{cl}, ayak sisteminin net yüksekliğini, I_{cl} ve N_{cl}, bir kolonun atalet

momentini ve sayısını, E_b, her bir paneldeki kirişin elastisite modülünü, L, kiriş açıklığını, I_b kirişin atalet momentini, N_p, ayakta kullanılan panel sayısını ve R_s ortalama ayak yarıçapını ifade etmektedir (Livaoğlu, 2005). Şekil 2.2'de tek serbestlik dereceli sistemlere ait modeller verilmektedir (Livaoğlu, 2005).

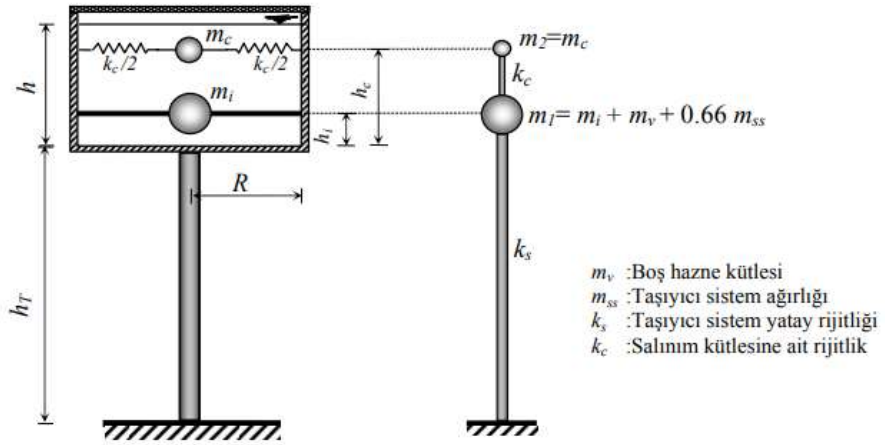


Şekil 2.2. Tek serbestlik dereceli ayaklı su depoları (a) betonarme silindirik kabuk taşıyıcı sistem (b) betonarme çerçeve taşıyıcı sistem (c) betonarme ya da çelik kafes çaprazlı çerçeve (d) yığma taşıyıcı sistem (e) tek serbestlik dereceli mekanik model (Livaoğlu ve Doğangün, 2006)

2.1.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemi Yaklaşımı

Tek serbestlik dereceli sistem idealleştirmesi yapılması için deponun tamamen dolu olması gerektiği bir önceki kısımda belirtilmektedir. Ancak işletme durumundaki bir ayaklı su deposunun her zaman tam dolu durumda olması mümkün değildir. Bu nedenle deprem etkisi gibi dinamik bir yük etkisindeki ayaklı su deposunun temel olarak iki titreşim modu bulunmaktadır. Pasif kütle olarak ta bilinen impuls etkileri, bir kısım sıvı kütlesinin hazne cidarlarının yer değiştirmesine atalet kuvvetlerinin etkimesinden meydana gelmektedir. Aktif kütle olarak ta bilinen salınım etkileri ise sıvı kütlesinin diğer kısmının deprem etkisi altında salınım davranışı göstermesinden kaynaklanmaktadır (Doğangün, 1989). Sonuç olarak depodaki suyun hareketi, ayaklı su deposunun hazne kısmı ile birlikte hareket eden impuls kütlesinin (m_i) ve salınım yapan salınım kütlesinin (m_c) hareketi ile meydana gelmektedir (Housner, 1963).

2.1.1.3. Ayaklı Su Depolarında Housner Yaklaşımının Uygulanması



Şekil 2.3. Ayaklı su deposunun mekanik ve matematik modeli (Livaoğlu, 2005)

Ayaklı su depolarında, sıvı-yapı etkileşimini modellemek için 1950'li yıllardan itibaren kütle-yay modelleri kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Housner silindirik depolar üzerinde yaptığı çalışmada,

- Sıvı ile hazne duvarının temasta olduğu yüzeylerin düşey ve düz olduğu,
- Hazne duvarının esnek değil, rijit olduğu,
- Hazne içindeki sıvının sıkışmadığı ve viskozitesinin olmadığı,
- Dinamik etki ile oluşan salınımın küçük olduğu,
- Hazne içindeki sıvının dönme serbestliğinin olmadığı,
- Dinamik bir etki altında olan sıvının düşey membranlar arasında kaldığı,
- Düşey membranlar arasında kalan sıvının sıkışmayarak yükselme davranışı gösterdiği,

kabüllerini yaparak dinamik bir etki altındaki deponun davranışlarını araştırmıştır (Doğangün, 1989; Housner, 1963; Livaoğlu, 2005).

Deponun Housner yaklaşımına göre modellenip çözülmesi için aşağıdaki işlemler verilmektedir (Doğangün Ayvaz vd., 1997).

1) Gerekli olan kütleler;

$$m_i = m_s \frac{th(1.74R/h)}{1.74R/h} + m_a + m_{bh}; \qquad m_c = m_s 0.318 \frac{R}{h} th(1.84h/R) \qquad \textbf{(2.2)}$$

burada m_s, statik durumda toplam su kütlesini, m_{bh}, boş hazne kütlesini, m_a, ayak kütlesini göstermektedir. Bu kütlelerin etkime yükseklikleri ise

$$h_i = \frac{3}{8}h \quad ; \quad h_c = \left[1 - \frac{ch(1.84h/R)}{1.84\frac{h}{R}sh(1.84h/R)}h\right] \tag{2.3}$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

2) Sistemin rijitlikleri ;

$$k_1 = \frac{m_{dh}}{\left(m_{dh} + \frac{33}{140}m_a\right)}\frac{3EI}{l^3} \tag{2.4}$$

Burada m_{dh}, daire halkasına sahip ayak için haznenin dolu kütlesini, EI kesitin eğilme rijitliğini göstermektedir.

$$k_2 = m_c\frac{g}{R}1.84th(1.84h/R) \tag{2.5}$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada g, yerçekimi ivmesini, R, hazne yarıçapını göstermektedir. k_1 ve k_2 rijitlikleri kullanılarak sistemin rijitlik matrisi aşağıdaki gibi düzenlenmektedir.

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

3) İlk iki titreşim moduna ait açısal hızlar(ω_n^2 ,n=1,2);

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2}\left[\frac{k_{11}}{m_i} + \frac{k_{22}}{m_c} \pm \sqrt{\left(\frac{k_{11}}{m_i} - \frac{k_{22}}{m_c}\right)^2 + 4.\frac{k_{12}}{m_i}\frac{k_{21}}{m_c}}\right] \tag{2.7}$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

4) Kütle seviyelerinde oluşan X_{1n} ve X_{2n} yer değiştirmeleri;

$$\phi_{1n} = \frac{-k_{12}/m_i}{(k_{11}/m_i) - \omega_n^2} \quad ; \quad K_n = \frac{m_i\phi_{1n} + m_c}{m_i\phi_{1n}^2 + m_c} \tag{2.8}$$

olmak üzere,

$$X_{2n} = K_n S_{an}/\omega_n^2 \quad ; \quad X_{1n} = X_{2n}\phi_{1n} \tag{2.9}$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

5) Kesme kuvvetleri; j toplanmış kütle seviyesindeki düğüm nokta numarasını, V_{jn} bu noktadaki kesme kuvvetini, V_n n.moddaki toplam kesme kuvvetini ve $V_{max.}$ iki modun katkısıyla meydana gelen en büyük kesme kuvvetini göstermek üzere,

$$V_{jn} = k_{j2}X_{2n} + k_{j1}X_{1n}; \qquad V_n = V_{2n} + V_{1n}; \qquad V_{max} = \sqrt{\sum V_n^2} \tag{2.10}$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

6) Herhangi bir n. modda oluşan dalga yüksekliği;

$$A_{2n} = X_{2n} - X_{1n} \qquad ve \quad \theta_{1n} = 1.53\frac{A_{2n}}{R} th(1.84h/R) \tag{2.11}$$

olmak üzere,

$$d_{max} = \frac{0.408R}{\left(\frac{g}{\omega_n \theta_{1n} R} - 1\right) th(1.84h/R)} \tag{2.12}$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

Dalga yüksekliği için $d_{max} \leq 0.2R$ ve $d_{max} \leq 0.2h$ şartlarının sağlanması gerekmektedir. Eğer bu şartlar sağlanmaz ise doğrusal olmayan etkilerin dikkate alınması gerekmektedir (Doğangün Ayvaz vd., 1997).

2.1.2. Sayısal Yöntemlerle Kullanılan Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemleri

Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin (SEY) yapısal çözümlemelerde kullanımı, inşaat mühendisliğindeki en önemli gelişmelerdendir. Bu yöntemle bir boyutlu problemlerden üç boyutlu problemlere kadar birçok karmaşık problem analiz edilebilmektedir. SEY kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları dikkate alınabilmektedir (Bathe ve Wilson, 1976). SEY kullanılarak ayaklı su deposunun sıvı-yapı etkileşim sistemleri de modellenebilmektedir . Bunun için birçok yaklaşım bulunmaktadır:

- Eklenmiş kütle yaklaşımı (Barton ve Parker, 1987; Doğangün Ayvaz vd., 1997; Gareane vd., 2011; Westergaard, 1931).
- Euler yaklaşımı (O. C. Zienkiewicz ve Bettess, 1978).
- Lagrange yaklaşımı (Doğangün ve Livaoglu, 2004; Olson ve Bathe, 1983; Wilson ve Khalvati, 1983).
- Euler-Lagrange yaklaşımı (Donea vd., 1982).

2.1.2.1. Eklenmiş Kütle Yaklaşımı

Dinamik bir yük etkisi altındaki ayaklı su deposu içindeki su, zamanla değişen hidrodinamik basınçları hazne duvarına uygulamaktadır. Westergaard (1931) tarafından geliştirilen modellemede, hazne cidarına etkiyen hidrodinamik basınç dağılımına göre su kütlesinin aynı noktadaki kütlelere eklenmesi gerekmektedir. Deprem yer hareketi etkisindeki çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = -[M]\ddot{u}_g(t) \quad \textbf{(2.13)}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\ddot{u}$ rölatif ivmeyi, $\dot{u}$ rölatif hızı, u rölatif yer değiştirmeyi, $\ddot{u}_g(t)$ yer hareketi ivmesini göstermektedir.

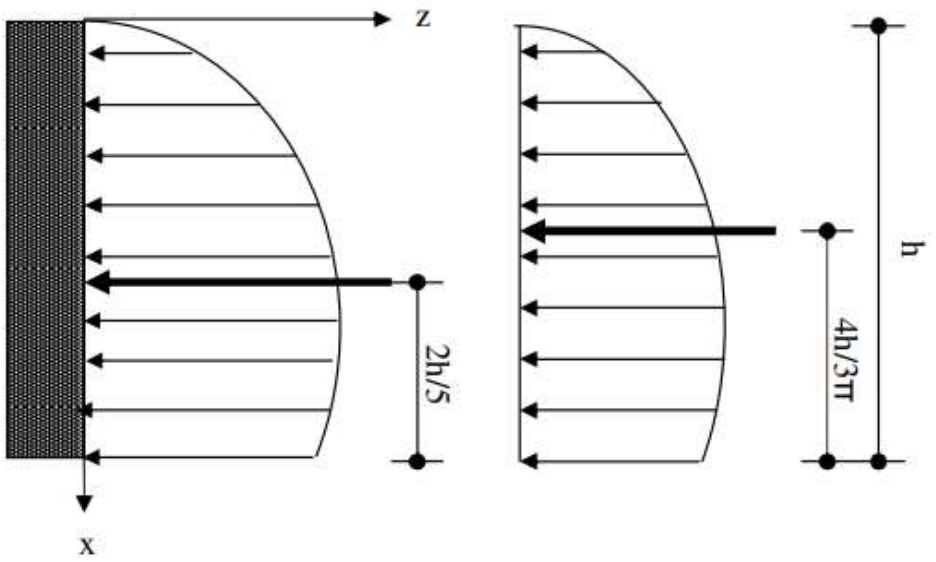
Eklenmiş kütle yaklaşımında bu hareket denklemi

$$[M]^*\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = -[M]^*\ddot{u}_g(t) \quad \textbf{(2.14)}$$

halini almaktadır. Burada M_a eklenmiş kütle matrisini göstermekte ve $[M]^* = [M_a] + [M]$ eşitliği yazılmaktadır. Westergaard eklenmiş kütle yaklaşımına ait hareket denklemi incelendiğinde kütlenin artmış olduğu ancak rijitlik ve sönümün ise değişmediği görülmektedir (Livaoğlu, 2005; Westergaard, 1931).

2.1.2.2. Westergaard Yöntemi

Westergaard 1931 yılında yapmış olduğu çalışmada sıvının viskozitesiz ve sıkışabilir olduğunu, yüzey dalgalarının ise ihmal edilebilir olduğunu, yer hareketinin harmonik olduğunu ve salınım yer değiştirmelerinin küçük olduğunu kabul ederek barajlar üzerinde hidrodinamik basınç dağılımlarını ifade etmiştir (Westergaard, 1931). Şekil 2.4'de Westergaard yaklaşımına göre duvar yüksekliğince hidrodinamik basıncın değişimi görülmektedir.



Şekil 2.4. Westergaard yaklaşımına göre duvar yüksekliği boyunca hidrodinamik basınç dağılımları (Yıldız, 2009)

$$P_i(z) = \frac{7}{8}.a_m.\rho.\sqrt{h.z} \quad \textbf{(2.15)}$$

Burada P_i ,impuls etkisinden oluşan hidrodinamik basınçları, ρ, sıvının birim hacim kütlesini, a_m, en büyük yer hareketi ivmesini göstermektedir.

2.1.2.3. Euler Yaklaşımı

Akışkanlar mekaniğinde sıvının zamana bağlı hareketi, süreklilik denklemlerinin yanısıra Navier-Stokes denklemlerinin birlikte kullanılmasıyla ifade edilmektedir. Üç boyutlu ortamda sıkışabilir bir sıvının x, y, z eksenleri doğrultularındaki hızları sırasıyla $v_{x,}\ v_{y,}\ v_z$ olmak üzere,

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial x} = -\frac{1}{E_v}\frac{\partial p}{\partial t} \quad \textbf{(2.16)}$$

ile ifade edilmektedir. Kinematik viskozite $v_k = 0$ kabul edilirse, Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + X \quad \textbf{(2.17)}$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + Y \quad \textbf{(2.18)}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + Z \quad \textbf{(2.19)}$$

Denklem (2.17)-(2.19) Euler denklemleri olarak bilinmektedir. Euler denklemleri doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerdir. Hareket halindeki sıvının genliği çok hızlı değişir ve bu genlikler küçük kalırsa konvektif ivmeler ihmal edilerek Euler denklemleri doğrusal duruma dönüştürülebilir. X, Y, Z kütle kuvvetleri de ihmal edilerek Euler denklemleri düzenlenirse,

$$\rho\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad \textbf{(2.20)}$$

$$\rho\frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad \textbf{(2.21)}$$

$$\rho\frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad \textbf{(2.22)}$$

olmaktadır. Denklem (2.17)-(2.19) ve Denklem (2.17) aralarında $v_{x,}\ v_{y,}\ v_z$ yok edilirek dalga denklemi basınca bağlı olarak şöyle ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{V_s^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \textbf{(2.23)}$$

Denklem (2.17) 'ün sağ tarafı sıfır olması durumunda Laplace denklemi olarak bilinen $\nabla^2 p = 0$ eşitlik elde edilmektedir (Doğangün, 1995).

Euler yaklaşımı, sıvı-yapı etkileşim sistemlerinde SEY ile birlikte sıklıkla kullanılmaktadır. Euler yaklaşımında, oluşturulan sonlu elemanlar ağı sabit olmaktadır ve sıvı bu ağın içinde hareket etmektedir. Genellikle sıvıların mekaniğinde kullanılan bu algoritmada ağ ve malzeme bağımsız olduğu için malzemenin yüksek genlikli hareketleri ağda bir deformasyon sorunu yaratmaz. Fakat malzeme ağa göre göreli olarak hareket ettiği için ilave olarak ortaya çıkan konveksiyonel terimler diferansiyel denklemlerin çözümünde zorluklara sebep olur. Euler algoritmasında malzemelere ait sınırların katı olarak belirlenmesi ve sınır koşullarının uygulanması zorlaşır. Ayrıca, malzemenin içinde hareket edebileceği bütün ortamın ağ ile tanımlanması gerekir (Özdemir, 2010).

O. C. Zienkiewicz ve Bettess (1978), yapmış oldukları çalışmada, Euler yaklaşımı dikkate alınarak sıvı-yapı etkileşimli bir sistemin hareket denklemini

$$\begin{bmatrix} M & O \\ Y^T & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & O \\ O & F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & Y \\ O & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_0 \\ h_0 \end{Bmatrix} \quad \textbf{(2.24)}$$

olarak ifade etmişlerdir. Burada yapı kısmı için M, kütle matrisini, C, sönüm matrisini, K, rijitlik matrisini, f_0, dış kuvvet vektörünü, sıvı kısmı için, Y ve O sıvı-yapı sisteminde ara yüzey etkileşiminde oluşan kuvvetlere ait matrisi, H, rijitlik matrisini, F, özel bir sönüm matrisini, h_0, dış kuvvetleri, L, enterpolasyon fonksiyonlarına bağlı oluşan yapı-sıvı yüzeyinde integral alarak elde edilen matrisi göstermektedir. Denklem (2.17) incelendiğinde yapıda bilinmeyenlerin yer değiştirme, sıvıda bilinmeyenlerin ise basınçlar olduğu görülmektedir. Burada denklemin simetrik olmamasından dolayı Euler yaklaşımı, Lagrange yaklaşımına göre daha zor denklem çözümüne sahip olmaktadır (Doğangün, 1995).

2.1.2.4. Lagrange Yaklaşımı

Lagrange yaklaşımında genellikle sıvının, sıkışabilen olduğu ve doğrusal elastik davranış gösterdiği, viskozitesinin ihmal edildiği ve dönmenin olmadığı kabulleri yapılmaktadır (Wilson ve Khalvati, 1983). Lagrange yaklaşımında, sıvının sıkışabilir ve doğrusal elastik olmasından, sıvıda oluşan şekil değiştirmeler Hooke kanununa uygun davranış göstermektedir. Üç boyutlu bir sıvı modelinde, ε_v birim hacim değişimini, u_x, u_y, u_z sırasıyla x, y, z eksenleri doğrultularındaki sıvının yer

değiştirmelerini, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ise şekil değiştirmelerini göstermek üzere sıvının hacimsel şekil değiştirmesi

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \tag{2.25}$$

olarak ifade edilmektedir. Buna göre sıvı basıncı ile şekil değiştirme arasında

$$p = E_v \varepsilon_v \tag{2.26}$$

ilişkisi bulunmaktadır.

Üç boyutlu ortamda, dönmenin olmadığı kabülünün sağlanması için x, y, z eksenleri etrafında oluşan dönmeler,

$$\varepsilon_{xr} = \frac{1}{2}\left[\frac{du_z}{dy} - \frac{du_y}{dz}\right] \tag{2.27}$$

$$\varepsilon_{yr} = \frac{1}{2}\left[\frac{du_x}{dz} - \frac{du_z}{dx}\right] \tag{2.28}$$

$$\varepsilon_{zr} = \frac{1}{2}\left[\frac{du_y}{dx} - \frac{du_x}{dy}\right] \tag{2.29}$$

olarak ifade edilmektedir. Buradaki dönmeler, sıvı elemanın şekil değiştirmesi olarak kabul edilirse p_{xr}, p_{yr}, p_{zr} dönme basınçlarını, ψ_x, ψ_y, ψ_z sırasıyla x, y, z eksenlerindeki kısıtlama parametre katsayılarını ifade etmektedir. Buradan

$$\mathrm{E_{22}} = \psi_\mathrm{x}\mathrm{E_v} \;;\; \mathrm{E_{33}} = \psi_\mathrm{y}\mathrm{E_v} \;;\; \mathrm{E_{44}} = \psi_\mathrm{z}\mathrm{E_v} \tag{2.30}$$

kısıtlama parametrelerini gösterirse;

$$\mathrm{p_{xr}} = \mathrm{E_{22}}\varepsilon_\mathrm{xr} \;;\; \mathrm{p_{zr}} = \mathrm{E_{33}}\varepsilon_\mathrm{yr} \;;\; \mathrm{p_{zr}} = \mathrm{E_{44}}\varepsilon_\mathrm{zr} \tag{2.31}$$

dönme basınçları elde edilmektedir.

E, elastisite matrisini, ε, şekil değiştirme vektörünü göstermek üzere, Π_ε, sıvının toplam şekil değiştirme enerjisi

$$\Pi_\varepsilon = \frac{1}{2}\int \varepsilon^T E \varepsilon dv \tag{2.32}$$

ile ifade edilmektedir. Hareket eden sıvı serbest yüzeyinde oluşan salınımlar nedeniyle oluşan potansiyel enerji

$$\Pi_s = \frac{1}{2}\int u_s \rho g\,(h + u_s) dv \tag{2.33}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (2.33) açık şekilde yazılırsa

$$\Pi_s = \frac{1}{2}\int u_s \rho g\, h dv + \frac{1}{2}\int u_s \rho g\, u_s dv \tag{2.34}$$

elde edilmektedir. Denklem (2.32) ve Denklem (2.33) toplanırsa sıvı hacminin toplam potansiyel enerjisi,

$$U = \Pi_\varepsilon + \Pi_s = \frac{1}{2}\int \varepsilon^T E\varepsilon dv + \frac{1}{2}\int u_s \rho g\,(h + u_s) dv \qquad \textbf{(2.35)}$$

ile hesaplanmaktadır. Sıvı hacminin kinetik enerjisi ise v kartezyen koordinat sisteminde hız vektörünü gösterirse,

$$T = \frac{1}{2}\int \rho v^T v\, dv \qquad \textbf{(2.36)}$$

olarak yazılmaktadır.

Yukarıda verilen denklemler yardımıyla Lagrange yaklaşımında F_i, dış yük vektörü

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}}\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \dot{\mathrm{u}}_\mathrm{i}}\right) - \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{u}_\mathrm{i}} + \frac{\partial \mathrm{U}}{\partial \mathrm{u}_\mathrm{i}} = \mathrm{F}_\mathrm{i} \quad (\mathrm{i} = 1, \ldots, \mathrm{n}) \qquad \textbf{(2.37)}$$

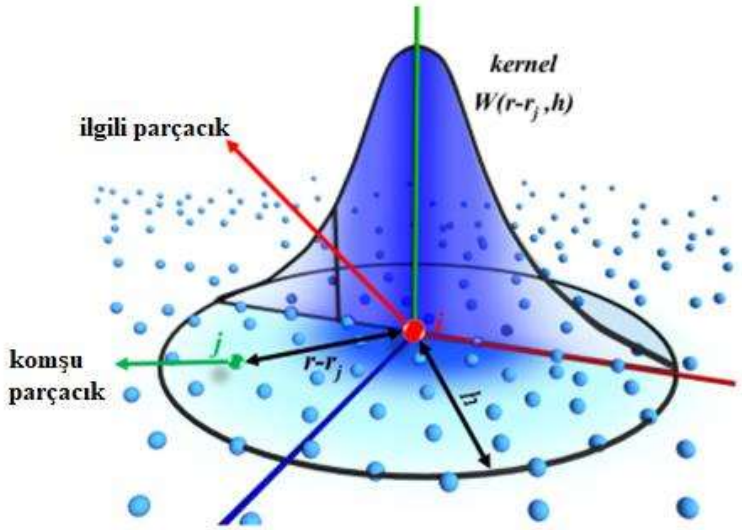
ile hesaplanmaktadır. Burada u_i i'.nci yer değiştirmeyi, $\dot{u}_i$ i.'nci hızı, t zamanı göstermektedir. Denklem (2.37) sıvı-yapı etkileşim sistemlerinde doğrusal veya doğrusal olmayan durumlar için kullanılabilmektedir (Doğangün, 1995). Bu tez çalışmasında Lagrange yaklaşımını esas alan DPH Yöntemi sıvı kısmın modellenmesinde kullanılmıştır (Monaghan, 1994).

2.2. Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (DPH) Yöntemi ile Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin İncelenmesi

Daha önce Bölüm 2.1'de de bahsedildiği gibi, hidrodinamik basınçların bulunması için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de Düzgün Parçacık Hidrodinamiği Yöntemidir (Monaghan, 1994). DPH hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde yaygın olarak kullanılan, parçacıkların akışının temsil edildiği ve yapılarla etkileşime girebildiği, büyük şekil değiştirmelerin elde edildiği Lagrangian yaklaşımını esas alan ağsız bir yöntemdir. Bu yöntemin ilk kullanımına Gingold ve Monaghan (1977) ve Lucy (1977) tarafından astrofizik problemlerinin çözümünde rastlanmaktadır. Ayrıca daha birçok araştırmacı DPH Yöntemini kullanmıştır (Crespo ve Gómez-Gesteira, 2007; Gomez-Gesteira vd., 2010; Güray ve Yazici, 2015; Kusić vd., 2018; Liu ve Liu, 2003; Monaghan, 1992). DPH ile akışkan parçacık olarak kabul edilerek, akışkanlar dinamiğinin sayısal denklemlerinin çözülmesi amaçlanmaktadır. DPH ile istenilen geometrideki akışkan modellenebildiği için, günümüzde birçok alanda akışkan modelleme için tercih edilmektedir. DPH Langrange yaklaşımını esas alıp, bir interpolasyon fonksiyonu (kernel fonksiyonu) belirleyerek, çeşitli parçacık kümeleri düzenlenmektedir (Wendland, 1995).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde Navier-Stokes denklemleri kullanılarak akışkan modelindeki her bir parçacığın bulunduğu konum r yarıçapı etrafındaki fiziksel özelliklere göre integre edilebilmektedir. r'yi çevreleyen parçacıkların komşu ya da bitişik bir dizisi ya iki boyutlu dairesel ya da üç boyutlu küresel fonksiyon tabanlı mesafede birleştirilmiş "h" interpolasyon uzunluğu ile belirlenmektedir. Belirlenen sürenin her bir zaman adımında yeni fiziksel değerler hesaplanarak güncelleştirilen yeni değerlere taşınmaktadır (Şekil 2.5).

Kernel fonksiyonu kullanılarak Navier-Stokes momentum denklemleri, süreklilik denklemi ve hal denklemi her bir zaman adımı için herhangi bir parçacığın belirlenen parçacık kümesi içindeki ağırlıkça etkisi hesap edilmektedir. Söz konusu Kernel fonksiyonunun korunum denklemlerinin herhangi bir noktadaki interpolasyon fonksiyonuna bağlı olası değerleri vermesi beklendiğinden bu fonksiyon parçacığa uygun şekilde diferansiyel biçime dönüştürülmektedir. Böylece fonksiyon, parçacığın zaman içerisindeki yer değiştirmesinin simülasyonunu gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 2.5. W(r) DPH Yöntemine ait Kernel fonksiyonu (Sampath vd., 2016)

Akışkanlar dinamiğinde akış problemi doğrusal olmayan bir şekilde tanımlanmak istenirse kısmi diferansiyel denklemler kullanılabilmektedir. Ağdan bağımsız olan DPH ile Lagrange yaklaşımı esas alındığı için, belirli bir hacimdeki akışkan sonlu sayıda parçacık kabulü ile modellenebilmektedir. Bu parçacıklar hem kendi kütlelerini hem de herhangi bir fiziksel özelliklerini taşıyabilmektedirler. Parçacığın hareketini ifade etmek için aşağıdaki integral interpolasyonu kullanılmaktadır (Liu ve Liu, 2003; Monaghan, 1992).

$$F(r) = \int_{\Omega} F(r')W(r - r', h)dr \tag{2.38}$$

Burada r, F değişkeninin elde edildiği konumu, r',değişkenin bilindiği konumu, Ω, çözüm alanını tanımlamaktadır. W, ağırlık fonksiyonunu, h ağırlık fonksiyonunun etki mesafesini ifade etmektedir. $W(r - r')$ ifadesi yukarıda bahsedilen Kernel fonksiyonu olarak bilinmektedir. F fonksiyonu parçacık kümesine dayalı olarak sürekli olmayan, ayrık biçimde yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu durumda fonksiyon, bir "a" parçacığında interpolasyonludur ve h interpolasyon uzunluğundaki tüm parçacıklar üzerinde bir toplam haline gelmektedir (Liu ve Liu, 2003; Monaghan, 1992).

$$F(r_a) \approx \sum_b F\,(r_b)W(r_a - r_b, h)\Delta v_b \tag{2.39}$$

v_b, komşu parçacığın hacmini göstermektedir. $v_b = m_b/\rho_b$ olmak üzere m_b, b parçacığının kütlesini, ρ_b ise yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu durumda

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b)\frac{m_b}{\rho_b}W(r_a - r_b, h) \tag{2.40}$$

olmaktadır.

DPH Yöntemiyle hazırlanan bir modelin doğruluğu Kernel fonksiyonunun iyi seçilmesine bağlıdır (Wendland, 1995). Bu çalışmada Kernel fonksiyonu olarak

$$W(q) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \qquad 0 \le q \le 2 \tag{2.41}$$

kullanılmıştır. Üç boyutta $\alpha_D = 21/164\pi h^3$ eşittir. q, verilen r/h oranına göre a ve b parçacıkları arasındaki boyutsuz mesafedir. Sürekli bir ortamda momentumun korunumu denklemi (Sampath vd., 2016)

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \Gamma \tag{2.42}$$

Γ, viskoz kuvveti, g, yerçekimi ivmesini göstermektedir.

Momentum denklemi, komşu bir parçacıkla etkileşimin bir sonucu olarak bir parçacığın ivmesini tanımlamak için kullanılır. DPH Yönteminde momentum denklemi (DualSPHysics, 2023)

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a + \rho_b} + \Pi_{ab}\right)\nabla_a W_{ab} + g \tag{2.43}$$

burada Π_{ab} a ve b parçacıkları arasındaki viskoz terimleri ifade eder.

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \dfrac{-\alpha\overline{c_{ab}}\mu_{ab}}{\overline{\rho_{ab}}} & v_{ab}.r_{ab} < 0 \\ 0 & v_{ab}.r_{ab} > 0 \end{cases} \quad \textbf{(2.44)}$$

$r_{ab} = r_a - r_b$ parçacık koordinatlarını, $v_{ab} = v_a - v_b$ viskoziteyi,

$$\mu_{ab} = hv_{ab}.r_{ab}/(r_{ab}^2 + \eta^2) \quad \textbf{(2.45)}$$

$\overline{c_{ab}} = 0.5(c_a + c_b)$ parçacıkların ortalama ses hızlarını, $\eta^2 = 0.01h^2$ ve α, yayılımı sağlamak için uygun bir katsayıdır ($\alpha = 0.01$). Süreklilik denklemi, zayıf sıkıştırılabilir akışkan için (DualSPHysics, 2023)

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \rho_a \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad \textbf{(2.46)}$$

olarak verilmektedir. Kütlenin korunumu DPH Yöntemi ile bu denklemde ifade edilmektedir.

DPH Yönteminde akışkan zayıf sıkışabilir kabul edildiği için akışkanın basınç değeri hal denklemi yardımıyla hesaplanmaktadır (Ibrahim, 2005).

$$P = b\left[\left(\frac{\rho_a}{\rho_0}\right)^{\gamma} - 1\right] \quad \textbf{(2.47)}$$

b, sabit bir değer olup, akışkanın elastisite modülü ile bağlantılıdır. $b = c_0^2\rho_0/\lambda$ ve $\rho = 10kN/m^3$ olup suyun yoğunluğudur. γ,1-7 arasında değer alabilir($\gamma = 7$). Denklemdeki -1 ifadesi ise akışkan serbest yüzeyindeki basıncın sıfır olmasını sağlamaktadır.

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

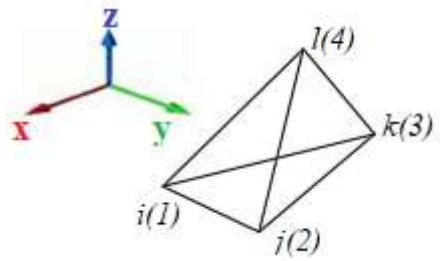
Son elli yıldır bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, yapı sistemlerinin modellenmesi ve dış yükler altındaki davranışının incelenmesi araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Daha önceleri yapı sistemlerinin ideal durumları belirlenerek geleneksel yöntemlerle çözümler elde edilmekteydi. Geleneksel yöntemlerin düzlem problemleri çözmesi, sonuçların yaklaşık olması, çözüm sürelerinin uzaması, belli geometrilerde çalışılabilmesi, malzeme seçiminin sınırlı olması gibi nedenlerden dolayı birçok yeni sayısal yöntemler teorik araştırma konusu olmuştur (Argyris ve Kelsey, 1960). Bu yöntemlerden Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), günümüzde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. SEY, mühendislik ve matematiksel fizik problemlerini çözmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu sayısal yöntem kullanılarak, yapı mekaniği ve dinamiği, akışkanlar mekaniği ve dinamiği, ısı transferi, difüzyon, elektrostatik gibi birçok alandaki problemler çözümlenmektedir. Yöntemde mühendislik probleminin küçük parçalara ayrılması istenmektedir. Parçaların dış etkilerden ve sınır şartlarından olan katkısı tüm sisteme yansıtılarak matris çözümleri gerçekleştirilmektedir. Çözümler sonucunda yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme sonlu sayıdaki düğüm noktalarında elde edilmektedir.

SEY ilk olarak 1956 yılında uzay problemlerinin çözümü için kullanılmıştır (Turner vd., 2012). Bilgisayar teknolojisinin de gelişmesi ile birlikte 1970'li yıllarda bu yöntem kendini daha da ön sıralara almaya başlamıştır (Bathe ve Wilson, 1976; Gallagher, 1975; Oden ve Sato, 1967; O C Zienkiewicz, 1972). Birçok araştırmacı bu yöntemi esas alan bilgisayar programları hazırlamıştır. Günümüzde ise ticari firmaların hem de akademisyenlerin hazırladığı pek çok sonlu elemanlar yazılımı bulunmaktadır (Kasımzade, 2018). Akademik çalışmalar için ticari yazılımların program kodları genelde açık olmadığı için akademisyenler açık kaynak kodlu yazılımları tercih etmektedir.

3.1. Dört Yüzlü (Tetrahedral) Sonlu Eleman

Şekil 3.1'deki dört yüzlü(tetrahedral) sonlu elemanında düğüm noktaları, "1" düğüm noktasından itibaren saatin ters yönünde i>j>k >l olarak kabul edilirse, sonlu eleman her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip olmaktadır. Tetrahedral sonlu eleman dört düğüm noktasında toplam on iki serbestlik derecesine sahip olmaktadır. Bu elemanın herhangi iç noktasının yer değiştirme vektörü $\{\underline{U}\}$, (i,j,k,l)

düğüm noktalarının yer değiştirme vektörü $\{U_*\}$ ile gösterilirse ve $\{\underline{U}\} = [H]\{U_*\}$ şeklinde ifade edilirse $[H]$ yaklaşım matrisi aşağıdaki şekilde düzenlenir (Kasımzade, 2018).



Şekil 3.1. Tetrahedral sonlu elemanın geometrisi (Kasımzade, 2018)

En basit halde noktada yer değiştirme x,y,z koordinatlarının doğrusal fonksiyonu olarak polinom şeklinde kabul edilebilmektedir.

$$\{\underline{U}\} = [h(x,y)]\{\alpha\} \tag{3.1}$$

$$[h(x,y)] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$\{\alpha\} = (\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4 \quad \alpha_5 \quad \alpha_6 \quad \alpha_7 \quad \alpha_8 \quad \alpha_9 \quad \alpha_{10} \quad \alpha_{11} \quad \alpha_{12})^T \tag{3.3}$$

$$\{\underline{U}\} = [u(x,y,z) \quad v(x,y,z) \quad w(x,y,z)]^T \tag{3.4}$$

Bilinmeyen $\{\alpha\}$ katsayılar vektörü, bakılan sonlu elemanın düğüm noktasının yer değiştirme vektörü

$$\{U_*\} = (u_i \quad v_i \quad w_i \quad u_j \quad v_j \quad w_j \quad u_k \quad v_k \quad w_k \quad u_l \quad v_l \quad w_l)^T \tag{3.5}$$

olarak ifade edilmektedir.

$$\{\underline{U}\}\Big|_{\substack{x=x_n \\ y=y_n}} = \{U_*\} \qquad ; n = i,j,k,l \tag{3.6}$$

$$\{\alpha\} = [h]^{-1}\{U_*\} \tag{3.7}$$

Denklem (3.6) , denklem (3.1) 'de yerine yazılırsa

$$\{\underline{U}\} = [h(x,y)][h]^{-1}\{U_*\} \tag{3.8}$$

$$\{\underline{U}\} = [H]\{U_*\} \tag{3.9}$$

Burada $[H]$ yaklaşım şekil fonksiyonu matrisini göstermektedir.

$$[H] = \begin{bmatrix} H_i & 0 & 0 & -H_j & 0 & 0 & H_k & 0 & 0 & -H_l & 0 & 0 \\ 0 & H_i & 0 & 0 & -H_j & 0 & 0 & H_k & 0 & 0 & -H_l & 0 \\ 0 & 0 & H_i & 0 & 0 & -H_j & 0 & 0 & H_k & 0 & 0 & -H_l \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

$$H_n = \frac{1}{6V}(a_n + b_n x + c_n y + d_n z); \qquad (n \leftrightarrow i,j,k,l) \tag{3.11}$$

$$6V = det\begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$a_i = det\begin{bmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{bmatrix} \; b_i = det\begin{bmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{bmatrix}$$
$$c_i = det\begin{bmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_l & z_l \end{bmatrix} \; d_i = det\begin{bmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_l & y_l \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

i,j,k,l indislerinin yer değiştirmelerinden $(i \to j \to k \to l)$ sonra uygun olarak $a_j,b_j,c_j,d_j,a_k,b_k,c_k,d_k,a_l,b_l,c_l,d_l$ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$a_j = det\begin{bmatrix} x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \\ x_i & y_i & z_i \end{bmatrix} \qquad ; b_j = det\begin{bmatrix} 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \\ 1 & y_i & z_i \end{bmatrix}$$
$$c_j = det\begin{bmatrix} 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_l & z_l \\ 1 & x_i & z_i \end{bmatrix} \qquad ; d_j = det\begin{bmatrix} 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_l & y_l \\ 1 & x_i & y_i \end{bmatrix}$$
$$a_k = det\begin{bmatrix} x_l & y_l & z_l \\ x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \end{bmatrix} \qquad ; b_k = det\begin{bmatrix} 1 & y_l & z_l \\ 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \end{bmatrix}$$
$$c_k = det\begin{bmatrix} 1 & x_l & z_l \\ 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \end{bmatrix} \qquad ; d_k = det\begin{bmatrix} 1 & x_l & y_l \\ 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \end{bmatrix}$$

$$a_l = det\begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \end{bmatrix} \qquad ; \; b_l = det\begin{bmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \end{bmatrix} \tag{3.14}$$
$$c_k = det\begin{bmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \end{bmatrix} \qquad ; d_k = det\begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix}$$

Denklem (3.9) yer değiştirme fonksiyonunu A.L.Cauchy eşitliklerinde yerine yazarak şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$
$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad ; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \qquad \textbf{(3.15)}$$
$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad ; \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\{\theta\} = [A]^T\{U\} = [A]^T[H]\{U_*\} \qquad \textbf{(3.16)}$$

veya

$$\{\theta\} = [B]\{U_*\} \qquad \textbf{(3.17)}$$

Burada $[B]$ kinematik matrisi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$[B] = [A]^T[H]$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial H_i}{\partial x} & 0 & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial H_k}{\partial x} & 0 & 0 & -\frac{\partial H_l}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial H_i}{\partial y} & 0 & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial H_k}{\partial y} & 0 & 0 & -\frac{\partial H_l}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial H_i}{\partial z} & 0 & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial H_k}{\partial z} & 0 & 0 & -\frac{\partial H_l}{\partial z} \\ \frac{\partial H_i}{\partial y} & \frac{\partial H_i}{\partial x} & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial y} & -\frac{\partial H_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial H_k}{\partial y} & \frac{\partial H_k}{\partial x} & 0 & -\frac{\partial H_l}{\partial y} & -\frac{\partial H_l}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial H_i}{\partial z} & \frac{\partial H_i}{\partial y} & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial z} & -\frac{\partial H_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial H_k}{\partial z} & \frac{\partial H_k}{\partial y} & 0 & -\frac{\partial H_l}{\partial z} & -\frac{\partial H_l}{\partial y} \\ \frac{\partial H_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial H_i}{\partial x} & -\frac{\partial H_j}{\partial z} & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial x} & \frac{\partial H_k}{\partial z} & 0 & \frac{\partial H_k}{\partial x} & -\frac{\partial H_l}{\partial z} & 0 & -\frac{\partial H_l}{\partial x} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Denklem (3.11) burada dikkate alınırsa, kinematik matris aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır.

$$[B] = \frac{1}{6V}\begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & -b_i & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & -b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & -c_i & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & -c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & -d_i & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & -d_l \\ c_i & b_i & 0 & -c_j & -b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & -c_l & -d_l & 0 \\ 0 & d_i & 0 & 0 & -d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & -d_l & 0 \\ d_i & 0 & b_i & -d_j & 0 & -b_j & d_k & 0 & b_k & -d_l & 0 & -b_l \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.19)}$$

Denklem (3.1) 'de yer değiştirme fonksiyonu doğrusal olduğundan Denklem (3.19) elemanları sabit kalmaktadır. Dört yüzlü sonlu elemanın rijitlik matrisi

$$[K] = \int_{V_m} [H]^T [A][K_0][A]^T[H]dv \qquad \textbf{(3.20)}$$

ile ifade edilmektedir.

$$\left[K^{[m]}\right] = \int_{V^{[m]}} \left[H^{[m]}(x,y)\right]^T [A]\left[K_0{}^{[m]}\right][A]^T\left[H^{[m]}(x,y)\right]dV^{[m]} \qquad \textbf{(3.21)}$$

Burada $[B] = [A]^T[H]$=sabit olduğu dikkate alınırsa, m. sonlu elemanın rijitlik matrisi

$$\left[\underline{K}\right] = [B]^T[K_0][B]V \qquad \textbf{(3.22)}$$

ile ifade edilmektedir.

$$K_0 = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.23)}$$

Yerel koordinat sisteminde eşdeğer düğüm noktası kuvvetleri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\{R^{[m]}\} = -\int_{V^{[m]}} \left[H^{[m]}(x,y)\right]^T \{q^{[m]}(x,y)\} dV^{[m]} \quad \textbf{(3.24)}$$

Yukarıdaki denklemlerdeki gibi her bir m. elemanın yerel koordinat sisteminde rijitlik matrisi Denklem (3.23) ve eşdeğer düğüm kuvvetler vektörü Denklem (3.24) bulunduktan sonra, global koordinat sisteminde sistemin rijitlik matrisi, düğüm noktası kuvvetlerinin vektörü $[K]\{U_*\} = \{F\}$ elde edilmektedir. Sınır koşulları dikkate alınır, düğüm yer değiştirmeleri $\{U_*\}$ bulunur, buradan bakılan m. elemanın yer değiştirmeleri ($\{U_*{}^{[m]}\} = \left(\{U_{*i}\} \quad \{U_{*j}\} \quad \{U_{*k}\} \quad \{U_{*l}\}\right)^T$) ayrılarak yerel koordinat sisteminde

($\left\{\overline{U_*}^{[m]}\right\} = \left(\{\overline{U}_{*i}\} \quad \{\overline{U}_{*j}\} \quad \{\overline{U}_{*k}\} \quad \{\overline{U}_{*l}\}\right)^T$) ifade edildikten sonra şekil değiştirme ve iç kuvvetleri şöyle hesaplanır (Kasımzade, 2018):

$$\left\{\overline{\theta}^{[m]}\right\} = [B]\left\{\overline{U}_*^{[m]}\right\} \quad \textbf{(3.25)}$$

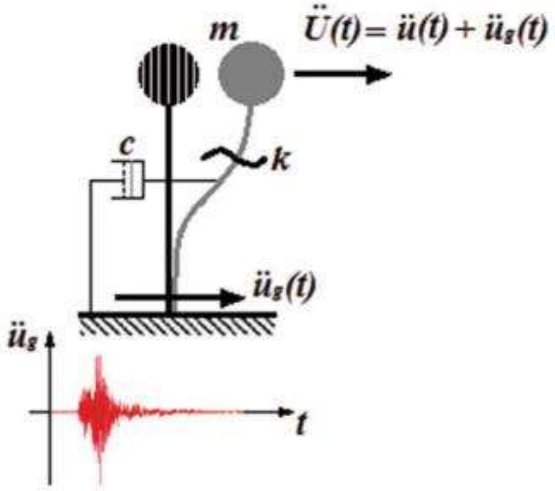
$$\left\{\overline{S}^{[m]}\right\} = \left[K_0^{[m]}\right]\left\{\overline{\theta}^{[m]}\right\} \quad \textbf{(3.26)}$$

4. SİSMİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Betonarme ayaklı su deposunun sismik analizi için zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizler için Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi uygulanmış ve her bir zaman adımında çözüm için durum-uzay modeli ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Hareket denklemlerinin sayısal çözümünde Runge-Kutta Yöntemi kullanılmıştır.

4.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz

4.1.1. Sönümlü Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Sistemlerin Denklemlerinin Kurulması



Şekil 4.1. Deprem etkisindeki tek serbestlik dereceli sönümü sistem (Cimellaro ve Marasco, 2018)

Deprem etkisi altındaki tek serbestlik dereceli sistemin matematik modeli Şekil 4.1'de verilmektedir. Tek serbestlik dereceli doğrusal sistemlerin hareket denklemi

$$m.\ddot{u} + c.\dot{u} + k.u = -m\ddot{u}_g(t) \quad \textbf{(4.1)}$$

ile ifade edilmektedir. Burada m, kütleyi, c, sönümü, k, rijitliği, $\ddot{u}$, rölatif ivmeyi, $\dot{u}$,rölatif hızı, u, rölatif yer değiştirmeyi, $\ddot{u}_g(t)$, ise deprem yer hareketini ait ivme kaydını göstermektedir. Bu denklemin çözümü için Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemi kullanılmaktadır (Cimellaro ve Marasco, 2018).

4.1.2. Runge-Kutta Yöntemi

Runge-Kutta Yönteminde, $i + 1$ zamanındaki çözüm, aralık içindeki bir dizi noktadaki (n) fonksiyon değerlerinin yaklaşık olarak değerlendirilmesiyle elde

edilmektedir (Epperson, 2013). Bu yöntemin doğruluğu, yöntemin sırasını tanımlayan nokta sayısı ile doğru orantılıdır. Dördüncü dereceden bir denklemde, iyi bir yaklaşım elde etmek için Denklem (4.2) gibi dengeli bir denklem kullanılmaktadır (Şekil 4.2).

$$u_{i+1} = u_i + (c_1k_1 + c_2k_2 + c_3k_3 + c_4k_4).\Delta t \tag{4.2}$$

Zaman aralığı ile çarpılan terim, söz konusu aralıktaki fonksiyonun ortalama eğimini tanımlamaktadır. Ek olarak, k_i katsayıları, belirtilen aralık ile fonksiyon eğiminin tahmini arasındaki çarpım olarak elde edilen artışları temsil etmektedir (Butcher, 1963). Bu artışlar aşağıda açıklandığı gibi varsayılmaktadır:

- k_1: $f_1 = f(t_i)$ kullanarak t_i zamanındaki eğime bağlı katsayı.
- k_2: $f_2 = f(t_i) + \frac{\Delta t}{2}k_1$ tahminini kullanarak $\frac{t_{i+1}+t_i}{2}$ zamanındaki eğime bağlı katsayı.
- k_3:$f_3 = f(t_i) + \frac{\Delta t}{2}k_2$ tahminini kullanarak $\frac{t_{i+1}+t_i}{2}$ zamanındaki eğime bağlı katsayı.
- k_4:$f_4 = f(t_i) + \Delta t k_3$kullanarak ti+1 zamanındaki eğime bağlı katsayı.

Bu tanımlamalara göre,aşağıdaki denklemler k_i katsayılarının matematiksel ifadesini tanımlamaktadır.

$$\begin{cases} k_1 = f(t_i, u_i) = \left[\frac{du}{dt}\right] \quad ; \quad t = t_i; u = u_i \\ k_2 = f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, u_i + k_1\frac{\Delta t}{2}\right) = \left[\frac{du}{dt}\right] \quad ; \quad t = t_i + \frac{\Delta t}{2}; u = u_i + k_1\frac{\Delta t}{2} \\ k_3 = f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, u_i + k_2\frac{\Delta t}{2}\right) = \left[\frac{du}{dt}\right] \quad ; \quad t = t_i + \frac{\Delta t}{2}; u = u_i + k_2\frac{\Delta t}{2} \\ k_4 = f(t_i + \Delta t, u_i + k_3\Delta t) = \left[\frac{du}{dt}\right] \quad ; \quad t = t_i + \Delta t; u = u_i + k_3\Delta t \end{cases} \tag{4.3}$$

Yukarıda yazılan c_i katsayıları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

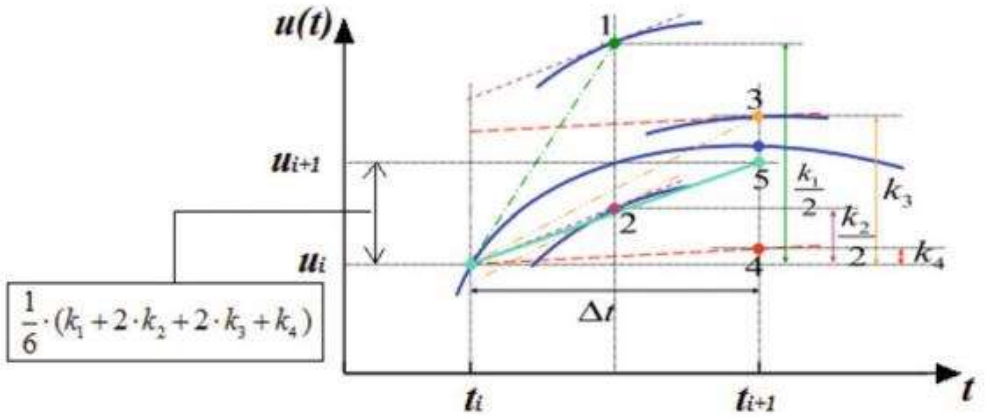
$$c_1 = c_4 = \frac{1}{6}; c_2 = c_3 = \frac{1}{3} \tag{4.4}$$

Problemin çözümü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$u_{i+1} = u_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4).\Delta t \tag{4.5}$$

Bu yöntem açıktır, çünkü t_{i+1} zamanındaki çözüm, $t_i\left(\dot{u}(t_i)\right)$ zamanındaki bağımsız değişkenin ilk türevine dayanan k_i katsayılarına bağlı olmaktadır. Δt zaman aralığını seçmek için özel bir yöntem yoktur. Δt stabilite problemlerine neden olacak kadar büyük olmamalı veya çok küçük olmamalıdır. Çünkü sayısal sürecin çözülmesi imkansız olabilmektedir. Dinamik hareket denklemi ikinci mertebeden bir diferansiyel

denklem ile tanımlandığından, Runge-Kutta Yöntemi adi birinci mertebeden diferansiyel iki doğrusal denklemin eşdeğeri bir sistem olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 4.2. k_i katsayılarının tanımlanması ve ortalama eğimin belirlenmesi (Cimellaro ve Marasco, 2018)

$$m.\ddot{u} + c.\dot{u} + k.u = F(t) \tag{4.6}$$

$$\dot{u} = v \tag{4.7}$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m}(F(t) - k.u - c.v) \tag{4.8}$$

Tek serbestlik dereceli sönümlü sistemin dinamik tepkisi dördüncü mertebeden Runge-Kutta Yöntemi ile değerlendirdiği düşünülmektedir. Hareket denkleminin iki adi diferansiyel denkleme ayrıştırılması gerektiğinden, iki set k_i katsayıları belirlenmesi gerekmektedir.

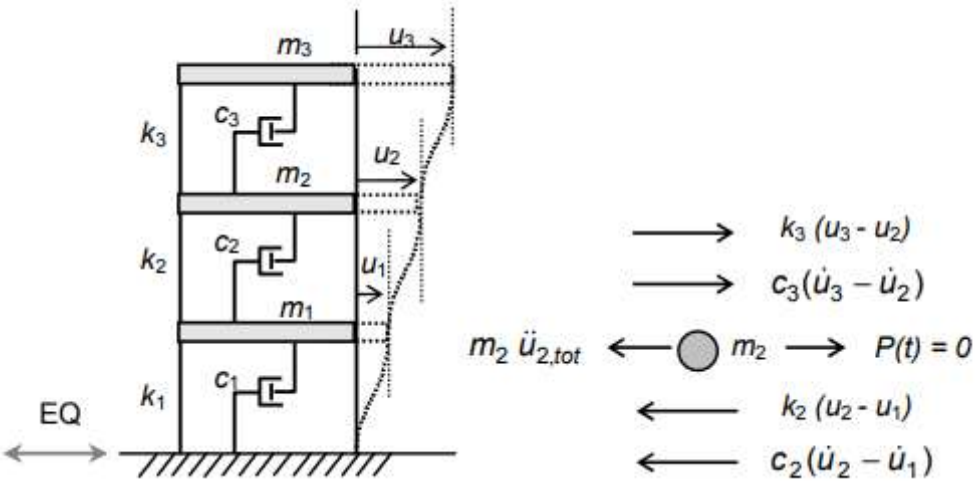
$$\begin{cases} k_1(I) = v_i \\ k_2(I) = v_i + k_1(II)\dfrac{\Delta t}{2} \\ k_3(I) = v_i + k_2(II)\dfrac{\Delta t}{2} \\ k_4(I) = v_i + k_3(II)\Delta t \end{cases} \tag{4.9}$$

$$\begin{cases} k_1(II) = \dfrac{1}{m}(F(t_i) - k.u_i - c.v_i) \\ k_2(II) = \dfrac{1}{m}\left[F\left(t_i + \dfrac{\Delta t}{2}\right) - k.\left(u_i + k_1(I)\dfrac{\Delta t}{2}\right) - c.\left(v_i + k_1(II)\dfrac{\Delta t}{2}\right)\right] \\ k_3(II) = \dfrac{1}{m}\left[F\left(t_i + \dfrac{\Delta t}{2}\right) - k.\left(u_i + k_2(I)\dfrac{\Delta t}{2}\right) - c.\left(v_i + k_2(II)\dfrac{\Delta t}{2}\right)\right] \\ k_4(II) = \dfrac{1}{m}[F(t_i + \Delta t) - k.(u_i + k_3(I)\Delta t) - c.(v_i + k_3(II)\Delta t)] \end{cases} \tag{4.10}$$

v_i, t_i zamanındaki tek serbestlik dereceli sistemin hızıdır(v_i=$\dot{u}_i$). Runge-Kutta Yöntemine göre yer değiştirme ve hız tepkisi aşağıdaki şekli almaktadır (Cimellaro ve Marasco, 2018).

$$\begin{cases} u_{i+1} = u_i + \frac{1}{6}[k_1(I) + 2k_2(I) + 2k_3(I) + k_4(I)].\Delta t \\ \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{1}{6}[k_1(II) + 2k_2(II) + 2k_3(II) + k_4(II)].\Delta t \\ \ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{m}(F(t_i + \Delta t) - k.u_{i+1} - c.\dot{u}_{i+1}) \end{cases} \quad \textbf{(4.11)}$$

4.1.3. Sönümlü Çok Serbestlik Dereceli Doğrusal Sistemlerin Denklemlerinin Kurulması



Şekil 4.3. Çok serbestlik dereceli doğrusal sistem (Armouti, 2015)

Şekil 4.3'de çok serbestlik derecesine sahip bir örnek verilmektedir. Sonlu boyutlu doğrusal dinamik bir sistem için hareket denklemi, aşağıda gösterildiği gibi bir dizi n tane ikinci mertebeden diferansiyel denklem tarafından tanımlanmaktadır (Kasımzade ve Tuhta, 2012).

$$[\mathrm{m}]\{\ddot{\mathrm{u}}(\mathrm{t})\} + [\mathrm{c}]\{\dot{\mathrm{u}}(\mathrm{t})\} + [\mathrm{k}]\{\mathrm{u}(\mathrm{t})\} = [\mathrm{d}]\{\mathrm{f}_{\oplus}(\mathrm{t})\} \quad \textbf{(4.12)}$$

Denklem (4.12) , aşağıdaki gibi birinci dereceden diferansiyel denklemlerin bulunduğu durum-uzay biçimine dönüştürülmektedir.

$$\dot{\mathrm{z}}(\mathrm{t}) = [\mathrm{A_c}]\mathrm{z}(\mathrm{t}) + [\mathrm{B_c}]\{\mathrm{f}_{\oplus}(\mathrm{t})\} \quad \textbf{(4.13)}$$

$$\{y(t)\} = [C_a]\{\ddot{u}\} + [C_v]\{\dot{u}\} + [C_d]\{u\} = [C]z(t) + [D]\{f_{\oplus}(t)\} \quad \textbf{(4.14)}$$

$$[\mathrm{A_c}] = \begin{bmatrix} [0] & [\mathrm{I}] \\ -[\mathrm{m}]^{-1}[\mathrm{k}] & -[\mathrm{m}]^{-1}[\mathrm{c}] \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.15)}$$

$$[B_c] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[m]^{-1}[d] \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.16)}$$

$$\{z(t)\} = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.17)}$$

$$[C] = \left[[C_d] - [C_a][m]^{-1}[k], [C_v] - [C_a][m]^{-1}[c]\right] \quad \textbf{(4.18)}$$

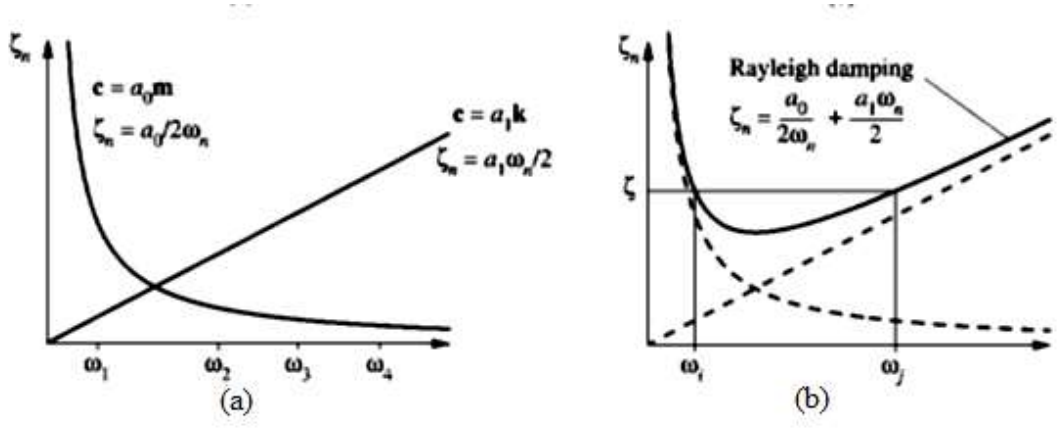
$$[D] = [C_a][m]^{-1}[d] \quad \textbf{(4.19)}$$

Denklem (4.13) ve (4.14) 'de verilen durum uzay modelinin bileşenlerine açıklık sağlamak için aşağıdaki Tablo 4.1'de açıklamalar verilmiştir.

Tablo 4.1. Durum-uzay modelinin bileşenlerinin açıklaması (Kasımzade ve Tuhta, 2012)

Değişken parametre sembolü	Tanımlama	Matris boyutu
z	Durum vektörü	$n_1 ile\ 1$
$f_{\oplus}$	Giriş depremin yükü	$r_1\ ile\ 1$
y	Giriş vektörü	$m_1\ ile 1$
A_c	Dinamik matris	$n_1\ ile\ n_1$
B_c	Giriş matrisi	$n_1\ ile\ r_1$
$[\ C]$	Çıkış etkisi matrisi	$m_1\ ile\ n_1$
$[D]$	Direkt transmisyon matrisi	$m_1\ ile\ r_1$
$[\ d]$	Giriş etkisi matrisi	$n_2\ ile\ r_1$

4.1.4. Sönüm Matrisinin Kurulması



Şekil 4.4. Doğal frekans ile modal sönüm oranlarının değişimi (a) kütle orantılı sönüm ve rijitlik orantılı sönüm (b) Rayleigh sönümü (Chopra, 2007)

Şekil 4.4'de doğal frekans ile modal sönümün nasıl değiştiği görülmektedir. Rayleigh sönümü [C]=α[M]+β[K] ile ifade edilmektedir.

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_i} & \omega_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\alpha\\ \beta\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\xi_i\\ \xi_j\end{Bmatrix} \tag{4.20}$$

$\omega_i, \omega_j, \xi_i, \xi_j$ i. ve j.ci modlar için doğal frekanslar ve sönüm oranlarıdır. Rayleigh sönüm matrisi için gerekli olan sönüm oranı %5 kabul edilmiştir (Chopra, 2007).

4.2. Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi

Sönümsüz ve dış kuvvetsiz ikinci dereceden hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır (Guyan, 1965; Paz, 1984).

$$\begin{bmatrix} M_{pp} & M_{ps} \\ M_{sp} & M_{ss} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{r}_p \\ \ddot{r}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{ps} \\ K_{sp} & K_{ss} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_p \\ r_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

Burada

$$r_p = \bar{r}_p \cos\omega t \tag{4.22}$$

$$r_s = \bar{r}_s cos\omega t \tag{4.23}$$

$$\begin{bmatrix} K_{pp} - \omega^2 M_{pp} & K_{ps} - \omega^2 M_{ps} \\ K_{sp} - \omega^2 M_{sp} & K_{ss} - \omega^2 M_{ss} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \overline{r_p} \\ \overline{r_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

olarak düzenlenmektedir.

Statik yoğunlaştırma denklemine bu kısmın özdeğer problemi doğrudan uygulanırsa,

$$\begin{aligned}[K_c - \omega^2 M_c] &= \left[K_{pp} - \omega^2 M_{pp}\right] \\ &- \left[K_{ps} - \omega^2 M_{ps}\right][K_{ss} - \omega^2 M_{ss}]^{-1}\left[K_{sp} - \omega^2 M_{sp}\right]\end{aligned} \tag{4.25}$$

olmaktadır. Yeni bir koordinat dönüşüm matrisi tanımlanarak,

$$T_c = \begin{bmatrix} I_{nxn} \\ [K_{ss} - \omega^2 M_{ss}]^{-1}\left[K_{sp} - \omega^2 M_{sp}\right] \end{bmatrix}_{Nxn} \tag{4.26}$$

$$T_c{}^T[K - \omega^2 M]T_c = T_c{}^T K T_c - \omega^2 T_c{}^T M T_c$$

elde edilmektedir. Bu durumda, yoğunlaştırılmış kütle ve rijitlik matrisleri aşağıdaki eşitliklerle elde edilmektedir.

$$K_c = T_c{}^T K T_c \tag{4.27}$$

$$M_c = T_c{}^T M T_c \tag{4.28}$$

Yoğunlaştırılmış kütle ve rijitlik matrisleri, bir ω doğal frekansındaki tüm sistemin K ve M matrislerinin dinamik özelliklerini tamamen ifade etmektedir (Paz, 1984).

- ω doğal frekansı, ilk mod frekansı, daha yüksek bir frekans ya da herhangi bir modun frekansı olabilmektedir.
- ω doğal frekansı sıfır ise, Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi Guyan Yoğunlaştırma Yöntemine dönüşmektedir.
- Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemini kullanarak hesaplanan yoğunlaştırılmış rijitlik matrisi tüm sistemin rijitlik matrisinin bantlılık özelliğini korumaktadır.
- Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi modal frekansları hesaplamak amacıyla yinelemeli olarak uygulanmaktadır.
  - ✓ i.iterasyonda , ω(i) frekansını seç.
  - ✓ ω(i) kullanarak T_c dönüşüm matrisini hesapla.
  - ✓ T_c,K, ve M matrislerini kullanarak K_c ve M_c matrislerini hesapla.
  - ✓ Bir sonraki ω(i+1) .iterasyon için modal frekansı hesaplamak amacıyla, küçültülmüş ölçüdeki K_c ve M_c için özdeğer problemini çöz.
  - ✓ i=i+1 iterasyonunda , tekrar 2. adımı tekrarla (Gavin, 2016).

4.2.1. Dinamik Yoğunlaştırma Yöntemi ile Hareket Denkleminin Yazılması

Yapı sistemlerinin yer hareketi etkisi altındaki sönümlü hale ait hareket denklemi

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad \textbf{(4.29)}$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada [M], [C], [K] sırasıyla ortak sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, {U}ise sırasıyla toplam ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini, {F} ise dış yük vektörünü göstermektedir.

Dinamik yoğunlaştırmadan sonra elde edilen dönüşüm matrisi T'ye göre düzenleme yapılmaktadır (Paz, 1984).

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U_p \\ U_s \end{Bmatrix} = [T]\{u\} \quad \textbf{(4.30)}$$

$$[M][T]\ddot{U} + [C][T]\dot{U} + [K][T]\{U\} = \{F\} \quad \textbf{(4.31)}$$

$$[T]^T[M][T]\{\ddot{U}\} + [T]^T[C][T]\{\dot{U}\} + [T]^T[K][T]\{U\} = [T]\{F\} \quad \textbf{(4.32)}$$

Yoğunlaştırılmış sistem için hareket denklemi,

$$[M_r]\{\ddot{u}\} + [C_r]\{\dot{u}\} + [K_r]\{u\} = \{F_r\} \quad \textbf{(4.33)}$$

olmaktadır. İndirgenmiş kütle, sönüm, rijitlik matrisleri ve dış kuvvet vektörü aşağıdaki gibidir (Paz, 1984; Paz ve Leigh, 2004).

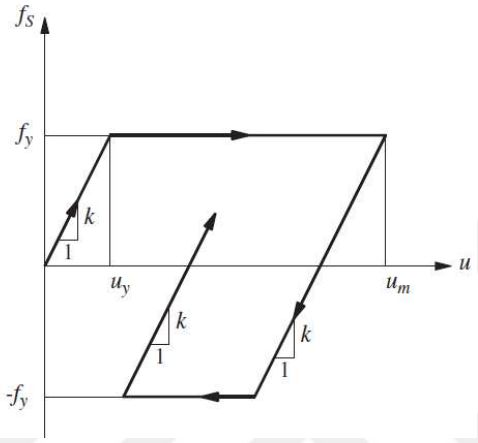
$$[M_r] = [T]^T[M][T] \quad \textbf{(4.34)}$$

$$[C_r] = [T]^T[C][T] \quad \textbf{(4.35)}$$

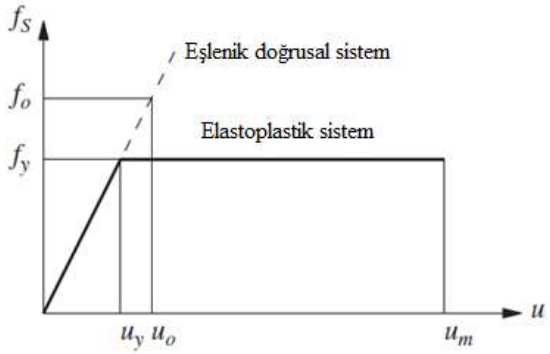
$$[K_r] = [T]^T[K][T] \quad \textbf{(4.36)}$$

$$\{F_r\} = [T]^T\{F\} \quad \textbf{(4.37)}$$

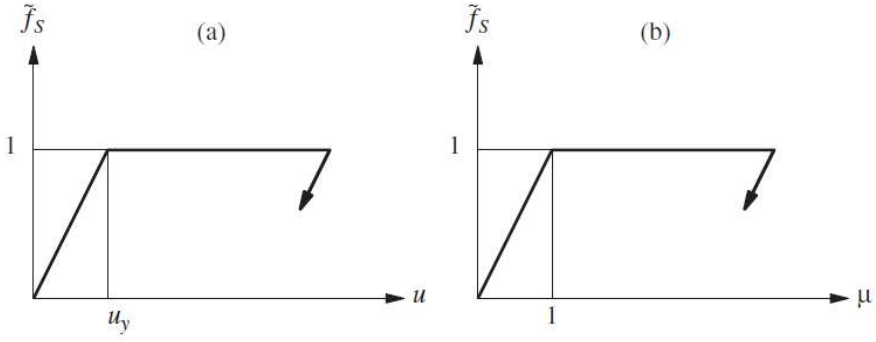
4.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz



Şekil 4.5. Elastoplastik kuvvet-yer değiştirme grafiği (Chopra, 2007)



Şekil 4.6. Elastik ve elastoplastik sistem (Chopra, 2007)



Şekil 4.7. Normalize edilmiş kuvvet- yer değiştirme ilişkisi (Chopra, 2007)

İnelastik sistem için hareket denklemi aşağıdaki gibi verilmektedir (Chopra, 2007).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = -m\ddot{u}_g(t) \quad \textbf{(4.38)}$$

$f_s(u)$ Şekil 4.5'ten görüldüğü gibi elastoplastik sistem için dengeleyici kuvveti ifade etmektedir. Denklem (4.38) hareket denklemi Runge-Kutta Yöntemi ile çözülebilmektedir.

u(t) yer değiştirme, ω_n, ξ ve u_y değerlerine bağlıdır. Hareket denkleminin her iki tarafı m 'ye bölünürse,

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u_y \tilde{f}_s(u) = -\ddot{u}_g(t) \quad \textbf{(4.39)}$$

bağıntısına ulaşılmaktadır. Buradaki değişkenler

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \textbf{(4.40)}$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad \textbf{(4.41)}$$

$$\tilde{f}_s(u) = \frac{f_s(u)}{f_y} \quad \textbf{(4.42)}$$

olarak verilmektedir. Şekil 4.6'dan aşağıdaki eşitlikler yazılmaktadır.

$$\bar{f}_y = \frac{f_y}{f_0} = \frac{u_y}{u_0} \quad \textbf{(4.43)}$$

$$f_y = ku_y \quad \textbf{(4.44)}$$

$$f_0 = ku_0 \quad \textbf{(4.45)}$$

$$R_y = \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} \quad \textbf{(4.46)}$$

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad \textbf{(4.47)}$$

burada f_y, akma dayanımını, f_0, yer hareketi sırasında yapının doğrusal kalması için gereken en küçük akma dayanımını, u_y, akma şekil değişimini, u_0, eşlenik doğrusal sistemin şekil değişiminin tepe değerini, u_m, elastoplastik sistemde yer hareketi etkisinde oluşan şekildeğişiminin tepe değerini, k, eşlenik eşlenil doğrusal sistemin rijitliğini, $\bar{f}_y$, boyutsuz akma dayanımını, R_y, dayanım azaltma katsayısını, μ, süneklik oranını göstermektedir (Şekil 4.6). Denklem (4.46) ve (4.47) düzenlenirse

$$\frac{u_m}{u_0} = \mu\bar{f}_y = \frac{\mu}{R_y} \quad \textbf{(4.48)}$$

elde edilmektedir. Yer değiştirme, hız ve ivme süneklik oranına göre düzenlenirse

$$\mu(t) \equiv u(t)/u_y \quad \textbf{(4.49)}$$

$$u(t) = u_y\mu(t) \quad \textbf{(4.50)}$$

$$\ddot{u}(t) = u_y\ddot{\mu}(t) \quad \textbf{(4.51)}$$

elde edilmektedir. Süneklik oranına göre hareket denklemi ise

$$\ddot{\mu} + 2\zeta\omega_n\dot{\mu} + \omega_n^2\tilde{f}_s(\mu) = -\omega_n^2\frac{\ddot{u}_g(t)}{a_y} \quad \textbf{(4.52)}$$

olmaktadır.

$$a_y = f_y/m \quad \textbf{(4.53)}$$

olarak ifade edilmektedir.

Burada a_y, akma dayanımı f_y kadar kuvvet oluşturacak kütle ivmesini ifade etmektedir.Denklem (4.52) 'ye göre $\ddot{u}_g(t)$'nin iki katına çıkması durumu ya da akma dayanımının yarıya düşmesi durumu, $\mu(t)$ üzerinde de aynı etkiyi yaratmaktadır (Chopra, 2007).

4.4. Doğrusal Olmayan Analiz İçin Bouc-Wen Histeretik Modeli

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde kullanmak amacıyla Bouc-Wen modelinden yararlanılmıştır (Bouc, 1967; Wen, 1976). Doğrusal olmayan analizlerin yapıldığı birçok çalışmada Bouc-Wen histeretik modeli kullanılmıştır (Chatzi ve Klis, 2013; Etemadi, 2015; Facchini ve Betti, 2014; Ikhouane vd., 2007; Kasımzade vd., 2019; Pelliciari vd., 2020; Thanh, 2017; Nicolò Vaiana vd., 2019; N Vaiana vd., 2019; Zhu ve Lu, 2011) .

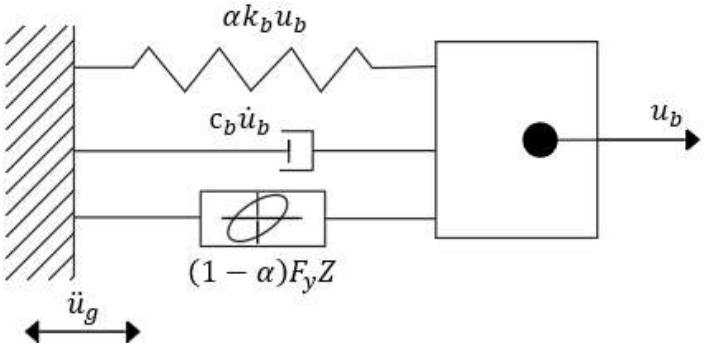
Bouc-Wen modelin yararları aşağıdaki gibidir:

- Şekil parametreleri uygun seçilerek basit bir elastoplastik davranıştan genel bir histeretik davranışa geçilebilmektedir.
- Adım-adım integrasyon süresince histeretik döngüyü izlemeye gerek olmadığı için hareketin doğrusal olmayan sayısal çözümü basitleşmektedir (Katsikadelis, 2020).

Yapı taban izolatörlerinde kullanılan Bouc-Wen modeli için aşağıdaki şekil ve denklemler kullanılmaktadır (Kasımzade vd., 2019) (Şekil 4.8) .

$$F_{kb} = k_b u_b + (1-\alpha)F_y Z \quad \textbf{(4.54)}$$

$$F_y = Q + k_b u_y \quad \textbf{(4.55)}$$

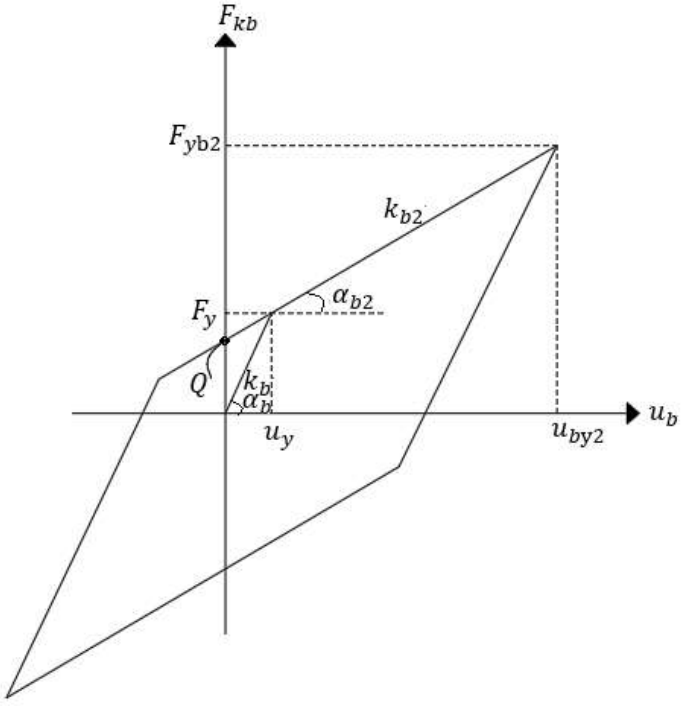


Şekil 4.8. Bouc-Wen modelin şeması (Kasımzade vd., 2019)

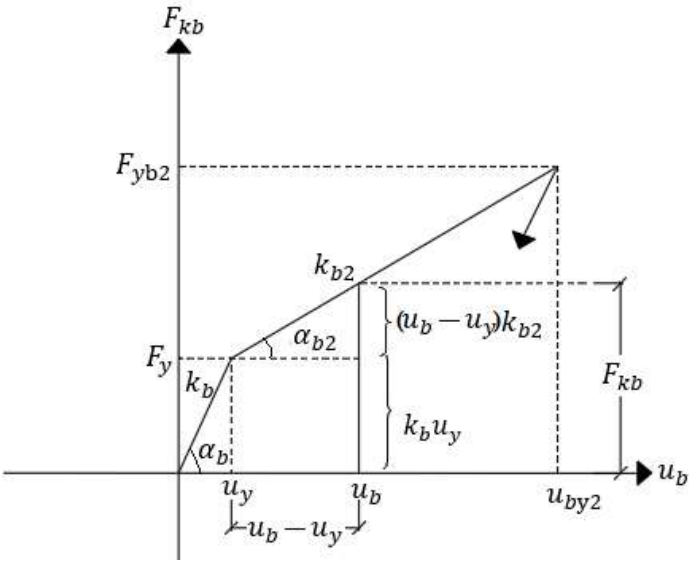
Burada F_{kb}: doğrusal olmayan dengeleyici kuvveti, F_y: doğrusal sistemdeki akma dayanımı, u_y: elastik yerdeğişmeyi, u_b: yanal yer değiştirmeyi, k_b: rijitliği, α: doğrusal kısım ile histeretik kısım arasındaki oranı göstermektedir. Z, histeretik davranışı belirleyen boyutsuz bir büyüklüktür ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemin çözümünden elde edilmektedir.

$$\dot{Z} = [a\dot{u}_b - \beta|c_b\dot{u}_b|Z|Z|^{n-1} - \gamma\dot{u}_b|Z|^n]u_y^{-1} \quad \textbf{(4.56)}$$

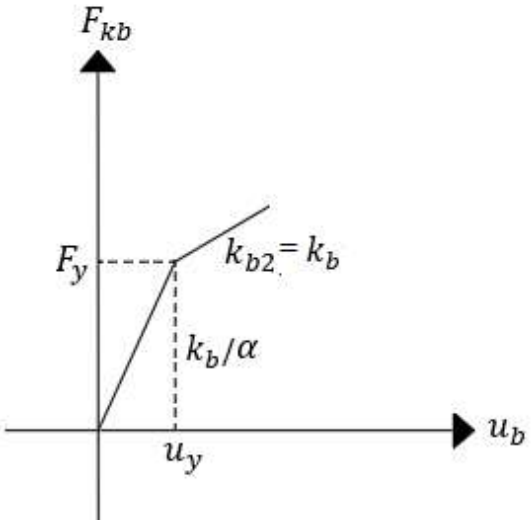
n=2, a=1, γ=0.5, β=0.5 boyutsuz şekil parametreleridir.



Şekil 4.9. Histeretik model (Kasımzade vd., 2019)

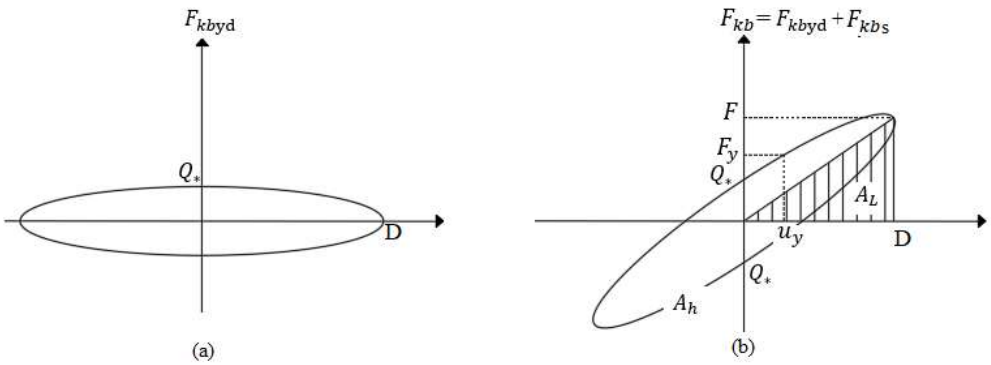


Şekil 4.10. Histeretik modelin temel geometrik oranları (Kasımzade vd., 2019)



Şekil 4.11. Yüksek başlangıç rijitlikli histeretik model (Kasımzade vd., 2019)

Doğrusal olmayan analizde eşdeğer viskoz sönüm kullanılmaktadır(Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Histeretik sönüm modeli (Kasımzade vd., 2019)

Eşdeğer viskoz sönüme ait eşitlikler aşağıda verilmektedir (Kasımzade vd., 2019).

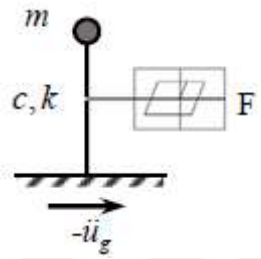
$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi r}\frac{A_h}{A_L} \tag{4.57}$$

$$A_h = \pi Q_*\left(D - u_y\right) \tag{4.58}$$

$$A_L = \frac{DF}{2} \tag{4.59}$$

$$F_{kbH} = (1-\alpha)\left(Q + k_b u_y\right)Z \tag{4.60}$$

4.4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Bouc-Wen Histeretik Modelinin Kullanılması



Şekil 4.13. Tek serbestlik dereceli sistem.

Şekil 4.13'deki gibi doğrusal olmayan tek serbestlik dereceli bir sistem için hareket denklemi Bouc-Wen histeretik modeli de dikkate alınarak durum-uzay biçiminde aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir (Du vd., 2006).

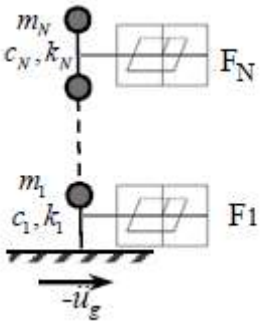
$$m.\ddot{u} + c.\dot{u} + k.u + (1-\alpha)k.z = -m\ddot{u}_g \tag{4.61}$$

$$z = [Au - \beta|u|z|z|^{n-1} - \gamma u|z|^n] \tag{4.62}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u}(t) \\ -\frac{c}{m}\dot{u}(t) - \frac{k}{m}u(t) - (1-\alpha)\frac{k}{m}z(t) - \ddot{u}_g(t) \\ \dot{u}(t) - \beta|\dot{u}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{u}(t)|z(t)|^n \end{bmatrix} \tag{4.63}$$

4.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde Bouc-Wen Histeretik Modelinin Kullanılması

Şekil 4.14'deki gibi doğrusal olmayan çok serbestlik dereceli bir sistem için hareket denklemi Bouc-Wen histeretik modeli de dikkate alınarak durum-uzay biçiminde aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir (Du vd., 2006).



Şekil 4.14. Çok serbestlik dereceli sistem

$$M.\ddot{U} + C.\dot{U} + K.U + (1-\alpha)K.Z = -M\ddot{u}_g \quad \textbf{(4.64)}$$

$$U = (u_1, u_2, u_3) \quad Z = (z_1, z_2, z_3) \quad \textbf{(4.65)}$$

$$z = [Au - \beta|u|z|z|^{n-1} - \gamma u|z|^n] \quad \textbf{(4.66)}$$

$$\{\dot{U}\} = [A_X]\{U\} + [A_z]\{z\} + \{E_x\}\ddot{u}_g(t) + [A_S]$$

$$\{U\} = \begin{Bmatrix}\{u\}\\ \{\dot{u}\}\end{Bmatrix} \quad \textbf{(4.67)}$$

$$[A_X] = \begin{bmatrix}[0] & [I]\\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C]\end{bmatrix} \quad \textbf{(4.68)}$$

$$[A_z] = \begin{bmatrix}[0]\\ -[M]^{-1}(1-\alpha)[K]\end{bmatrix} \quad \textbf{(4.69)}$$

$$\{E_x\} = \begin{Bmatrix}\{0\}\\ -\{r\}\end{Bmatrix} \quad \textbf{(4.70)}$$

$$[A_S] = \begin{bmatrix}[0]\\ [M]^{-1}\{F_S\}\end{bmatrix} \quad \textbf{(4.71)}$$

$$\{r\} = (1\ 1\ 1\ 1 \ldots 1 \ldots . 1_n)^T \quad \textbf{(4.72)}$$

5. MATLAB KISMİ DİFERANSİYEL DENKLEM ARAÇ KUTUSU

Kısmi Diferansiyel Denklem Araç Kutusu (PDE Toolbox), Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanılarak yapısal mekaniğin, ısı transferinin ve genel kısmi diferansiyel denklemlerin (PDE'ler) çözülmesi için fonksiyonlar sağlamaktadır (MATLAB, 2023). Bu araç kutusunun özellikleri;

- Deformasyonları ve gerilmeleri hesaplamak için kullanılabilmektedir.
- Yapının dinamiğinin ve titreşimin modellenmesi için, araç kutusu doğrudan zaman integrasyonu yapan bir çözücüye sahiptir.
- Doğal frekansları ve mod şekillerini bulmak için modal analiz yaparak bir bileşenin yapısal özelliklerini analiz edebilmektedir.
- Isı dağılımlarını, ısı akışını ve ısı akış oranlarını yüzeyler üzerinden hesaplamak için iletken ısı geçişi problemlerini modelleyebilmektedir.
- Difüzyon, elektrostatik ve manyetostatikler gibi standart sorunları ve özel PDE'leri de çözebilmektedir.
- İki boyutlu ve üç boyutlu geometrileri STL'den veya mesh verilerinden yararlanarak içe aktarım yapmaktadır.
- Üçgen ve tetrahedral elemanlı meshleri otomatik olarak oluşturabilmektedir.

Kısmi diferansiyel denklem (PDE) araç kutusu aşağıda verilen biçimdeki denklemleri

$$m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d\frac{\partial u}{\partial t} - \nabla.(c\nabla u) + au = f \quad \textbf{(5.1)}$$

$$\nabla.(c\nabla u) + au = \lambda du \quad \textbf{(5.2)}$$

$$-\nabla.(c\nabla u) + au = \lambda^2 mu \quad \textbf{(5.3)}$$

çözmektedir. Kısmi diferansiyel denklemler çözülürken, her kenar veya yüz için iki sınır seçeneği vardır. Dirichlet sınır koşulları, Kenar veya yüzeyde, çözüm denklemini gerçekleştirmektedir.

$$hu = r \quad \textbf{(5.4)}$$

Burada h ve r üç boyutlu (x,y,z) uzay fonksiyonlarıdır.

Genelleştirilmiş Neumann sınır koşulları: Kenarda veya yüzeyde çözüm denklemini gerçekleştirir.

$$\vec{n}.(c\nabla u) + qu = g \quad \textbf{(5.5)}$$

$\vec{n}$ birim normal vektördür. q ve g üç boyutlu uzayda (x,y,z)'ye bağlı $\partial\Omega$'de tanımlı fonksiyonlardır sağlar (MATLAB, 2023).

5.1. Doğrusal Elastisite Denklemleri

Doğrusal elastisitede, izotropik bir malzemenin rijitlik matrisi E, young modülünü, v, Poisson oranını göstermek üzere iki parametreye bağlıdır. Statik durumda denge denklemi

$$-\nabla.\sigma = f \tag{5.6}$$

Doğrusallaştırılmış küçük yer değişmelerle şekil değiştirmeler arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir sağlar (MATLAB, 2023).

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \tag{5.7}$$

Açısal momentum dengesi, gerilmenin simetrik olduğunu göstermektedir.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \tag{5.8}$$

Doğrusal elastisite teorisine göre gerilme ile şekil değiştirmeler arasındaki ilişki şöyledir.

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix} = \frac{E}{(1-v)(1-2v)}\begin{bmatrix}1-v & v & v & 0 & 0 & 0\\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0\\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{13}\\ \varepsilon_{12}\end{bmatrix} \tag{5.9}$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix} = \frac{E}{(1-v)(1-2v)}\begin{bmatrix}1-v & v & v & 0 & 0 & 0\\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0\\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{13}\\ \varepsilon_{12}\end{bmatrix} \tag{5.10}$$

Daha genişletilmiş biçimde yazılırsa,

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{21}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{32}\\ \sigma_{33}\end{bmatrix} = \frac{E}{(1-v)(1-2v)} \tag{5.11}$$

$$\begin{bmatrix} 1-\upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon \\ \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-\upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-\upsilon \end{bmatrix}$$

elde edilmektedir. Matristeki $\bullet$ simetriklik özelliğini göstermektedir.

5.2. Üç Boyutlu Doğrusal Elastisite Denklemleri

Denklem (5.6) 'nın MATLAB Kısmi Diferansiyel Araç Kutusu için yazılması durumunda

$$-\nabla(c \otimes \nabla u) = f \tag{5.12}$$

elde edilir (MATLAB, 2023).

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \tag{5.13}$$

Şekil değiştirme hem ∇u'ya hem de bunun transpozesine bağlı olmaktadır. Şekil değiştirmeden ∇u'ya bunu çevirmek gerekirse ve sütun vektör biçiminde yazılırsa;

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \partial u_x/\partial x \\ \partial u_x/\partial y \\ \partial u_x/\partial z \\ \partial u_y/\partial x \\ \partial u_y/\partial y \\ \partial u_y/\partial z \\ \partial u_z/\partial x \\ \partial u_z/\partial y \\ \partial u_z/\partial z \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

elde edilir. Bundan sonra şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkisi şöyle yazılır.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \nabla u \equiv A\nabla u \tag{5.15}$$

$$\sigma = \frac{E}{(1-\upsilon)(1-2\upsilon)} \tag{5.16}$$

$$\begin{bmatrix} 1-\upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon \\ \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-\upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-2\upsilon & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1-\upsilon \end{bmatrix}$$

$$A\nabla u$$

$$\sigma = \frac{E}{(1-\upsilon)(1-2\upsilon)}$$

$$\begin{bmatrix} 1-\upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon \\ 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 0 & 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 0 \\ 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \upsilon & 0 & 0 & 0 & 1-\upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\upsilon & 0 & 1-2\upsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 0 & 0 & 1-2\upsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2-\upsilon & 0 & 1-2\upsilon & 0 \\ \upsilon & 0 & 0 & 0 & \upsilon & 0 & 0 & 0 & 1-\upsilon \end{bmatrix} \quad \textbf{(5.17)}$$

$$\nabla u$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \quad \textbf{(5.18)}$$

$$\lambda = \frac{E\upsilon}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)} \quad \textbf{(5.19)}$$

$$2\mu + \lambda = \frac{E(1-\upsilon)}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)} \quad \textbf{(5.20)}$$

eşitlikleri elde edilir. Buna göre tekrar düzenleme yapılırsa

$$\sigma = \begin{bmatrix} 2\mu+\lambda & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & \mu & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 2\mu+\lambda & 0 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & \mu & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 2\mu+\lambda \end{bmatrix} \nabla u \equiv c\nabla u \quad \textbf{(5.21)}$$

elde edilir.

Von Mises akma kriterine ait denklemler aşağıda verilmektedir(Chen ve Han, 2007).

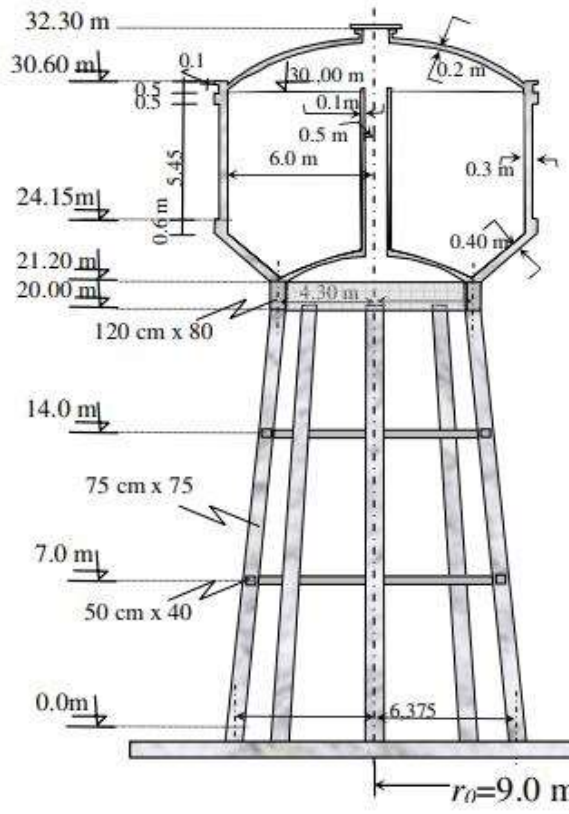
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\sigma_{xx}-\sigma_{yy}\right)^2 + \left(\sigma_{yy}-\sigma_{zz}\right)^2 + (\sigma_{zz}-\sigma_{xx})^2 + 6\left(\sigma_{xy}^2+\sigma_{yz}^2+\sigma_{zx}^2\right)^2\right]} \quad \textbf{(5.22)}$$

Söz konusu araç kutusunun kullanımı için akış şeması EK-1' de verilmektedir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Çalışma Kapsamında Oluşturulan Modeller ve Uygulamalar

Bu çalışmada 1000m^3 hacmindeki İller Bankası tip projesi olan betonarme ayaklı su deposu seçilmiş ve deprem yer hareketi etkisindeki davranışı çeşitli sıvı-yapı etkileşim sistemleri de dikkate alınarak incelenmiştir. Betonarme ayaklı su deposunun taşıyıcı sistemi kolonlar, yastık kirişler, konik kısım ve silindir kısımdan oluşmaktadır. Kolonlar 83.5cmx75cm dikdörtgen kesitli, yastık kirişler 35cmx35cm kare kesitli, hazne kalınlığı ise 40cm'dir. Deponun su hacmi 1000m^3'tür. Deponun %100 dolu seviyede su kotu 30.35m, su yüksekliği 9.25m, %50 dolu seviyede su kotu 25.73m, su yüksekliği ise 4.63m'dir. Diğer geometrik özellikler Şekil 6.1 ve Tablo 6.1'de, malzeme özellikleri ise Tablo 6.2'de verilmektedir.



Şekil 6.1. 1000m^3'lük betonarme ayaklı su deposunun düşey kesiti ve detayları (Livaoğlu, 2005)

Tablo 6.1. Su deposunun geometrik özellikleri

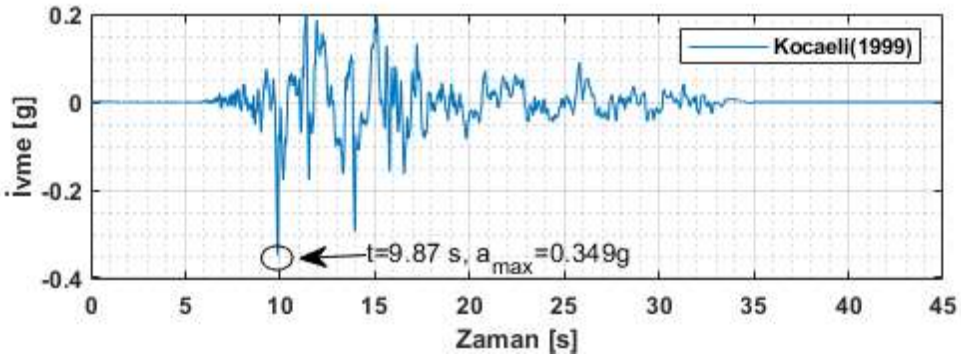
Su haznesinin özellikleri	
	Ölçüler
Hazne hacmi	1000m^3
İç çap	12m
Yükseklik	10.6m
Üst dairesel kiriş	0.6mx0.6m
Alt dairesel kiriş	0.8mx0.6m
Hazne duvar kalınlığı	0.20m
Alt döşeme kalınlığı	0.50m
Üst döşeme kalınlığı	0.20m
Depo ayak özellikleri	
Kolon boyutları	0.835mx0.75m
Kolon yüksekliği	20m
Üstteki daire çapı	8.60
Alttaki daire çapı	12.75
Kiriş boyutları	0.35mx0.35m

Tablo 6.2. Betonarme ayaklı su deposunun malzeme özellikleri

Malzeme	Sınıf	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	Birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
Beton	C25	30	0.18	23
Çelik	S420	210	0.30	78.5

6.1.1. Yer Hareketi Bilgileri

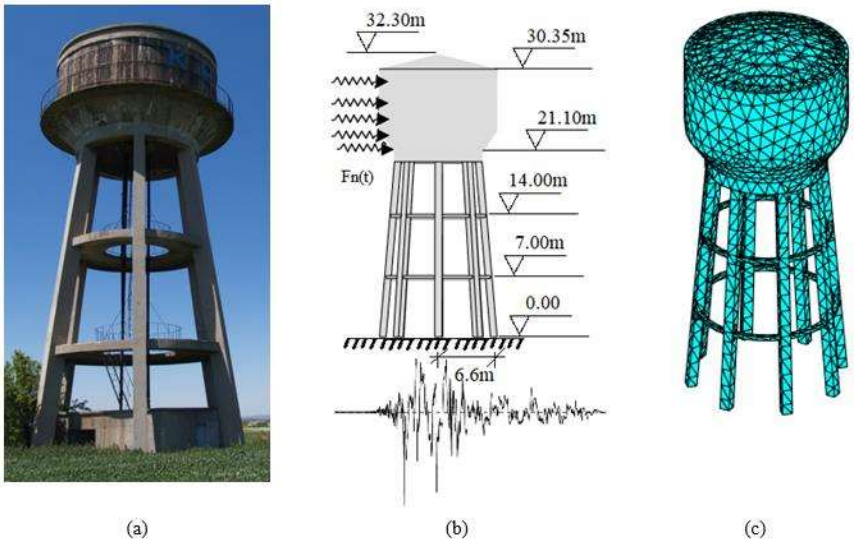
Bu çalışma kapsamında deprem yer hareketi için 17 Ağustos 1999 yılında gerçekleşen Kocaeli (Türkiye) depreminin Yarımca'da kaydedilen ve Şekil 6.2'de verilen YPT330 bileşeni kullanılmıştır (PEER, 2023).



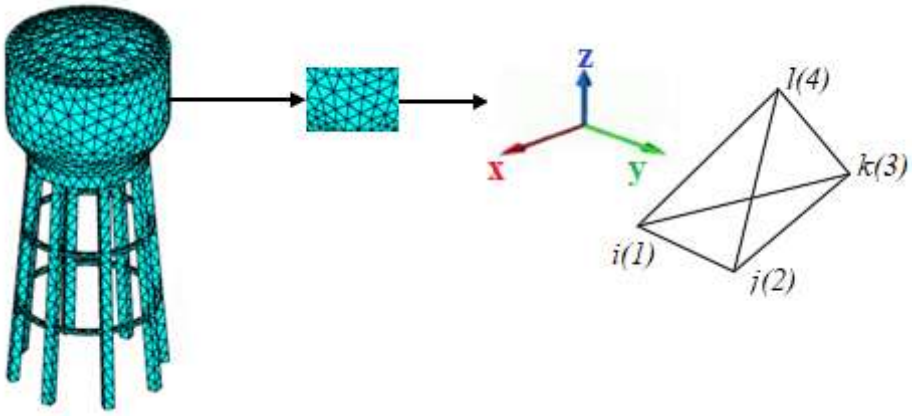
Şekil 6.2. Kocaeli depremi(1999,YPT330) ivme grafiği (PEER, 2023)

6.1.2. Betonarme Ayaklı Su Deposunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi

Şekil 6.3'de betonarme ayaklı su deposunun fotoğrafı, matematik modeli ve sonlu eleman modeli görülmektedir. Deponun taşıyıcı sistemi, silindir ve kesik koni kısım, sekiz kolon ayak ve iki dairesel kirişten oluşmaktadır. Kolonlar 83.5cmx75cm dikdörtgen kesitli, dairesel kirişler 35cmx35cm kare kesitli, hazne kalınlığı ise 30cm'dir. Sonlu eleman için solid tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinde 3894 adet düğüm noktası, 11051 adet sonlu eleman bulunmaktadır (Şekil 6.4, Tablo 6.3). Hazne cidarlarındaki sonlu eleman düğüm noktası ise 2199 adettir. Ayaklı su deposunun zemine ankastre mesnetli olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 6.3. Betonarme ayaklı su deposunun (a) fotoğrafı, (b) matematik modeli ve (c) sonlu eleman modeli



Şekil 6.4. Tetrahedral sonlu eleman modeli

Tablo 6.3. Betonarme ayaklı su deposunun sonlu eleman modeli özellikleri

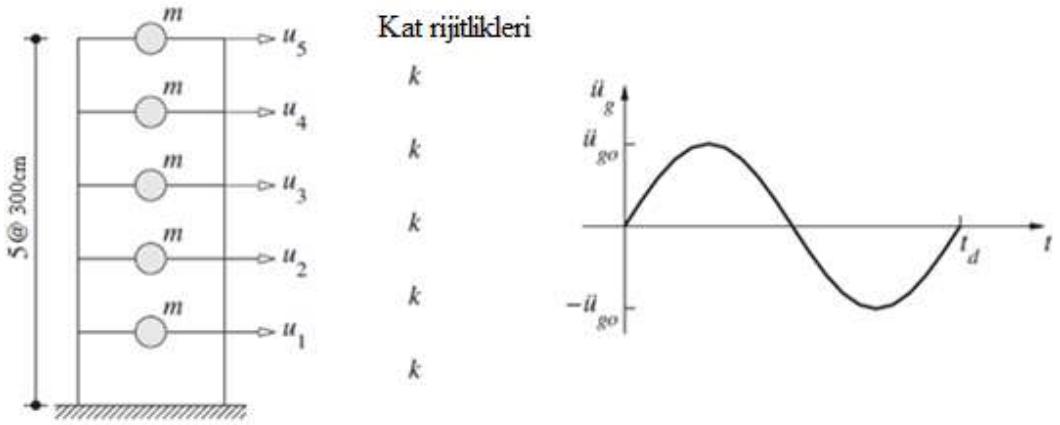
Düğüm noktası sayısı	Eleman sayısı	En büyük eleman boyutu	En küçük eleman boyutu	Ağ derecesi	Geometrik düzen
3x3894=11682	4x11051=44204	1.4993	0.7496	1.5	Doğrusal

6.2. Yazılım ve Model Doğrulama

Bu çalışma kapsamında MATLAB programlama dilinde geliştirilen yazılım (EK-1,2,3,4,5,6) kullanılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde hem kişisel bilgisayarlar hem de Uhemdeki yüksek hızlı bilgisayarlar kullanılmıştır. Ancak analizler için kişisel bilgisayarlar ile kısa sürelerde (ortalama 5-10 dakika) sonuçların elde edildiği görülmüştür. Kullanılan kişisel bilgisayar özellikleri; Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz 2.60 GHz, 6.00 GB RAM; 500.0 GB HDD; Windows 10'dur. Geliştirilen yazılım için iki türlü doğrulama yapılmıştır. Birinci doğrulama geliştirilen yazılımın doğrulaması, ikincisi ise sonlu eleman modelinin doğrulamasıdır. Birinci doğrulama kapsamında Chopra (2007)'de yer alan kat çerçevesinin dinamik analiz sonuçları ve geliştirilen yazılımın sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada beş serbestlik dereceli sistemin sonuçlarının kitaptaki sonuçlar ile aynı olduğu görülmüştür (Şekil 6.8). Ayrıca doğrusal olmayan analiz için de tek serbestlik bir sistemin doğrulaması yapılmıştır. İkinci doğrulamada ise ayaklı su deposunun sonlu eleman modelini doğrulamak için serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları (ANSYS, 2016) yazılımındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

6.2.1. Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Sistem İçin Doğrulama

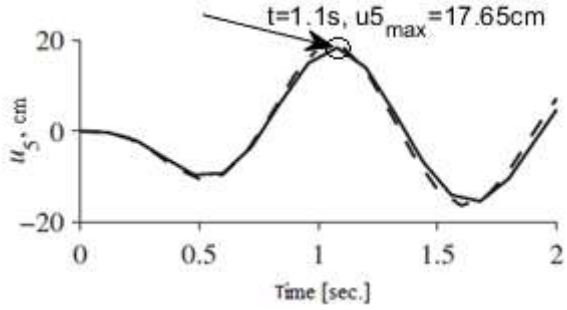
Örnek: Şekil 12 deki beş katlı kayma çerçevesi , bir tam sinüs dalgası biçimli yer ivmesi $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_{go}\, sin\, 2\,\pi t$ etkisinde hareket etmektedir. Sistem ve yükleme için t_d=1s. , $\ddot{u}_{go}$=193cm/s^2, m=0.2591kN-sn^2/cm, k=100kN/cm ve tüm modlar için aynı sönüm oranı ζ_n=%5 verilmiştir. Hareket denklemlerini ilk iki moda dönüştürerek(Δt=0.1s.) çözünüz.



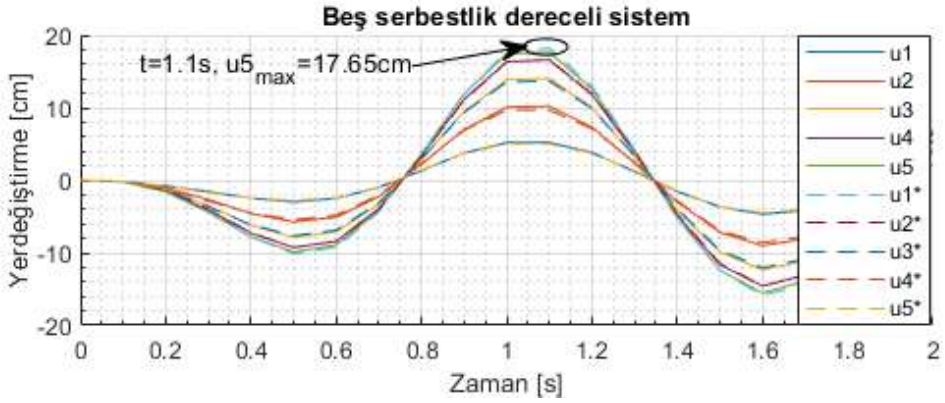
Şekil 6.5. Dinamik yük etkisindeki 5 serbestlik dereceli sistem örneği.

Çözüm:

$$m = m\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad k = k\begin{bmatrix} 2 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & -1 & 2 & -1 & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad p(t) = -m\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t)$$



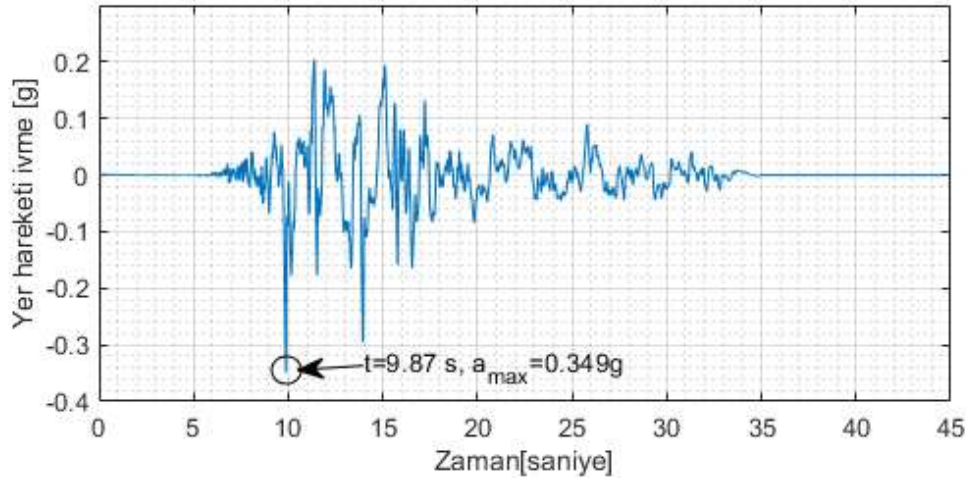
Şekil 6.6. 5.kattaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi.



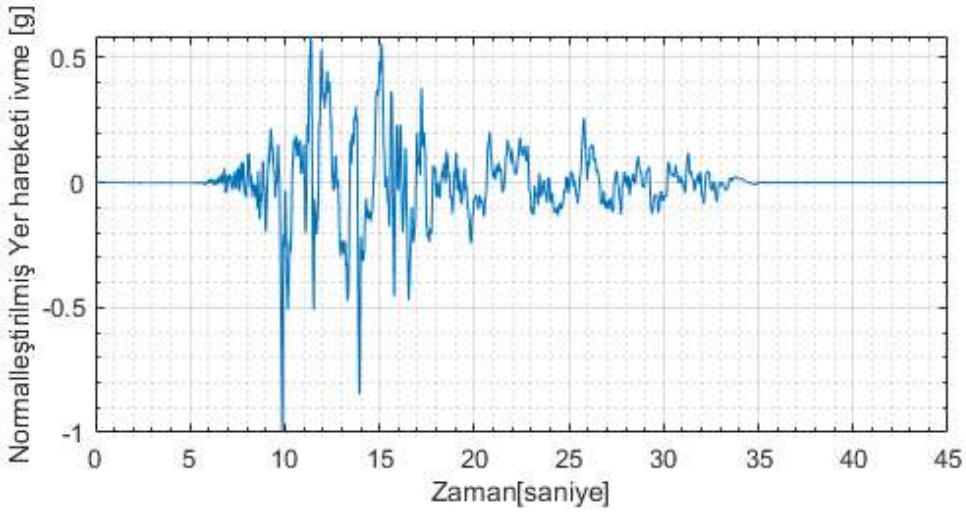
Şekil 6.7. Beş serbestlik dereceli sistemin yer değiştirmesinin zamana bağlı değişimi.

6.2.2. Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Olmayan Sistem İçin Doğrulama

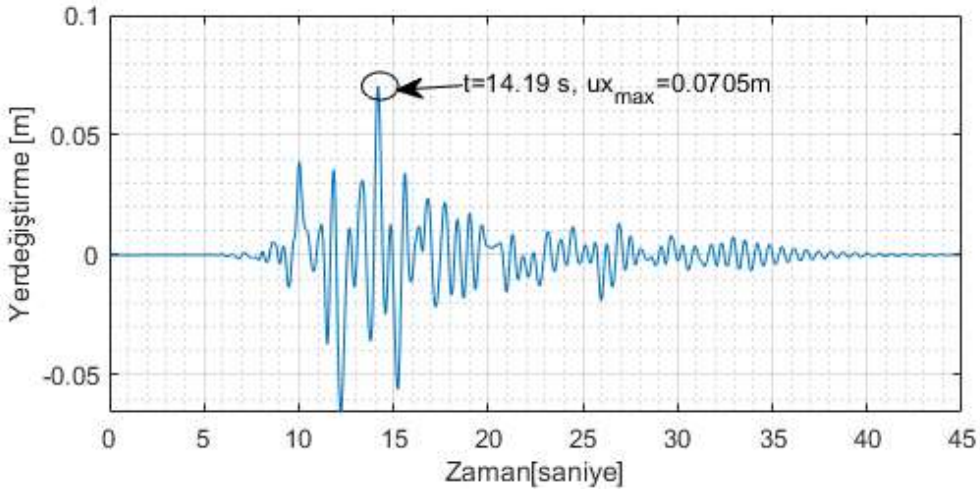
Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için Şekil 4.1'deki gibi tek serbestlik dereceli bir sistem üzerinde yazılım doğrulaması yapılmıştır. Deprem yer hareketi için Şekil 6.9'daki Kocaeli depremine ait ivme kaydı kullanılmıştır. Histeretik model için Bouc-Wen modeli kullanılmıştır. Şekil 6.10'de verilen yer değiştirme-zaman ve Şekil 6.14'de verilen düktilite-zaman grafiklerinin benzer biçimde olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.13'de verilen inelastik kuvvet/mg-zaman ve Şekil 6.15'de verilen $z=f/f_y$-$u=d/d_y$ grafiklerinin benzer biçimde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak deprem yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli bir sistemin doğrusal olmayan analiz sonuçları literatüre uygun bir biçimde elde edilmiştir.



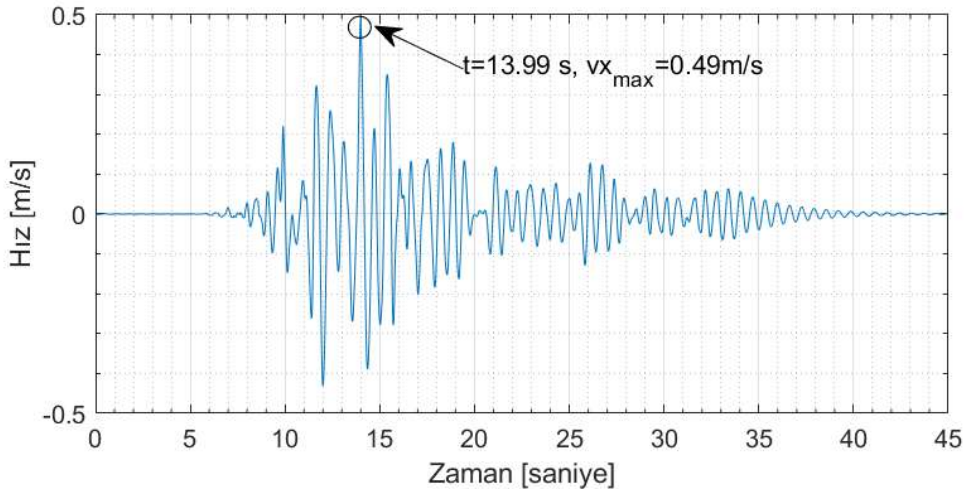
Şekil 6.8. Kocaeli depremi(1999, YPT330) ivme grafiği



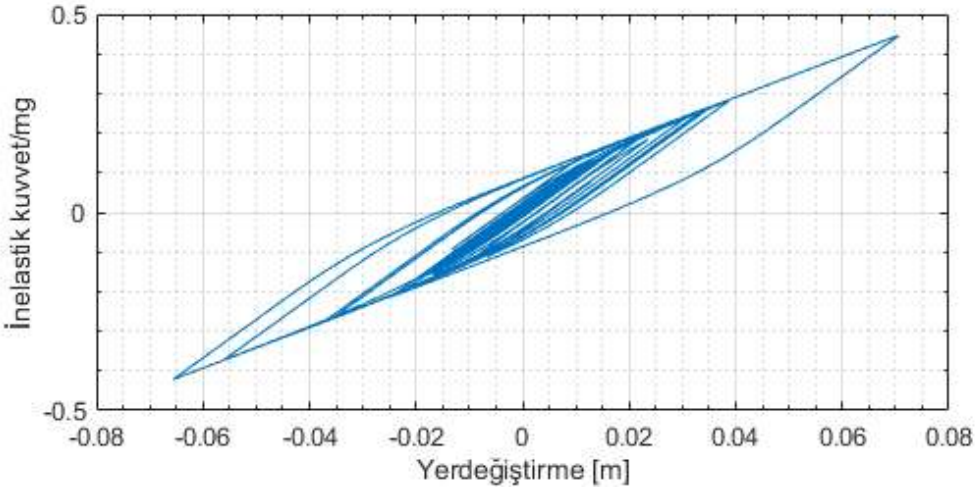
Şekil 6.9. Kocaeli depremi(1999, YPT330) normalleştirilmiş ivme-zaman grafiği



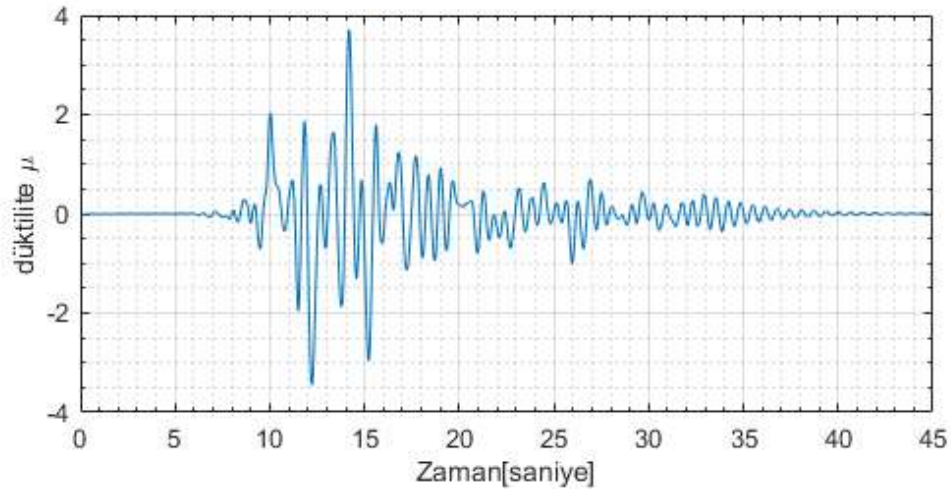
Şekil 6.10. Tek serbestlik dereceli sistemin yer değiştirme-zaman grafiği



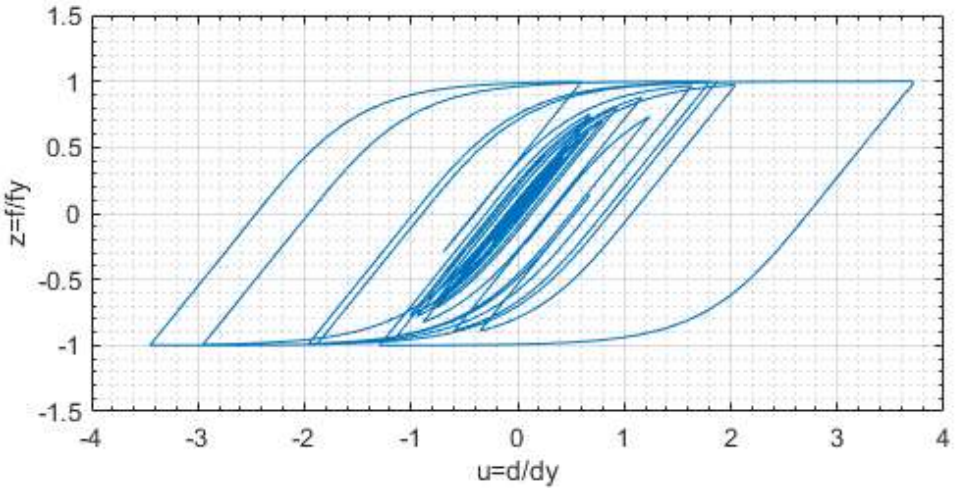
Şekil 6.11. Tek serbestlik dereceli sistemin hız-zaman grafiği



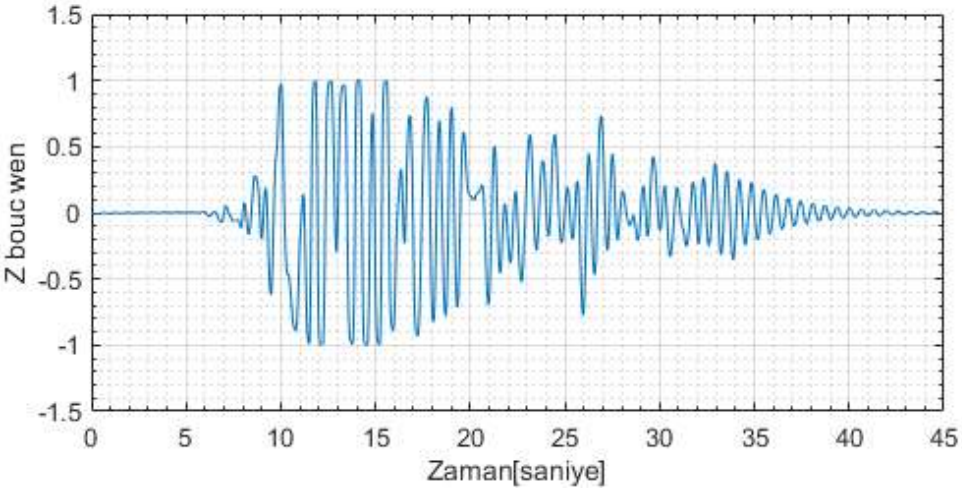
Şekil 6.12. Tek serbestlik dereceli sistemin inelastik kuvvet/ mg- zaman değişimi



Şekil 6.13. Tek serbestlik dereceli sistemin düktilite-zaman grafiği



Şekil 6.14. Tek serbestlik dereceli sistemin $z=f/f_y$-$u=d/d_y$ grafiği



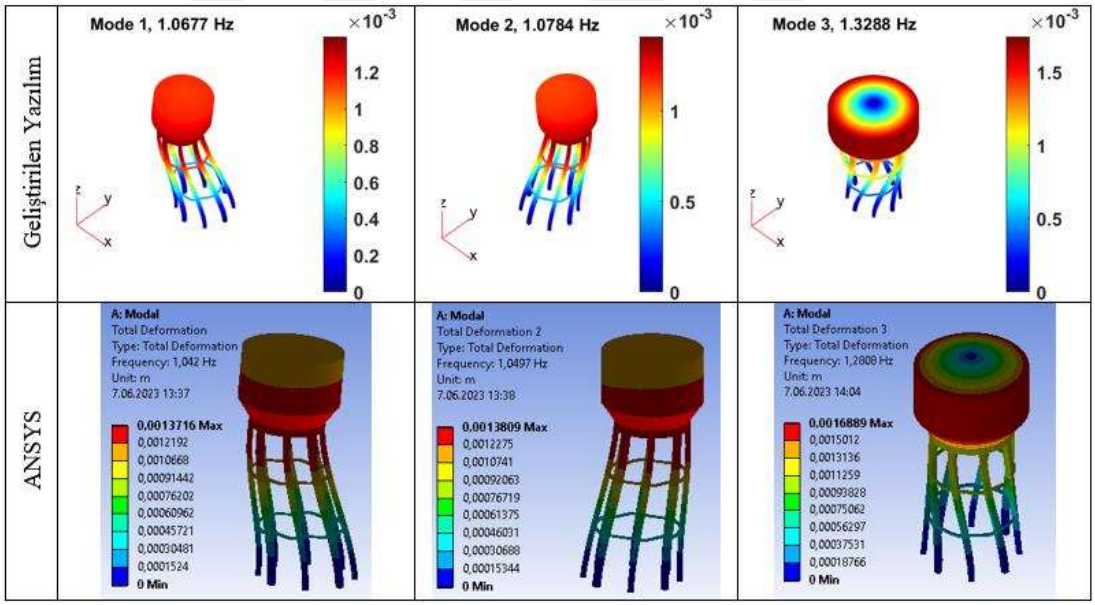
Şekil 6.15. Tek serbestlik dereceli sistemin z=f/fy-zaman grafiği

6.2.3. Sonlu Eleman Modeli İçin Doğrulama

Betonarme ayaklı su deposunun sonlu eleman modeli doğrulaması için hem geliştirilen MATLAB (MATLAB, 2023) yazılımı hem de ANYSYS (ANSYS, 2016) yazılımı üzerinde serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda doğrulamanın yüzde 5'ten az fark ile gerçekleştiği Tablo 6.4'ten görülmektedir. Ayrıca mod şekillerinin de literatüre uygun şekilde 1.modun x yönünde yer değiştirme, 2. Modun y yönünde yer değiştirme ve 3.modun burulma olduğu Şekil 6.16'da görülmektedir.

Tablo 6.4. Serbest titreşim analizi sonuçları

Mod sayısı	Modal Frekans (Hz) (Geliştirilen yazılım)	Modal Frekans (Hz) (Ansys)	Fark (%)	<%5
1	1.0677	1.0420	2.46	✓
2	1.0784	1.0497	2.73	✓
3	1.3288	1.2808	3.74	✓



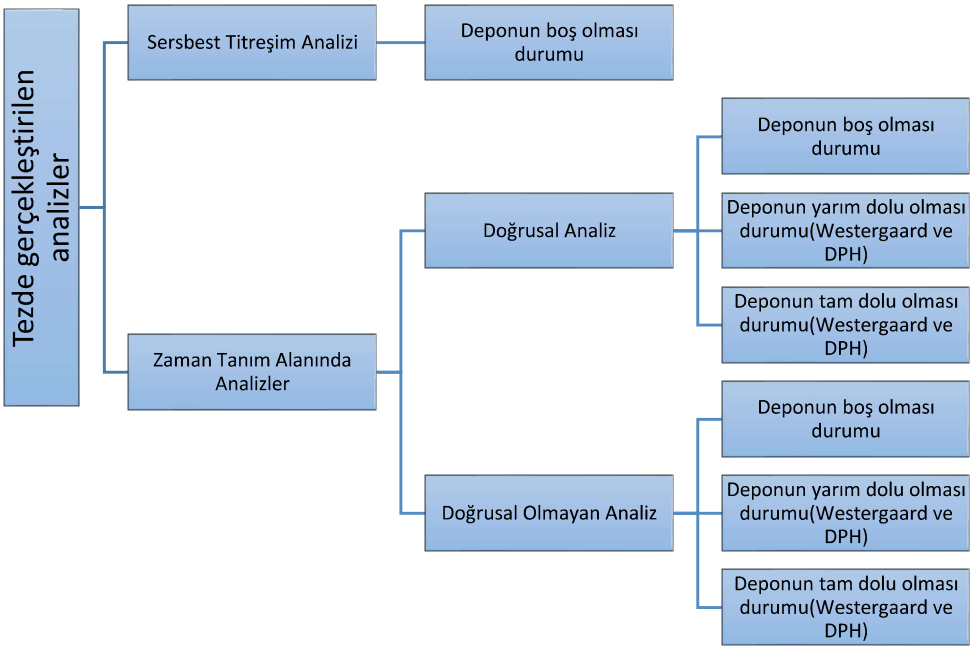
Şekil 6.16. Geliştirilen yazılıma ve ANSYS yazılımına ait serbest titreşim analizi sonuçları

6.2.4. Analizlerde Kullanılan Modeller

Tez çalışması kapsamında hazırlanan modeller Şekil 6.17 ve Tablo 6.5'de verilmektedir. Söz konusu modeller, çalışma kapsamında oluşturulan yazılımla yapılan çözümlemelerde dikkate alınmıştır.

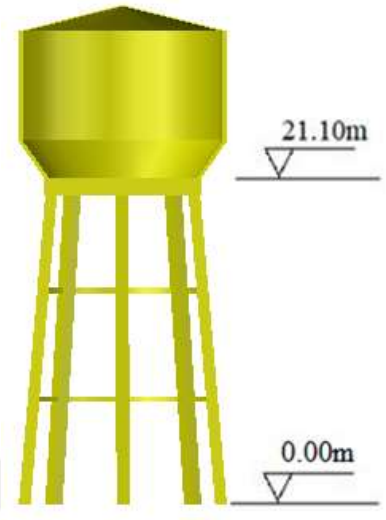
Tablo 6.5. Analiz modelleri

	Yaklaşım	1.Boş durum	2.Yarım dolu durum (%50)	3.Tam dolu durum (%100)	Analiz çeşidi	
					Doğrusal	Doğrusal olmayan
Model-1	-	✓			✓	
Model-2	-	✓				✓
Model-3	Westergaard		✓		✓	
Model-4	Westergaard		✓			✓
Model-5	Westergaard			✓	✓	
Model-6	Westergaard			✓		✓
Model-7	DPH		✓		✓	
Model-8	DPH		✓			✓
Model-9	DPH			✓	✓	
Model-10	DPH			✓		✓



Şekil 6.17. Tez çalışması kapsamında yapılan analizler

6.2.4.1. Model-1: Ayaklı Su Deposunun Boş Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizin Gerçekleştirildiği Model.



Şekil 6.18. Betonarme ayaklı su deposunun boş durumu

Betonarme ayaklı su deposunun boş durumda olduğu ***Model-1*** Şekil 6.18'de görülmektedir.

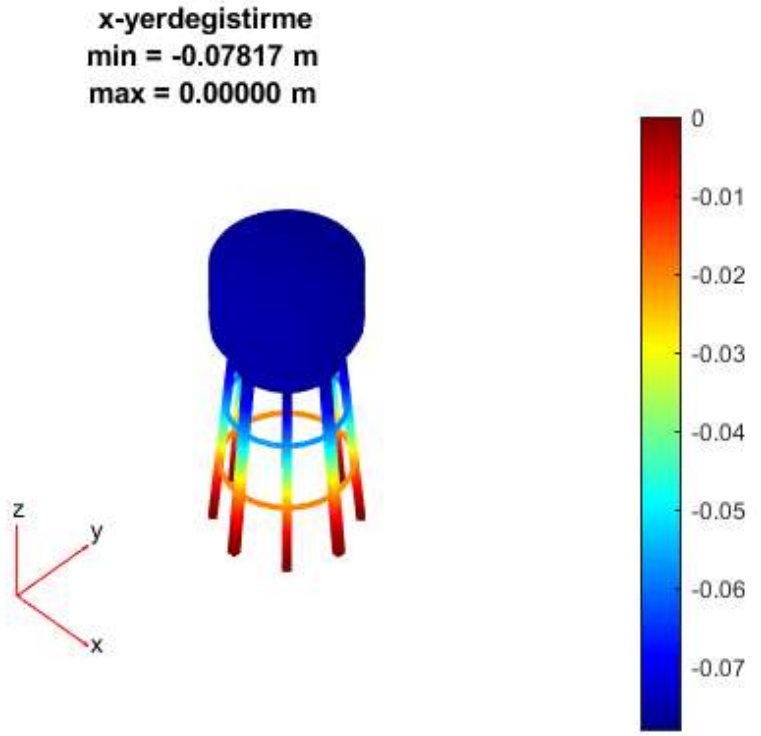
- **Sıvı:** Ayaklı su deposu boş durumda olduğu için sıvı kısım modellenmemiştir.
- **Yapısal kısım:** Betonarme ayaklı su deposunun taşıyıcı sistemi SEY'ni esas alınarak modellenmiştir. Modellemede, hem çubuk elemanlar (kolon, kiriş) hem de yüzeysel taşıyıcı elemanlar için üç boyutlu solid tetrahedral dörtyüzlü sonlu eleman kullanılmıştır. MATLAB Kısmi Diferansiyel Denklem(PDE) araç kutusu (MATLAB, 2023) kullanılarak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Bu araç kutusu Sonlu Elemanlar Yöntemini esas alarak yapı sisteminin statik ve dinamik analizleri sonucu oluşan gerilme ve deformasyonları hesaplayabilmektedir. Bu araç kutusu yardımıyla hazırlanan ayaklı su deposunun sonlu eleman modelinde 3894 adet düğüm noktası, 11051 adet sonlu eleman bulunmaktadır (Tablo 6.3). Hazne cidarlarındaki sonlu eleman düğüm noktası ise 2199 adettir. Hazırlanan taşıyıcı sisteme ait kütle ve rijitlik matrisleri ise statik, modal ve zaman tanım alanında analizde kullabilmektedir. Betonarme malzemenin davranışı ise doğrusal olarak kabul edilmiştir.

- **Zemin kısmı:** Bu modelde ayaklı su deposu zemine ankastre bağlı olarak kabul edilmiştir.
- **Yer hareketi:** Şekil 6.2'de verilen Kocaeli depremine ait ivme kaydı için analizler gerçekleştirilmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun boş olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Sönüm türü:** Rayleigh sönüm kullanılmıştır.

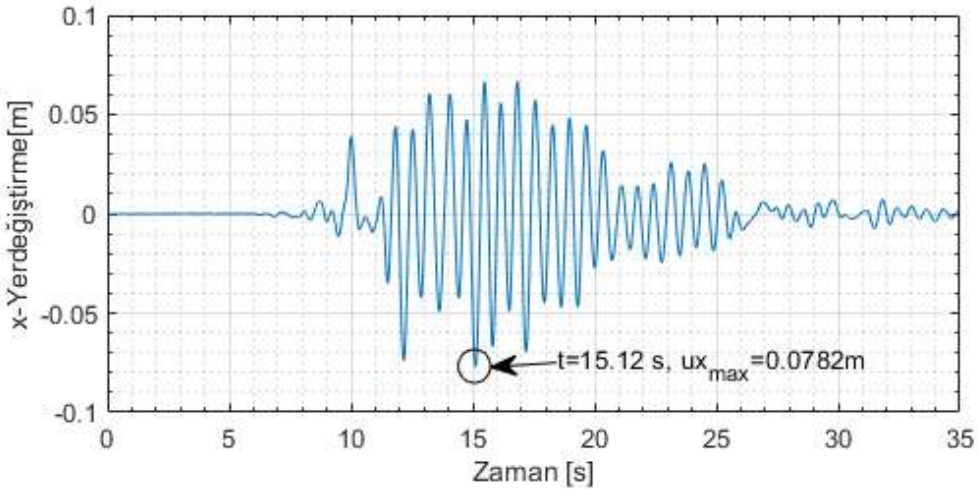
Model-1 için Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB (MATLAB, 2023) ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Model-1 analiz sonuçları

Model-1 'e ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir.

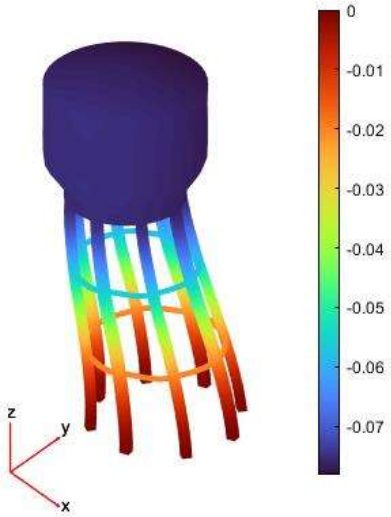


Şekil 6.19. ***Model-1'***de x yönündeki yer değiştirme

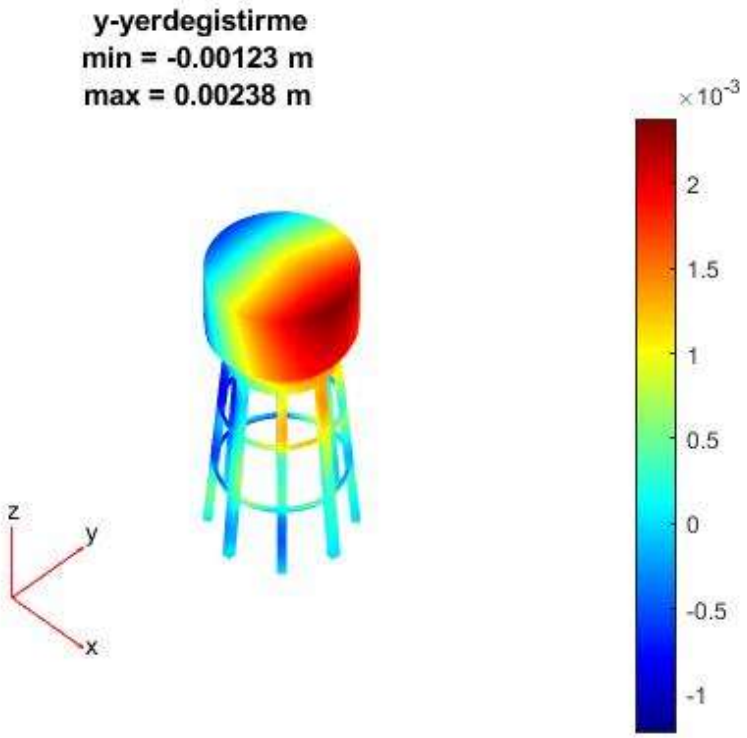


Şekil 6.20. ***Model-1'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

Model-1 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.19'da verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.20'de verilmektedir. Şekil 6.21'de t=15.12 saniyede x yönünde 0.0782m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.

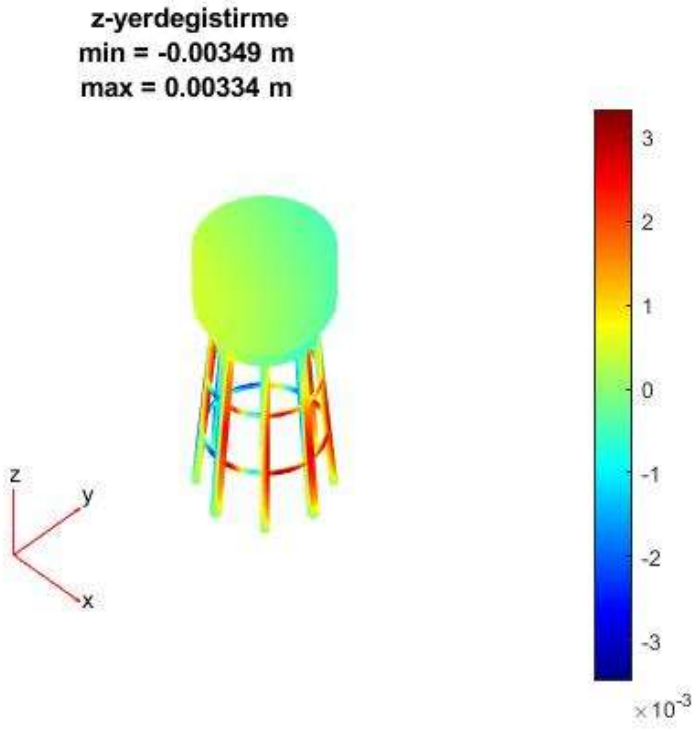


Şekil 6.21. ***Model-1'***de x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem



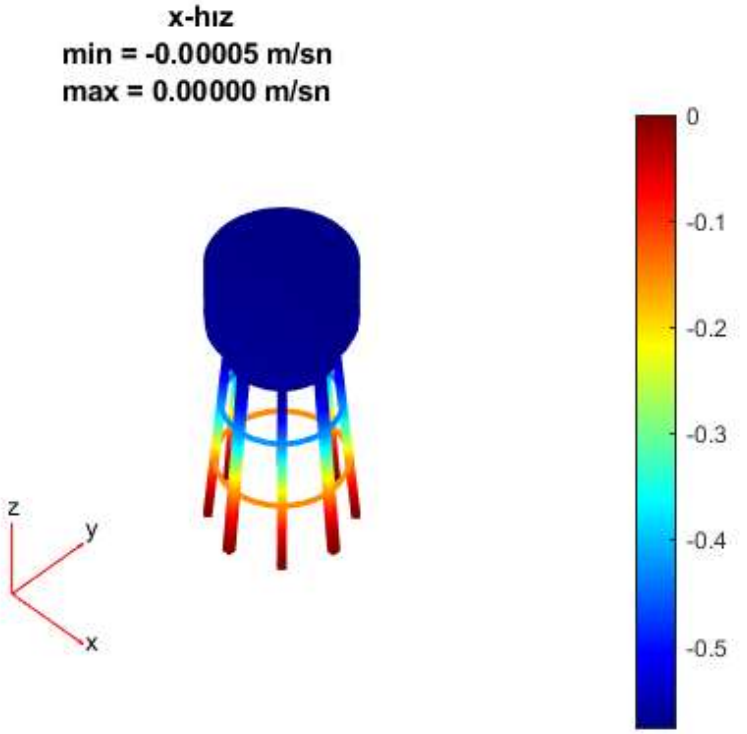
Şekil 6.22. ***Model-1'***de y yönündeki yer değiştirme

Model-1 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.22 ve 6.23'de verilmektedir.

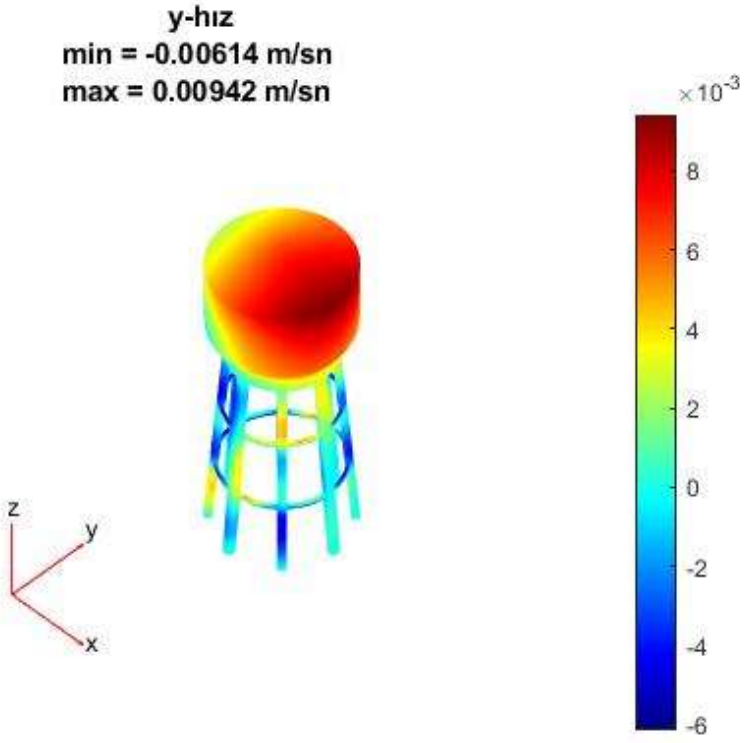


Şekil 6.23. ***Model-1'***de z yönündeki yer değiştirme

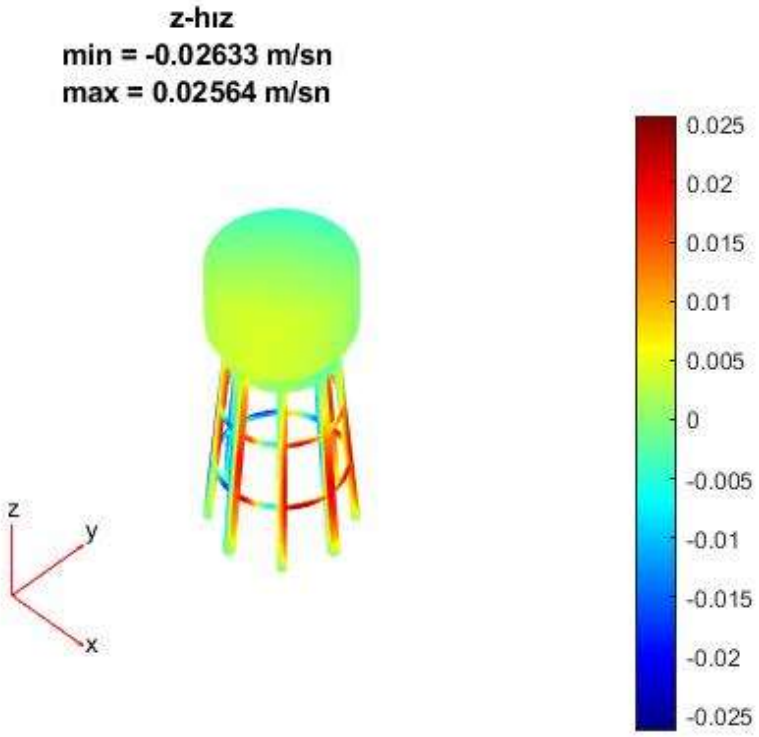
Model-1 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.24-6.26'da verilmektedir.



Şekil 6.24. ***Model-1'***de x yönündeki hız

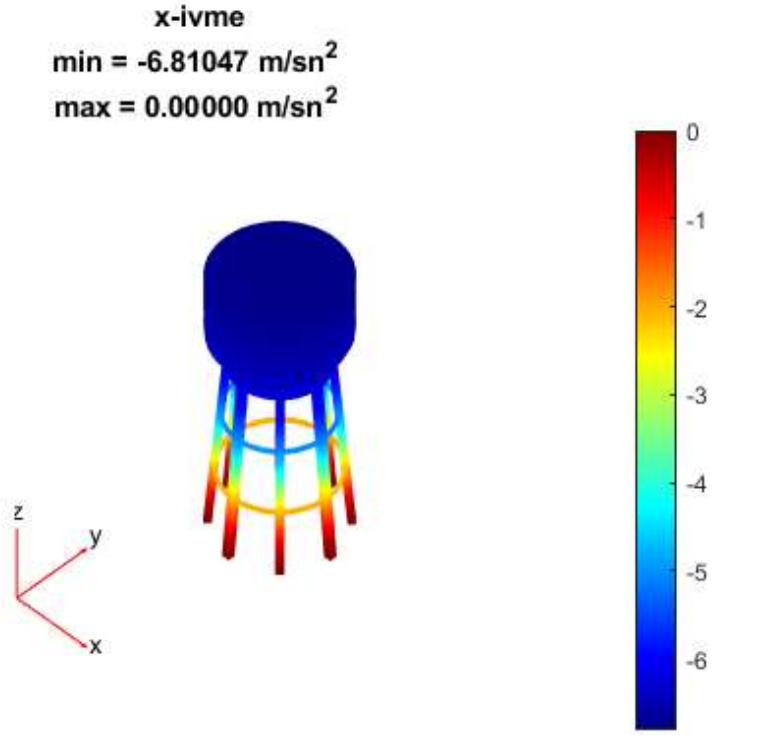


Şekil 6.25. ***Model-1'***de y yönündeki hız

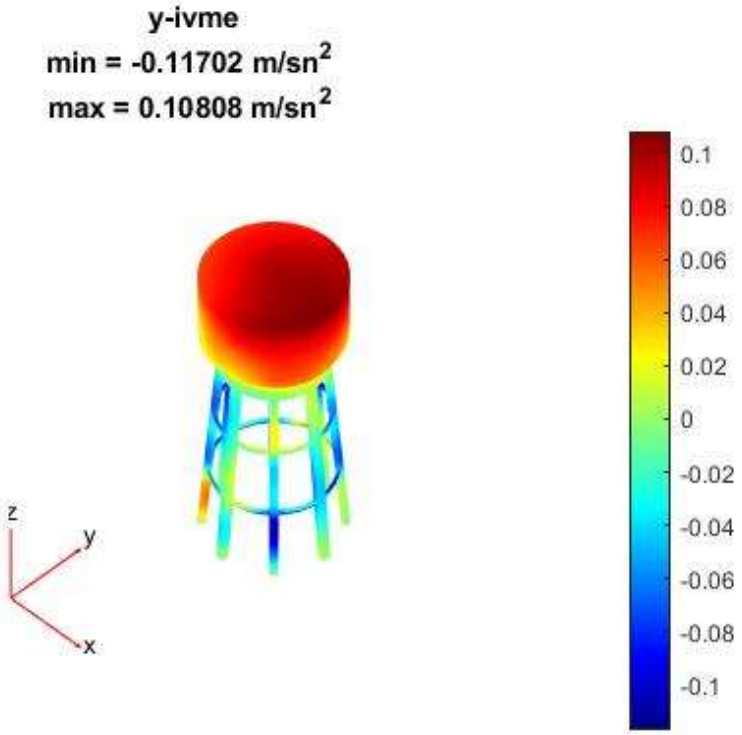


Şekil 6.26. ***Model-1'***de z yönündeki hız

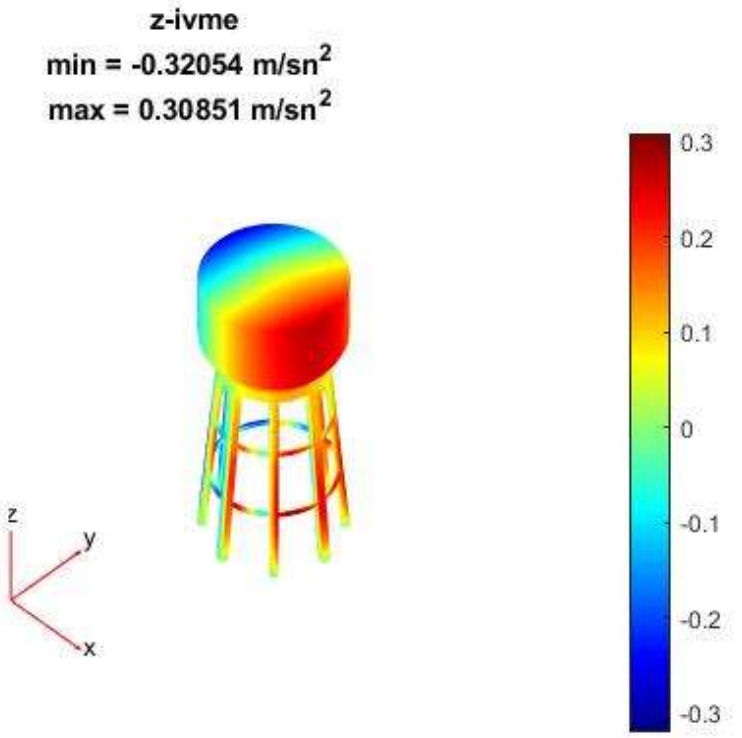
Model-1 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.27-6.29'da verilmektedir.



Şekil 6.27. ***Model-1'***de x yönündeki ivme

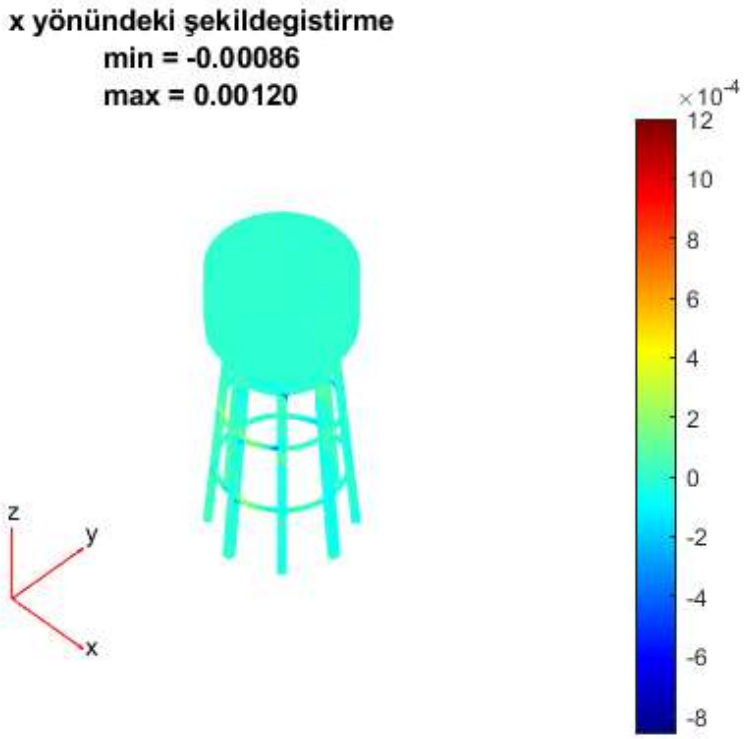


Şekil 6.28. ***Model-1'***de y yönündeki ivme

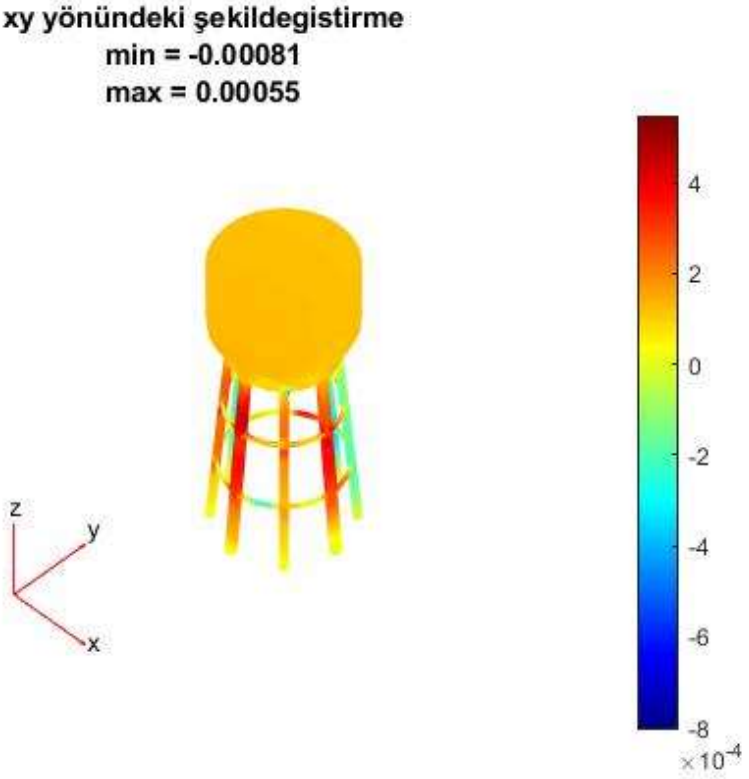


Şekil 6.29. ***Model-1'***de z yönündeki ivme

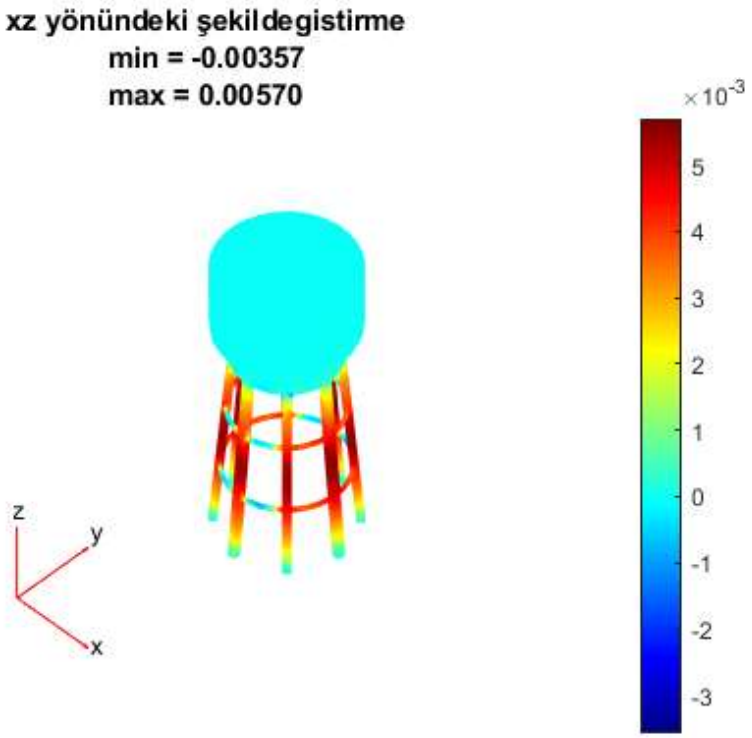
Model-1 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimleri Şekil 6.30-6.38'da verilmektedir.



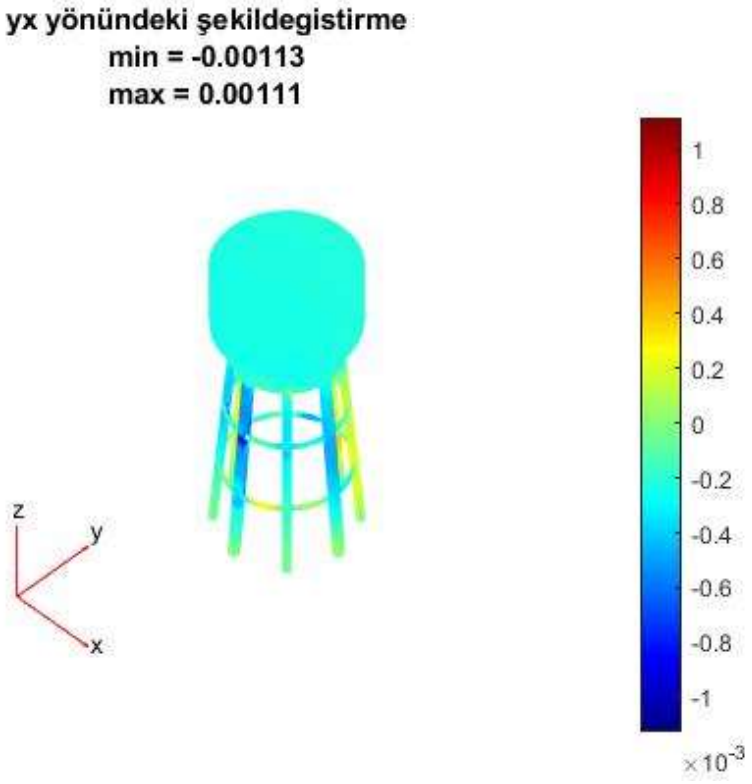
Şekil 6.30. ***Model-1'***de x yönündeki şekil değiştirme



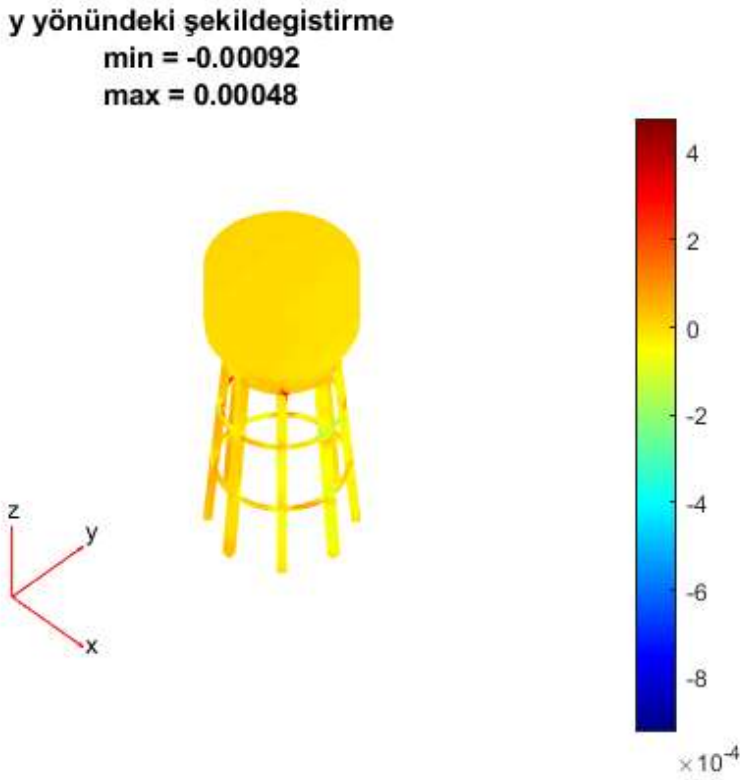
Şekil 6.31. ***Model-1'***de xy yönündeki şekil değiştirme



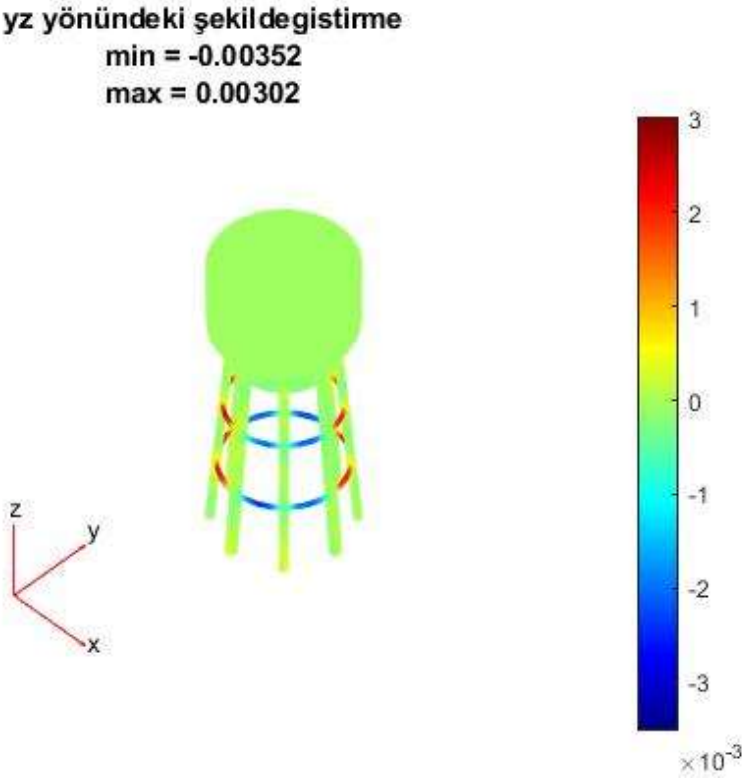
Şekil 6.32. ***Model-1'***de xz yönündeki şekil değiştirme



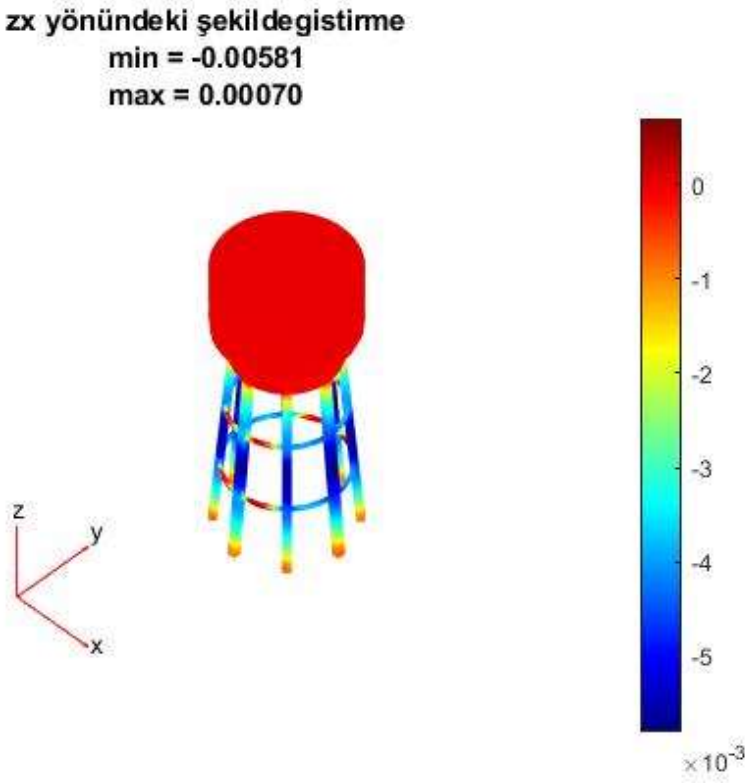
Şekil 6.33. ***Model-1'***de yx yönündeki şekil değiştirme



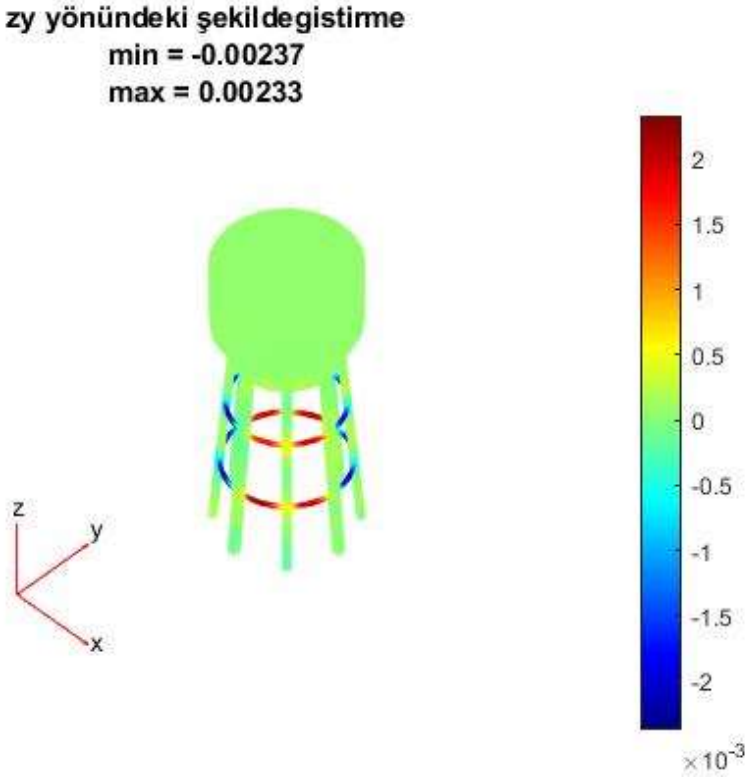
Şekil 6.34. ***Model-1'***de y yönündeki şekil değiştirme



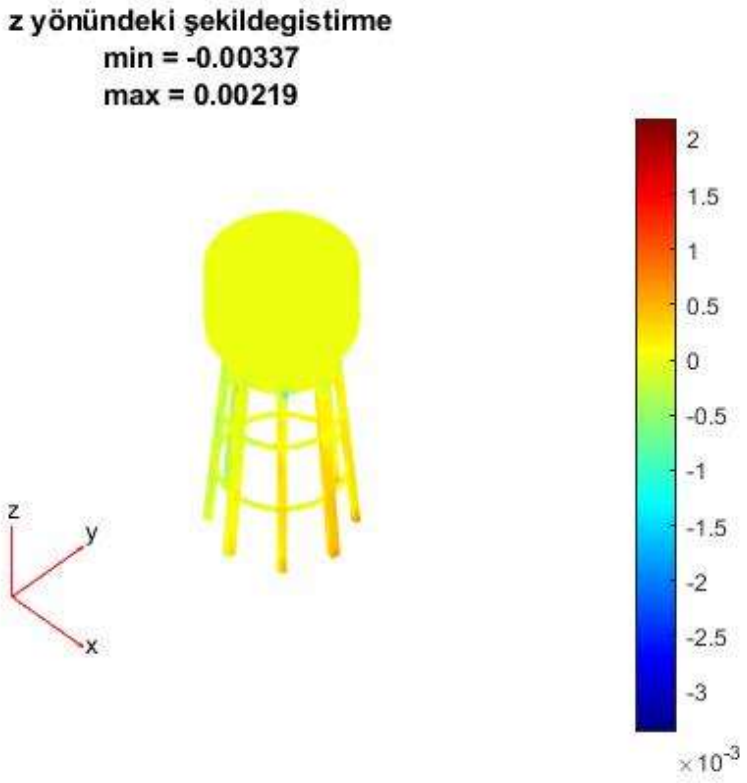
Şekil 6.35. ***Model-1'***de yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.36. ***Model-1'***de zx yönündeki şekil değiştirme

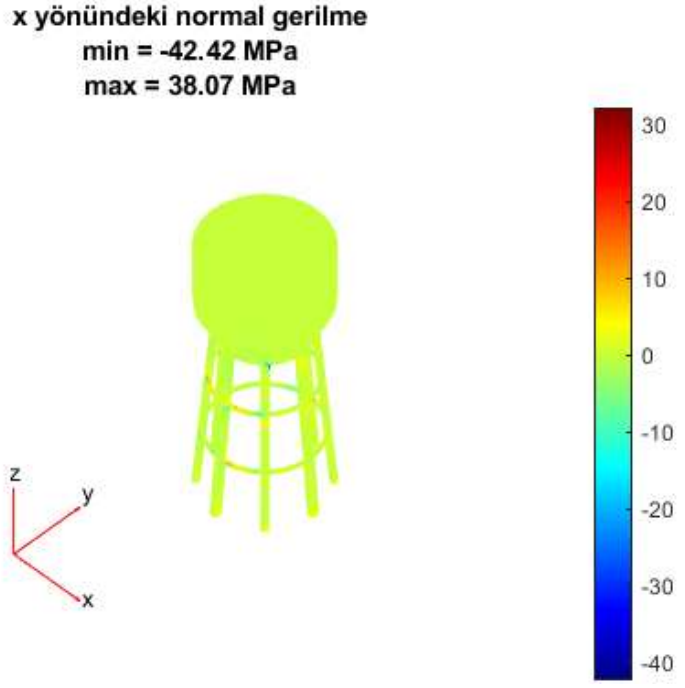


Şekil 6.37. ***Model-1'***de zy yönündeki şekil değiştirme

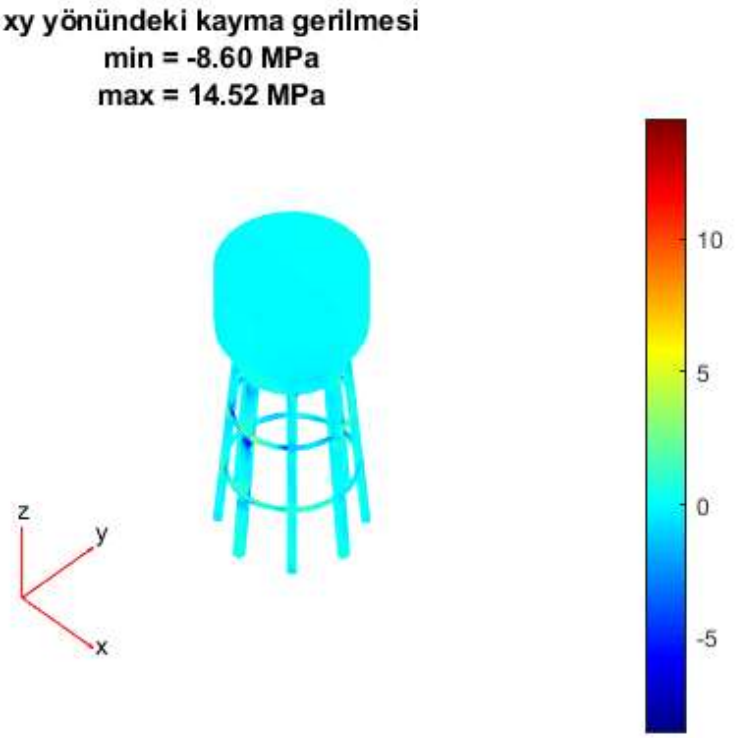


Şekil 6.38. ***Model-1'***de z yönündeki şekil değiştirme

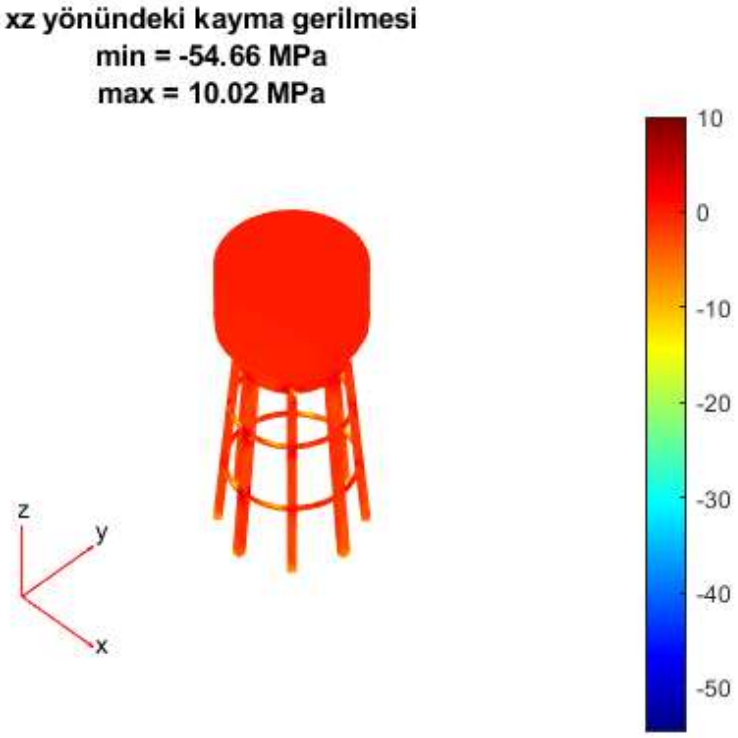
Model-1 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimleri Şekil 6.39-6.48'de verilmektedir.



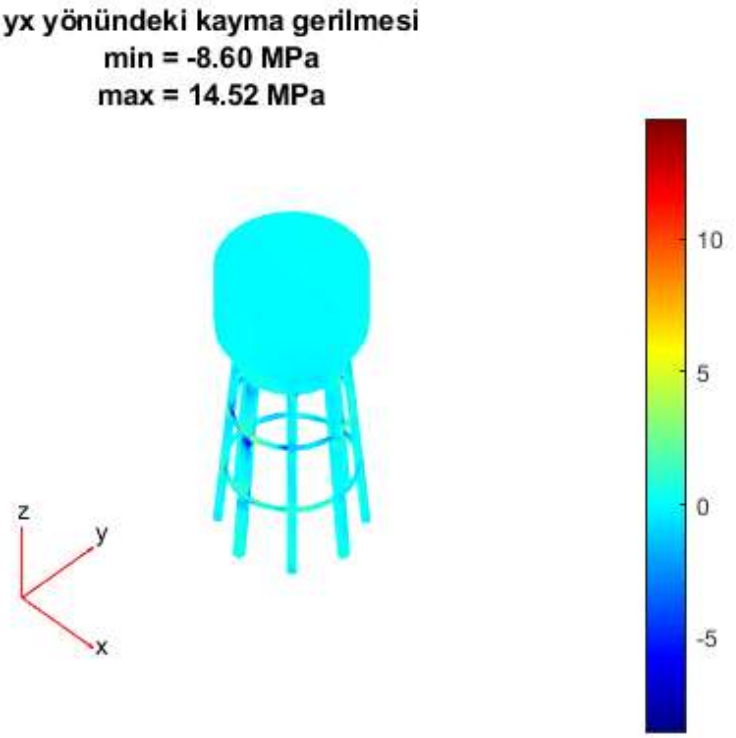
Şekil 6.39. ***Model-1'***de x yönündeki normal gerilme



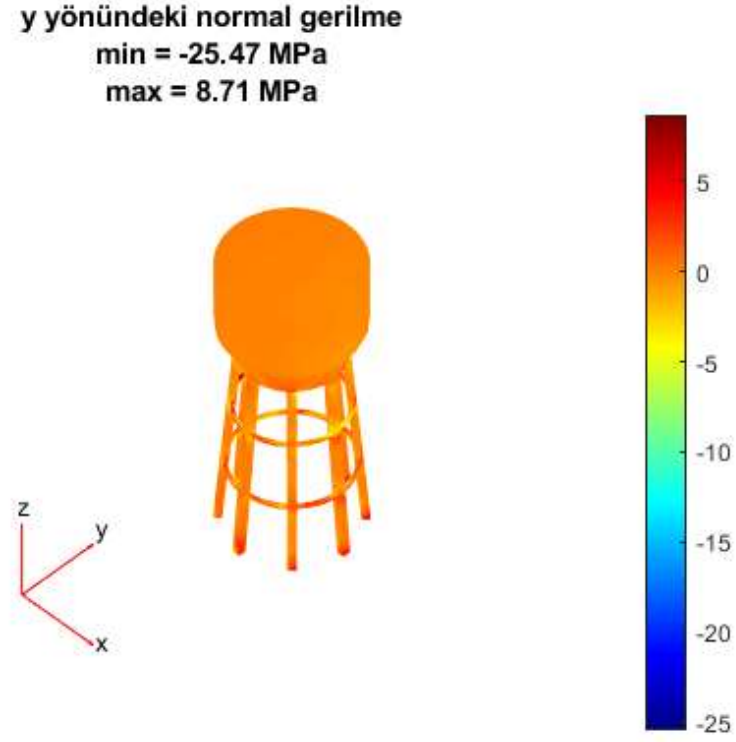
Şekil 6.40. ***Model-1'***de xy yönündeki kayma gerilmesi



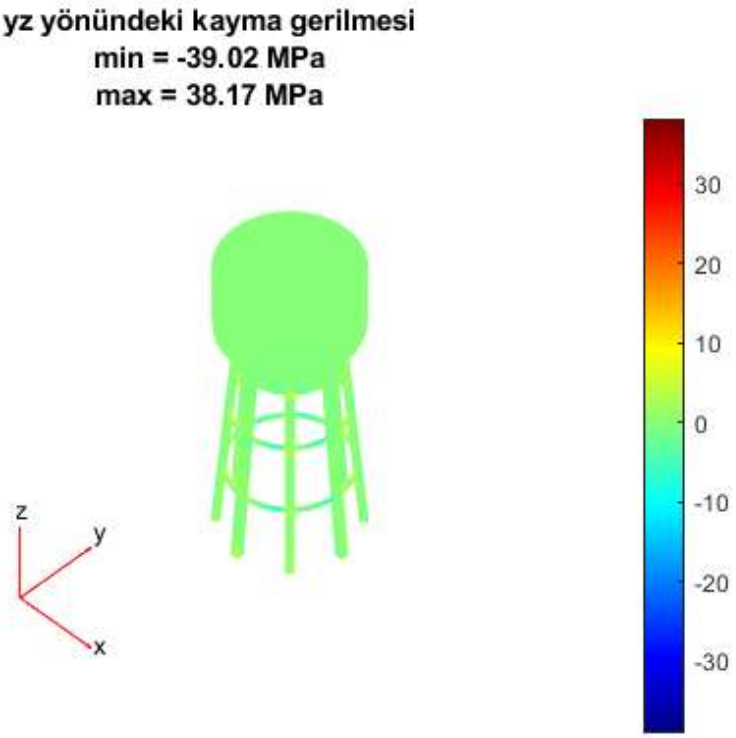
Şekil 6.41. ***Model-1'***de xz yönündeki kayma gerilmesi



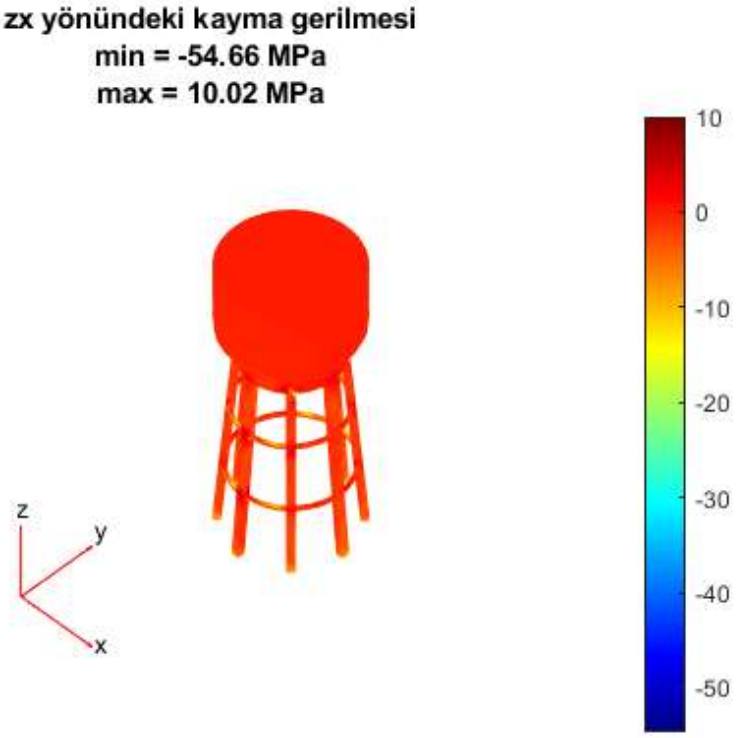
Şekil 6.42. ***Model-1'***de yx yönündeki kayma gerilmesi



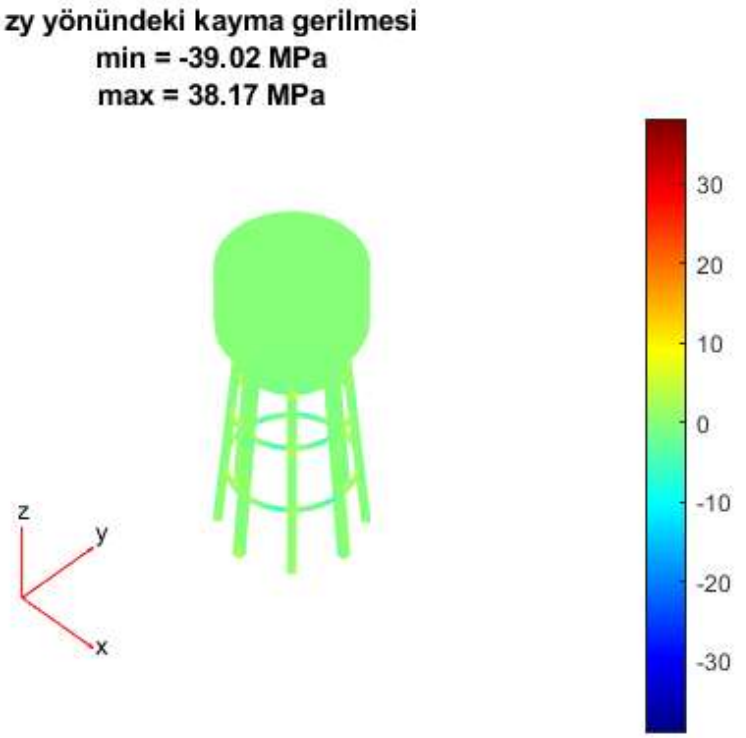
Şekil 6.43. ***Model-1'***de y yönündeki normal gerilme



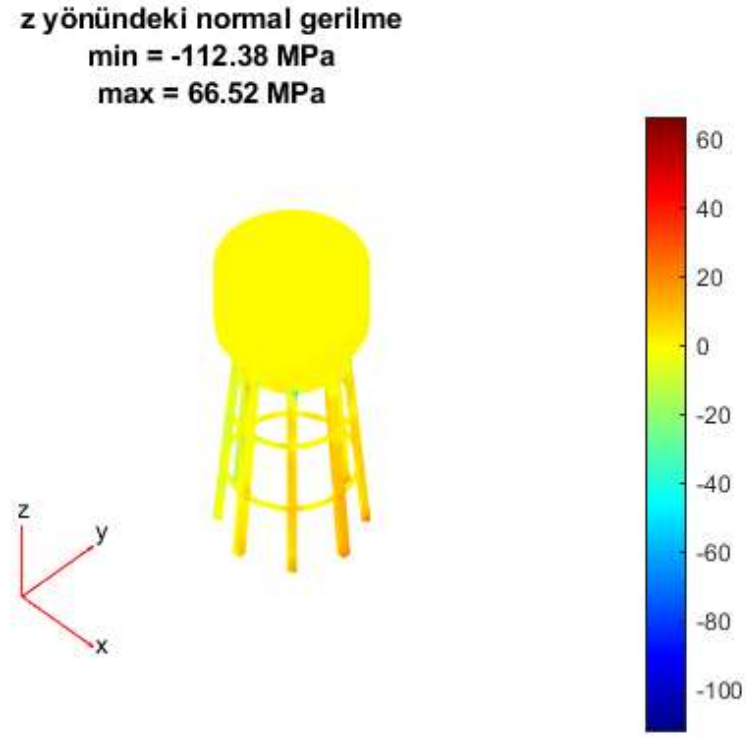
Şekil 6.44. ***Model-1'***de yz yönündeki kayma gerilmesi



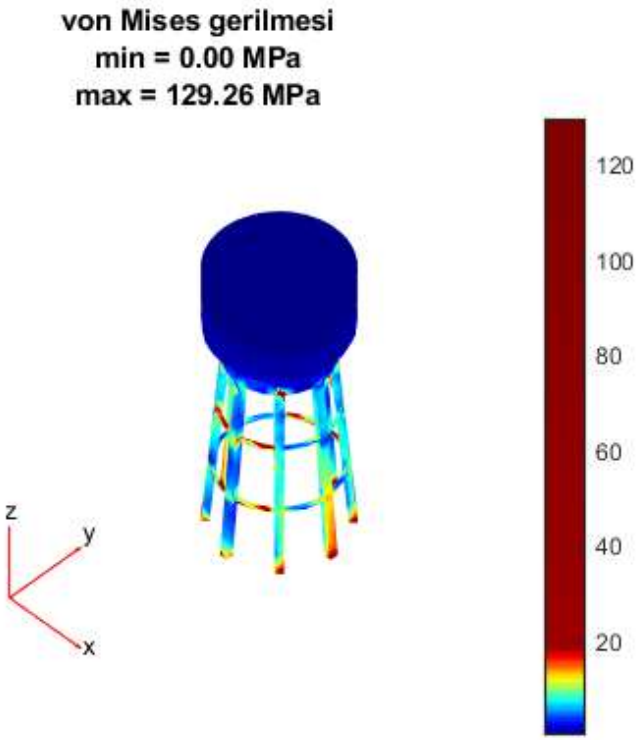
Şekil 6.45. ***Model-1'***de zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.46. ***Model-1'***de zy yönündeki kayma gerilmesi

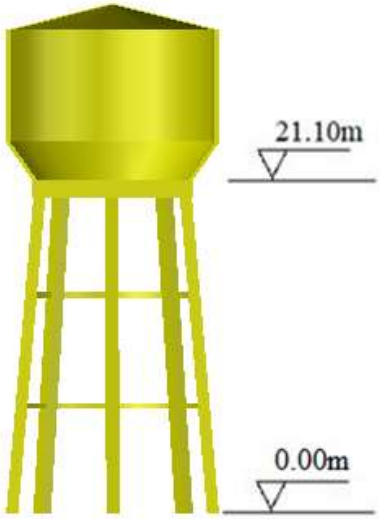


Şekil 6.47. ***Model-1'***de z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.48. ***Model-1'***de Von Mises gerilmesi

6.2.4.2. Model-2: Ayaklı Su Deposunun Boş Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizin Gerçekleştirildiği Model.



Şekil 6.49. Betonarme ayaklı su deposunun boş durumu

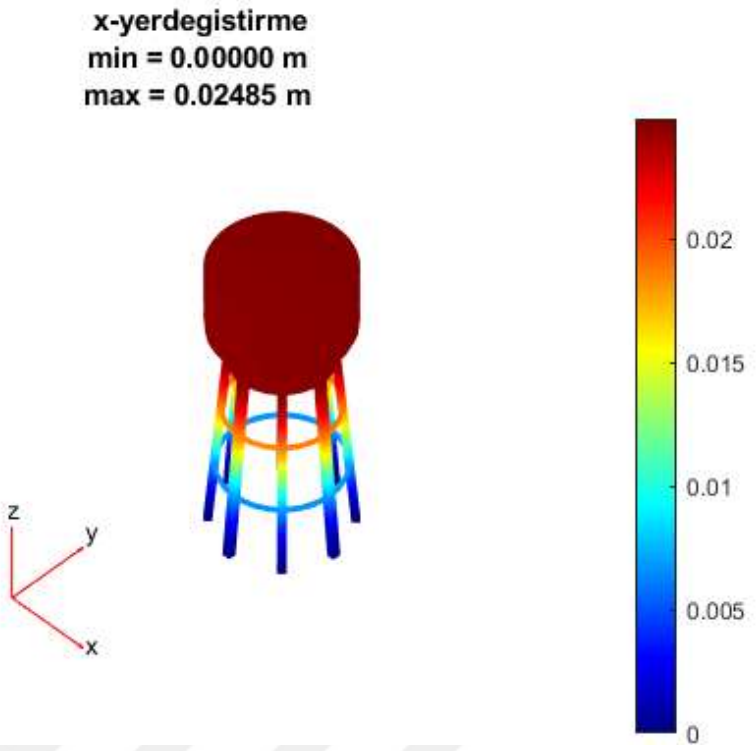
Betonarme ayaklı su deposunun boş durumda olduğu ***Model-2*** Şekil 6.49'da görülmektedir.

- **Sıvı:** Ayaklı su deposu boş durumda olduğu için sıvı kısım modellenmemiştir.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun boş olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analiz için histeresis modellerden Bouc-Wen modeli kullanılmıştır.
- **Sönüm türü:** Eşdeğer viskoz sönüm kullanılmıştır.

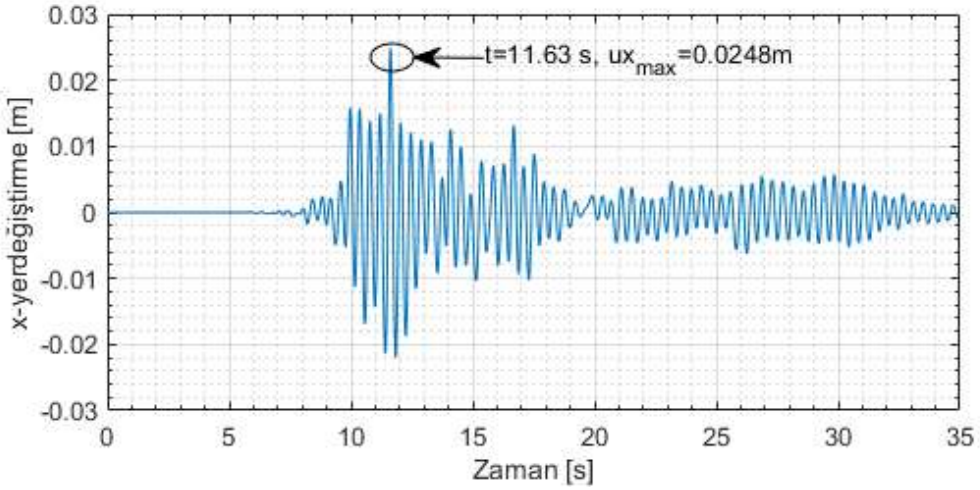
Model-2 için Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB (MATLAB, 2023) ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Model-2 analiz sonuçları

Model-2 'ye ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-2*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.50'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.51'de verilmektedir. Şekil 6.52'de t=11.63 saniyede x yönünde 0.0248m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.

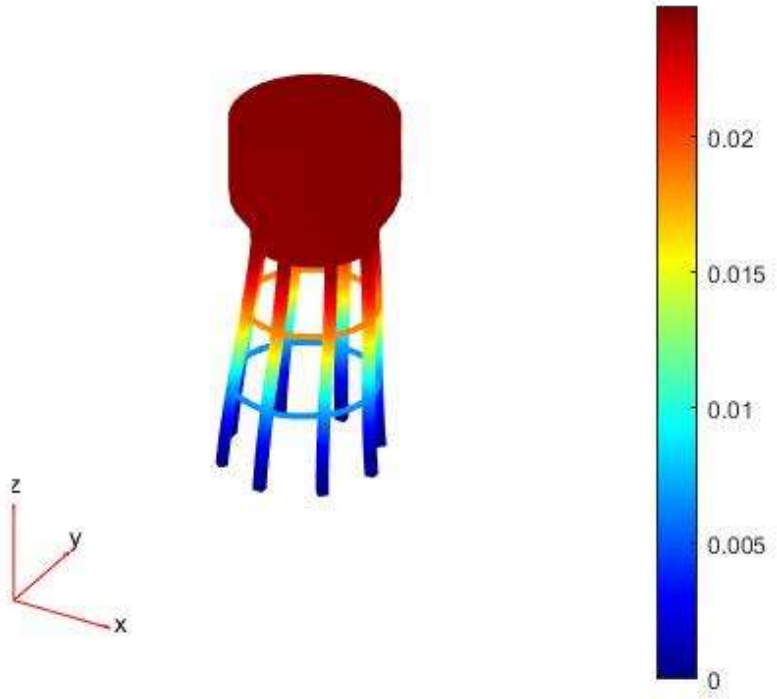


Şekil 6.50. ***Model-2'***de x yönündeki yer değiştirme

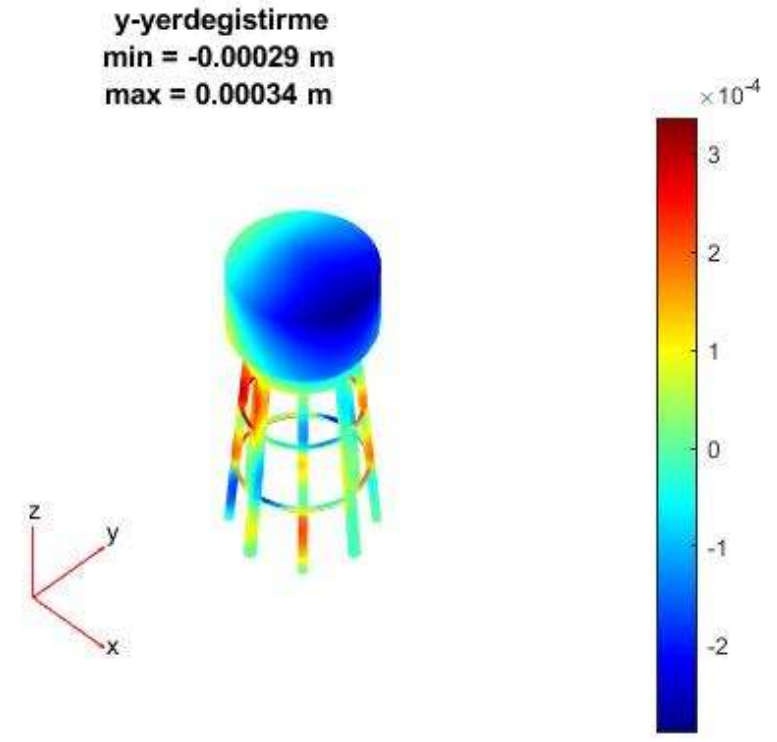


Şekil 6.51. ***Model-2'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

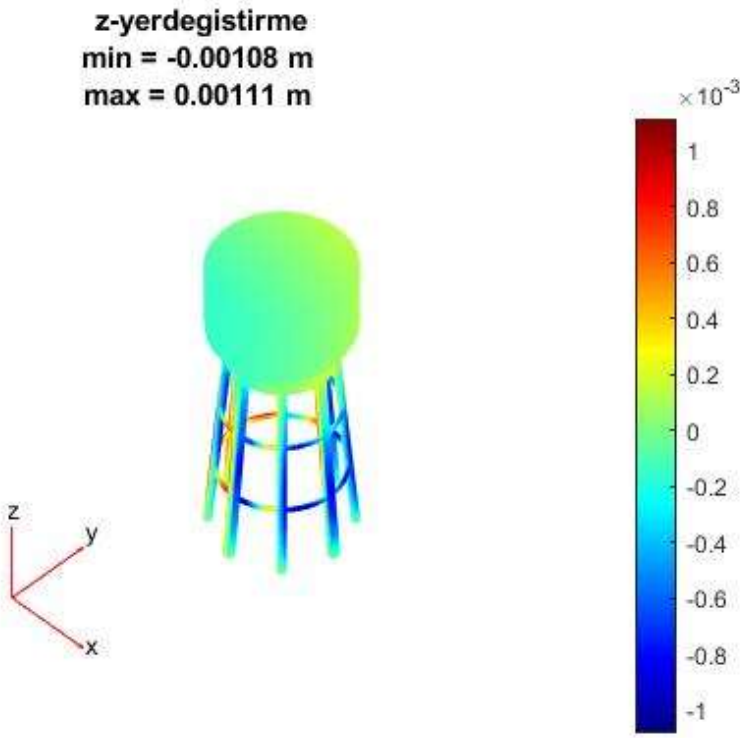
Model-2 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.53 ve 6.54'de verilmektedir.



Şekil 6.52. ***Model-2'***de x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem

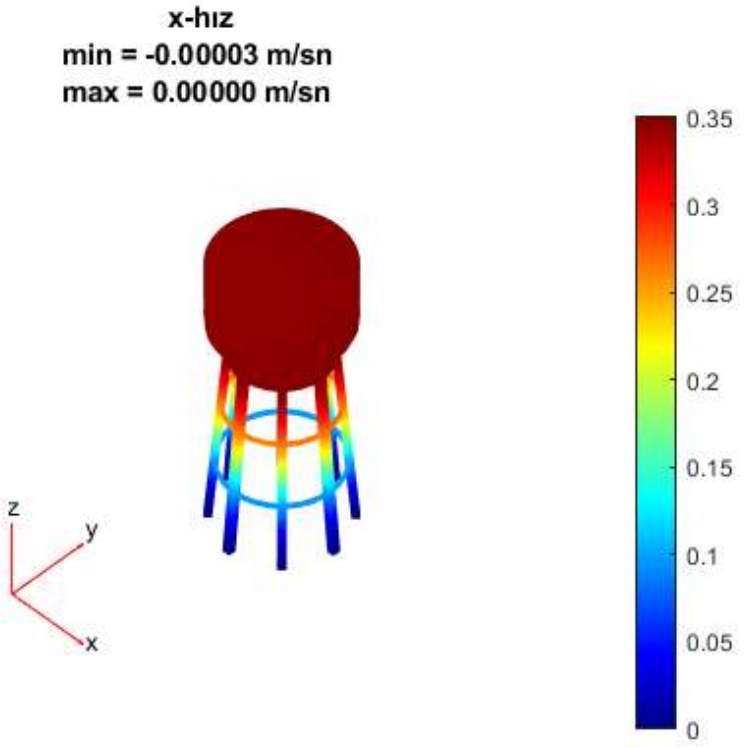


Şekil 6.53. ***Model-2'***de y yönündeki yer değiştirme

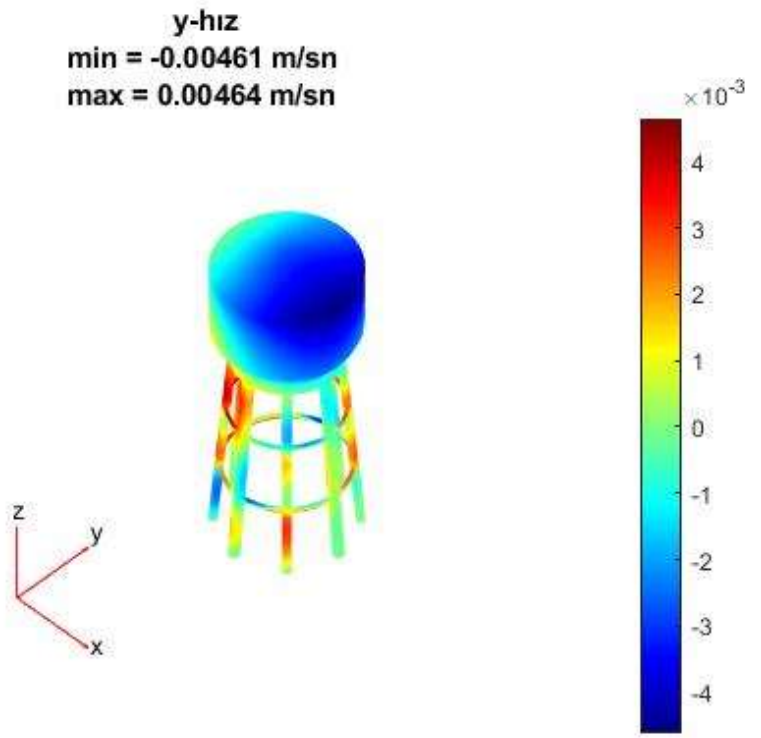


Şekil 6.54. ***Model-2'***de z yönündeki yer değiştirme

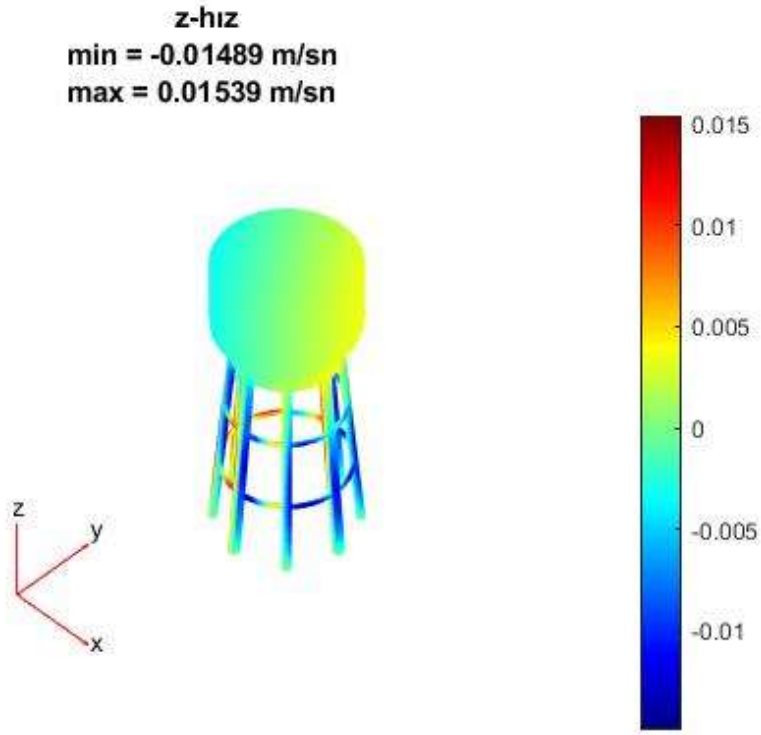
Model-2 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.55-6.57'de verilmektedir.



Şekil 6.55. ***Model-2'***de x yönündeki hız

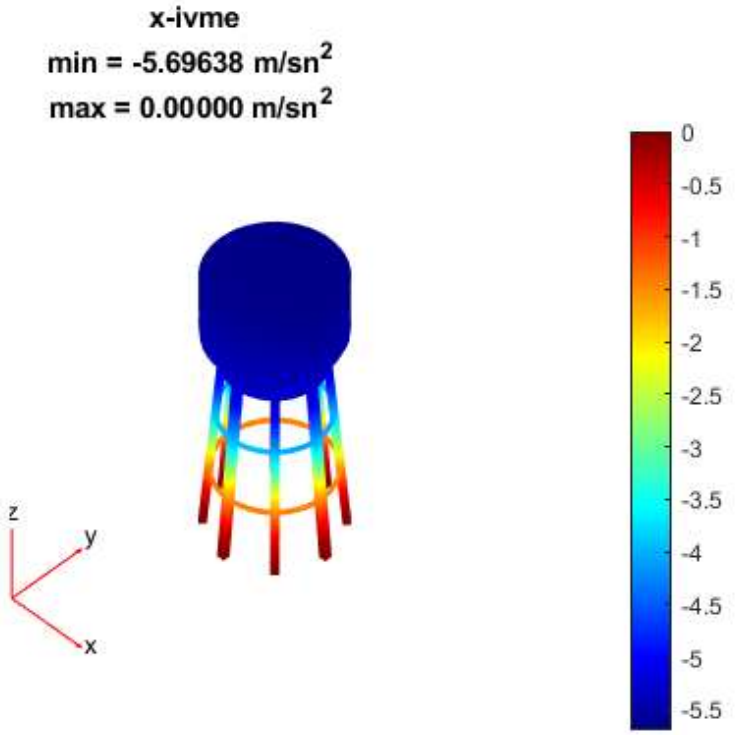


Şekil 6.56. ***Model-2'***de y yönündeki hız

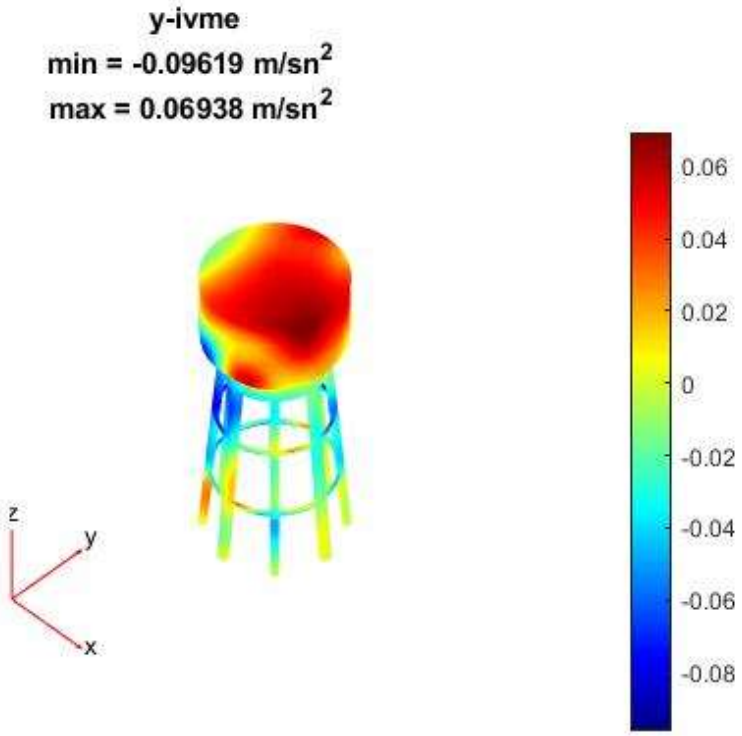


Şekil 6.57. ***Model-2'***de z yönündeki hız

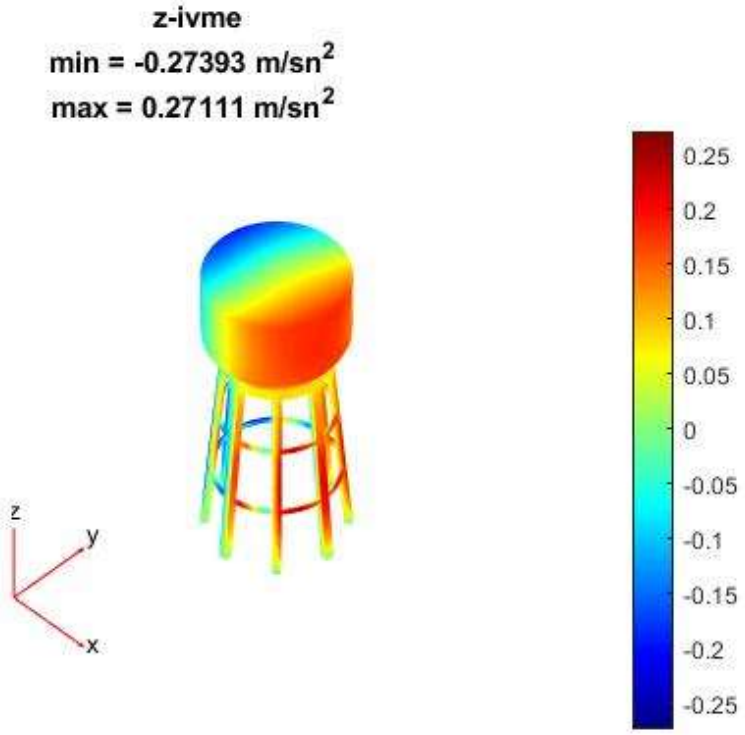
Model-2 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.58-6.60'da verilmektedir.



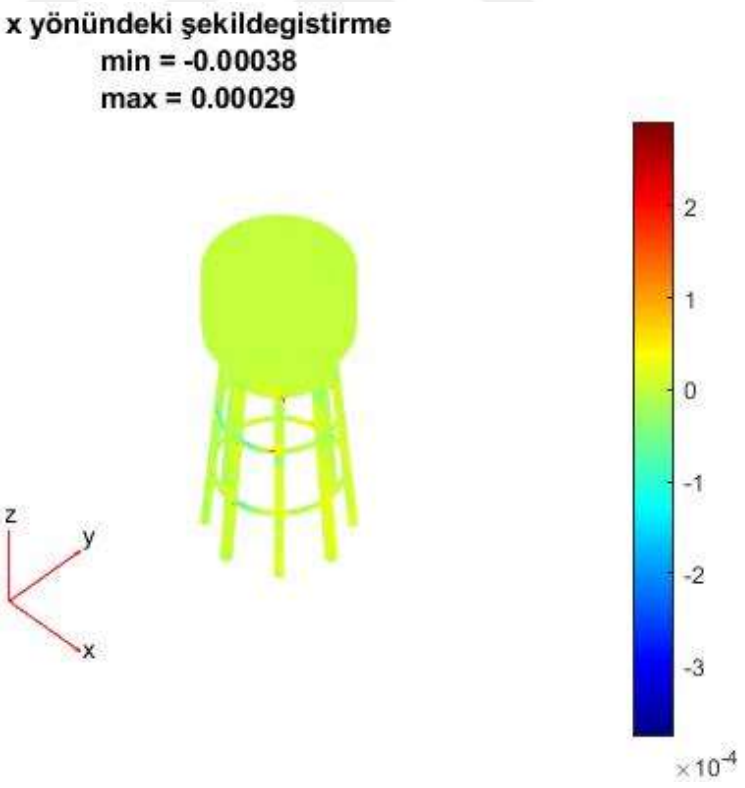
Şekil 6.58. ***Model-2'***de x yönündeki ivme



Şekil 6.59. ***Model-2'***de y yönündeki ivme

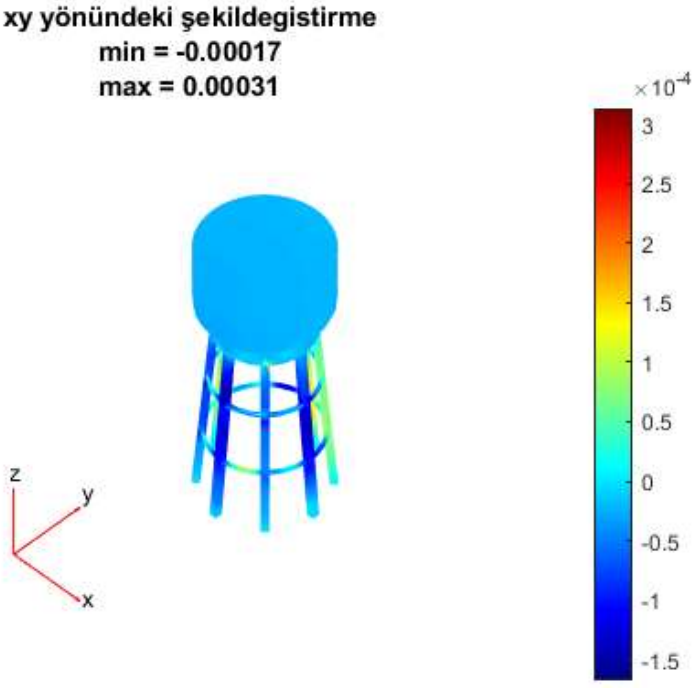


Şekil 6.60. ***Model-2'***de z yönündeki ivme

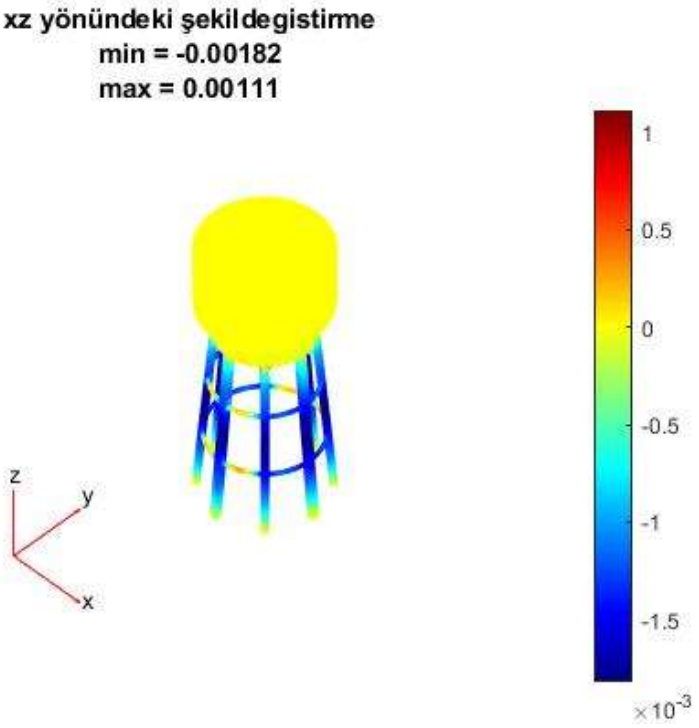


Şekil 6.61. ***Model-2'***de x yönündeki şekil değiştirme

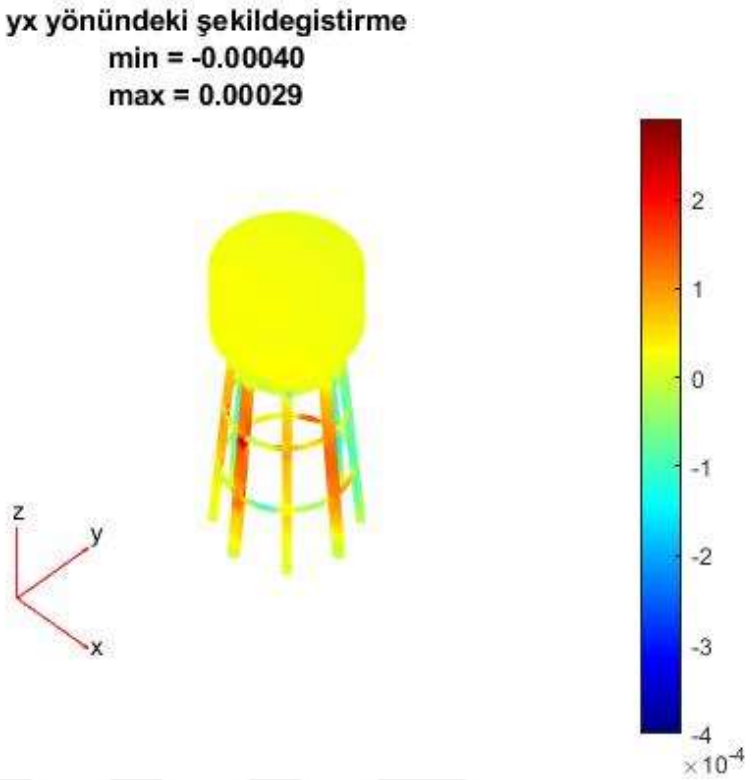
Model-2 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.61-6.69'da verilmektedir.



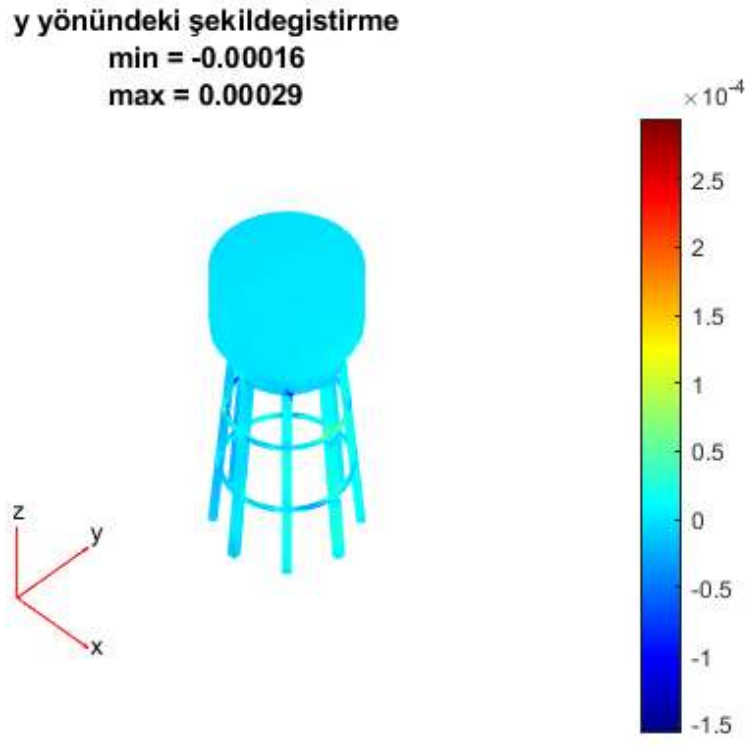
Şekil 6.62. ***Model-2'***de xy yönündeki şekil değiştirme



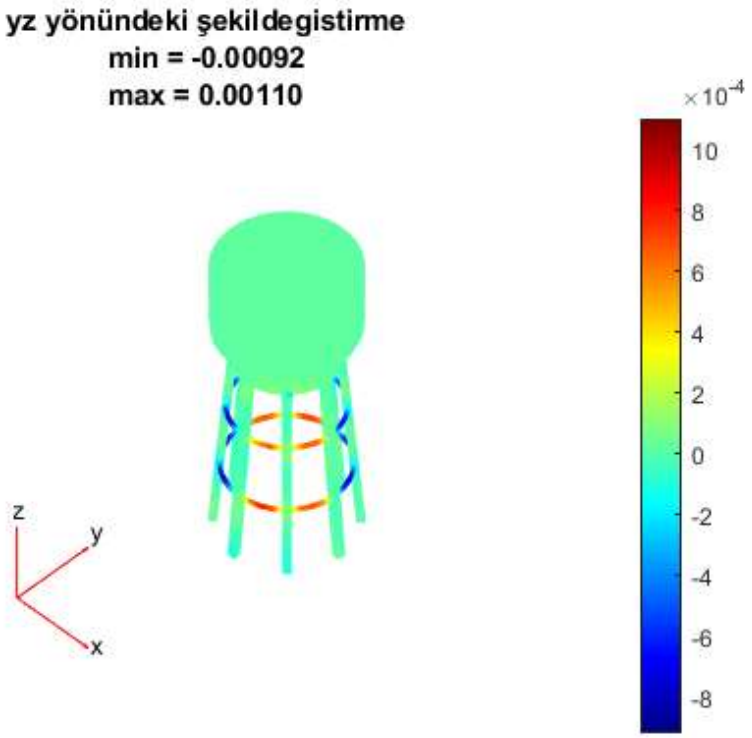
Şekil 6.63. ***Model-2'***de xz yönündeki şekil değiştirme



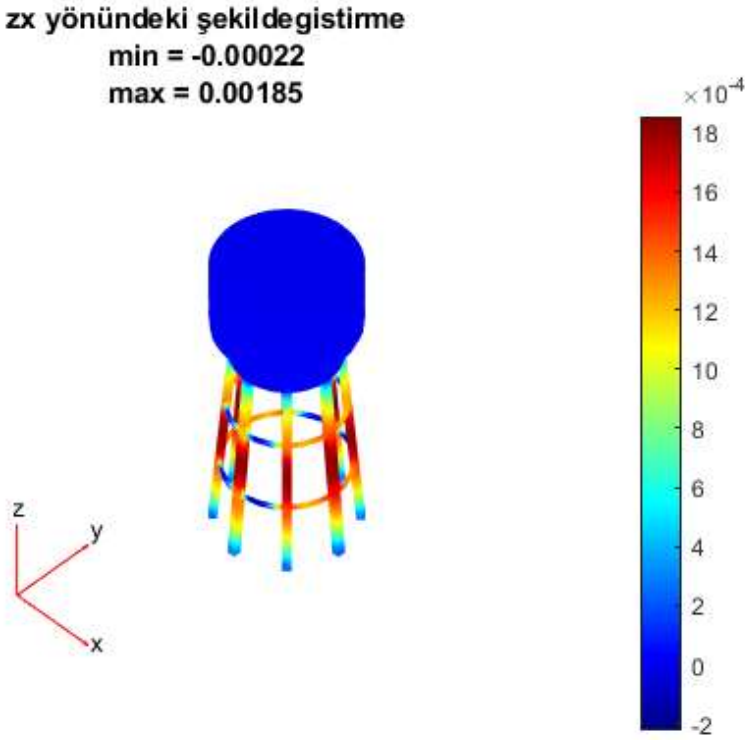
Şekil 6.64. ***Model-2'***de yx yönündeki şekil değiştirme



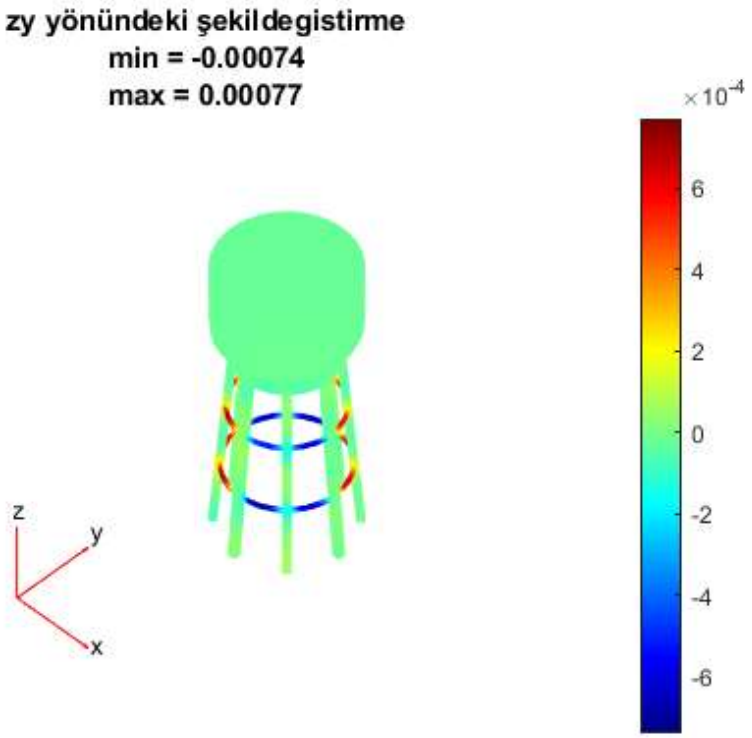
Şekil 6.65. ***Model-2'***de y yönündeki şekil değiştirme



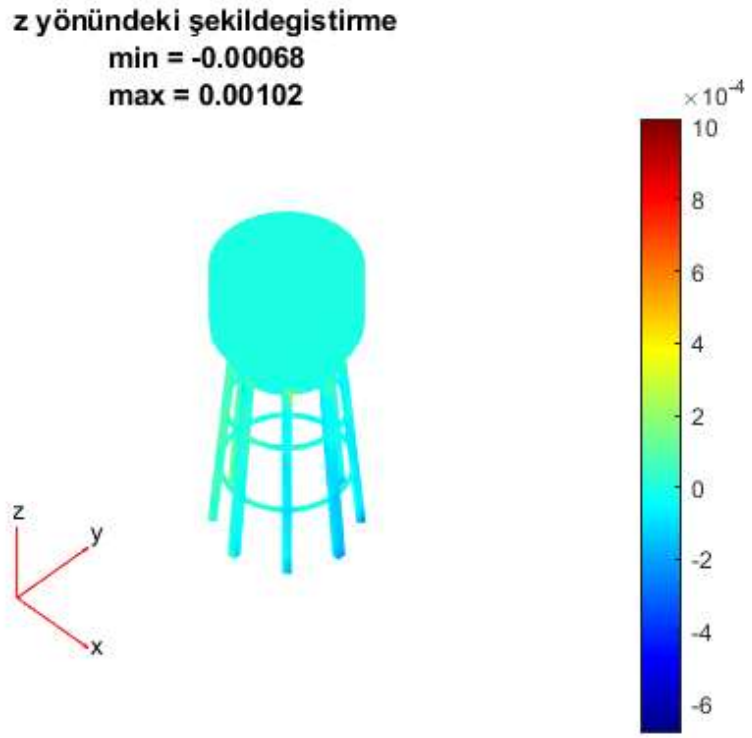
Şekil 6.66. ***Model-2'***de yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.67. ***Model-2'***de zx yönündeki şekil değiştirme



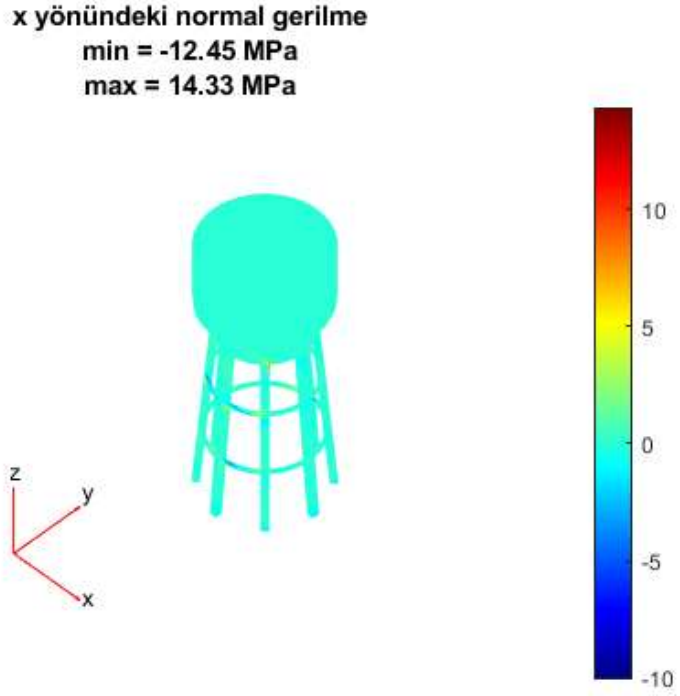
Şekil 6.68. ***Model-2'***de zy yönündeki şekil değiştirme



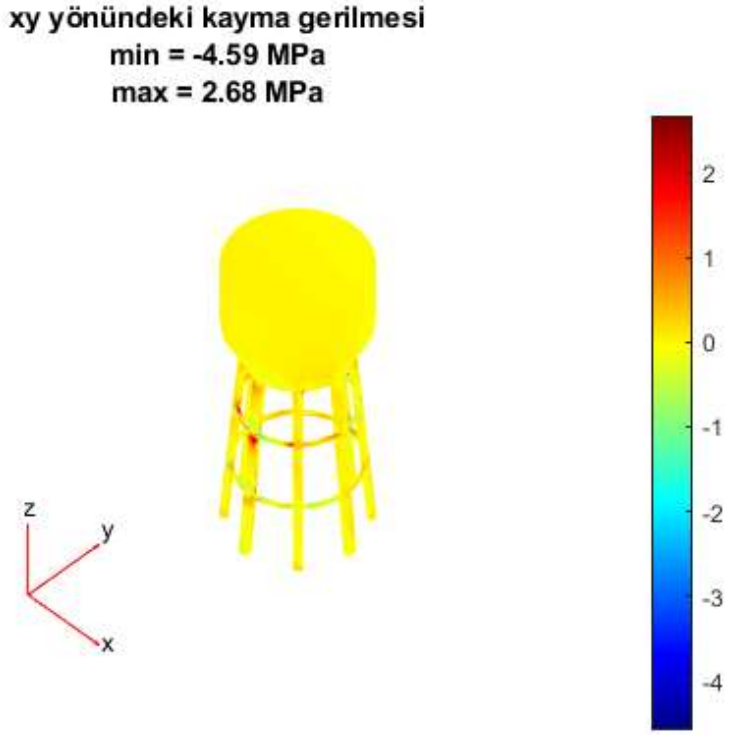
Şekil 6.69. ***Model-2'***de z yönündeki şekil değiştirme

Model-2 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin

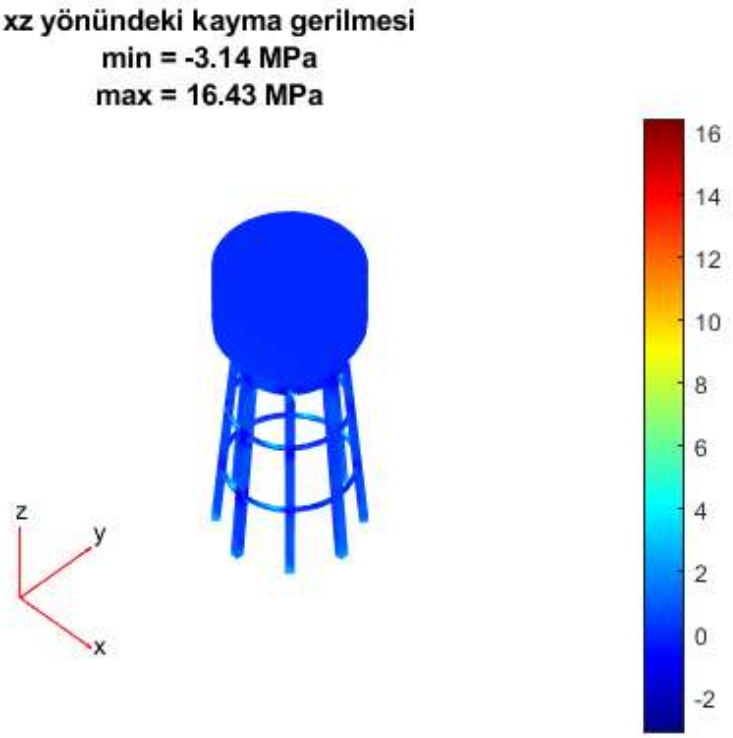
deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.70-6.79'da verilmektedir.



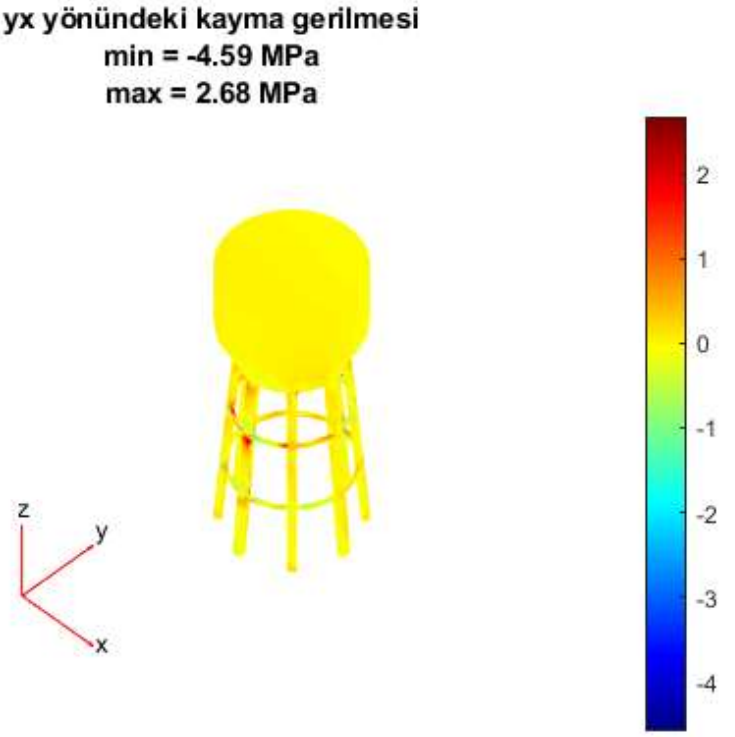
Şekil 6.70. ***Model-2'***de x yönündeki normal gerilme



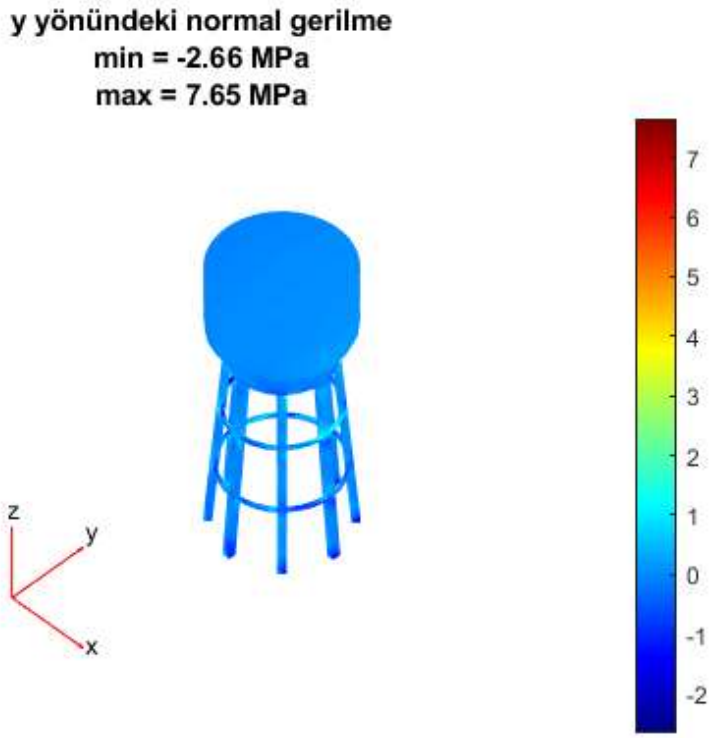
Şekil 6.71. ***Model-2'***de xy yönündeki kayma gerilmesi



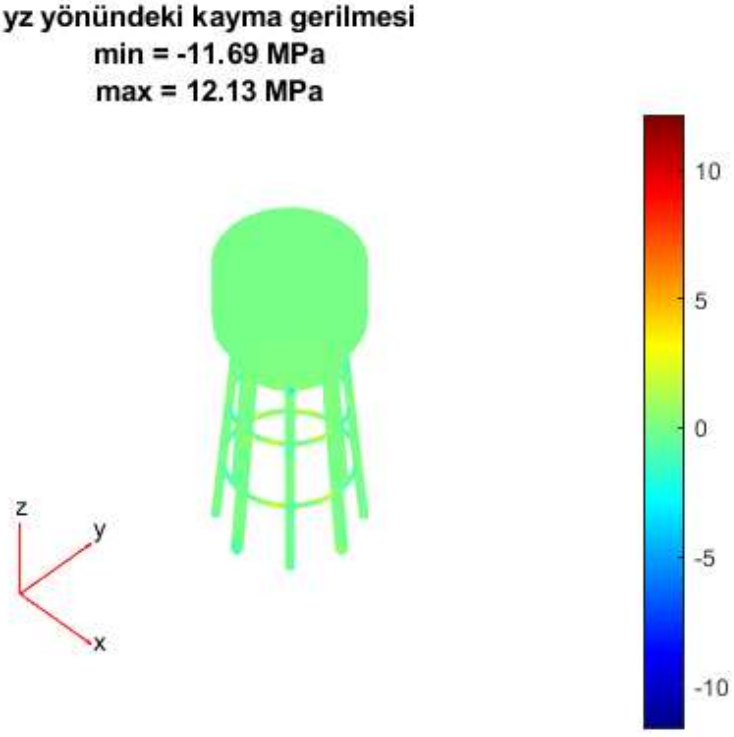
Şekil 6.72. ***Model-2'***de xz yönündeki kayma gerilmesi



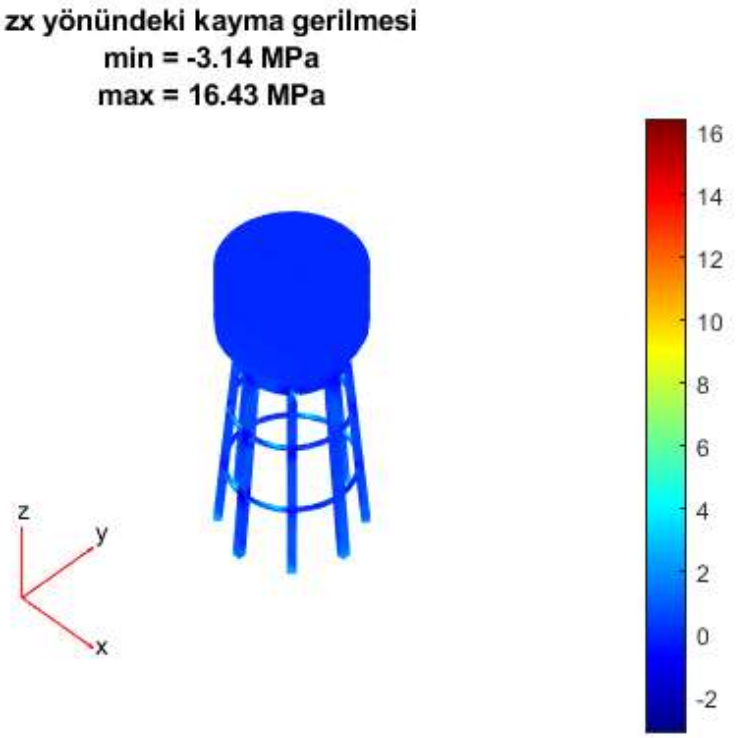
Şekil 6.73. ***Model-2'***de yx yönündeki kayma gerilmesi



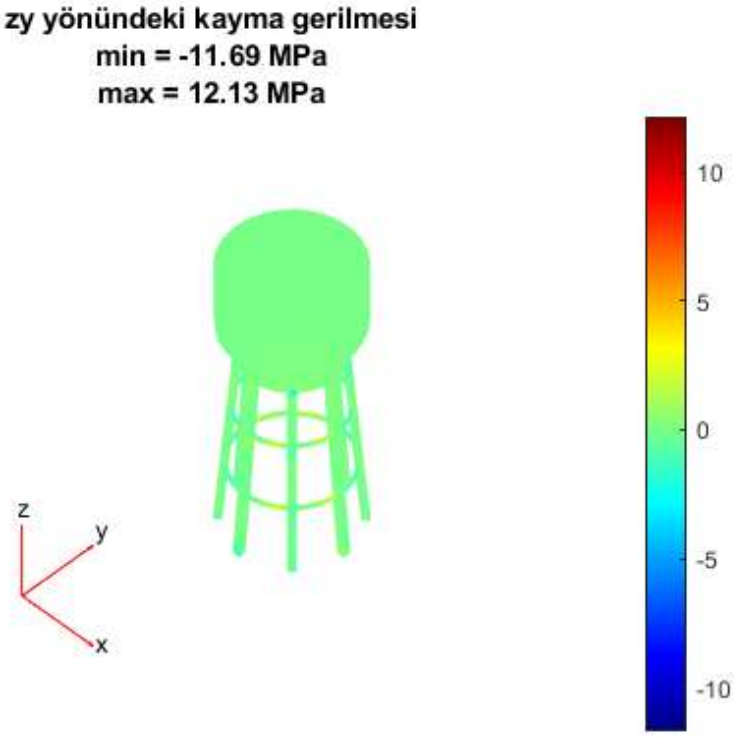
Şekil 6.74. ***Model-2'***de y yönündeki normal gerilme



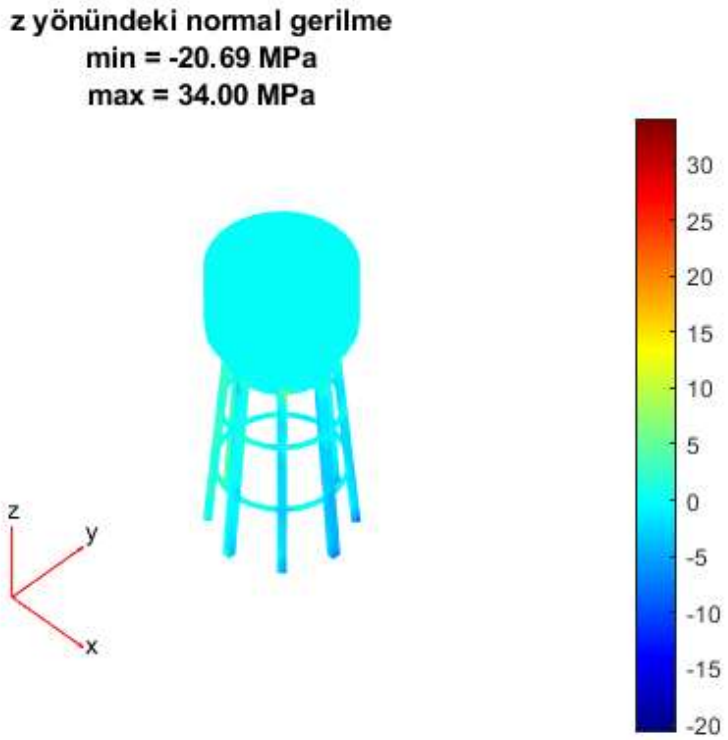
Şekil 6.75. ***Model-2'***de yz yönündeki kayma gerilmesi



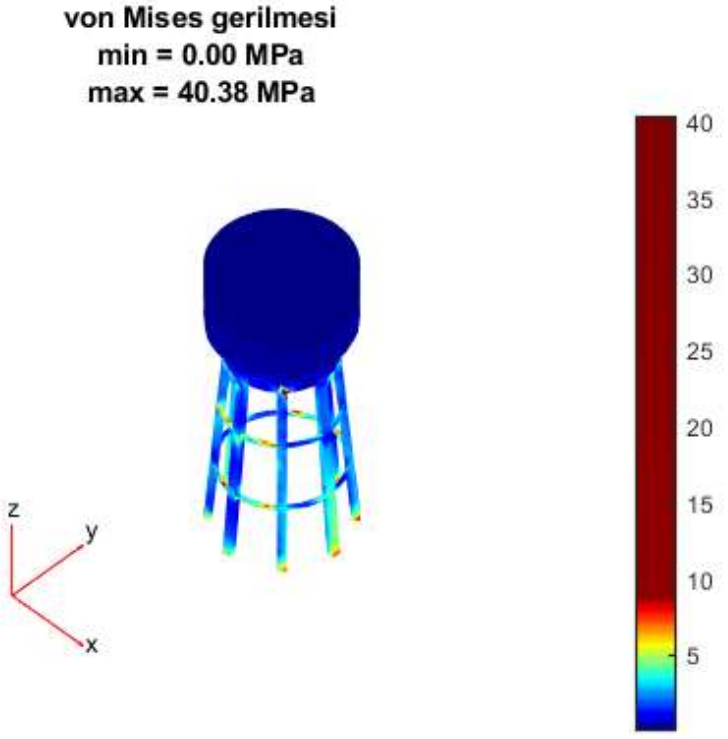
Şekil 6.76. ***Model-2'***de zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.77. ***Model-2'***de zy yönündeki kayma gerilmesi

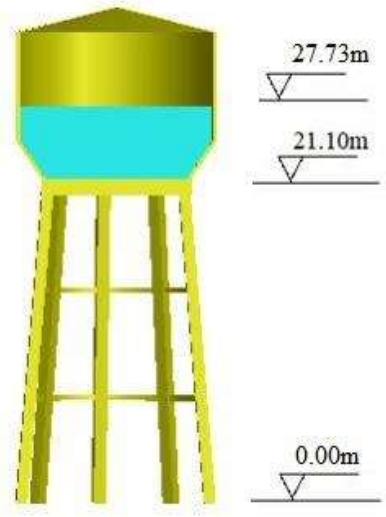


Şekil 6.78. ***Model-2'***de z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.79. ***Model-2'***de Von Mises gerilmesi

6.2.4.3. Model-3: Ayaklı Su Deposunun Yarım Dolu (%50) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için Westergaard Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizin Gerçekleştirildiği Model



Şekil 6.80. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu

Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumda olduğu ***Model-3*** Şekil 6.80'de görülmektedir.

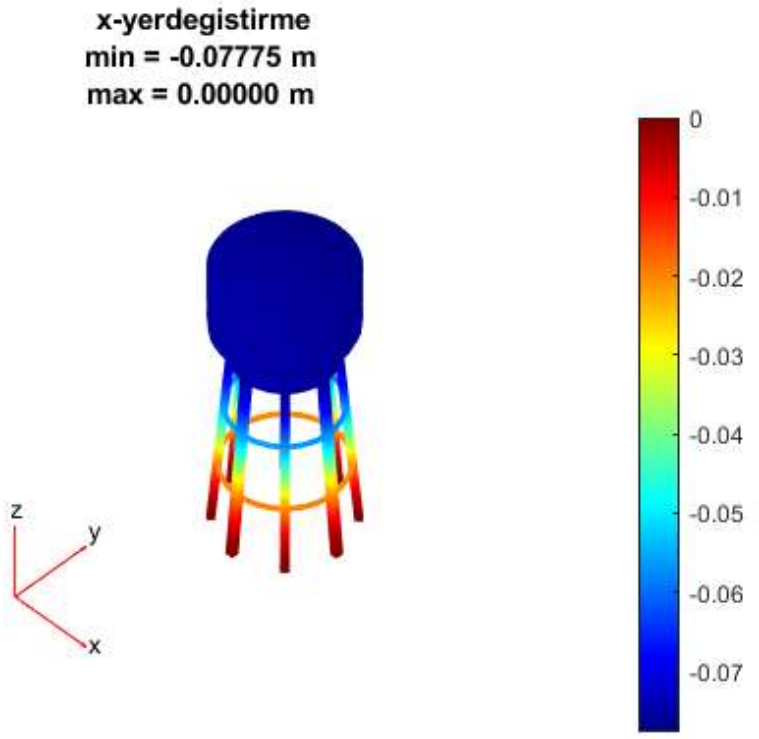
- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumunda sıvı eklenmiş kütle yaklaşımı olan Westergaard yaklaşımına göre modellenmiştir.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Sönüm türü:** Rayleigh sönüm kullanılmıştır.

Model-3'de sıvı-yapı etkileşimi için eklenmiş kütle yaklaşımına göre yarım dolu durumdaki deponun hidrodinamik basınç dağılımına bağlı olarak hazne cidarlarındaki sonlu eleman düğüm noktalarına impuls ve salınım su kütleleri eklenmiştir. Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB

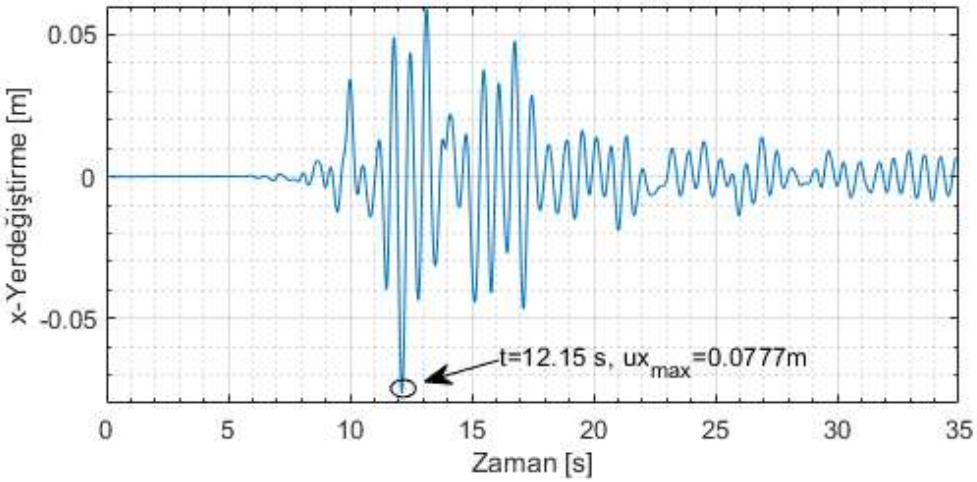
(MATLAB, 2023) ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Model-3 analiz sonuçları

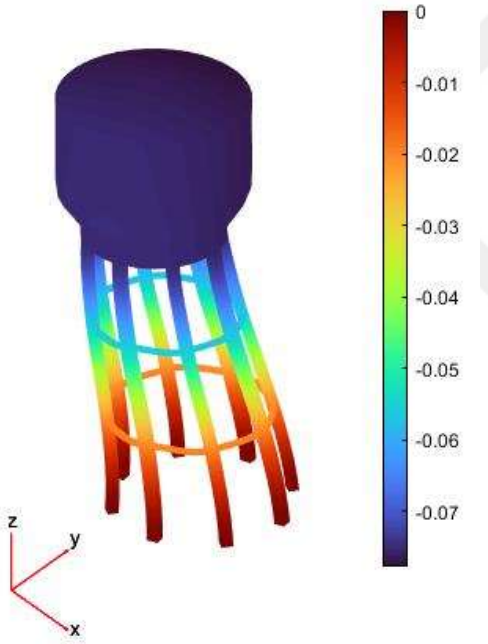
Model-3 ’e ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-3*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.81’de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.82’de verilmektedir. Şekil 6.83’de t=12.15’.nci saniyede x yönünde 0.07775m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.



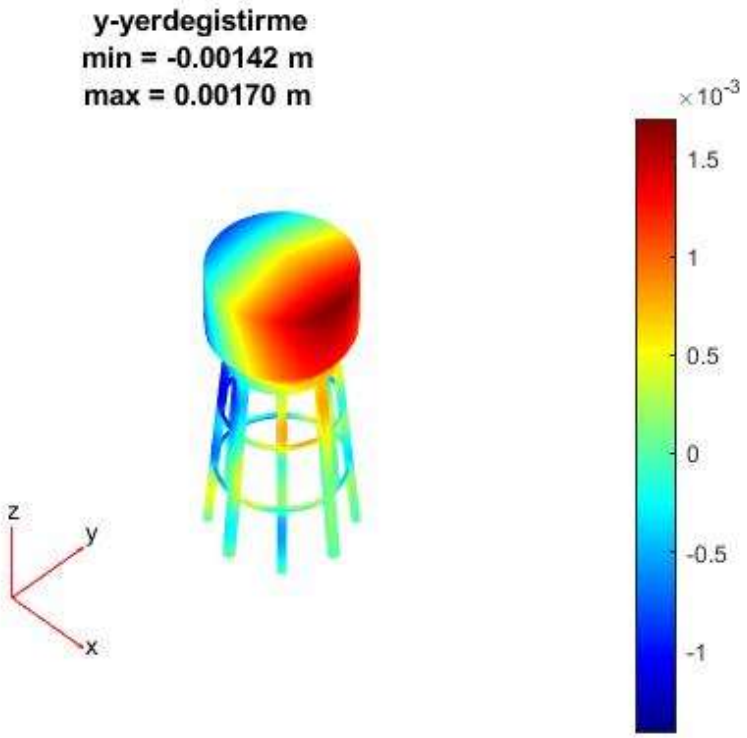
Şekil 6.81. ***Model-3’***te x yönündeki yer değiştirme



Şekil 6.82. ***Model-3'***te x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

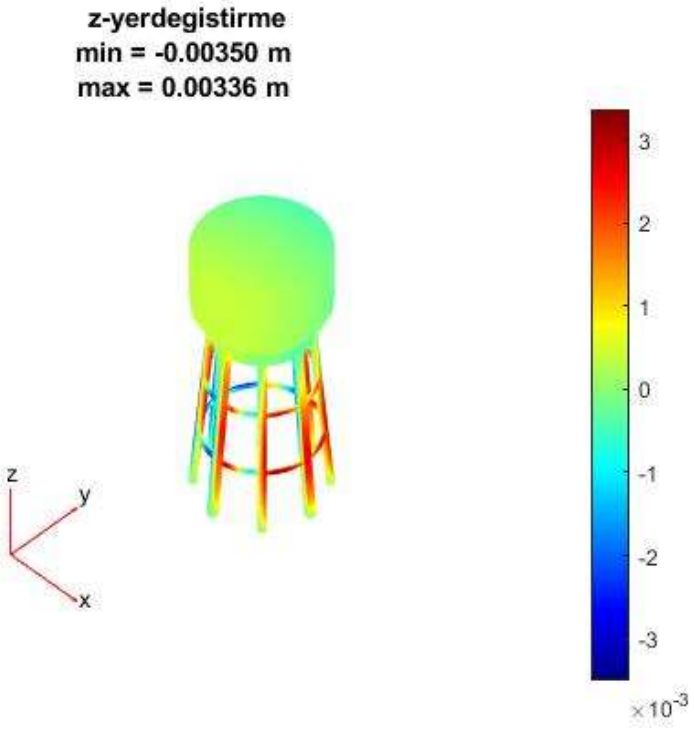


Şekil 6.83. ***Model-3'***te x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem



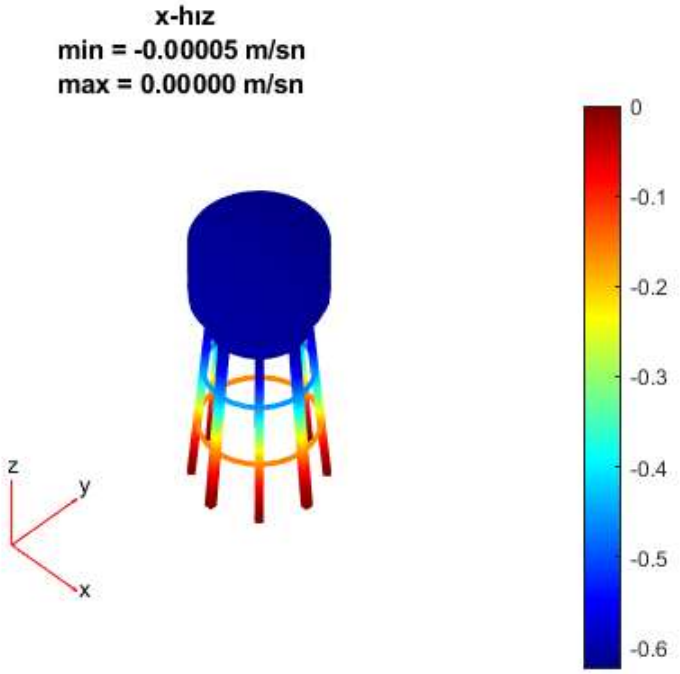
Şekil 6.84. ***Model-3'***te y yönündeki yer değiştirme

Model-3 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.84 ve 6.85'de verilmektedir.

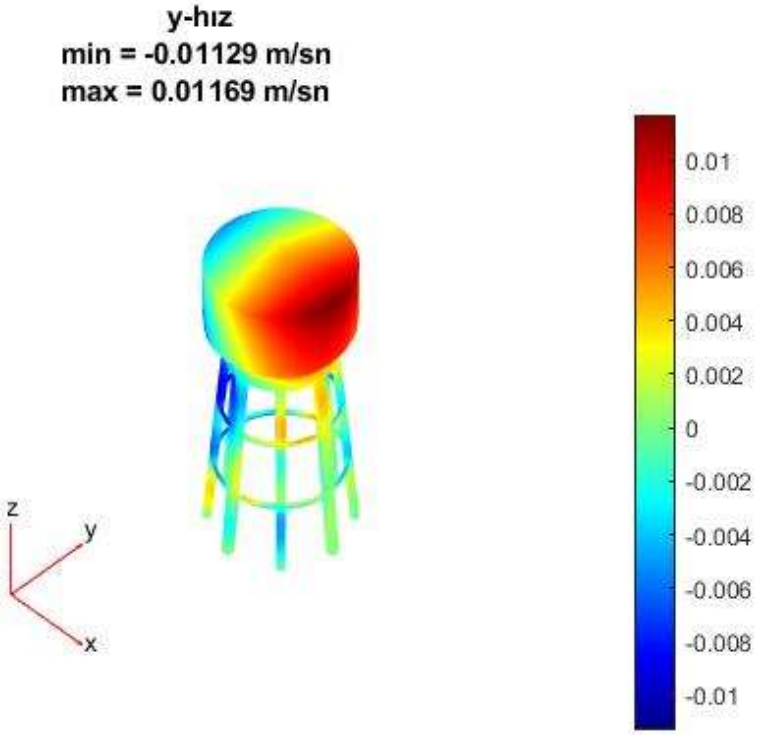


Şekil 6.85. ***Model-3'***te z yönündeki yer değiştirme

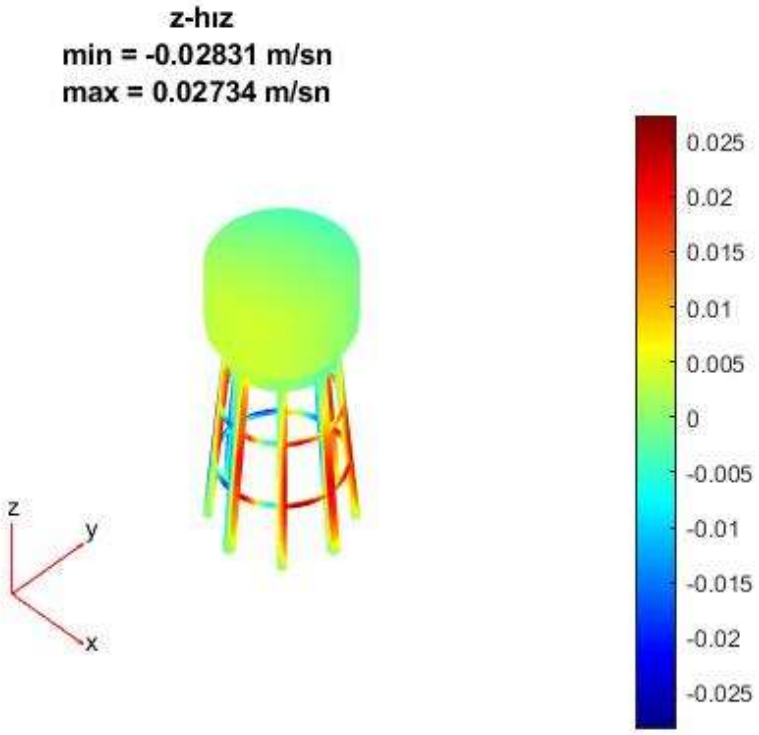
Model-3 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.86-6.88'de verilmektedir.



Şekil 6.86. ***Model-3'***te x yönündeki hız

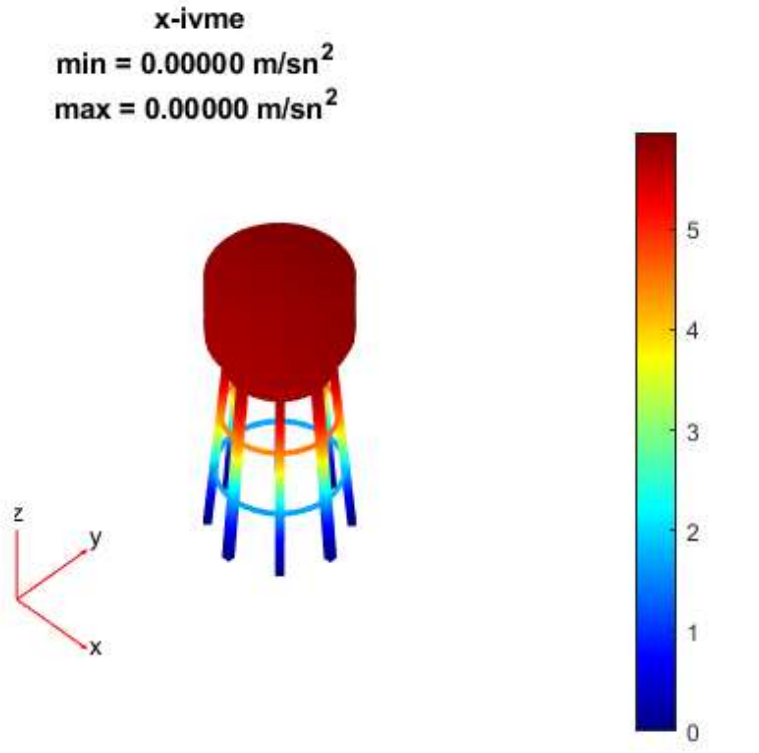


Şekil 6.87. ***Model-3'***te y yönündeki hız

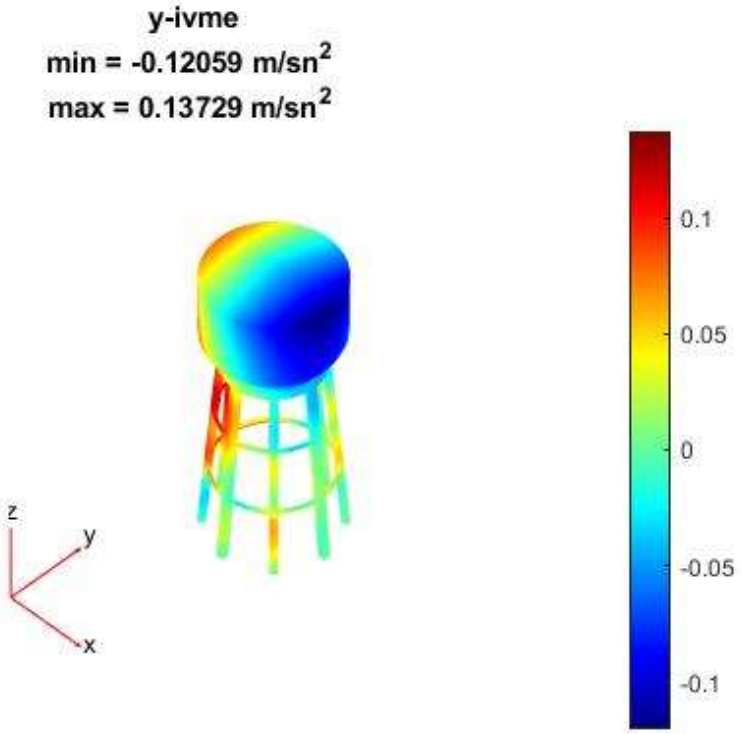


Şekil 6.88. ***Model-3'***te z yönündeki hız

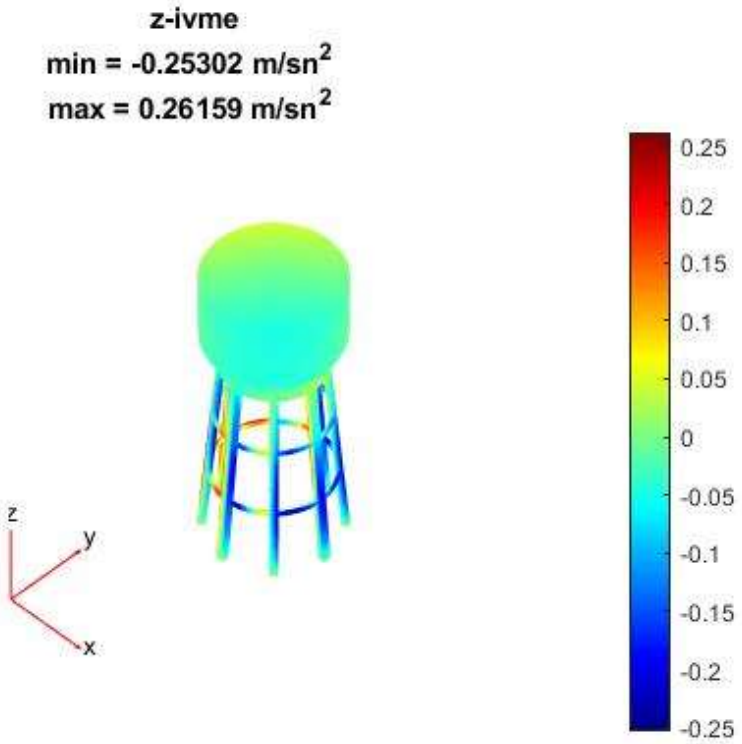
Model-3 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.89-6.91'de verilmektedir.



Şekil 6.89. ***Model-3'***te x yönündeki ivme

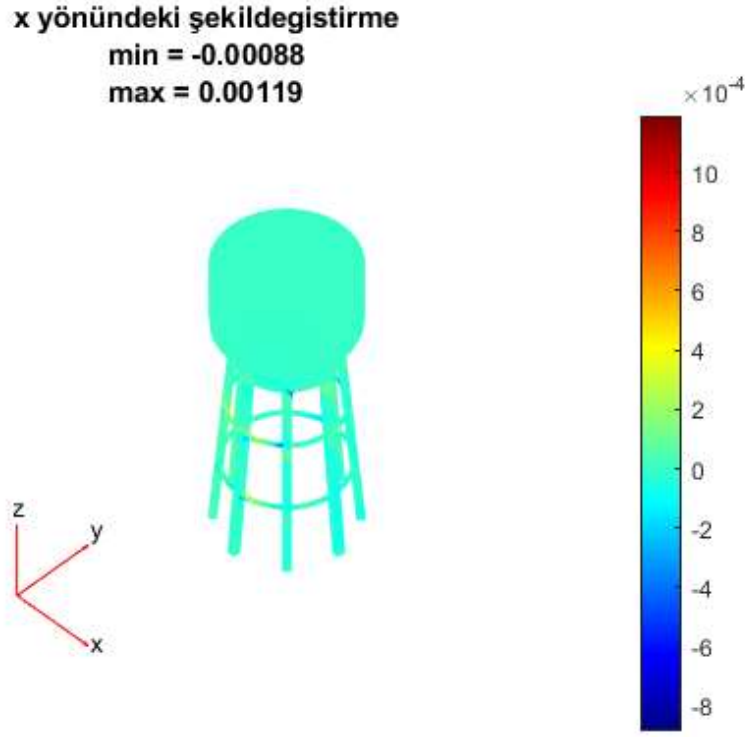


Şekil 6.90. ***Model-3'***te y yönündeki ivme

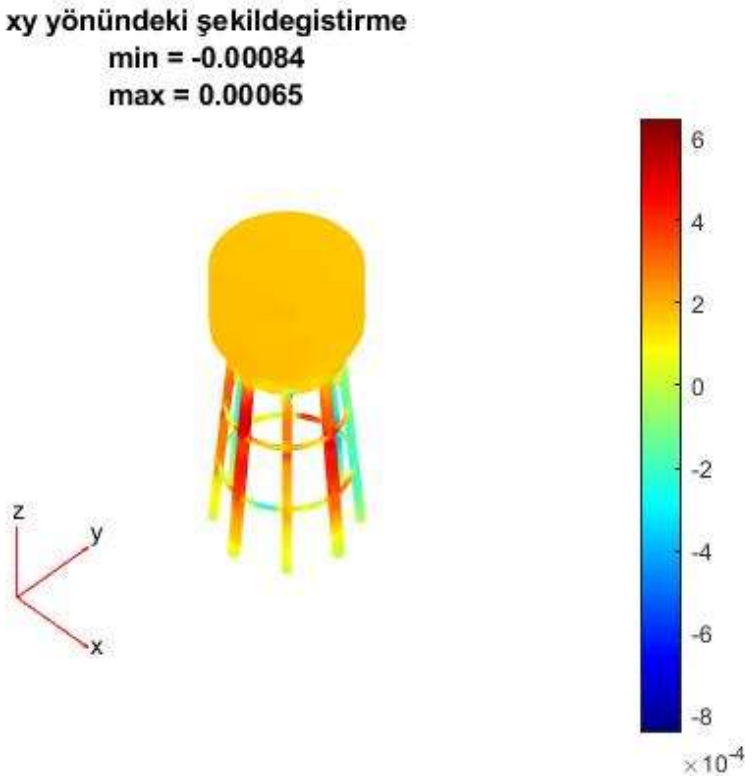


Şekil 6.91. ***Model-3'***te z yönündeki ivme

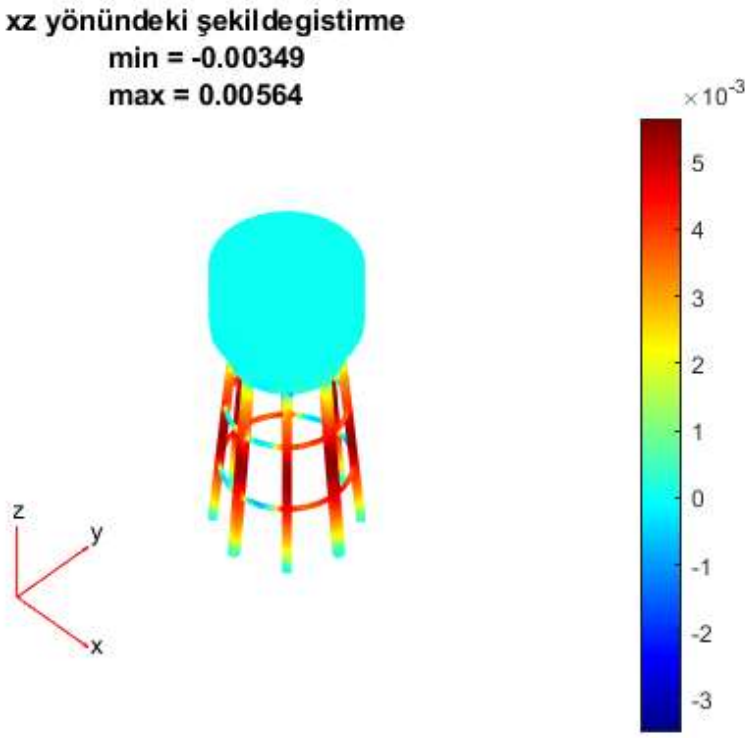
Model-3 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.92-6.100'de verilmektedir.



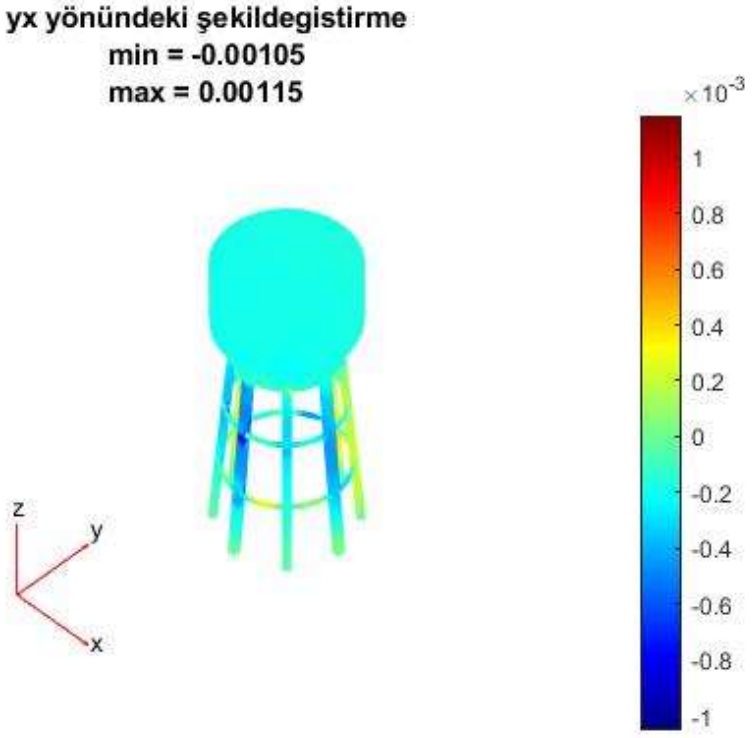
Şekil 6.92. ***Model-3'***te x yönündeki şekil değiştirme



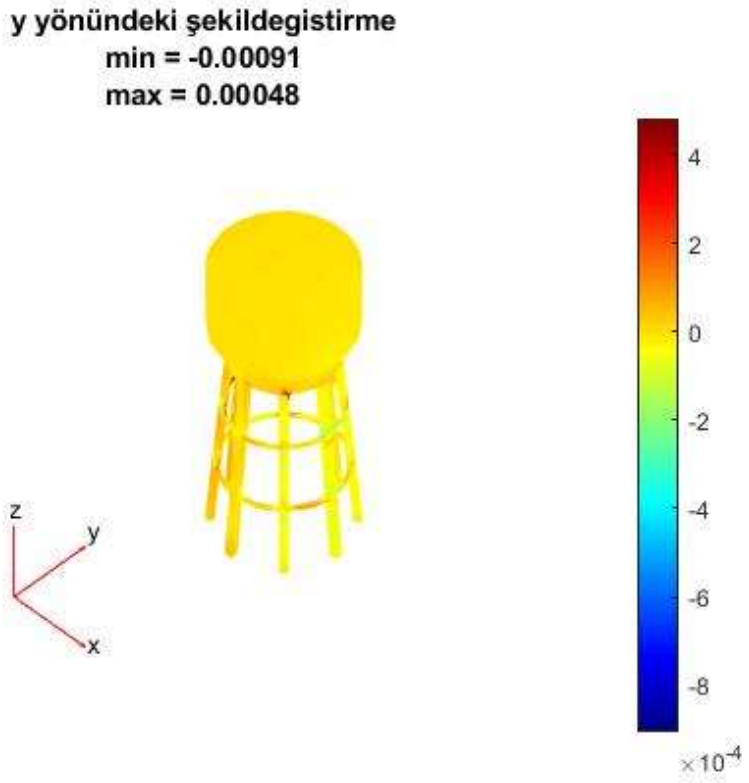
Şekil 6.93. ***Model-3'***te xy yönündeki şekil değiştirme



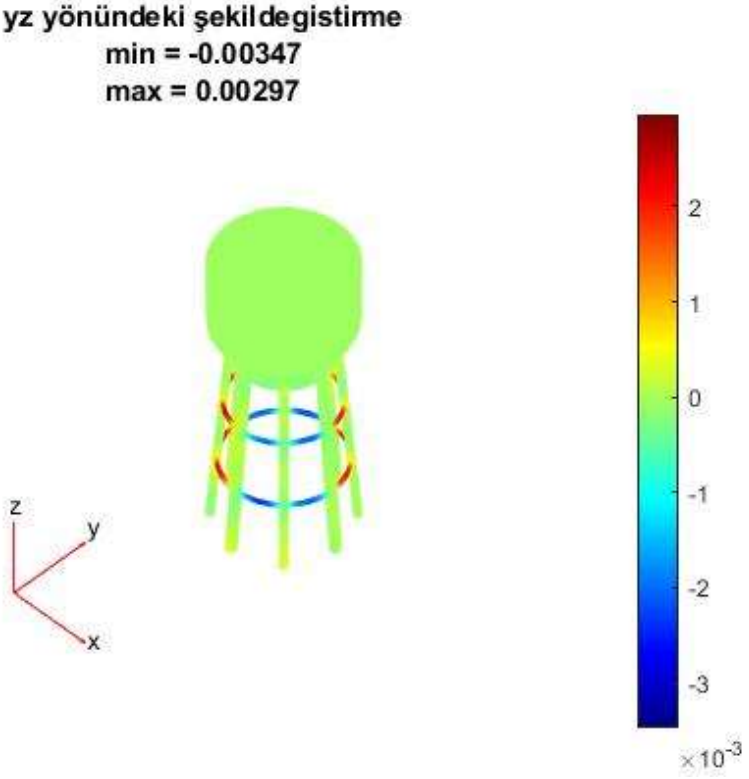
Şekil 6.94. ***Model-3'***te xz yönündeki şekil değiştirme



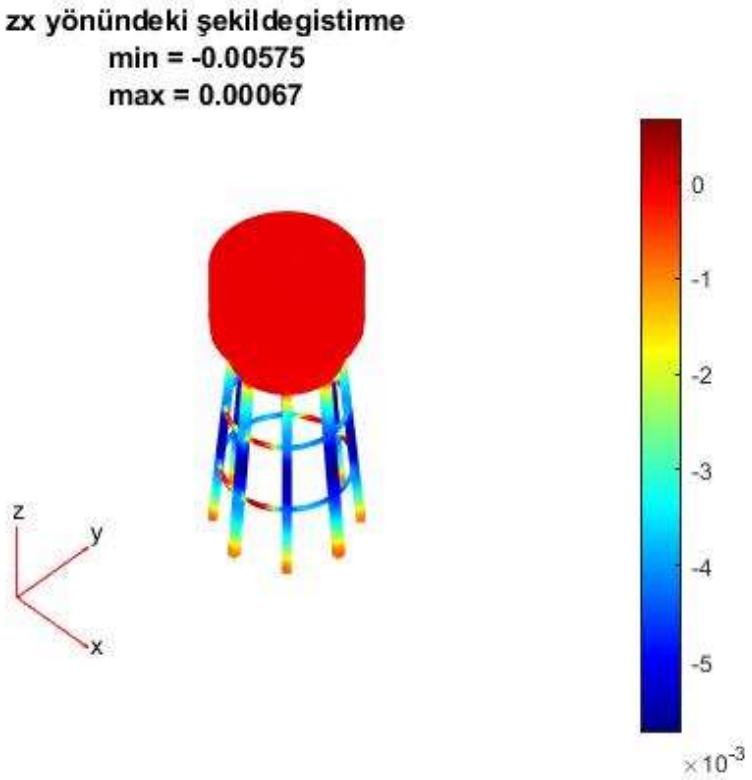
Şekil 6.95. ***Model-3'***te yx yönündeki şekil değiştirme



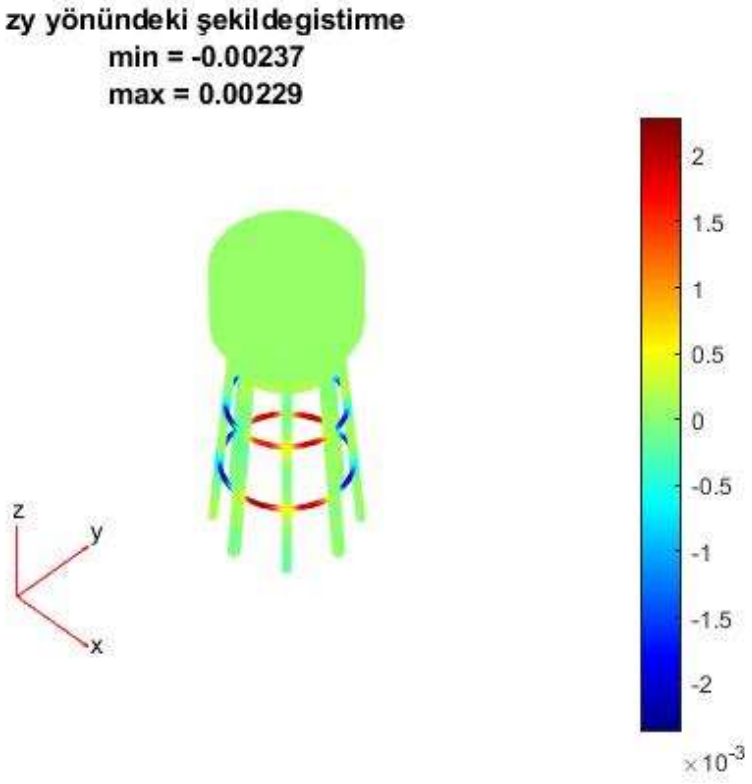
Şekil 6.96. ***Model-3'***te y yönündeki şekil değiştirme



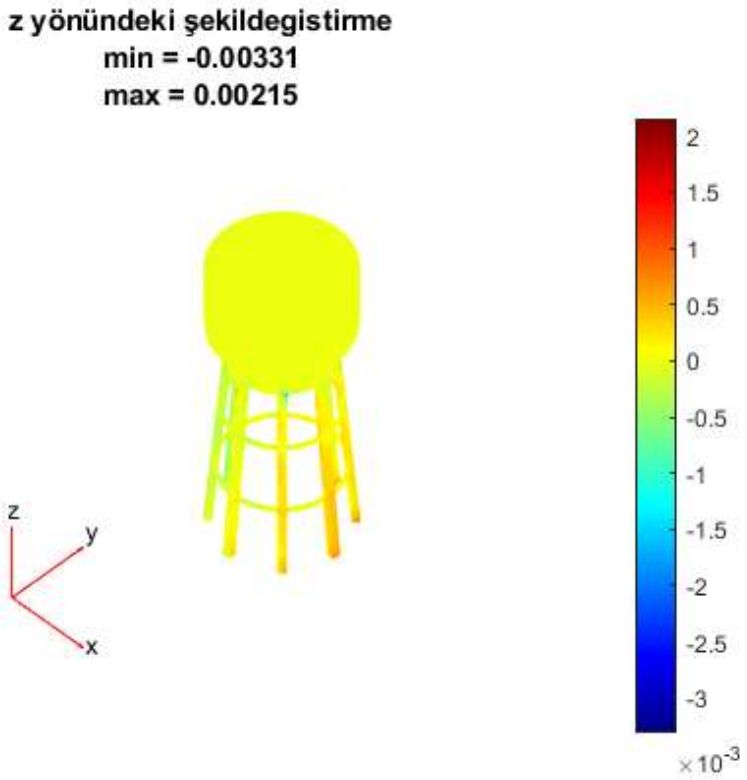
Şekil 6.97. ***Model-3'***te yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.98. ***Model-3'***te zx yönündeki şekil değiştirme

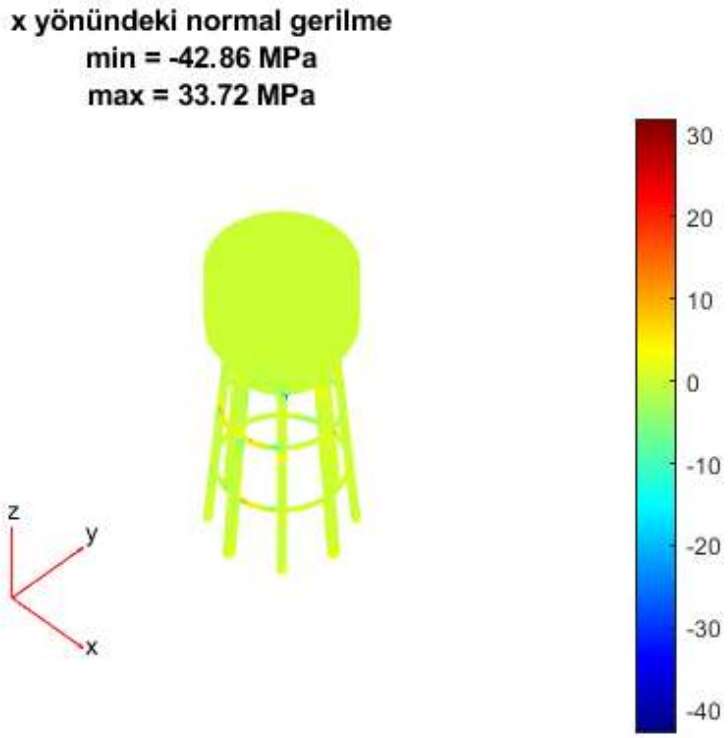


Şekil 6.99. ***Model-3'***te zy yönündeki şekil değiştirme

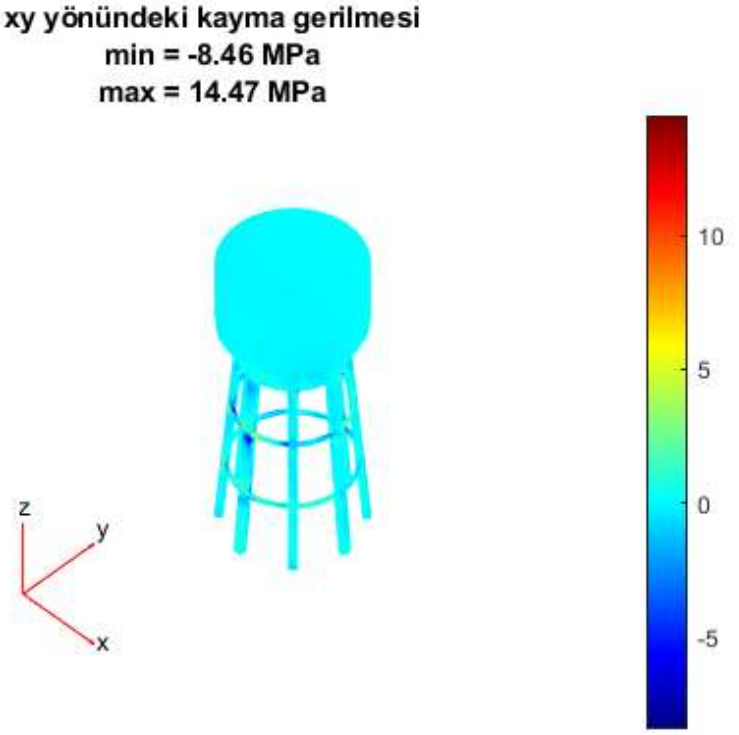


Şekil 6.100. ***Model-3'***te z yönündeki şekil değiştirme

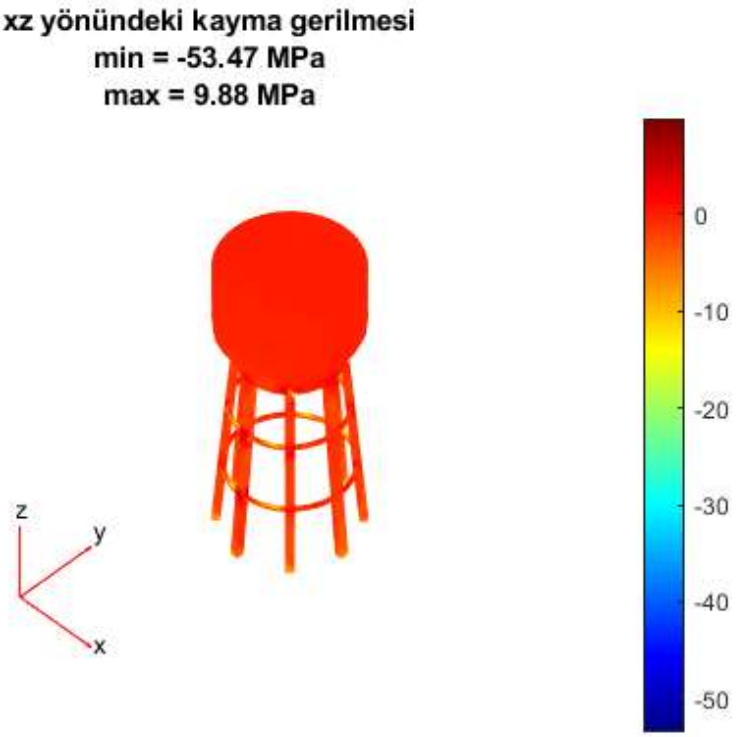
Model-3 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.101-6.110'da verilmektedir.



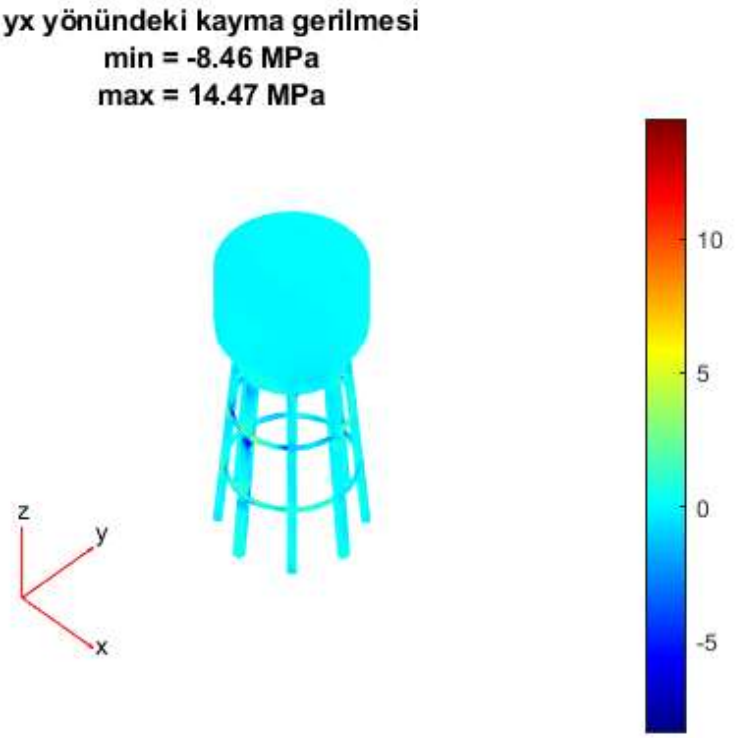
Şekil 6.101. ***Model-3'***te x yönündeki normal gerilme



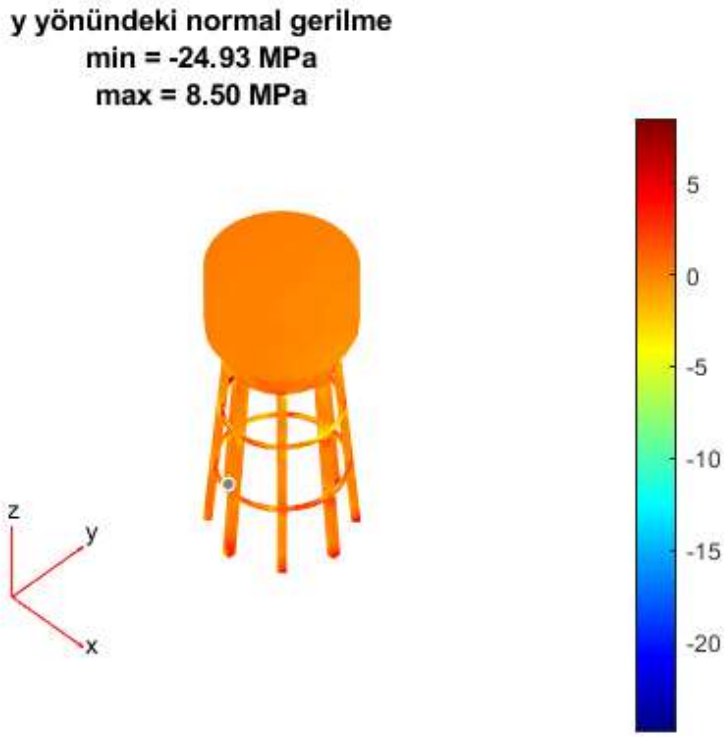
Şekil 6.102. ***Model-3'***te xy yönündeki kayma gerilmesi



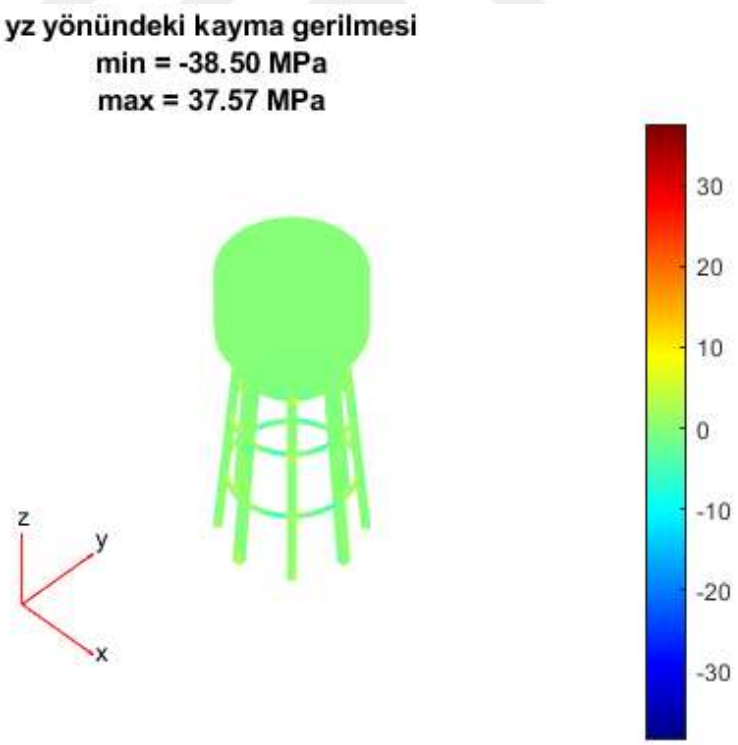
Şekil 6.103. ***Model-3'***te xz yönündeki kayma gerilmesi



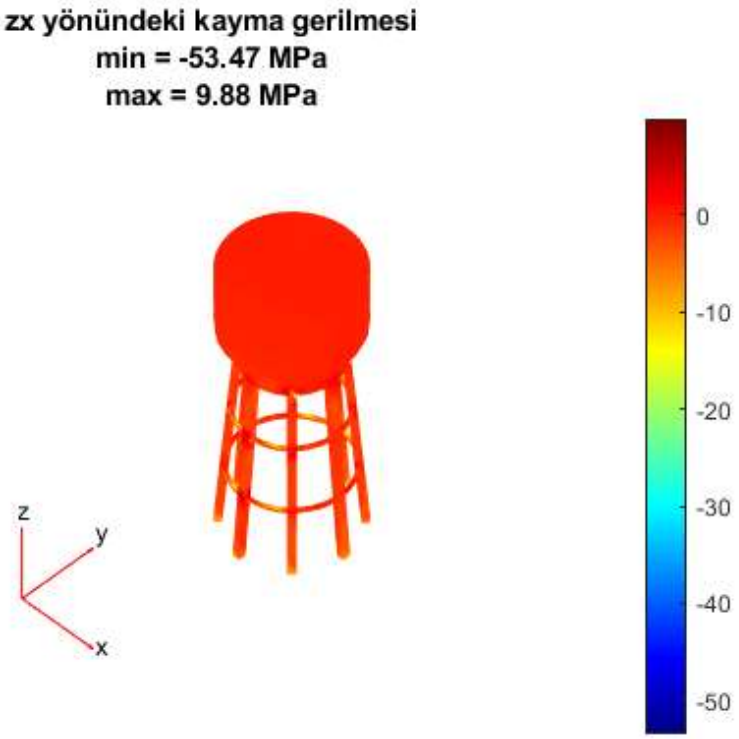
Şekil 6.104. ***Model-3'***te yx yönündeki kayma gerilmesi



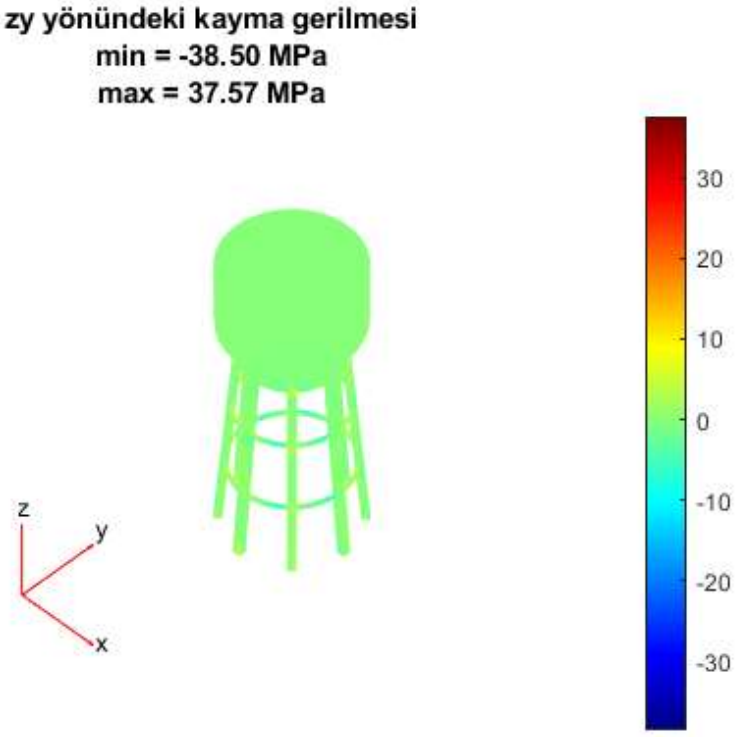
Şekil 6.105. ***Model-3'***te y yönündeki normal gerilme



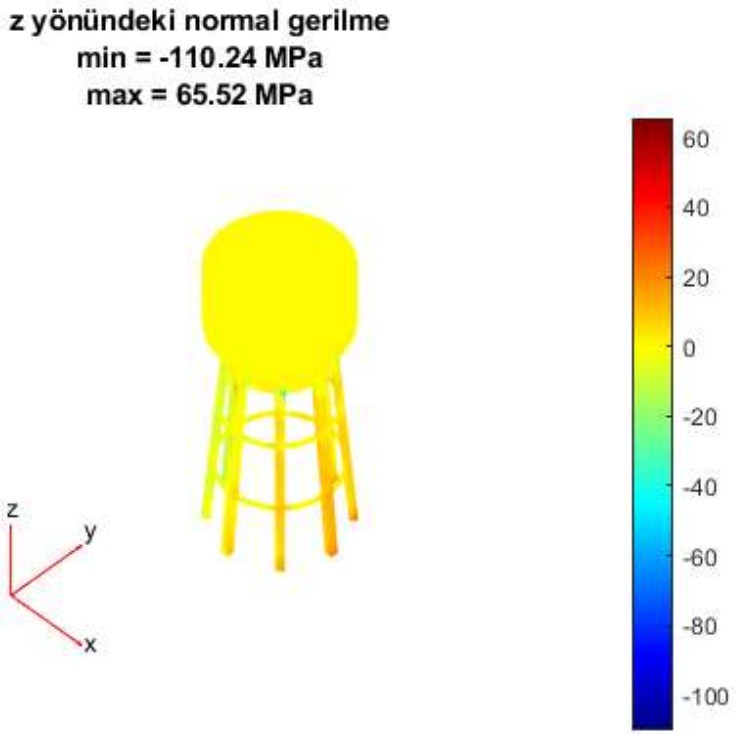
Şekil 6.106. ***Model-3'***te yz yönündeki kayma gerilmesi



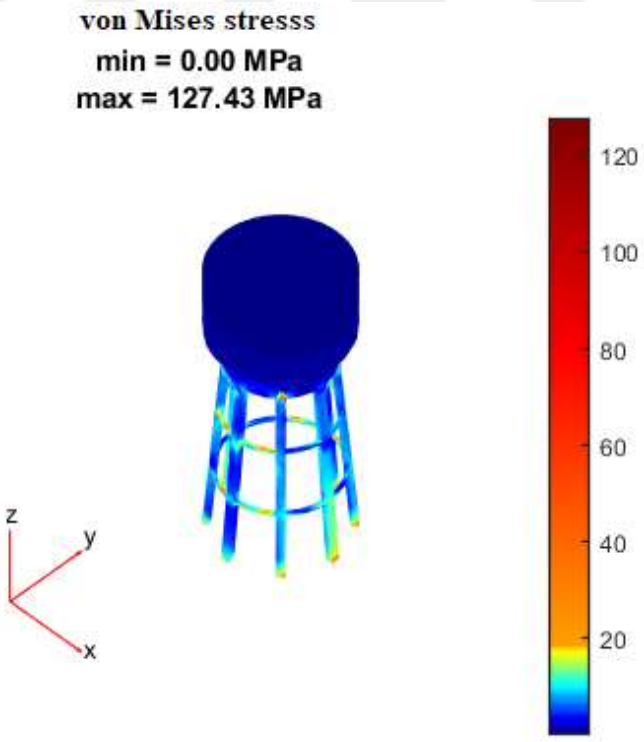
Şekil 6.107. ***Model-3'***te zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.108. ***Model-3'***te zy yönündeki kayma gerilmesi

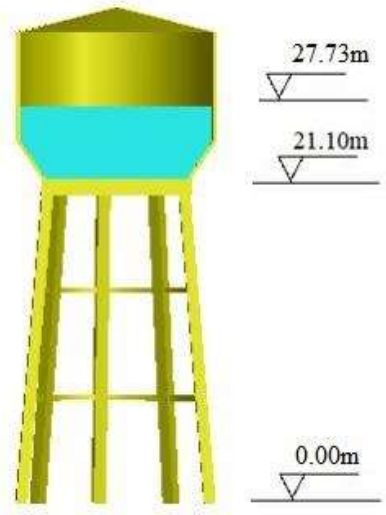


Şekil 6.109. ***Model-3'***te z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.110. ***Model-3'***te Von Mises gerilmesi

6.2.4.4. Model-4: Ayaklı Su Deposunun Yarım Dolu (%50) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için Westergaard Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizin Gerçekleştirildiği Model.



Şekil 6.111. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu

Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumda olduğu ***Model-4*** Şekil 6.111'de görülmektedir.

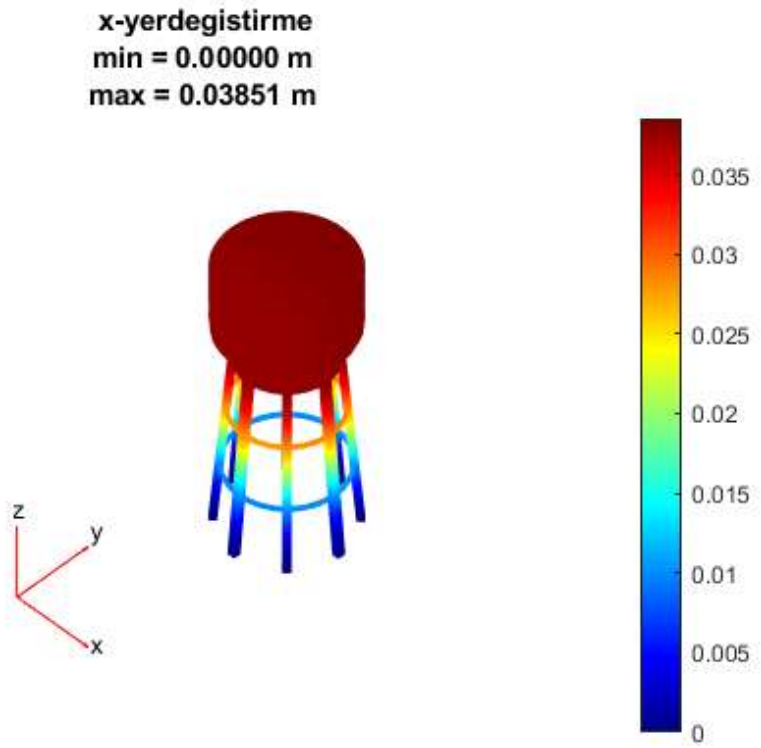
- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumunda sıvı eklenmiş kütle yaklaşımı olan Westergaard yaklaşımına göre modellenmiştir.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analiz için histeresis modellerden Bouc-Wen modeli kullanılmıştır.
- **Sönüm türü:** Eşdeğer viskoz sönüm kullanılmıştır.

Model-4'de sıvı-yapı etkileşimi için eklenmiş kütle yaklaşımına göre yarım dolu durumdaki deponun hidrodinamik basınç dağılımına bağlı olarak hazne cidarlarındaki sonlu eleman düğüm noktalarına impuls ve salınım su kütleleri eklenmiştir. Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket

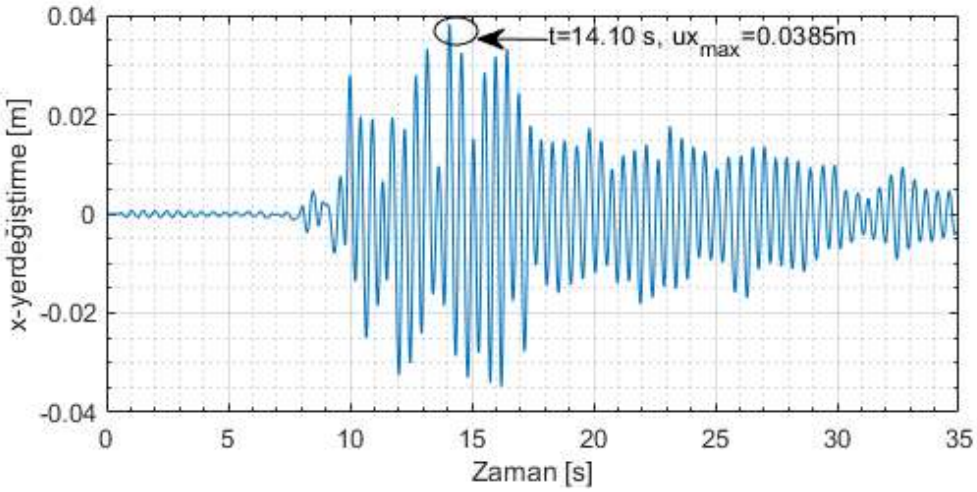
denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB(MATLAB, 2023) ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Model-4 analiz sonuçları

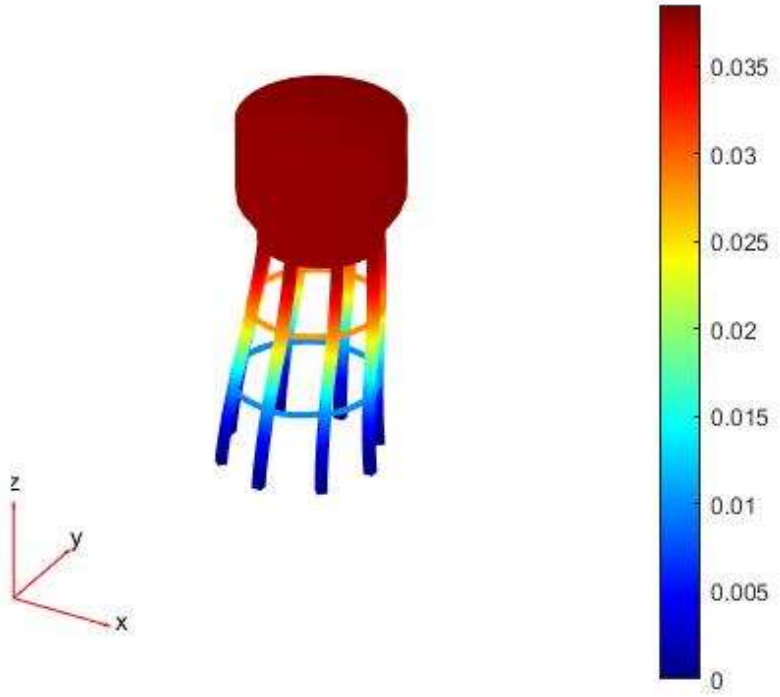
Model-4 'e ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-4*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.112'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.113'de verilmektedir. Şekil 6.114'de t=14.10'.ncu saniyede x yönünde 0.03851m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.



Şekil 6.112. ***Model-4'***te x yönündeki yer değiştirme

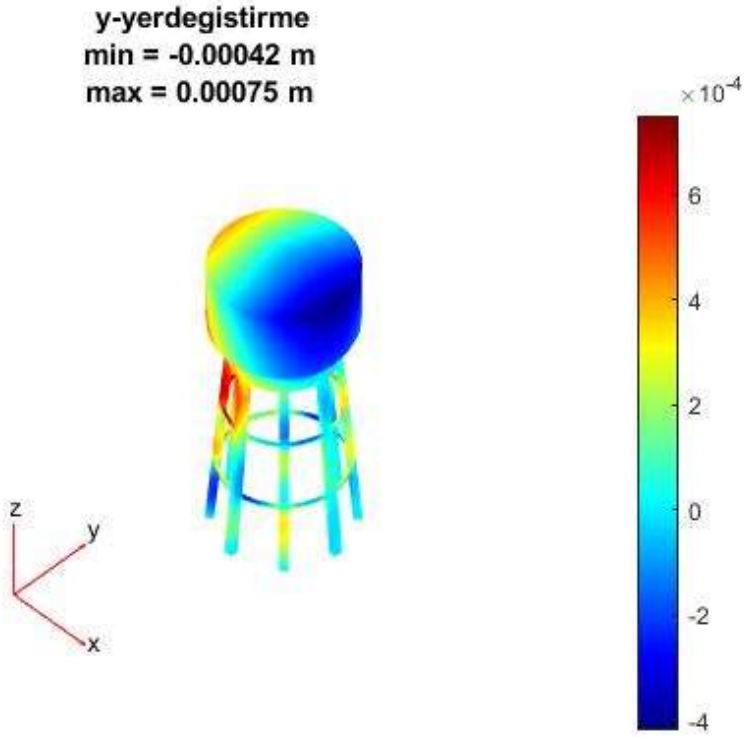


Şekil 6.113. ***Model-4'***te x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

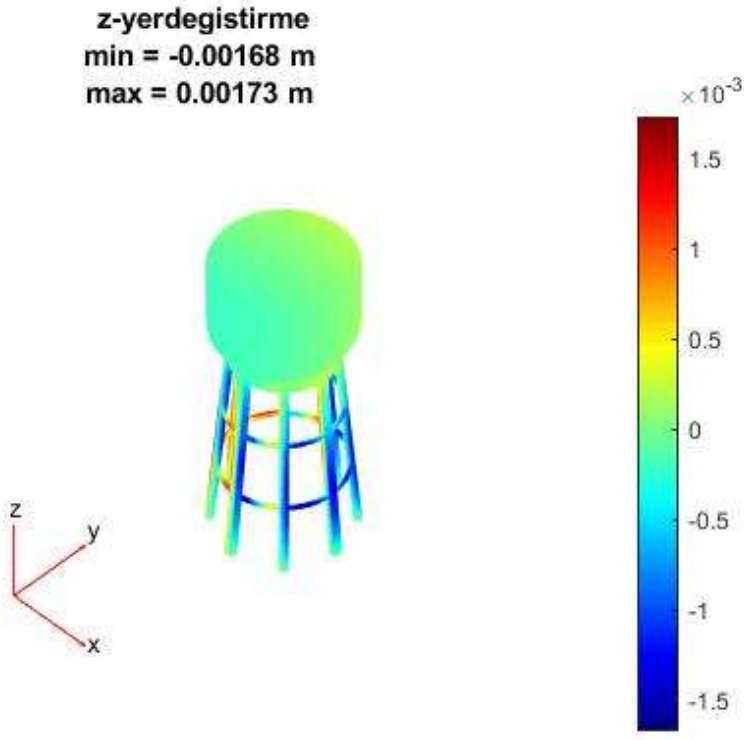


Şekil 6.114. ***Model-4'***te x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-4 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.115 ve 6.116'da verilmektedir.

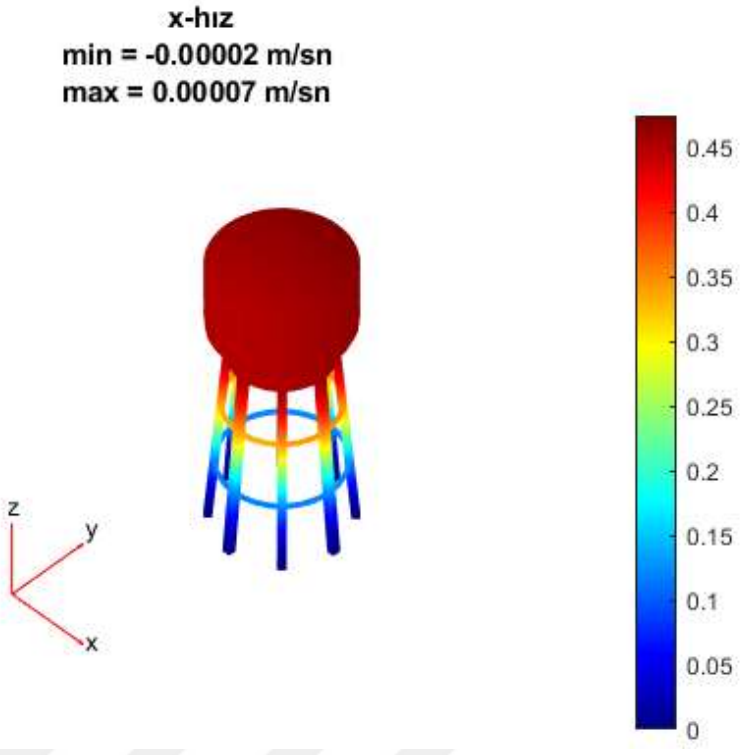


Şekil 6.115. ***Model-4'***te y yönündeki yer değiştirme

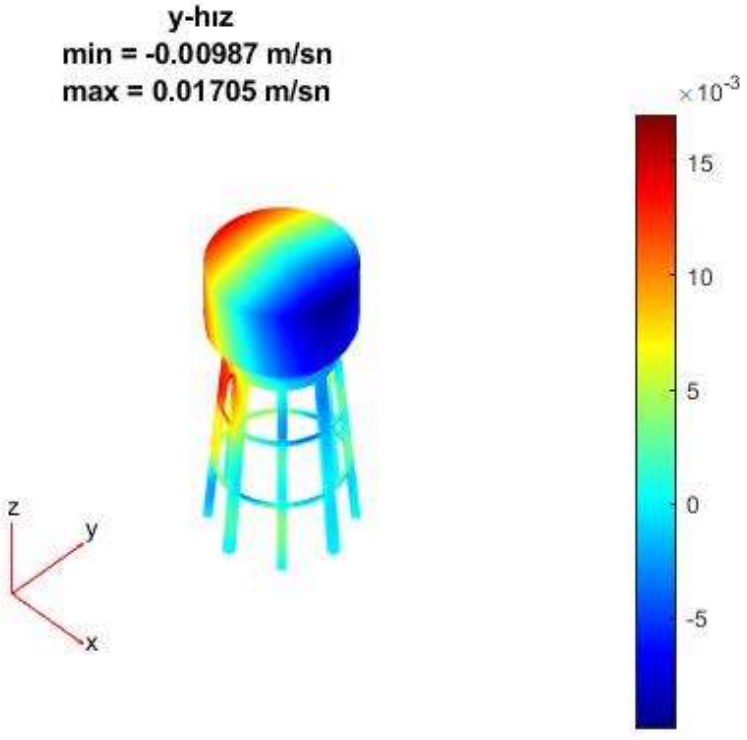


Şekil 6.116. ***Model-4'***te z yönündeki yer değiştirme

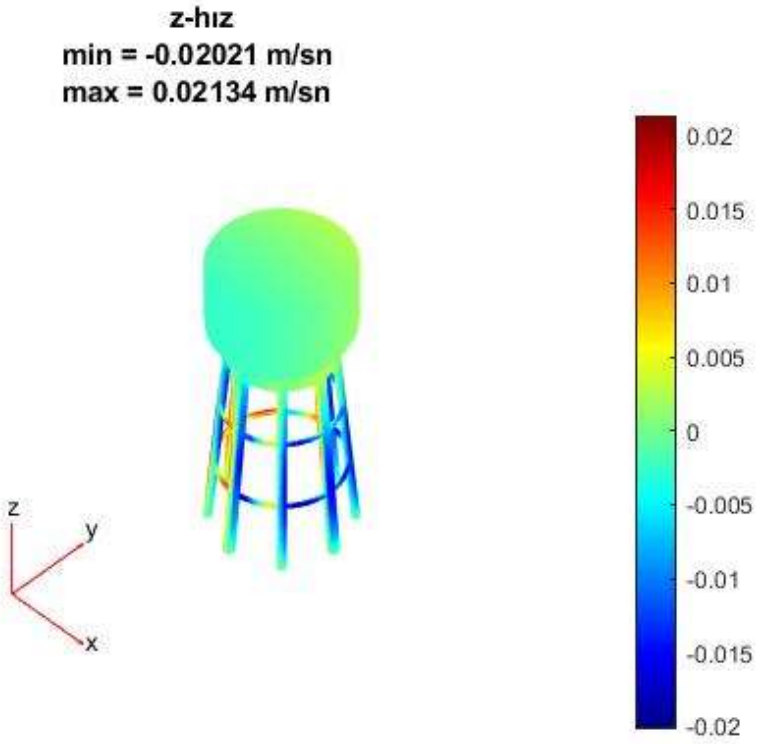
Model-4 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.117 - 6.119'da verilmektedir.



Şekil 6.117. ***Model-4'***te x yönündeki hız

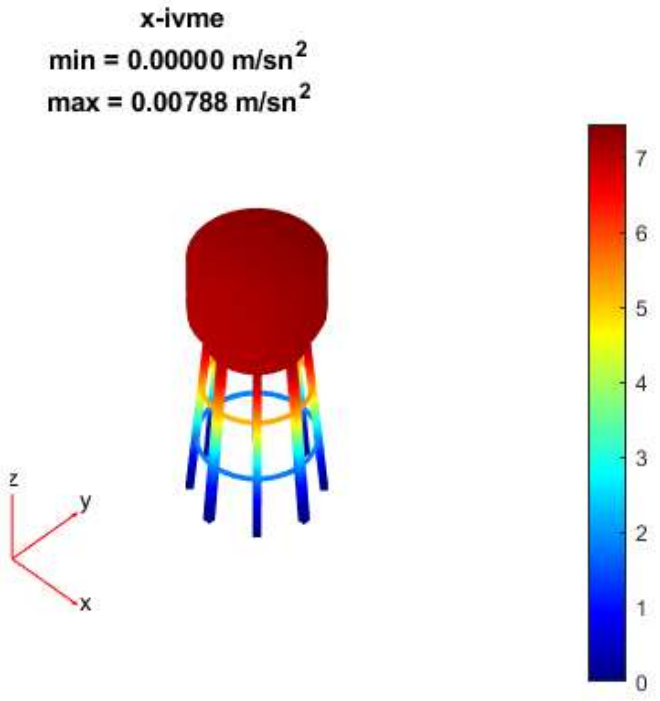


Şekil 6.118. ***Model-4'***te y yönündeki hız

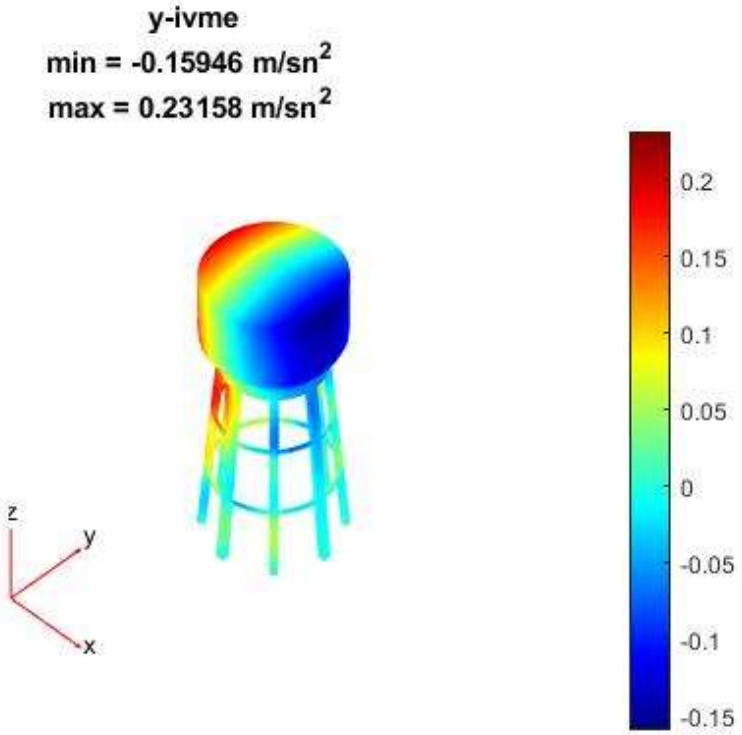


Şekil 6.119. ***Model-4'***te z yönündeki hız

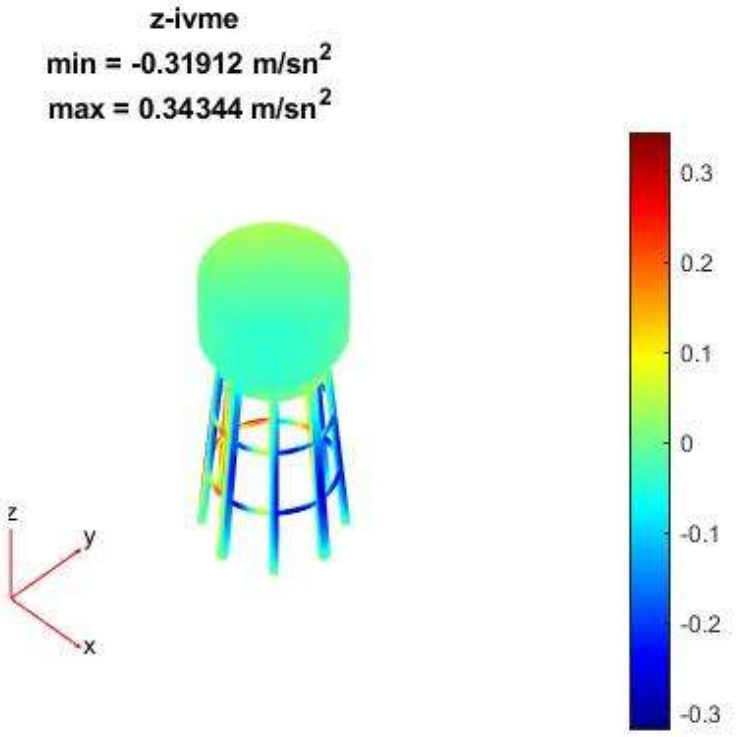
Model-4 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.120 - 6.122'de verilmektedir.



Şekil 6.120. ***Model-4'***te x yönündeki ivme



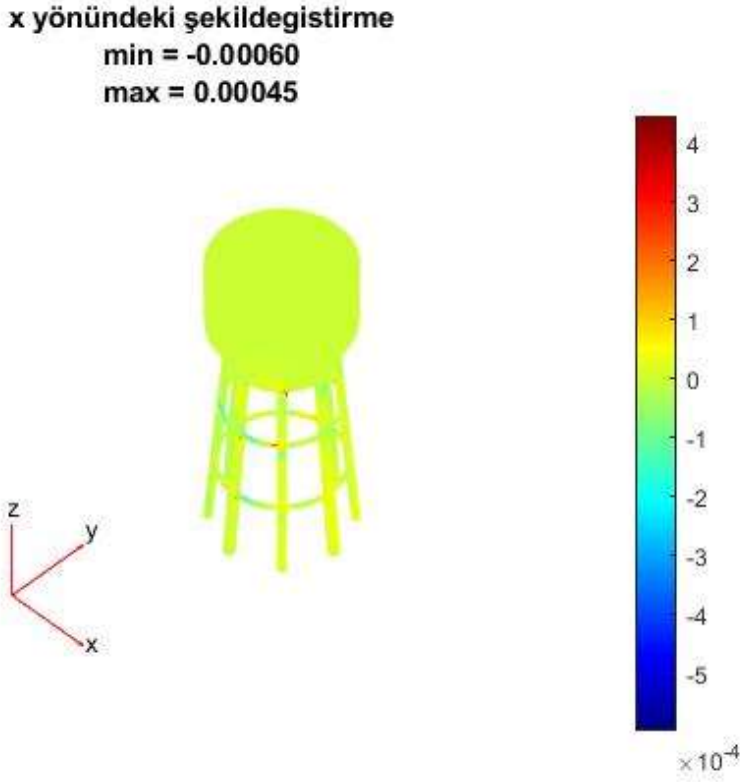
Şekil 6.121. ***Model-4'***te y yönündeki ivme



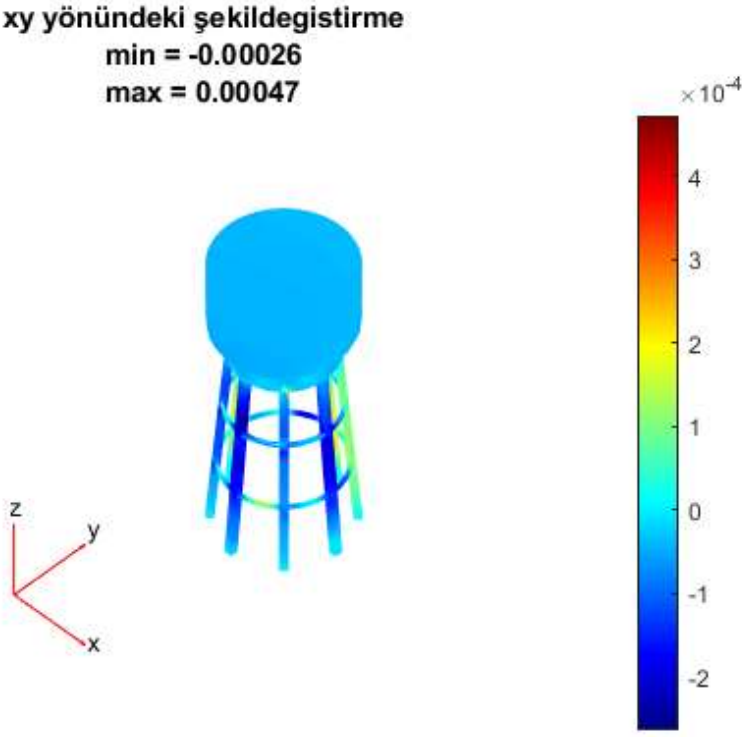
Şekil 6.122. ***Model-4'***te z yönündeki ivme

Model-4 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin

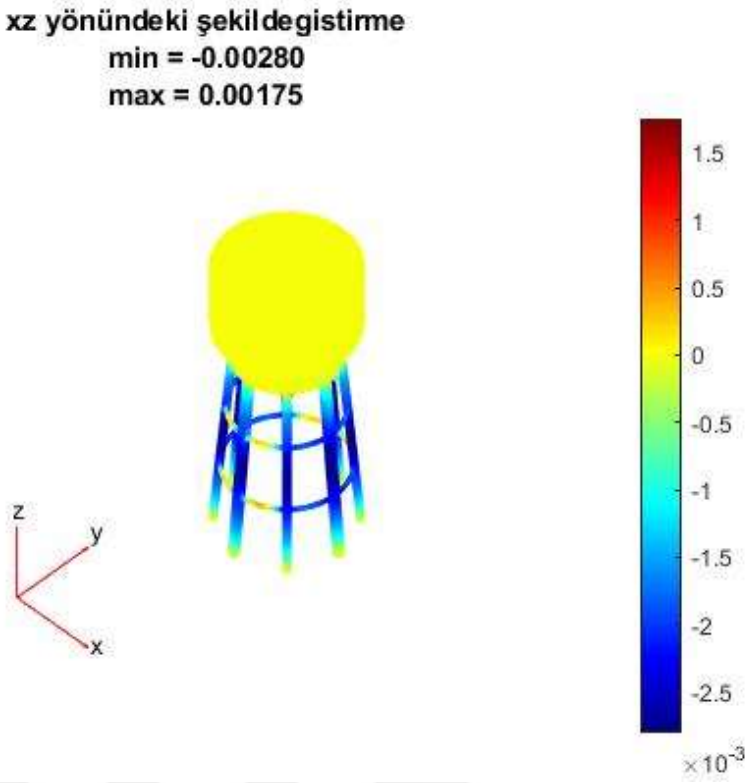
deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.123 ve 6.131'de verilmektedir.



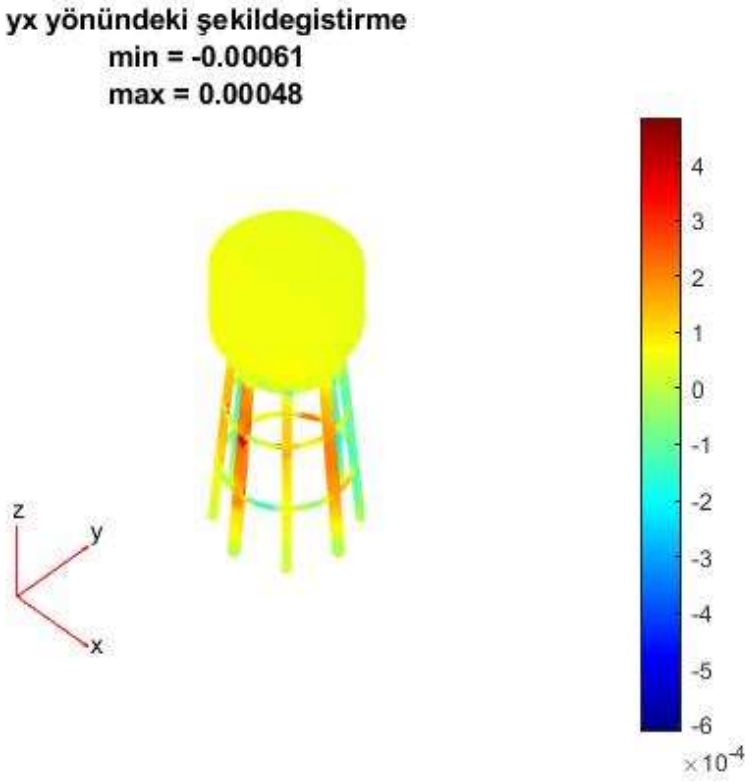
Şekil 6.123. ***Model-4'***te x yönündeki şekil değiştirme



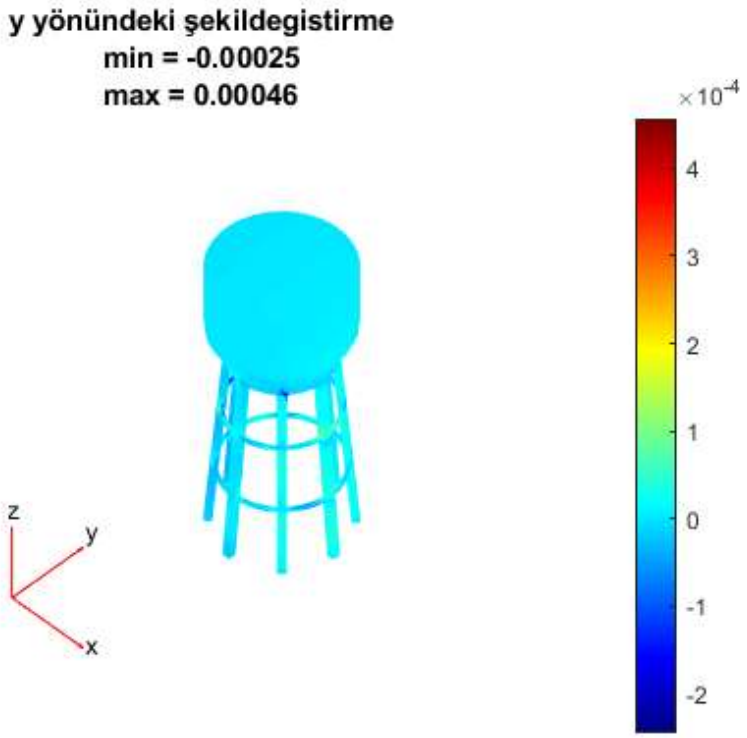
Şekil 6.124. ***Model-4'***te xy yönündeki şekil değiştirme



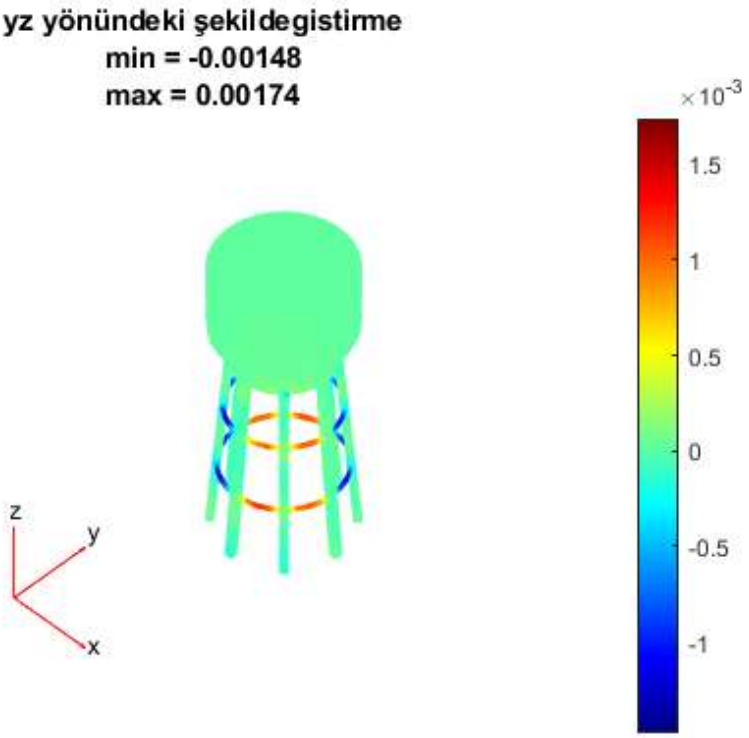
Şekil 6.125. ***Model-4'***te xz yönündeki şekil değiştirme



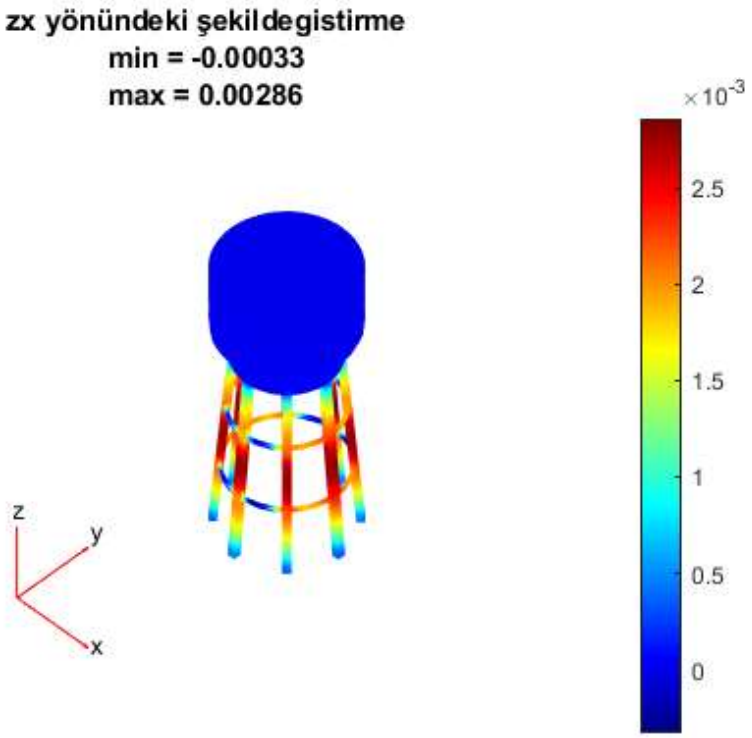
Şekil 6.126. ***Model-4'***te yx yönündeki şekil değiştirme



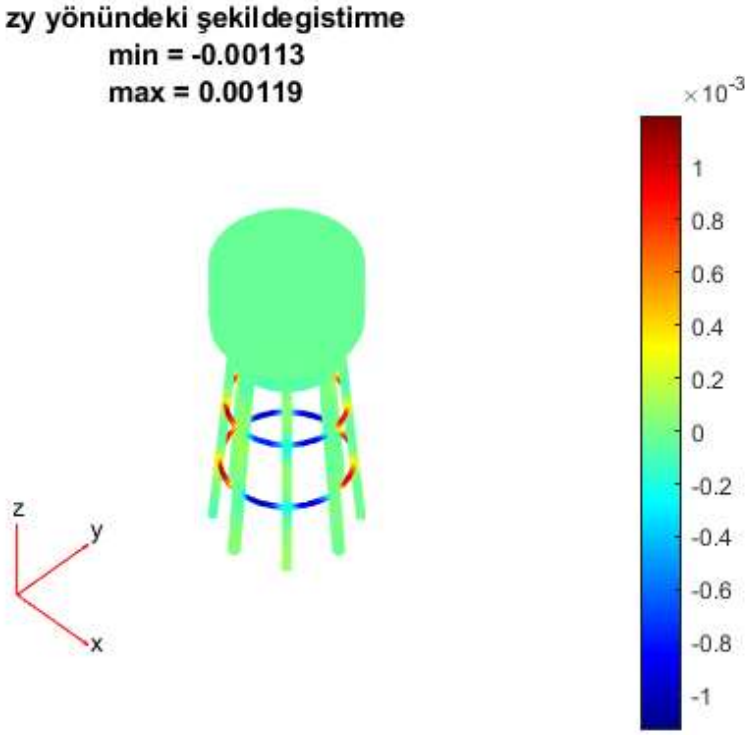
Şekil 6.127. ***Model-4'***te y yönündeki şekil değiştirme



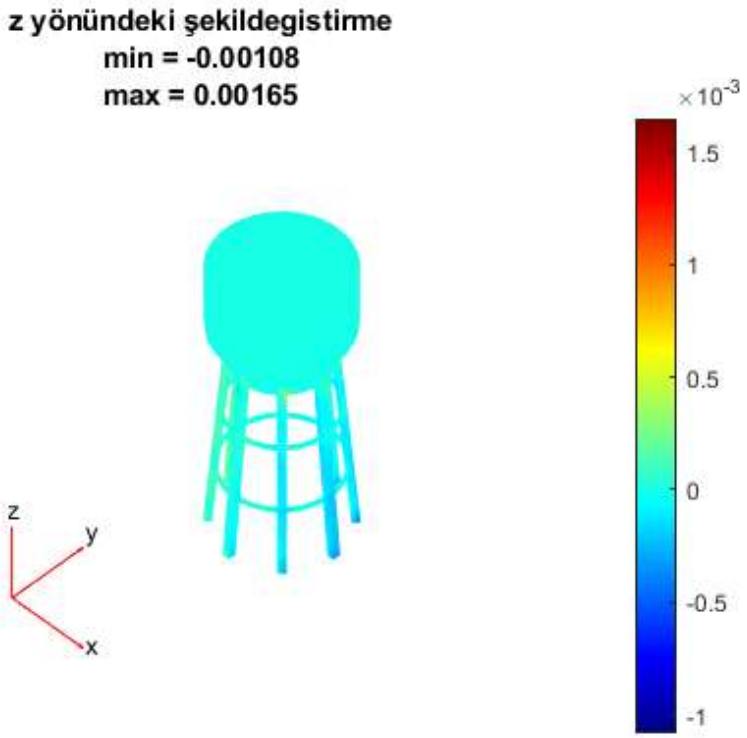
Şekil 6.128. ***Model-4'***te yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.129. ***Model-4'***te zx yönündeki şekil değiştirme

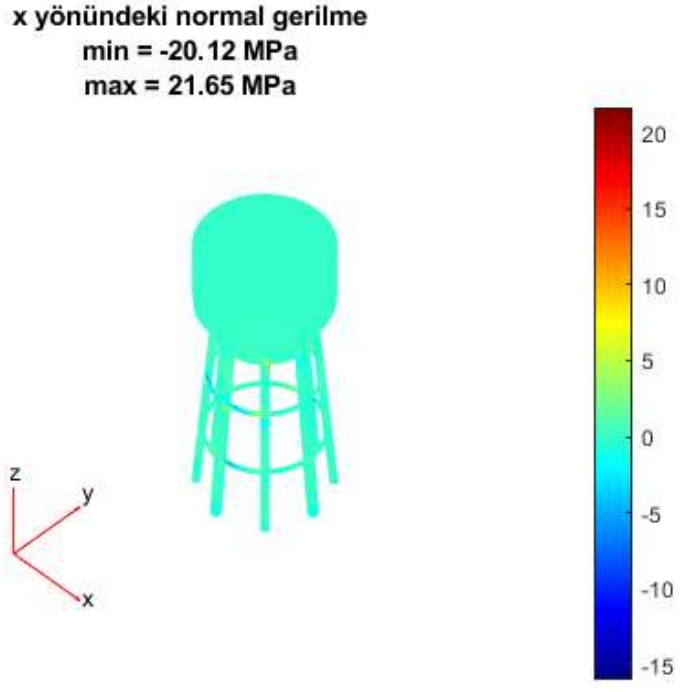


Şekil 6.130. ***Model-4'***te zy yönündeki şekil değiştirme

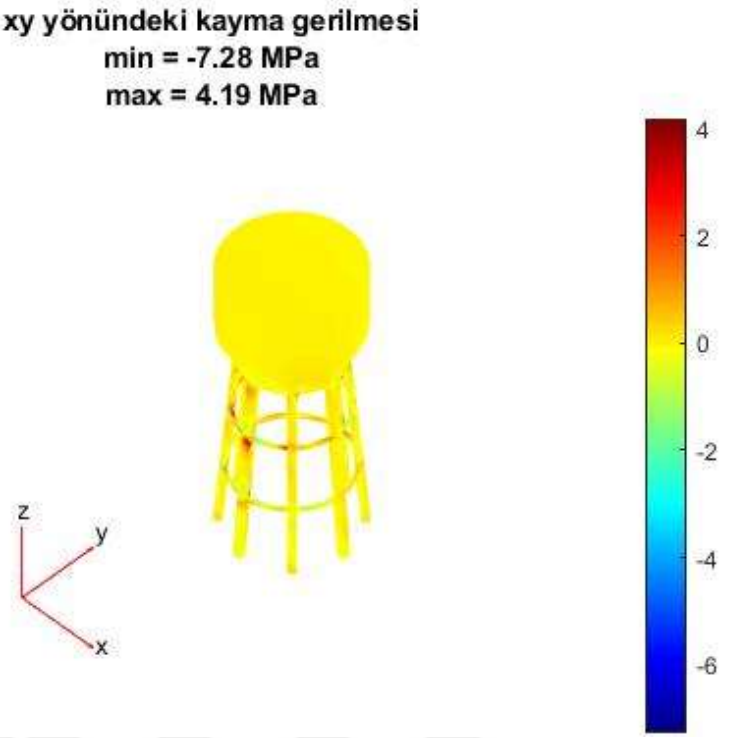


Şekil 6.131. ***Model-4'***te z yönündeki şekil değiştirme

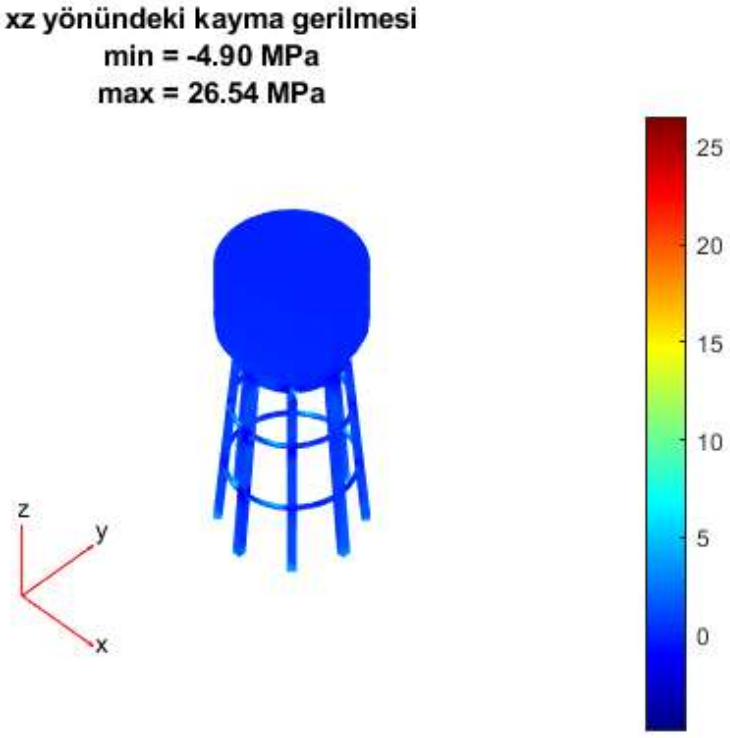
Model-4 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.132 ve 6.141'de verilmektedir.



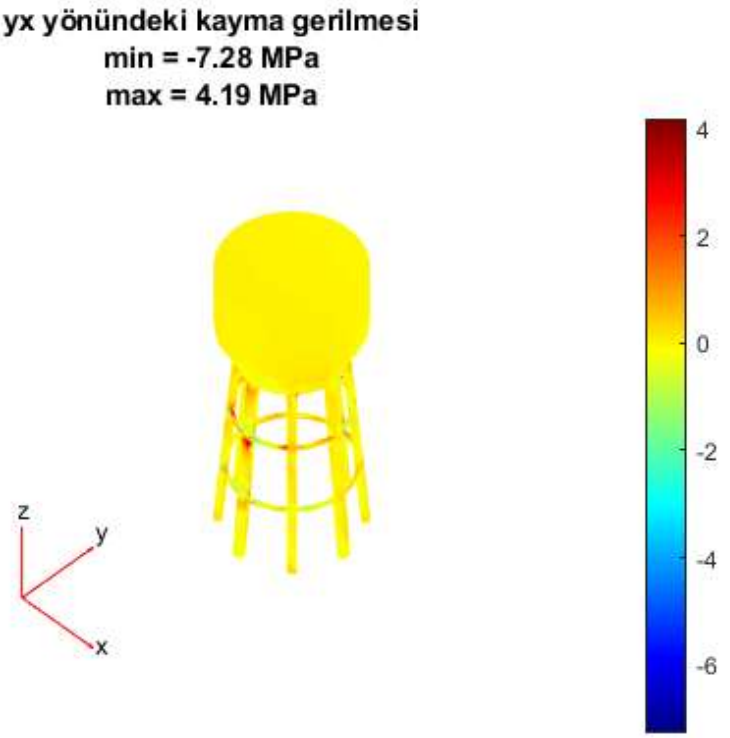
Şekil 6.132. ***Model-4'***te x yönündeki normal gerilme



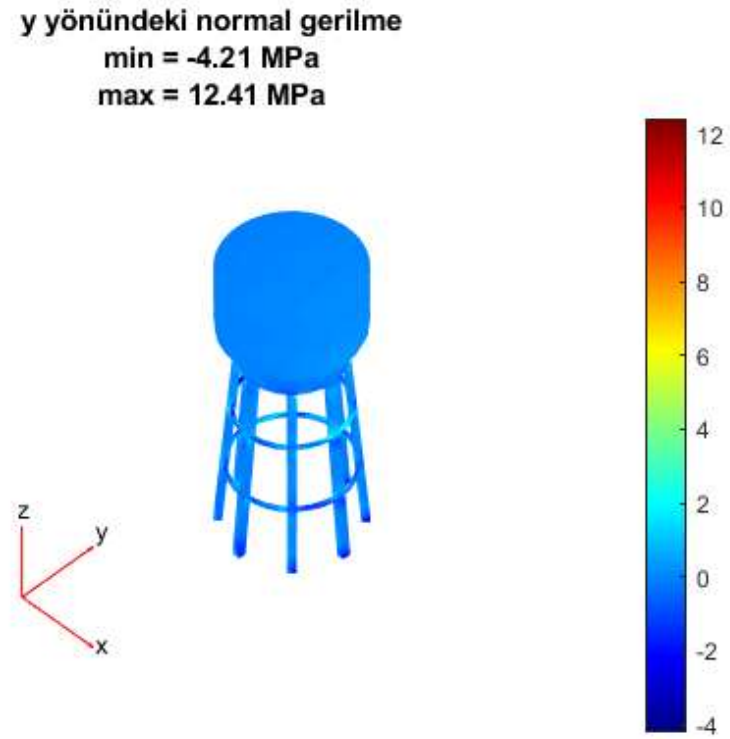
Şekil 6.133. ***Model-4'***te xy yönündeki kayma gerilmesi



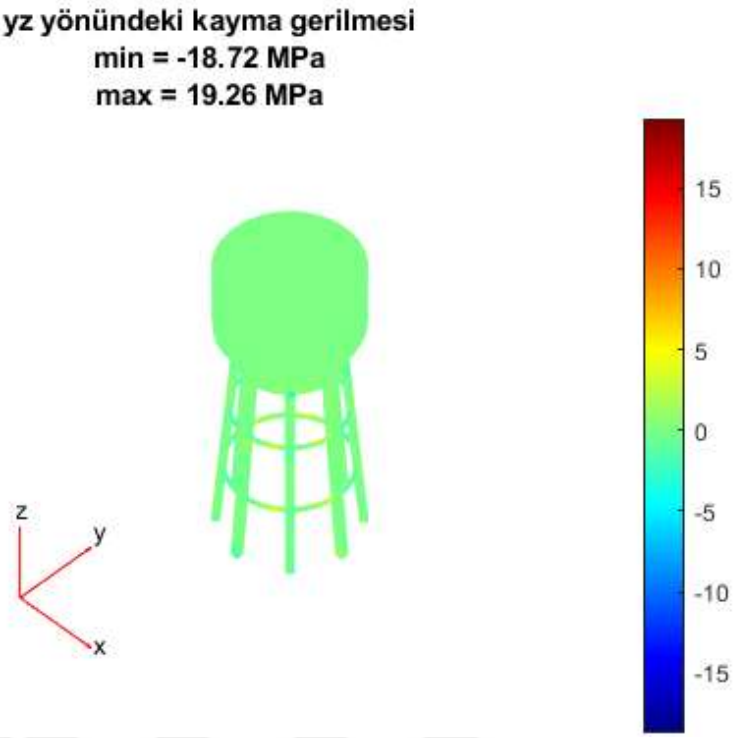
Şekil 6.134. ***Model-4'***te xz yönündeki kayma gerilmesi



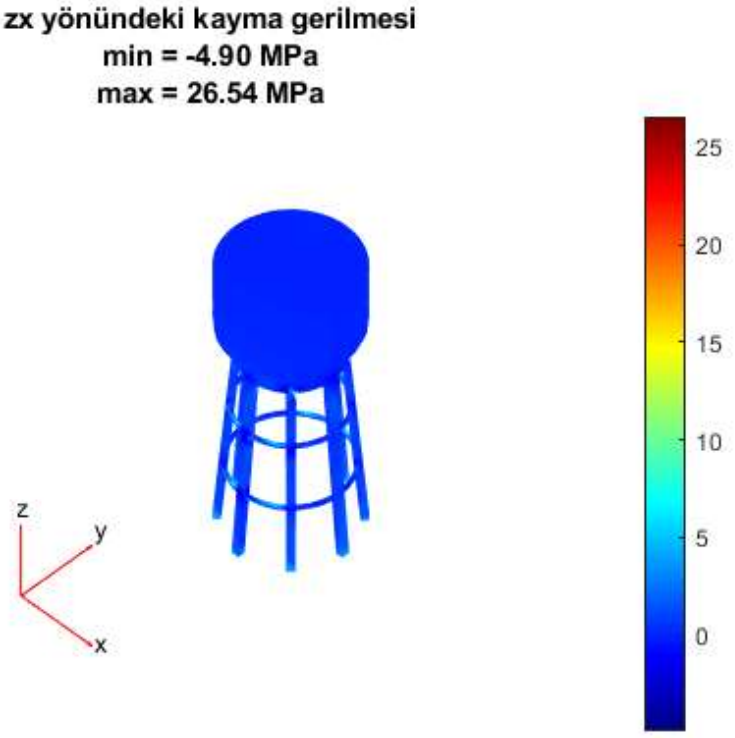
Şekil 6.135. ***Model-4'***te yx yönündeki kayma gerilmesi



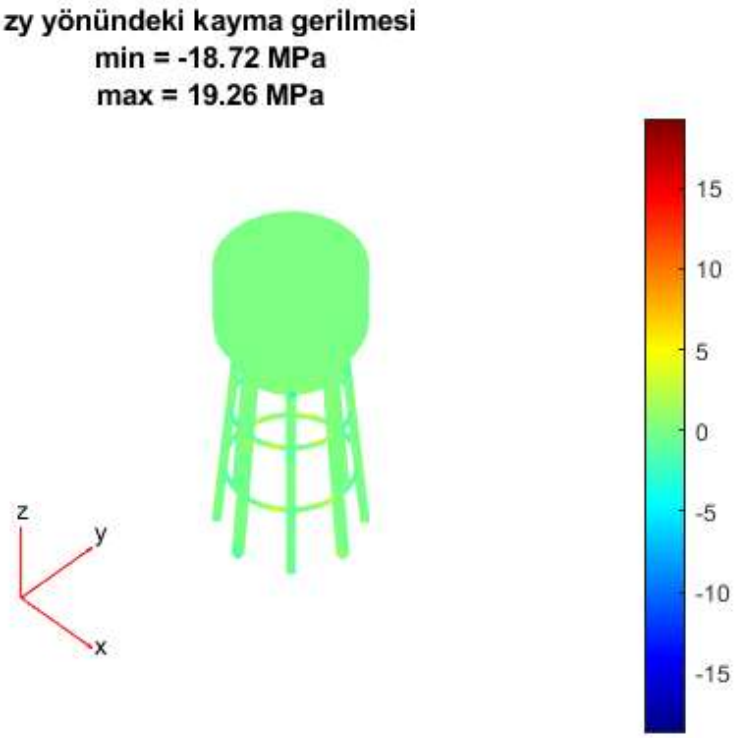
Şekil 6.136. ***Model-4'***te y yönündeki kayma gerilmesi



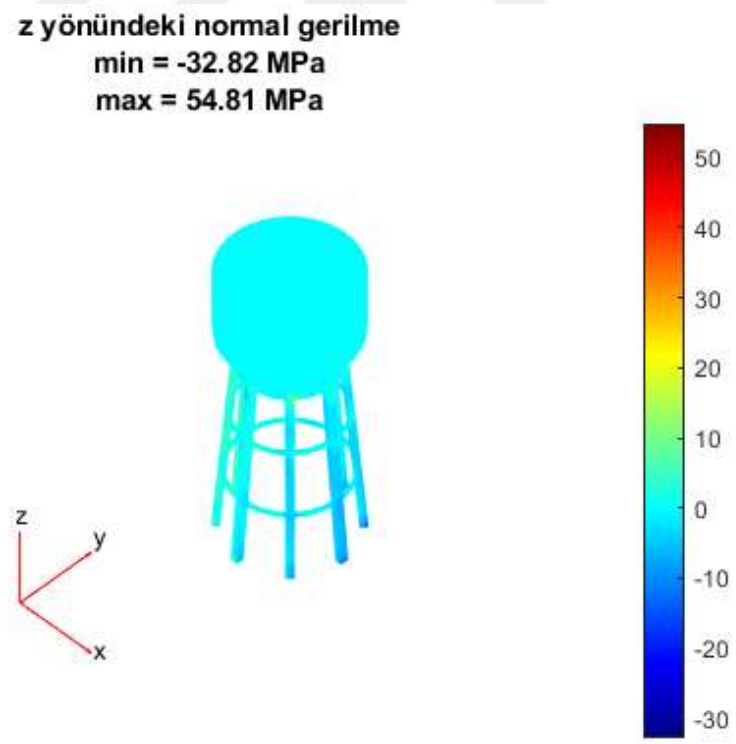
Şekil 6.137. ***Model-4'***te yz yönündeki kayma gerilmesi



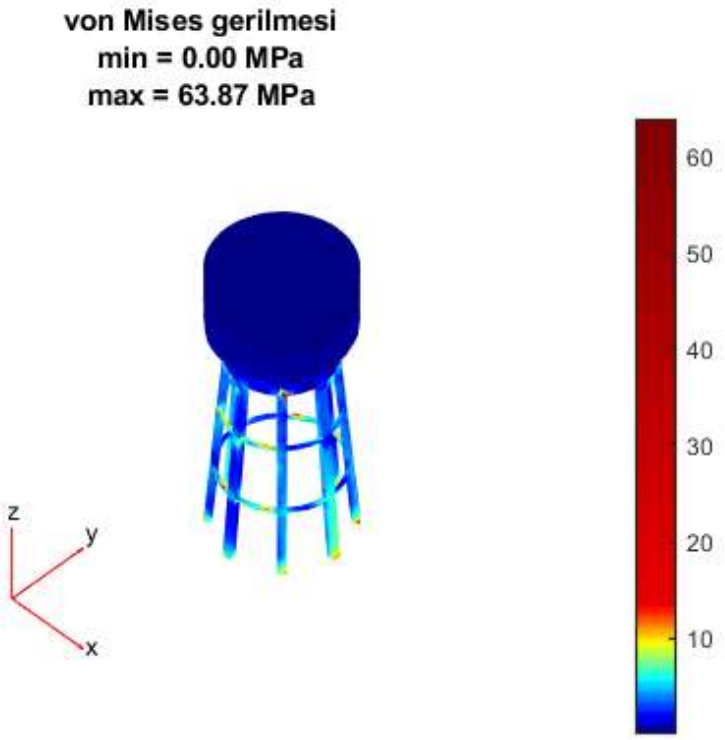
Şekil 6.138. ***Model-4'***te zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.139. ***Model-4'***te zy yönündeki kayma gerilmesi

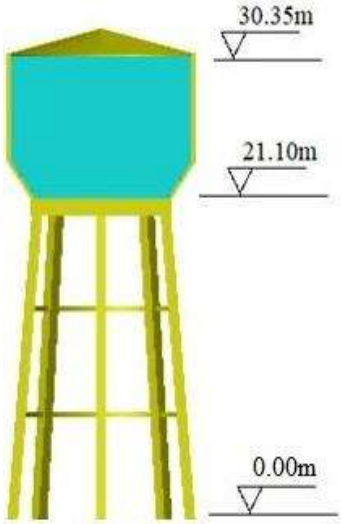


Şekil 6.140. ***Model-4'***te z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.141. ***Model-4'***te Von Mises gerilmesi

6.2.4.5. Model-5: Ayaklı Su Deposunun Tam Dolu (%100) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için Westergaard Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizin Gerçekleştirildiği Model.



Şekil 6.142. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu

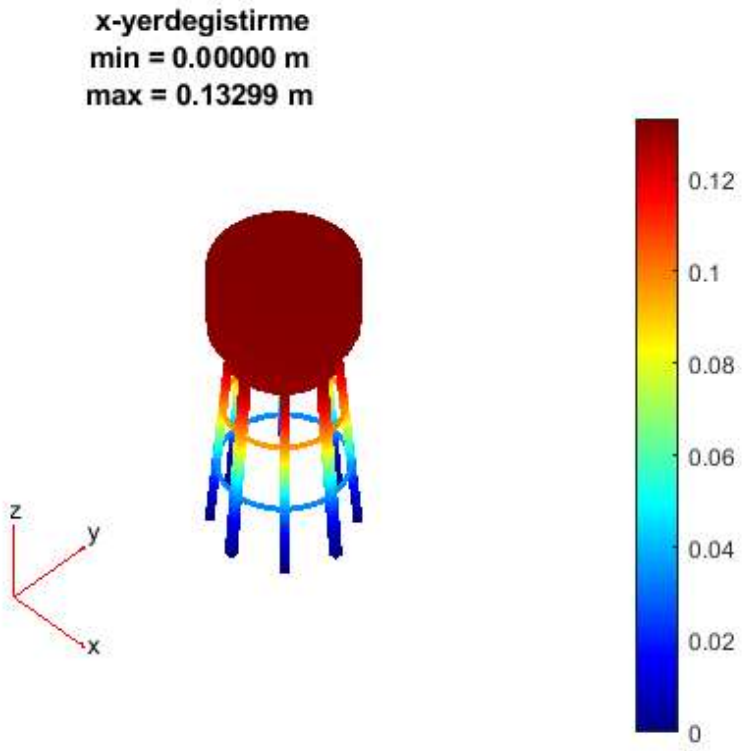
Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumda olduğu ***Model-5*** Şekil 6.142'de görülmektedir.

- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumunda sıvı eklenmiş kütle yaklaşımı olan Westergaard yaklaşımına göre modellenmiştir.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Sönüm türü:** Rayleigh sönüm kullanılmıştır.

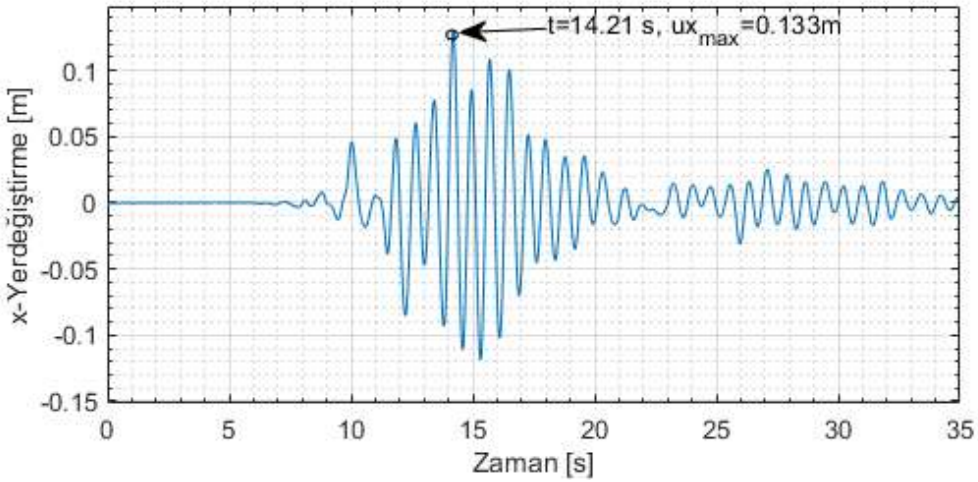
Model-5'de sıvı-yapı etkileşimi için eklenmiş kütle yaklaşımına göre tam dolu(%100) durumdaki deponun hidrodinamik basınç dağılımına bağlı olarak hazne cidarlarındaki sonlu eleman düğüm noktalarına impuls ve salınım su kütleleri eklenmiştir. Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB(MATLAB, 2023) ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Model-5 analiz sonuçları

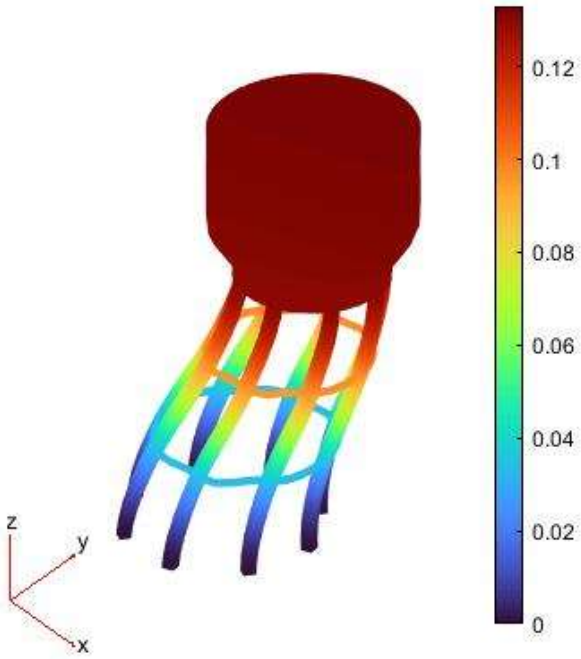
Model-5 'e ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-5*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.143'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.144'de verilmektedir. Şekil 6.145'de t=14.21'.nci saniyede x yönünde 0.13299m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.



Şekil 6.143. ***Model-5'***te x yönündeki yer değiştirme

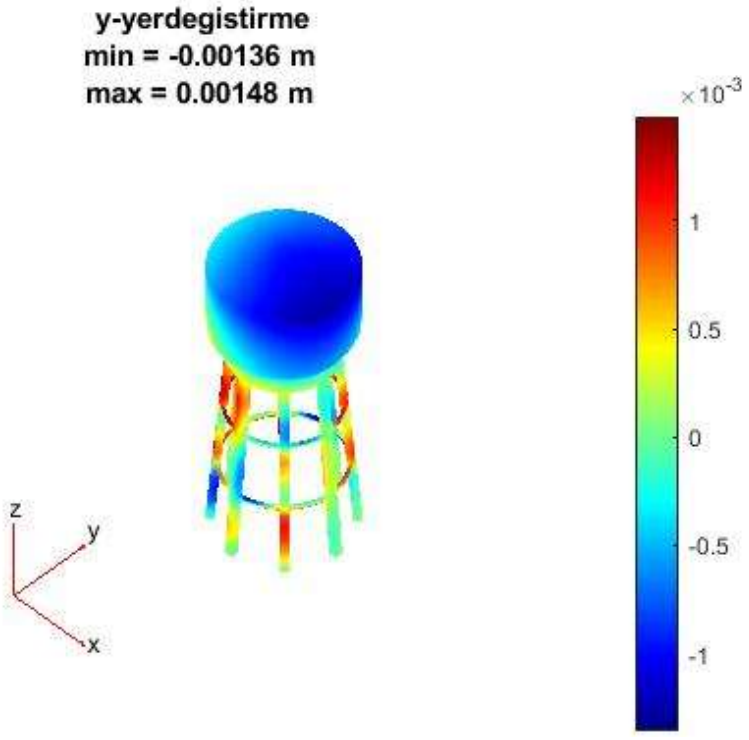


Şekil 6.144. ***Model-5'***te x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

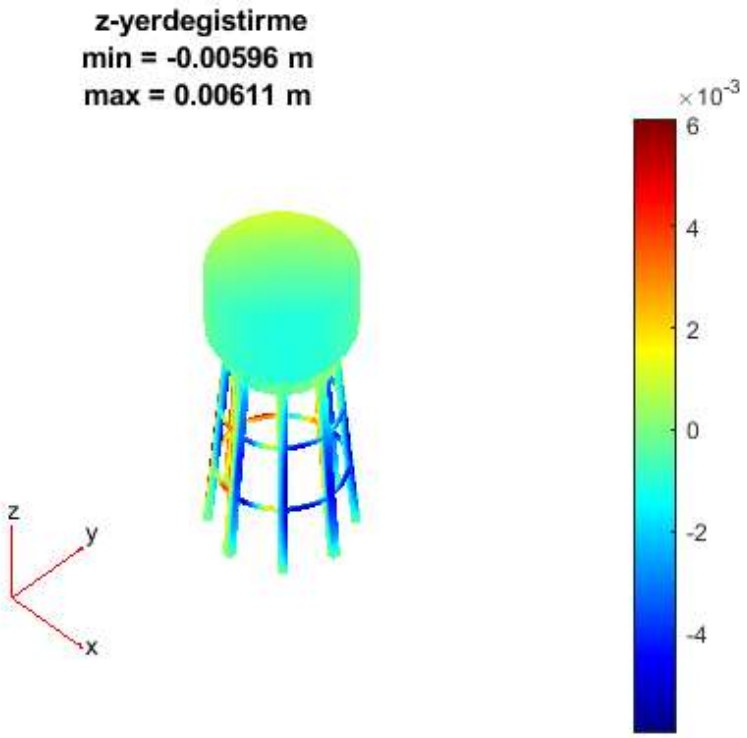


Şekil 6.145. ***Model-5'***te x yönünde şekil değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-5 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.146 ve 6.147'de verilmektedir.

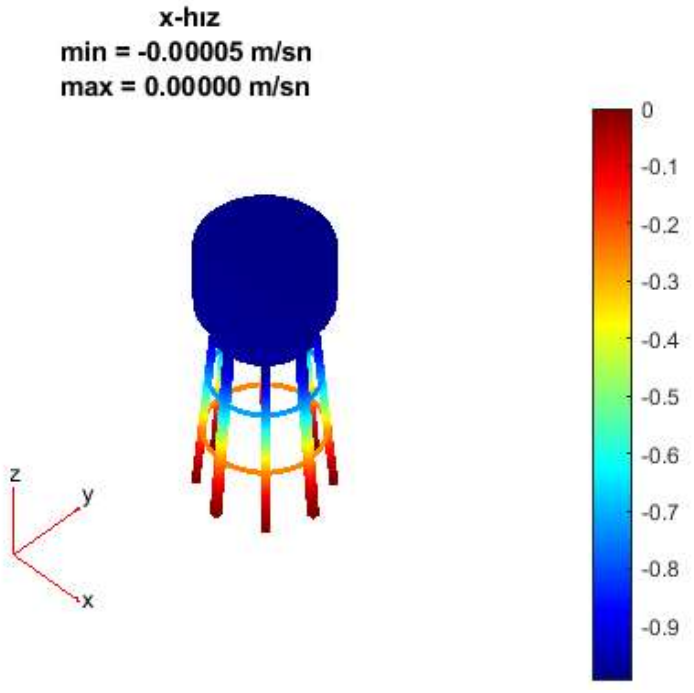


Şekil 6.146. ***Model-5'***te y yönündeki yer değiştirme

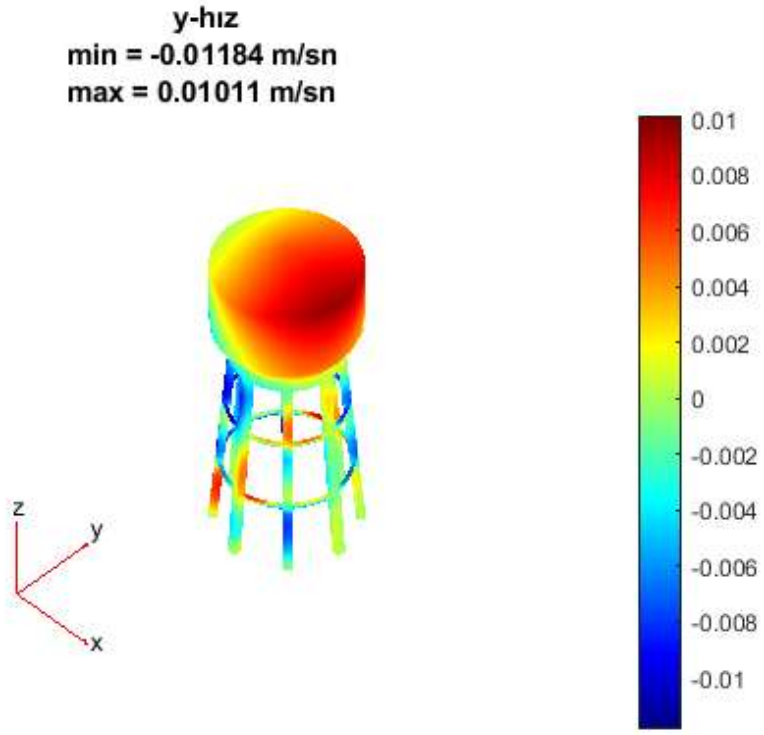


Şekil 6.147. ***Model-5'***te z yönündeki yer değiştirme

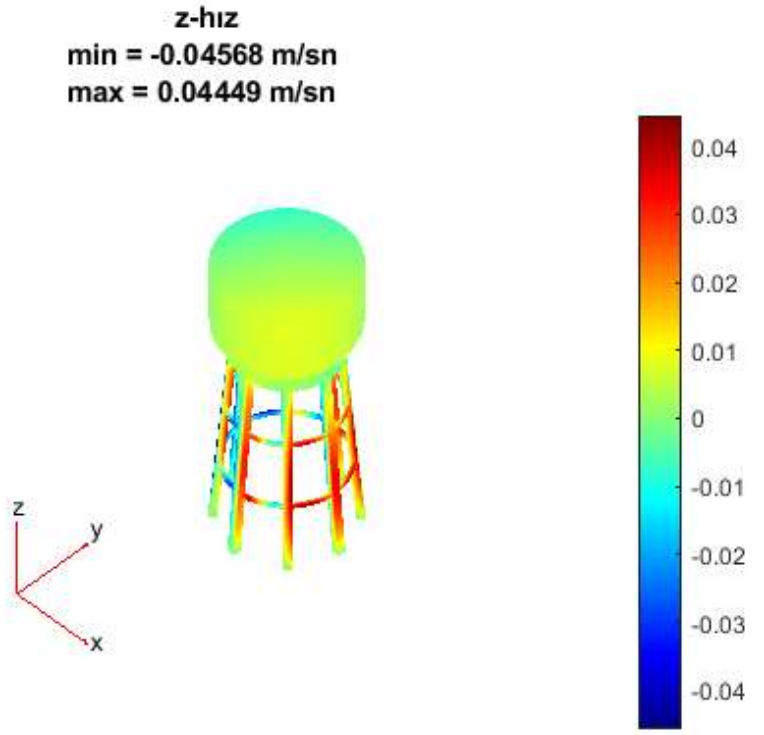
Model-5 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.148 - 6.150'de verilmektedir.



Şekil 6.148. ***Model-5'***te x yönündeki hız

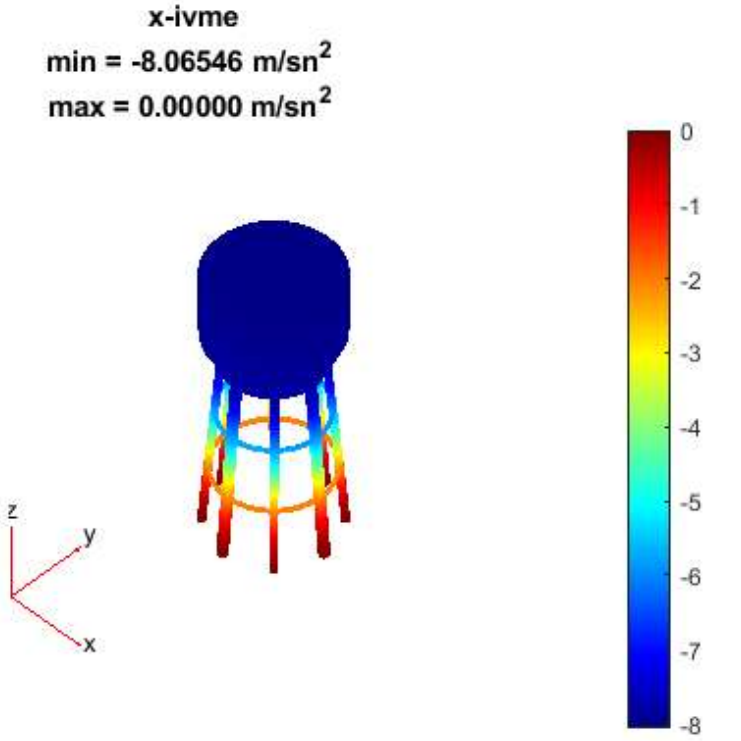


Şekil 6.149. ***Model-5'***te y yönündeki hız

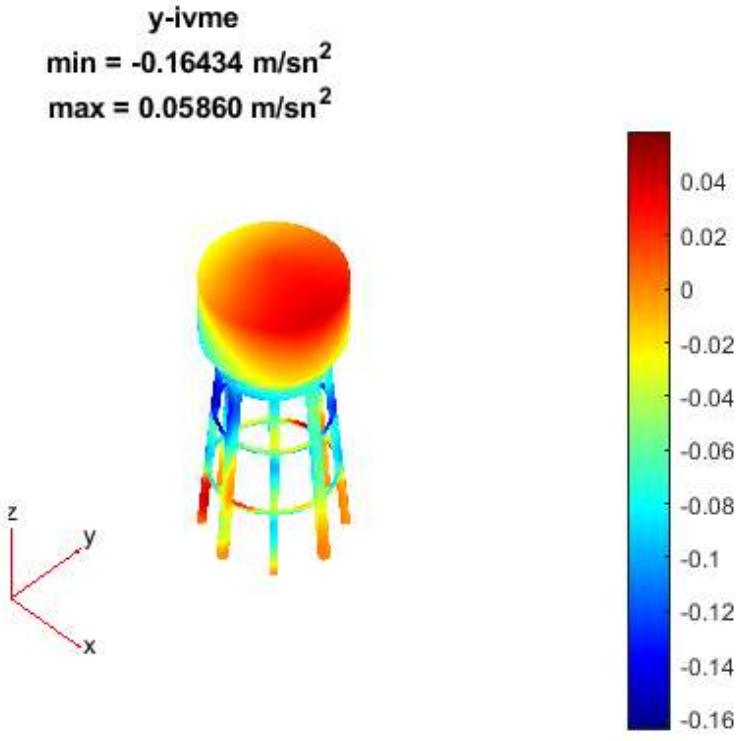


Şekil 6.150. ***Model-5'***te z yönündeki hız

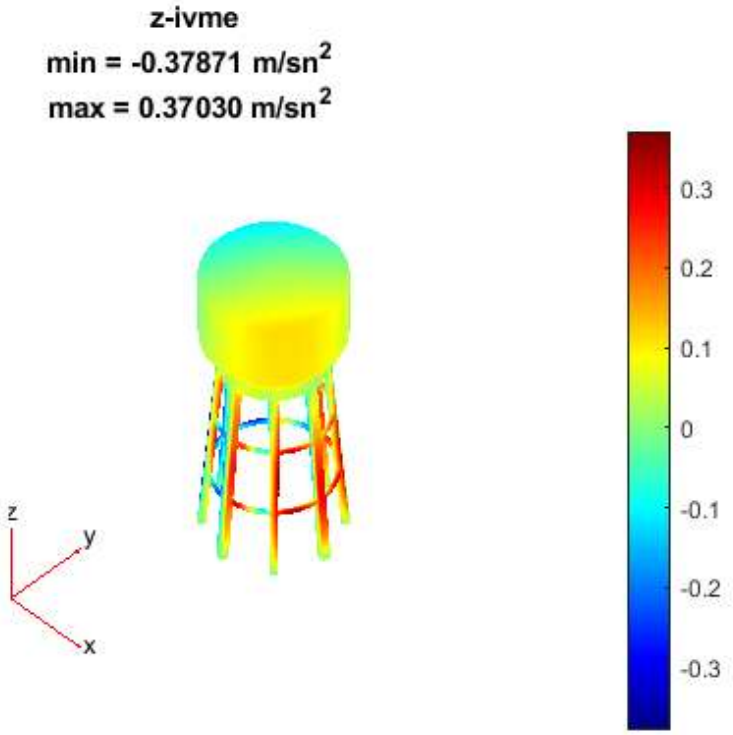
Model-5 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.151 - 6.153'de verilmektedir.



Şekil 6.151. ***Model-5'***te x yönündeki ivme

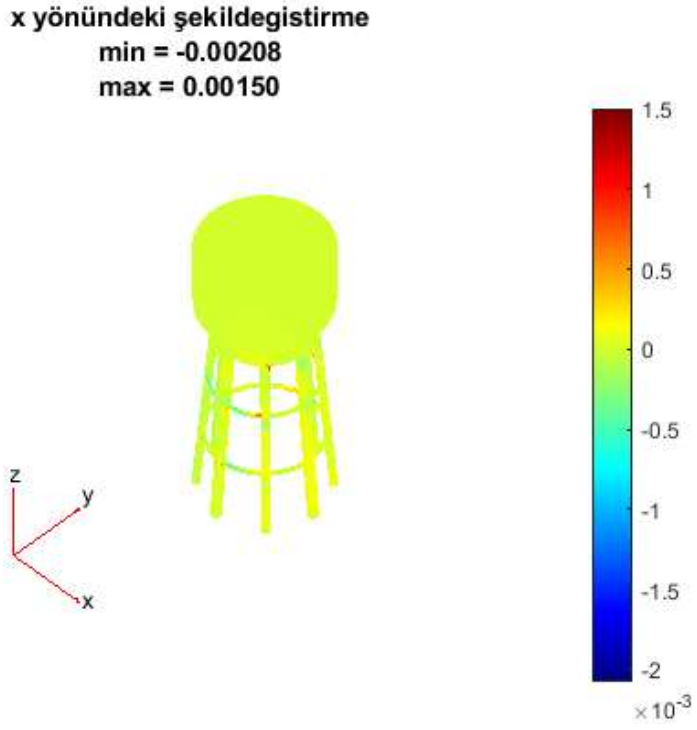


Şekil 6.152. ***Model-5'***te y yönündeki ivme

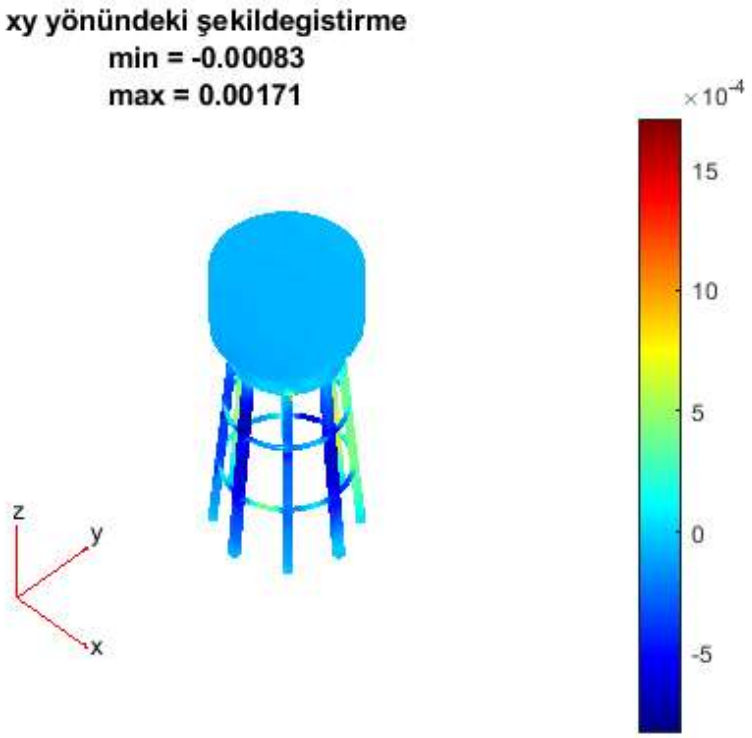


Şekil 6.153. ***Model-5'***te z yönündeki ivme

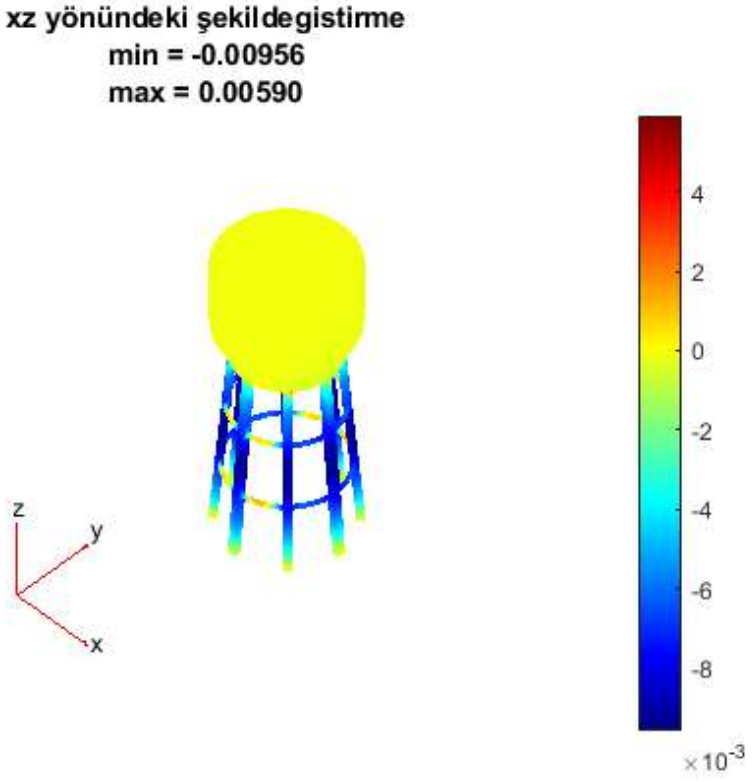
Model-5 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.154 - 6.162'de verilmektedir.



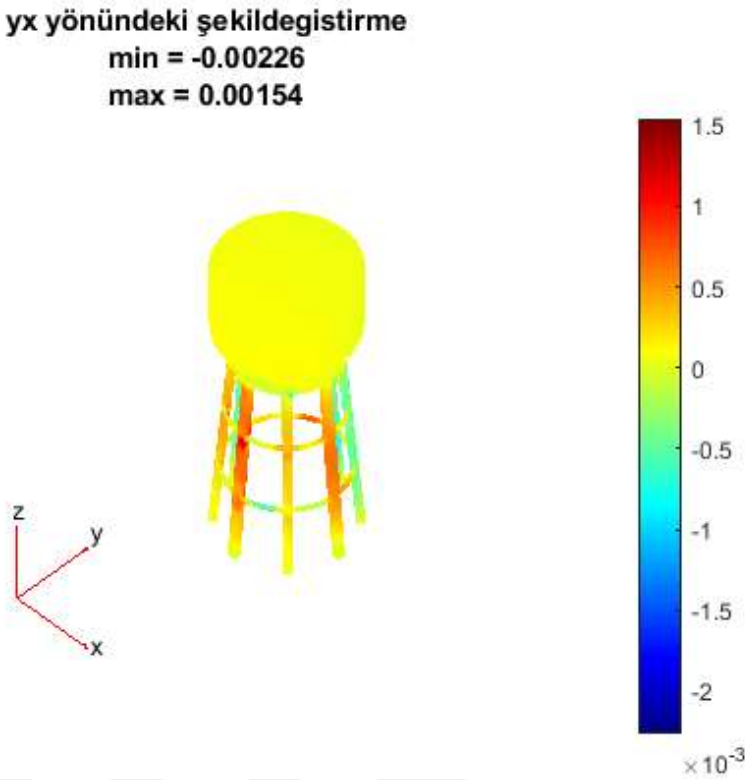
Şekil 6.154. ***Model-5'***te x yönündeki şekil değiştirme



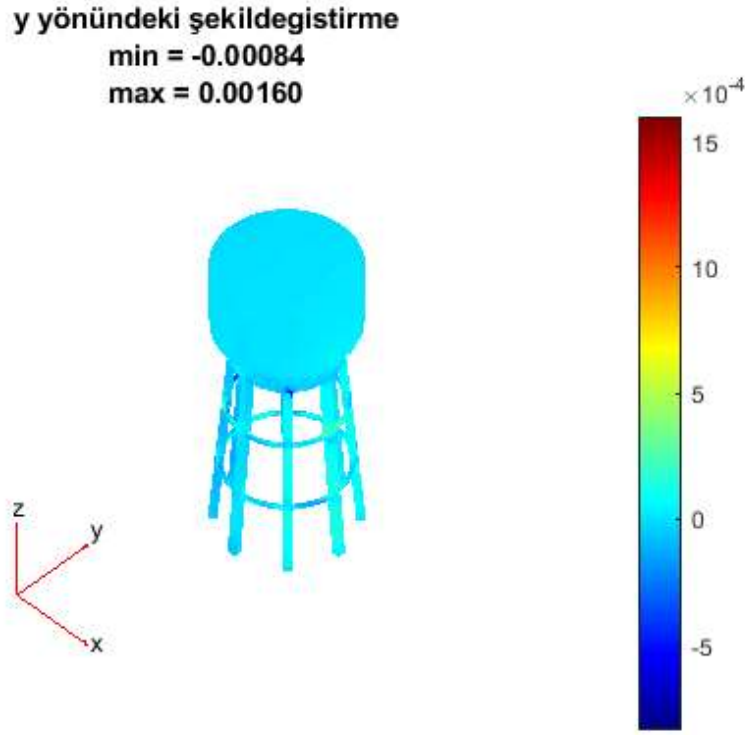
Şekil 6.155. ***Model-5'***te xy yönündeki şekil değiştirme



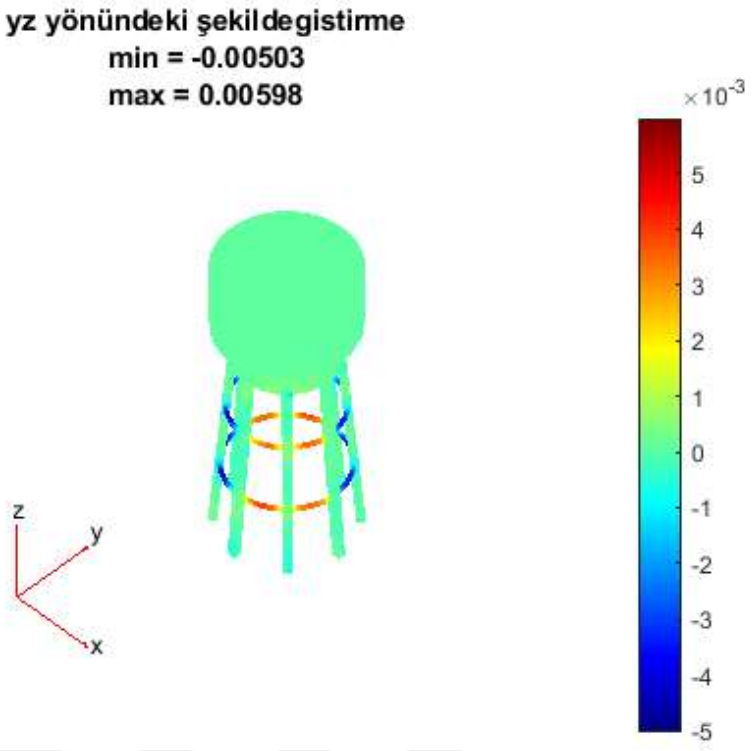
Şekil 6.156. ***Model-5'***te xz yönündeki şekil değiştirme



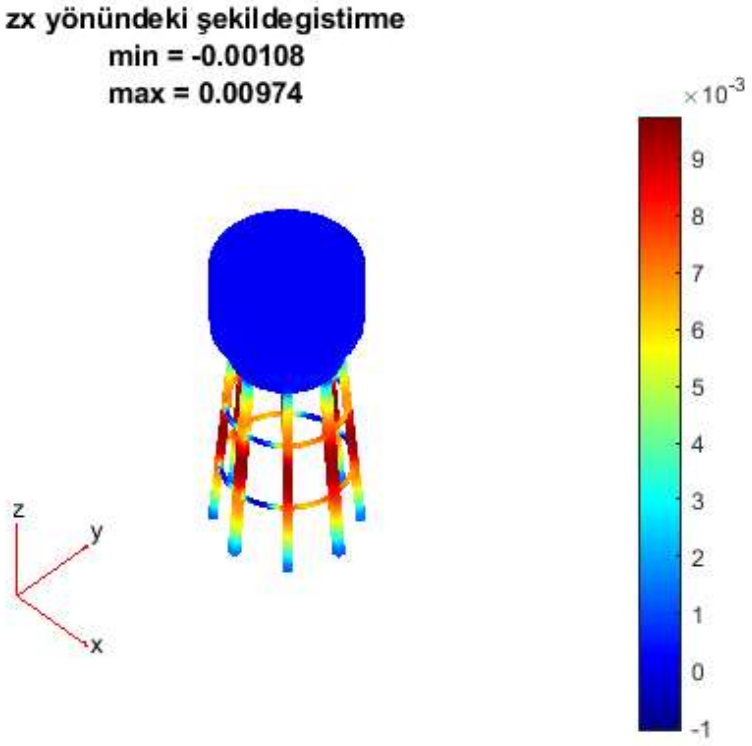
Şekil 6.157. ***Model-5'***te yx yönündeki şekil değiştirme



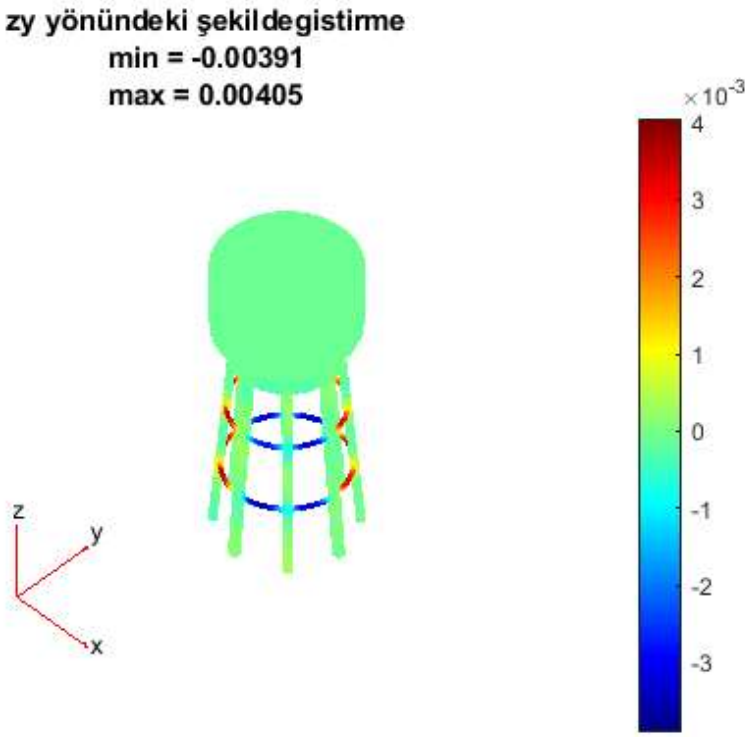
Şekil 6.158. ***Model-5'***te y yönündeki şekil değiştirme



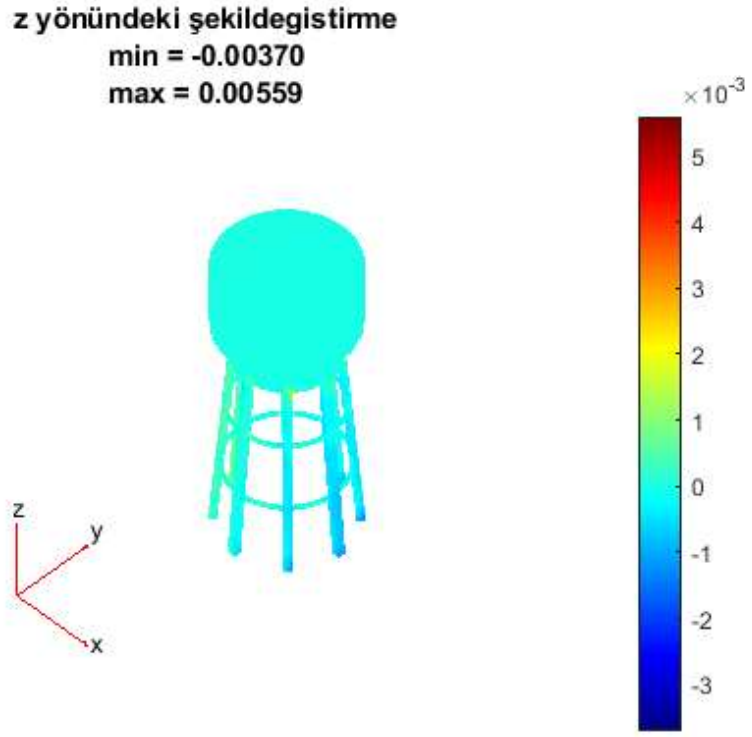
Şekil 6.159. ***Model-5'***te yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.160. ***Model-5'***te zx yönündeki şekil değiştirme

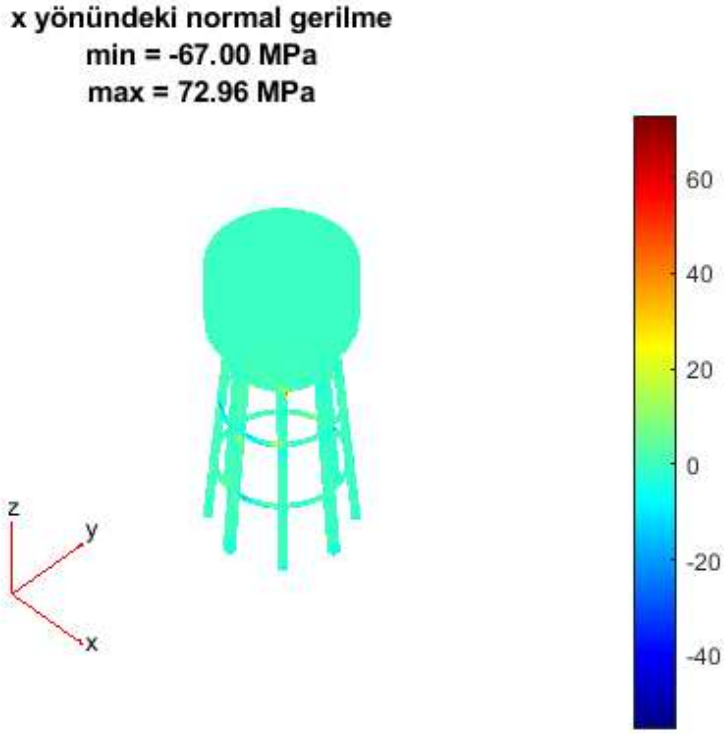


Şekil 6.161. ***Model-5'***te zy yönündeki şekil değiştirme

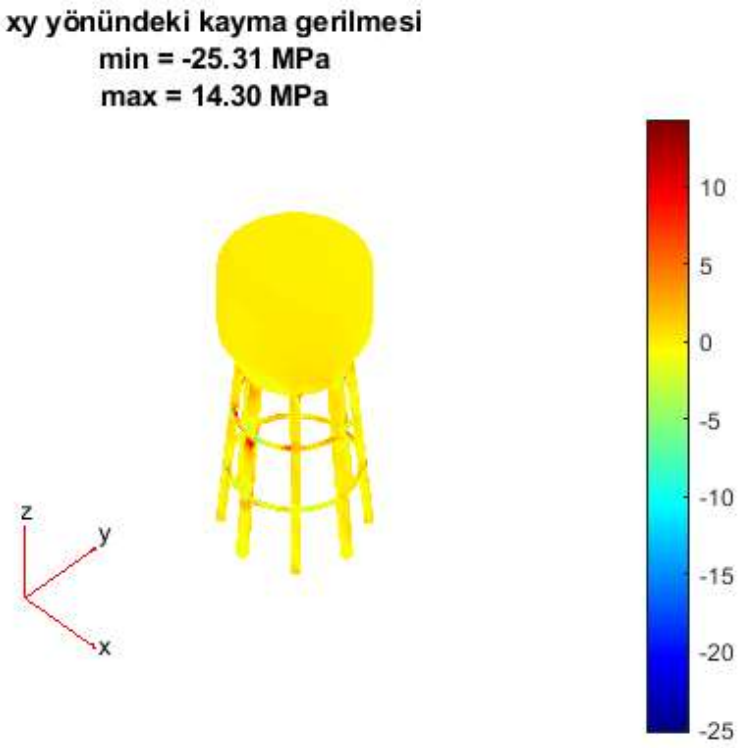


Şekil 6.162. ***Model-5'***te z yönündeki şekil değiştirme

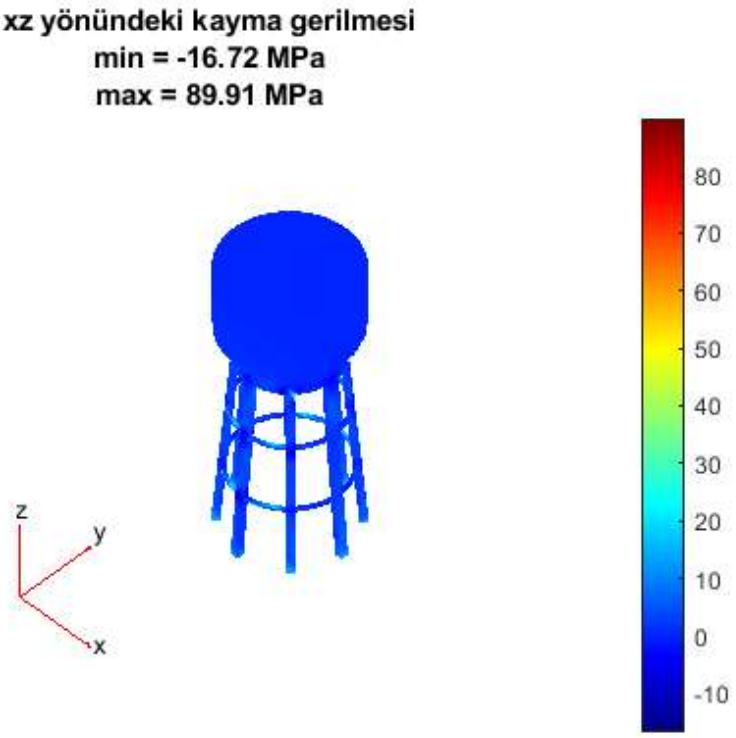
Model-5 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.163 - 6.172'de verilmektedir.



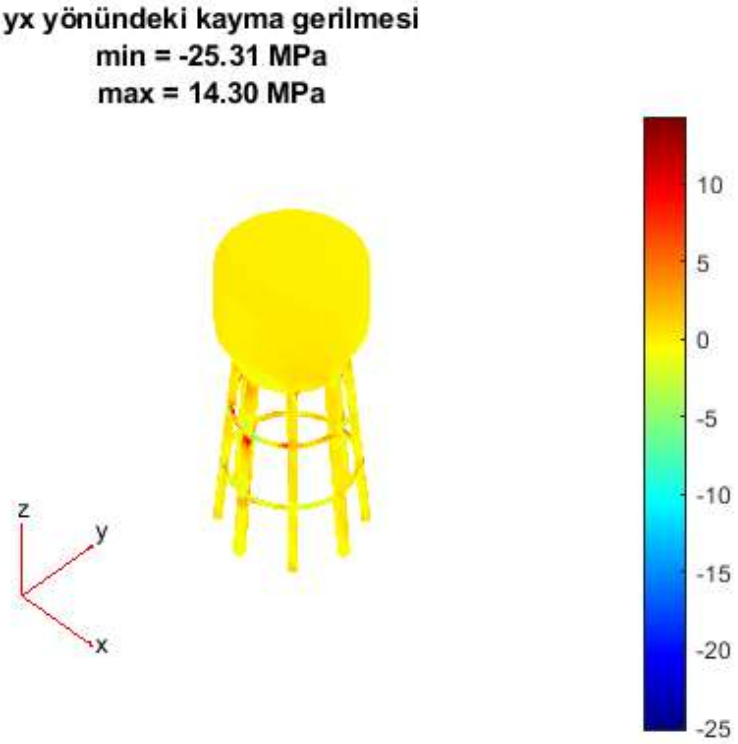
Şekil 6.163. ***Model-5'***te x yönündeki normal gerilme



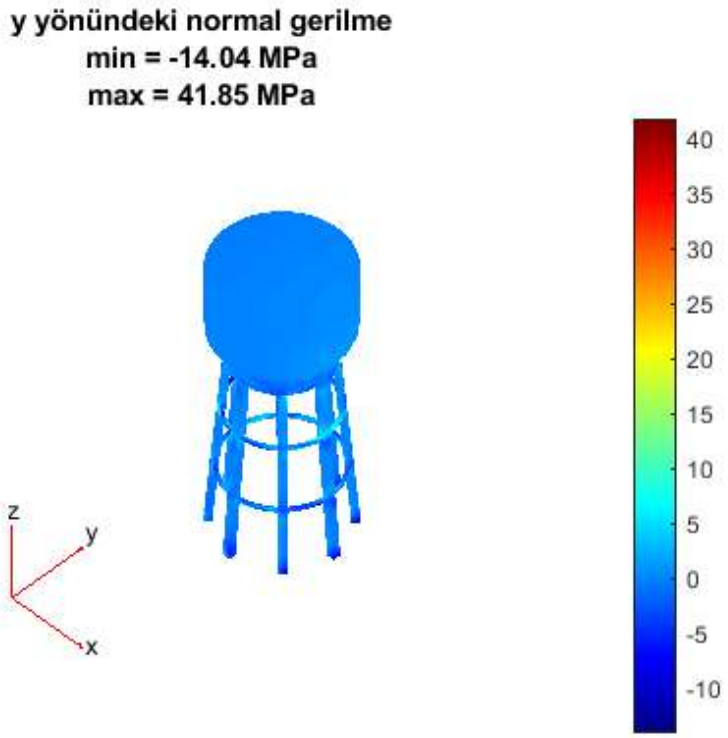
Şekil 6.164. ***Model-5'***te xy yönündeki kayma gerilmesi



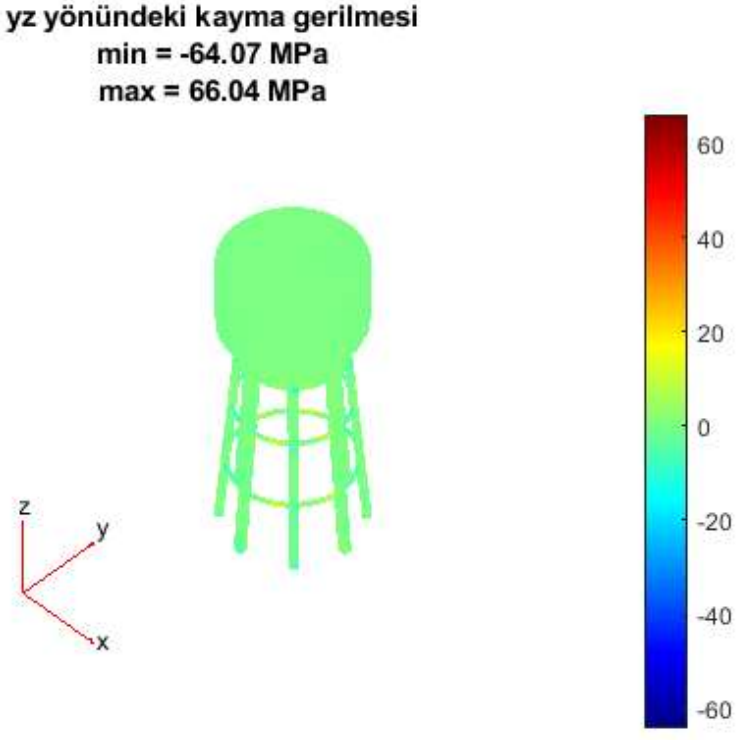
Şekil 6.165. ***Model-5'***te xz yönündeki kayma gerilmesi



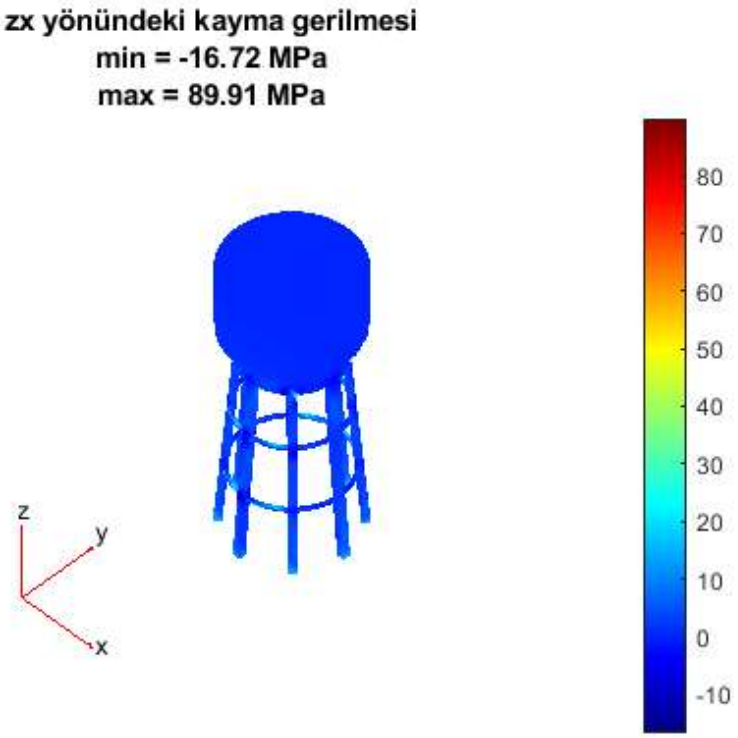
Şekil 6.166. ***Model-5'***te yx yönündeki kayma gerilmesi



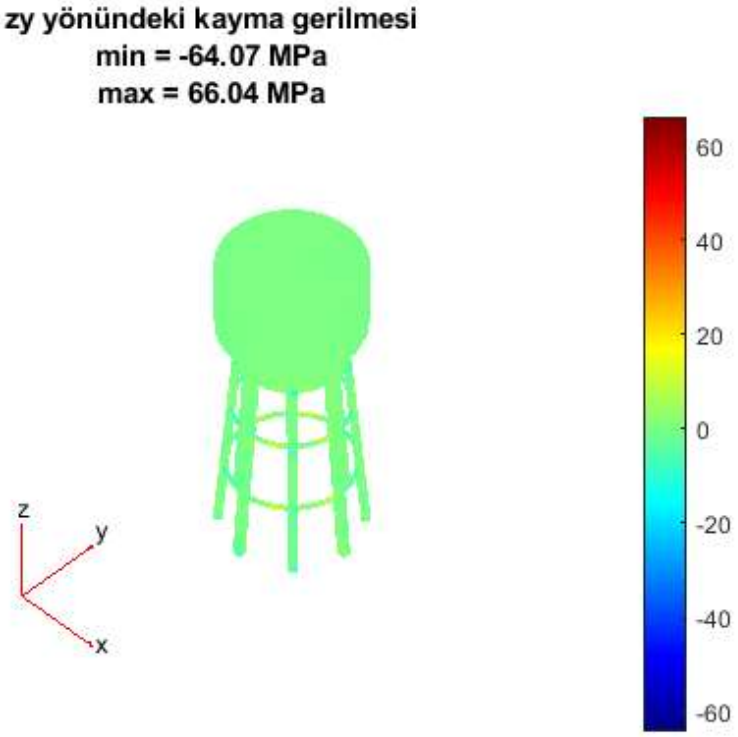
Şekil 6.167. ***Model-5'***te y yönündeki normal gerilme



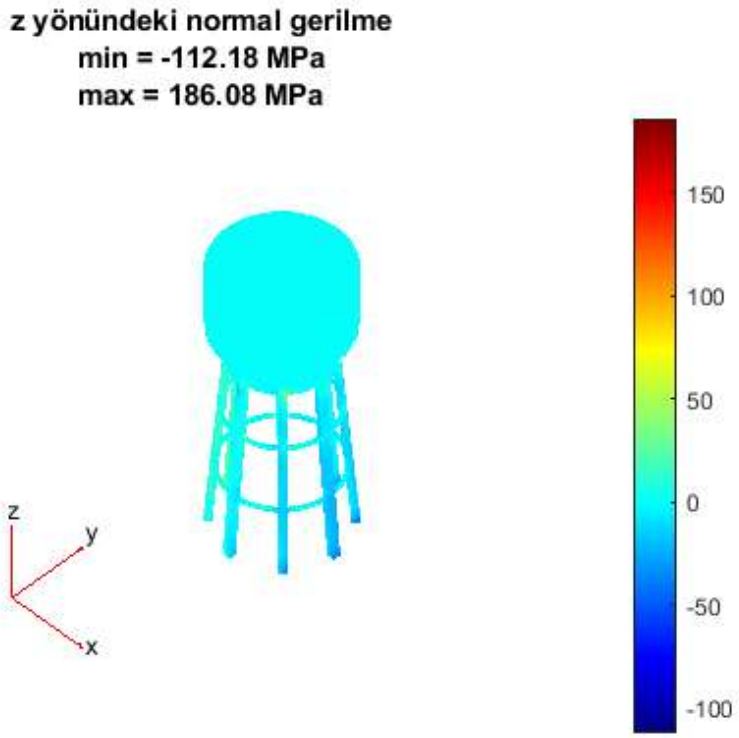
Şekil 6.168. ***Model-5'***te yz yönündeki kayma gerilmesi



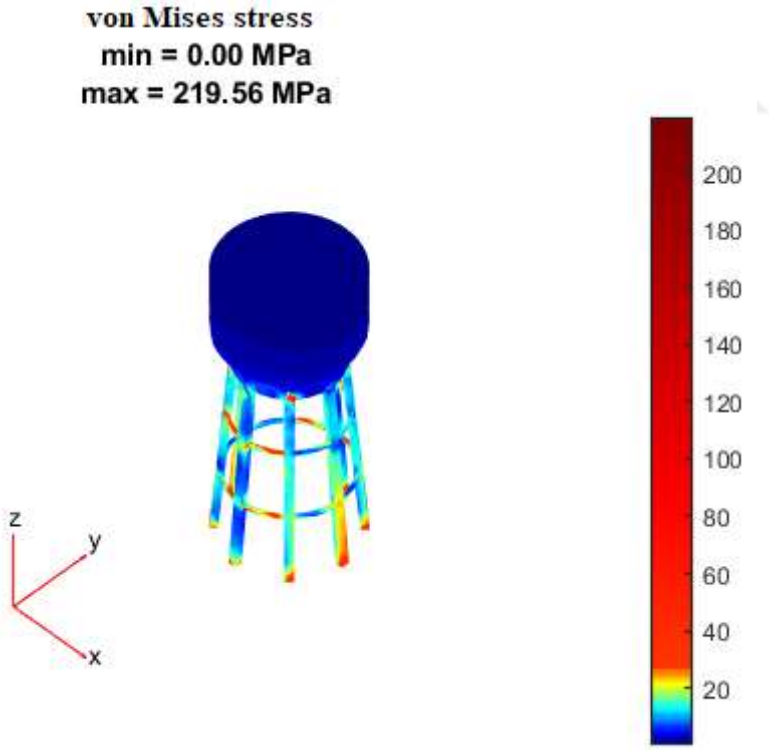
Şekil 6.169. ***Model-5'***te zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.170. ***Model-5'***te zy yönündeki kayma gerilmesi

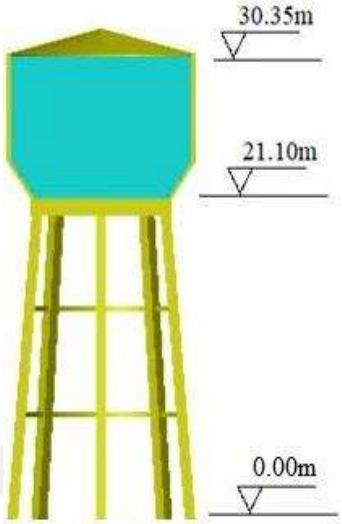


Şekil 6.171. ***Model-5'***te z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.172. ***Model-5'***te Von Mises gerilmesi

6.2.4.6. Model-6: Ayaklı Su Deposunun Tam Dolu (%100) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için Westergaard Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizin Gerçekleştirildiği Model.



Şekil 6.173. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu

Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumda olduğu ***Model-6*** Şekil 173'de görülmektedir.

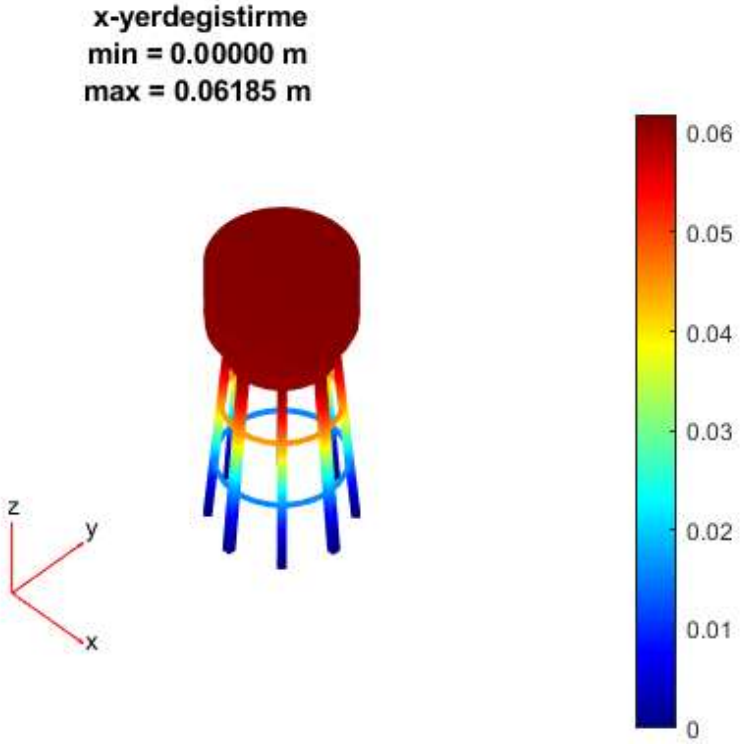
- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumunda sıvı eklenmiş kütle yaklaşımı olan Westergaard yaklaşımına göre modellenmiştir.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analiz için histeresis modellerden Bouc-Wen modeli kullanılmıştır.
- **Sönüm türü:** Eşdeğer viskoz sönüm kullanılmıştır.

Model-6'da sıvı-yapı etkileşimi için eklenmiş kütle yaklaşımına göre yarım dolu durumdaki deponun hidrodinamik basınç dağılımına bağlı olarak hazne cidarlarındaki sonlu eleman düğüm noktalarına impuls ve salınım su kütleleri eklenmiştir. Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket

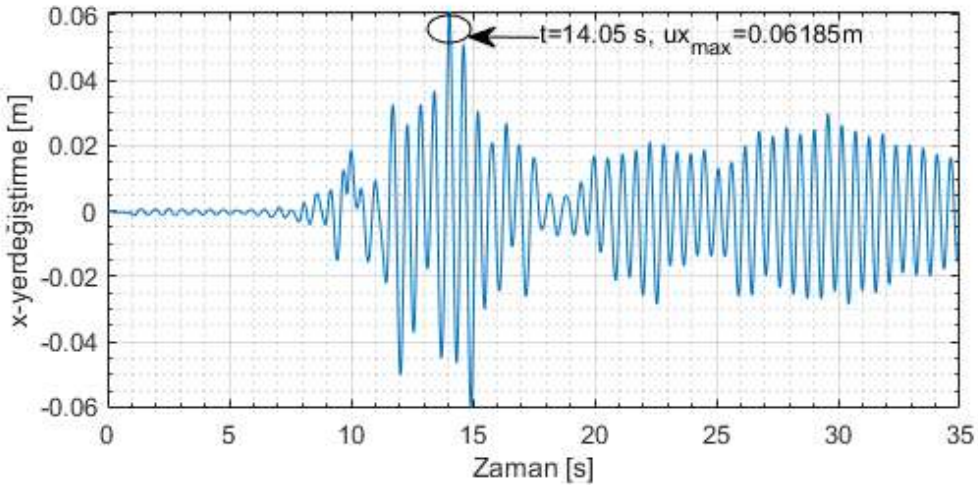
denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Model-6 analiz sonuçları

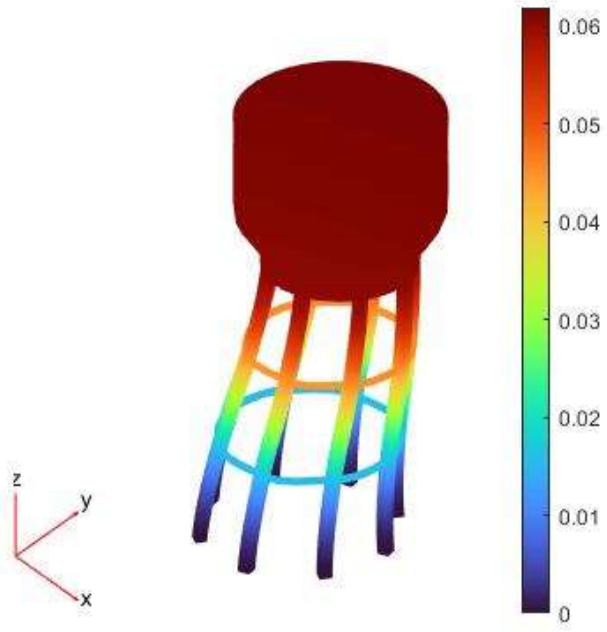
Model-6 'ya ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-6*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.174'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.175'de verilmektedir. Şekil 6.176'da t=14.05 saniyede x yönünde 0.06185m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.



Şekil 6.174. ***Model-6'***da x yönündeki yer değiştirme

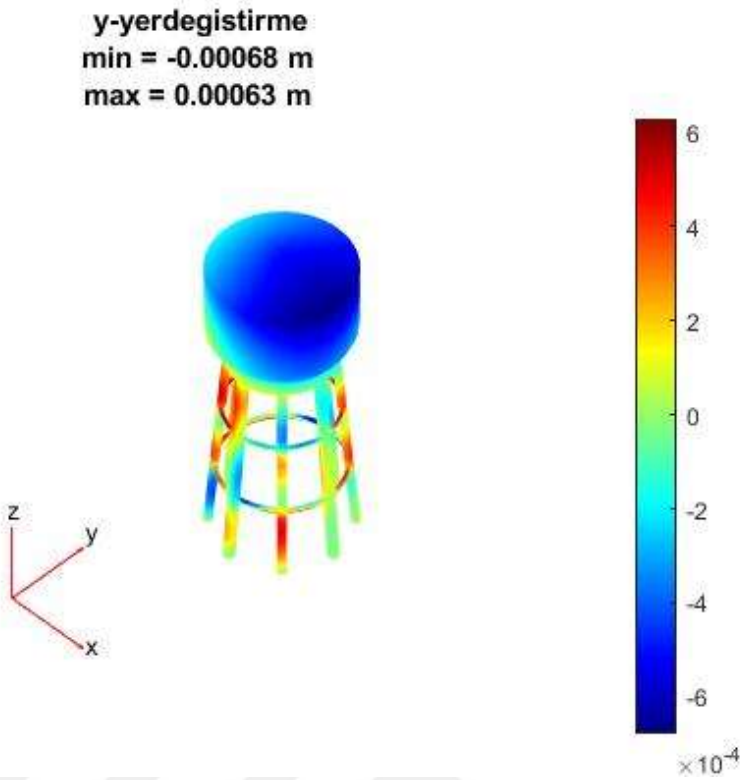


Şekil 6.175. ***Model-6'***da x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

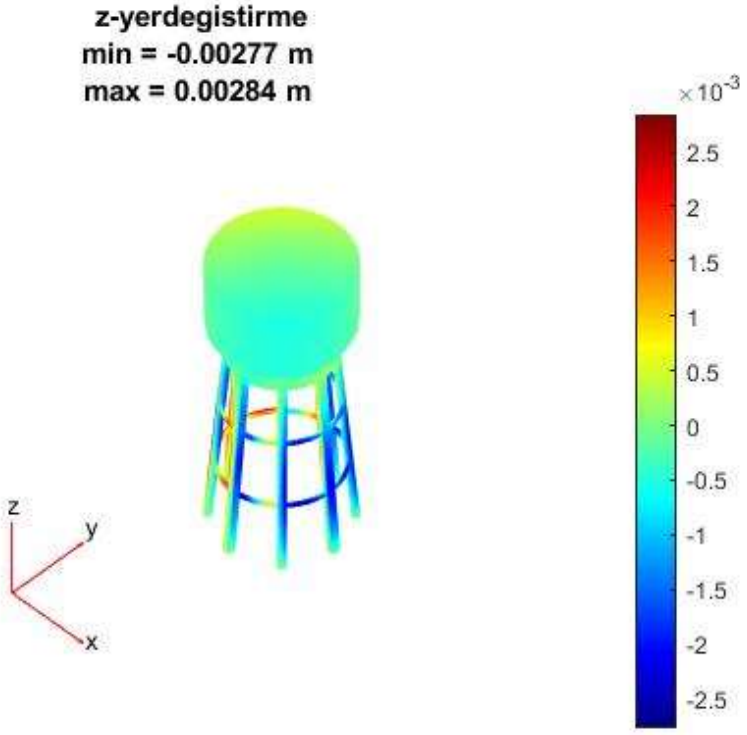


Şekil 6.176. ***Model-6'***da x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-6 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.177 ve 6.178'de verilmektedir.

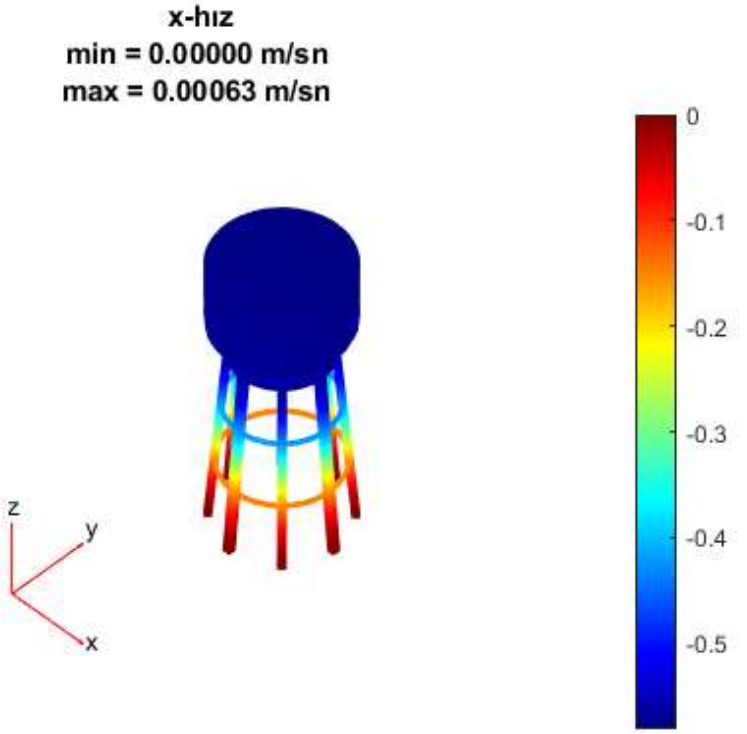


Şekil 6.177. ***Model-6'***da y yönündeki yer değiştirme

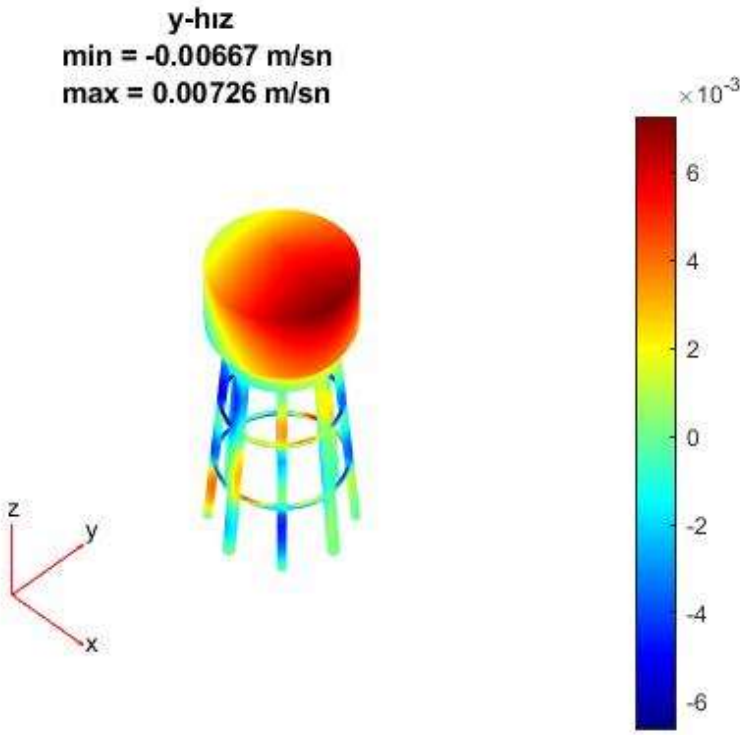


Şekil 6.178. ***Model-6'***da z yönündeki yer değiştirme

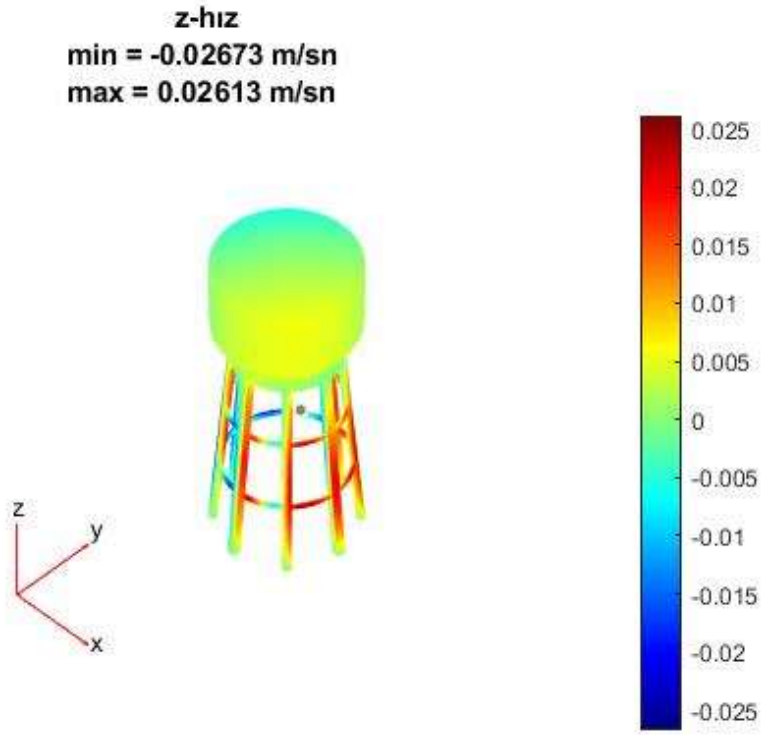
Model-6 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.179 - 6.181'de verilmektedir.



Şekil 6.179. ***Model-6'***da x yönündeki hız

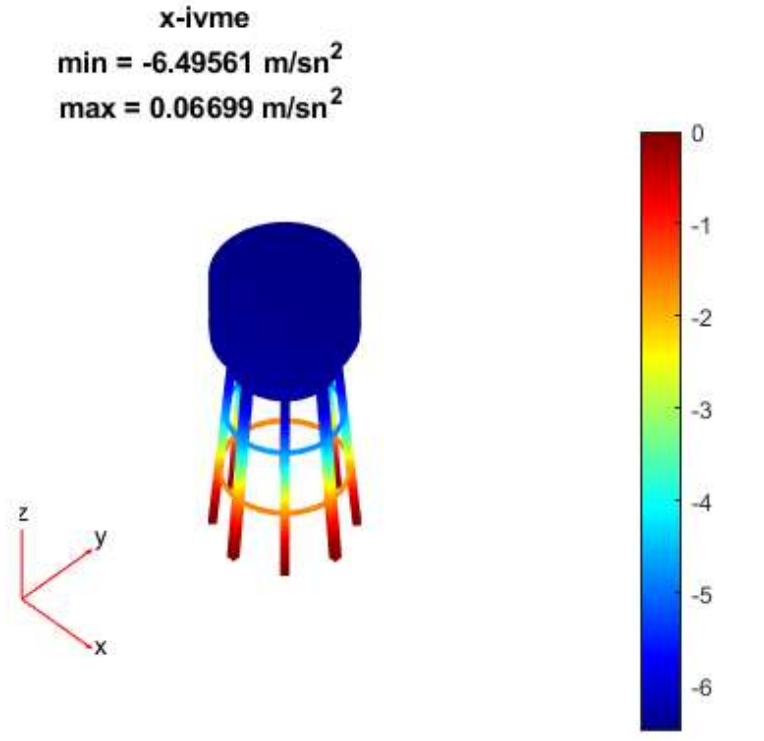


Şekil 6.180. ***Model-6'***da y yönündeki hız

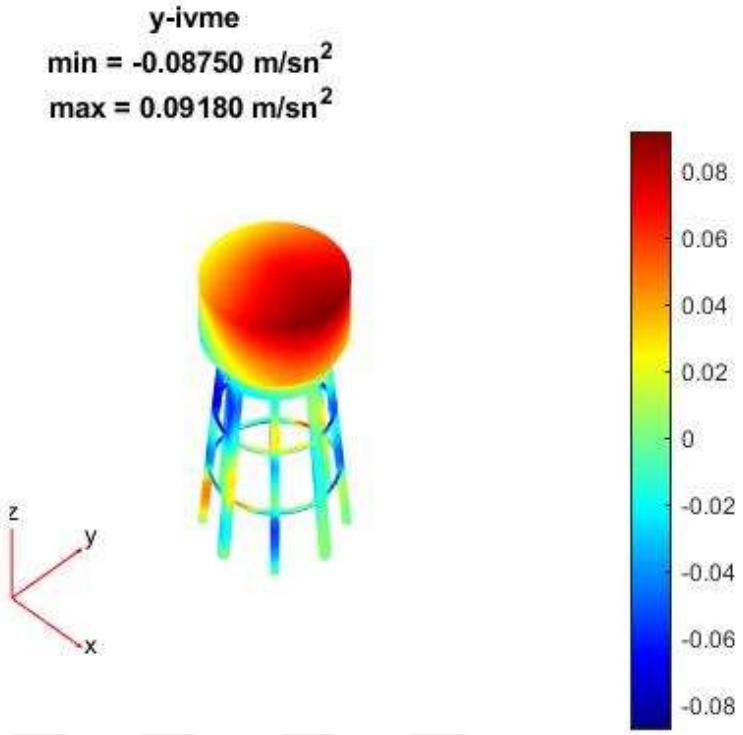


Şekil 6.181. ***Model-6'***da z yönündeki hız

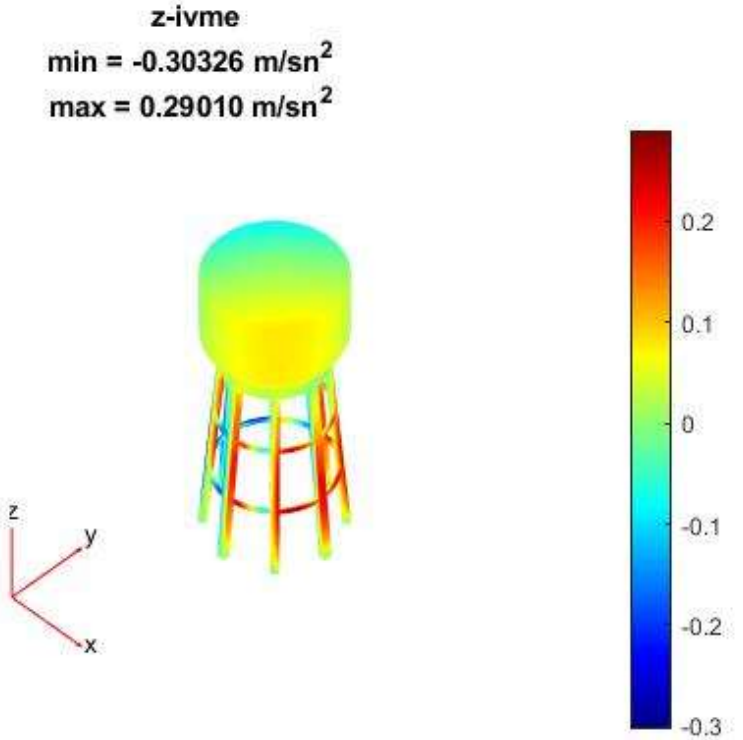
Model-6 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.182 - 6.184'de verilmektedir.



Şekil 6.182. ***Model-6'***da x yönündeki ivme



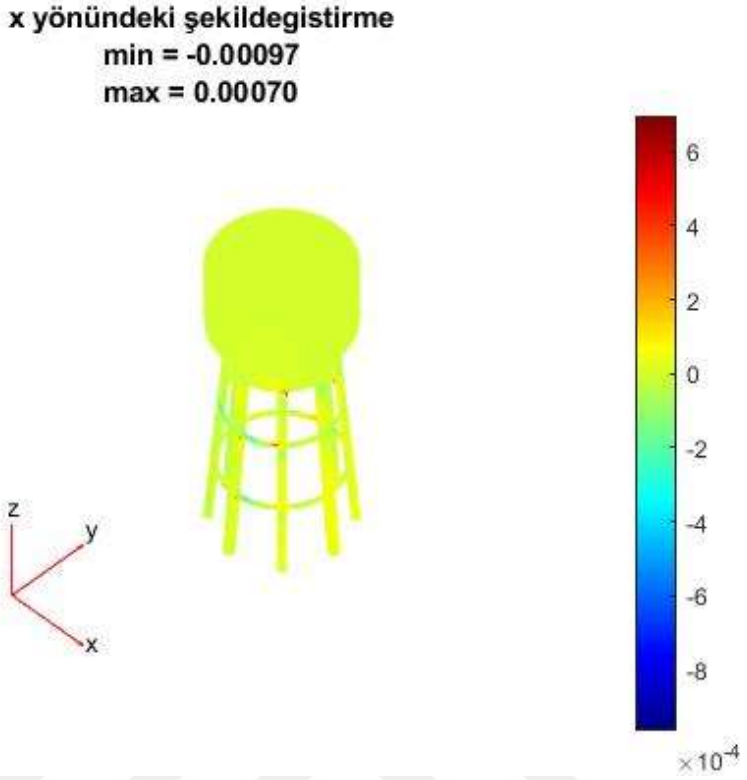
Şekil 6.183. ***Model-6'***da y yönündeki ivme



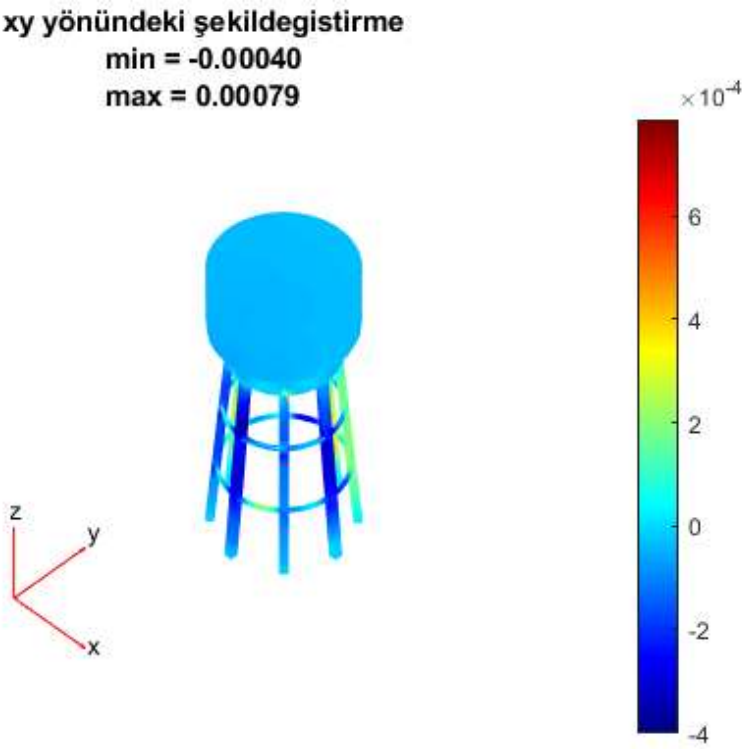
Şekil 6.184. ***Model-6'***da z yönündeki ivme

Model-6 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin

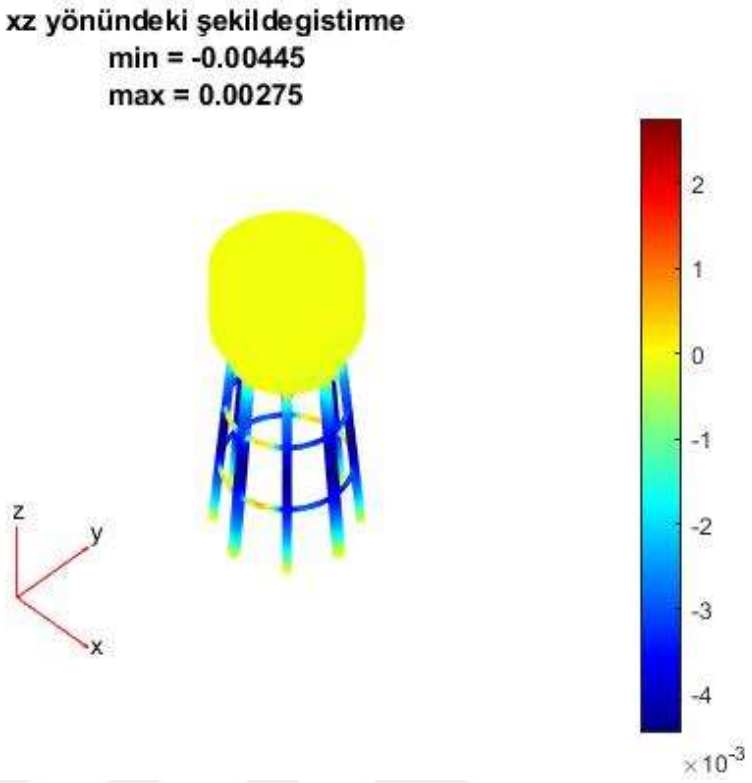
deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.185 - 6.193'de verilmektedir.



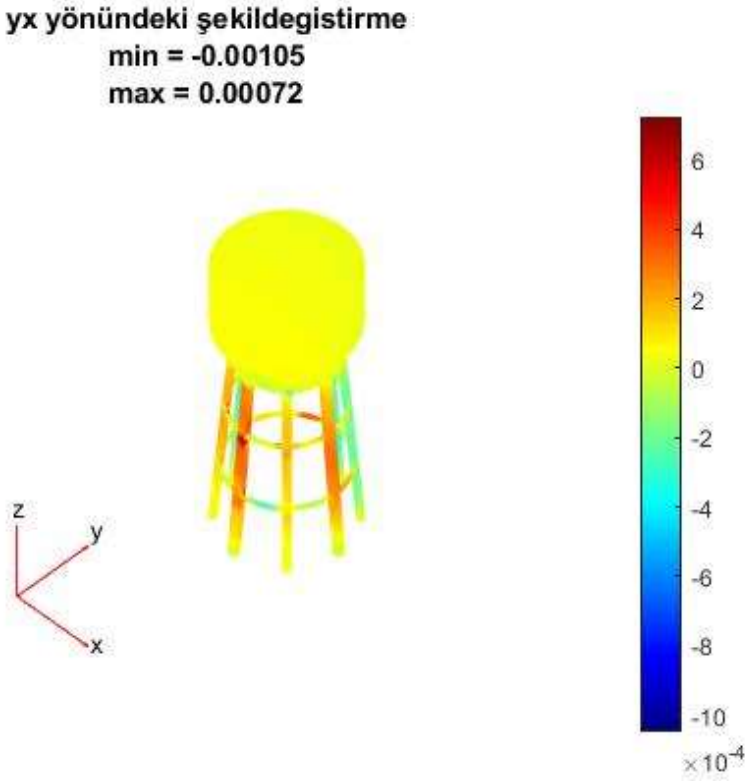
Şekil 6.185. ***Model-6'***da x yönündeki şekil değiştirme



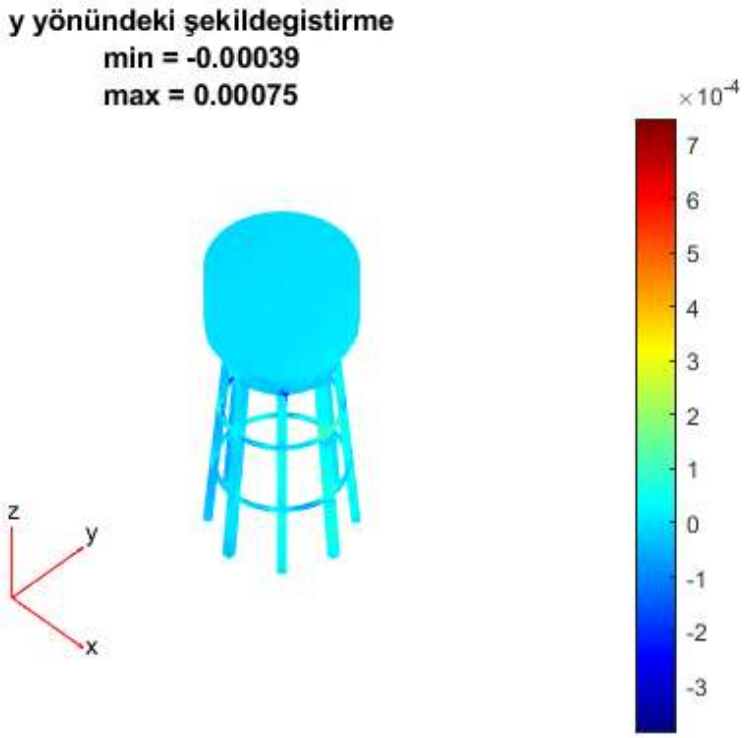
Şekil 6.186. ***Model-6'***da xy yönündeki şekil değiştirme



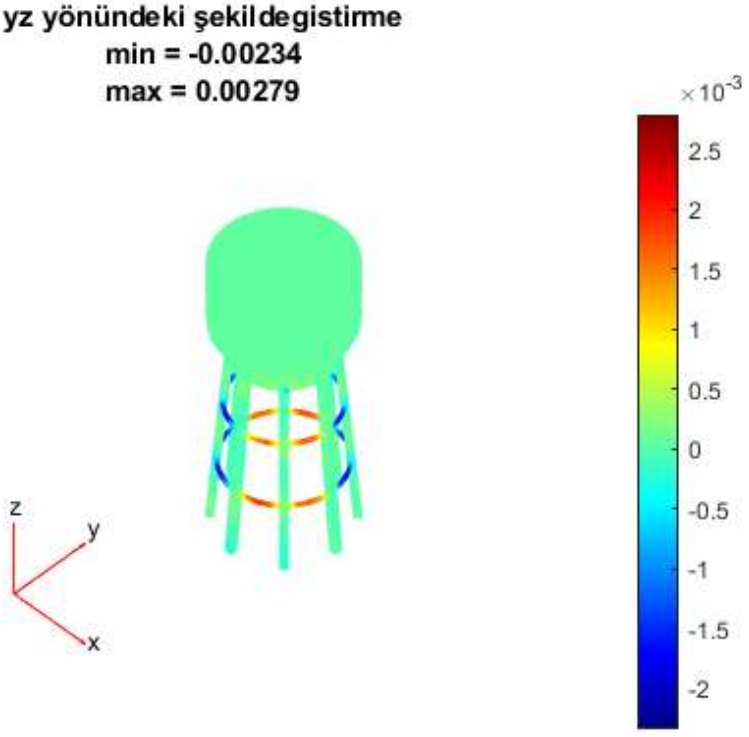
Şekil 6.187. ***Model-6'***da xz yönündeki şekil değiştirme



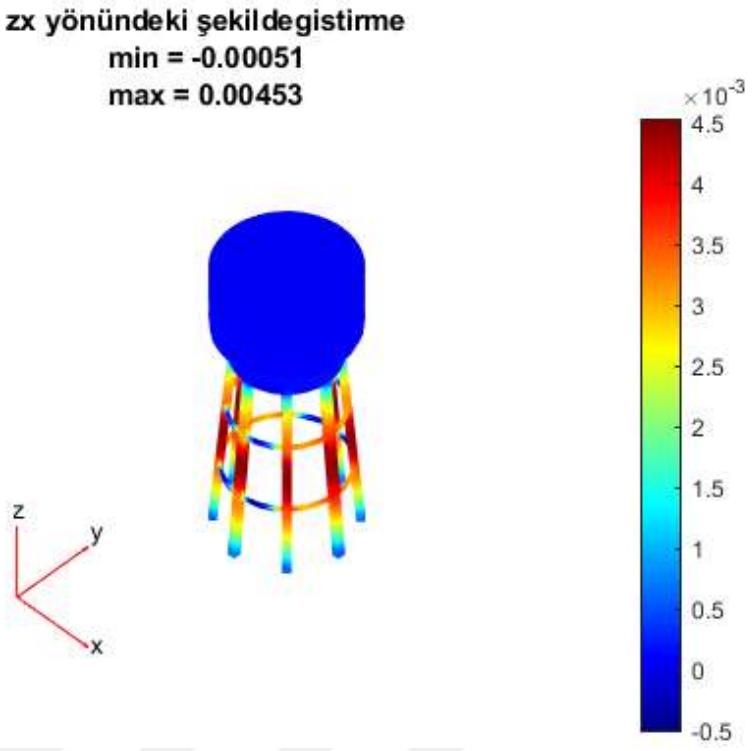
Şekil 6.188. ***Model-6'***da yx yönündeki şekil değiştirme



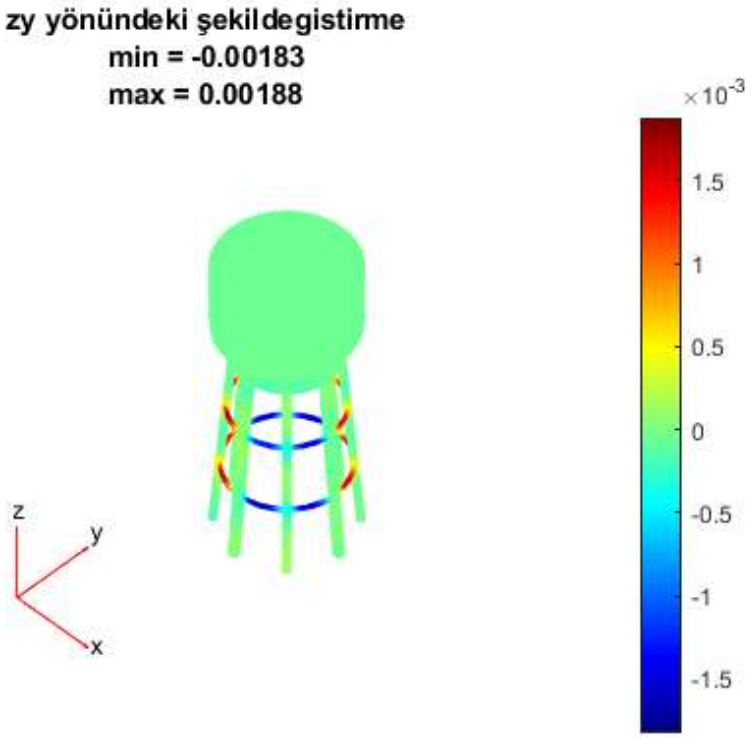
Şekil 6.189. ***Model-6'***da y yönündeki şekil değiştirme



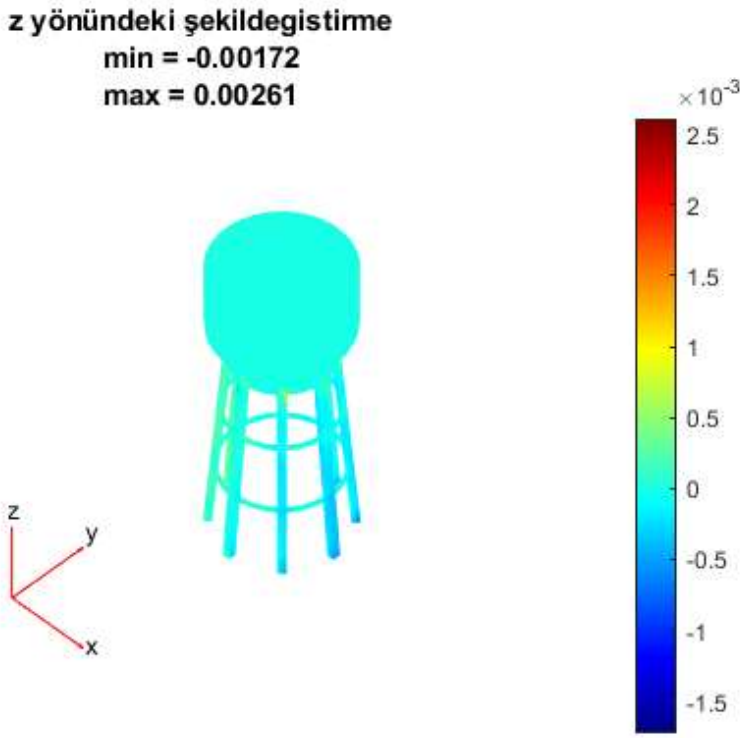
Şekil 6.190. ***Model-6'***da yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.191. ***Model-6'***da zx yönündeki şekil değiştirme

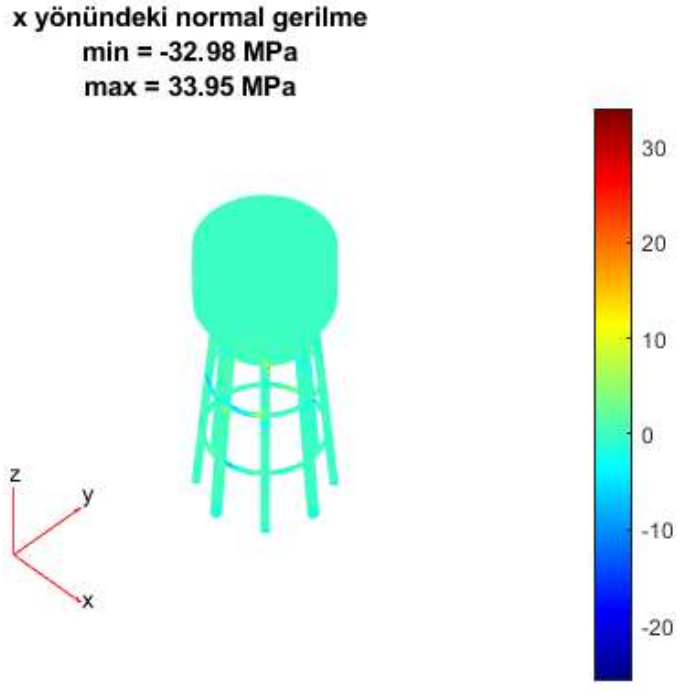


Şekil 6.192. ***Model-6'***da zy yönündeki şekil değiştirme

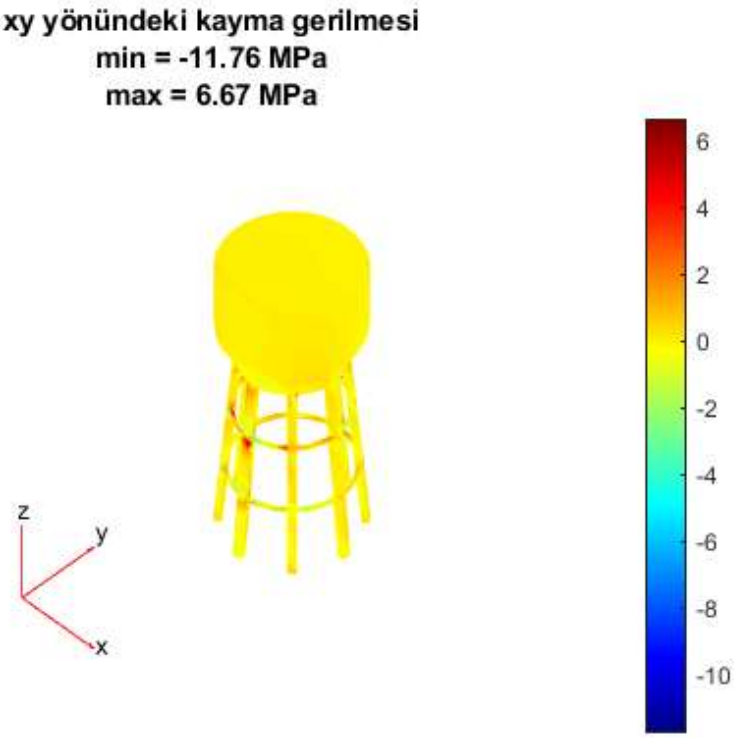


Şekil 6.193. ***Model-6'***da z yönündeki şekil değiştirme

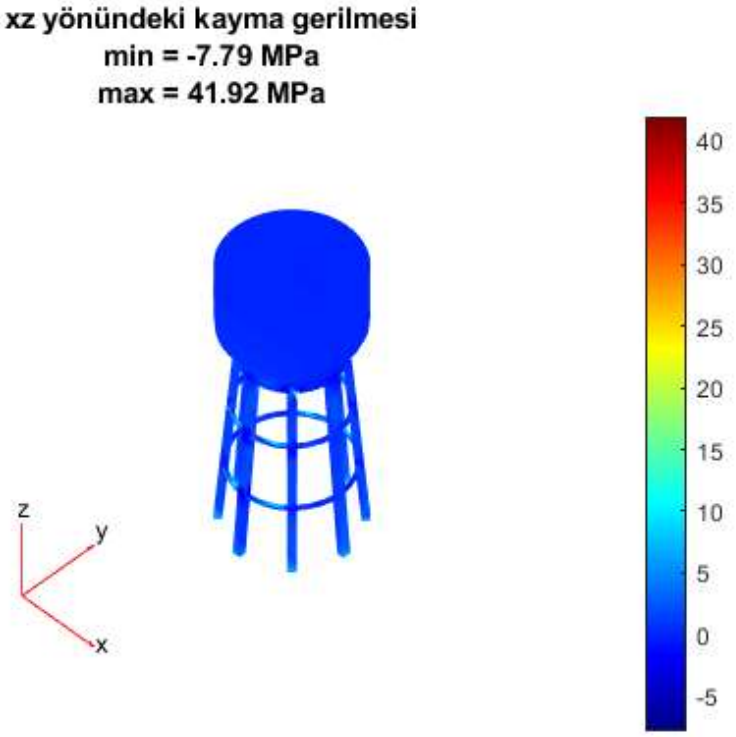
Model-6 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.194 - 6.203'de verilmektedir.



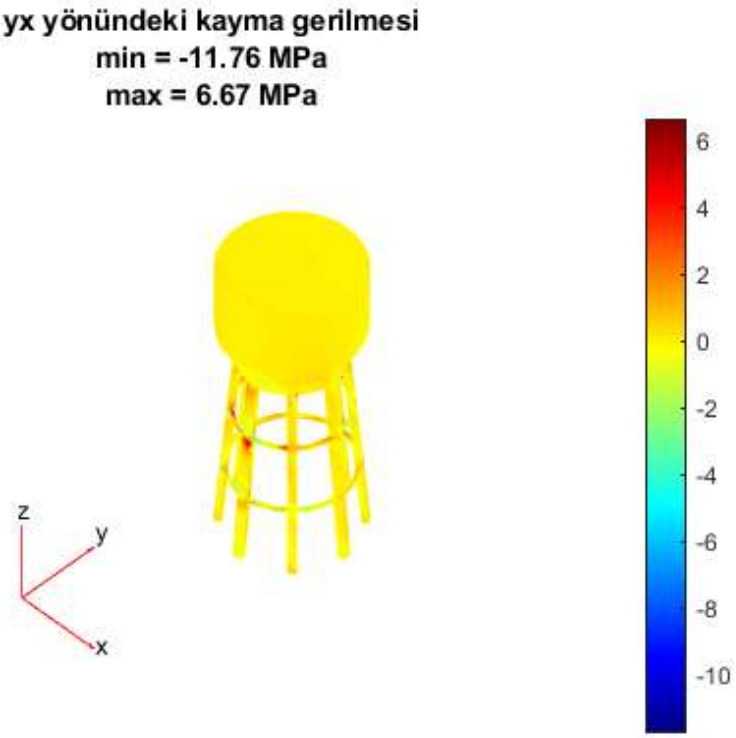
Şekil 6.194. ***Model-6'***da x yönündeki normal gerilme



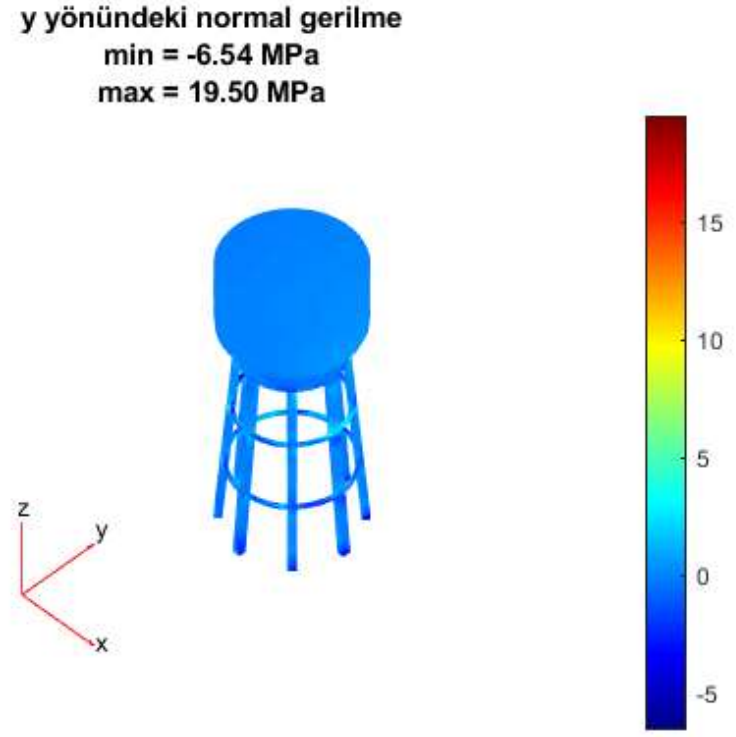
Şekil 6.195. ***Model-6'***da xy yönündeki kayma gerilmesi



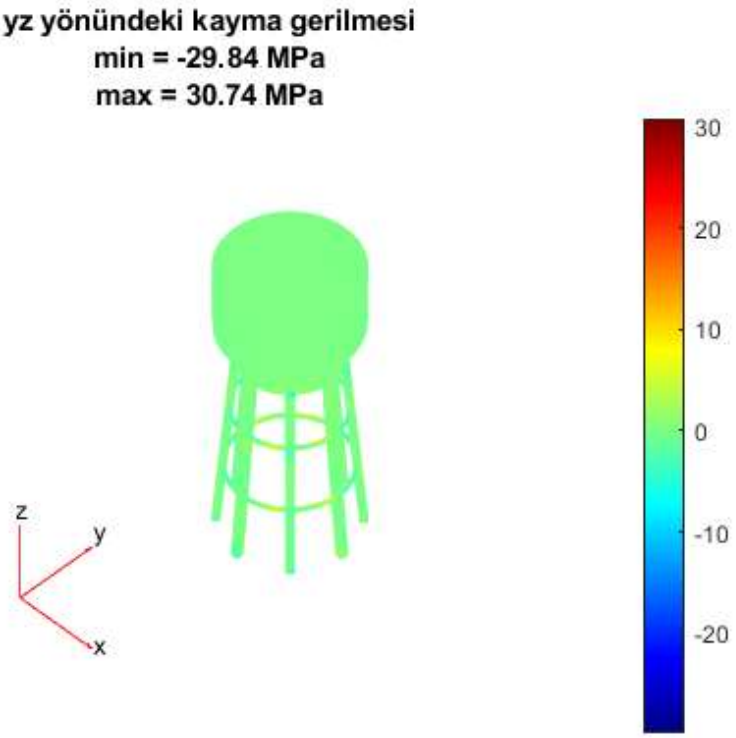
Şekil 6.196. ***Model-6'***da xz yönündeki kayma gerilmesi



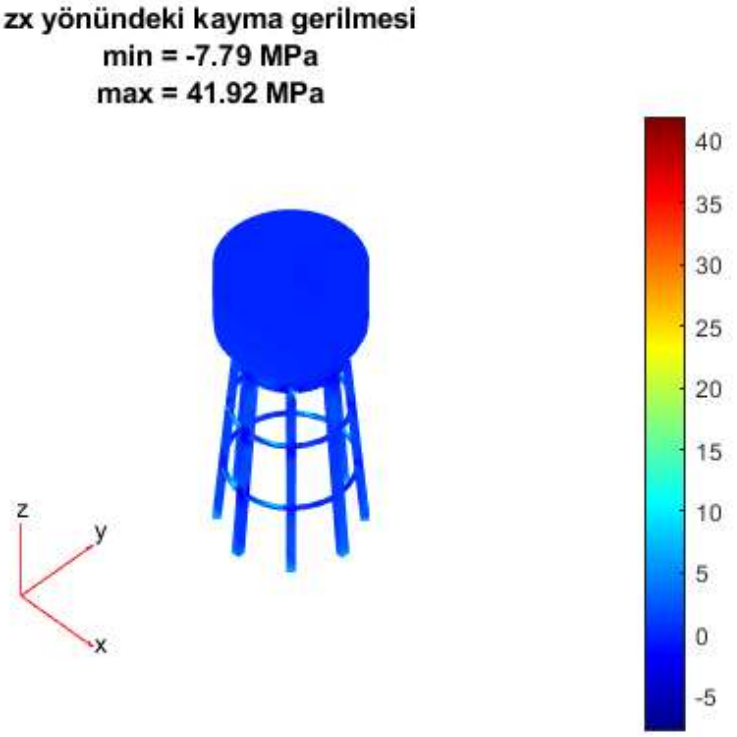
Şekil 6.197. ***Model-6'***da yx yönündeki kayma gerilmesi



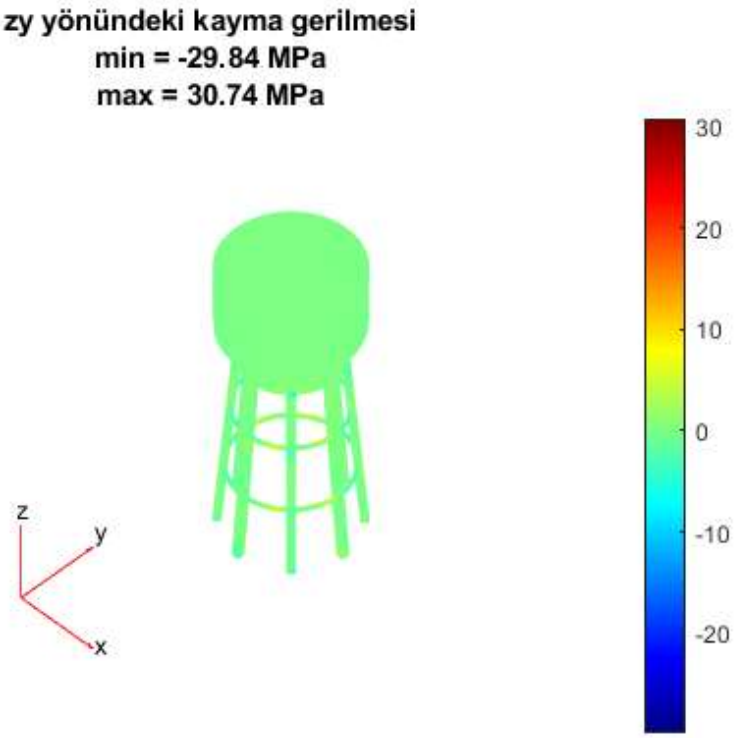
Şekil 6.198. ***Model-6'***da y yönündeki normal gerilme



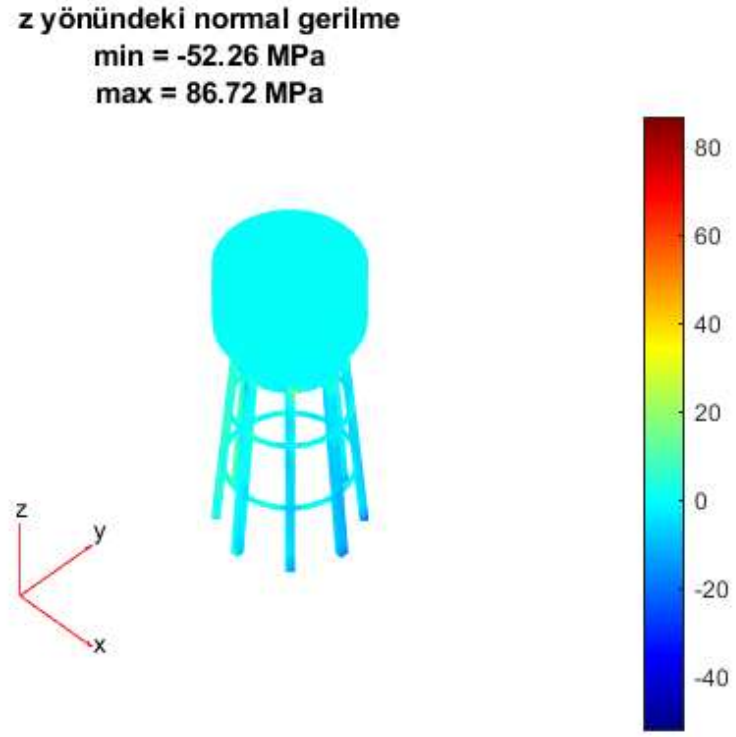
Şekil 6.199. ***Model-6'***da yz yönündeki kayma gerilmesi



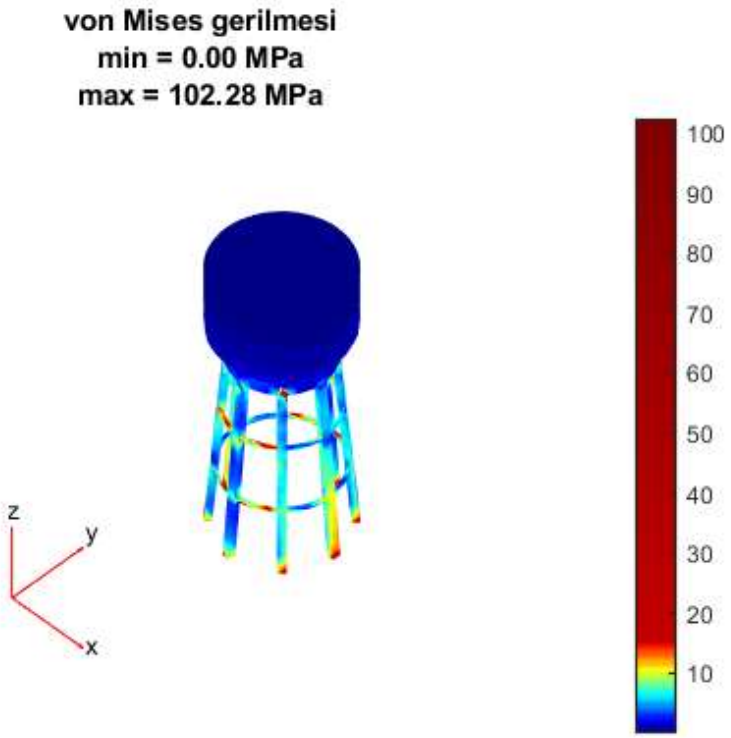
Şekil 6.200. ***Model-6'***da zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.201. ***Model-6'***da zy yönündeki kayma gerilmesi

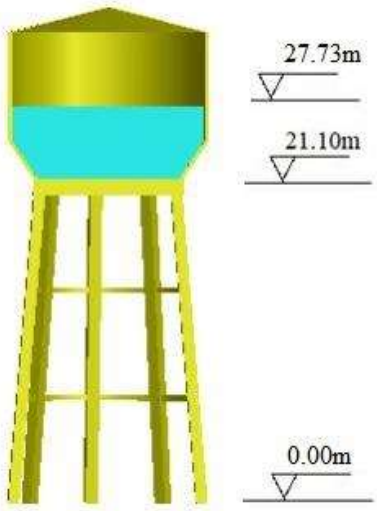


Şekil 6.202. ***Model-6'***da z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.203. ***Model-6'***da Von Mises gerilmesi

6.2.4.7. Model-7: Ayaklı Su Deposunun Yarım Dolu (%50) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için DPH Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizin Gerçekleştirildiği Model.



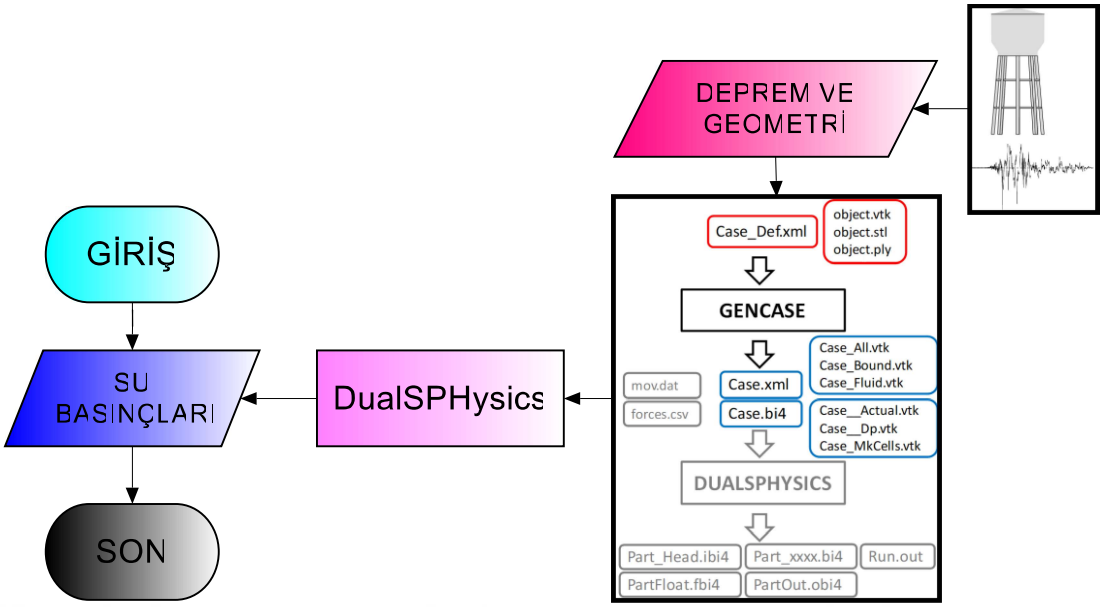
Şekil 6.204. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu

Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumda olduğu ***Model-7*** Şekil 6.204'de görülmektedir.

- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumunda suyun doğrusal olmayan davranışını modellemede kullanılan DPH yaklaşımı kullanılmıştır.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Sönüm türü:** Rayleigh sönüm kullanılmıştır.

Model-7'de hazne içindeki suyun modellemesi doğrusal olmayan davranışı ve Lagrangian yaklaşımı esas alan DPH Yöntemi ile modellenmiştir.

Betonarme ayaklı su deposuna etkiyen bir deprem yer hareketi sonucunda hazne duvarlarına gelen su basınçları DPH Yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Bu yöntemi esas alan DualSphysics programı(DualSPHysics, 2023) kullanılarak hazne duvarlarına gelen hidrodinamik basınçlar elde edilebilmektedir. Bu program bilgisayarın Merkezi İşlem Birimi(CPU) ve Grafik İşlem Birimi(GPU) ile analizleri gerçekleştirmektedir. Parçacık sayısının çok fazla olması ve görsel sunumlar nedeniyle zaman açısından GPU üzerinde çalışma yapmak daha uygun olmaktadır. Bu amaçla, 1000m^3'lük betonarme ayaklı deponun katı modeli hazırlanmıştır. Daha sonra MATLAB (MATLAB, 2023) Kısmi Diferansiyel Denklem araç kutusu yardımıyla deponun taşıyıcı sistemi düzenlenerek betonarme kısmın sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Deponun yarı dolu ve tam dolu durumu dikkate alınarak DualSphysics (DualSPHysics, 2023) programında analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.205). Deprem yer hareketi için, Türkiye'de 17 Ağustos 1999 yılında gerçekleşen Kocaeli depremi seçilmiştir. Bu depremin en büyük yer ivmesi 9.87'nci saniyede 0.349g değerinde gerçekleşmiştir (Şekil 6.2). Kocaeli depremi ivme kaydı kulllanılarak 3490 adet zaman adımı için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir. Hareket denkleminin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemini esas alan MATLAB(MATLAB, 2023) ODE45 fonksiyonları kullanılmıştır. Analizler sonucunda her bir zaman adımı için yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme, gerilme değerleri üç boyutlu olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.205. DualSPHysics programı ile hidrodinamik su basınçlarının elde edilmesi

Tablo 6.6. Yarım dolu ayaklı su deposunun DPH Yöntemi parametreleri

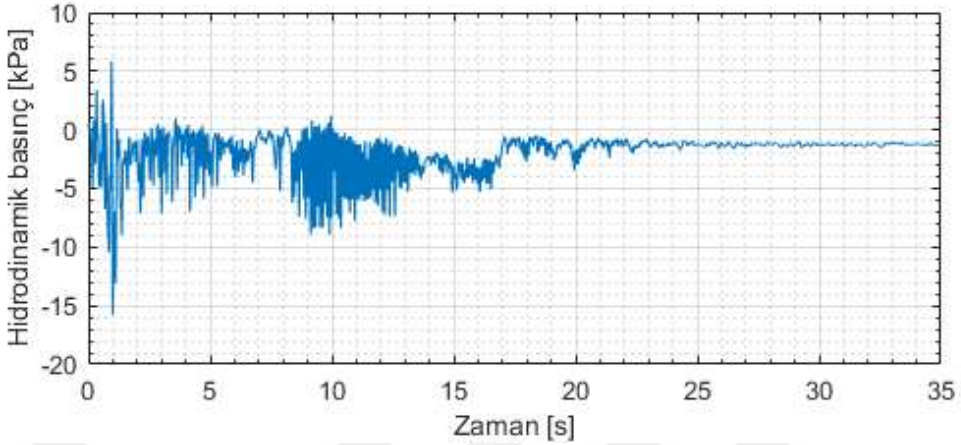
Özellik	Parametreler
Versiyon	DualSPHysics v4.056
Boyut	3B
Kernel fonksiyonu çeşidi	Wendland
Zaman adımı	Verlet
Yoğunluk filtresi	Shepard filter
Viskozite davranışı	Yapay viskozite (α=0.01)
Sınır şartları	Dinamik
Parçacıklar arasındaki mesafe (dp)	0.09m
İnterpolasyon uzunluğu	1
Akışkan parçacık sayısı	38029
Suyun yoğunluğu	1000kg/m^3
CFL katsayısı	0.20

Tablo 6.6 betonarme ayaklı su deposunun %50 dolu olması durumu için gereken analiz parametrelerini göstermektedir. Şekil 6.204 haznenin %50 dolu seviyedeki durumunu göstermektedir. Bu seviyede su serbest yüzeyi kotu 25.73m, su yüksekliği ise 4.63m ve su hacmi 528.41m^3'dür.

DPH Yöntemi ile Bulunan Hidrodinamik Basınçlar

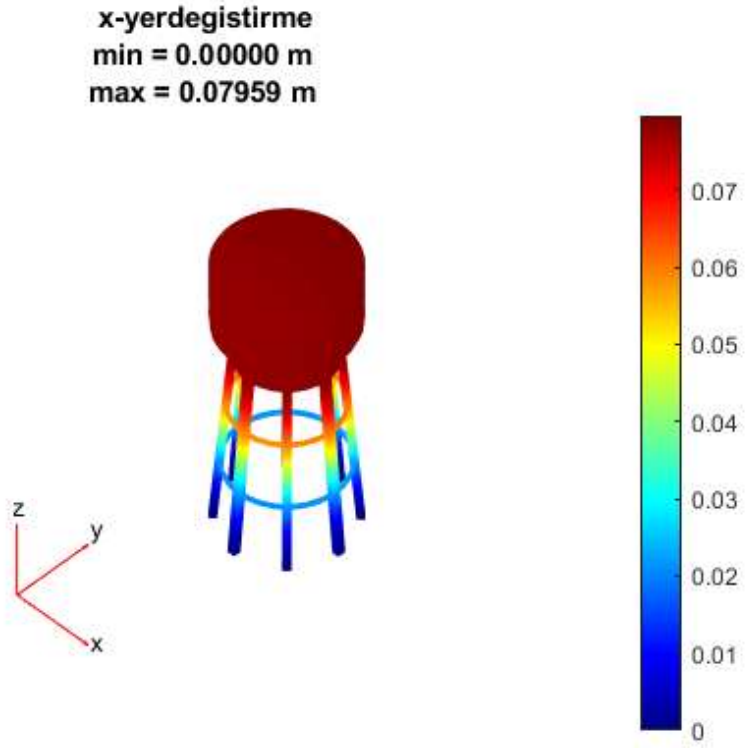
Gerçekleştirilen analizler sonucunda hazne cidarındaki sonlu eleman düğüm noktalarındaki tüm hidrodinamik basınçlar zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Örnek

olarak depo haznesinin tabanında yer alan X=5.8814m, Y=11.396m, Z=21.1m koordinatındaki bir noktaya ait zamana bağlı hidrodinamik basınç değişimi Şekil 6.206'da verilmektedir.

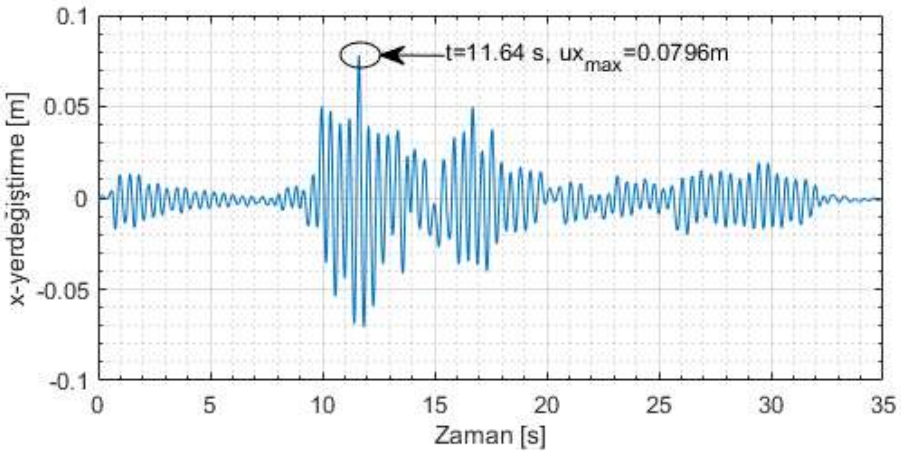


Şekil 6.206. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) olması durumundaki hidrodinamik basınçlar

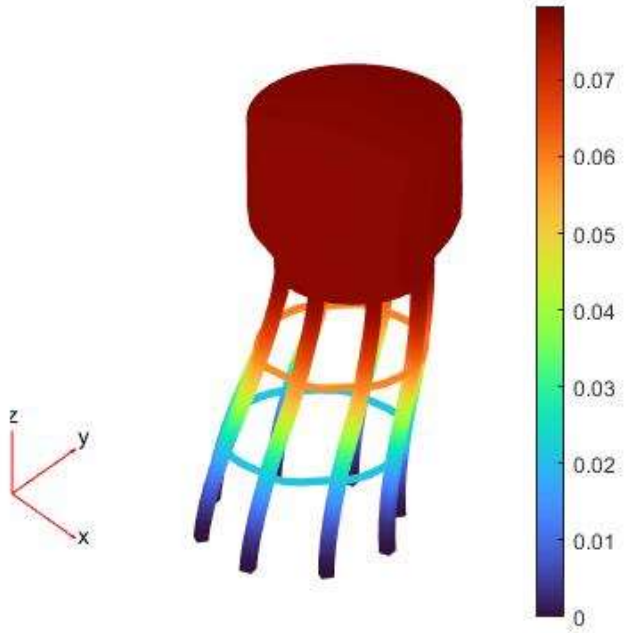
Model-7 analiz sonuçları



Şekil 6.207. ***Model-7'***de x yönündeki yer değiştirme



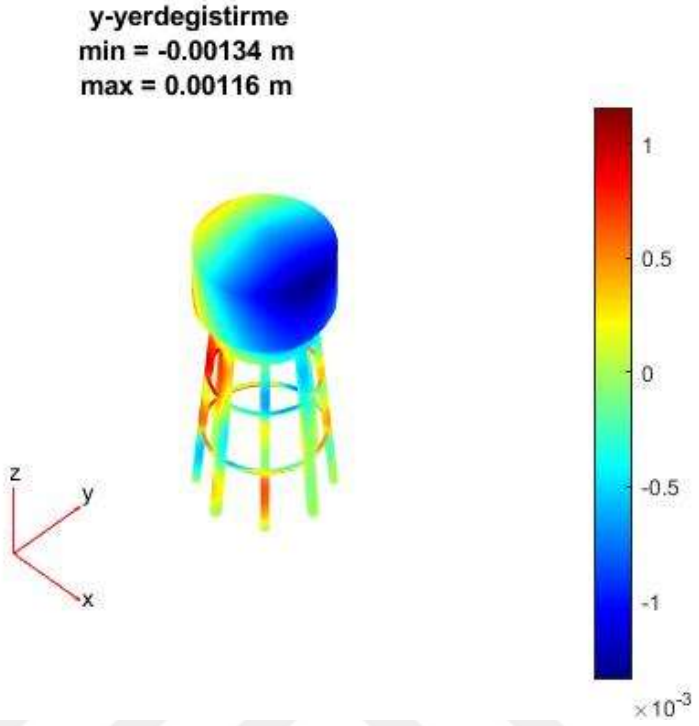
Şekil 6.208. ***Model-7'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi



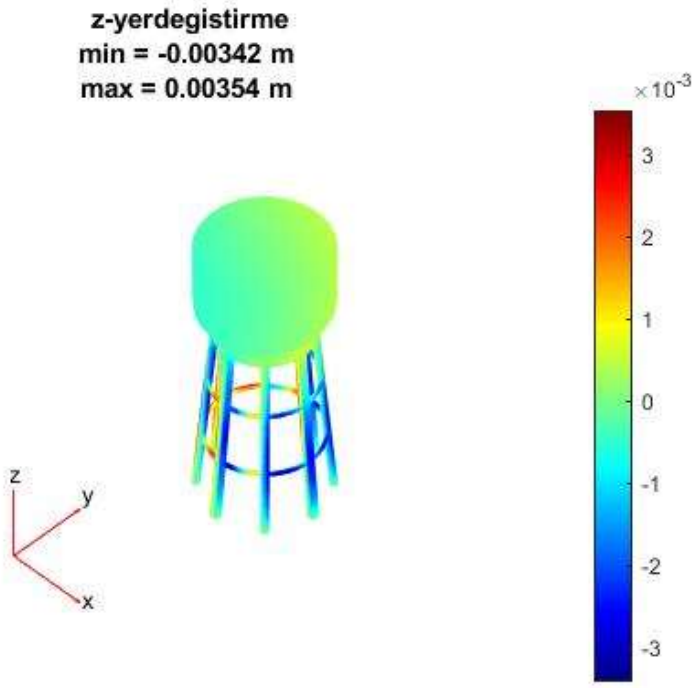
Şekil 6.209. ***Model-7'***de x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-7 'e ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-7*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.207'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.208'de verilmektedir. Şekil 6.209'da t=11.64'.ncü saniyede x yönünde 0.0796m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.

Model-7 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.210 ve 6.211'de verilmektedir.

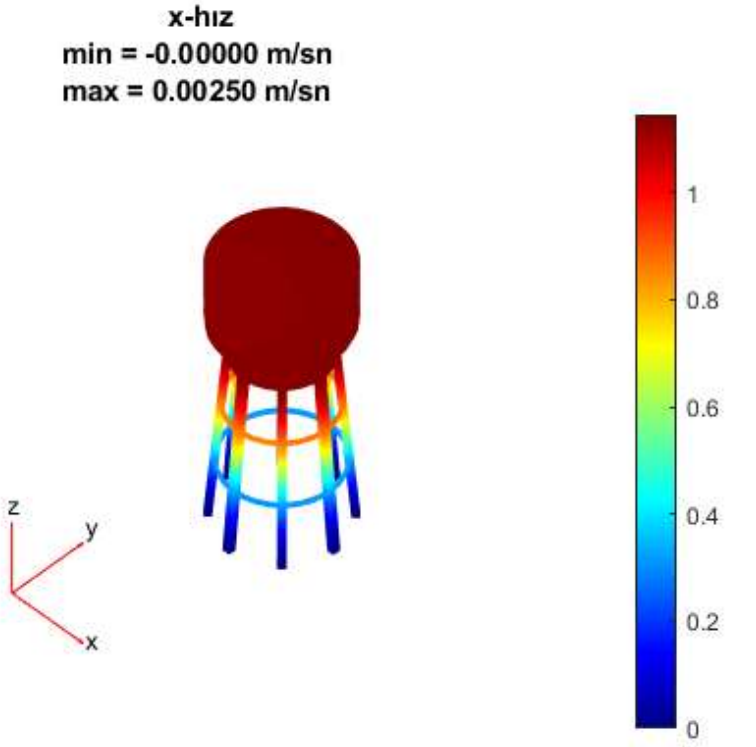


Şekil 6.210. ***Model-7'***de y yönündeki yer değiştirme

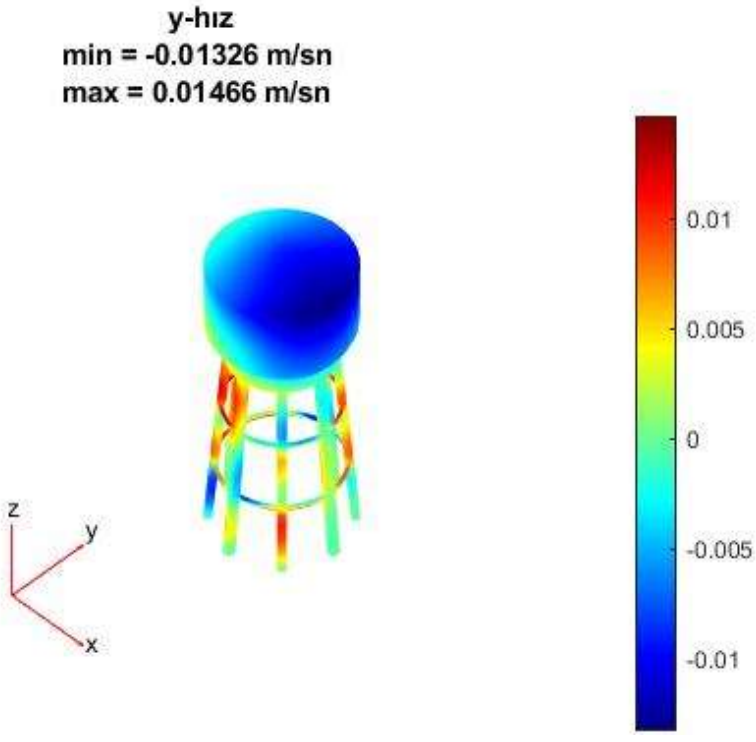


Şekil 6.211. ***Model-7'***de z yönündeki yer değiştirme

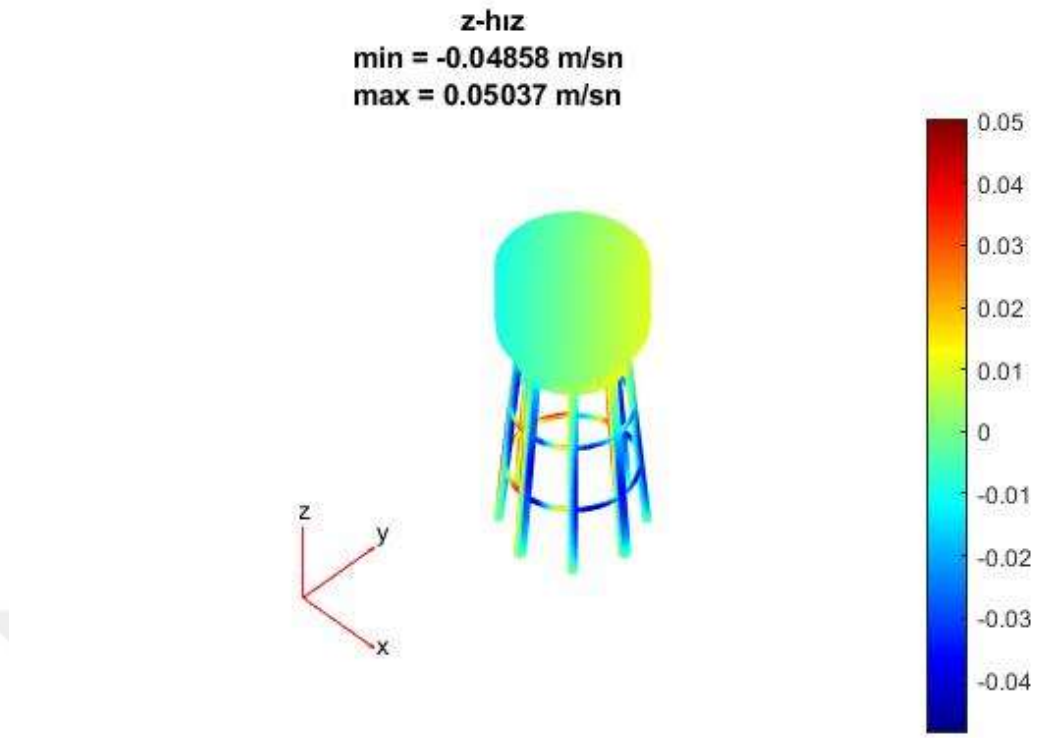
Model-7 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.212 - 6.214'de verilmektedir.



Şekil 6.212. ***Model-7'***de x yönündeki hız

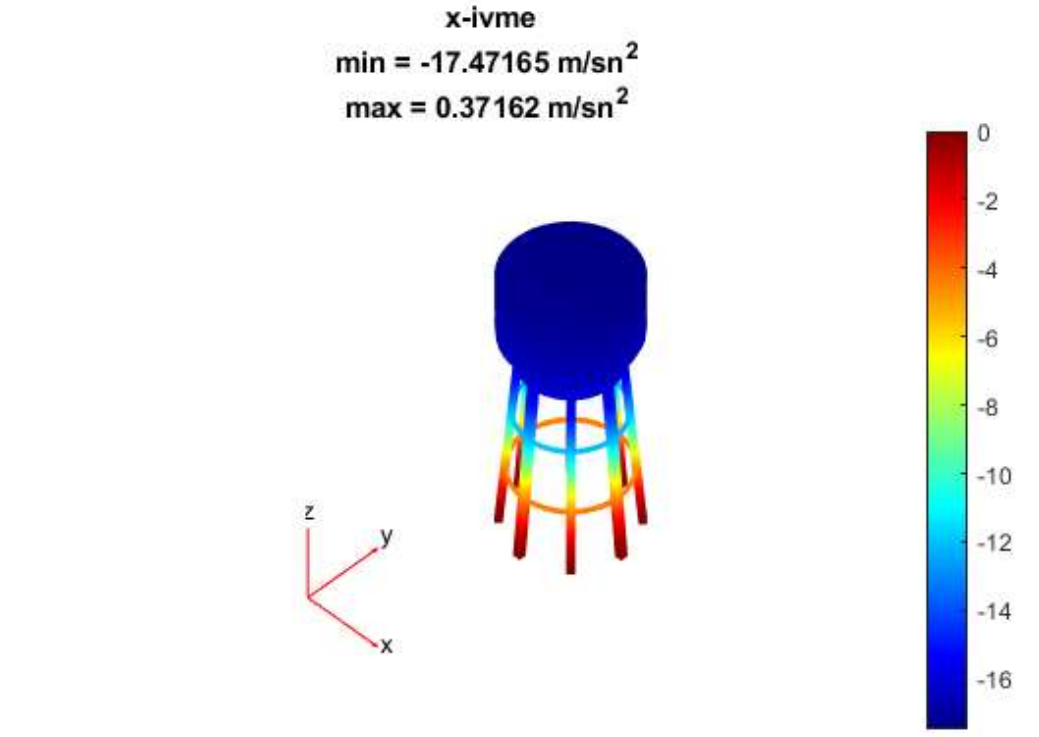


Şekil 6.213. ***Model-7'***de y yönündeki hız

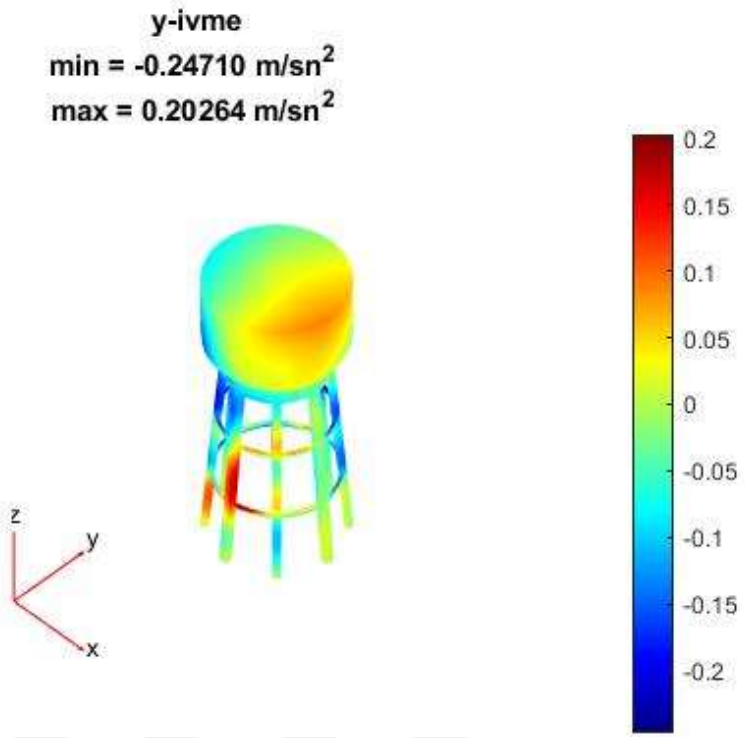


Şekil 6.214. ***Model-7***'de z yönündeki hız

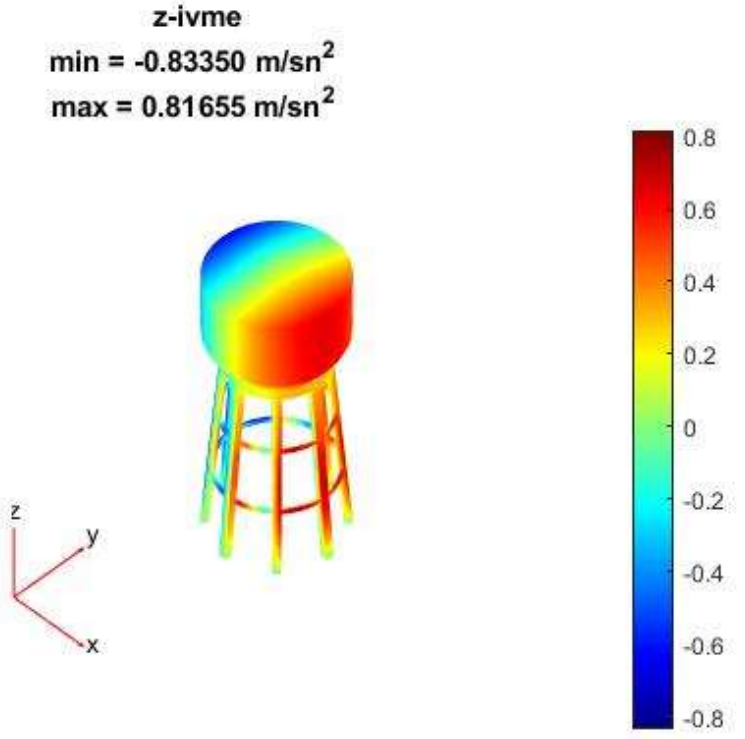
Model-7 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.215 - 6.217'de verilmektedir.



Şekil 6.215. ***Model-7***'de x yönündeki ivme

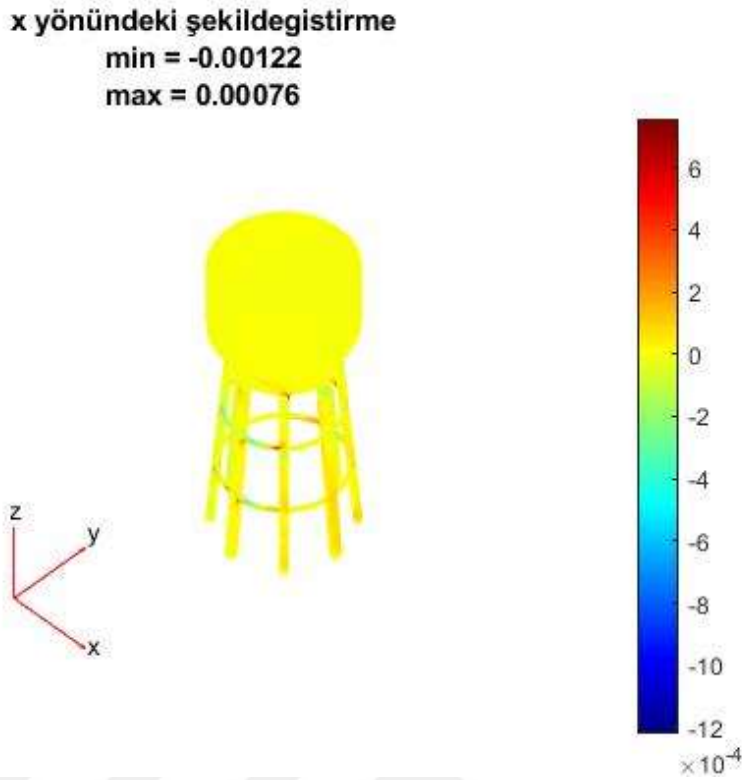


Şekil 6.216. ***Model-7'***de y yönündeki ivme

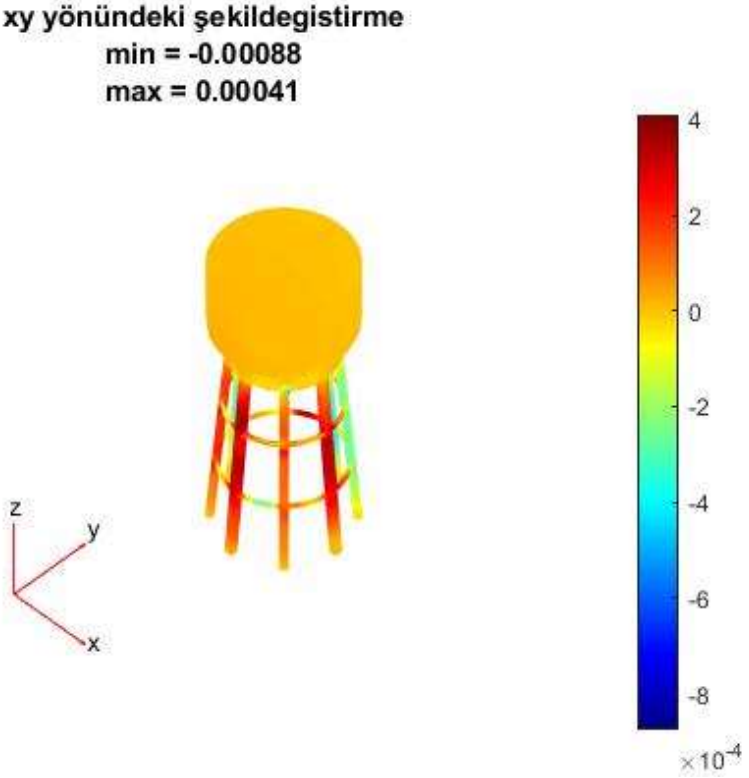


Şekil 6.217. ***Model-7'***de z yönündeki ivme

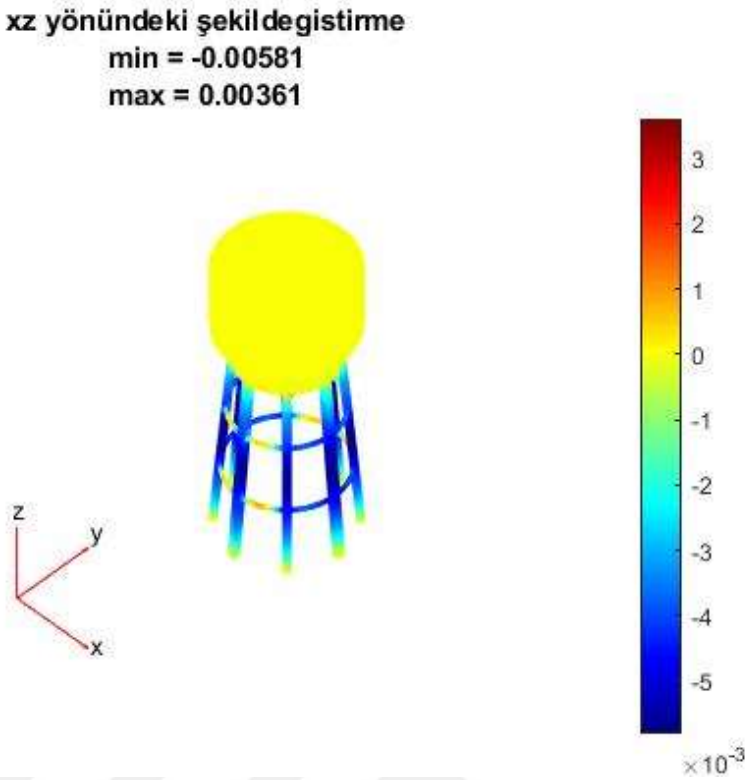
Model-7 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.218 - 6.226'da verilmektedir.



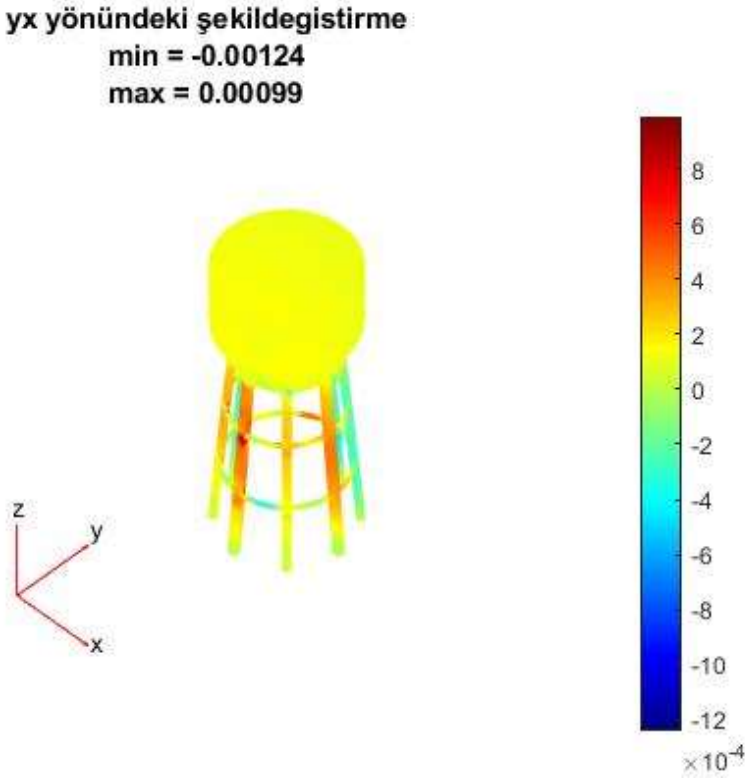
Şekil 6.218. ***Model-7'***de x yönündeki şekil değiştirme



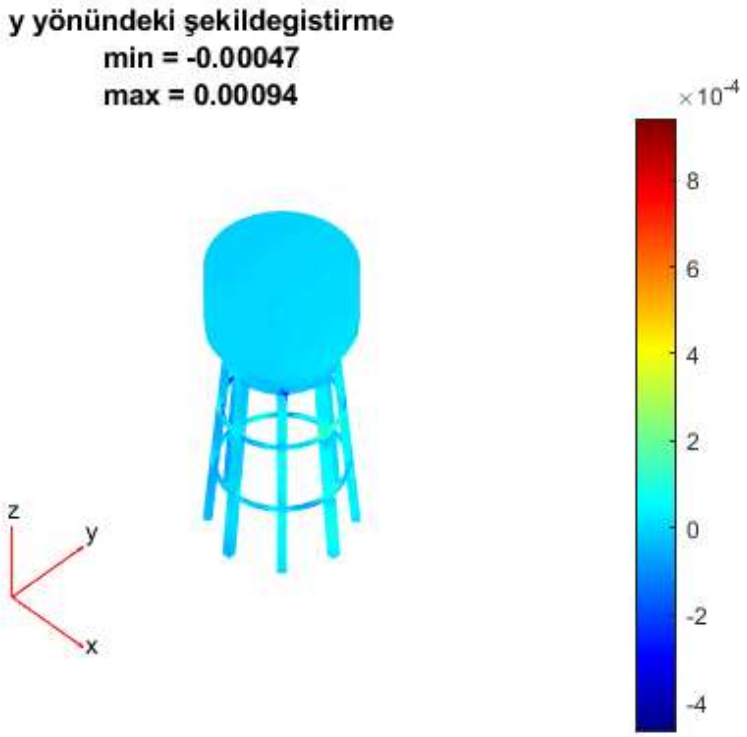
Şekil 6.219. ***Model-7'***de xy yönündeki şekil değiştirme



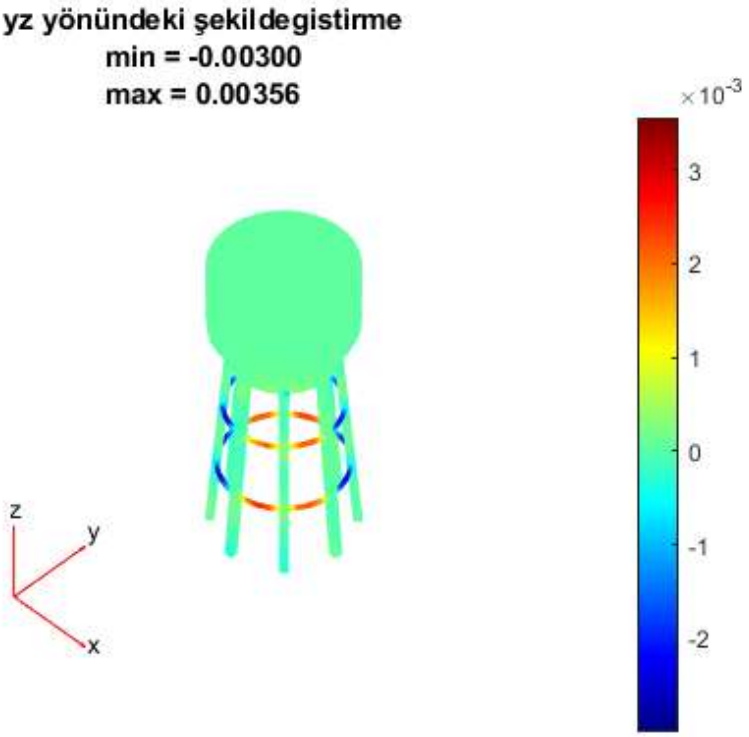
Şekil 6.220. ***Model-7'***de xz yönündeki şekil değiştirme



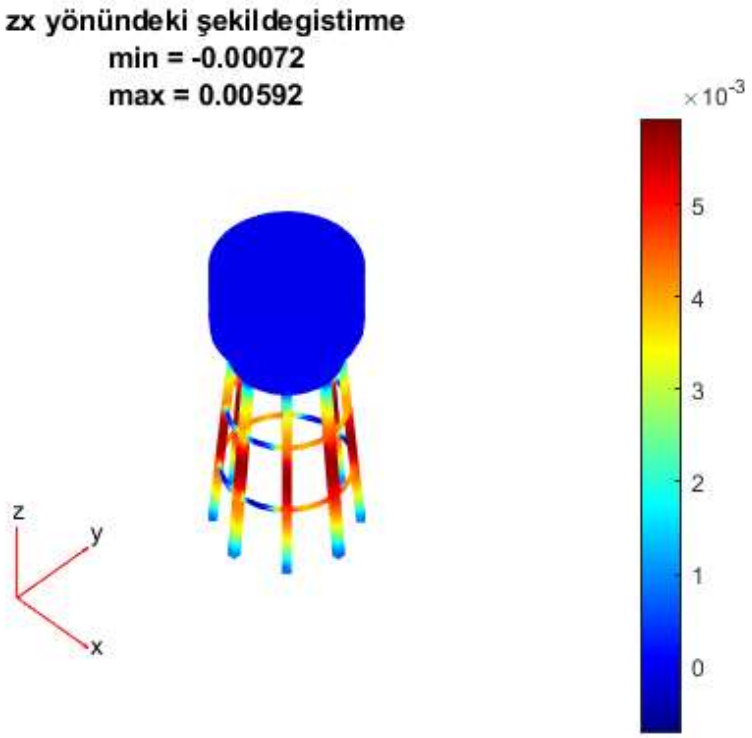
Şekil 6.221. ***Model-7'***de yx yönündeki şekil değiştirme



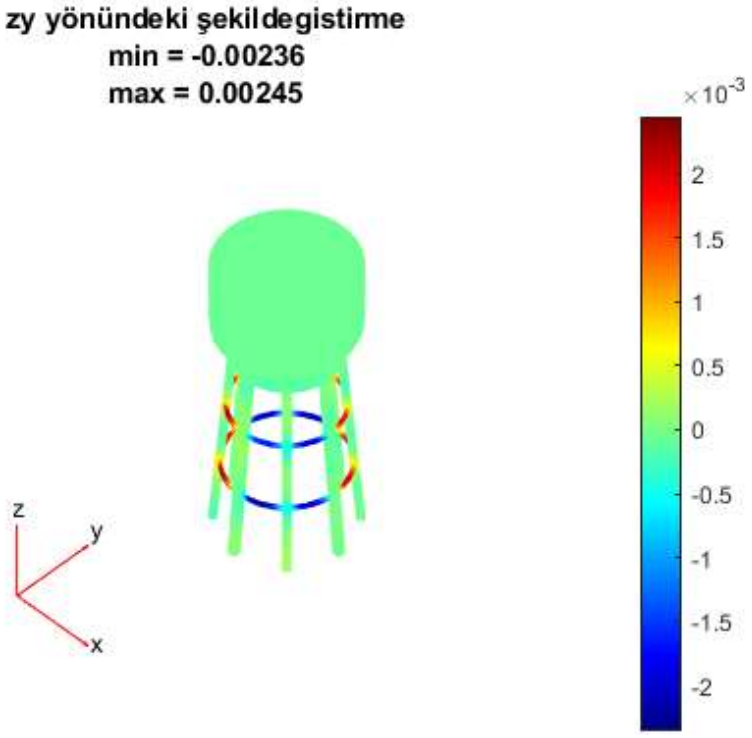
Şekil 6.222. ***Model-7'***de y yönündeki şekil değiştirme



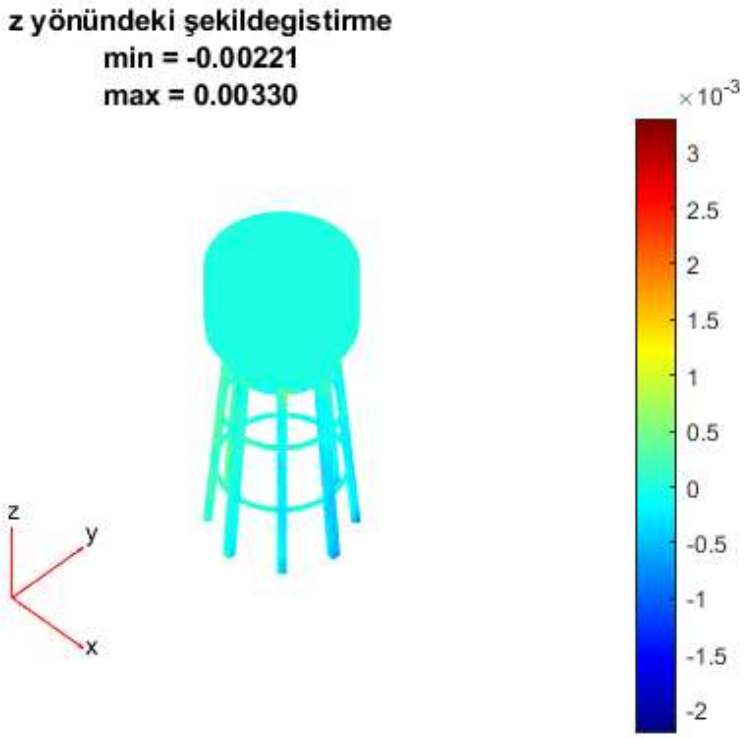
Şekil 6.223. ***Model-7'***de yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.224. ***Model-7'***de zx yönündeki şekil değiştirme

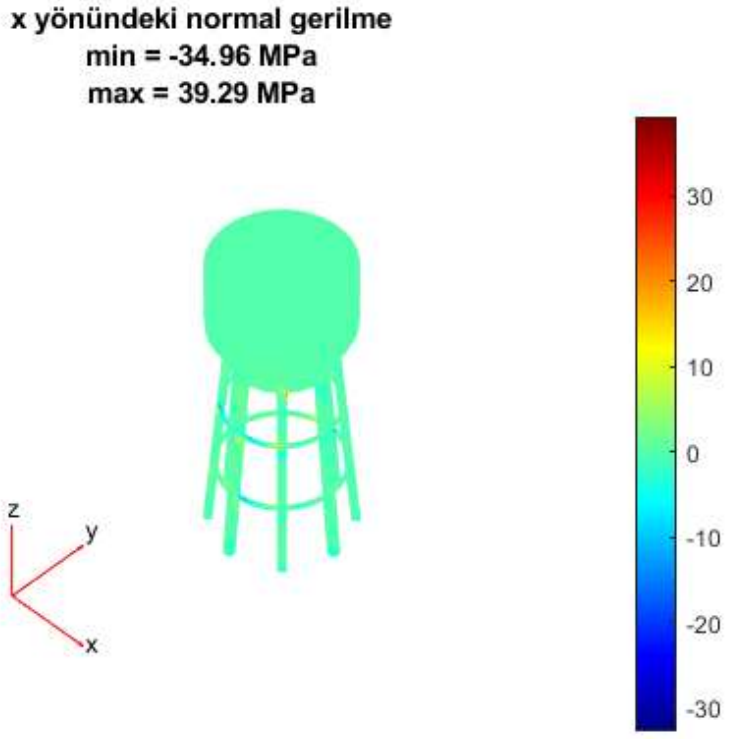


Şekil 6.225. ***Model-7'***de zy yönündeki şekil değiştirme

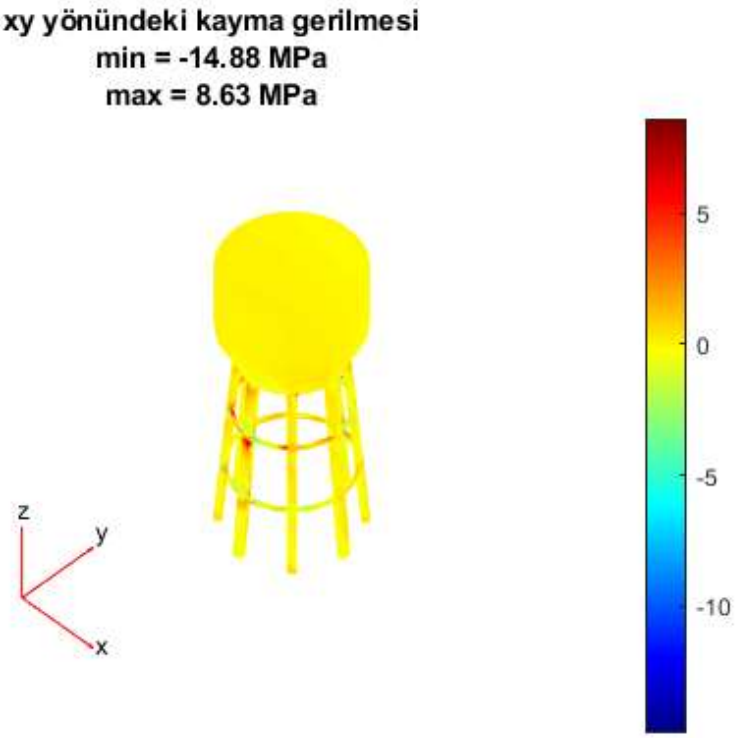


Şekil 6.226. ***Model-7***'de z yönündeki şekil değiştirme

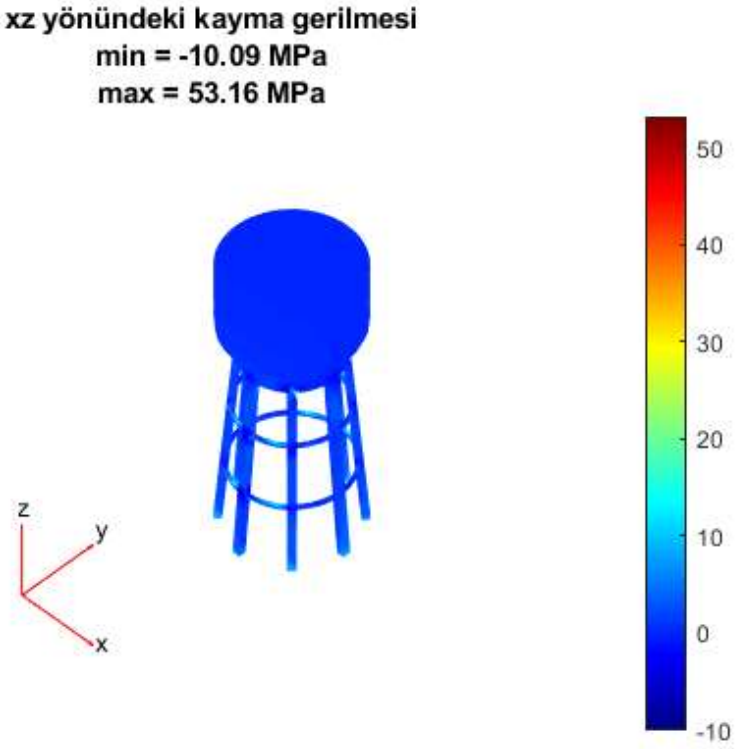
Model-7 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.227 - 6.236'da verilmektedir.



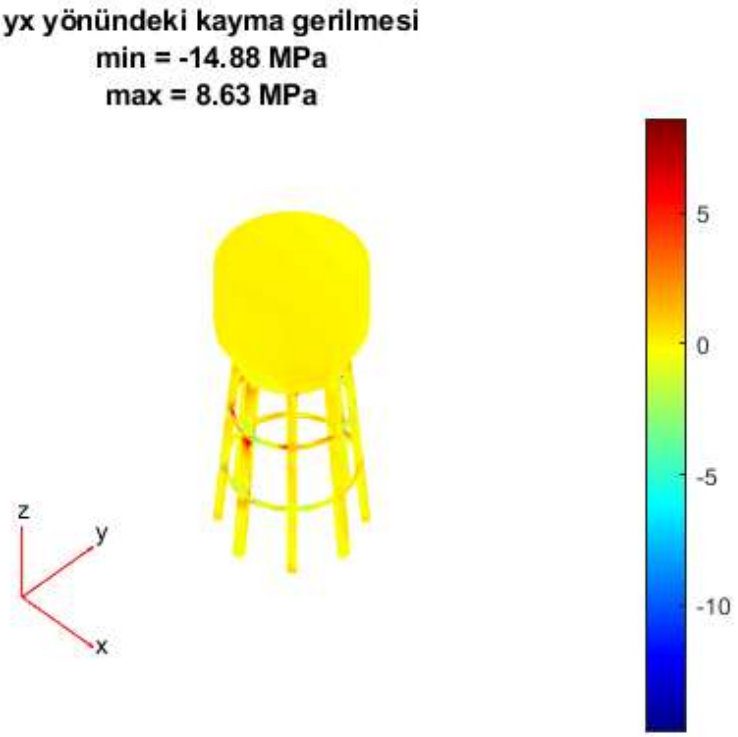
Şekil 6.227. ***Model-7***'de x yönündeki normal gerilme



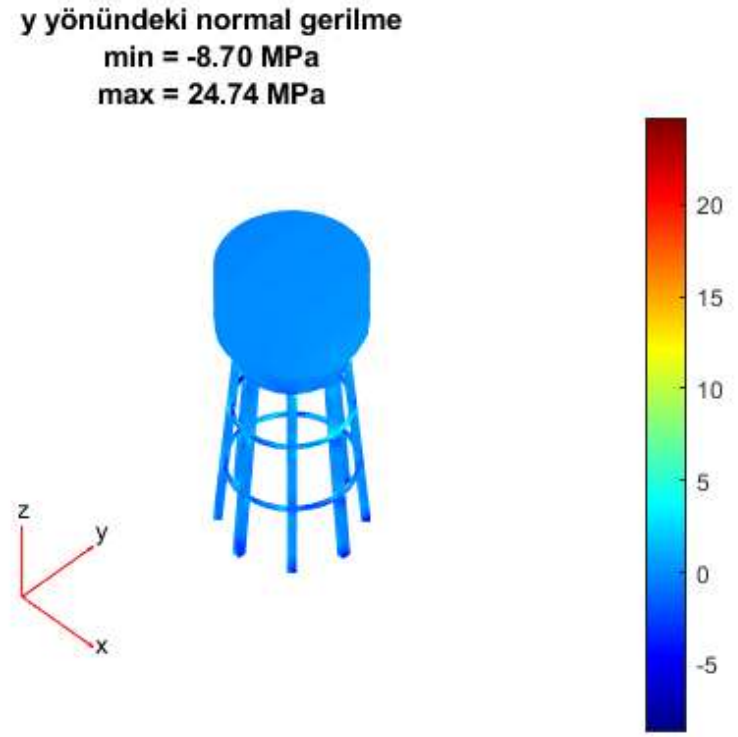
Şekil 6.228. ***Model-7'***de xy yönündeki kayma gerilmesi



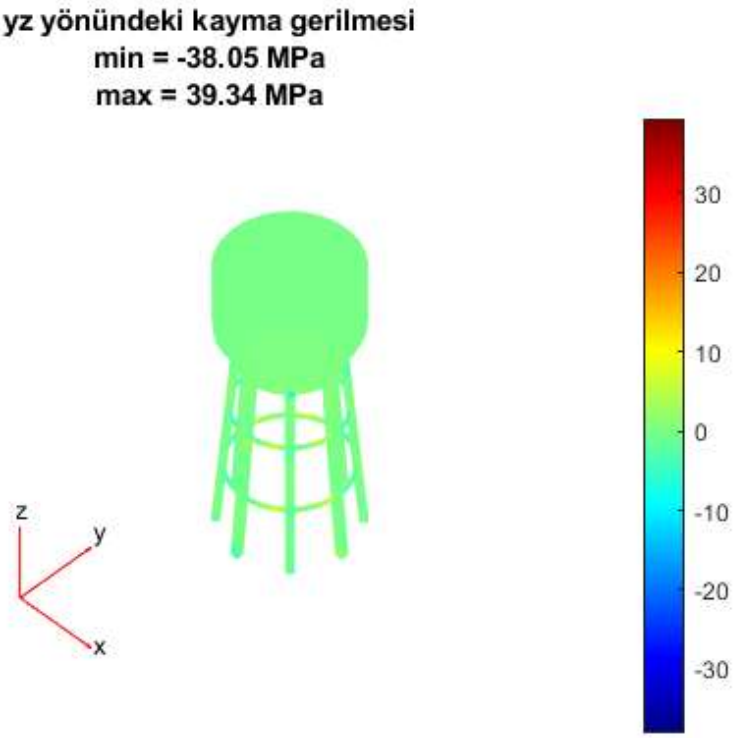
Şekil 6.229. ***Model-7'***de xz yönündeki kayma gerilmesi



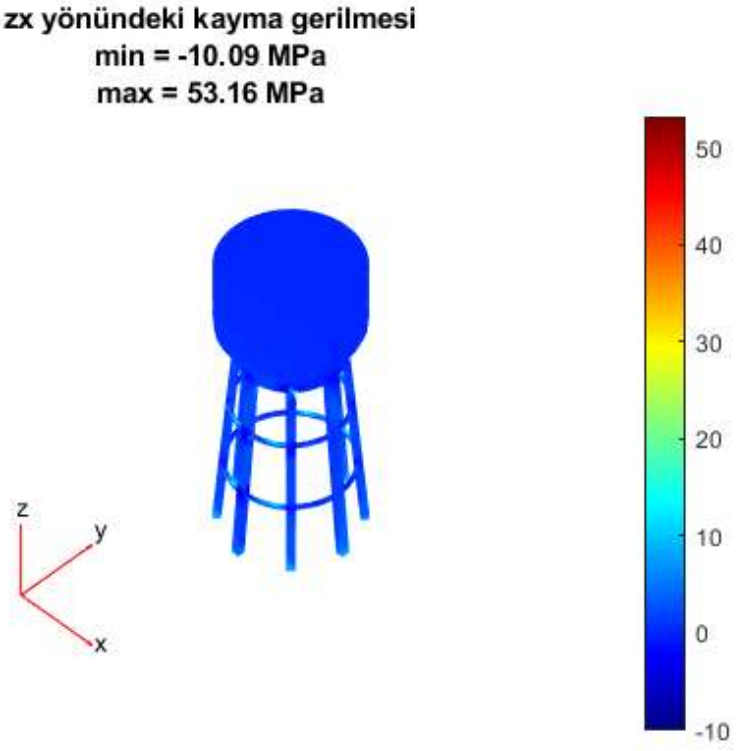
Şekil 6.230. ***Model-7'***de yx yönündeki kayma gerilmesi



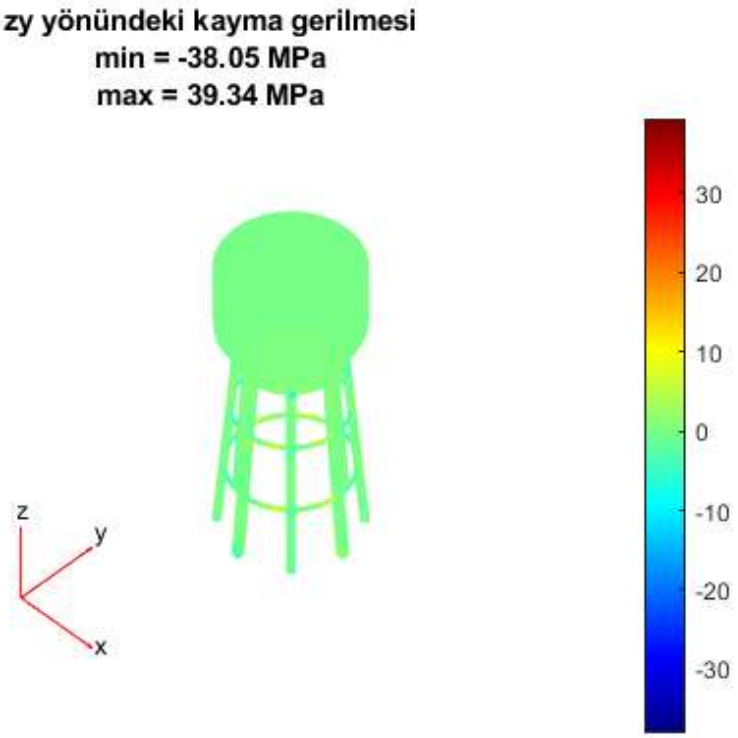
Şekil 6.231. ***Model-7'***de y yönündeki normal gerilme



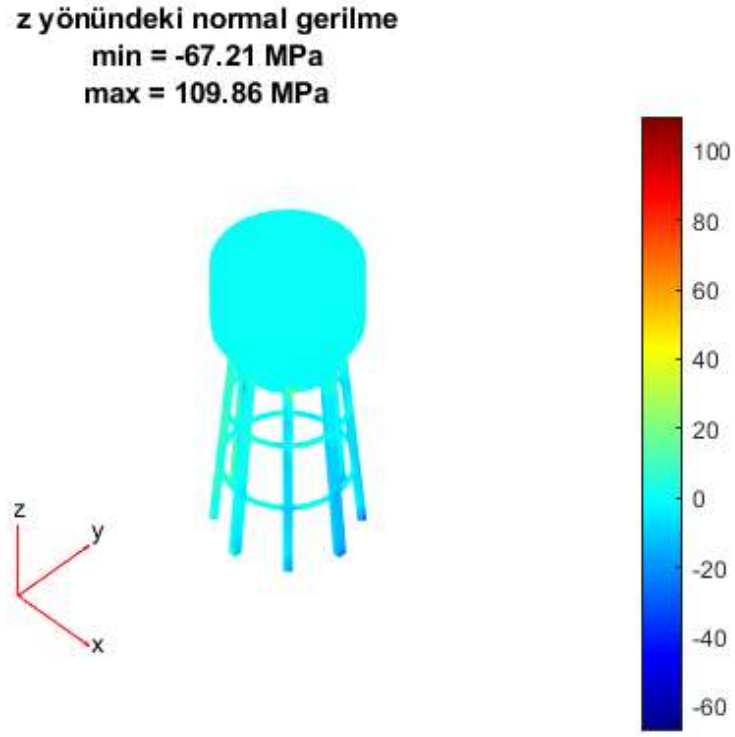
Şekil 6.232. ***Model-7'***de yz yönündeki kayma gerilmesi



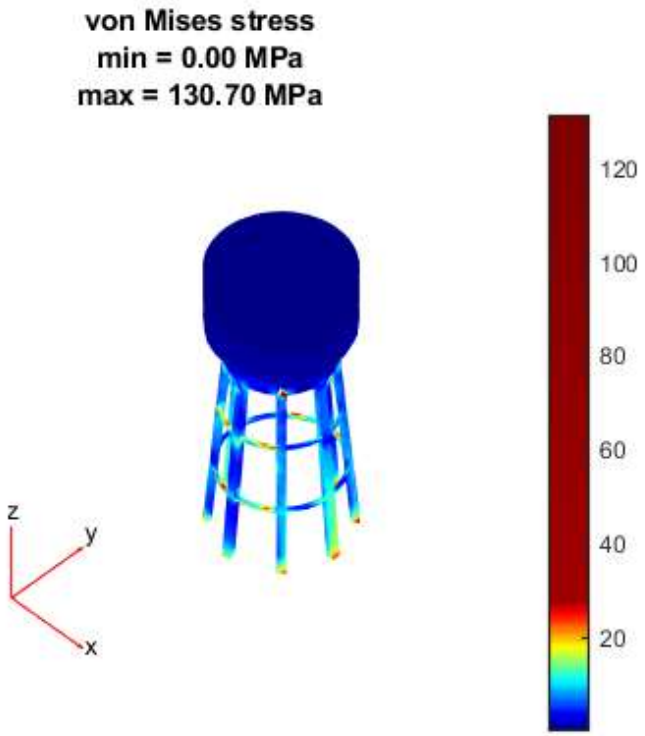
Şekil 6.233. ***Model-7'***de zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.234. ***Model-7'***de zy yönündeki kayma gerilmesi

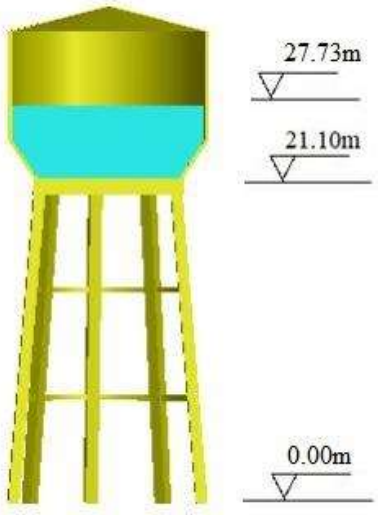


Şekil 6.235. ***Model-7'***de z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.236. ***Model-7'***de Von Mises gerilmesi

6.2.4.8. Model-8: Ayaklı Su Deposunun Yarım Dolu (%50) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için DPH Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizin Gerçekleştirildiği Model



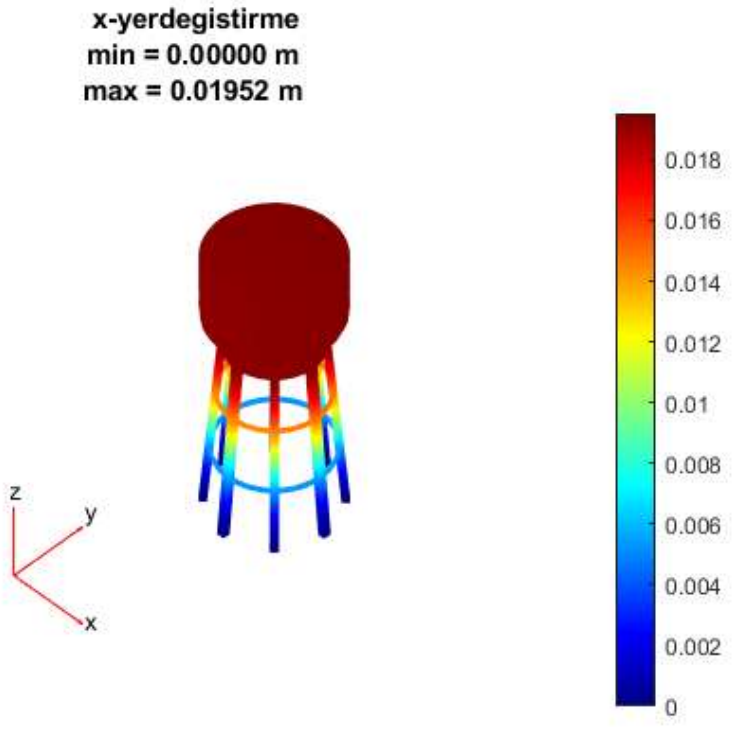
Şekil 6.237. Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu (%50) durumu

Betonarme ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumda olduğu ***Model-8*** Şekil 6.237'de görülmektedir.

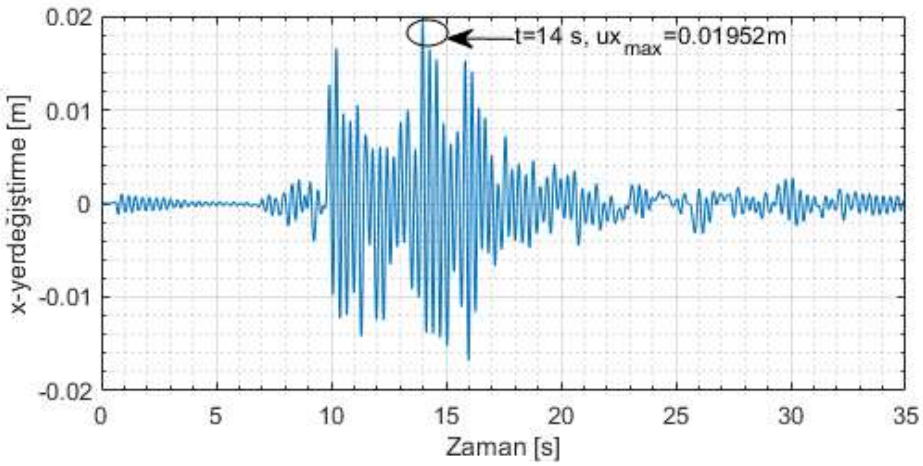
- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) durumunda suyun doğrusal olmayan davranışını modellemede kullanılan DPH yaklaşımı kullanılmıştır.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun yarım dolu(%50) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analiz için histeresis modellerden Bouc-Wen modeli kullanılmıştır.
- **Sönüm türü:** Eşdeğer viskoz sönüm kullanılmıştır.

Model-8'de ***Model-7***'den farklı olarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir.

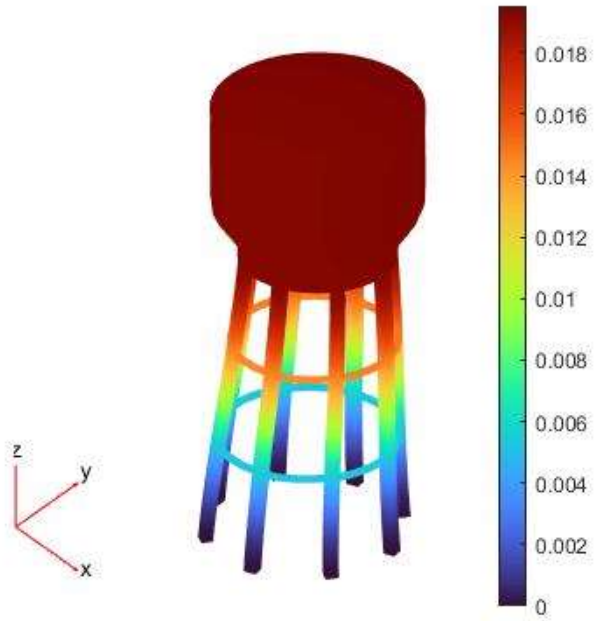
Model-8 analiz sonuçları



Şekil 6.238. ***Model-8'***de x yönündeki yer değiştirme



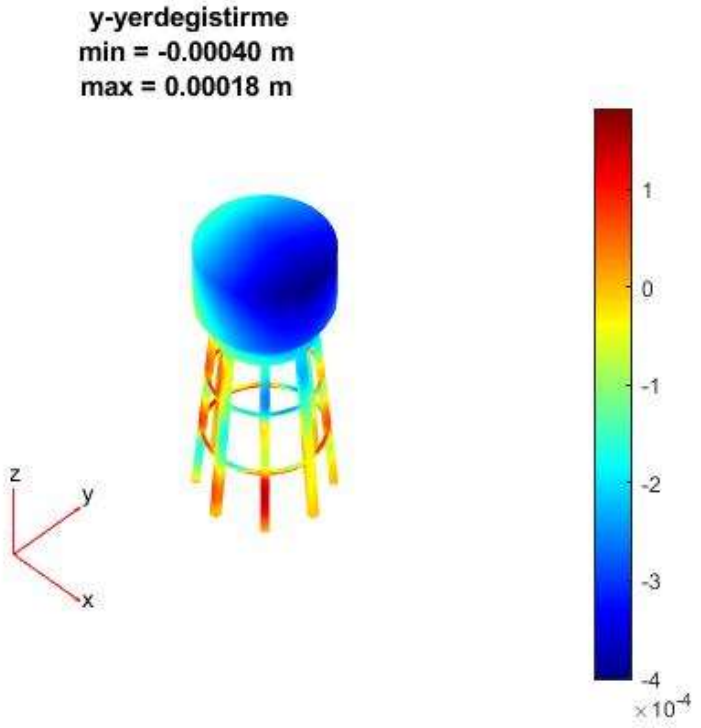
Şekil 6.239. ***Model-8'***de x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi



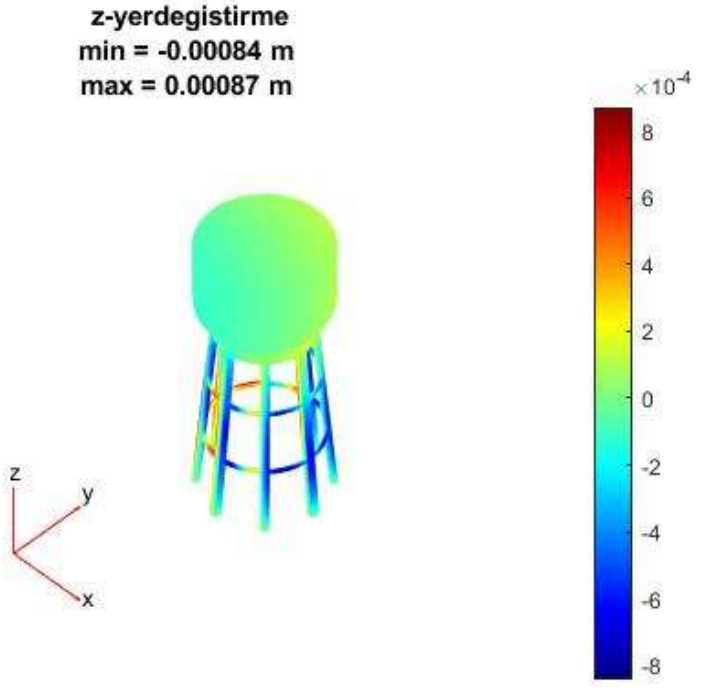
Şekil 6.240. ***Model-8'***de x yönündeki yer değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-8'e ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-8*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.238'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.239'da verilmektedir. Şekil 6.240'da t=14'.ncü saniyede x yönünde 0.01952m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.

Model-8 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.241 ve 6.242'de verilmektedir.

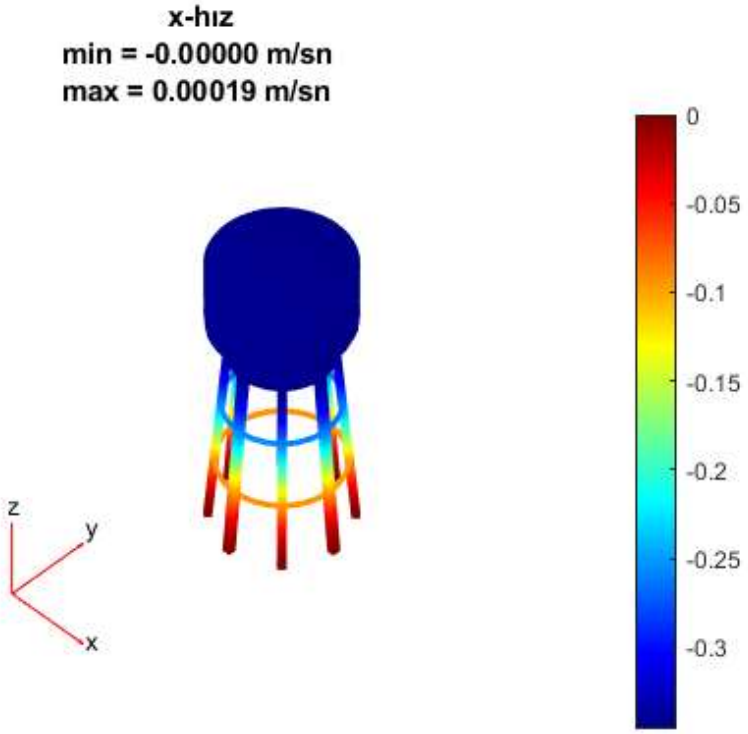


Şekil 6.241. ***Model-8'***de y yönündeki yer değiştirme

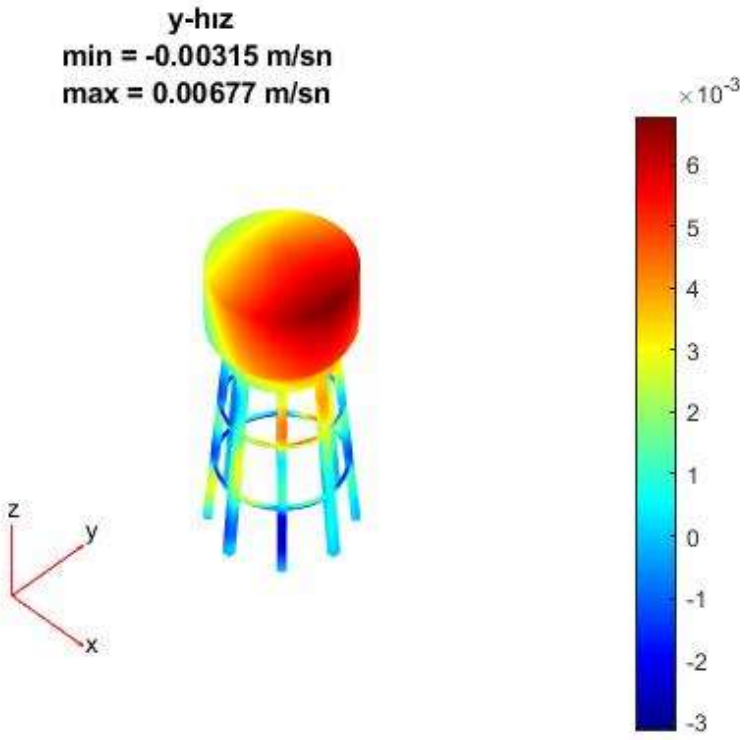


Şekil 6.242. ***Model-8'***de z yönündeki yer değiştirme.

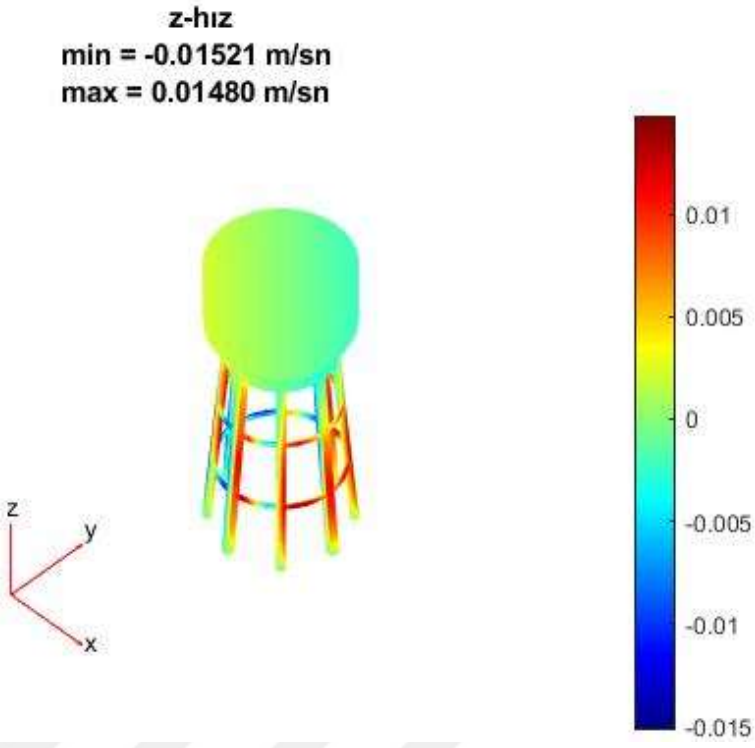
Model-8 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.243 - 6.245'de verilmektedir.



Şekil 6.243. ***Model-8'***de x yönündeki hız

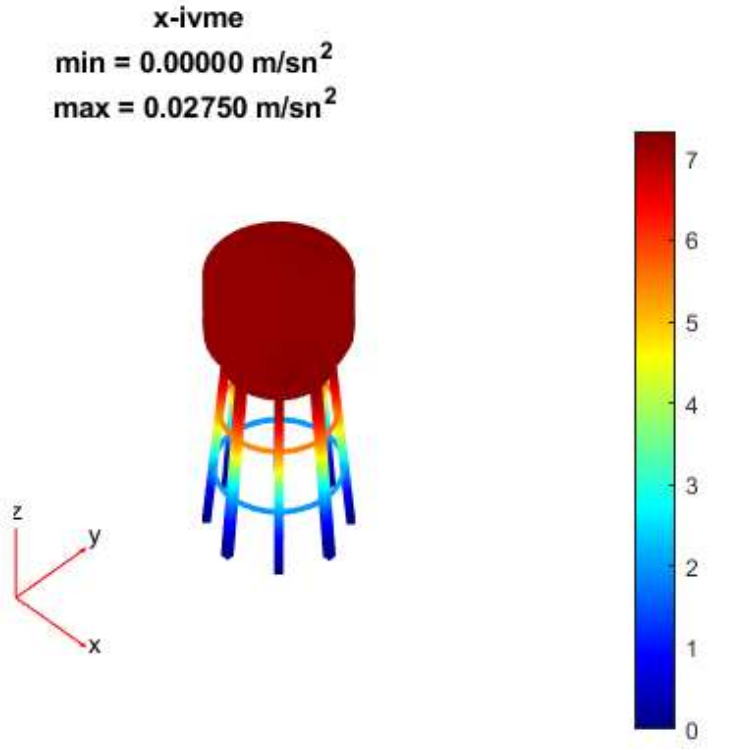


Şekil 6.244. ***Model-8'***de y yönündeki hız

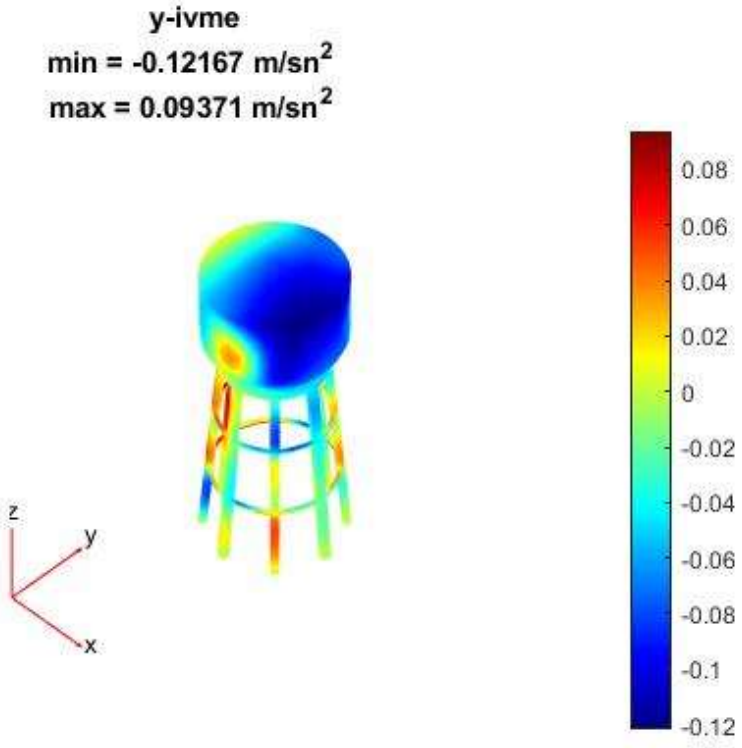


Şekil 6.245. ***Model-8'***de z yönündeki hız

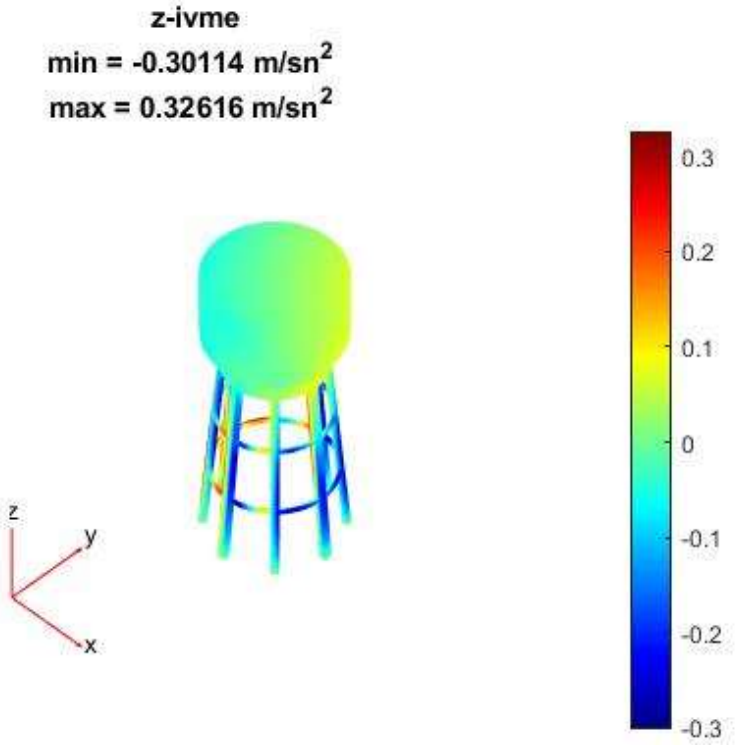
Model-8 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.246 - 6.248'de verilmektedir.



Şekil 6.246. ***Model-8'***de x yönündeki ivme



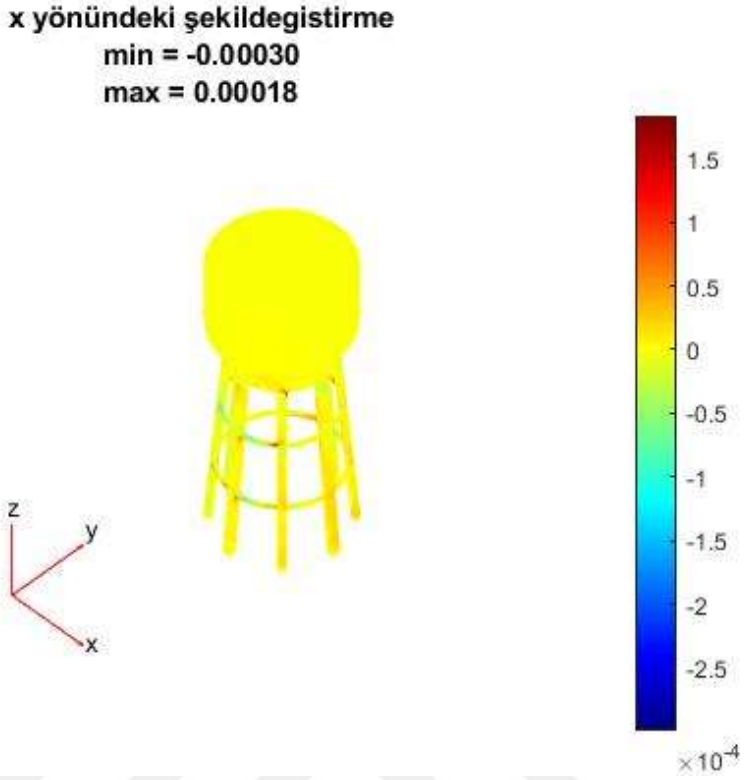
Şekil 6.247. ***Model-8'***de y yönündeki ivme



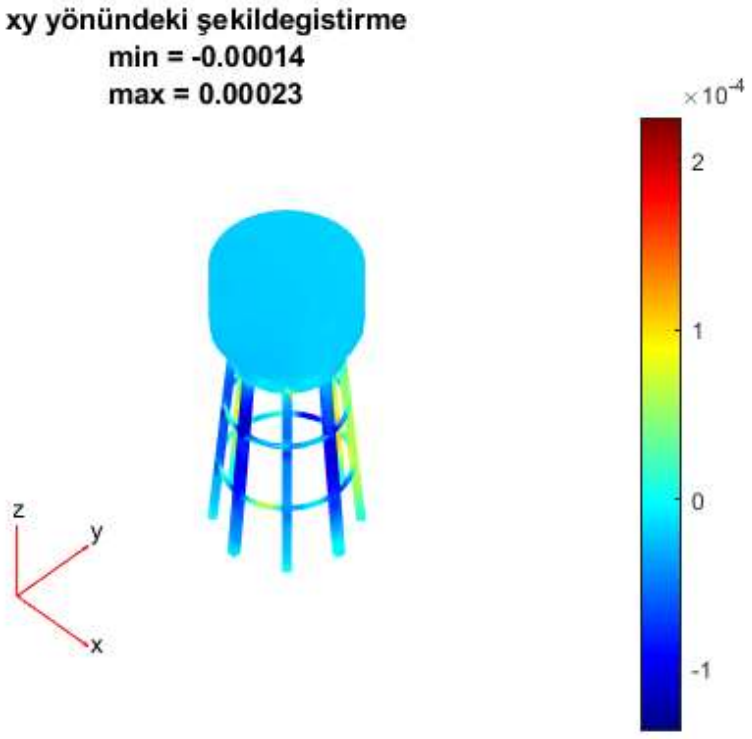
Şekil 6.248. ***Model-8'***de z yönündeki ivme

Model-8 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin

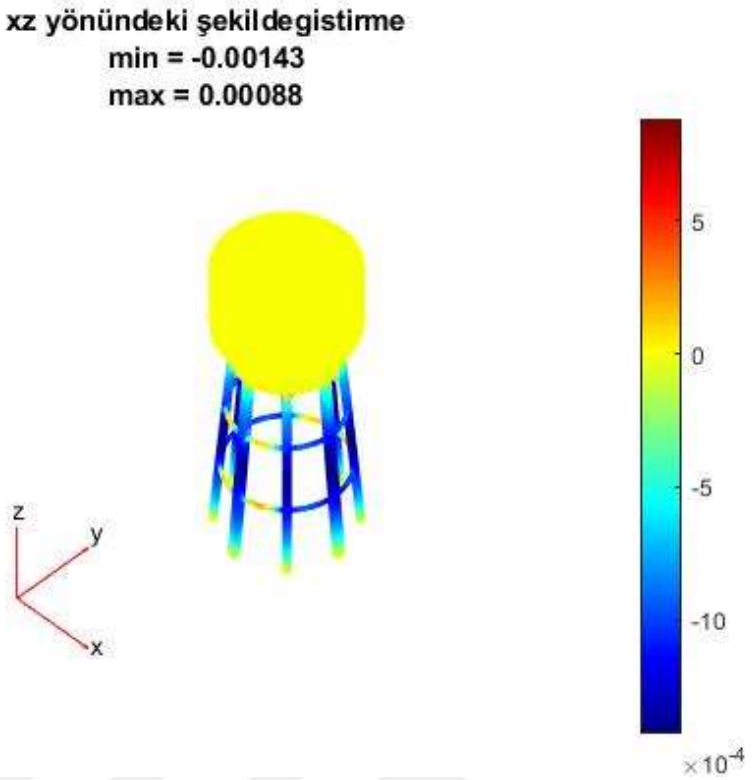
deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.249 - 6.257'de verilmektedir.



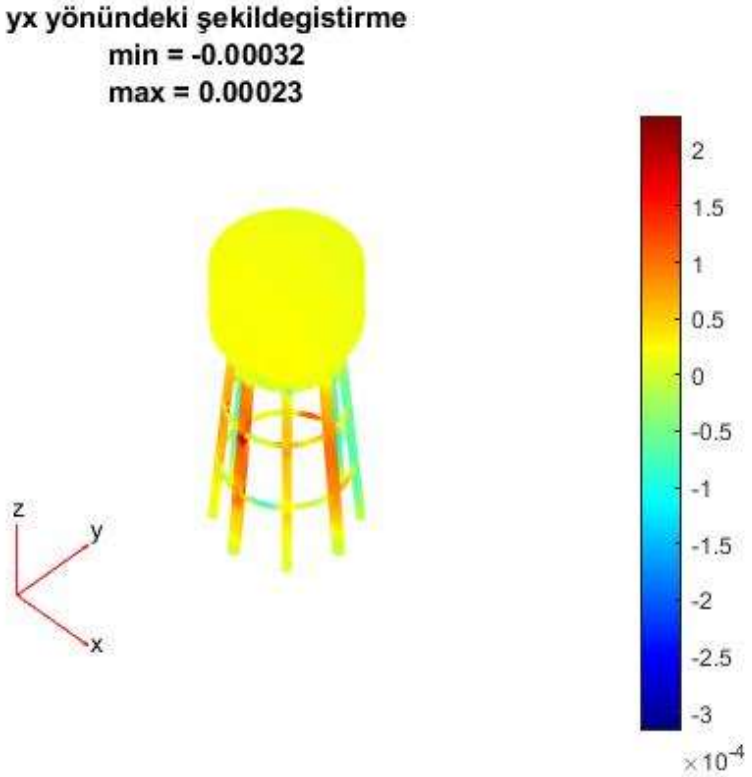
Şekil 6.249. ***Model-8'***de x yönündeki şekil değiştirme



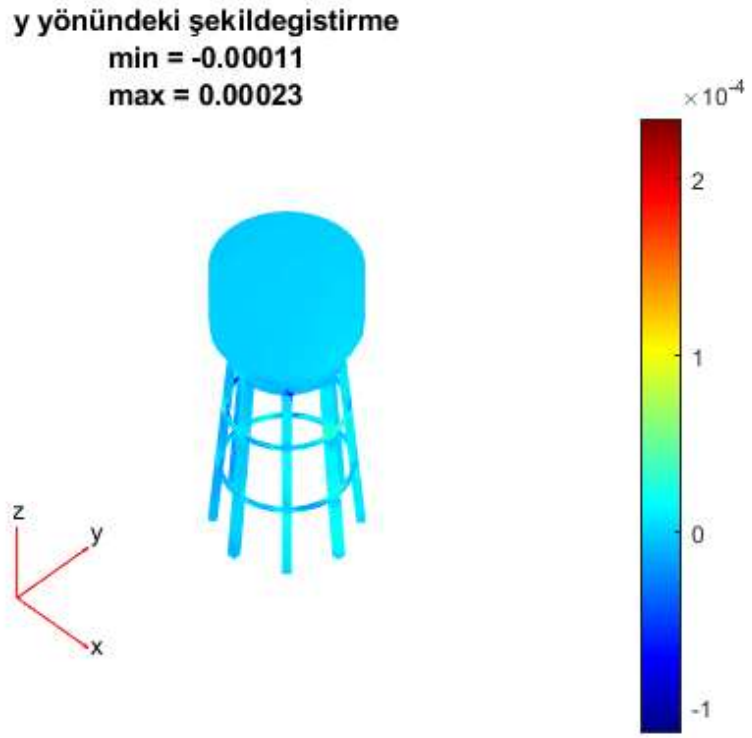
Şekil 6.250. ***Model-8'***de xy yönündeki şekil değiştirme



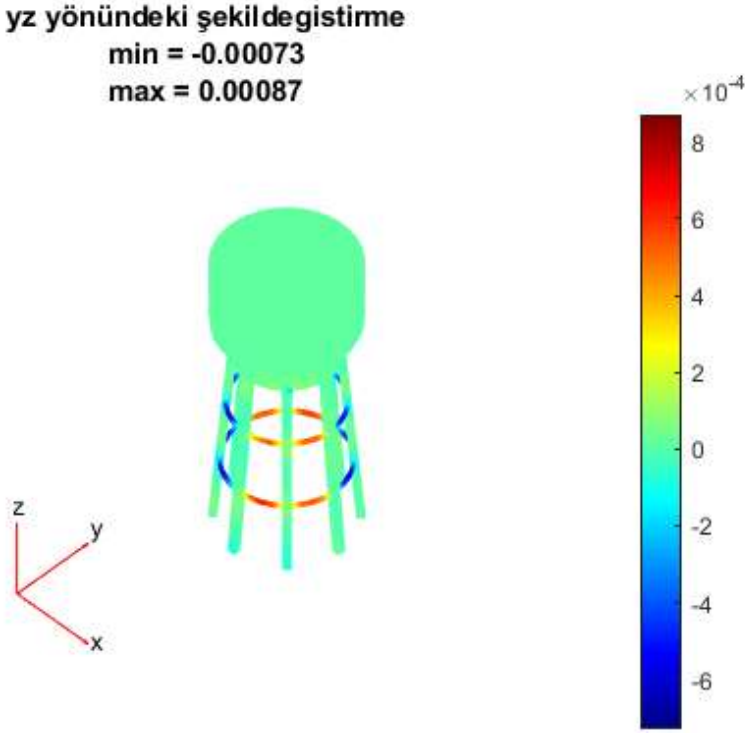
Şekil 6.251. ***Model-8'***de xz yönündeki şekil değiştirme



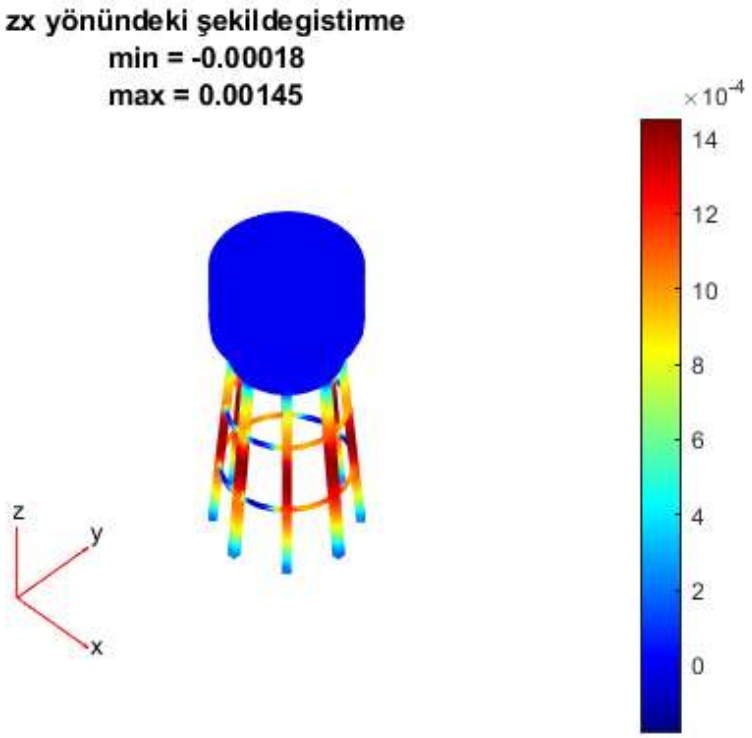
Şekil 6.252. ***Model-8'***de yx yönündeki şekil değiştirme



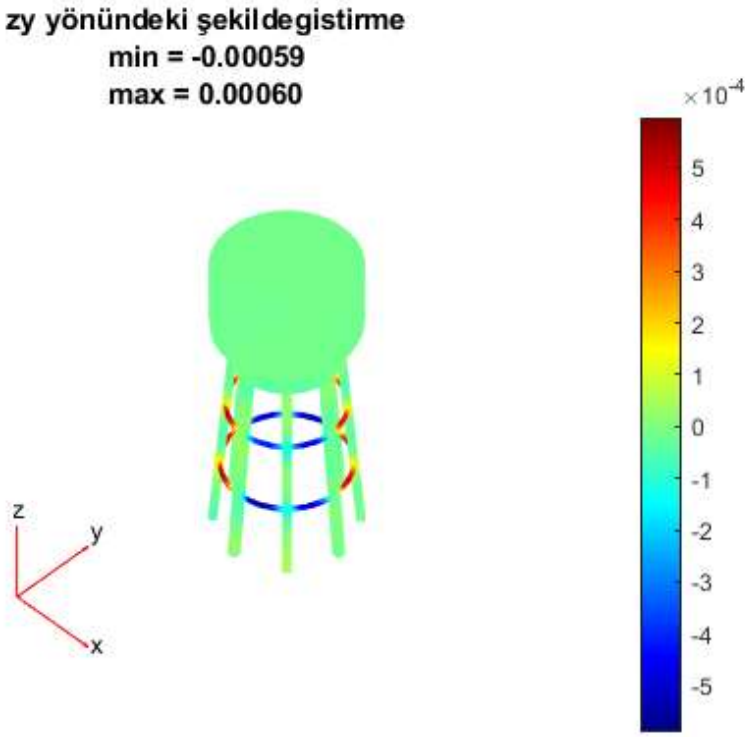
Şekil 6.253. ***Model-8'***de y yönündeki şekil değiştirme



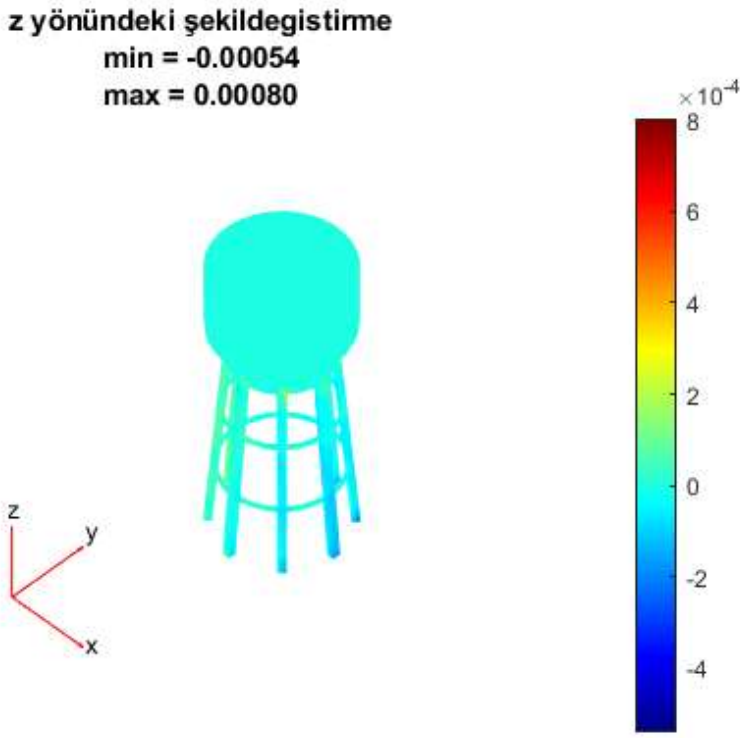
Şekil 6.254. ***Model-8'***de yz yönündeki şekil değiştirme



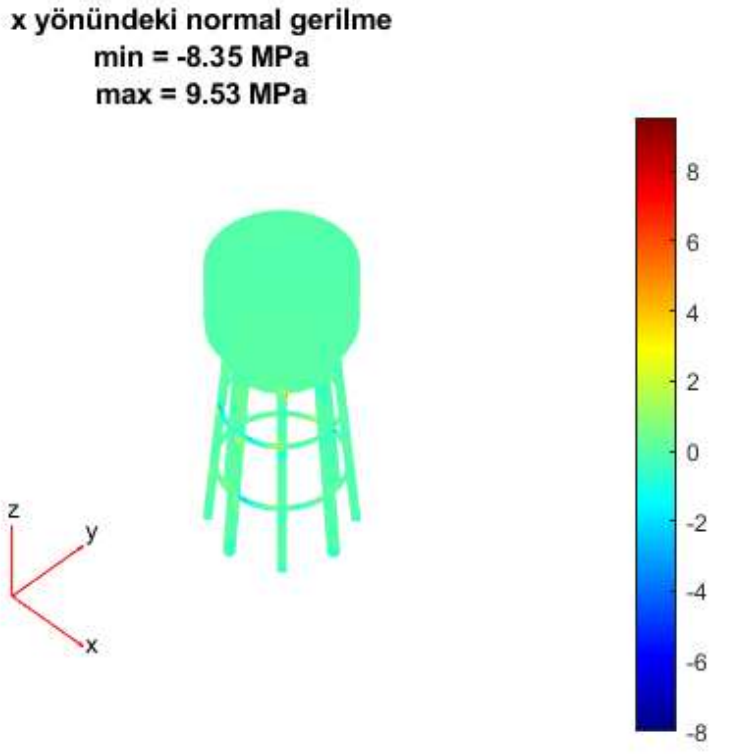
Şekil 6.255. ***Model-8'***de zx yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.256. ***Model-8'***de zy yönündeki şekil değiştirme



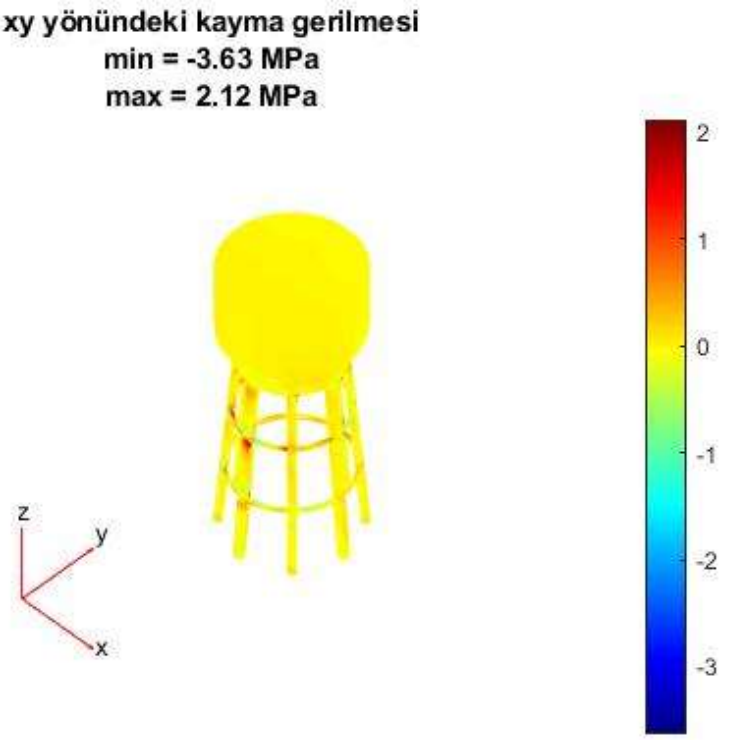
Şekil 6.257. ***Model-8'***de z yönündeki şekil değiştirme



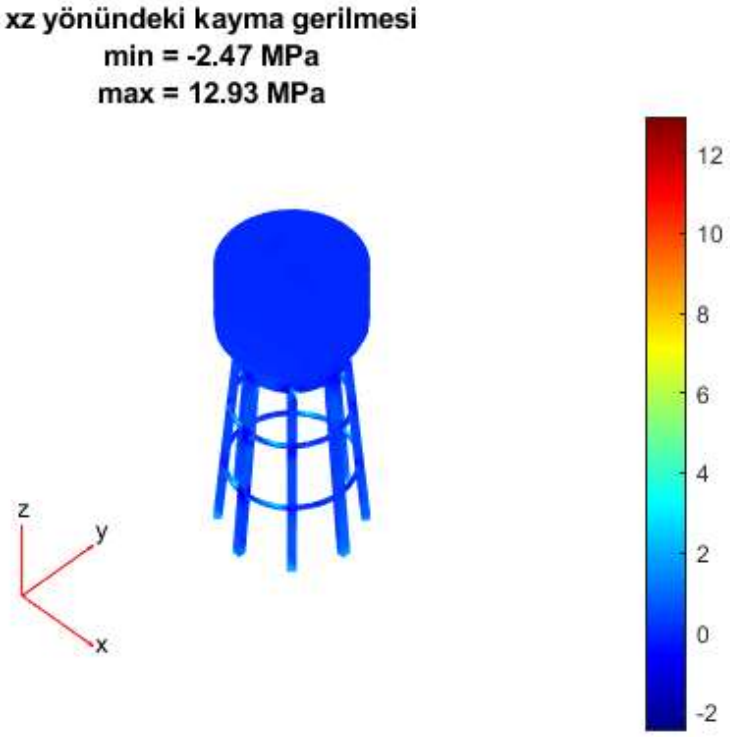
Şekil 6.258. ***Model-8'***de x yönündeki normal gerilme

Model-8 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin

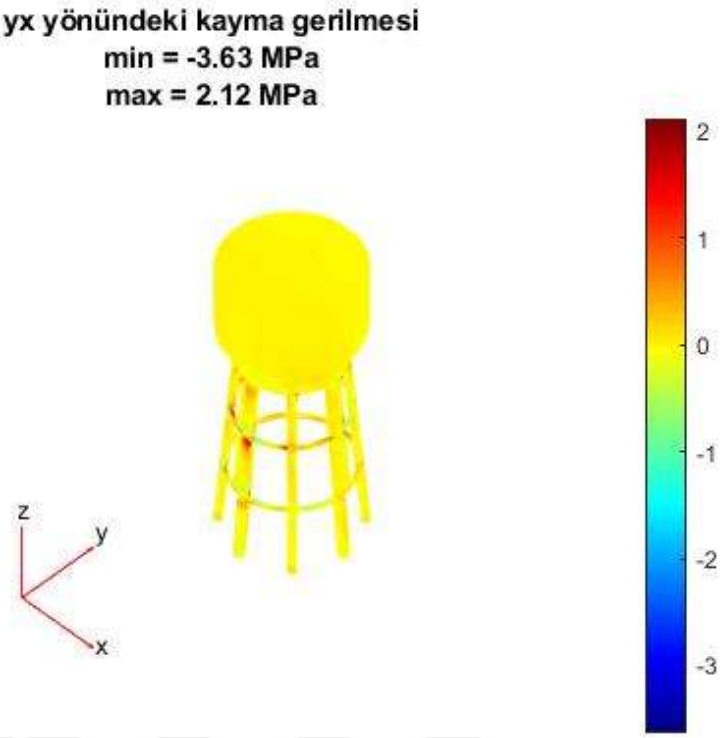
deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.258 - 6.267'de verilmektedir.



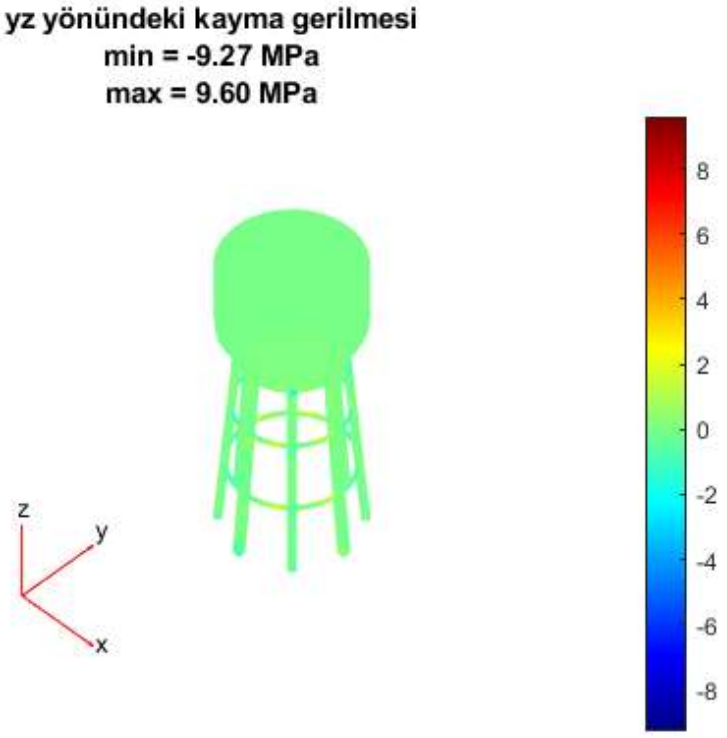
Şekil 6.259. ***Model-8'***de xy yönündeki kayma gerilmesi



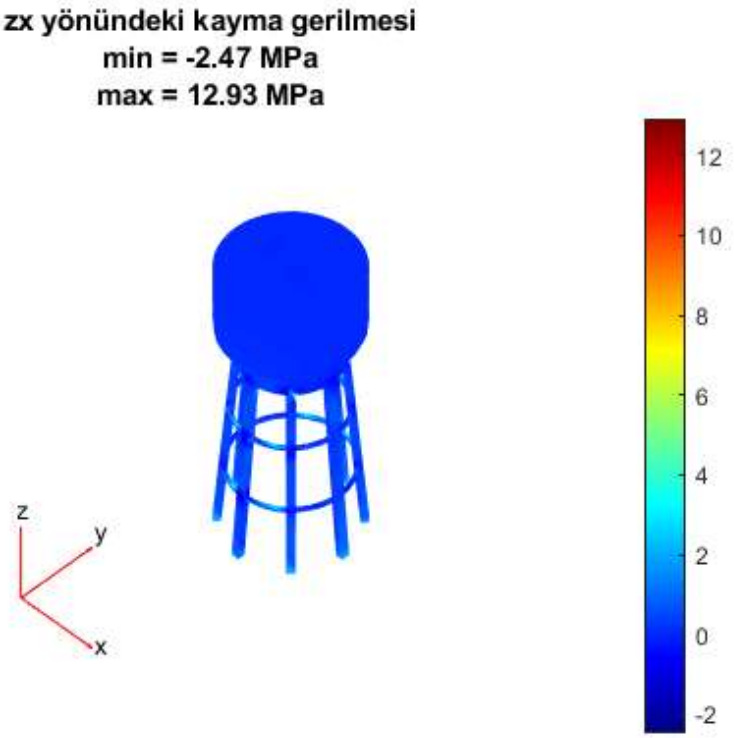
Şekil 6.260. ***Model-8'***de xz yönündeki kayma gerilmesi



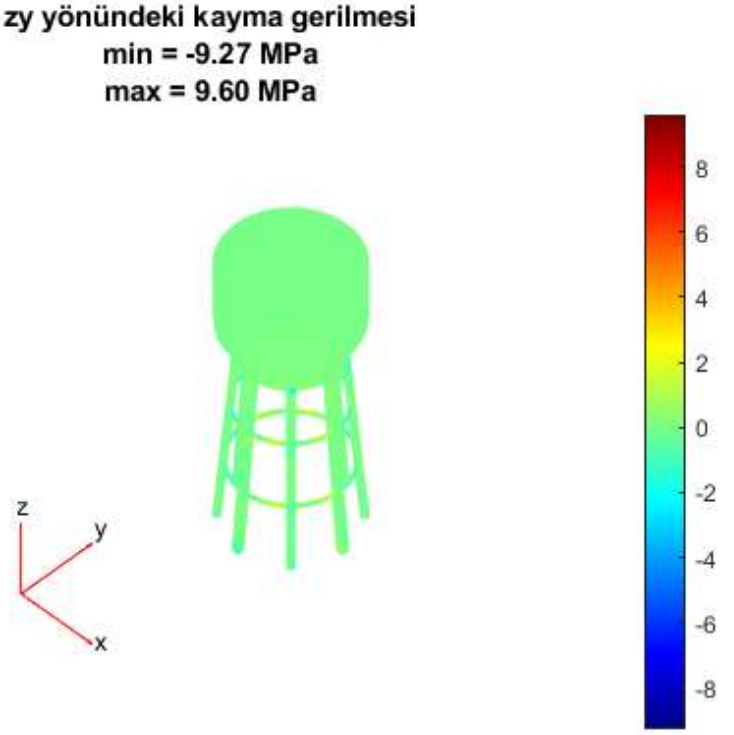
Şekil 6.261. ***Model-8'***de yx yönündeki kayma gerilmesi



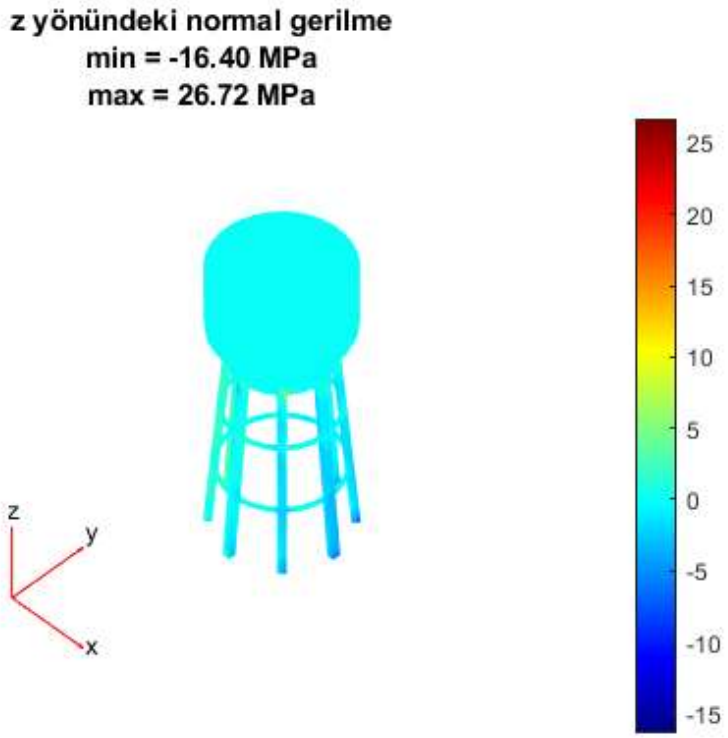
Şekil 6.262. ***Model-8'***de yz yönündeki kayma gerilmesi



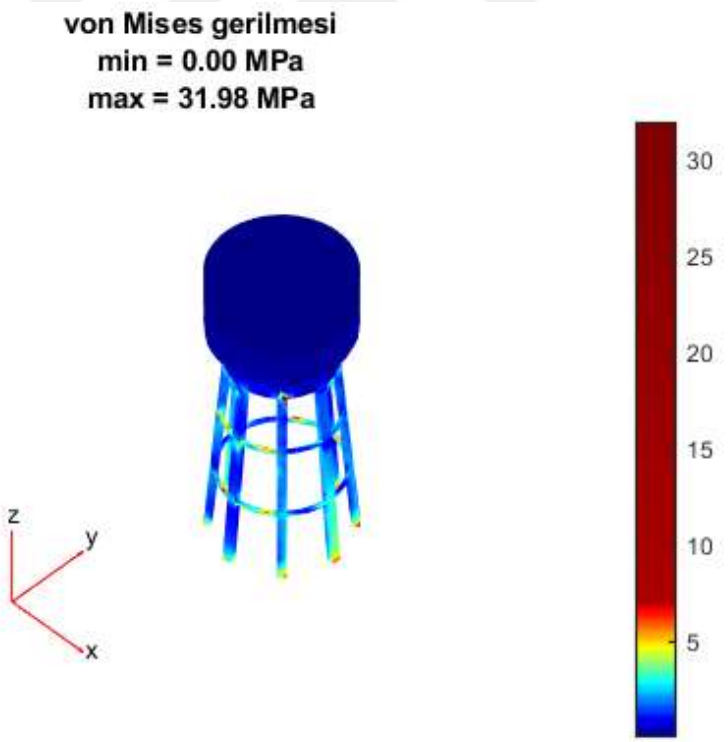
Şekil 6.263. ***Model-8'***de zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.264. ***Model-8'***de zy yönündeki kayma gerilmesi

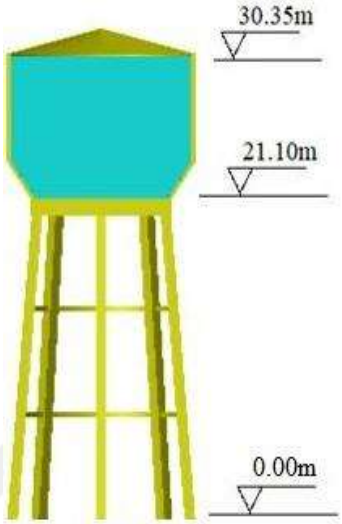


Şekil 6.265. ***Model-8'***de z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.266. ***Model-8'***de Von Mises gerilmesi

6.2.4.9. Model-9: Ayaklı Su Deposunun Tam Dolu (%100) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için DPH Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizin Gerçekleştirildiği Model



Şekil 6.267. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu

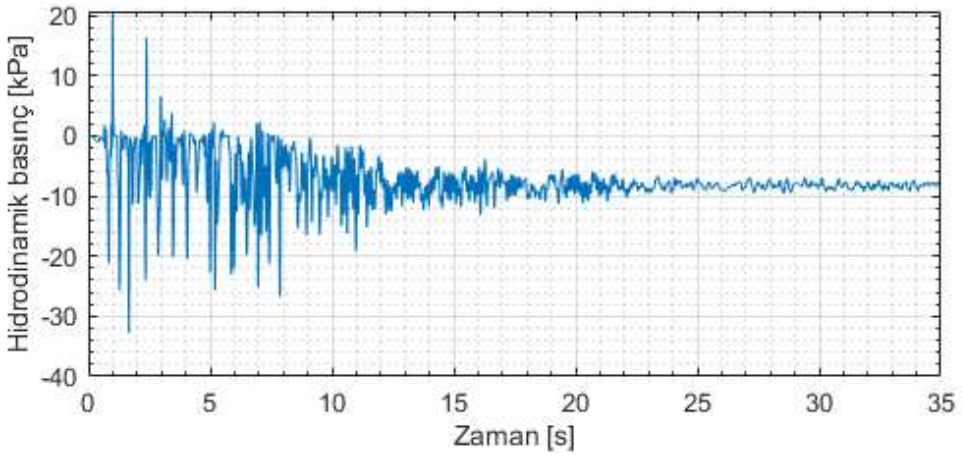
Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumda olduğu ***Model-9*** Şekil 6.267'de görülmektedir.

- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumunda suyun doğrusal olmayan davranışını modellemede kullanılan DPH yaklaşımı kullanılmıştır.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Sönüm türü:** Rayleigh sönüm kullanılmıştır.

Tablo 6.7. Tam dolu ayaklı su deposunun DPH Yöntemi parametreleri

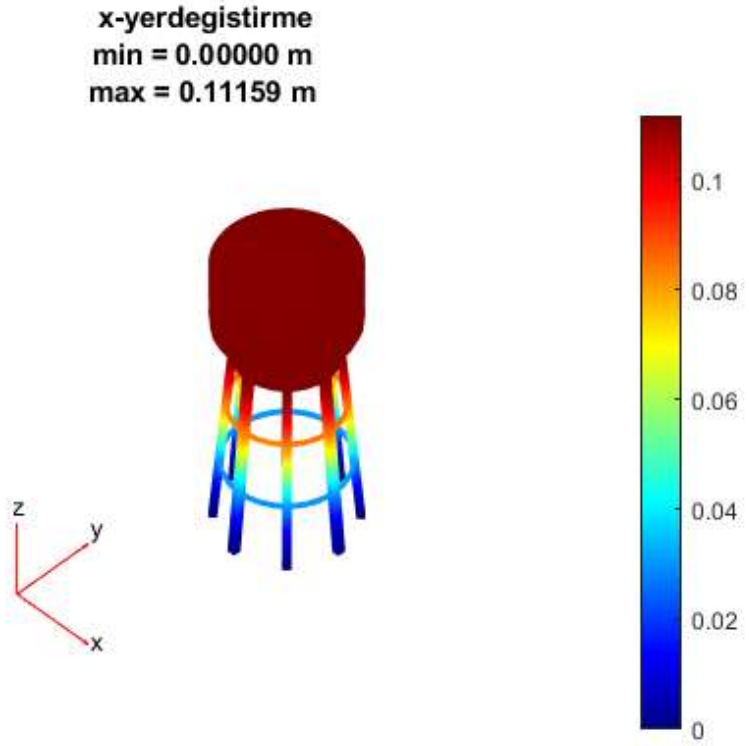
Özellik	Parametre
Versiyon	DualSPHysics v4.056
Boyut	3D
Kernel fonksiyonu çeşidi	Wendland
Zaman adımı	Verlet
Yoğunluk filtresi	Shepard filter
Viskozite davranışı	Yapay viskozite(α=0.01)
Sınır şartları	Dinamik
Parçacıklar arasındaki mesafe (dp)	0.20m
İnterpolasyon uzunluğu	1
Akışkan parçacık sayısı	95333
Suyun yoğunluğu	1000kg/m^3
CFL katsayısı	0.20

Tablo 6.7 betonarme ayaklı su deposunun %100 dolu olması durumu için gereken analiz parametrelerini göstermektedir. Şekil 6.267 haznenin %100 dolu seviyedeki durumunu göstermektedir. Bu seviyede su serbest yüzeyi kotu 30.35m, su yüksekliği ise 9.25m ve su hacmi 1000m^3'dür. Şekil 6.268'de en büyük yer ivmesinin gerçekleştiği 9.87saniyede hidrodinamik basınç 9.29kPa'dır.

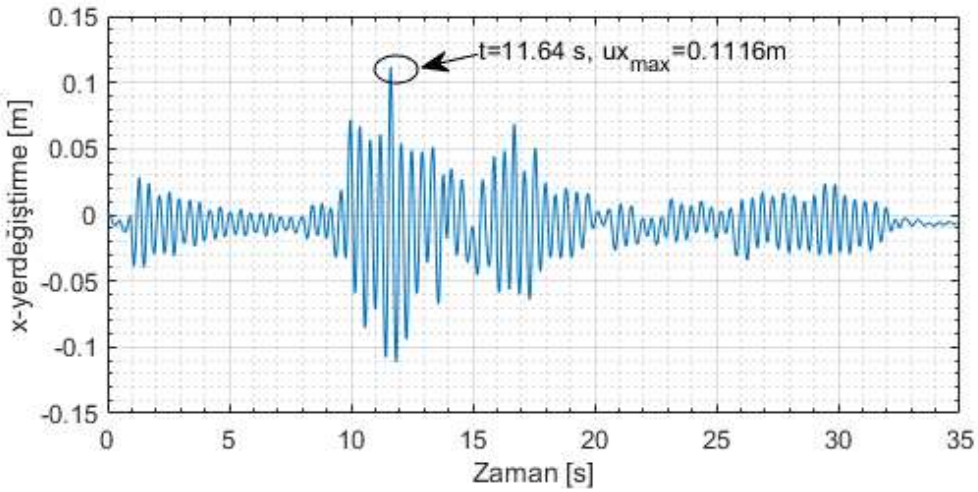


Şekil 6.268. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) olması durumundaki hidrodinamik basınçlar

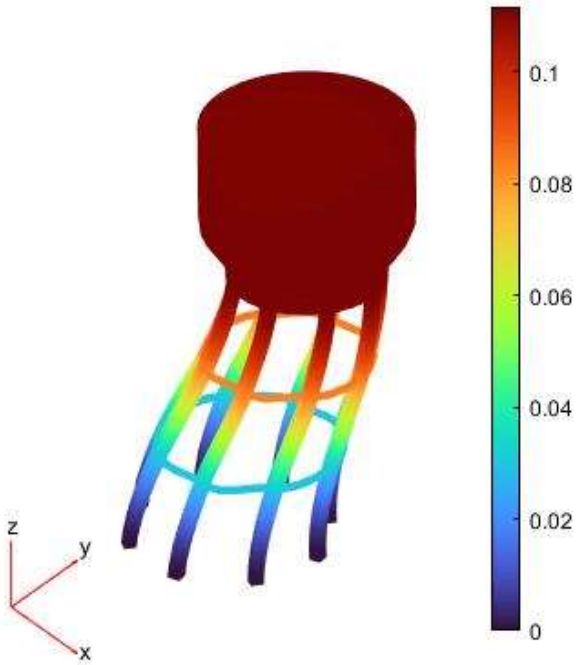
Model-9 analiz sonuçları



Şekil 6.269. ***Model-9'***da x yönündeki yer değiştirme



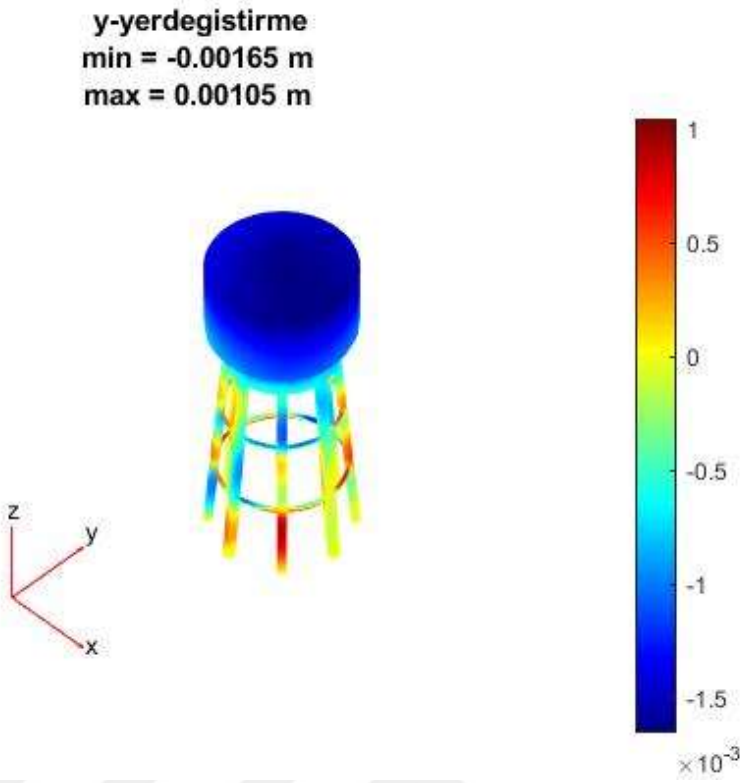
Şekil 6.270. ***Model-9'***da x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi



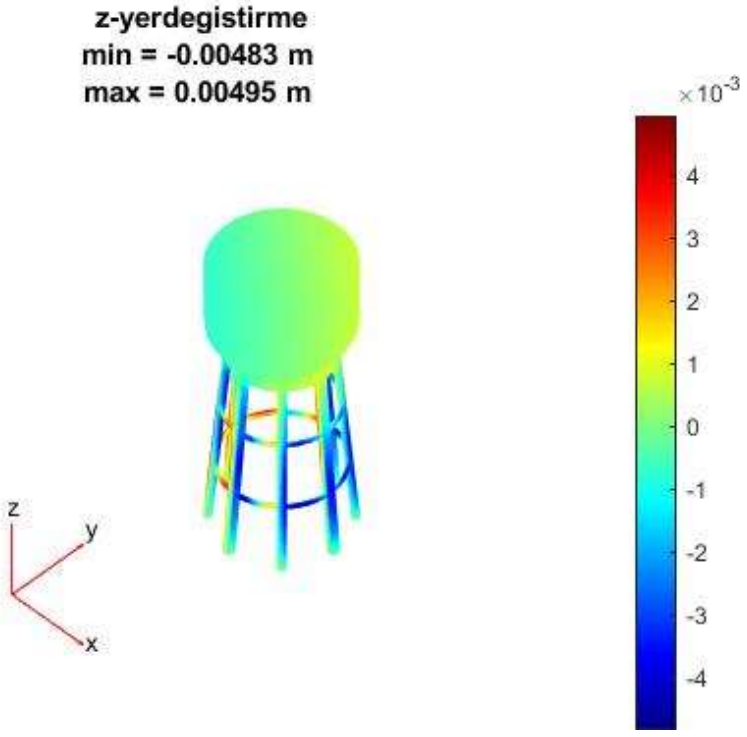
Şekil 6.271. ***Model-9'***da x yönünde şekil değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-9'a ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. ***Model-9*** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.269'da verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.270'de verilmektedir. Şekil 6.271'de t=11.64'.ncü saniyede x yönünde 0.1116m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.

Model-9 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.272 ve 6.273'de verilmektedir.

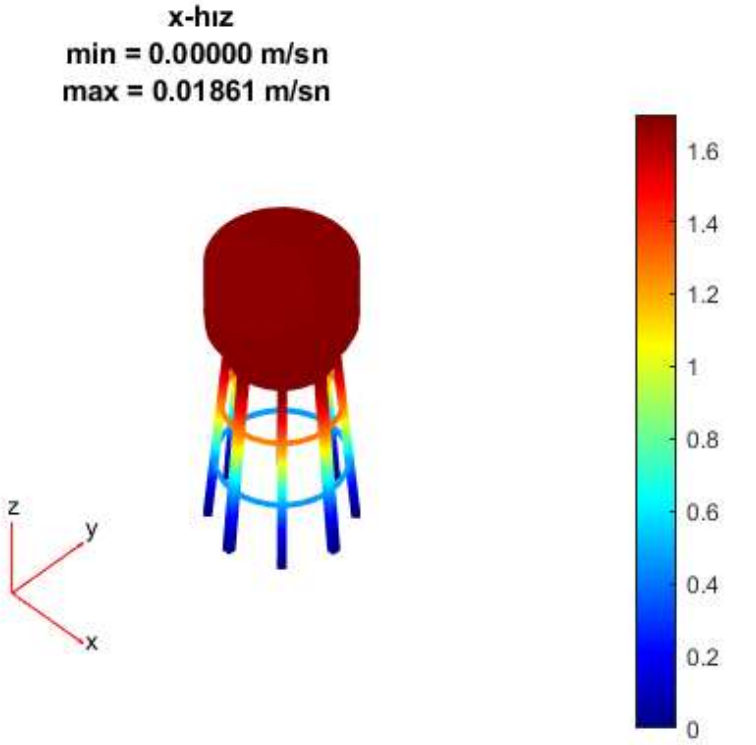


Şekil 6.272. ***Model-9'***da y yönündeki yer değiştirme

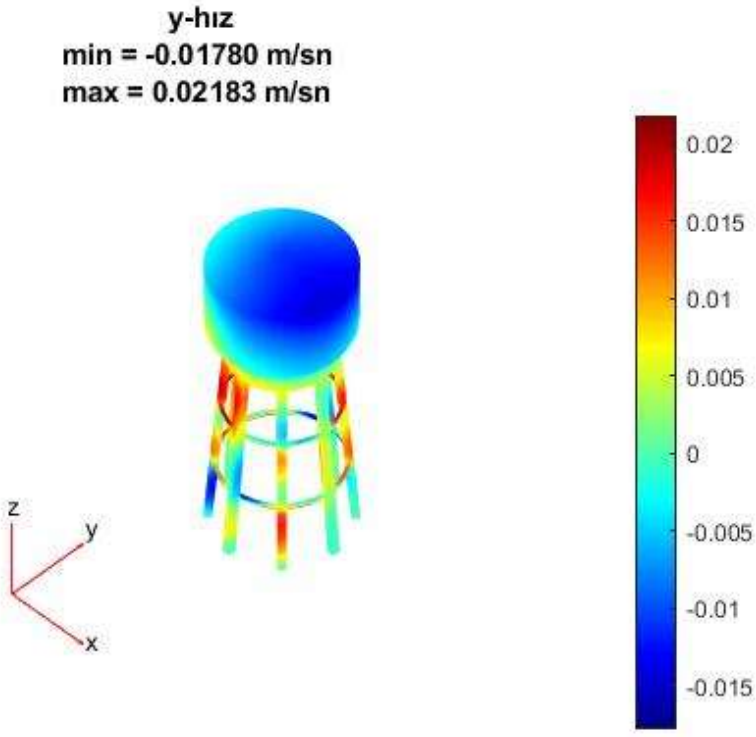


Şekil 6.273. ***Model-9'***da z yönündeki yer değiştirme

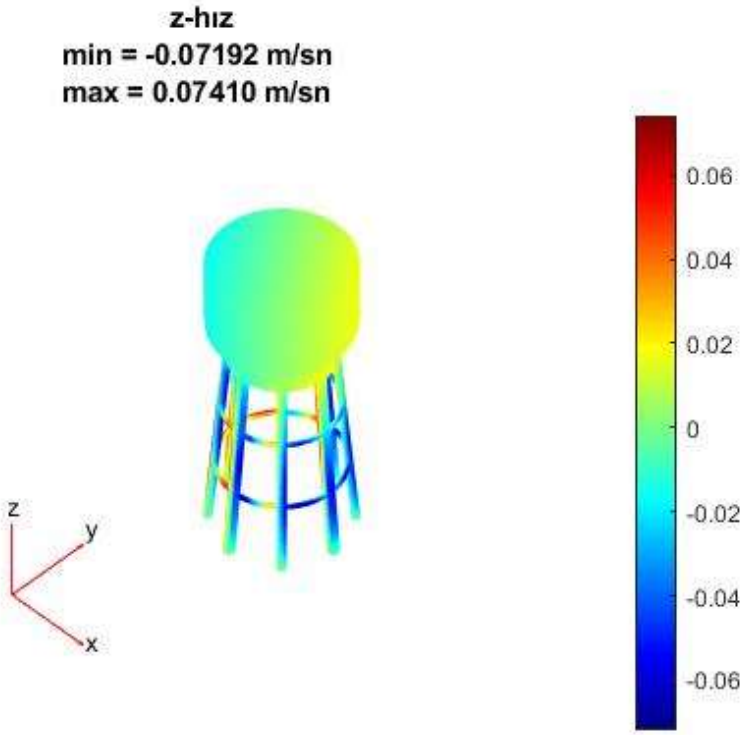
Model-9 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.274 - 6.276'de verilmektedir.



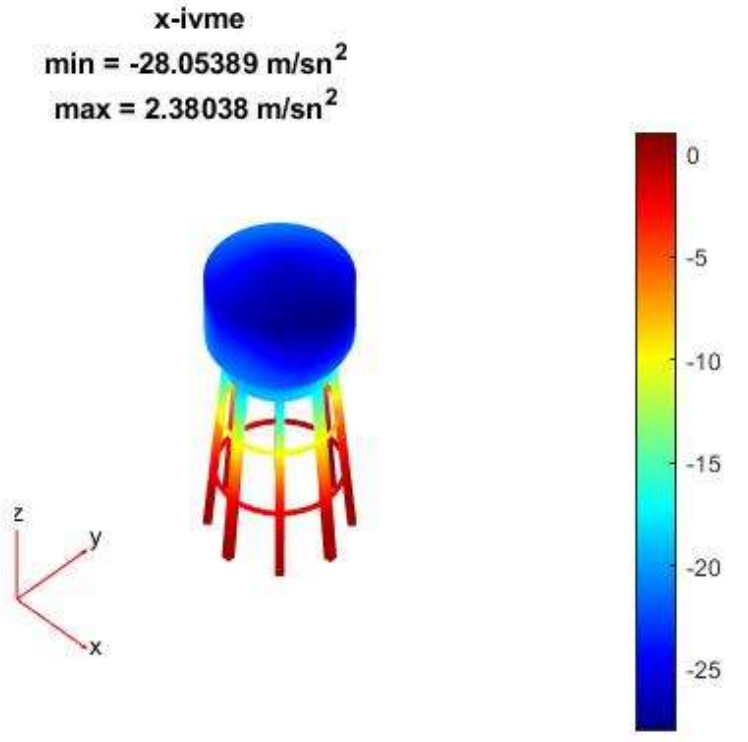
Şekil 6.274. ***Model-9'***da x yönündeki hız



Şekil 6.275. ***Model-9'***da y yönündeki hız

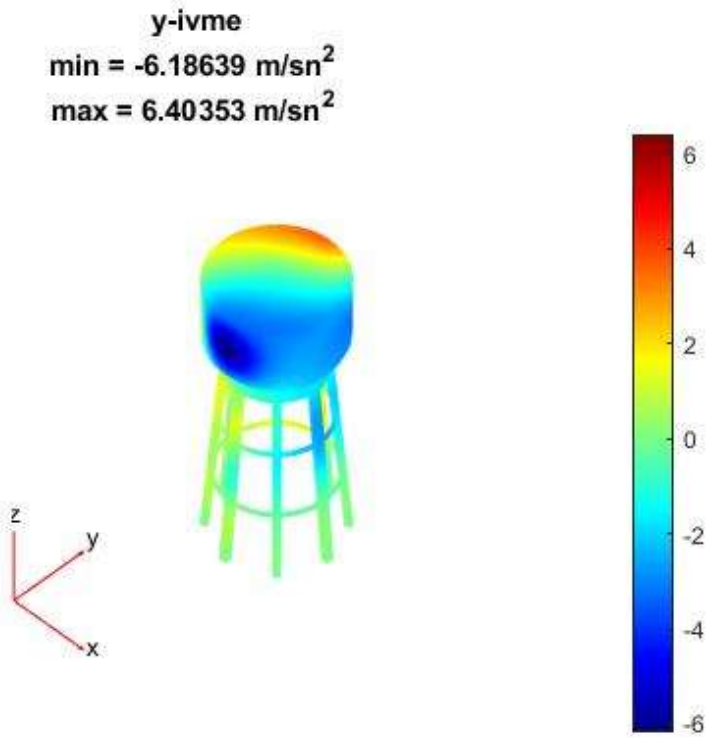


Şekil 6.276. ***Model-9'***da z yönündeki hız

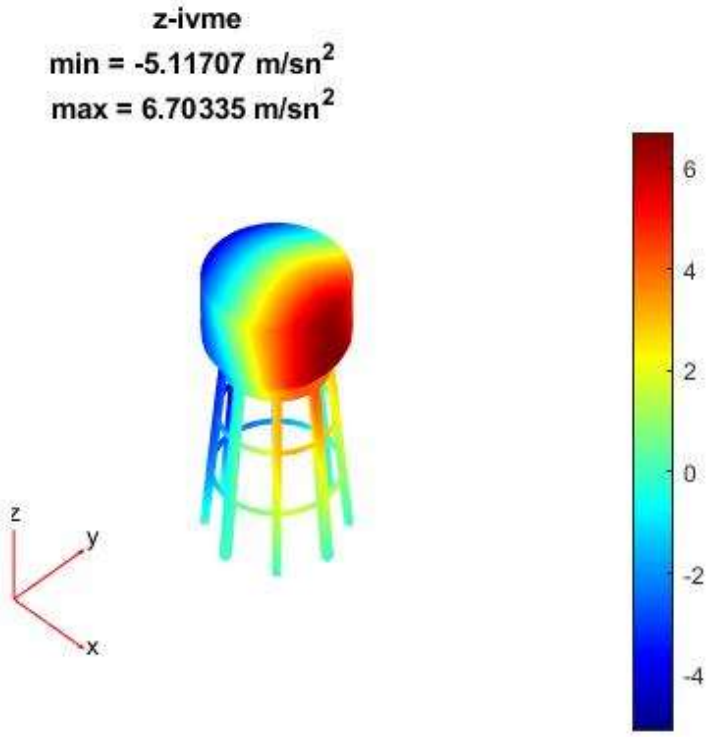


Şekil 6.277. ***Model-9'***da x yönündeki ivme

Model-9 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.277 - 6.279'da verilmektedir.

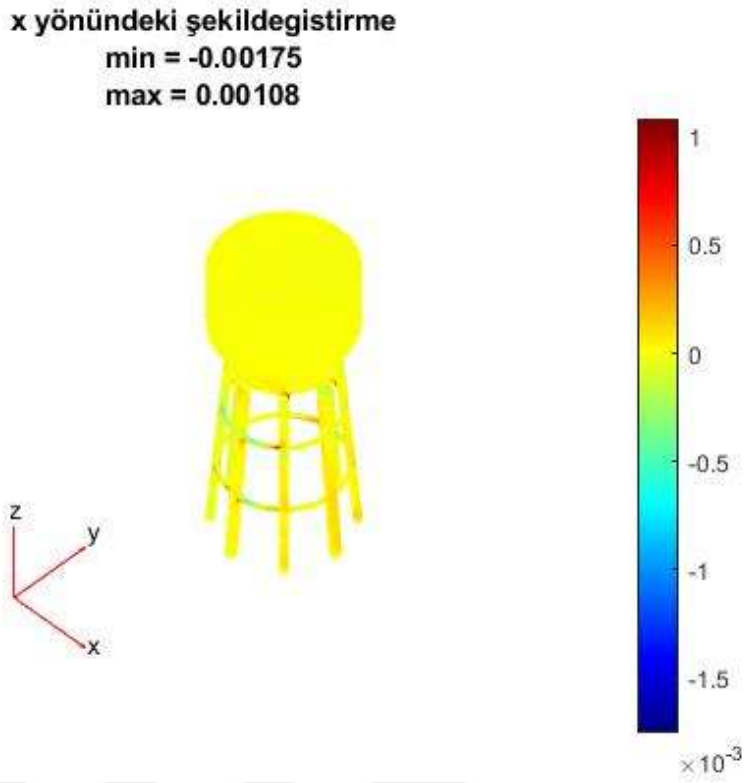


Şekil 6.278. ***Model-9'***da y yönündeki ivme

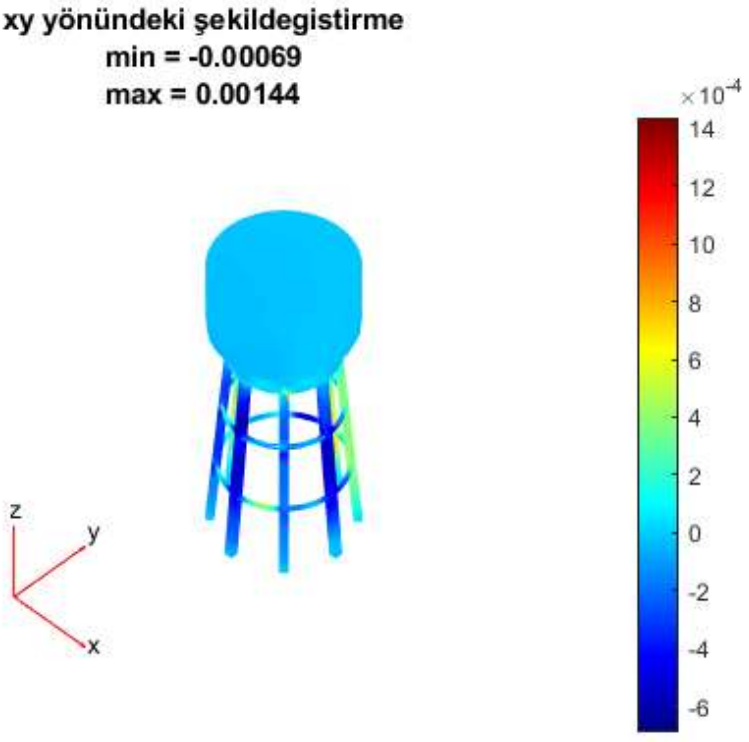


Şekil 6.279. ***Model-9'***da z yönündeki ivme

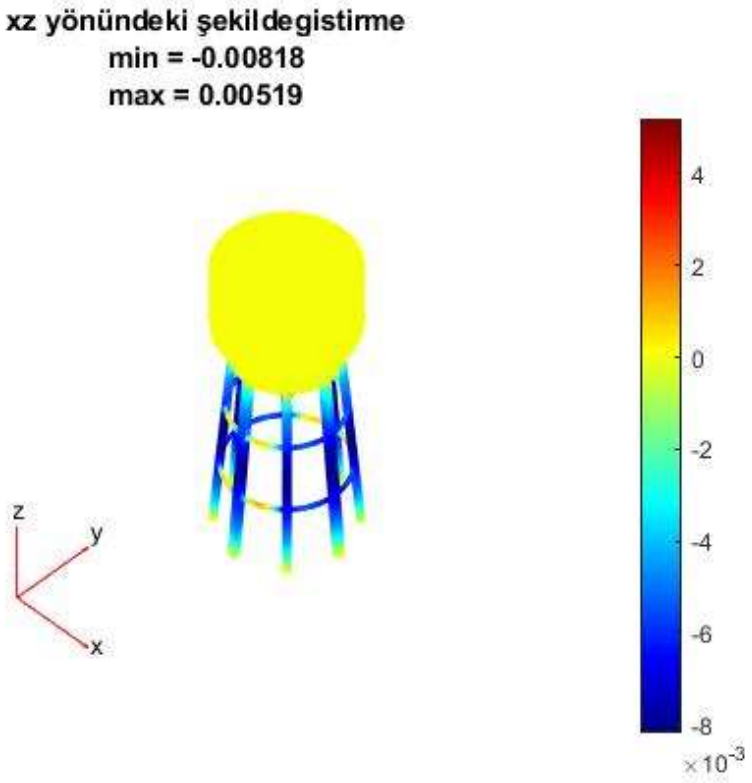
Model-9 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.280 - 6.288'de verilmektedir.



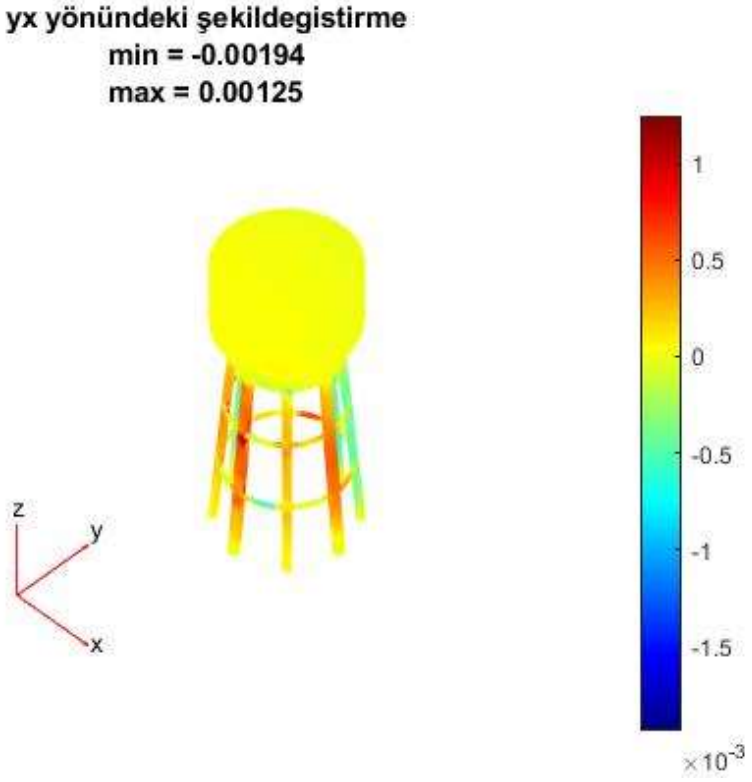
Şekil 6.280. ***Model-9'***da x yönündeki şekil değiştirme



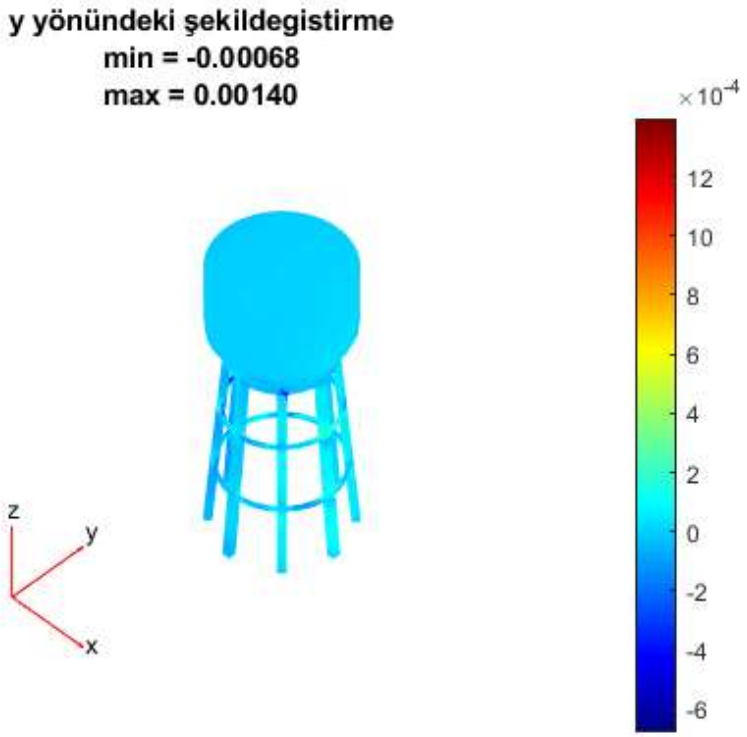
Şekil 6.281. ***Model-9'***da xy yönündeki şekil değiştirme



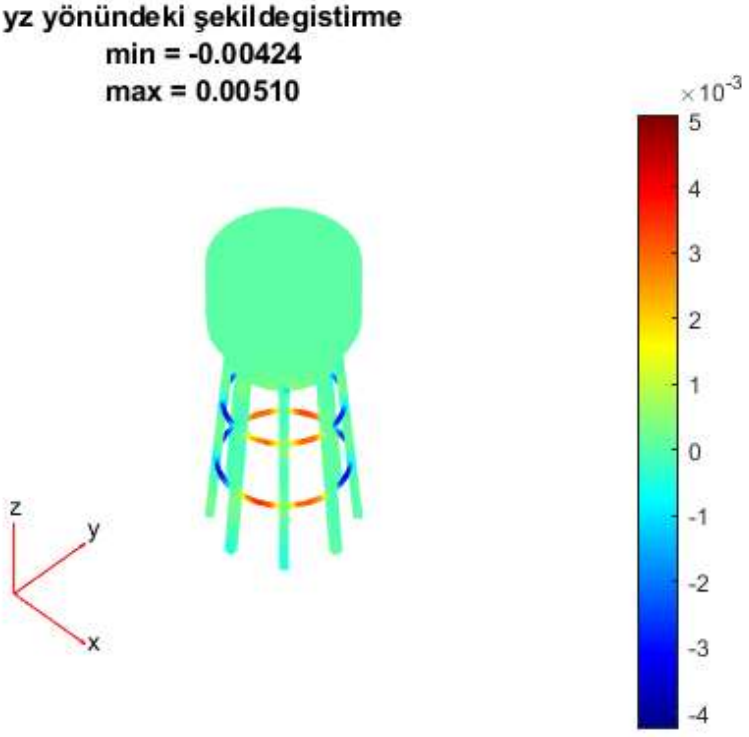
Şekil 6.282. ***Model-9'***da xz yönündeki şekil değiştirme



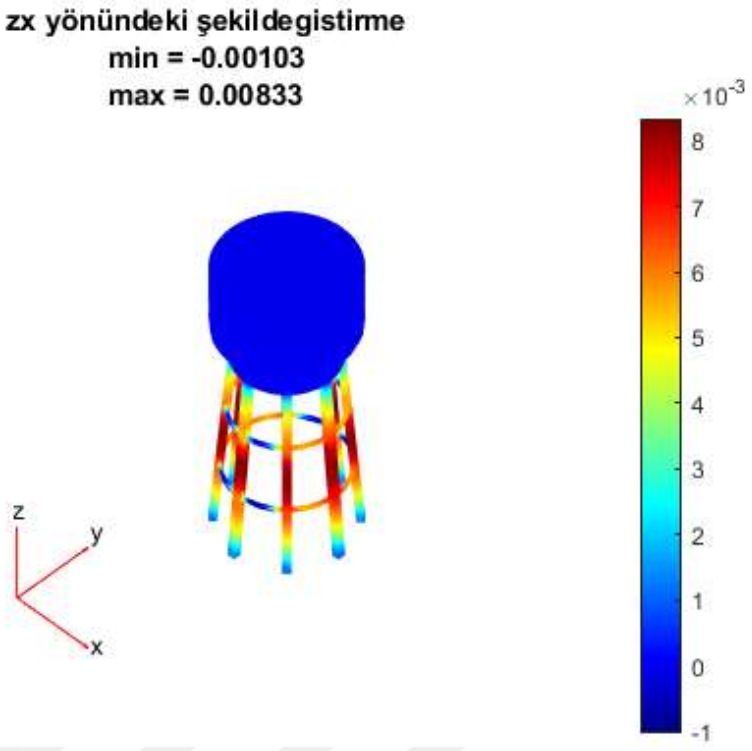
Şekil 6.283. ***Model-9'***da yx yönündeki şekil değiştirme



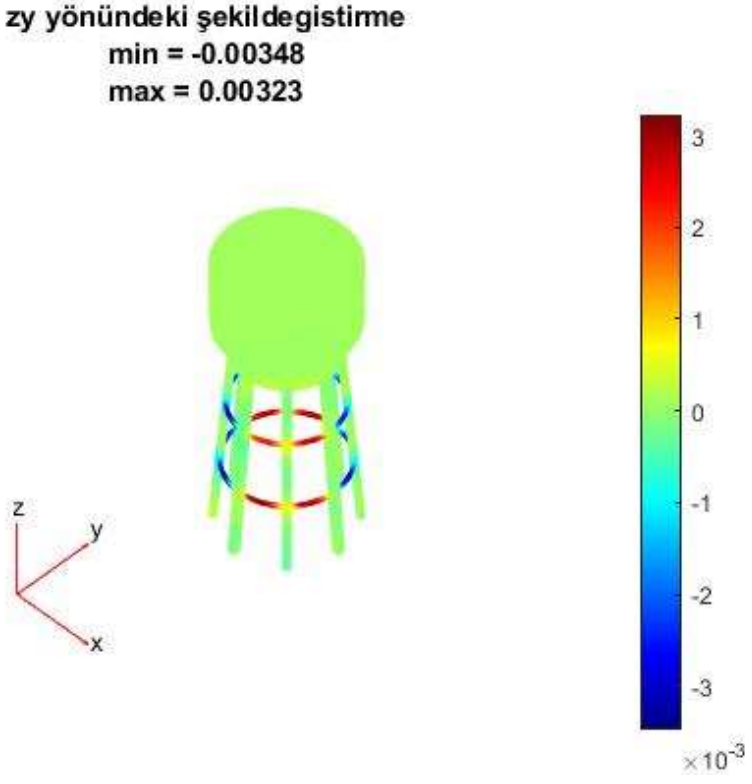
Şekil 6.284. ***Model-9'***da y yönündeki şekil değiştirme



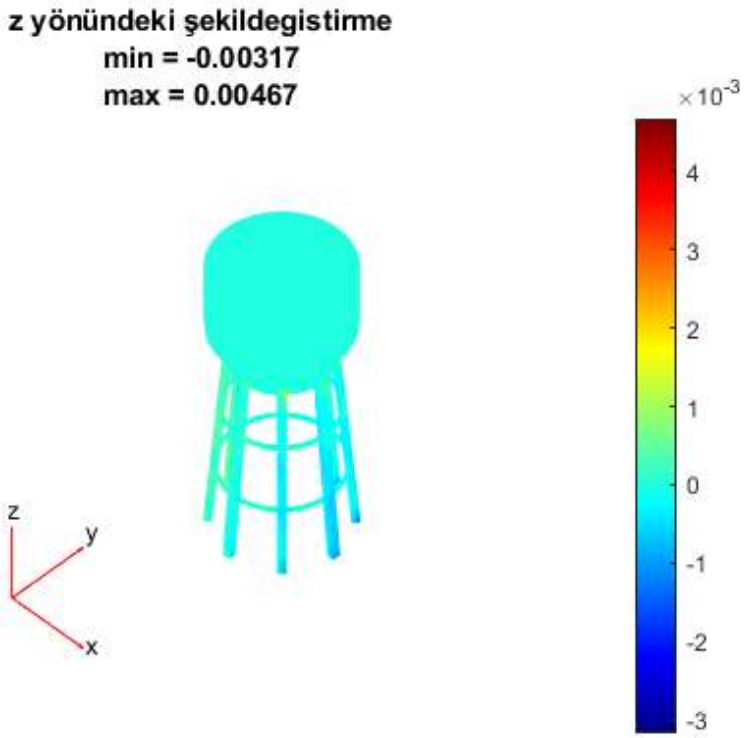
Şekil 6.285. ***Model-9'***da yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.286. ***Model-9'***da zx yönündeki şekil değiştirme

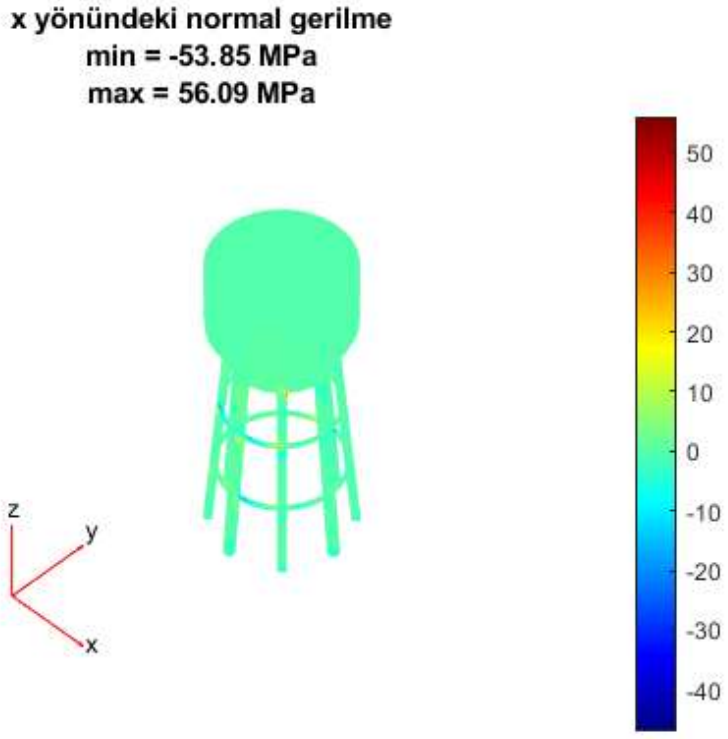


Şekil 6.287. ***Model-9'***da zy yönündeki şekil değiştirme

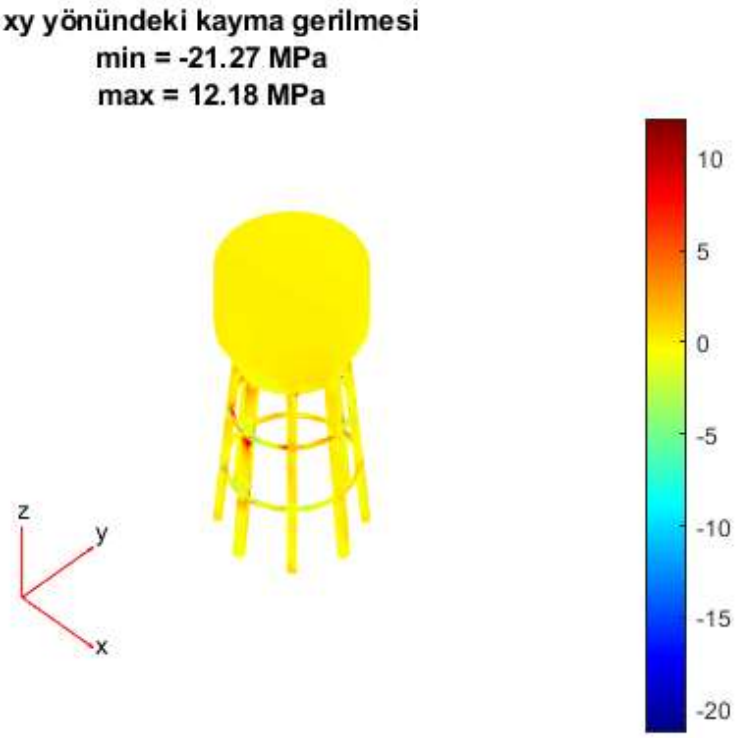


Şekil 6.288. ***Model-9'***da z yönündeki şekil değiştirme

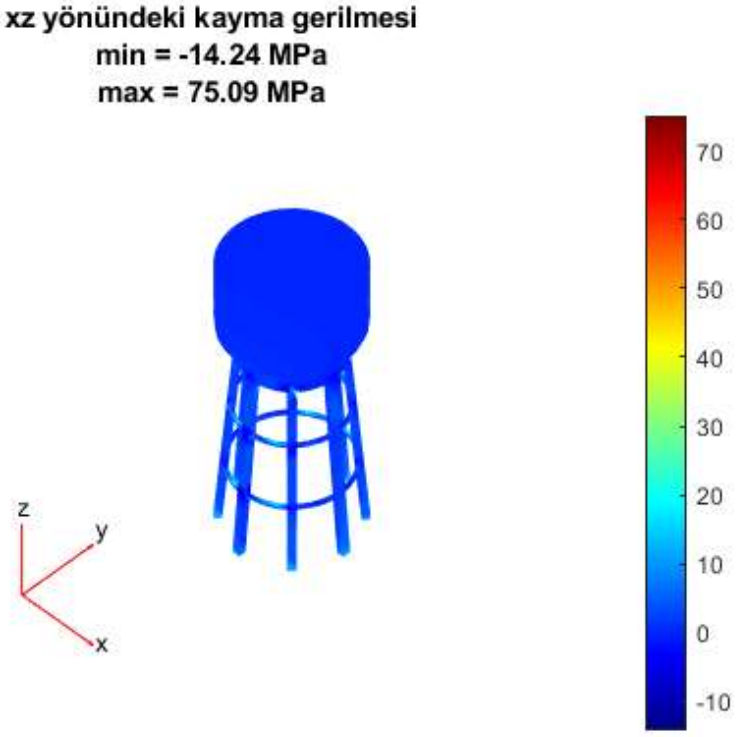
Model-9 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.289 - 6.298'de verilmektedir.



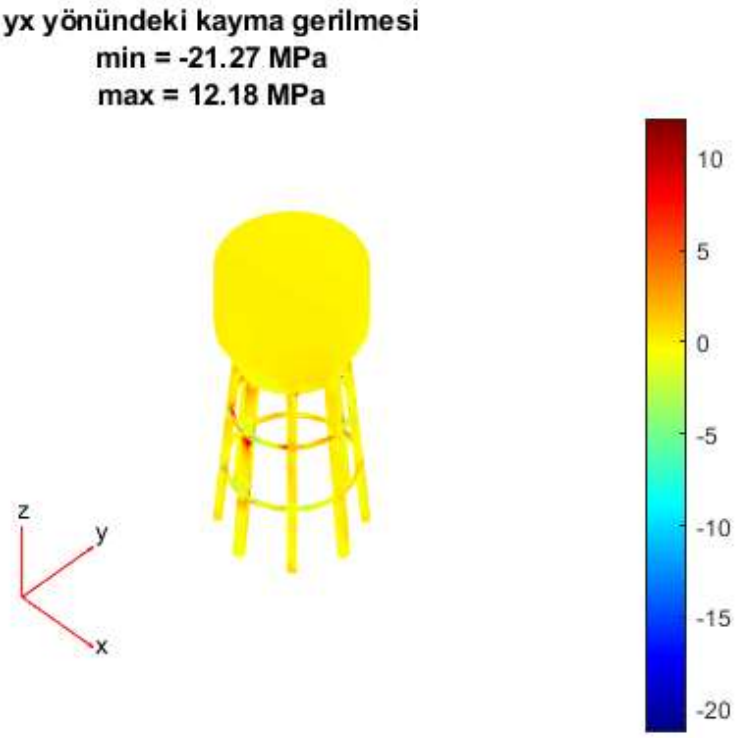
Şekil 6.289. ***Model-9'***da x yönündeki normal gerilme



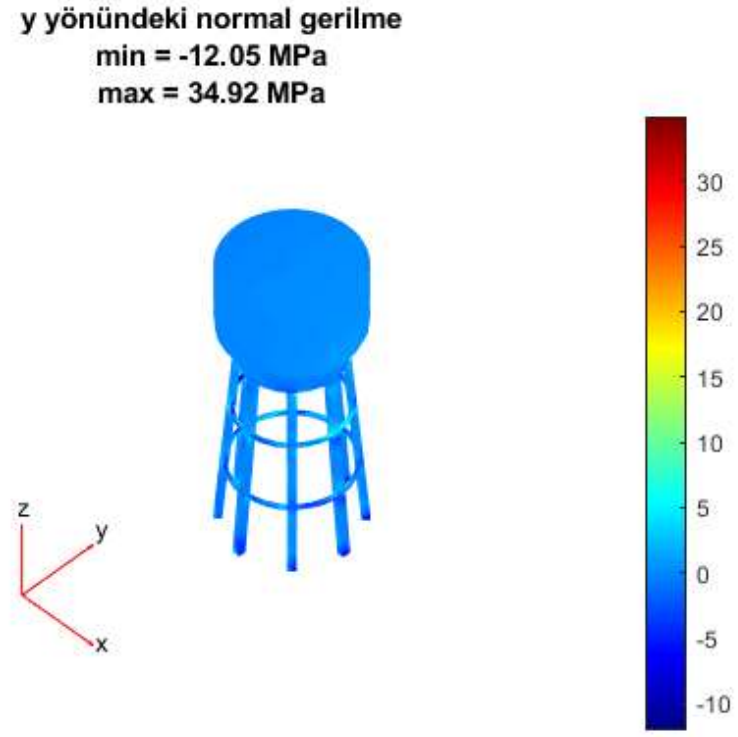
Şekil 6.290. ***Model-9'***da xy yönündeki kayma gerilmesi



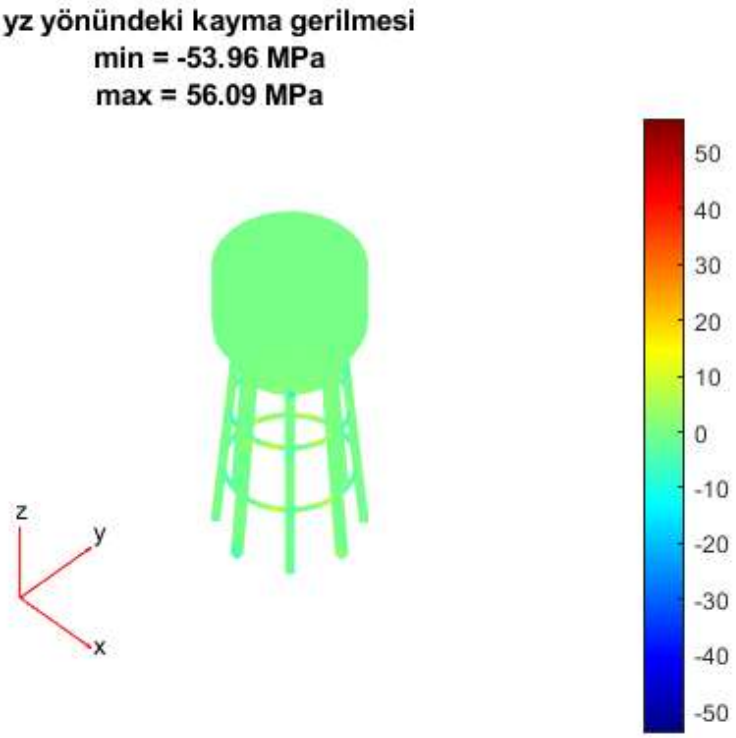
Şekil 6.291. ***Model-9'***da xz yönündeki kayma gerilmesi



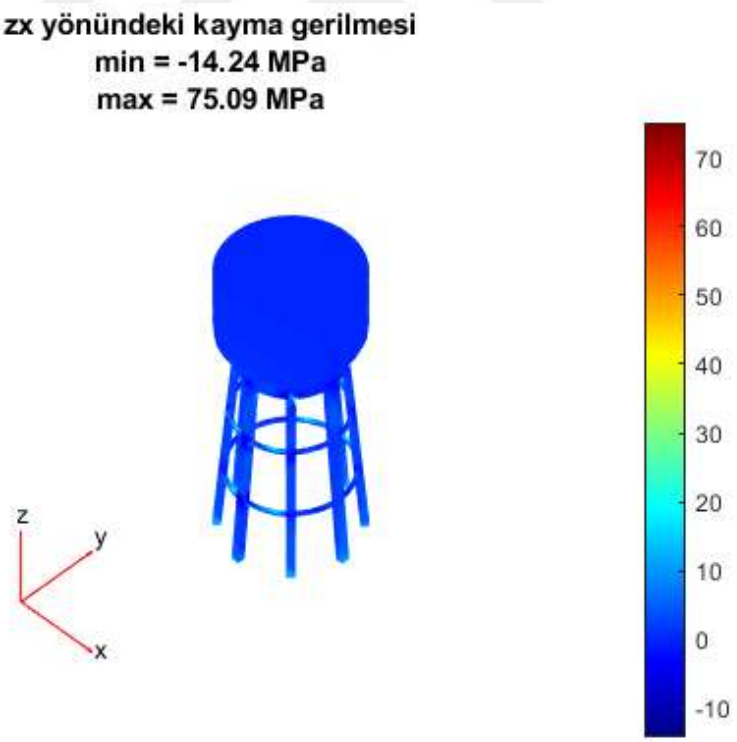
Şekil 6.292. ***Model-9'***da yx yönündeki kayma gerilmesi



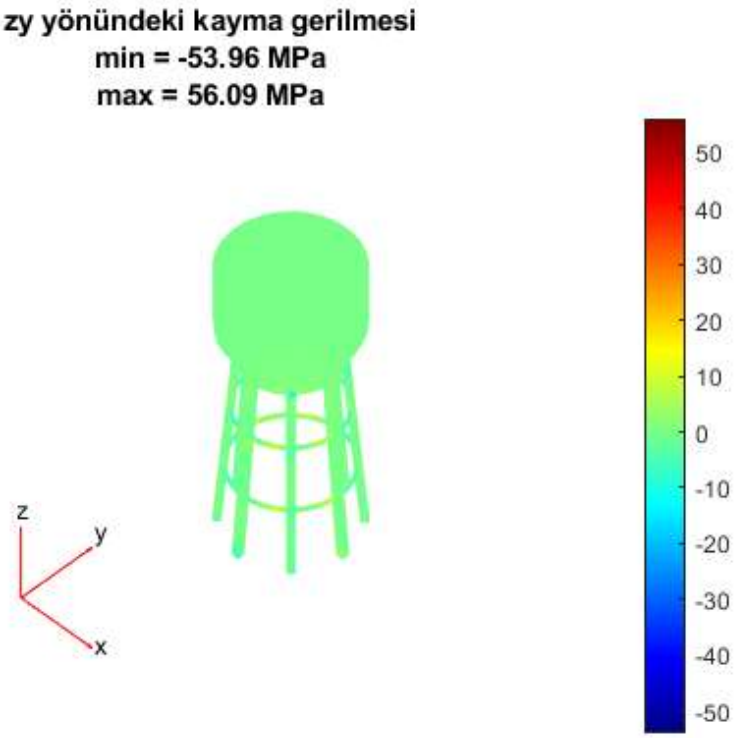
Şekil 6.293. ***Model-9'***da y yönündeki normal gerilme



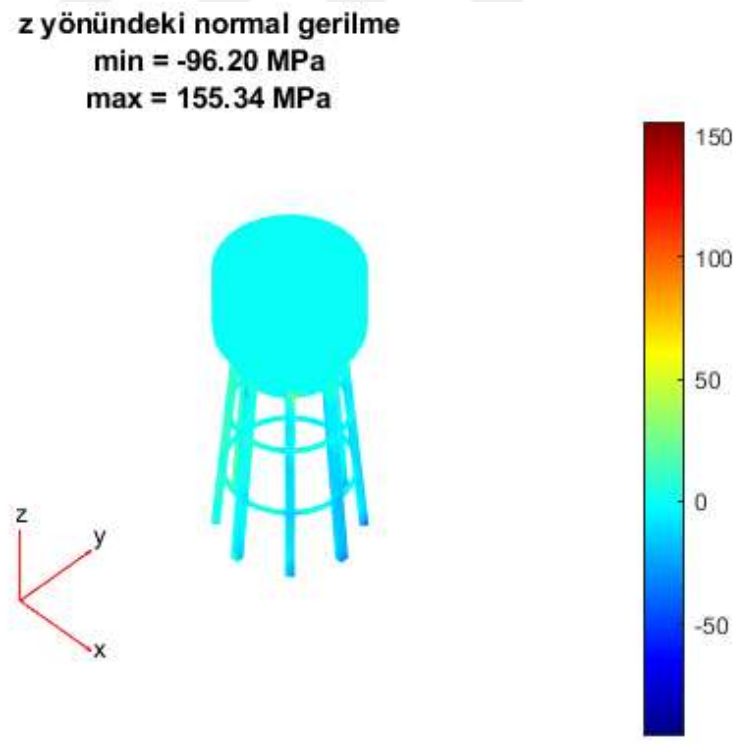
Şekil 6.294. ***Model-9'***da yz yönündeki kayma gerilmesi



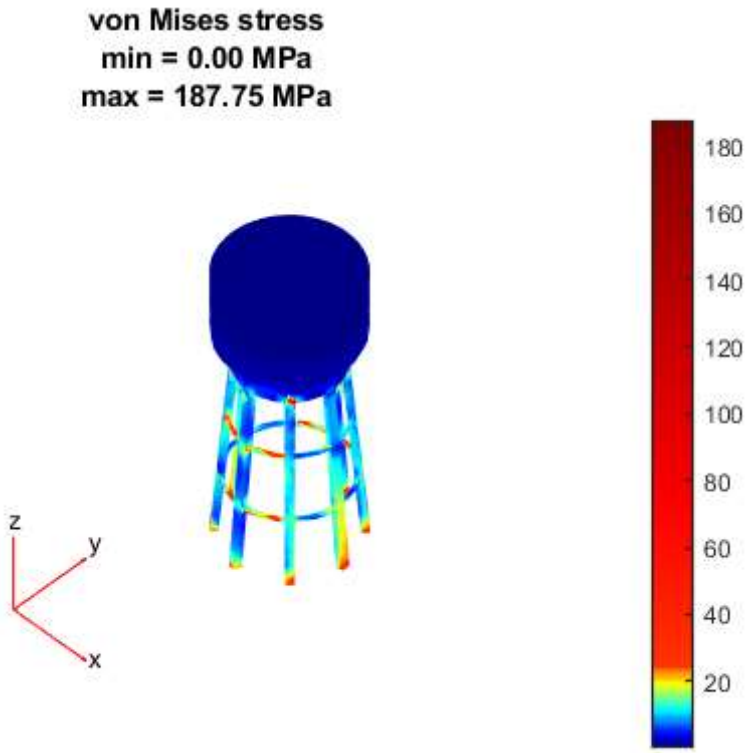
Şekil 6.295. ***Model-9'***da zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.296. ***Model-9'***da zy yönündeki kayma gerilmesi

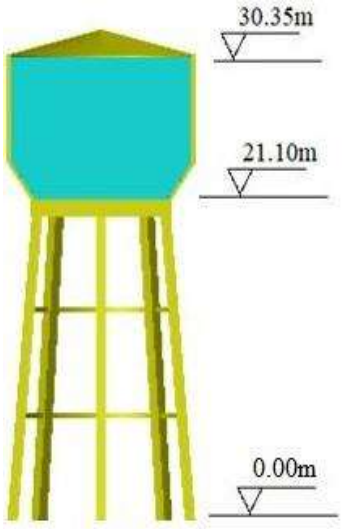


Şekil 6.297. ***Model-9'***da z yönündeki normal gerilme



Şekil 6.298. ***Model-9'***da Von Mises gerilmesi

6.2.4.10. Model-10: Ayaklı Su Deposunun Tam Dolu (%100) Durumda Olduğu, Yapı Taşıyıcı Sisteminin Çok Serbestlik Dereceli Olduğu, Sıvı-Yapı Etkileşimi için DPH Yaklaşımının Esas Alındığı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizin Gerçekleştirildiği Model



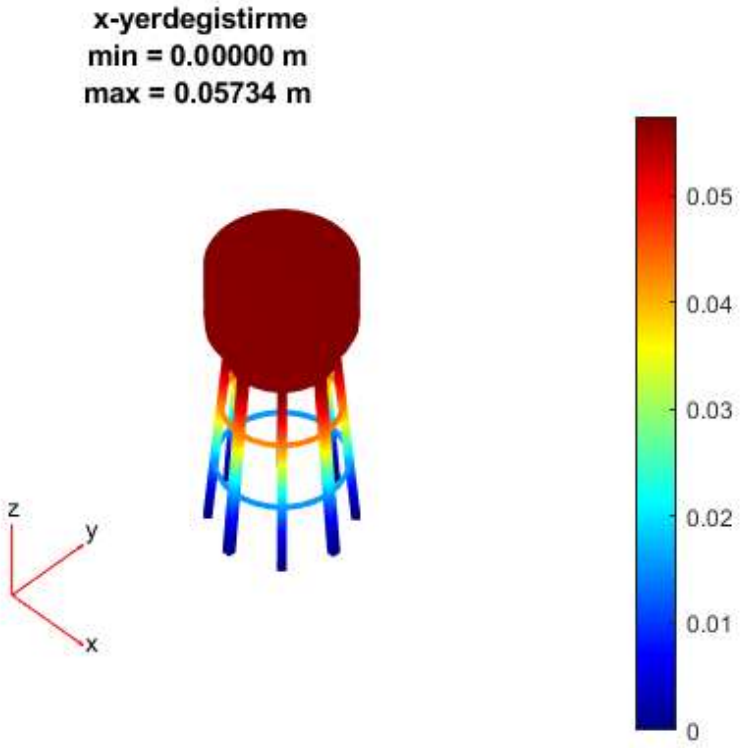
Şekil 6.299. Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu (%100) durumu

Betonarme ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumda olduğu ***Model-10*** Şekil 6.299'da görülmektedir.

- **Sıvı:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) durumunda suyun doğrusal olmayan davranışını modellemede kullanılan DPH yaklaşımı kullanılmıştır.
- **Yapısal kısım:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Zemin kısmı:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Yer hareketi:** Model-1'deki ile aynı modellenmiştir.
- **Analiz türü:** Ayaklı su deposunun tam dolu(%100) olduğu bu model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Sönüm türü:** Eşdeğer viskoz sönüm kullanılmıştır.

Hidrodinamik basınçlar ***Model-8*** ile aynıdır. ***Model-8***'den farklı olarak ***Model-9***'da zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir.

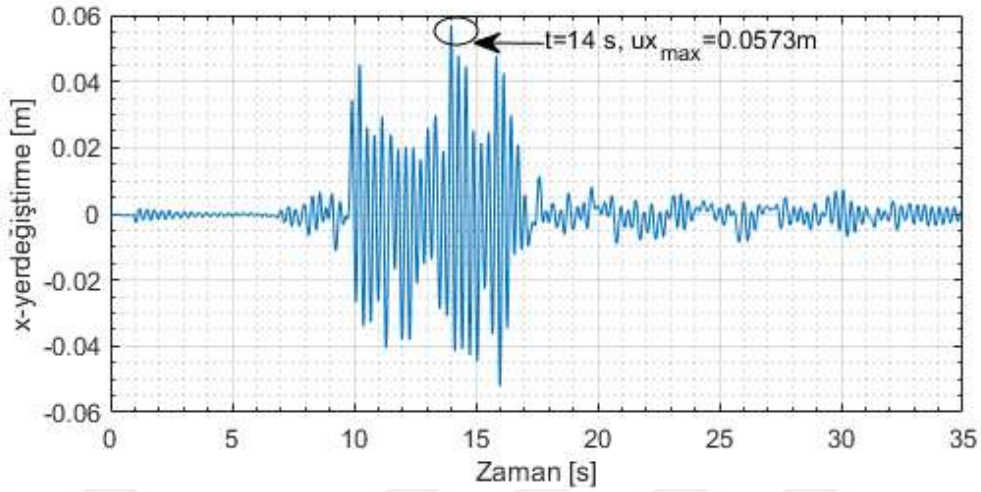
Model-10 analiz sonuçları



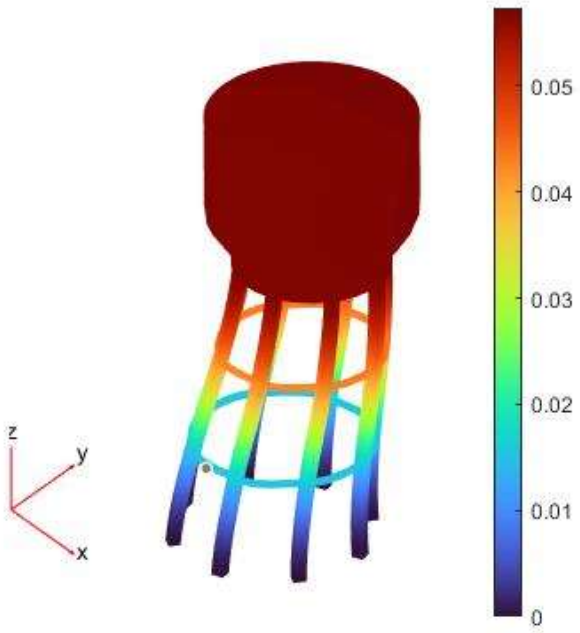
Şekil 6.300. ***Model-10'***da x yönündeki yer değiştirme

Model-10'a ait analiz sonuçları, en büyük değerlerin olduğu zamanlar seçilerek aşağıdaki şekillerde verilmektedir. **Model-10** için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.300'de verilmektedir. x yönündeki yer değiştirmenin en büyük değerinin meydana geldiği düğüm noktasının zamanla değişimi ise Şekil 6.301'de verilmektedir. Şekil

6.302'de t=14'. ncü saniyede x yönünde 0.0573m yerdeğiştirmiş taşıyıcı sistem görülmektedir.

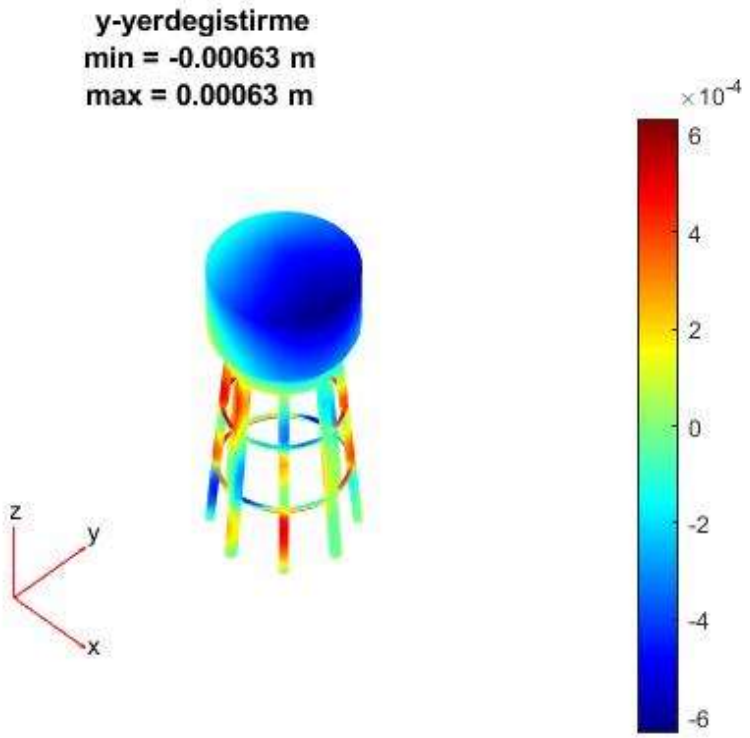


Şekil 6.301. ***Model-10'***da x yönündeki yer değiştirmenin zamanla değişimi

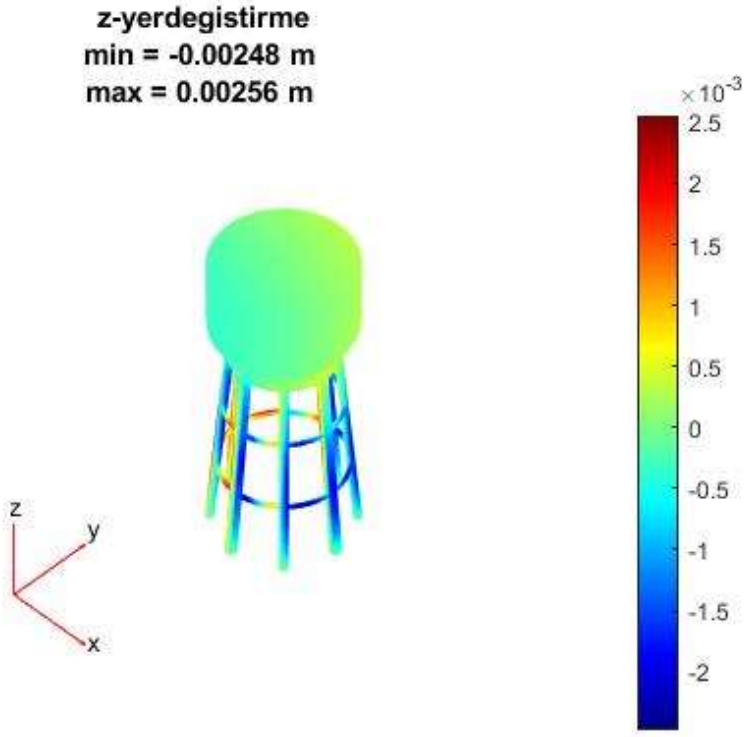


Şekil 6.302. ***Model-10'***da x yönünde yer değiştirmiş taşıyıcı sistem

Model-10 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen y ve z yönündeki en büyük yer değiştirmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.303 ve 6.304'de verilmektedir.

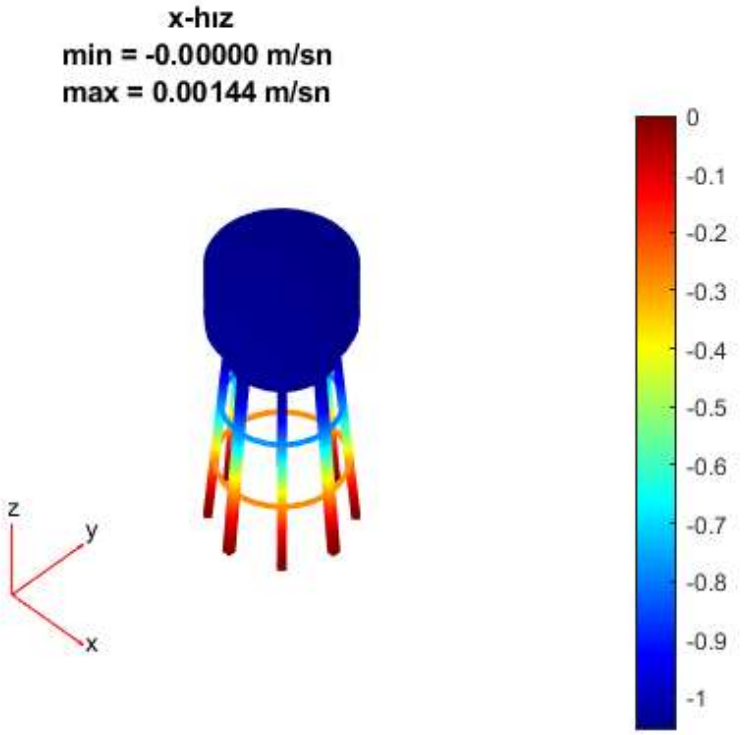


Şekil 6.303. ***Model-10'***da y yönündeki yer değiştirme

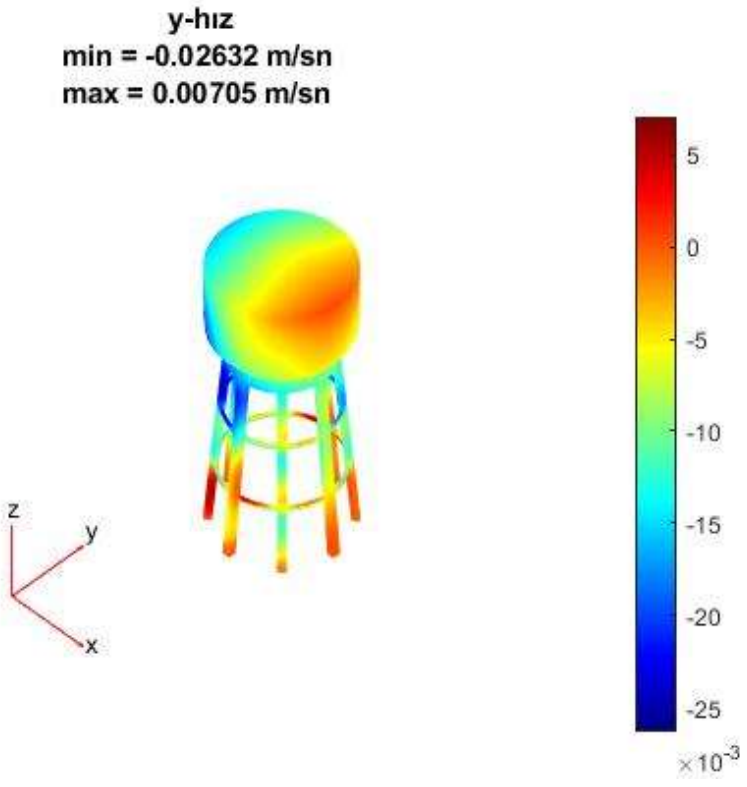


Şekil 6.304. ***Model-10'***da z yönündeki yer değiştirme

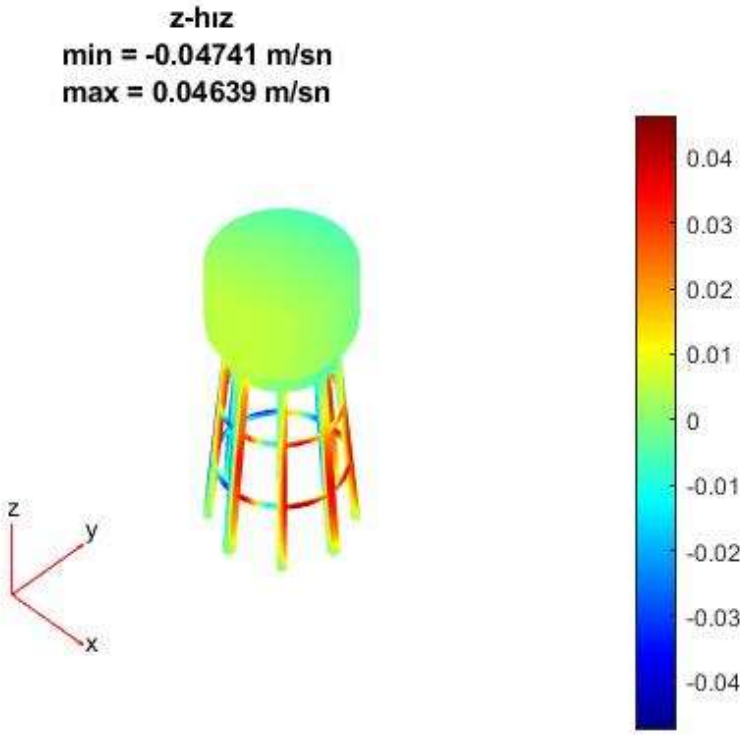
Model-10 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük hızların deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.305 - 6.307'de verilmektedir.



Şekil 6.305. ***Model-10'***da x yönündeki hız

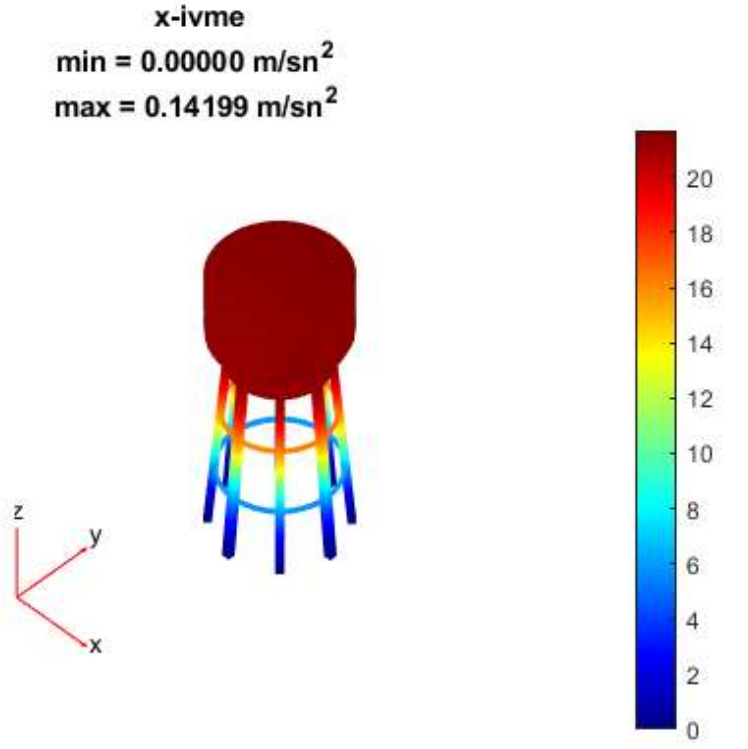


Şekil 6.306. ***Model-10'***da y yönündeki hız

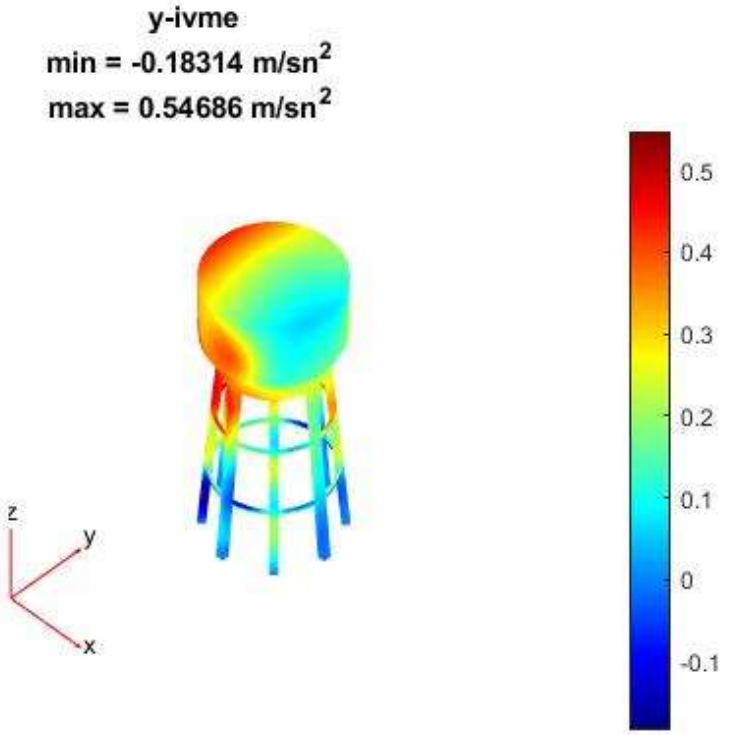


Şekil 6.307. ***Model-10'***da z yönündeki hız

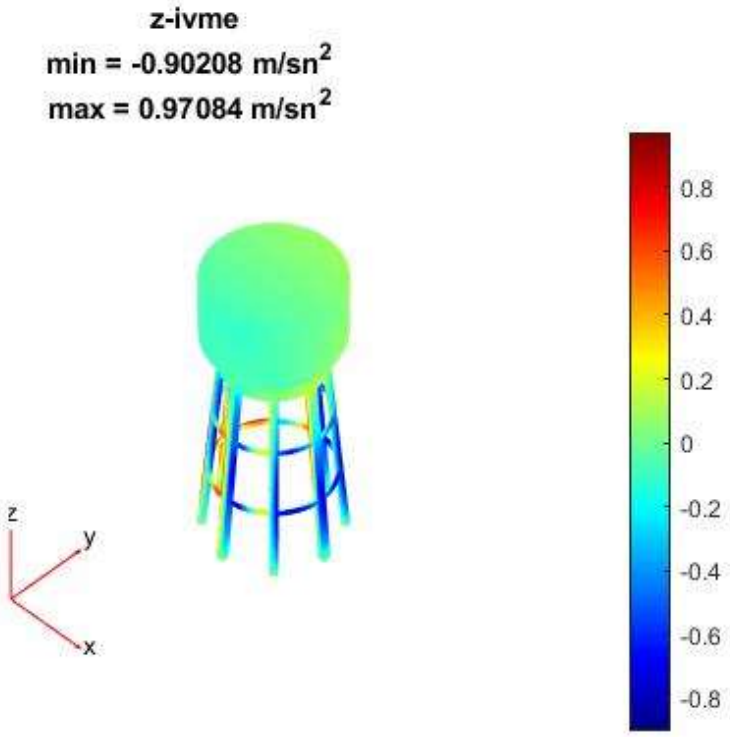
Model-10 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük ivmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.308 - 6.310'da verilmektedir.



Şekil 6.308. ***Model-10'***da x yönündeki ivme



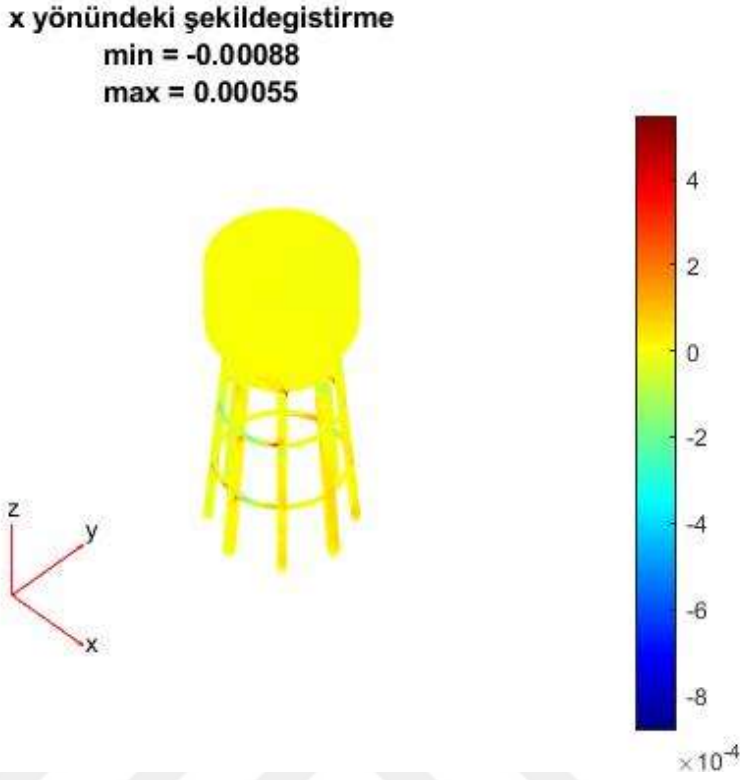
Şekil 6.309. ***Model-10'***da y yönündeki ivme



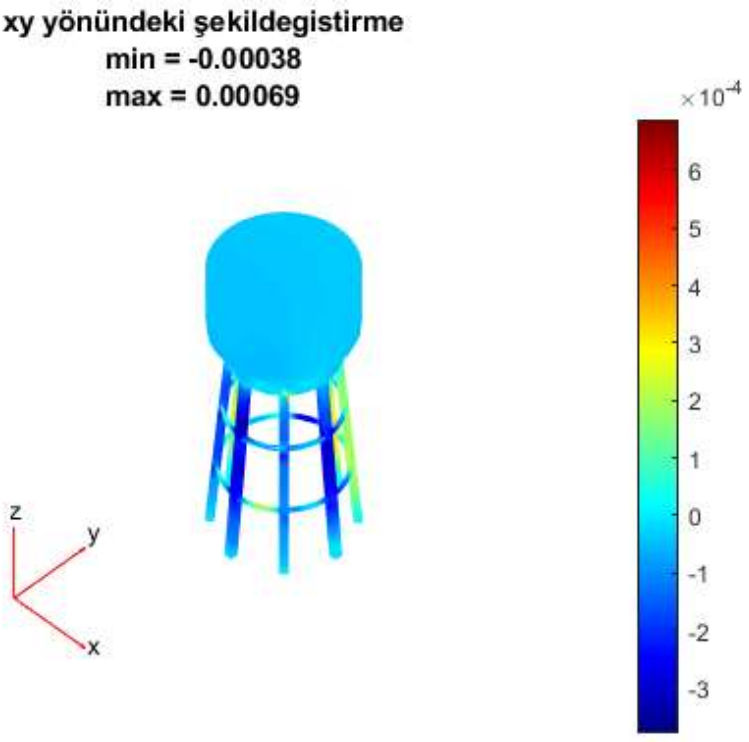
Şekil 6.310. ***Model-10'***da z yönündeki ivme

Model-10 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük şekil değiştirmelerin

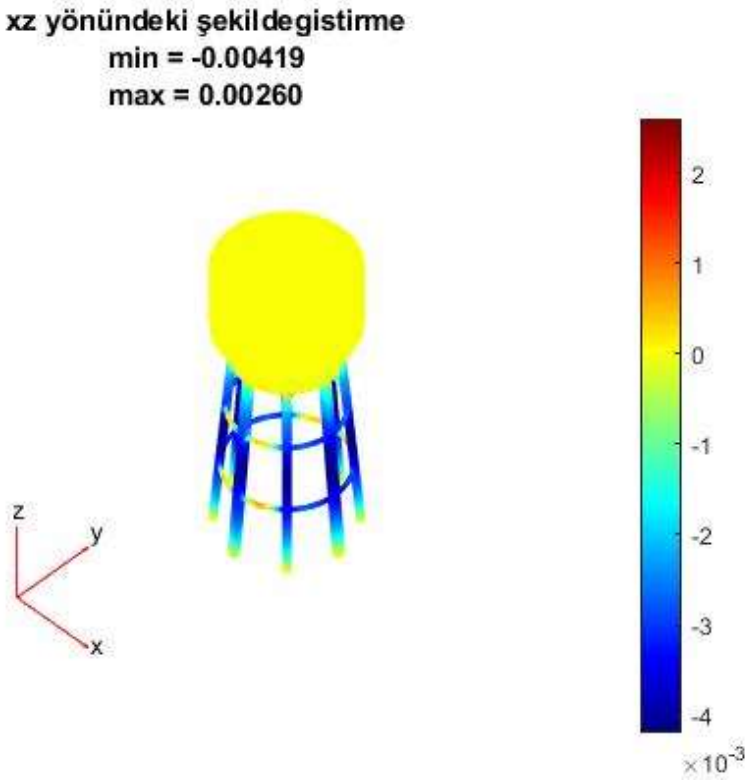
deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.311 - 6.319'da verilmektedir.



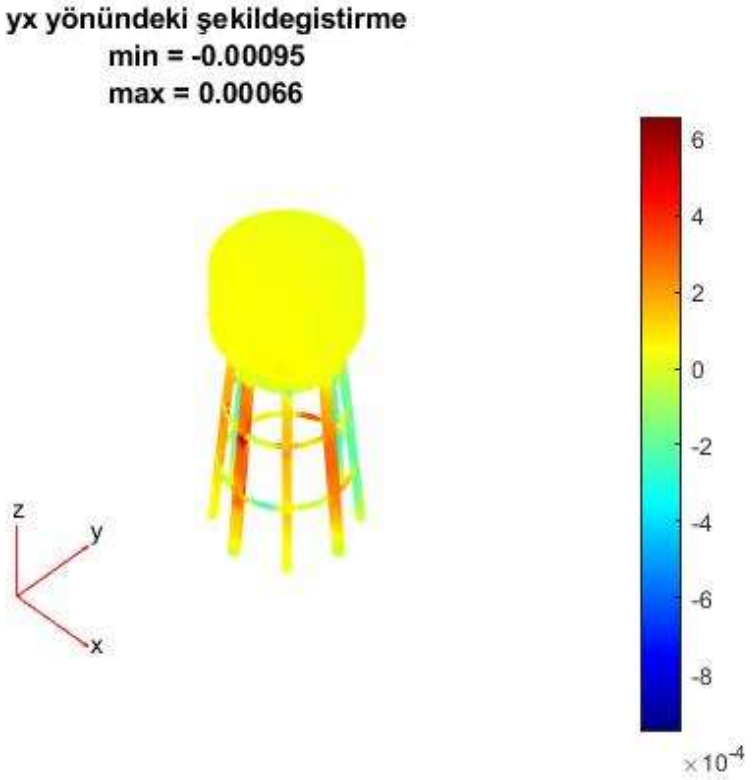
Şekil 6.311. ***Model-10'***da x yönündeki şekil değiştirme



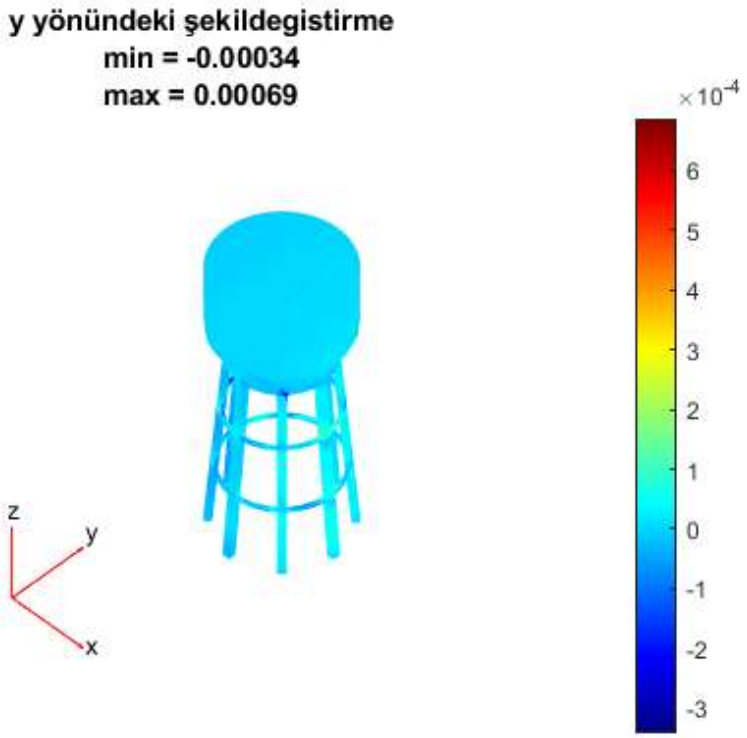
Şekil 6.312. ***Model-10'***da xy yönündeki şekil değiştirme



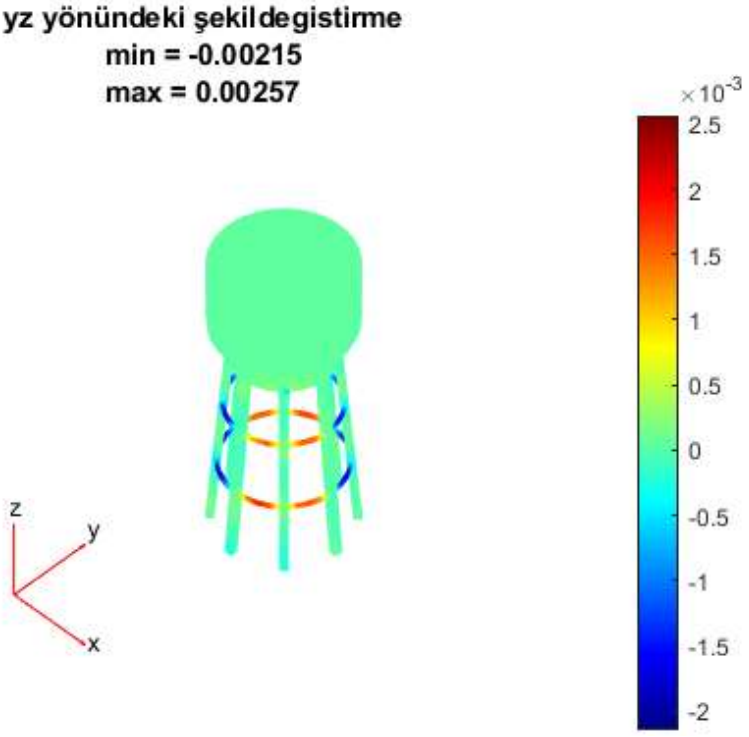
Şekil 6.313. ***Model-10'***da xz yönündeki şekil değiştirme



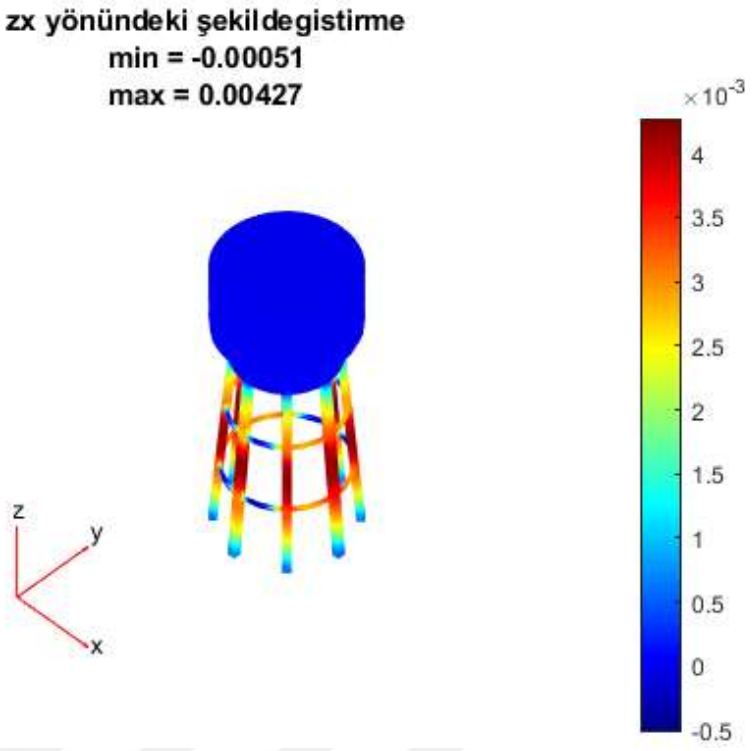
Şekil 6.314. ***Model-10'***da yx yönündeki şekil değiştirme



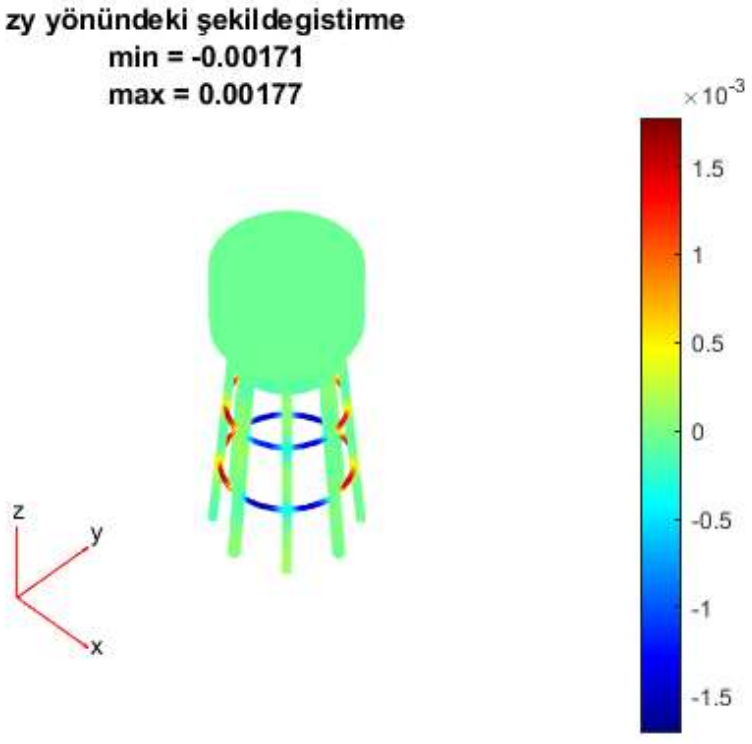
Şekil 6.315. ***Model-10'***da y yönündeki şekil değiştirme



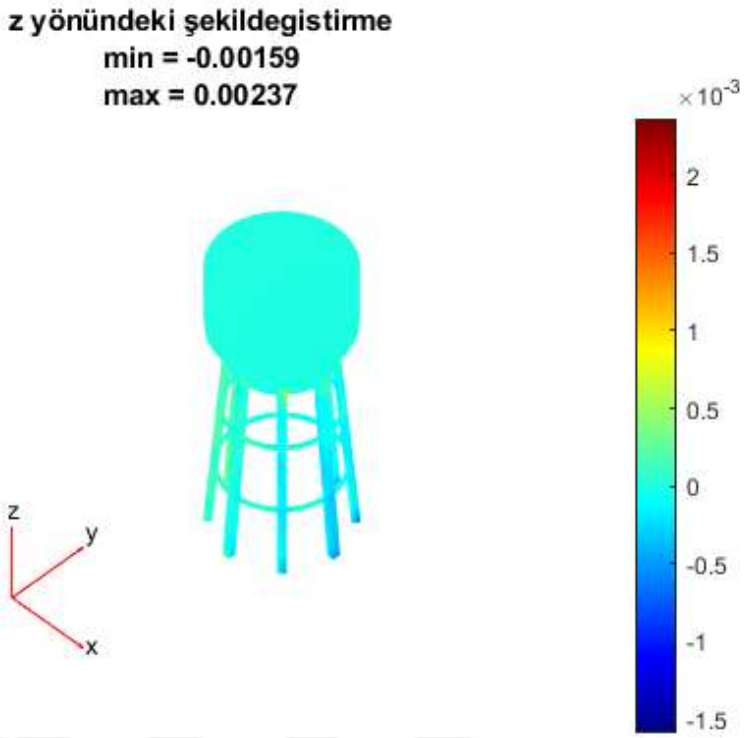
Şekil 6.316. ***Model-10'***da yz yönündeki şekil değiştirme



Şekil 6.317. ***Model-10'***da zx yönündeki şekil değiştirme

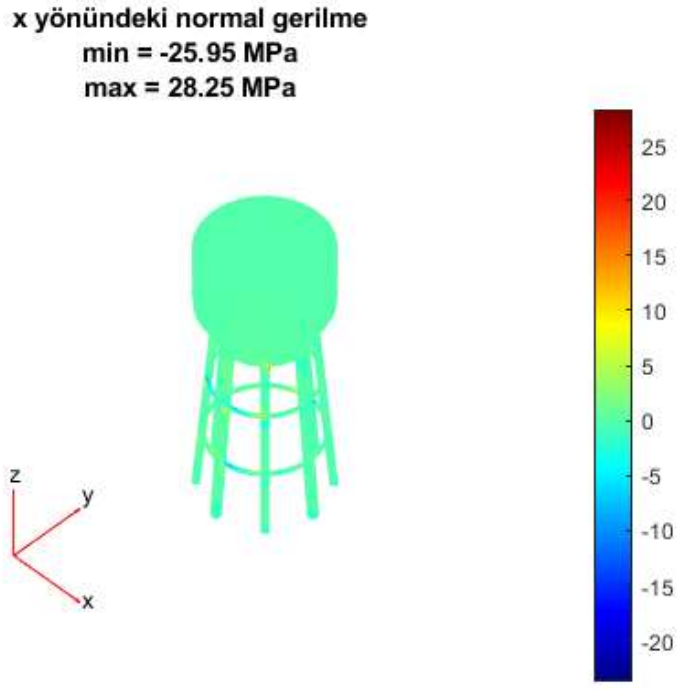


Şekil 6.318. ***Model-10'***da zy yönündeki şekil değiştirme

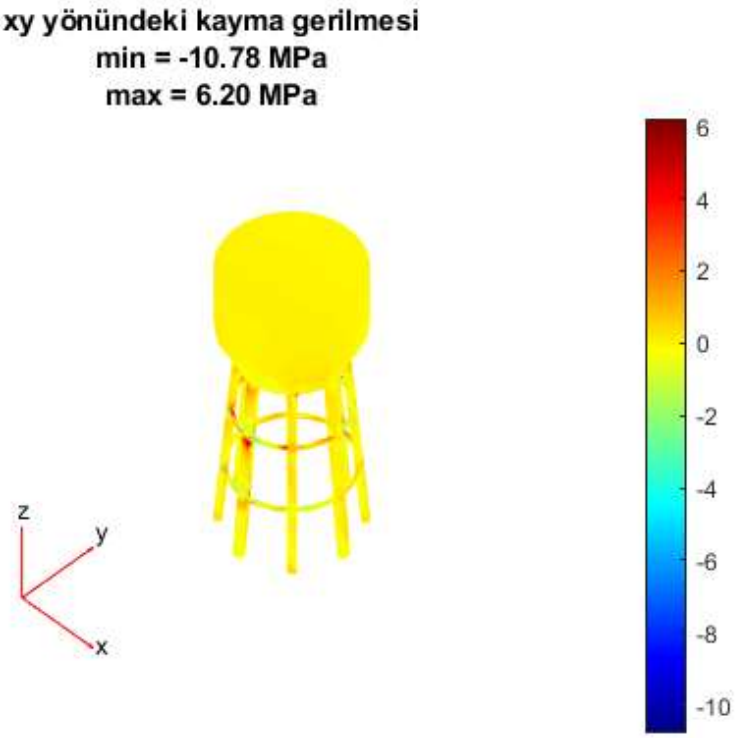


Şekil 6.319. ***Model-10'***da z yönündeki şekil değiştirme

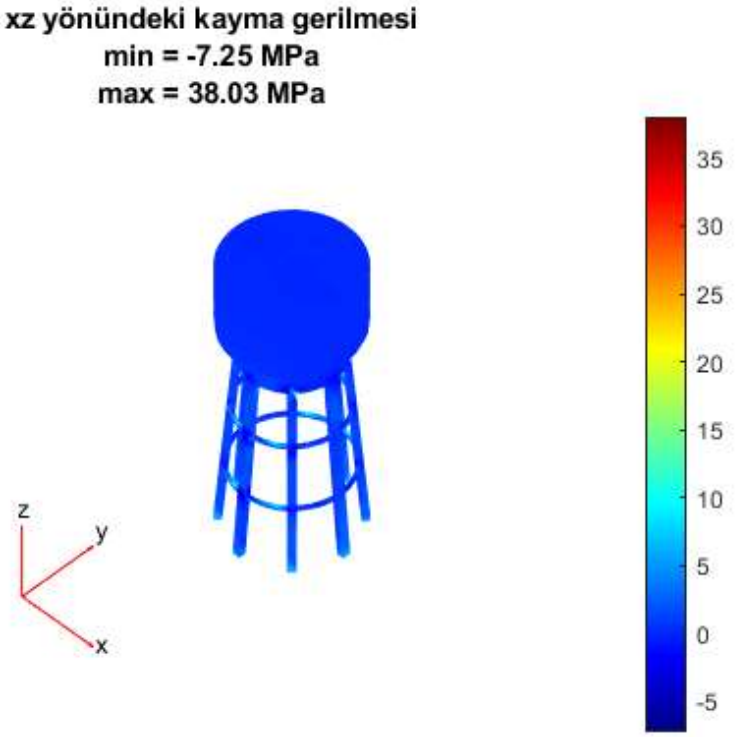
Model-10 için yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz çözümlemesinden sonra elde edilen x, y ve z yönündeki en büyük gerilmelerin deponun üç boyutlu taşıyıcı sistem üzerindeki değişimi Şekil 6.320 - 6.329'da verilmektedir.



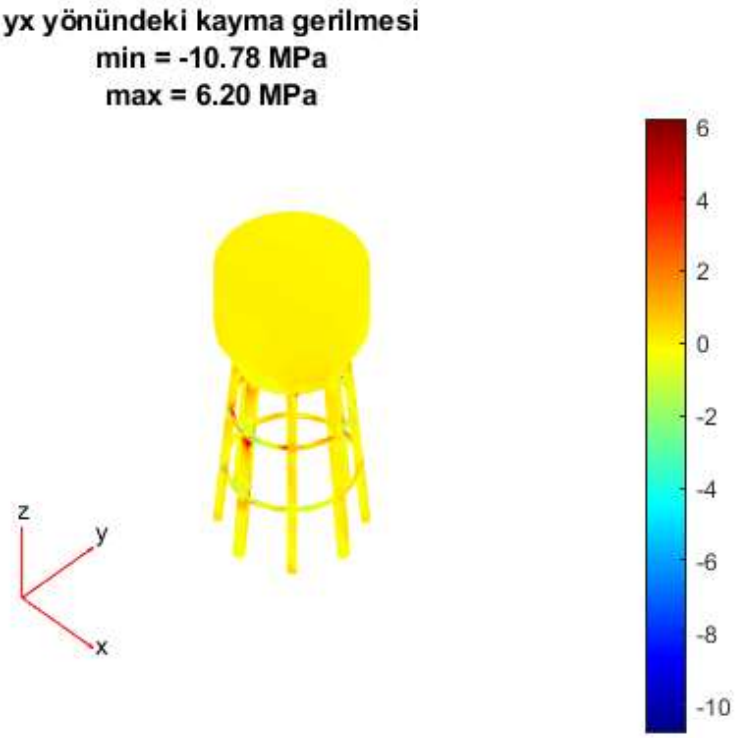
Şekil 6.320. ***Model-10'***da x yönündeki normal gerilme



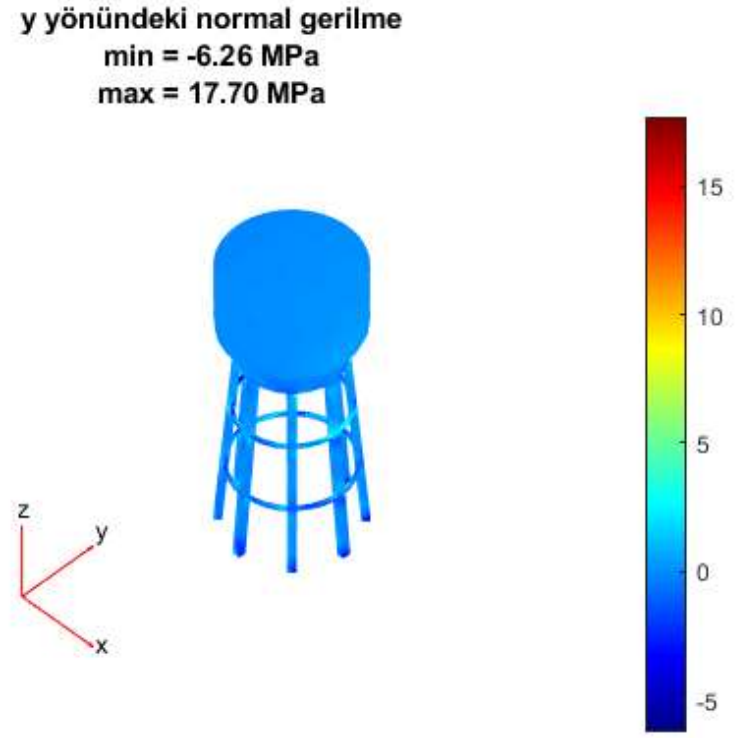
Şekil 6.321. ***Model-10'***da xy yönündeki kayma gerilmesi



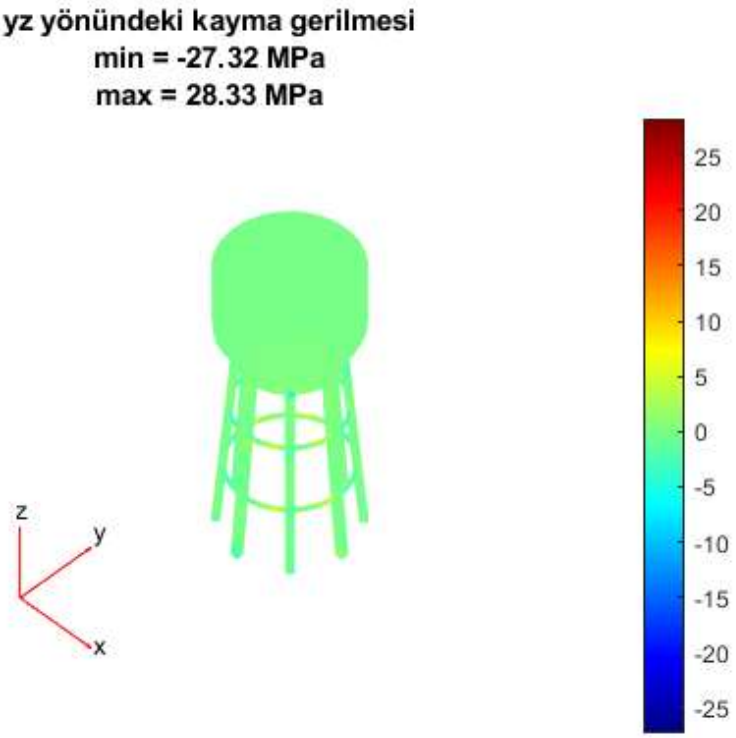
Şekil 6.322. ***Model-10'***da xz yönündeki kayma gerilmesi



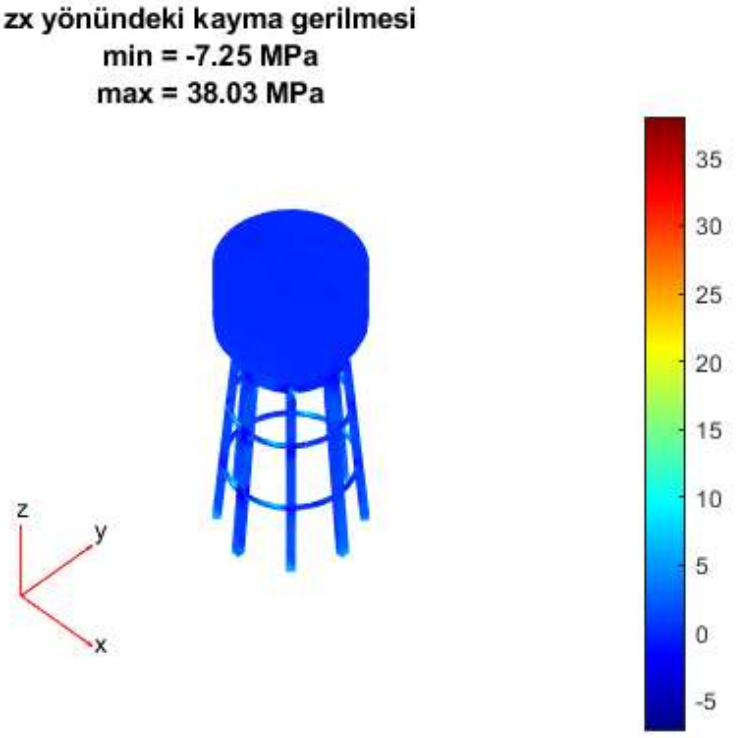
Şekil 6.323. ***Model-10'***da yx yönündeki kayma gerilmesi



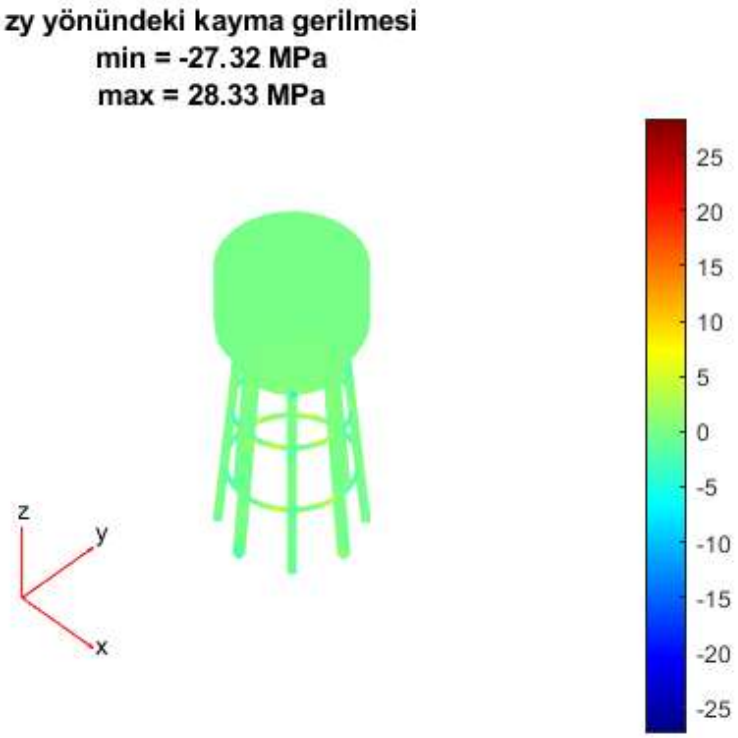
Şekil 6.324. ***Model-10'***da y yönündeki normal gerilme



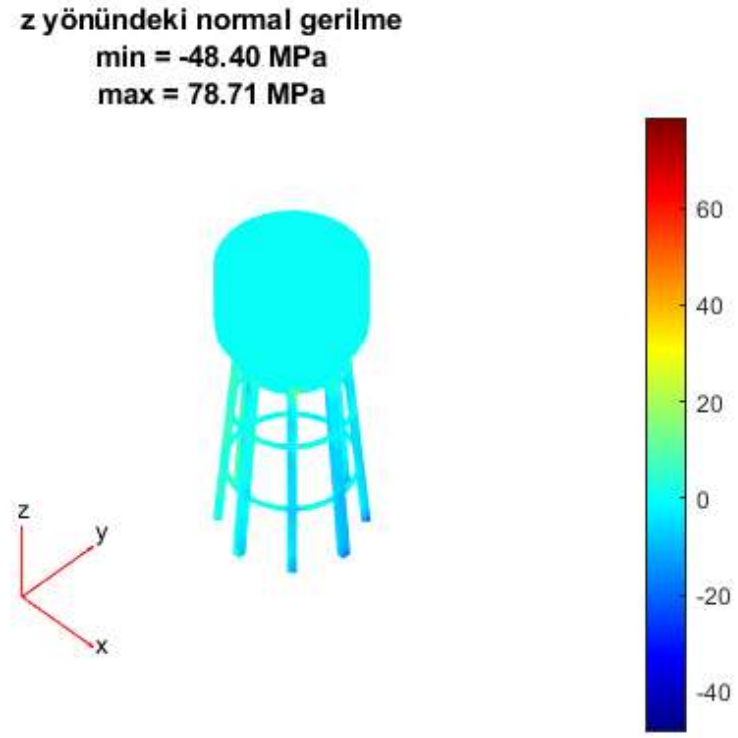
Şekil 6.325. ***Model-10'***da yz yönündeki kayma gerilmesi



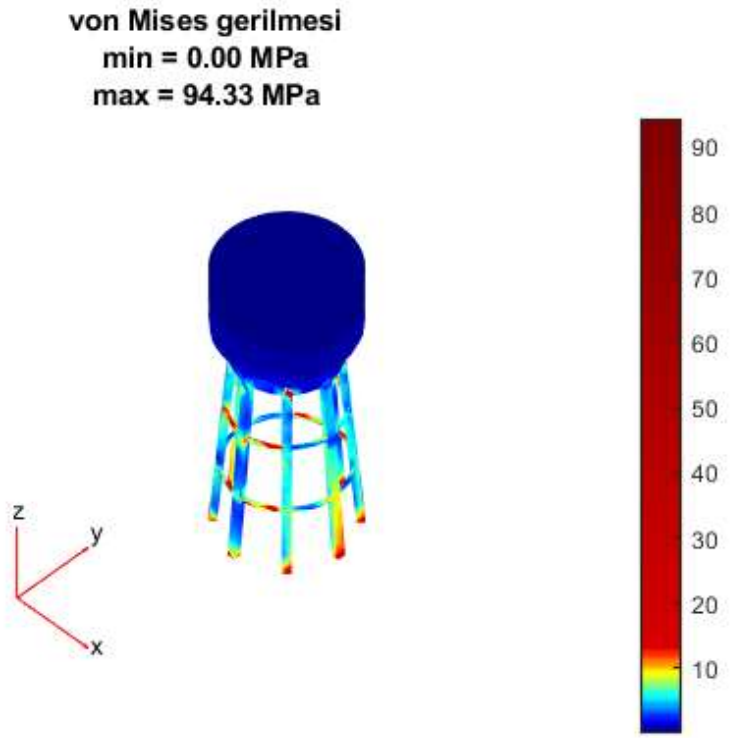
Şekil 6.326. ***Model-10'***da zx yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.327. ***Model-10'***da zy yönündeki kayma gerilmesi



Şekil 6.328. ***Model-10'***da z yönündeki normal gerilme

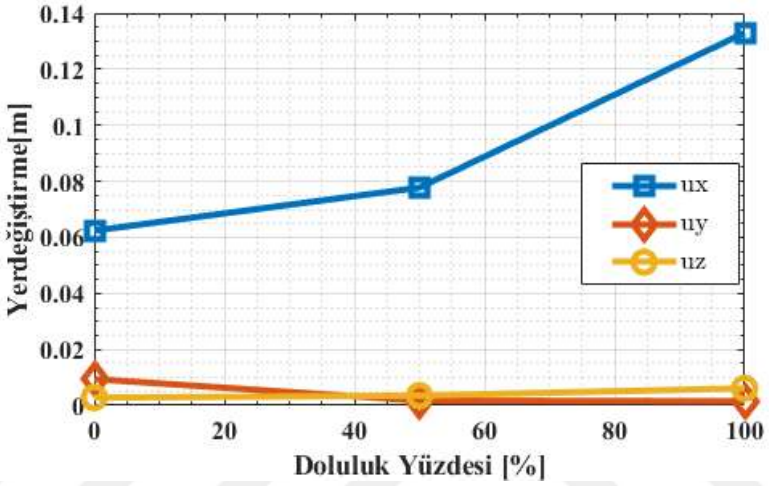


Şekil 6.329. ***Model-10'***da Von Mises gerilmesi

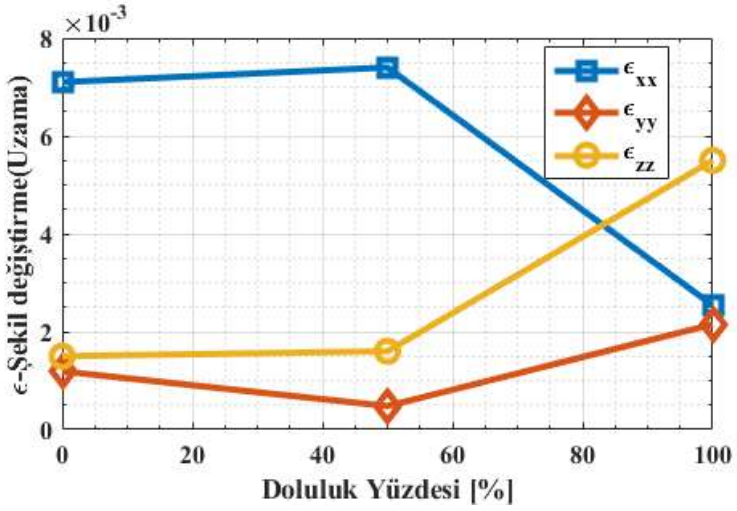
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Westergaard Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Sonuçları

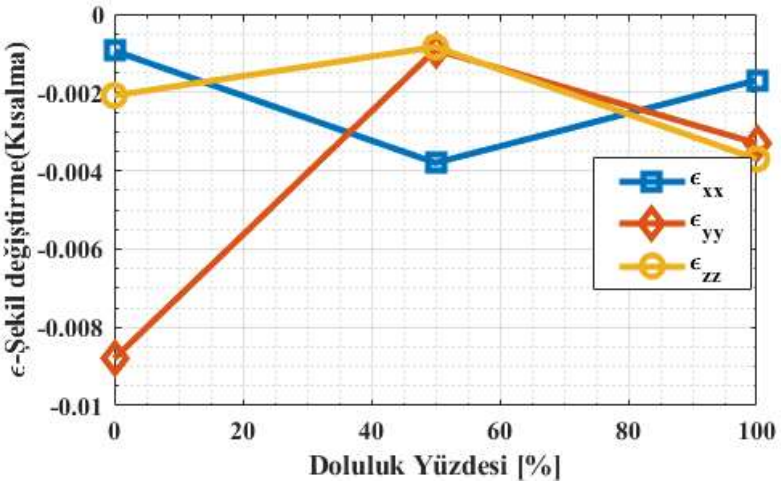
Sıvı-yapı etkileşimi için dikkate alınan Westergaard yaklaşımıyla toplam üç model için (***Model-1,3,5***) zaman tanım alanında doğrusal analizler, geliştirilen yazılım ile yapılmıştır. Doluluk oranlarına göre yer değiştirme, şekil değiştirme, gerilme sonuçları aşağıdaki grafiklerde (Şekil 7.1-7.8) verilmektedir.



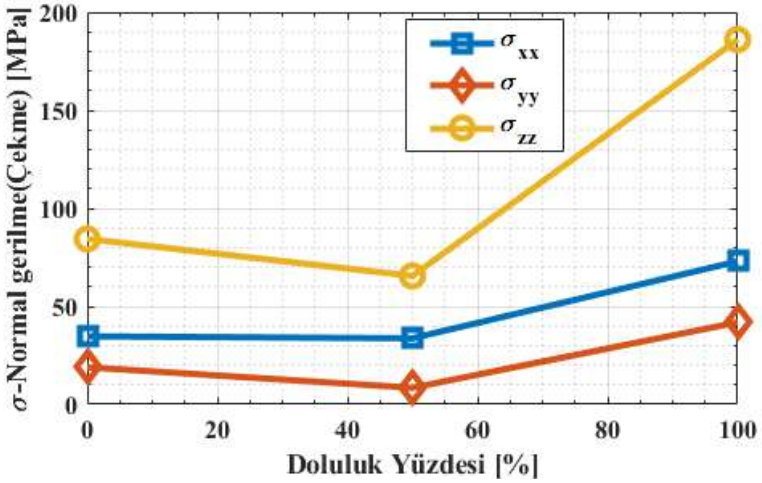
Şekil 7.1. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-1,3,5***)



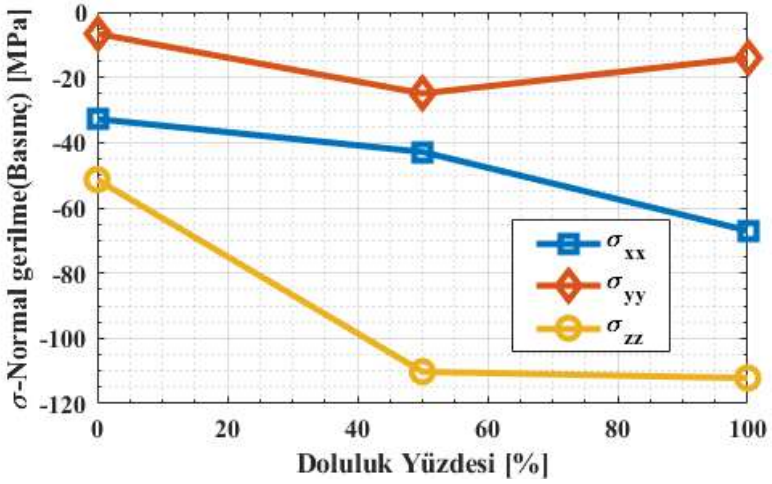
Şekil 7.2. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), ***Model-1,3,5***



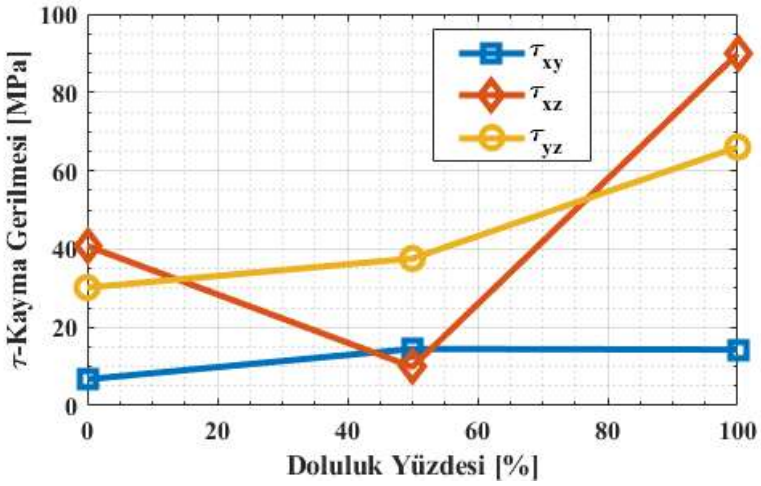
Şekil 7.3. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), ***Model-1,3,5***



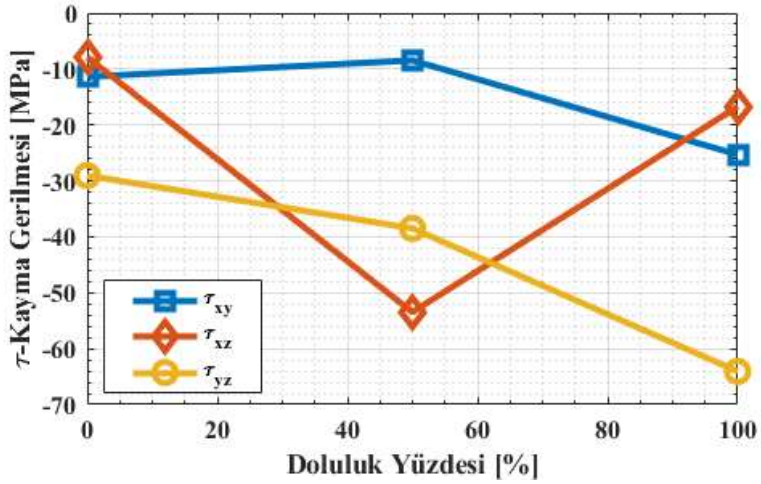
Şekil 7.4. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), ***Model-1,3,5***



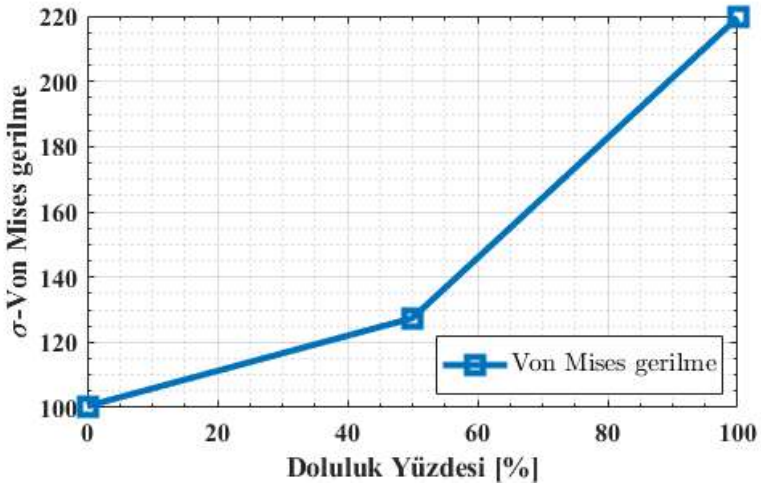
Şekil 7.5. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), ***Model-1,3,5***



Şekil 7.6. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (pozitif), ***Model-1,3,5***



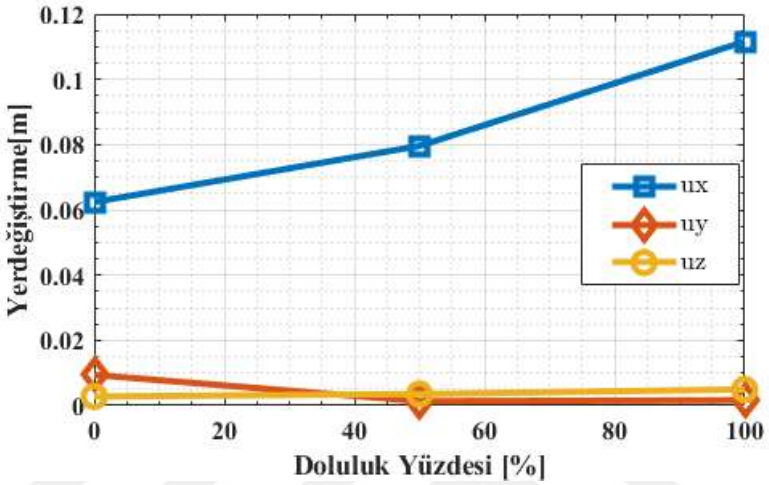
Şekil 7.7. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (negatif), ***Model-1,3,5***



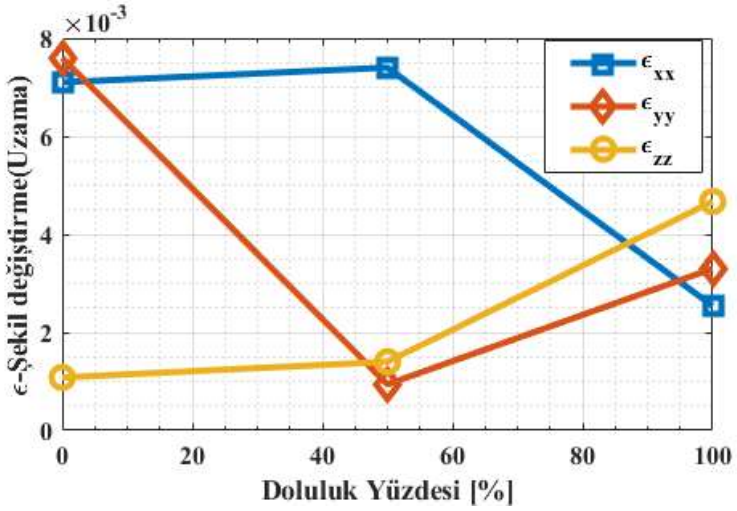
Şekil 7.8. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-1,3,5***)

7.2. DPH Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizlerin Sonuçları

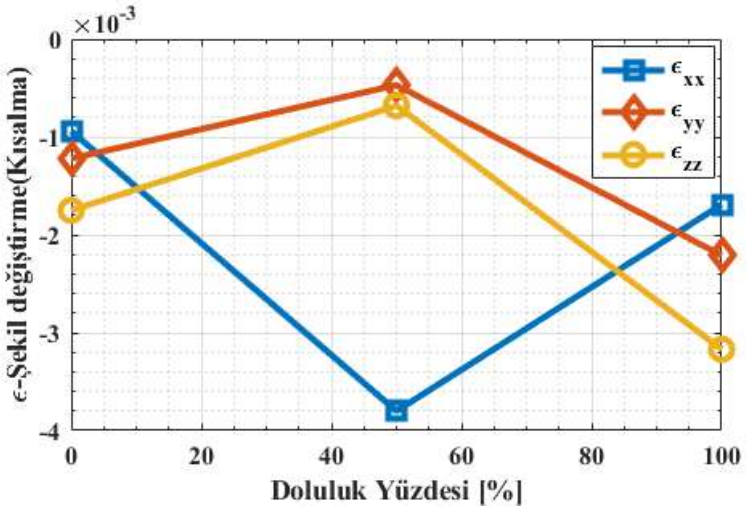
Sıvı-yapı etkileşimi için dikkate alınan DPH yaklaşımıyla toplam üç model için (**Model-1,7,9**) zaman tanım alanında doğrusal analizler, geliştirilen yazılım ile yapılmıştır. Doluluk oranlarına göre yer değiştirme, şekil değiştirme, gerilme sonuçları aşağıdaki grafiklerde (Şekil 7.9-7.16) verilmektedir.



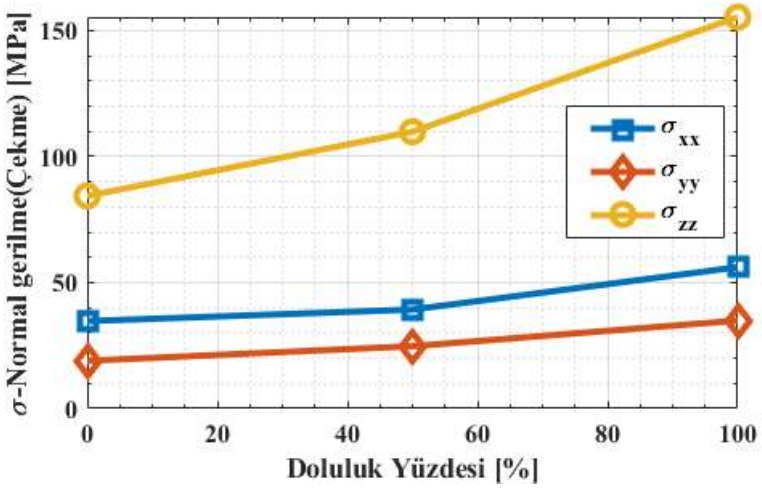
Şekil 7.9. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-1,7,9***)



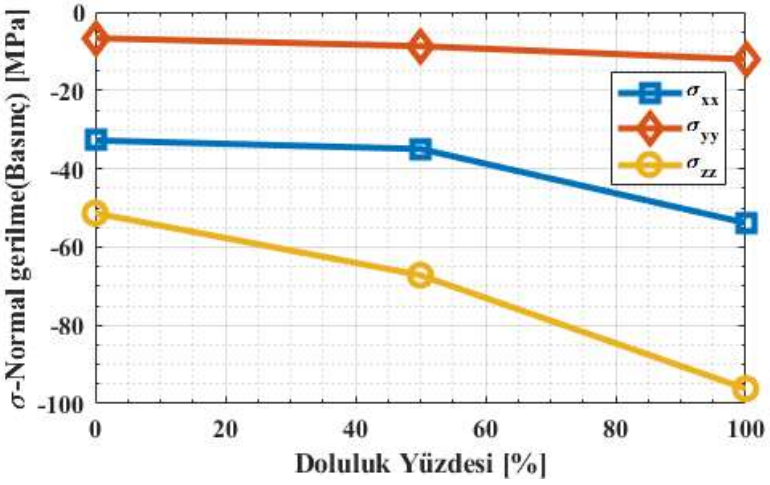
Şekil 7.10. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), (***Model-1,7,9***)



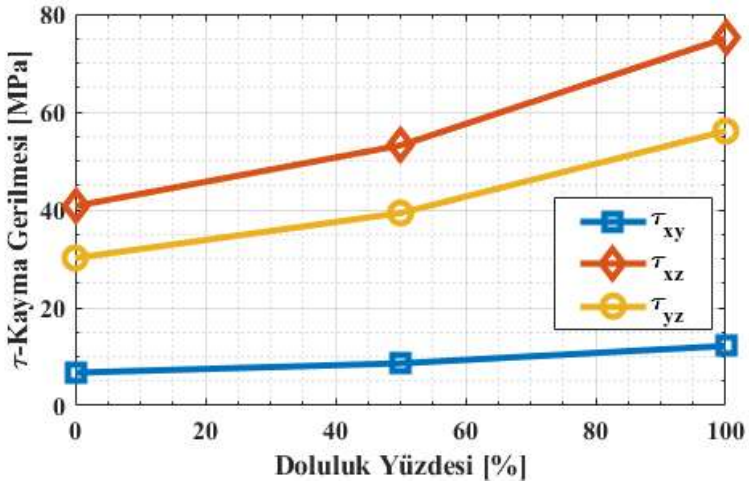
Şekil 7.11. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), (***Model-1,7,9***)



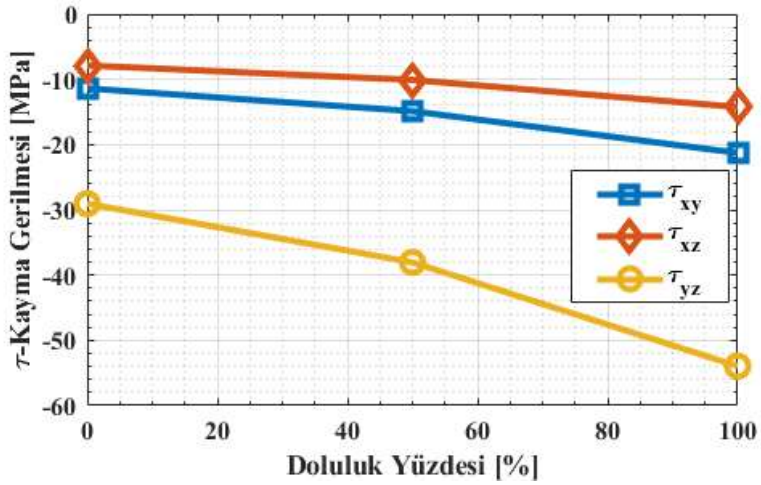
Şekil 7.12. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), (***Model-1,7,9***)



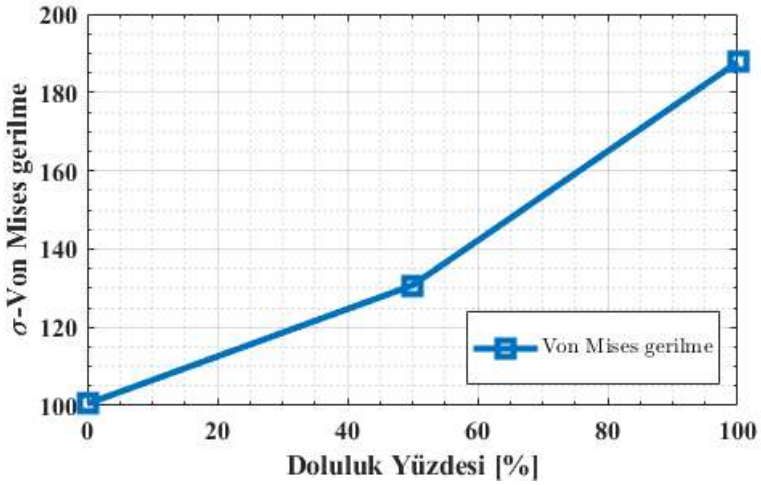
Şekil 7.13. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), (***Model-1,7,9***)



Şekil 7.14. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (pozitif), (***Model-1,7,9***)



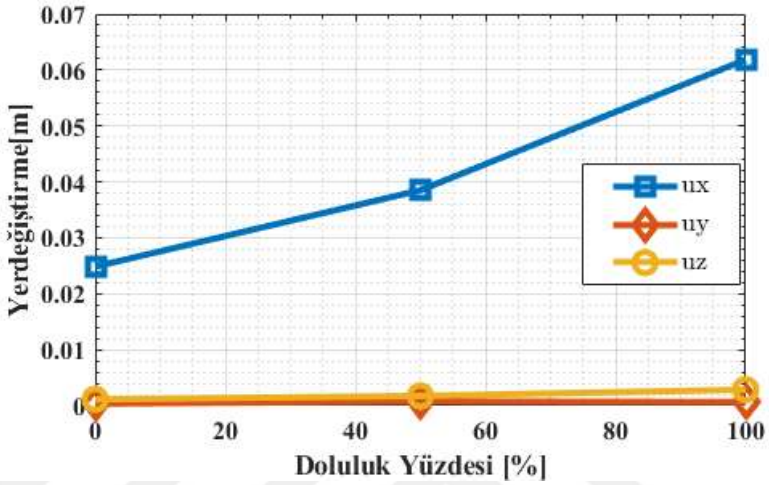
Şekil 7.15. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmeleri (negatif), (***Model-1,7,9***)



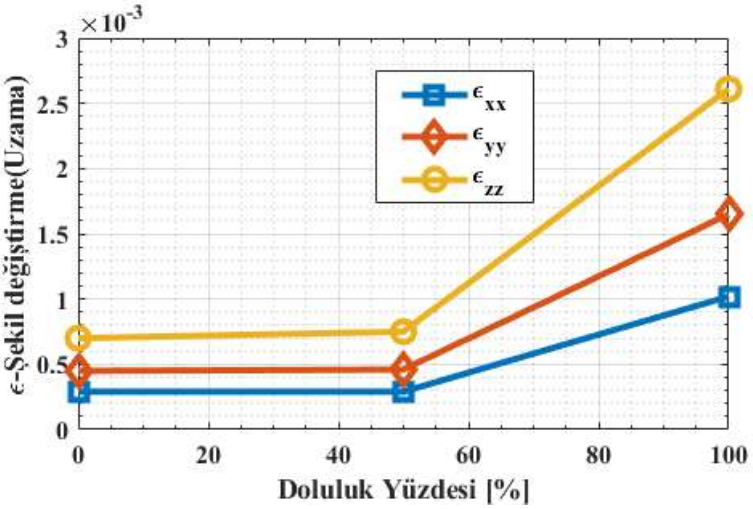
Şekil 7.16. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-1,7,9***)

7.3. Westergaard Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizlerin Sonuçları

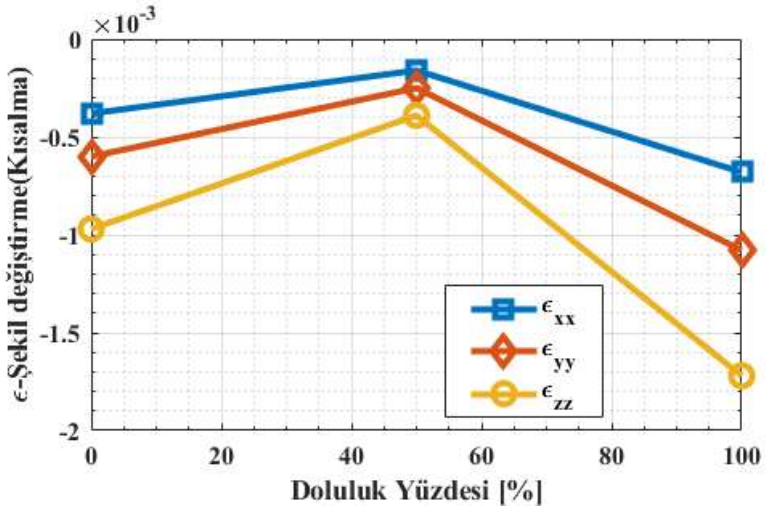
Sıvı-yapı etkileşimi için dikkate alınan Westergaard yaklaşımıyla toplam üç model için (**Model-2,4,6**) zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, geliştirilen yazılım ile yapılmıştır. Doluluk oranlarına göre yer değiştirme, şekil değiştirme, gerilme sonuçları aşağıdaki grafiklerde (Şekil 7.17-7.24) verilmektedir.



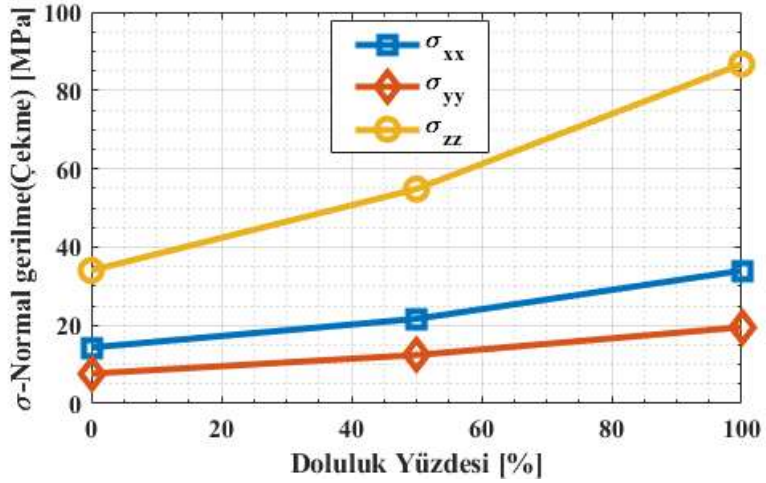
Şekil 7.17. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-2,4,6***)



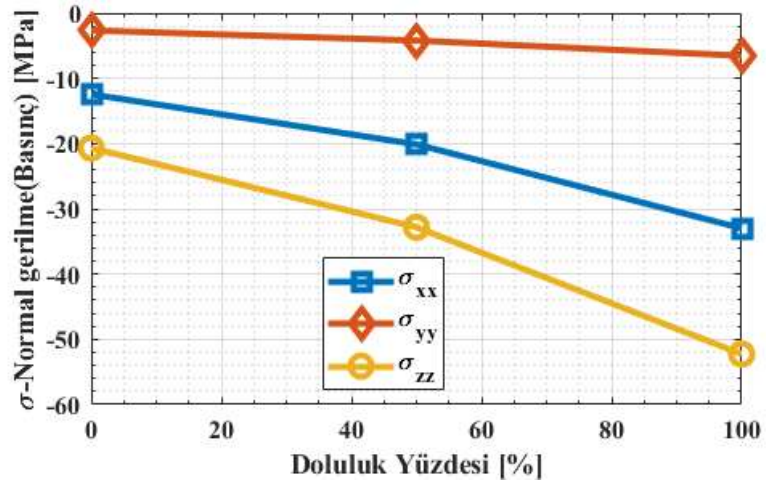
Şekil 7.18. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), (***Model-2,4,6***)



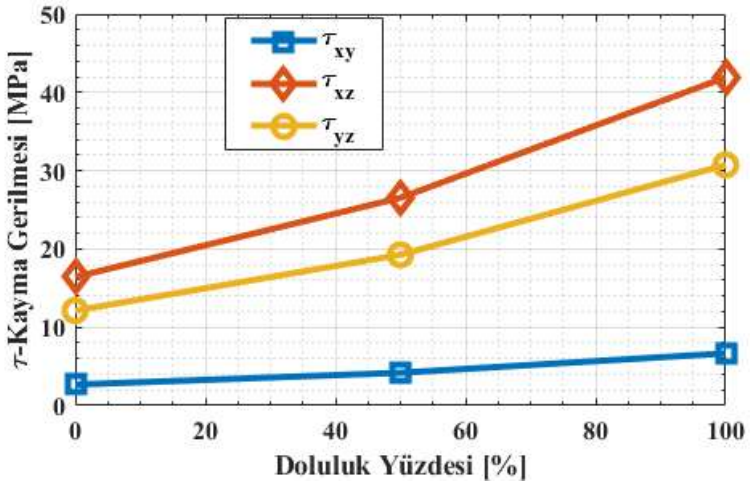
Şekil 7.19. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), (***Model-2,4,6***)



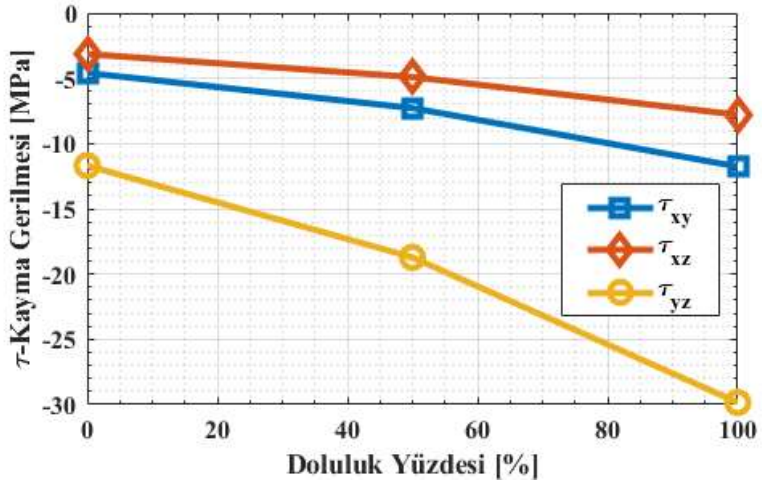
Şekil 7.20. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), (***Model-2,4,6***)



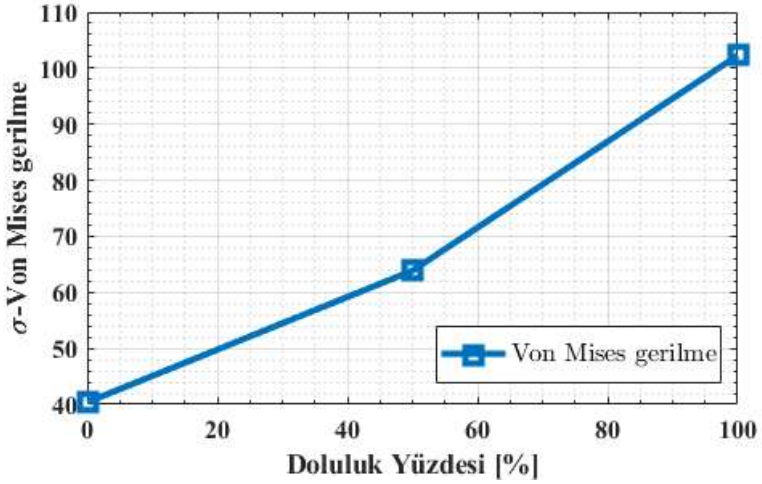
Şekil 7.21. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), (***Model-2,4,6***)



Şekil 7.22. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (pozitif), (***Model-2,4,6***)



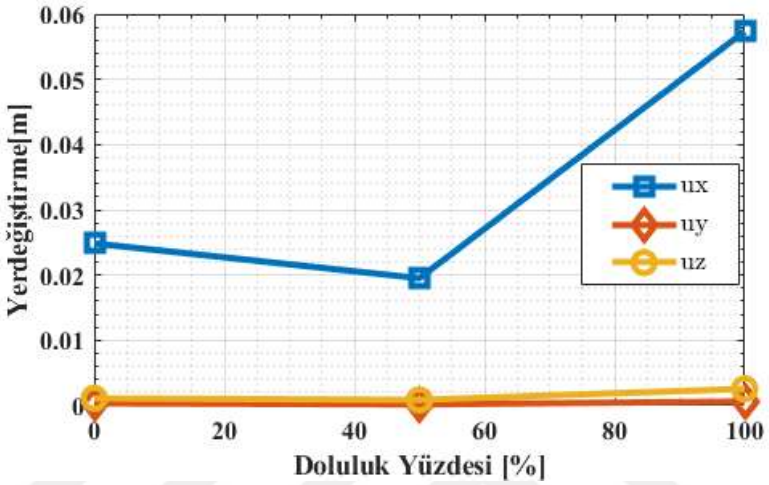
Şekil 7.23. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (negatif), (***Model-2,4,6***)



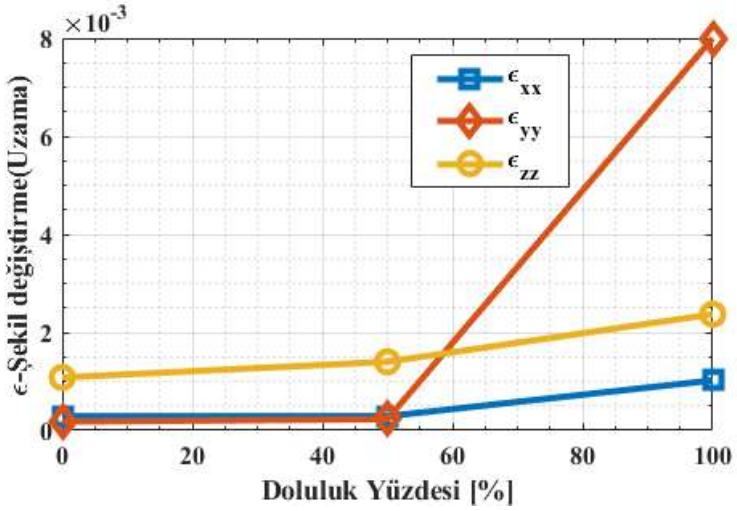
Şekil 7.24. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-2,4,6***)

7.4. DPH Yaklaşımına Göre Yapılan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizlerin Sonuçları

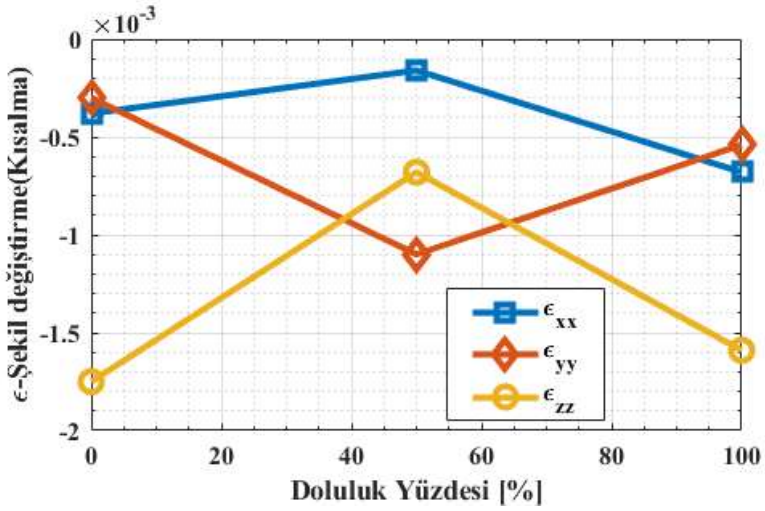
Sıvı-yapı etkileşimi için dikkate alınan DPH yaklaşımıyla toplam üç model için (**Model-2,8,10**) zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, geliştirilen yazılım ile yapılmıştır. Doluluk oranlarına göre yer değiştirme, şekil değiştirme, gerilme sonuçları aşağıdaki grafiklerde (Şekil 7.25-7.32) verilmektedir.



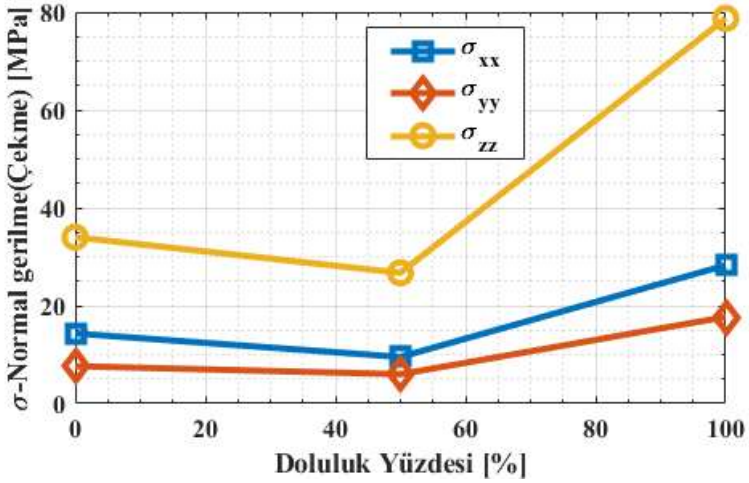
Şekil 7.25. Doluluk yüzdelerine göre yer değiştirmeler, (***Model-2,8,10***)



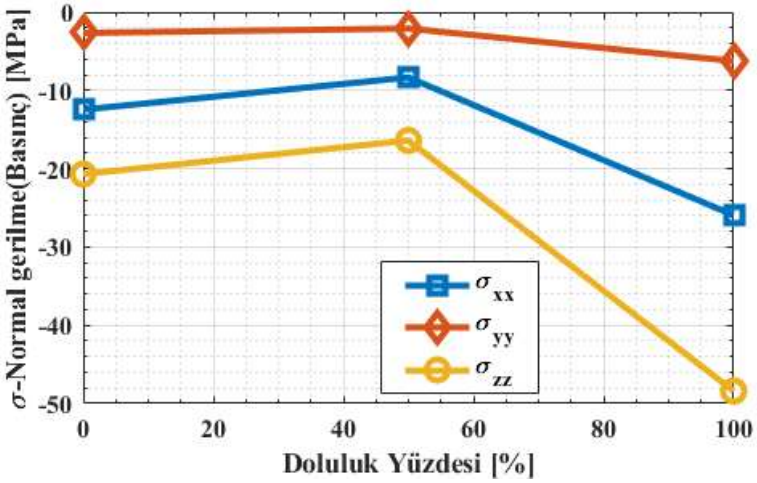
Şekil 7.26. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (uzama), (***Model-2,8,10***)



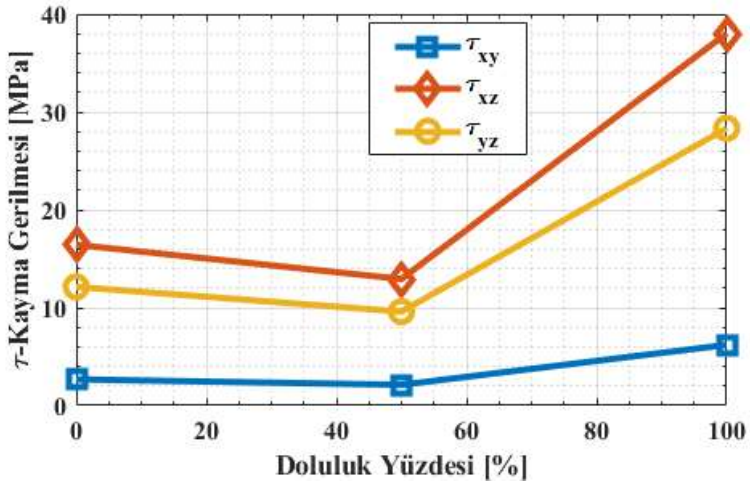
Şekil 7.27. Doluluk yüzdelerine göre şekil değiştirmeler (kısalma), (***Model-2,8,10***)



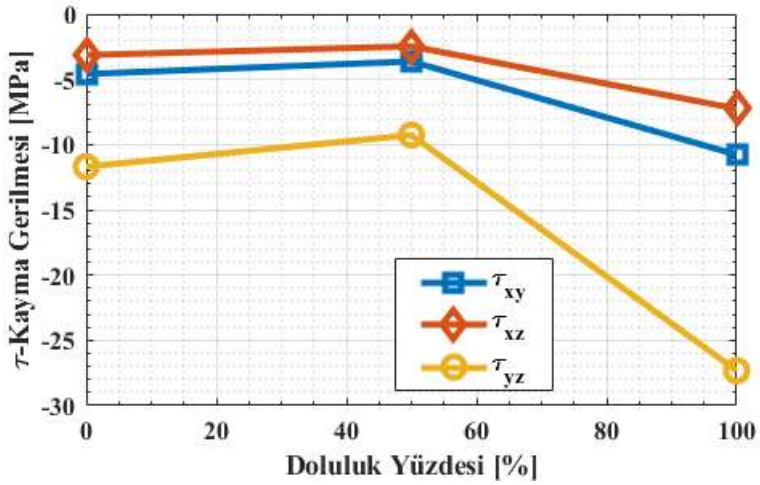
Şekil 7.28. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (çekme), (***Model-2,8,10***)



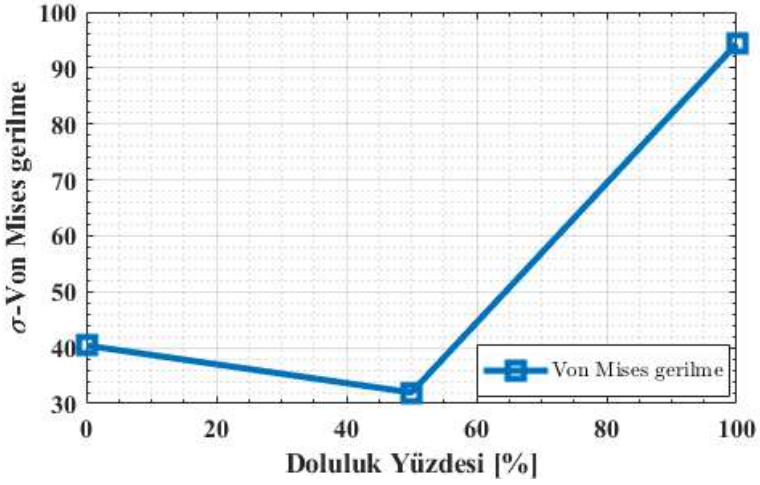
Şekil 7.29. Doluluk yüzdelerine göre normal gerilmeler (basınç), (***Model-2,8,10***)



Şekil 7.30. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (pozitif), (***Model-2,8,10***)



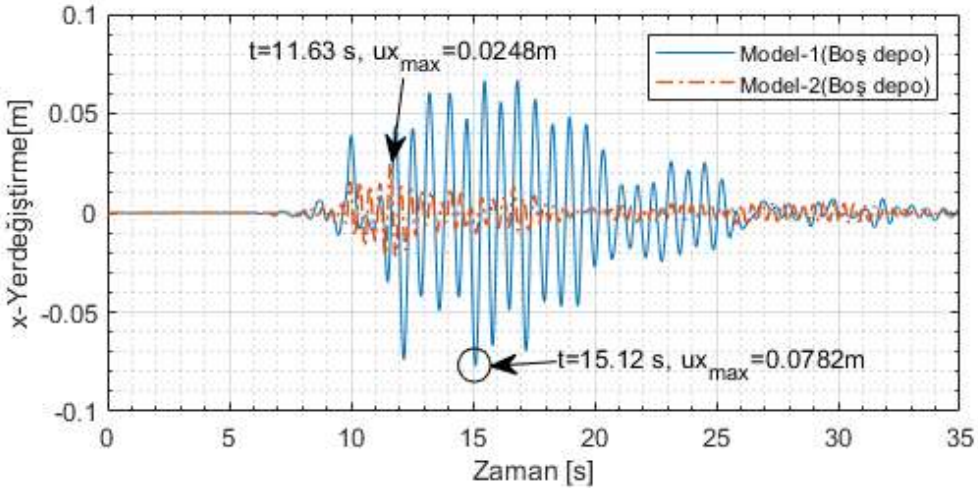
Şekil 7.31. Doluluk yüzdelerine göre kayma gerilmesi (negatif), (***Model-2,8,10***)



Şekil 7.32. Doluluk yüzdelerine göre Von Mises gerilmeleri, (***Model-2,8,10***)

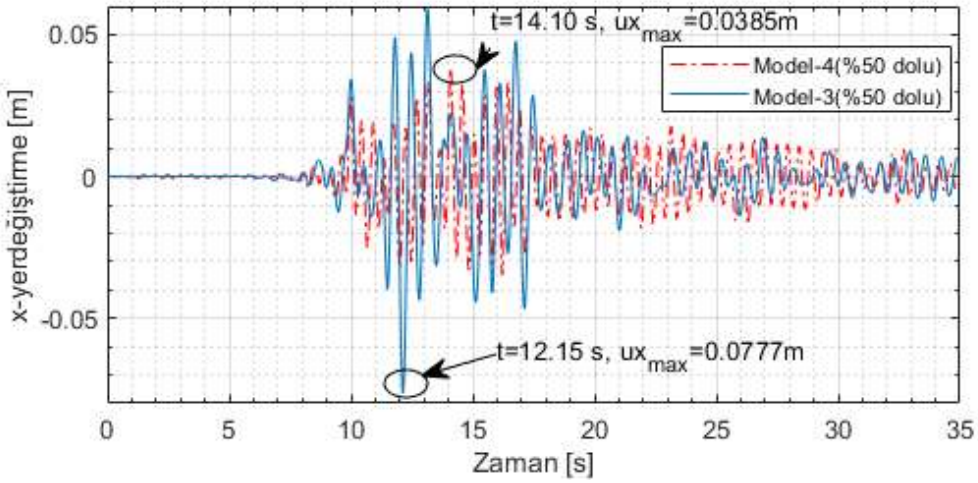
7.5. Zaman Tanım Alanında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Model-1 ve ***Model-2***'de elde edilen analiz sonuçlarından x yönündeki yatay yer değiştirmenin zamanla değişimi Şekil 7.33'de verilmektedir. Şekil 7.33'ten görüldüğü gibi doğrusal analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=15.12 saniyede 0.0782m iken, doğrusal olmayan analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=11.63 saniyede 0.0248m'dir. Buradan doğrusal ve doğrusal olmayan analizdeki x yönündeki en büyük yer değiştirmenin, Şekil 6.2'deki deprem ivme kaydının en büyük olduğu t=9.87 saniyeden sonra meydana geldiği görülmektedir. Doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin %68.28 azaldığı görülmektedir.



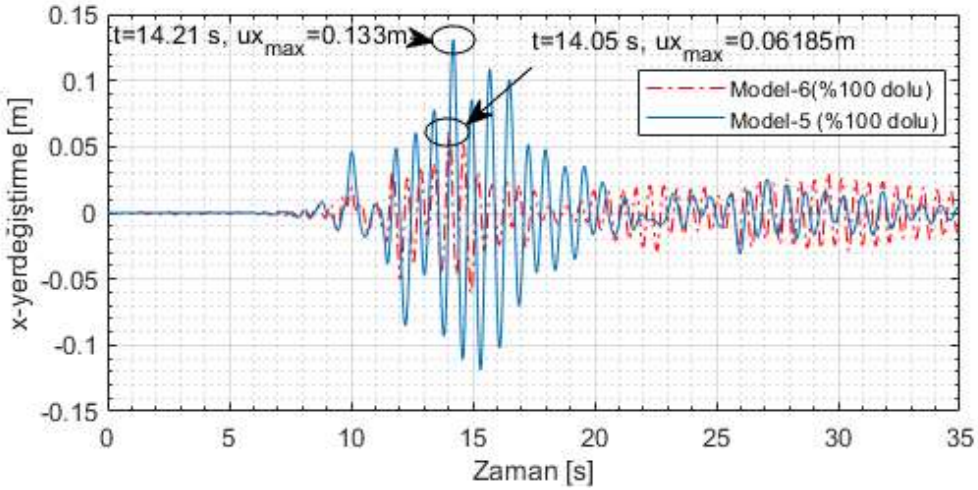
Şekil 7.33. ***Model-1 ve Model-2***'de hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi

Model-3 ve ***Model-4***'de elde edilen analiz sonuçlarından x yönündeki yatay yer değiştirmenin zamanla değişimi Şekil 7.34'de verilmektedir. Şekil 7.34'ten görüldüğü gibi doğrusal analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=12.15 saniyede 0.0777m iken, doğrusal olmayan analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=14.10 saniyede 0.0385m'dir. Buradan doğrusal ve doğrusal olmayan analizdeki x yönündeki en büyük yer değiştirmenin, Şekil 6.2'deki deprem ivme kaydının en büyük olduğu t=9.87 saniyeden sonra meydana geldiği görülmektedir. Doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin %50.45 azaldığı görülmektedir.



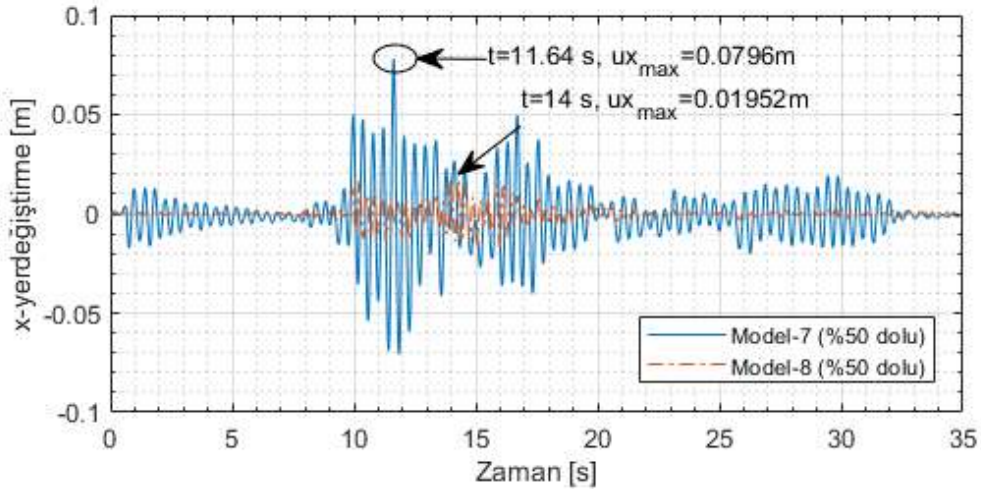
Şekil 7.34. ***Model-3 ve Model-4***'te hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi

Model-5 ve ***Model-6***'da elde edilen analiz sonuçlarından x yönündeki yatay yer değiştirmenin zamanla değişimi Şekil 7.35'de verilmektedir. Şekil 7.35'ten görüldüğü gibi doğrusal analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=14.21 saniyede 0.133m iken, doğrusal olmayan analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=14.05 saniyede 0.06185m'dir. Buradan doğrusal ve doğrusal olmayan analizdeki x yönündeki en büyük yer değiştirmenin, Şekil 6.2'deki deprem ivme kaydının en büyük olduğu t=9.87 saniyeden sonra meydana geldiği görülmektedir. Doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin %53.49 azaldığı görülmektedir.



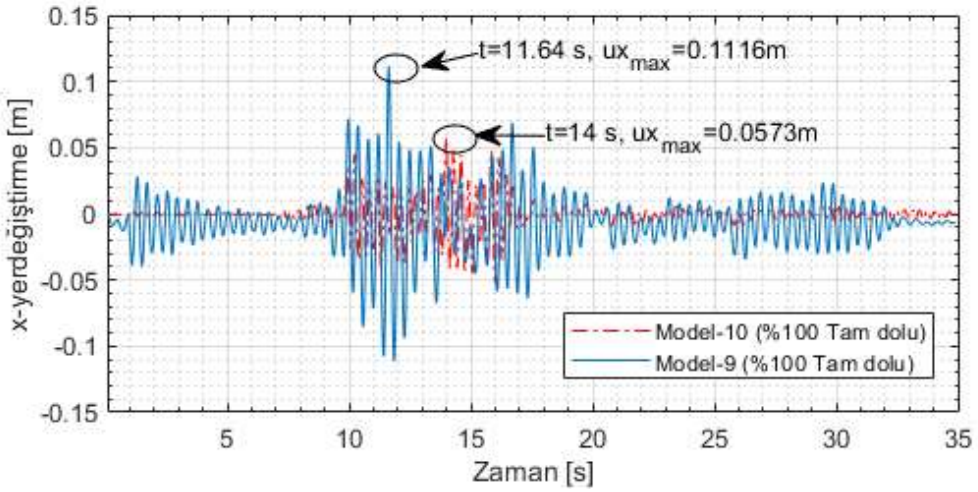
Şekil 7.35. ***Model-5 ve Model-6***'da hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi

Model-7 ve ***Model-8***'de elde edilen analiz sonuçlarından x yönündeki yatay yer değiştirmenin zamanla değişimi Şekil 7.36'da verilmektedir. Şekil 7.36'dan görüldüğü gibi doğrusal analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=11.64 saniyede 0.0796m iken, doğrusal olmayan analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=14 saniyede 0.01952m'dir. Buradan doğrusal ve doğrusal olmayan analizdeki x yönündeki en büyük yer değiştirmenin, Şekil 6.2'deki deprem ivme kaydının en büyük olduğu t=9.87 saniyeden sonra meydana geldiği görülmektedir. Doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin %75.47 azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.36. ***Model-7 ve Model-8***'de hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi

Model-9 ve ***Model-10***'da elde edilen analiz sonuçlarından x yönündeki yatay yer değiştirmenin zamanla değişimi Şekil 7.3'de verilmektedir. Şekil 7.3e'den görüldüğü gibi doğrusal analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=11.64 saniyede 0.1116m iken, doğrusal olmayan analizde x yönündeki en büyük yer değiştirme t=14 saniyede 0.0573m'dir. Buradan doğrusal ve doğrusal olmayan analizdeki x yönündeki en büyük yer değiştirmenin, Şekil 6.2'deki deprem ivme kaydının en büyük olduğu t=9.87 saniyeden sonra meydana geldiği görülmektedir. Doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin %48.65 azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.37. ***Model-9 ve Model-10***'da hesaplanan x yönündeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi

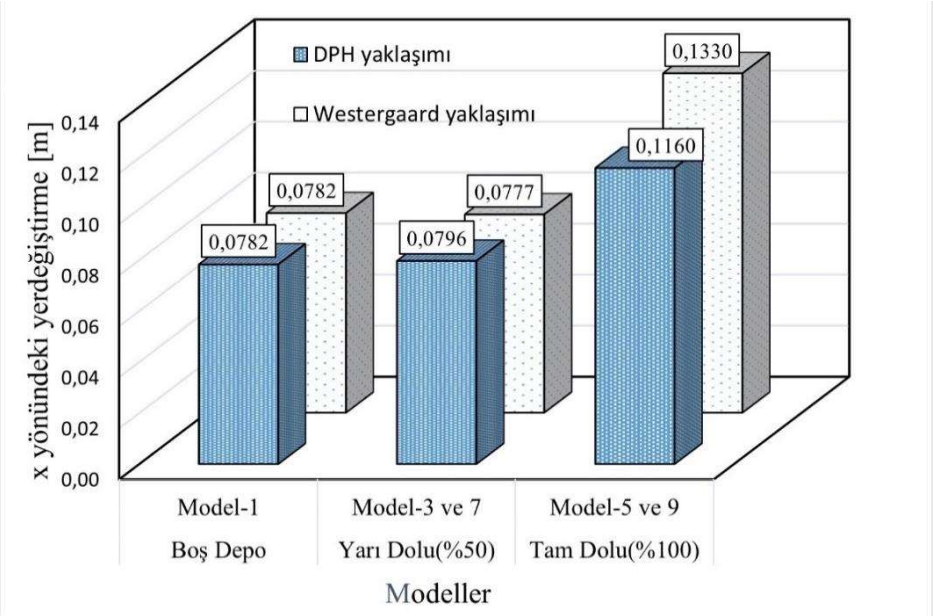
7.6. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerine Göre Karşılaştırmalar

7.6.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizler

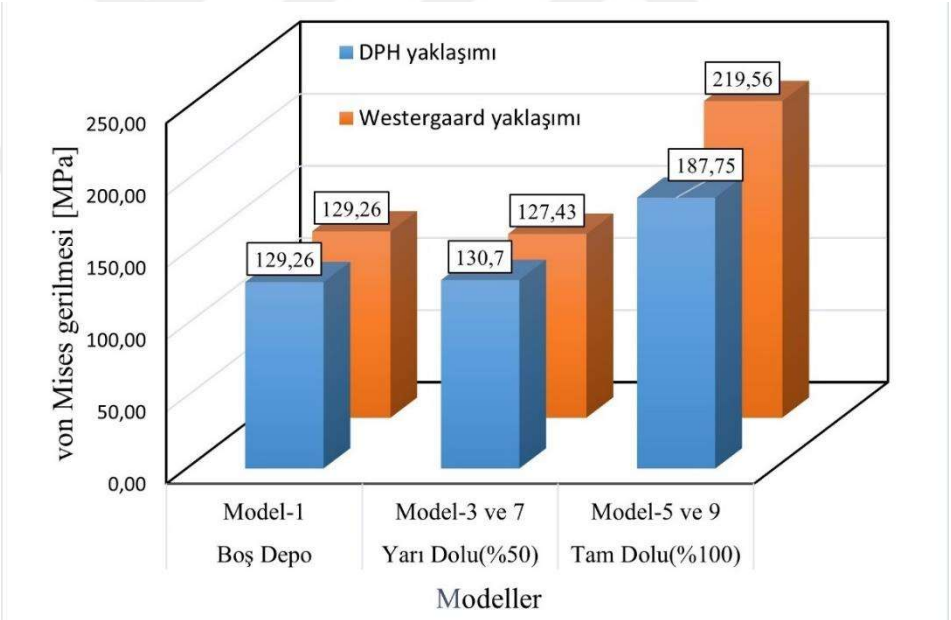
Tablo 7.1. ve Şekil 7.38 incelendiğinde Westergaard yaklaşımı ve DPH yaklaşımı dikkate alındığında deponun yarı dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında +%2.45 fark olduğu, tam dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%12.78 fark olduğu görülmektedir.

Tablo 7.1. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim yaklaşımlarına göre zaman tanım alanında doğrusal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	Westergaard yaklaşımı	DPH Yaklaşımı	Doluluk oranı (%)	Fark (%)
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0777	0.0796	50	+2.45
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.1330	0.1160	100	-12.78
En büyük Von Mises gerilmesi (MPa)	127.43	130.7	50	+2.57
En büyük Von Mises gerilmesi (MPa)	219.56	187.75	100	-14.48



Şekil 7.38. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler



Şekil 7.39. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler

Ancak Şekil 7.34 ve Şekil 7.36 incelendiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin Westergaard yaklaşımında (***Model-3***) t=12.15 saniyede, DPH yaklaşımında **(Model-7)** ise t=11.64 saniyede gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 7.34 ve Şekil 7.36 beraber incelendiğinde x yönündeki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi de farklı olmaktadır. Benzer şekilde deponun tam dolu olması

durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmenin Westergaard yaklaşımında (***Model-5***) t=14.21 saniyede, DPH yaklaşımında (***Model-9***) ise t=11.64 saniyede gerçekleştiği görülmektedir. Yine Şekil 7.35 ve Şekil 7.37 incelendiğinde x yönündeki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi farklı olmaktadır. Şekil 7.38'den de görüldüğü gibi Westergaard yaklaşımı dikkate alınarak yapılan analizlerde, x yönündeki en büyük yer değiştirmeler boş ve yarı dolu durumda biribirine yakındır. Yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yer değiştirme, tam dolu durumdakinin yaklaşık %58.4'ü kadardır. Yine Şekil 7.38 'den de görüldüğü gibi DPH Yöntemi dikkate alınarak yapılan analizlerde, x yönündeki en büyük yer değiştirmeler boş ve yarı dolu durumda biribirine yakındır.Yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yer değiştirme, tam dolu durumdakinin yaklaşık %68.6'sı kadardır.

Betonarme ayaklı su depolarının tasarımı açısından bakıldığında ise yatay ötelenmelerin $\Delta_{imax} \leq 0.114m$ şartını sağlaması gerekmektedir (Livaoğlu, 2005). Şekil 7.38 incelendiğinde boş durumda ve Westergard yaklaşımına göre yapılan analizlerde yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenme değerinin sırasıyla 0.0782m, 0.0777m ile bu şartı sağladığı, tam dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenmenin 0.133m ile bu şartı sağlamadığı görülmektedir. Bunun Westergaard yaklaşımının yapmış olduğu kabullerden(salınım etkisinin dikkate alınmaması) kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak Şekil 7.38'de DPH yaklaşımına göre yapılan analizlerde yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenme değerinin 0.796m ile bu şartı sağladığı, tam dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenmenin de 0.116m ile bu şartı sağladığı görülmektedir. DPH yaklaşımı ile parçacığın doğrusal olmayan hareketi suyun sönümleme etkisini de modelleyebildiği için şartın daha rahat sağlandığı düşünülmektedir.

Şekil 7.39'den görüldüğü gibi Westergaard yaklaşımı dikkate alınarak yapılan analizlerde, von Mises gerilmeleri boş ve yarı dolu durumda biribirine yakındır. Yarı dolu durumda en büyük von Mises gerilmesi, tam dolu durumdakinin yaklaşık %58.04'ü kadardır. Yine Şekil 7.39'dan da görüldüğü gibi DPH Yöntemi dikkate alınarak yapılan analizlerde, von Mises gerilmeleri boş ve yarı dolu durumda biribirine yakındır.Yarı dolu durumda en büyük von Mises gerilmesi, tam dolu durumdakinin yaklaşık %69.76'sı kadardır. Tablo 7.1. incelendiğinde Westergaard yaklaşımı ve DPH yaklaşımı dikkate alındığında deponun yarı dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında +%2.57 fark olduğu, tam dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%14.48 fark olduğu görülmektedir.

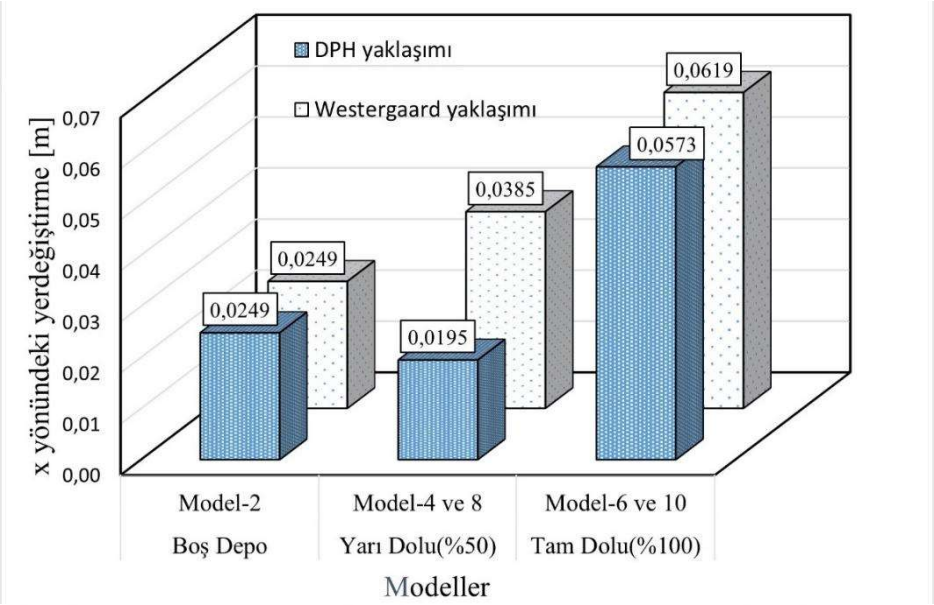
Şekil 7.39'da verilen ortalama gerilmeyi ifade eden von Mises gerilmeleri, doğrusal analizlerde betonarme inşaat demiri S420'nin akma değeri olan f_y=420MPa değerinin çok altında kaldığı görülmektedir.

7.6.2. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizler

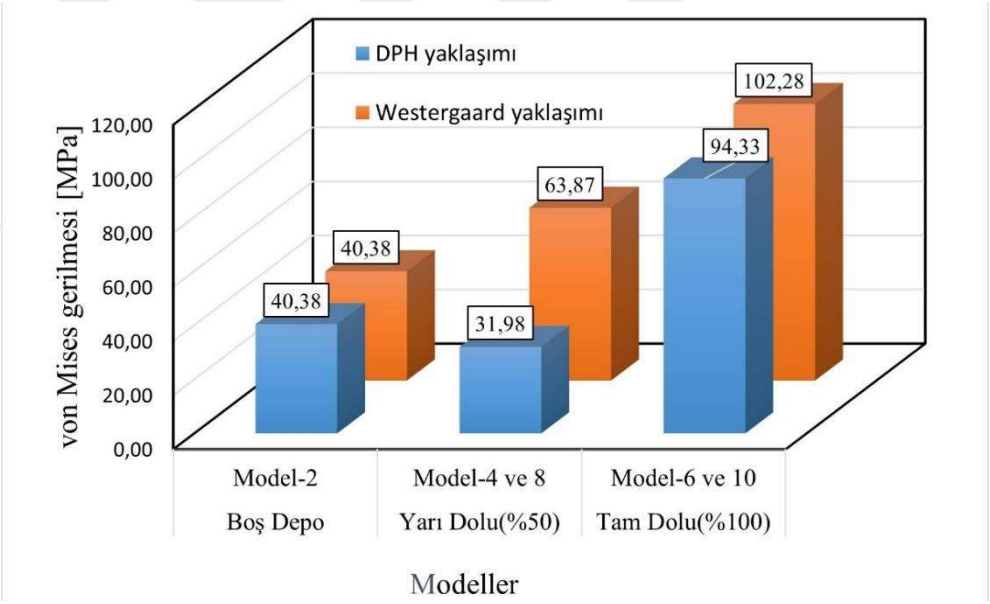
Tablo 7.2. ve Şekil 7.40 incelendiğinde Westergaard yaklaşımı ve DPH yaklaşımı dikkate alındığında deponun yarı dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%49.35 fark olduğu, tam dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%7.43 fark olduğu görülmektedir. Ancak Şekil 7.34 ve Şekil 7.36 incelendiğinde x yönündeki en büyük yer değiştirmenin Westergaard yaklaşımında (***Model-4***) t=14.10 saniyede, DPH yaklaşımında **(Model-8)** ise t=14 saniyede gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 7.34 ve Şekil 7.36 beraber incelendiğinde x yönündeki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi de farklı olmaktadır. Benzer şekilde deponun tam dolu olması durumunda (Şekil 7.35 ve Şekil 7.37) x yönündeki en büyük yer değiştirmenin Westergaard yaklaşımında (***Model-6***) t=14.05 saniyede, DPH yaklaşımında (***Model-10***) ise t=14 saniyede gerçekleştiği görülmektedir. Yine Şekil 7.35 ve Şekil 7.37 incelendiğinde x yönündeki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi farklı olmaktadır. Şekil 7.40'dan da görüldüğü gibi Westergaard yaklaşımı dikkate alınarak yapılan analizlerde, x yönündeki en büyük yer değiştirmeler boş ve yarı dolu durumda doğrusal analizde olduğu gibi biribirine çok yakın değildir.

Tablo 7.2. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim yaklaşımlarına göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	Westergaard yaklaşımı	DPH yaklaşımı	Doluluk oranı (%)	Fark (%)
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0385	0.0195	50	-49.35
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0619	0.0573	100	-7.43
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	63.87	31.98	50	-49.93
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	102.28	94.33	100	-7.77



Şekil 7.40. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler



Şekil 7.41. Doluluk oranlarına ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler

Yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yer değiştirme, tam dolu durumdakinin yaklaşık %63.11'i kadardır. Yine Şekil 7.40'dan da görüldüğü gibi DPH yaklaşımı dikkate alınarak yapılan analizlerde, x yönündeki en büyük yer değiştirmeler boş ve yarı dolu durumda doğrusal analizdeki gibi biribirine çok yakın değildir. Yarı

dolu durumda x yönündeki en büyük yer değiştirme, tam dolu durumdakinin yaklaşık %34.03'ü kadardır.

Betonarme ayaklı su depolarının tasarımı açısından bakıldığında ise yatay ötelenmelerin $\Delta_{imax} \leq 0.114m$ şartını sağlaması gerekmektedir (Livaoğlu, 2005).Şekil 7.40 incelendiğinde boş durumda ve Westergard yaklaşımına göre yapılan analizlerde yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenme değerinin sırasıyla 0.0249m, 0.0385m ile bu şartı sağladığı, tam dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenmenin 0.0619m ile bu şartı sağladığı görülmektedir. Şekil 7.40'da DPH yaklaşımına göre yapılan analizlerde yarı dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenme değerinin 0.0195m ile bu şartı sağladığı, tam dolu durumda x yönündeki en büyük yatay ötelenmenin de 0.0573m ile bu şartı sağladığı görülmektedir. DPH yaklaşımı ile parçacığın doğrusal olmayan hareketi suyun sönümleme etkisini de modelleyebildiği için şartın daha rahat sağlandığı düşünülmektedir.

Şekil 7.41'den görüldüğü gibi Westergaard yaklaşımı dikkate alınarak yapılan analizlerde, von Mises gerilmeleri boş ve yarı dolu durumda doğrusal analizdeki gibi biribirine çok yakın değildir. Yarı dolu durumda en büyük von Mises gerilmesi, tam dolu durumdakinin yaklaşık %62.44'ü kadardır. Yine Şekil 7.41'den de görüldüğü gibi DPH yaklaşımı dikkate alınarak yapılan analizlerde, von Mises gerilmeleri boş ve yarı dolu durumda biribirine doğrusal analizdeki gibi çok yakın değildir. Yarı dolu durumda en büyük von Mises gerilmesi, tam dolu durumdakinin yaklaşık %33.90'ı kadardır. Tablo 7.2. incelendiğinde Westergaard yaklaşımı ve DPH yaklaşımı dikkate alındığında deponun yarı dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında +%49.93 fark olduğu, tam dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%7.77 fark olduğu görülmektedir.

Şekil 7.41'de verilen ortalama gerilmeyi ifade eden von Mises gerilmeleri, doğrusal olmayan analizlerde betonarme inşaat demiri S420'nin akma değeri olan f_y=420MPa değerinin çok altında kaldığı görülmektedir.

7.7. Taşıyıcı Sistem Davranışına Göre Karşılaştırmalar

7.7.1. Westergaard Yaklaşımının Dikkate Alındığı Analizler

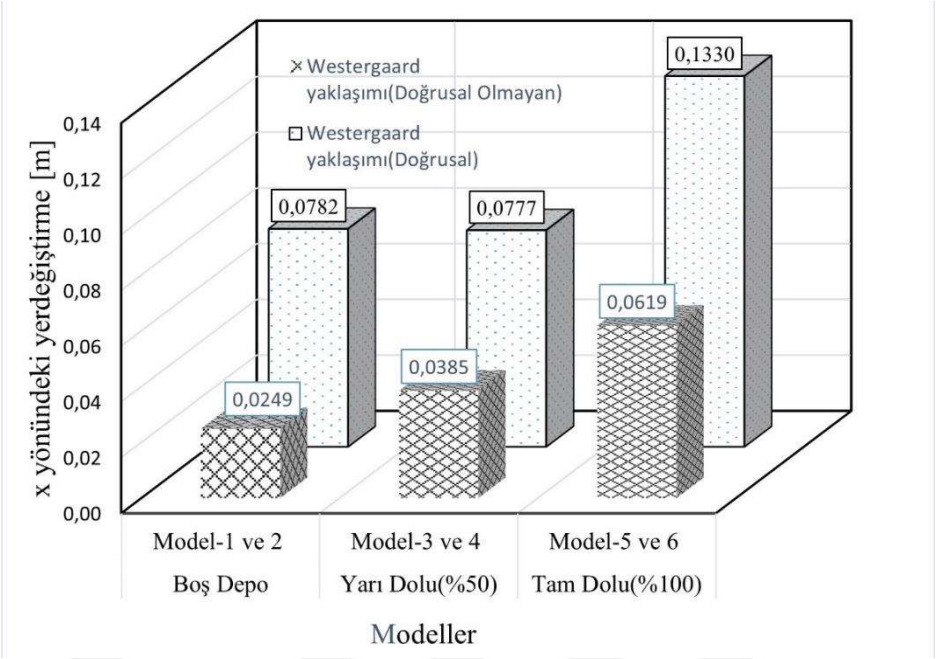
Sıvı-yapı etkileşim sistemlerinden olan Westergaard yaklaşımı dikkate alınarak zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırması Şekil 7.42 ve 7.43'de verilmektedir. Ayrıca Tablo 7.3'de analizler arasındaki değişim yüzdeleri verilmektedir.

Tablo 7.3. Doluluk oranlarına ve Westergaard yaklaşımına göre zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması

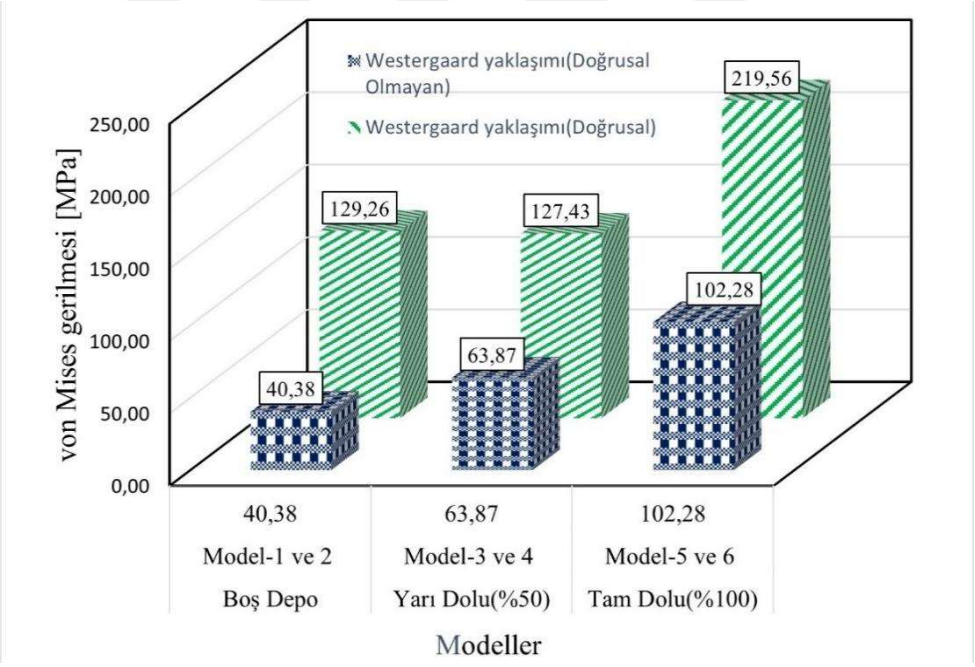
	Doğrusal Analiz	Doğrusal Olmayan Analiz	Doluluk oranı (%)	Fark (%)
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0782	0.0249	0	-68.15
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0777	0.0385	50	-50.45
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.1330	0.0619	100	-53.33
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	129.26	40.38	0	-68.76
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	127.43	63.87	50	-49.87
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	219.56	102.28	100	-53.42

Tablo 7.3 ve Şekil 7.42 incelendiğinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde, deponun boş olması durumunda, x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%68.15 fark olduğu, yarı dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%50.45 fark olduğu, tam dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%53.33 fark olduğu görülmektedir.

Tablo 7.3 ve Şekil 7.43 incelendiğinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde, deponun boş olması durumunda, en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%68.76 fark olduğu, yarı dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%49.87 fark olduğu, tam dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%53.42 fark olduğu görülmektedir.



Şekil 7.42. Doluluk oranlarına ve Westergaard yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler



Şekil 7.43. Doluluk oranlarına ve Westergaard yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler

7.7.2. DPH Yaklaşımının Dikkate Alındığı Analizler

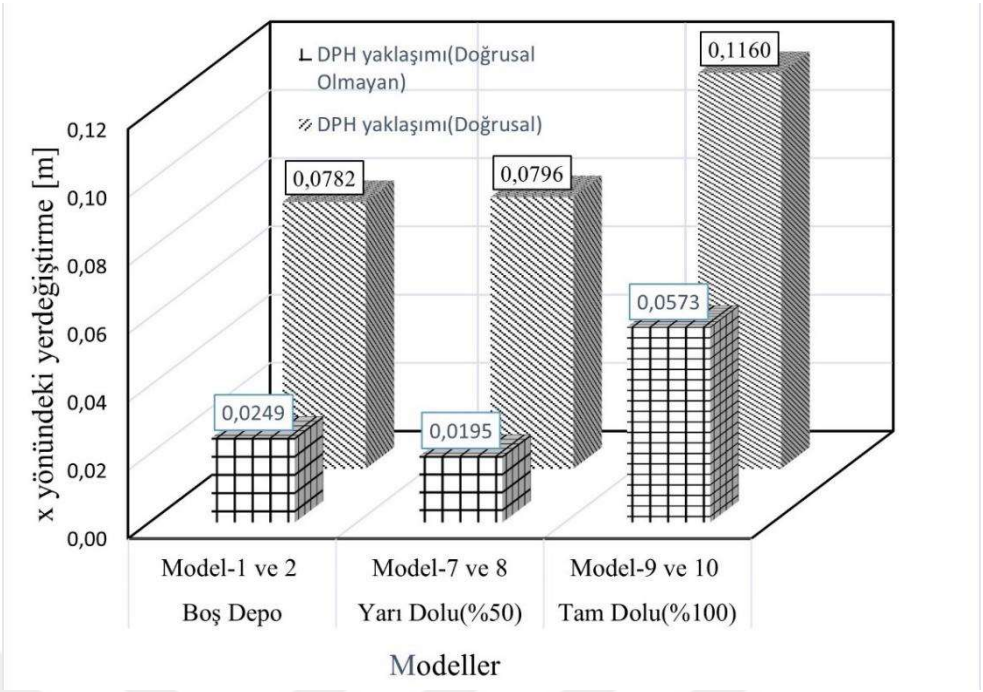
Sıvı-yapı etkileşim sistemlerinden olan DPH yaklaşımı dikkate alınarak zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırması Şekil 7.44 ve 7.45'de verilmektedir. Ayrıca Tablo 7.4'de analizler arasındaki değişim yüzdeleri verilmektedir.

Tablo 7.4. Doluluk oranlarına ve DPH yaklaşımına göre zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırılması

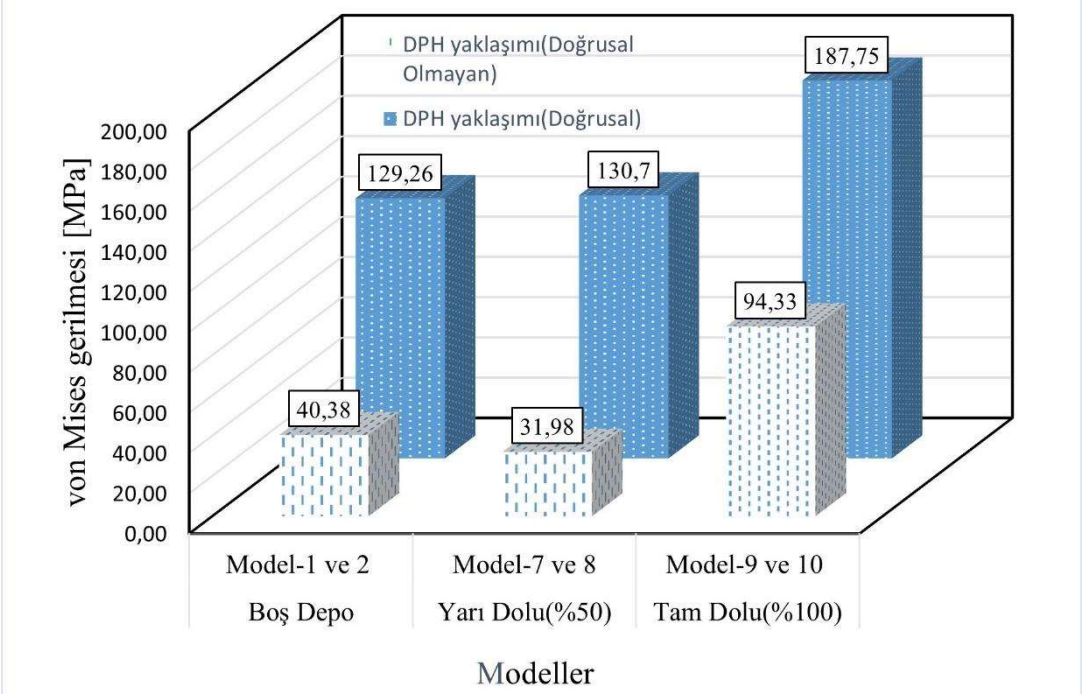
	Doğrusal Analiz	Doğrusal Olmayan Analiz	Doluluk oranı (%)	Fark (%)
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0782	0.0249	0	-68.15
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.0796	0.0195	50	-75.50
x yönündeki en büyük yer değiştirme(m)	0.116	0.0573	100	-50.60
En büyük Von Mises gerilmesi(Mpa)	129.26	40.38	0	-68.76
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	130.7	31.98	50	-75.53
En büyük Von Mises gerilmesi (Mpa)	187.75	94.33	100	-49.76

Tablo 7.4 ve Şekil 7.44 incelendiğinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde, deponun boş olması durumunda, x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%68.15 fark olduğu, yarı dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%75.50 fark olduğu, tam dolu olması durumunda x yönündeki en büyük yer değiştirmeler arasında -%50.60 fark olduğu görülmektedir.

Tablo 7.4 ve Şekil 7.45 incelendiğinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde, deponun boş olması durumunda, en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%68.76 fark olduğu, yarı dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%75.53 fark olduğu, tam dolu olması durumunda en büyük von Mises gerilmeleri arasında -%49.76 fark olduğu görülmektedir.



Şekil 7.44. Doluluk oranlarına ve DPH yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük x yönündeki yer değiştirmeler



Şekil 7.45. Doluluk oranlarına ve DPH yaklaşımına göre oluşturulmuş modellerin zaman tanım alanında doğrusal olan ve olmayan analizlerinde elde edilmiş en büyük von Mises gerilmeler

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım ve buna bağlı oluşturulan on model üzerinde gerçekleştirilen analizlerin tümünden çıkartılabilecek sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

1. Betonarme ayaklı su deposunun çeşitli sıvı-yapı etkileşim sistemlerine göre zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri bu çalışma kapsamında geliştirilen yazılım ile kişisel bilgisayarlarda yapılabilmektedir. Bu yazılım sayesinde çözümler daha hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca bu yazılım kullanılarak yüksek bilgisayar kapasitesi zorunluluğu büyük ölçüde ortadan kaldırılmış olmaktadır.
2. Bu yazılım her türlü çözümlemede (doğrusal veya doğrusal olmayan) sonucu tamamlayabilmekte, bu yönüyle var olan yazılımlara göre öne çıkmaktadır.
3. Geliştirilen yazılım sayesinde ayaklı deponun, deprem yer hareketi etkisindeki davranışı üç boyutlu olarak gerçekleştirilebilmektedir. Her bir zaman adımındaki yer değiştirme, hız, ivme, şekil değiştirme ve gerilme değerleri elde edilebilmekte ve grafiğe dökülebilmektedir.
4. Yazılımın geliştirilmesi sırasında SEY'ni esas alan MATLAB Kısmi Diferansiyel Araç Kutusu kullanılmıştır. Bu araç kutusu ile malzeme mekanik özellikleri, üç boyutlu katı model, kütle ve rijitlik matrisleri hazırlanmaktadır.
5. Geliştirilen yazılımın doğrulanması için literatürde yer alan tek serbestlik dereceli doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda literatürdeki çalışmalarla tam uyumlu sonuçların elde edildiği görülmüştür.
6. Ayaklı deponun sonlu elemanlar modellemesinin doğrulanması için ANSYS yazılımında ve geliştirilen yazılımda serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Burada da yüzde 5'ten az hata ile mod şekilleri ve frekanslar elde edilmiştir.
7. Depo taşıyıcı sistemine ait kütle ve rijitlik matrislerinin büyük boyutlarda olmasından dolayı dinamik hesaplamaların hızlı yapılabilmesi için dinamik yoğunlaştırma gerçekleştirilmiştir. Dinamik yoğunlaştırma ile ilgili de doğrulama işlemleri yapılmıştır. Dinamik yoğunlaştırmanın hesap süresini önemli ölçüde kısalttığı görülmüştür.

8. Taşıyıcı sistemin zaman tanım alanında doğrusal çözümlemesinde sönüm matrisinin oluşturulması için Rayleigh sönüm dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan çözümlemede ise eşdeğer viskoz sönüm dikkate alınmıştır.
9. Doğrusal ve doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemi kullanılmıştır. Böylece çok daha etkin çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Böylece iterasyona bağlı analizler elimine edilmiştir.
10. Betonarme ayaklı su deposunun deprem yer hareketi etkisindeki davranışını, sıvı-yapı etkileşim sistemi önemli ölçüde etkilemektedir.
11. DPH yaklaşımı ile suyun doğrusal olmayan modellemesi yapılarak gerçek duruma daha yakın davranış elde edilmektedir. Bu çalışmada hidrodinamik basınçların elde edilmesinde DPH yaklaşımını esas alan Dualsphyics yazılımı kullanılmıştır.
12. Dualsphyics yazılımı ile ayaklı su deposunun hazne içerisinde oluşan hidrodinamik basınçları zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Hazne içindeki her bir düğüm noktasına ait bu basınçlar dinamik analizde dış kuvvet olarak etki ettirilmiştir.
13. Ayaklı deponun boş, yarım dolu ve tam dolu su seviyeleri deponun dinamik davranışını zamana bağlı olarak değiştirebilmektedir.
14. Tüm analiz modelleri incelendiğinde, deprem yer hareketi etkisi altındaki ayaklı deponun en büyük yer değiştirmeleri, deponun tam dolu olması durumunda gerçekleşmektedir.
15. Depo içindeki sıvının davranışının Westergaard yaklaşımına göre doğrusal olarak modellenmesinde elde edilen yatay yer değiştirme, sıvının doğrusal olmayan davranışını esas alan DPH yaklaşımına göre modellemesinde elde edilen yatay yer değiştirmeden daha fazla olmaktadır. Bu durum salınım etkisine atfedilmektedir.
16. Ayaklı deponun sıvı kısmının hem Westergaard yaklaşımına hem de DPH yaklaşımına göre dikkate alınması durumunda, taşıyıcı sistemin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarının, doğrusal analiz sonuçlarına göre büyük oranda azalma gösterdiği görülmektedir.
17. Ayaklı depo üzerinde yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde şartnamede yer alan yatay yer değiştirme sınırı ($\Delta_{imax} \leq 0.114m$), Westergaard yaklaşımının dikkate alındığı doğrusal analizde deponun tam dolu

durumunda aşılmıştır. Bunun haricindeki analizlerde hep bu şartname sınırının altında değerler elde edilmiştir.

18. Ayaklı depo üzerinde yapılan tüm analizlerde malzeme dayanım sınırları aşılmamıştır. Doğrusal olmayan analizlerde gerilmelerin, doğrusal analize göre büyük oranda düştüğü görülmüştür. Bu sonuç da daha ekonomik kesitli ayaklı depoların yapılabileceğini göstermektedir. Böylece daha az inşaat malzemesi kullanılarak çevresel etkiler azaltılabilmektedir.
19. Tez çalışması kapsamında yer almayan üç boyutlu deprem etkisindeki davranışlar için analizler, geliştirilen yazılım ile yapılabilir.
20. Farklı sıvı-yapı etkileşim sistemleri ile DPH yaklaşımı karşılaştırılabilir.
21. Deprem yer hareketi etkisindeki ayaklı depoda oluşan dalga yüksekliği için $d_{max} \leq 0.2R$ ve $d_{max} \leq 0.2h$ şartlarının sağlanması gerekmektedir. Eğer bu şartlar sağlanmaz ise doğrusal olmayan etkilerin dikkate alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Akgül, K. (2014). *Nonlineer sıvı-yapı-zemin etkileşiminin modellenmesi ve silindirik tankların dinamik davranışlarının değerlendirilmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

ANSYS. (2016). ANSYS, Swanson Analysis System, US. Erişim: 15 Mayıs 2022 https://www.ansys.com/

Argyris, J. H., & Kelsey, S. (1960). Energy Theorems and Structural Analysis. *Energy Theorems and Structural Analysis*. doi:10.1007/978-1-4899-5850-1

Armouti, N. (2015). *Earthquake Engineering: Theory and Implementation with the 2015 International Building Code*: McGraw Hill Professional.

Asthana, A., & Sridhar, P. (1997). *"Earthquake analysis of elevated water tanks using SESAM".* Paper presented at the 4th International Conference on civil Engineering.

Aydoğan, M. (2020). *Bir su deposunun taşıyıcı sisteminin karbon fiber malzeme ile güçlendirilmesi.* (Yüksek Lisans). İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Ayman, Moustafa Moufid, K., & Fadzli. (2021). Seismic vulnerability assessment of elevated water tanks with variable staging pattern incorporating the fluid-structure interaction. *Structures, 34*, 61-77. doi:https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.062

Barton, D., & Parker, J. (1987). Finite element analysis of the seismic response of anchored and unanchored liquid storage tanks. *Earthquake engineering & structural dynamics, 15*(3), 299-322.

Bathe, K.-J., & Wilson, E. L. (1976). *Numerical methods in finite element analysis*: Prentice Hall.

Bouc, R. (1967). *"Forced vibrations of mechanical systems with hysteresis".* Paper presented at the Proc. of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillations, Prague, 1967.

Butcher, J. C. (1963). Coefficients for the study of Runge-Kutta integration processes. *Journal of the Australian Mathematical Society, 3*(2), 185-201.

Chatzi, E., & Klis, R. (2013). Nonlinear System Identification using a UKF enhanced ERA framework. *Safety, Reliability, Risk and Life-cycle Performance of Structures and Infrastructures*, 1893-1900.

Chen, W.-F., & Han, D.-J. (2007). *Plasticity for structural engineers*: J. Ross publishing.

Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of structures*: Pearson Education India.

Cimellaro, G. P., & Marasco, S. (2018). *Introduction to dynamics of structures and earthquake engineering* (Vol. 45): Springer.

Cossins, P. J. (2010). *Smoothed Particle Hydrodynamics.* (Ph.D. thesis). University of Leicester, England.

Crespo, A. J. C., & Gómez-Gesteira, M. (2007). Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods. *scholars.northwestern.edu*.

Demirören, R. (2005). *Ayaklı betonarme su depolarının tasarım kuralları ve deprem etkisindeki davranışı.* (Yüksek Lisans). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Dieterman, H. (1986). An analytically derived lumped-impedance model for the dynamic behaviour of a watertower. *Archive of Applied Mechanics, 56*(4), 265-280.

Doğangün, A. (1989). *Betonarme sıvı depoları ve projelendirme ilkeleri.* (Yüksek Lisans). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Doğangün, A. (1995). *Dikdörtgen kesitli su depolarının sonlu elemanlar yöntemiyle depo-sıvı-zemin etkileşimini dikkate alarak analitik yöntemlerle karşılaştırmalı deprem hesabı.* (Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Doğangün, A., Ayvaz, Y., & Durmuş, A. (1997). *"Farklı ayaklara sahip su depolarının deprem davranışları".* Paper presented at the Türkiye İnşaat Mühendisliği14.TeknikKongresi, İstanbul.

Doğangün, A., Durmuş, A., & Ayvaz, Y. (1997). Earthquake analysis of flexible rectangular tanks by using the Lagrangian fluid finite element. *European Journal of Mechanics. A, Solids, 16*, 165-182.

Doğangün, A., & Livaoglu, R. (2004). Hydrodynamic pressures acting on the walls of rectangular fluid containers. *Structural engineering and mechanics: An international journal, 17*(2), 203-214.

Donea, J., Giuliani, S., & Halleux, J.-P. (1982). An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions. *Computer methods in applied mechanics and engineering, 33*(1-3), 689-723.

Du, Y., Li, H., Ma, Y., & Jin, J. (2006). *Behaviour of laminated rubber bearing under low and its effect on the dynamic reliability of isolated structure.* Paper presented at the International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.

DualSPHysics. (2023). DualSPHysics. Erişim: 15 Mayıs 2022 https://dual.sphysics.org/sphysics-project/

Dutta, S., Jain, S., & Murty, C. (2000). Assessing the seismic torsional vulnerability of elevated tanks with RC frame-type staging. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19*(3), 183-197.

Dutta, S., Mandal, A., & Dutta, S. C. (2004). Soil–structure interaction in dynamic behaviour of elevated tanks with alternate frame staging configurations. *Journal of sound and vibration, 277*(4-5), 825-853.

e-içişleri projesi. (2023,15.05.2022). Erişim: 15 Mayıs 2022 https://www.e-icisleri.gov.tr/Anasayfa/MulkiIdariBolumleri.aspx

Epperson, J. (2013). Interpolation and approximation. *An Introduction to numerical methods and analysis. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons*, 171-262.

Ermutlu, E. (1964). Bursa'da yıkılan su kulesi hakkında mülahazalar. *DSİ Teknik Bülteni, 0*, 31-54.

Etemadi, A. (2015). *Lineer olmayan kayma çerçeveleri için yaklaşık kat arası yer değiştirme spektrumu.* (Doktora tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.

Facchini, L., & Betti, M. (2014). An efficient Bouc & Wen approach for seismic analysis of masonry tower. *Frattura ed Integrità Strutturale, 8*(29), 139-149.

Gallagher, R. H. (1975). *Finite Element Analysis Fundamentals." Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey*.

Gareane, A., Algreane, G., Osman, S., Karim, O., & Kasa, A. (2011). Study the Fluid Interaction due to Dynamic Response of Elevated Concrete Water Tank. *Australian Journal of Basic and Applied Science, 5*(9), 1084-1087.

Gavin, H. P. (2016). Erişim: 15 Mayıs 2022 https://people.duke.edu/~hpgavin/StructuralDynamics/ModelCondensation.pdf.

Ghateh, R. (2021). *Nonlinear seismic response of reinforced concrete pedestals in elevated water tanks.* (Ph.D. thesis). Toronto Metropolitan University, Toronto.

Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society, 181*(3), 375-389.

Gomez-Gesteira, M., Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., & Crespo, A. J. C. (2010). State-of-the-art of classical SPH for free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research, 48*, 6-27. doi:10.1080/00221686.2010.9641242

Gurkalo, F. (2016). *An investigation into the analysis of innovative slit reinforced concrete shafts design in elevated water tanks in seismic regions.* (Ph.D. thesis). Anglia Ruskin University, United Kingdom of Great Britain

Guyan, R. J. (1965). Reduction of stiffness and mass matrices. *AIAA journal, 3*(2), 380-380. doi:10.2514/3.2874

Güray, E., & Yazici, G. (2015). Sloshing in medium sized tanks under earthquake load. *Gradjevinar, 67*, 655-662. doi:10.14256/JCE.1149.2014

Haroun, M. A., & Ellaithy, H. (1985). Seismically Induced Fluid Forces On Elevated Tanks. *Journal of technical topics in civil engineering, 111*, 1-15. doi:10.1061/JTCEDL.0000023

Haroun, M. A., & Temraz, M. K. (1992). Effects of soil-structure interaction on seismic response of elevated tanks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 11*(2), 73-86.

Hoskins, L. M., & Jacobsen, L. S. (1934). Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake. *Bulletin of the seismological society of America, 24*(1), 1-32.

Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the seismological society of America, 53*(2), 381-387.

Ibrahim, R. A. (2005). *Liquid sloshing dynamics: theory and applications*.

Ikhouane, F., Hurtado, J. E., & Rodellar, J. (2007). *Variation of the hysteresis loop with the Bouc–Wen model parameters* (Vol. 48).

İnce, E. (2012). *Dikdörtgen kesitli yükseltilmiş su tankındaki su çalkantısının yapının davranışı üzerindeki etkisi* (Yüksek Lisans). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Kasımzade, A. A. (2018). *Finite Element Method Fundamentals and Applications in Structural Mechanics*: Nobel Academic Publishing.

Stochastic Parametric System Identification Approach For Validation Of Finite Element Models: Industrial Applications, 41-61 (2012).

Kasımzade, A. A., Tuhta, S., & Atmaca, G. (2019). New Structural Seismic Isolation System. *Seismic Isolation, Structural Health Monitoring, and Performance Based Seismic Design in Earthquake Engineering: Recent Developments*, 3-54.

Katsikadelis, J. T. (2020). *Dynamic analysis of structures*: Academic press.

Knoy, C. (1995). *"Performance of elevated tanks during recent California seismic events".* Paper presented at the AWWA Annual Conference & Exhibition.

Kusić, M. S., Radnić, J., & Grgić, N. (2018). Sloshing in medium size tanks caused by earthquake studied by SPH. *pdfs.semanticscholar.org, 8*, 671-684. doi:10.14256/JCE.2169.2017

Lee, P. T., & Dawe, J. L. (1996). *"Collapse of single pedestal elevated water tank".* Paper presented at the Proceedings of the 2nd International Conference in Civil Engineering on Computer.

Leonard, R. A., Graham, L. H., & Len, K. S. (1990). Buckling considerations in the design of elevated steel water tanks. *Thin-Walled Structures, 9*(1), 389-406. doi:https://doi.org/10.1016/0263-8231(90)90054-3

Liu, G. R., & Liu, M. B. (2003). Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method.

Livaoğlu, R. (2005). *Ayaklı depoların sıvı-yapı-zemin etkileşimleri dikkate alınarak deprem davranışlarının incelenmesi.* (Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Livaoğlu, R. (2013). Soil interaction effects on sloshing response of the elevated tanks. *Geomechanics and Engineering, 5*, 283-297. doi:10.12989/gae.2013.5.4.283

Livaoğlu, R., & Doğangün, A. (2006). Evaluation of seismic models for fluid-elevated tanks systems suggested in codes.

Livaoğlu, R., & Doğangün, A. (2007). Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27*, 855-863. doi:10.1016/j.soildyn.2007.01.008

Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal, vol. 82, Dec. 1977, p. 1013-1024., 82*, 1013-1024.

Mali, A. K., & Desai, H. (2021). Performance of Various Staging Systems for Elevated Water Tank.

Marashi, E., & Shakib, H. (1997). *Evaluations of dynamic characteristics of elevated water tanks by ambient vibration tests.* Paper presented at the Proceedings of the 4th International Conference on Civil Engineering, Tehran.

MATLAB. (2023). MATLAB. *The MathWorks, Natick, MA.* Erişim: 15 Mayıs 2022, https://matlab.mathworks.com/

Monaghan, J. J. (1992). Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys, 30*, 543-574.

Monaghan, J. J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics, 110*(2), 399-406.

Narayanaswamy, M. S. (2008). *A hybrid boussinesq-sph wave propagation model with applications to forced waves in rectangular tanks.* (PhD. thesis). The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland.

Nazari, A. (2009). *Seismic response of reinforced concrete elevated water towers.* (Ph.D. thesis). Toronto Metropolitan University, Toronto.

Oden, J. T., & Sato, T. (1967). Finite strains and displacements of elastic membranes by the finite element method. *International Journal of Solids and Structures, 3*, 471-488. doi:10.1016/0020-7683(67)90002-9

Olson, L. G., & Bathe, K.-J. (1983). A study of displacement-based fluid finite elements for calculating frequencies of fluid and fluid-structure systems. *Nuclear Engineering and Design, 76*(2), 137-151.

Özdemir, Z. (2010). *Sıvı ihtiva eden tankların lineer olmayan sıvı-yapı etkileşimi ile çok boyutlu deprem analizleri.* (Doktora tezi). Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Paz, M. (1984). Dynamic condensation. *AIAA journal, 22*(5), 724-727.

Paz, M., & Leigh, W. (2004). Structural Dynamics. doi:10.1007/978-1-4615-0481-8

PEER. (2023). Pacific Earthquake Engineering Research Center. Retrieved from https://peer.berkeley.edu/

Pelliciari, M., Briseghella, B., Tondolo, F., Veneziano, L., Nuti, C., Greco, R., . . . Tarantino, A. M. (2020). A degrading Bouc–Wen model for the hysteresis of reinforced concrete structural elements. *Structure and Infrastructure Engineering, 16*(7), 917-930.

Resheidat, R., & Sunna, H. (1986). *Behavior of elevated storage tanks during earthquakes.* Paper presented at the Proceedings of the 3th US National Conference on Earthquake Engineering.

Sampath, R., Montanari, N., Akinci, N., Prescott, S., & Smith, C. (2016). Large-scale solitary wave simulation with implicit incompressible SPH. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2*, 313-329. doi:10.1007/S40722-016-0060-8

Shakib, H., & Alemzadeh, H. (2017). The effect of earthquake site-source distance on dynamic response of concrete elevated water tanks. *Procedia Engineering, 199*, 260-265. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.020

Soheil, S., Sh. Tavousi, T., Omidinasab, F., Beheshtian, N., & Sajad, S. (2011). Seismic Performance of RC Elevated Water Tanks with Frame Staging and Exhibition Damage Pattern. *Procedia Engineering, 14*, 3076-3087. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.387

Soumya, M., Jalla, & Dilip. (2023). The study of wind-interference effect on an elevated RC circular tank due to an adjacent building. *Materials Today: Proceedings*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.557

Steinbrugge, K. V., & Rodrigo, F. A. (1963). The Chilean earthquakes of May, 1960: A structural engineering viewpoint. *Bulletin of the seismological society of America, 53*, 225-307. doi:10.1785/BSSA0530020225

Sunara, M., Gotovac, B., Radnić, J., & Harapin, A. (2021). Numerical analysis of pressures on rigid structures using the smoothed particle hydrodynamics method. *Scientia Iranica, 28*, 1066-1078. doi:10.24200/sci.2020.22052

Thanh, N. X. (2017). Nonlinear dynamic analysis of base-isolated frames using Julia. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE, 11*(6), 29-36.

Trimulyono, A., & Hashimoto, H. (2019). Experimental validation of smoothed particle hydrodynamics on generation and propagation of waterwaves. *Journal of Marine Science and Engineering, 7*. doi:10.3390/jmse7010017

Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Topp, L. J. (2012). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *https://doi.org/10.2514/8.3664, 23*, 805-823. doi:10.2514/8.3664

Vaiana, N., Sessa, S., Marmo, F., & Rosati, L. (2019). Nonlinear dynamic analysis of hysteretic mechanical systems by combining a novel rate-independent model and an explicit time integration method. *Nonlinear Dynamics, 98*, 2879-2901.

Vaiana, N., Sessa, S., Paradiso, M., & Rosati, L. (2019). *"Accurate and efficient modeling of the hysteretic behavior of sliding bearings".* Paper presented at the Proceedings of the 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering.

Wen, Y.-K. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the engineering mechanics division, 102*(2), 249-263.

Wendland, H. (1995). Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics, 4*, 389-396. doi:10.1007/BF02123482

Werner, P. W., & Sundquist, K. J. (1949). On hydrodynamic earthquake effects. *Eos, Transactions American Geophysical Union, 30*, 636-657. doi:10.1029/TR030I005P00636

Westergaard, H. M. (1931). Water Pressures on Dams during Earthquakes. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98*, 418-433. doi:10.1061/TACEAT.0004496

Wilson, E. L., & Khalvati, M. (1983). Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19*(11), 1657-1668.

Yıldız, Y. (2009). *Betonarme sıvı depolarının farklı yönetmeliklere göre karşılaştırmalı deprem analizi.* (Yüksek Lisans). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

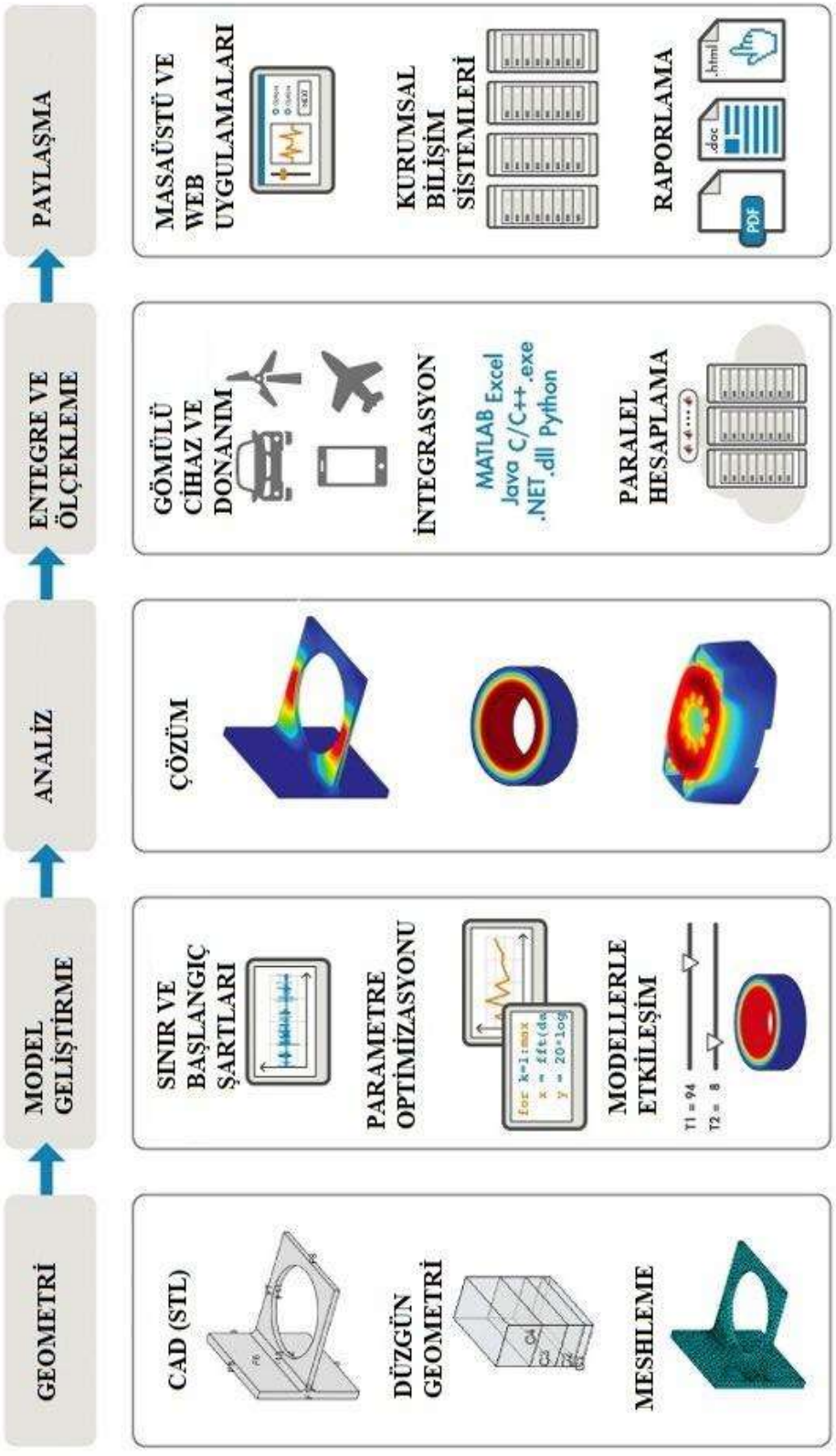
Zhu, X., & Lu, X. (2011). Parametric identification of Bouc-Wen model and its application in mild steel damper modeling. *Procedia Engineering, 14*, 318-324.

Zienkiewicz, O. C. (1972). Finite Element Method in Engineering Science. 432.

Zienkiewicz, O. C., & Bettess, P. (1978). Fluid-structure dynamic interaction and wave forces. An introduction to numerical treatment. *13*, 1-16. doi:10.1002/NME.1620130102

EKLER

EK-1 MATLAB PDE Araç Kutusu Akış Şeması



EK-2 Serbest Titreşim Analizi Program Kodları

```
%AYAKLI SU DEPOSUNUN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ
clear;clc;
%HESAP MODELİ SEÇİMİ
modelM = createpde('structural','modal-solid');
%GEOMETRİ
load depogeometri23052021.mat;
modelM.Geometry=DepoGeo;
%MESHLEME
mesh=generateMesh(modelM,'GeometricOrder','linear');
%MALZEME ÖZELLİKLERİ
structuralProperties(modelM,'YoungsModulus',30E9, ...
'PoissonsRatio',0.18, ...
'MassDensity',2300);
%SINIR ŞARTLARI
structuralBC(modelM,'Face',[48,51,53,76,85,100,105,110],'Vectorized','on',
'Constraint','fixed');
%ÇÖZÜM
RF = solve(modelM,'FrequencyRange',[-0.1,1000]);
%SONUÇLAR
modeID = 1:numel(RF.NaturalFrequencies);
tmodalResults = table(modeID.',RF.NaturalFrequencies/2/pi);
tmodalResults.Properties.VariableNames = {'Mode','Frequency'};
figure(1);
pdeplot3D(modelM,'ColorMapData',RF.ModeShapes.ux(:,1))
title(['1.mod şekli ', ...
        num2str(RF.NaturalFrequencies(1)/(2*pi)),' Hz'])
   view(45,45)
figure(2);
    pdeplot3D(modelM,'ColorMapData',RF.ModeShapes.ux(:,2))
title(['2.mod şekli ', ...
        num2str(RF.NaturalFrequencies(2)/(2*pi)),' Hz'])
     view(45,45)
figure(3);
    pdeplot3D(modelM,'ColorMapData',RF.ModeShapes.ux(:,3))
title(['3.mod şekli ', ...
        num2str(RF.NaturalFrequencies(3)/(2*pi)),' Hz'])
    view(45,45)
figure(4);
    pdeplot3D(modelM,'ColorMapData',RF.ModeShapes.ux(:,4))
title(['4.mod şekli ', ...
        num2str(RF.NaturalFrequencies(4)/(2*pi)),' Hz'])
    view(45,45)
 figure(5);
    pdeplot3D(modelM,'ColorMapData',RF.ModeShapes.ux(:,5))
title(['5.mod şekli ', ...
        num2str(RF.NaturalFrequencies(5)/(2*pi)),' Hz'])
  view(45,45)
figure(6);
    pdeplot3D(modelM,'ColorMapData',RF.ModeShapes.ux(:,6))
title(['6.mod şekli ', ...
        num2str(RF.NaturalFrequencies(6)/(2*pi)),' Hz'])
      view(45,45)
tmodalResults2 = table(modeID.',1./(RF.NaturalFrequencies/2/pi));
tmodalResults2.Properties.VariableNames = {'Mode','t-PERİYOD'};
disp(tmodalResults2);
```

EK-3 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Program Kodları(Boş Depo)

```
%Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Program Kodları(Boş Depo)
clc;clear;
load K78.mat
load M78.mat
load csonum.mat
load T78.mat
load Fbos.mat
load mesnetnode.mat
nm=length(Mc_r);
M=Mc_r;
K=Kc_r;
g = load('Kocaeli4491.mat');
tg = g.Kocaeli(:,1);
ag = g.Kocaeli(:,2);
tg=0:0.01:34.89;
ag=ag(1:length(tg));
ac = [zeros(nm,nm) eye(nm,nm);
       -inv(M)*K   -inv(M)*C ];
     nmm=11562;
     nm1=nmm/3;
     nm2=(nmm/3)*2;
     J=[ones(nm1,1); zeros(nm2,1)];
load('M11562_11562.mat');
mu=T'*M11562*J;
bc=[zeros(nm,1);
    -inv(M)*mu];
tspan = [min(tg):0.01:max(tg)];
Y0 = zeros(nm*2,1);
[t,Y] = ode45(@(t,Y) buyukmodeldogrusalBOS(t,Y,ac,bc,tg,ag),tspan,Y0);
tic
toc
X=Y';
vq1 = interp1(t,X',tg);
XX=vq1(:,1:nm)';
yim5=T*XX;
yim5max=max(max(abs(yim5)));
[yim5max node]=max(max(abs(yim5)))
save('buyukmodeldogrusal.mat','t', 'X','yim5','T','XX', '-v7.3')
save('yim5.mat','yim5max', '-v7.3')

function dYdt = depodoludogrusal(t,Y,ac,bc,tg,ag,as)
    xg = interp1(tg,ag,t);
    as=interp1(tg,as',t)';
 dYdt = ac*Y+bc*xg*9.806+as;
end

[C, RA, RB] = insertrows(yim5,zeros(32,3490),187);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),3672);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),4081);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),7566);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),7975);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),11460);
yim5=C;
[yim5max,i]=max(max(abs(yim5)));
model = createpde(3);
load depogeometri23052021.mat;
model.Geometry=DepoGeo;
```

```
E = 30E9;
nu = 0.18;
rho = 2300;
c = elasticityC3D(E,nu);
a=0;
f=[0;0;0];
m=rho;
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','Face',4,'u',[0,0,0]);
applyBoundaryCondition(model,'neumann','Face',1,'g',[0;-10000;0]);
specifyCoefficients(model,'m',0,'d',0,'c',c,'a',a,'f',f);
mesh=generateMesh(model,'GeometricOrder','linear');
tlist=0:0.01:34.89;
results = createPDEResults(model,yim5,tlist,'time-dependent');
save model.mat model
%%Yer değiştirmeler
figure(1)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,1,i))
title({'x-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(2)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,2,i))
title({'y-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(3)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,3,i))
title({'z-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
%Hızlar
load hizveivme.mat
t = tlist;
for i=1:length(yim5)
h= yim5(i,:);
dt = diff(t);
dh = diff(h);
v(i,1:3489)= dh./dt;
end
[vmax,i]=max(max(abs(v)));
figure(4)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-hız';['min = ' num2str(min(min(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f'), '
m/sn ']; ...
['max = ' num2str(max(max(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(5)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-hız';['min = '
num2str(min(min(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']; ...
```

```
['max = '
num2str(max(max(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(6)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-hız';['min = '
num2str(min(min(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']; ...
['max = '
num2str(max(max(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']})
colormap('jet')
view(45,45)
%%%İvmeler
for i=1:length(yim5)
v1= v(i,:);
dt = diff(t);
dv= diff(v1);
a(i,1:3488)= dv./dt(2:end);
end
save hizveivme.mat v a
[amax,i]=max(max(abs(a)));
figure(7)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(1:length(yim5)/3,i))),'%3.5f'), ' m/sn^2 ']; ...
['max = ' num2str(max(max(a(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(8)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-ivme';['min = '
num2str(min(min(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']; ...
['max = '
num2str(max(max(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(9)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']; ...
['max = '
num2str(max(max(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']})
colormap('jet')
view(45,45)
[cgradx,cgrady,cgradz] = evaluateCGradient(results);
sxx = cgradx(:,1,:);
sxy = cgradx(:,2,:);
sxz = cgradx(:,3,:);
syx = cgrady(:,1,:);
syy = cgrady(:,2,:);
syz = cgrady(:,3,:);
szx = cgradz(:,1,:);
```

```
szy = cgradz(:,2,:);
szz = cgradz(:,3,:);
save gerilmeler.mat sxx sxy sxz syx syy syz szx szy szz
figure(10)
[sxxmax,i]=max(max(abs(sxx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxx(:,1,i)/1E6);colormap('jet')
title({'x yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
view(45,45)
figure(11)
[sxymax,i]=max(max(abs(sxy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxy(:,1,i)/1E6)
title({'xy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(12)
[sxzmax,i]=max(max(abs(sxz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxz(:,1,i)/1E6)
title({'xz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(13)
[syxmax,i]=max(max(abs(syx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syx(:,1,i)/1E6)
title({'yx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(14)
[syymax,i]=max(max(abs(syy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syy(:,1,i)/1E6)
title({'y yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(15)
[syzmax,i]=max(max(abs(syz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syz(:,1,i)/1E6)
title({'yz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(16)
[szxmax,i]=max(max(abs(szx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szx(:,1,i)/1E6)
title({'zx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
```

```
figure(17)
[szymax,i]=max(max(abs(szy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szy(:,1,i)/1E6)
title({'zy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(18)
[szzmax,i]=max(max(abs(szz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szz(:,1,i)/1E6)
title({'z yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
sVonMises = sqrt( 0.5*( (sxx-syy).^2 + (syy -szz).^2 +...
(szz-sxx).^2) + 3*(sxy.^2 + syz.^2 + szx.^2));
[sVMmax,i]=max(max(abs(sVonMises)));
figure(19)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sVonMises(:,1,i)/1E6)
title({'von Mises gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
save vonmisesgerilme.mat sVonMises
% strain = evaluateStrain(result);
figure(20)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,1,i))
title({'x yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(21)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,2,i))
title({'xy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(22)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,3,i))
title({'xz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(23)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,1,i))
title({'yx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
```

```
view(45,45)
figure(24)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,2,i))
title({'y yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(25)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,3,i))
title({'yz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(26)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,1,i))
title({'zx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(27)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,2,i))
title({'zy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(28)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,3,i))
title({'z yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
```

EK-4 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Program Kodları(Boş Depo)

```
%Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Program Kodları(Boş Depo)
clc;clear;
load K78.mat
load M78.mat
load csonum78.mat
load T78.mat
load Fbos.mat
load mesnetnode.mat
nm=length(Mc_r);
fy=556*ones(nm,1);

M=Mc_r;
K=Kc_r;
g = load('Kocaeli4491.mat');
tg = g.Kocaeli(:,1);
ag = g.Kocaeli(:,2);
tg=0:0.01:34.89;
ag=ag(1:length(tg));
uy=0.1;
ac = [zeros(nm,nm) eye(nm,nm);
       -inv(M)*K   -inv(M)*C ];          % (Eq. 3.191)
     nmm=11562;
     nm1=nmm/3;
     nm2=(nmm/3)*2;
     J=[ones(nm1,1); zeros(nm2,1)];
load('M11562_11562.mat');
mu=T'*M11562*J/uy;
bc=[zeros(nm,1);
    -inv(M)*mu];
%Bouc-Wen tablo 6.tableri
A=1; beta=0.5; gamma=0.5; n=2; alpha=0.1;
az=[zeros(nm,nm);
    -inv(M)*(1-alpha)*K];
tspan = [min(tg) max(tg)];
Y0 = zeros(nm*3,1);
[t,Y] = ode45(@(t,Y)
depobosNL(t,Y,ac,bc,az,tg,ag,beta,gamma,n,uy,M,K,C,fy,alpha,nm),tspan,Y0);
tic
toc
X=Y';
X=X*uy;
vq1 = interp1(t,X',tg);
XX=vq1(:,1:nm)';
yim5=T*XX;
yim5max=max(max(abs(yim5)));
save('buyukmodeldogrusalOlmayan.mat','t', 'X','yim5','T','XX', '-v7.3')
save('yim5.mat','yim5max', '-v7.3')
g=9.806;
[C, RA, RB] = insertrows(yim5,zeros(32,3490),187);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),3672);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),4081);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),7566);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),7975);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),11460);
yim5=C;
```

```
[yim5max,i]=max(max(abs(yim5)));
save yim5.mat yim5
model = createpde(3);
load depogeometri23052021.mat;
model.Geometry=DepoGeo;
E = 30E9;
nu = 0.18;
rho = 2300;
c = elasticityC3D(E,nu);
a=0;
f=[0;0;0];
m=rho;
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','Face',4,'u',[0,0,0]);
applyBoundaryCondition(model,'neumann','Face',1,'g',[0;-10000;0]);
specifyCoefficients(model,'m',0,'d',0,'c',c,'a',a,'f',f);
mesh=generateMesh(model,'GeometricOrder','linear');
tlist=0:0.01:34.89;
results = createPDEResults(model,yim5,tlist,'time-dependent');
save results.mat results
%Yer değiştirmeler
figure(1)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,1,i))
title({'x-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(2)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,2,i))
title({'y-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(3)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,3,i))
title({'z-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
%%Hızlar
load hizveivme.mat
t = tlist;
for i=1:length(yim5)
h= yim5(i,:);
dt = diff(t);
dh = diff(h);
% v - velocity
v(i,1:3489)= dh./dt;
end
[vmax,i]=max(max(abs(v)));
figure(4)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-hız';['min = ' num2str(min(min(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f'), '
m/sn ']; ...
['max = ' num2str(max(max(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
```

```
figure(5)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-hız';['min = '
num2str(min(min(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']; ...
['max = '
num2str(max(max(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(6)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-hız';['min = '
num2str(min(min(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']; ...
['max = '
num2str(max(max(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']})
colormap('jet')
view(45,45)
%%%İvmeler
for i=1:length(yim5)
v1= v(i,:);
dt = diff(t);
dv= diff(v1);
% a - acceleration
a(i,1:3488)= dv./dt(2:end);
end
save hizveivme.mat v a
[amax,i]=max(max(abs(a)));
figure(7)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(1:length(yim5)/3,i))),'%3.5f'), ' m/sn^2 ']; ...
['max = ' num2str(max(max(a(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(8)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-ivme';['min = '
num2str(min(min(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']; ...
['max = '
num2str(max(max(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(9)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']; ...
['max = '
num2str(max(max(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']})
colormap('jet')
view(45,45)
[cgradx,cgrady,cgradz] = evaluateCGradient(results);
sxx = cgradx(:,1,:);
```

```
sxy = cgradx(:,2,:);
sxz = cgradx(:,3,:);
syx = cgrady(:,1,:);
syy = cgrady(:,2,:);
syz = cgrady(:,3,:);
szx = cgradz(:,1,:);
szy = cgradz(:,2,:);
szz = cgradz(:,3,:);
figure(10)
[sxxmax,i]=max(max(abs(sxx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxx(:,1,i))
title('x yönündeki normal gerilme')
colormap('jet')
view(45,45)
[sxxmax,i]=max(max(abs(sxx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxx(:,1,i)/1E6);colormap('jet')
title({'x yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
view(45,45)
figure(11)
[sxymax,i]=max(max(abs(sxy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxy(:,1,i)/1E6)
title({'xy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(12)
[sxzmax,i]=max(max(abs(sxz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxz(:,1,i)/1E6)
title({'xz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(13)
[syxmax,i]=max(max(abs(syx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syx(:,1,i)/1E6)
title({'yx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(14)
[syymax,i]=max(max(abs(syy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syy(:,1,i)/1E6)
title({'y yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(15)
[syzmax,i]=max(max(abs(syz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syz(:,1,i)/1E6)
title({'yz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
```

```
view(45,45)
figure(16)
[szxmax,i]=max(max(abs(szx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szx(:,1,i)/1E6)
title({'zx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(17)
[szymax,i]=max(max(abs(szy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szy(:,1,i)/1E6)
title({'zy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(18)
[szzmax,i]=max(max(abs(szz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szz(:,1,i)/1E6)
title({'z yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
sVonMises = sqrt( 0.5*( (sxx-syy).^2 + (syy -szz).^2 +...
(szz-sxx).^2) + 3*(sxy.^2 + syz.^2 + szx.^2));
[sVMmax,i]=max(max(abs(sVonMises)));
figure(19)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sVonMises(:,1,i)/1E6)
title({'von Mises gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
strain = evaluateStrain(result);
figure(20)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,1,i))
title({'x yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(21)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,2,i))
title({'xy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(22)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,3,i))
title({'xz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
```

```
view(45,45)
figure(23)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,1,i))
title({'yx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(24)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,2,i))
title({'y yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(25)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,3,i))
title({'yz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(26)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,1,i))
title({'zx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(27)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,2,i))
title({'zy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(28)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,3,i))
title({'z yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
```

EK-5 Zaman Tam Alanında Doğrusal Analiz Program Kodları(Yarım ve Tam Dolu Depo-Westergaard ve DPH Yaklaşımı)

```
%AYAKLI DEPONUN YARIM ve TAM DOLU DURUMU(WESTERGAARD ve DPH YAKLAŞIMI)
%İÇİN PROGRAM KODLARI
clc;clear;
load K78.mat
load M78.mat
load csonum.mat
load T78.mat
load Fbos.mat
load mesnetnode.mat
nm=length(Mc_r);
M=Mc_r;
K=Kc_r;
g = load('Kocaeli4491.mat');
tg = g.Kocaeli(:,1);
ag = g.Kocaeli(:,2);
tg=0:0.01:34.89;
ag=ag(1:length(tg));
ac = [zeros(nm,nm) eye(nm,nm);
       -inv(M)*K   -inv(M)*C ];

     nmm=11562;
     nm1=nmm/3;
     nm2=(nmm/3)*2;
     J=[ones(nm1,1); zeros(nm2,1)];
load('M11562_11562.mat');
mu=T'*M11562*J;
bc=[zeros(nm,1);
    -inv(M)*mu];
tspan = [min(tg):0.01:max(tg)]; % Time range
Y0 = zeros(nm*2,1); % Initial condition
[t,Y] = ode45(@(t,Y) buyukmodeldogrusalBOS(t,Y,ac,bc,tg,ag),tspan,Y0); %
ODE
tic
toc
X=Y';
vq1 = interp1(t,X',tg);
XX=vq1(:,1:nm)';
yim5=T*XX;
yim5max=max(max(abs(yim5)));
[yim5max node]=max(max(abs(yim5)))
save('buyukmodeldogrusal.mat','t', 'X','yim5','T','XX', '-v7.3')
save('yim5.mat','yim5max', '-v7.3')

[C, RA, RB] = insertrows(yim5,zeros(32,3490),187);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),3672);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),4081);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),7566);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),7975);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),11460);
yim5=C;
[yim5max,i]=max(max(abs(yim5)));
model = createpde(3);
load depogeometri23052021.mat;
model.Geometry=DepoGeo;
E = 30E9;
```

```
nu = 0.18;
rho = 2300;
c = elasticityC3D(E,nu);
a=0;
f=[0;0;0];
m=rho;
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','Face',4,'u',[0,0,0]);
applyBoundaryCondition(model,'neumann','Face',1,'g',[0;-10000;0]);
specifyCoefficients(model,'m',0,'d',0,'c',c,'a',a,'f',f);
mesh=generateMesh(model,'GeometricOrder','linear');
tlist=0:0.01:34.89;
results = createPDEResults(model,yim5,tlist,'time-dependent');
%%%Yer değiştirmeler
figure(1)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,1,i))
title({'x-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(2)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,2,i))
title({'y-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(3)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,3,i))
title({'z-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
%%Hızlar
load hizveivme.mat
t = tlist;
for i=1:length(yim5)
h= yim5(i,:);
dt = diff(t);
dh = diff(h);
v(i,1:3489)= dh./dt;
end
[vmax,i]=max(max(abs(v)));
figure(4)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-hız';['min = ' num2str(min(min(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f'), '
m/sn ']; ...
['max = ' num2str(max(max(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(5)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-hız';['min = '
num2str(min(min(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']; ...
['max = '
num2str(max(max(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']})
```

```
colormap('jet')
view(45,45)
figure(6)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-hız';['min = '
num2str(min(min(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']; ...
['max = '
num2str(max(max(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']})
colormap('jet')
view(45,45)
%%%İvmeler
for i=1:length(yim5)
v1= v(i,:);
dt = diff(t);
dv= diff(v1);
a(i,1:3488)= dv./dt(2:end);
end
save hizveivme.mat v a
[amax,i]=max(max(abs(a)));
figure(7)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(1:length(yim5)/3,i))),'%3.5f'), ' m/sn^2 ']; ...
['max = ' num2str(max(max(a(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(8)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-ivme';['min = '
num2str(min(min(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']; ...
['max = '
num2str(max(max(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(9)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']; ...
['max = '
num2str(max(max(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']})
colormap('jet')
view(45,45)
[cgradx,cgrady,cgradz] = evaluateCGradient(results);
sxx = cgradx(:,1,:);
sxy = cgradx(:,2,:);
sxz = cgradx(:,3,:);
syx = cgrady(:,1,:);
syy = cgrady(:,2,:);
syz = cgrady(:,3,:);
szx = cgradz(:,1,:);
szy = cgradz(:,2,:);
szz = cgradz(:,3,:);
figure(10)
```

```
[sxxmax,i]=max(max(abs(sxx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxx(:,1,i)/1E6);colormap('jet')
title({'x yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
view(45,45)
figure(11)
[sxymax,i]=max(max(abs(sxy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxy(:,1,i)/1E6)
title({'xy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(12)
[sxzmax,i]=max(max(abs(sxz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxz(:,1,i)/1E6)
title({'xz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(13)
[syxmax,i]=max(max(abs(syx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syx(:,1,i)/1E6)
title({'yx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(14)
[syymax,i]=max(max(abs(syy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syy(:,1,i)/1E6)
title({'y yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(15)
[syzmax,i]=max(max(abs(syz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syz(:,1,i)/1E6)
title({'yz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(16)
[szxmax,i]=max(max(abs(szx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szx(:,1,i)/1E6)
title({'zx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(17)
[szymax,i]=max(max(abs(szy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szy(:,1,i)/1E6)
title({'zy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
```

```
['max = ' num2str(max(max(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(18)
[szzmax,i]=max(max(abs(szz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szz(:,1,i)/1E6)
title({'z yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
sVonMises = sqrt( 0.5*( (sxx-syy).^2 + (syy -szz).^2 +...
(szz-sxx).^2) + 3*(sxy.^2 + syz.^2 + szx.^2));
[sVMmax,i]=max(max(abs(sVonMises)));
figure(19)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sVonMises(:,1,i)/1E6)
title({'von Mises gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
strain = evaluateStrain(result);
figure(20)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,1,i))
title({'x yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(21)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,2,i))
title({'xy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(22)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,3,i))
title({'xz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(23)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,1,i))
title({'yx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(24)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,2,i))
title({'y yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
```

```
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(25)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,3,i))
title({'yz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(26)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,1,i))
title({'zx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(27)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,2,i))
title({'zy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(28)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,3,i))
title({'z yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
```

EK-6 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Program Kodları(Yarı ve Tam Dolu Depo-Westergaard ve DPH Yaklaşımı)

```
% Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Program Kodları
% (Yarı ve Tam Dolu Depo-Westergaard ve SPH Yaklaşımı)
clc;clear;
load K78.mat
load M78.mat
load csonum.mat
load T78.mat
load depoyarimdoluFs.mat
load Fbos.mat
load mesnetnode.mat
nm=length(Mc_r);
fy=556*ones(nm,1);
F(mesnetNode,:)=[];
M=Mc_r;
K=Kc_r;
F=T'*F;
g = load('Kocaeli4491.mat');
tg = g.Kocaeli(:,1);
ag = g.Kocaeli(:,2);
tg=0:0.01:34.89;
ag=ag(1:length(tg));
uy=0.1;
ac = [zeros(nm,nm) eye(nm,nm);
       -inv(M)*K   -inv(M)*C ];
     nmm=11562;
     nm1=nmm/3;
     nm2=(nmm/3)*2;
     J=[ones(nm1,1); zeros(nm2,1)];
load('M11562_11562.mat');
mu=T'*M11562*J/uy;
bc=[zeros(nm,1);
    -inv(M)*mu];
A=1; beta=0.5; gamma=0.5; n=2; alpha=0.1;
az=[zeros(nm,nm);
    -inv(M)*(1-alpha)*K];
as1=inv(M)*F;
as=zeros(2*nm,length(tg));
for i=1:length(tg)
    for j=1:nm
as(j+nm,i) =as1(j,i);
    end
end
tspan = [min(tg):0.01: max(tg)];
Y0 = zeros(nm*3,1);
[t,Y] = ode45(@(t,Y)
depoyarimNL(t,Y,ac,bc,az,as,tg,ag,beta,gamma,n,uy,M,K,C,fy,alpha,nm),tspan
,Y0);
tic
toc
X=Y';
X=X*uy;
xc = U(:,1:nmt)*Y(:,nmt+1:end)';
vq1 = interp1(t,X',tg);
XX=vq1(:,1:nm)';
yim5=T*XX;
yim5max=max(max(abs(yim5)));
```

```
save('buyukmodeldogrusalOlmayan.mat','t', 'X','yim5','T','XX', '-v7.3')
save('yim5.mat','yim5max', '-v7.3')
[C, RA, RB] = insertrows(yim5,zeros(32,3490),187);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),3672);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),4081);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),7566);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(32,3490),7975);
[C, RA, RB] = insertrows(C,zeros(8,3490),11460);
yim5=C;
[yim5max,i]=max(max(abs(yim5)));
save yim5.mat yim5
model = createpde(3);
load depogeometri23052021.mat;
model.Geometry=DepoGeo;
E = 30E9;
nu = 0.18;
rho = 2300;
c = elasticityC3D(E,nu);
a=0;
f=[0;0;0];
m=rho;
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','Face',4,'u',[0,0,0]);
applyBoundaryCondition(model,'neumann','Face',1,'g',[0;-10000;0]);
specifyCoefficients(model,'m',0,'d',0,'c',c,'a',a,'f',f);
mesh=generateMesh(model,'GeometricOrder','linear');
tlist=0:0.01:34.89;
results = createPDEResults(model,yim5,tlist,'time-dependent');
save results.mat results
%Yer değiştirmeler
figure(1)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,1,i))
title({'x-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,1,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(2)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,2,i))
title({'y-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,2,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(3)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.NodalSolution(:,3,i))
title({'z-yerdegistirme';['min = '
num2str(min(min(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']; ...
['max = ' num2str(max(max(results.NodalSolution(:,3,i))),'%3.5f') ' m ']})
colormap('jet')
view(45,45)
load hizveivme.mat
t = tlist;
for i=1:length(yim5)
h= yim5(i,:);
dt = diff(t);
dh = diff(h);
v(i,1:3489)= dh./dt;
end
[vmax,i]=max(max(abs(v)));
```

```
figure(4)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-hız';['min = ' num2str(min(min(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f'), '
m/sn ']; ...
['max = ' num2str(max(max(v(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(5)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-hız';['min = '
num2str(min(min(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']; ...
['max = '
num2str(max(max(v((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(6)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-hız';['min = '
num2str(min(min(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']; ...
['max = '
num2str(max(max(v(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn
']})
colormap('jet')
view(45,45)
for i=1:length(yim5)
v1= v(i,:);
dt = diff(t);
dv= diff(v1);
a(i,1:3488)= dv./dt(2:end);
end
save hizveivme.mat v a
[amax,i]=max(max(abs(a)));
figure(7)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(1:length(yim5)/3,i))
title({'x-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(1:length(yim5)/3,i))),'%3.5f'), ' m/sn^2 ']; ...
['max = ' num2str(max(max(a(1:length(yim5)/3))),'%3.5f') ' m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(8)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))
title({'y-ivme';['min = '
num2str(min(min(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']; ...
['max = '
num2str(max(max(a((length(yim5)/3)+1:2*(length(yim5)/3),i))),'%3.5f') '
m/sn^2 ']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(9)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))
title({'z-ivme';['min = '
num2str(min(min(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']; ...
```

```
['max = '
num2str(max(max(a(2*(length(yim5)/3)+1:length(yim5),i))),'%3.5f') ' m/sn^2
']})
colormap('jet')
view(45,45)
save results.mat results
[cgradx,cgrady,cgradz] = evaluateCGradient(results);
sxx = cgradx(:,1,:);
sxy = cgradx(:,2,:);
sxz = cgradx(:,3,:);
syx = cgrady(:,1,:);
syy = cgrady(:,2,:);
syz = cgrady(:,3,:);
szx = cgradz(:,1,:);
szy = cgradz(:,2,:);
szz = cgradz(:,3,:);
figure(10)
[sxxmax,i]=max(max(abs(sxx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxx(:,1,i))
title('x yönündeki normal gerilme')
colormap('jet')
view(45,45)
[sxxmax,i]=max(max(abs(sxx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxx(:,1,i)/1E6);colormap('jet')
title({'x yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxx))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
view(45,45)
figure(11)
[sxymax,i]=max(max(abs(sxy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxy(:,1,i)/1E6)
title({'xy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(12)
[sxzmax,i]=max(max(abs(sxz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sxz(:,1,i)/1E6)
title({'xz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sxz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(13)
[syxmax,i]=max(max(abs(syx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syx(:,1,i)/1E6)
title({'yx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(14)
[syymax,i]=max(max(abs(syy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syy(:,1,i)/1E6)
title({'y yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
```

```
view(45,45)
figure(15)
[syzmax,i]=max(max(abs(syz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',syz(:,1,i)/1E6)
title({'yz yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(syz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(16)
[szxmax,i]=max(max(abs(szx)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szx(:,1,i)/1E6)
title({'zx yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szx(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(17)
[szymax,i]=max(max(abs(szy)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szy(:,1,i)/1E6)
title({'zy yönündeki kayma gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szy(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(18)
[szzmax,i]=max(max(abs(szz)));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',szz(:,1,i)/1E6)
title({'z yönündeki normal gerilme'; ['min = '
num2str(min(min(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(szz(:,1,i)))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
sVonMises = sqrt( 0.5*( (sxx-syy).^2 + (syy -szz).^2 +...
(szz-sxx).^2) + 3*(sxy.^2 + syz.^2 + szx.^2));
[sVMmax,i]=max(max(abs(sVonMises)));
figure(19)
pdeplot3D(model,'ColorMapData',sVonMises(:,1,i)/1E6)
title({'von Mises gerilmesi'; ['min = '
num2str(min(min(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']; ...
['max = ' num2str(max(max(sVonMises))/1E6,'%3.2f') ' MPa']})
colormap('jet')
view(45,45)
strain = evaluateStrain(result);
figure(20)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,1,i))
title({'x yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(21)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,2,i))
title({'xy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
```

```
view(45,45)
figure(22)
[XGmax,i]=max(max(abs(results.XGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.XGradients(:,3,i))
title({'xz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.XGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(23)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,1,i))
title({'yx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(24)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,2,i))
title({'y yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(25)
[YGmax,i]=max(max(abs(results.YGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.YGradients(:,3,i))
title({'yz yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.YGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(26)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,1,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,1,i))
title({'zx yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,1,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(27)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,2,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,2,i))
title({'zy yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,2,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
figure(28)
[ZGmax,i]=max(max(abs(results.ZGradients(:,3,:))));
pdeplot3D(model,'ColorMapData',results.ZGradients(:,3,i))
title({'z yönündeki şekildegistirme'; ['min = '
num2str(min(min(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f') ]; ...
['max = ' num2str(max(max(results.ZGradients(:,3,i))),'%3.5f')]})
colormap('jet')
view(45,45)
```

ÖZ GEÇMİŞ

Olgun KÖKSAL, Samsun Çarşamba Dikbıyık Lisesi'ni 2000 yılında bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden 09.07.2004 tarihinde mezun oldu. 2013 yılında OMÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programından mezun oldu. Lisans mezuniyetinden sonra özel ve kamuda inşaat mühendisi olarak yedi yıl kadar çalışmıştır. 2011-2013 yıllarında Sinop Üniversitesi'nde, 2013-2018 yıllarında Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmıştır. 2018 yılından itibaren Samsun Üniversitesi Kavak Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : *0000-0001-8448-6404*

Yayınlar:

1. O. Köksal, Z. Karaca, E. Türkeli, Innovations and Technologies in Engineering, Bölüm adı:(Nonlinear Sloshing Response of Liquidfilled Reinforced Concrete (RC) Elevated Water Tank Under Seismic Excitation) (2022)., Eğitim Yayınevi, Editör:Prof. Dr. Sakir Tasdemir, Assoc. Prof. Dr. Ilker Ali Ozkan, Basım sayısı:1, Sayfa Sayısı 293, ISBN:978-625-6382-83-1, İngilizce(Bilimsel Kitap), (Yayın No: 8085541)

2. O. Köksal & Z. Karaca, Influence of blast-induced ground motion on dynamic response of reinforcement retaining walls, Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics, 2020, 2630-5763, 3, 2, 85-92.

3. O. Köksal & Z. Karaca, Patlatma Kaynaklı Yer Hareketi İçin Bilgisayar Yazılımının Geliştirilmesi, International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 2017, 0000-0000, 1, 1, 42-46.

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. TÜBİTAK BİDEB 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Teşvik Bursu
2. Akademik Teşvik(2018)