

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ İLE DEPREM YÜKLERİ
ALTINDA TABAN İZOLATÖRLÜ LNG TANKLARININ
DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

İBRAHİM HÜNER

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ İLE DEPREM YÜKLERİ
ALTINDA TABAN İZOLATÖRLÜ LNG TANKLARININ
DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

İBRAHİM HÜNER

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi tarafından 2019FEBE055 nolu
proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İBRAHİM HÜNER

ÖZET

**DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ İLE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA
TABAN İZOLATÖRLÜ LNG TANKLARIN DAVRANIŞLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
İBRAHİM HÜNER
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)
(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ)
DENİZLİ, EYLÜL - 2023**

Geçmiş depremlerde sıvı depolama tanklarında meydana gelen hasarlar; tankların sismik davranışının deneysel ve analitik olarak incelenmesini zorunlu kılmıştır. Bu çalışma, farklı tipteki taban izolatör sistemlerinin Sıvılaştırılmış Doğal Gaz depolama tanklarının sismik performansı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Sabit mesnetli ve üç farklı sismik yalıtımlı tankların zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizleri, Deprem Yer Hareketi-1'e (DD-1) göre ölçeklenen 7 farklı yer hareketinin ortalama ivmesi için gerçekleştirilmiştir. İzolatör tipi olarak yüksek sönümlmeli kauçuk, kurşun çekirdekli kauçuk ve sürtünmeli sarkaç sistemleri gözönüne alınmıştır. Bu izolatörler, deneysel verilere dayalı kuvvet-yer değiştirme ilişkilerine sahip doğrusal olmayan yaylar olarak modellenmiştir. LNG sıvısı, çelik tank, dış kabuk, betonarme çevre kirişi, çatı, temel betonu, alt ve yan duvar izolasyonlarının modelleme çalışmalarında ANSYS Workbench programı; LNG sıvısı, çelik tank ve temel betonunun lineer olmayan analizi için LS-DYNA programı kullanılmıştır. Sabit mesnetli ve üç farklı sismik yalıtımlı tankların toplam taban kesme kuvveti, çalkalanma yüksekliği, çelik tank gerilmeleri, çelik tank kabuk levhası yanal deformasyonu, çelik tank taban ve duvarın en üst noktasındaki deplasmanları, izolatör yatay kuvvet-yer değiştirmeleri ve izolatöre gelen düşey kuvvetler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sabit ve izolatörlü sistemlerde modlar arasında fark olmadığını göstermektedir. Sıvının dalga hareketinin yapının salınımından farklı hareket ettiği ve izolatörlerin çalkalanma hareketini etkilemediği sonucuna varılmıştır. Sismik yalıtımlı tankların taban kesme kuvvetleri ve çelik tank gerilmelerinin sabit mesnetlilere göre sırasıyla %50-70 ve %85-95 arasında azaldığı görülmüştür. Fakat çalkalanma yüksekliklerinde bir değişiklik söz konusu değildir. İzolatörlü sistemlerin 400mm'ye varan yatay deplasman hareketi ise tanka bağlanan mekanik teçhizat ve borular açısından tehlike arz etmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: LNG DEPOLAMA TANKLARI, HDRB, LRB, FPS, LS-DYNA, ANSYS WORKBENCH, DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ

ABSTRACT

**COMPARISON OF THE BEHAVIOR OF LNG TANKS WITH SEISMIC
ISOLATORS UNDER EARTHQUAKE LOADS WITH NONLINEAR
ANALYSES
PH.D THESIS
İBRAHİM HÜNER
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. ABDULLAH CEM KOÇ)
(CO-SUPERVISOR:PROF. BÜLENT AKBAŞ)
DENİZLİ, AUGUST 2023**

Damages in liquid storage tanks in past earthquakes; This necessitated the experimental and analytical investigation of the seismic behavior of the tanks. This study investigates the effect of different types of base isolator systems on the seismic performance of Liquefied Natural Gas storage tanks. Nonlinear time history analyses of fixed support and three different seismic isolated tanks were performed for the average acceleration of 7 different ground motions scaled according to Earthquake Ground Motion-1 (DD-1). High damping rubber, lead core rubber and friction pendulum systems are considered as insulator types. These insulators are modeled as nonlinear springs with force-displacement relationships based on experimental data. ANSYS Workbench program in modeling studies of LNG liquid, inner steel tank, outer shell, reinforced concrete ring beam, roof, foundation concrete, bottom and side wall insulations; LS-DYNA program was used for non-linear analysis of LNG liquid, inner steel tank and foundation concrete. Total bottom shear force, sloshing height, steel tank stresses, steel tank shell plate lateral deformation, steel tank bottom and wall displacements, insulator horizontal force-displacements, and vertical forces on the insulator of tanks with fixed support and three different seismic insulation were compared. The results show that there is no difference between modes in fixed and isolator systems. It was concluded that the wave motion of the liquid acts differently from the oscillation of the structure and does not affect the agitation motion of the insulators. It has been observed that the bottom shear forces and steel tank stresses of the seismic insulated tanks are reduced by 50-70% and 85-95%, respectively, compared to the fixed supports. However, there is no change in agitation heights. Horizontal displacement of isolator systems up to 400mm poses a danger to the mechanical equipment and pipes connected to the tank.

KEYWORDS: LNG STORAGE TANKS, HDRB, LRB, FPS, LS-DYNA, ANSYS WORKBENCH, NON-LINEER ANALYSES

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖNSÖZ.....	v
1. GİRİŞ.....	1
1.2 Ankrajlı Sıvı Depolama Tankları ile İlgili Bilimsel Çalışmalar.....	2
1.3 Sıvı Depolayan Ankrajsız Tankların Deprem Davranışları ile İlgili Bilimsel Çalışmaları	7
1.4 LNG Depolama Tankları ile İlgili Yapılan Bilimsel Çalışmalar.....	11
2. SIVI ve SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ DEPOLAYAN ÇELİK TANKLAR VE DEPREM HASARLARI	20
2.1 Sıvı Depolayan Çelik Tankların Depremde Gördüğü Hasarlar ve Nedenleri	20
2.1.1 Fil Ayağı Burkulması.....	20
2.1.2 Elmas Şekilli Burkulma	21
2.1.3 Çelik Tankın Üst Kısımında Meydana Gelen Burkulma	22
2.1.4 Çelik Tankın Kayması	23
2.1.5 Çelik Tank Çatısının Göçmesi.....	23
2.1.6 Çelik Tank Ankrajlarının Kopması ve Zarar Görmesi	24
2.1.7 Çelik Tanklarda Farklı Oturmalar.....	25
2.1.8 Çelik Tankta Bağlanan Boru Sistemlerinin Zarar Görmesi	25
2.1.9 Çelik Tankta Oluşan Yangınlar	26
2.2 LNG Tanklar	27
2.2.1 LNG Tankların İnşaat Tipleri	28
2.2.2 LNG Depolama Tankı Deprem Performans Hedefleri	31
2.2.3 LNG Tankların İnşası ve Deprem Yalıtımı Uygulamaları	32
3. SİSMİK YALITIM SİSTEMLERİ.....	35
3.1 Sismik Yalıtım Uygulamasının Tarihsel Gelişimi ve Özellikleri	36
3.2 Sismik Yalıtımın Kullanım Alanları	38
3.3 Sismik Yalıtımın Sağladığı Avantajlar.....	39
3.4 Yapı İzolatörlerinin Sınıflandırılması	40
3.4.1 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDRB)	40
3.4.2 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB)	43
3.4.3 Sürtünmeli Sarkaç Sistemi (FPS)	46
4. LNG DEPOLAMA TANKI MODELLEME VE MODAL ANALİZİ	48
4.1 Deprem Yalıtımı Sisteminin Yerleştirilmesi	52
4.2 LNG Sıvısının Dinamik Yükler Altındaki Mekanik Analojisi	55
4.2.1 Sabit Mesnetli Sistem	55
4.2.2 İzolatörlü Sistemler	55
4.3 Modal Analiz	56
4.3.1 I. Sistem	56
4.3.2 II. Sistem.....	61

4.3.3	III. Sistem.....	64
4.3.4	IV. Sistem	67
4.4	LNG Tankının Bulunduğu Bölgenin Spektral İvme Katsayılarının Hesaplanması.....	70
5. LNG DEPOLAMA TANKININ LİNEER OLMAYAN ANALİZ		
SONUÇLARI.....		75
5.1	Sistem-I için Lineer Olmayan Analiz Sonuçları	75
5.2	Sistem-II Lineer Olmayan Analiz Sonuçları	79
5.3	Sistem-III Lineer Olmayan Analiz Sonuçları.....	84
5.4	Sistem-IV Lineer Olmayan Analiz Sonuçları.....	89
6. SABİT MESNETLİ ve HDRB-LRB-FPS İZOLATÖRLÜ LNG DEPOLAMA TANKLARININ LİNEER OLMAYAN ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI		
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI		94
6.1	Modal Analizlerin Karşılaştırılması	94
6.2	Çelik Tank Duvarında Oluşan Gerilmelerin Farklı Mesnet Sistemleri ve Depremler için Karşılaştırılması.....	95
6.3	LNG Sıvısı Dalga Yüksekliklerinin Farklı Mesnet Sistemleri ve Depremler için Karşılaştırılması	96
6.4	Çelik Tank Duvar Yanal Deformasyonlarının Farklı Mesnet Sistemleri ve Depremler için Karşılaştırılması	97
6.5	Çelik Tank Taban ve Duvar Tepe Noktası Deplasman Farklarının Karşılaştırılması.....	98
6.6	LNG Tankının Maksimum Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması.....	100
6.7	HDRB-LRB-FPS İzolatörlerin Yatay Kuvvet–Deplasman Analizleri	101
6.8	HDRB-LRB-FPS İzolatörlerin Düşey Kuvvet–Zaman Analizleri ...	103
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....		104
KAYNAKLAR		107
EKLER		117
EK A: Modal Analiz Sonuçları		118
EK B: İvme-Zaman Grafikleri		128
EK C: Lineer Olmayan Analiz Sonuçları		133
EK D: Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması		227
ÖZGEÇMİŞ.....		242

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Sıvının dinamik hareketi (Housner 1957)	4
Şekil 1.2: Sıvının dinamik hareketi (Malhotra ve diğ. 2000)	4
Şekil 1.3: Veletsos tarafından önerilen sıvı-tank etkileşimi (Barros 2008).....	5
Şekil 1.4: Ci ve Cc için itkisel ve taşınımlı katsayılar (Malhotra ve diğ. 2000). 5	
Şekil 1.5: Sıvının depremde duvar ve zemine yaptığı itkisel ve taşınımlı basınç kuvveti (Rosin ve Butenweg 2014).....	6
Şekil 1.6: Sıvının depremde duvar ve zemine yaptığı taşınımlı basınç kuvveti (Rosin ve Butenweg 2014).....	6
Şekil 1.7: Ankrajsız tankın devrilme parametreleri (Vathi ve Karamanos 2015).....	7
Şekil 1.8: Örnek bir ankrajsız tankın bağlantı şekli (Prinz ve diğ. 2012).....	7
Şekil 1.9: Tank temeli ile zeminin yay tanımlaması (Malhotra ve Veletsos 1994).....	10
Şekil 1.10: Tank temeli ile zeminin yay tanımlaması (Prinz ve diğ. 2012).....	10
Şekil 2.1: Fil ayağı burkulması-basınç (www.shellbuckling.com)	21
Şekil 2.2: Doğalgaz akış diyagramı (Datoli ve diğ. 2007)	27
Şekil 2.3: Tam muhafazalı LNG tankı (Wartsila Corp. 2018)	29
Şekil 3.1: Katlar arası deplasman hareketleri grafiği (T.C. Millî Eğitim Bakanlığı 2011).....	36
Şekil 3.2: Ankastre yapı ile deprem izolasyonlu yapıda katlar arasındaki deplasman hareketleri (Wang Yen-Po 2002)	36
Şekil 3.3: HDRB izolatörün yatay kuvvet altındaki şekil değişimi.....	41
Şekil 3.4: Yalnız eğilme etkisi altında rijit tabakalar arasında kauçuk tabaka (Farzad ve Kelly 1999).....	42
Şekil 3.5: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün histeresis eğrisi, (FIPMEC 2022), (Keskin 2008).....	44
Şekil 3.6: Sürtünmeli Sarkaç İzolatörün Çalışma Prensibi (Polat 2007), (FIPMEC 2022).....	46
Şekil 3.7: FPS izolatörün histeresis eğrisi (Farzad ve Kelly 1999), (FIPMEC 2022).....	46
Şekil 4.1: LNG depolama tankı kesiti.....	50
Şekil 4.2: LNG depolama tankı alt taban ve perde kesiti (Abd ve diğ. 2018)..	51
Şekil 4.3: LNG depolama tankı çatı kesiti (Abd ve diğ. 2018)	51
Şekil 4.4: İzolatörlerin yerleşim planı	52
Şekil 4.5: İzolatörlerin aks arası mesafe detayları	53
Şekil 4.6: İzolatör sistemlerinin modellenmesi	53
Şekil 4.7: LNG tankının ANSYS Workbench programında sonlu elemanlar metodu kullanarak üç boyutlu katı modellenmesi.....	53
Şekil 4.8: ANSYS Workbench programında LNG Tankının taban izolatörlerin yerlerinin modellenmesi.....	54
Şekil 4.9: ANSYS Workbench programında LNG tank ve sıvının kesit görünüşleri.....	54
Şekil 4.10: ANSYS Workbench programında çelik tank ve LNG sıvısının kesit görünüşleri.....	54
Şekil 4.11: ANSYS Workbench programında betonarme yapı taban ve yan ısı izolasyon malzemelerinin kesit görünüşleri.....	55

Şekil 4.12: Deprem yalıtımlı LNG tankındaki sıvının mekanik anolojisi (Christovasilis 2006)	56
Şekil 4.13: LNG sıvısının 1. çalkalanma frekansı f: 0.1018 Hz (T: 9.823 s) ...	57
Şekil 4.14: LNG sıvısının 2. çalkalanma frekansı f: 0.1343 Hz (T: 7.446 s) ...	57
Şekil 4.15: LNG sıvısının 3. çalkalanma frekansı f: 0.1509 Hz (T: 6.627 s) ...	57
Şekil 4.16: LNG sıvısının 4. çalkalanma frekansı f: 0.1580 Hz (T: 6.331 s) ...	57
Şekil 4.17: LNG sıvısının 5. çalkalanma frekansı f: 0.1780 Hz (T: 5.618 s) ...	57
Şekil 4.18: LNG sıvısının 6. çalkalanma frekansı f: 0.1784 Hz (T: 5.605 s) ...	58
Şekil 4.19: LNG sıvı ve çelik tankın 1. salınım frekansı f: 4.3436 Hz (T: 0.230 s)	58
Şekil 4.20: LNG sıvı ve çelik tankın 2. salınım frekansı f: 4.3445 Hz (T: 0.230 s)	58
Şekil 4.21: LNG sıvı ve çelik tankın 3. salınım frekansı f: 4.5913 Hz (T: 0.218 s)	58
Şekil 4.22: LNG sıvı ve çelik tankın 4. salınım frekansı f: 4.633 Hz (T: 0.216 s)	58
Şekil 4.23: LNG sıvı ve çelik tankın 5. salınım frekansı f: 5.016 Hz (T: 0.199 s)	59
Şekil 4.24: LNG sıvı ve çelik tankın 6. salınım frekansı f: 5.301 Hz (T: 0.189 s)	59
Şekil 4.25: LNG betonarme tankı 1. salınım frekansı f: 4.3445 Hz (T: 0.230 s)	60
Şekil 4.26: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 4.5913 Hz (T: 0.218 s)	60
Şekil 4.27: LNG betonarme tankı 3. salınım frekansı f: 5.0163 Hz (T: 0.199 s)	61
Şekil 4.28: HDRB-SI-N 900/204 d:400 mm yatay kuvvet-deplasman grafiği.	63
Şekil 4.29: LRB-SN 900/225 izolatörün kuvvet-deplasman grafiği	65
Şekil 4.30: FPS 1600/600(3700) yatay kuvvet-deplasman grafiği.....	68
Şekil 4.31: Marmara Ereğlisi BOTAŞ tesisi harita spektral ivme katsayıları (https://tdth.afad.gov.tr)	70
Şekil 4.32: İvme Davranış Spektrumu.....	73
Şekil 5.1: Sistem-I'ın LS-DYNA programında modellenmesi.....	75
Şekil 5.2: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler.....	76
Şekil 5.3: Çelik tank duvar gerilme - zaman grafiği.....	76
Şekil 5.4: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an	77
Şekil 5.5: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği.....	77
Şekil 5.6: Çelik tank duvar maksimum yanıl deformasyonu	77
Şekil 5.7: Çelik tank duvarı yanıl deformasyon-zaman grafiği	78
Şekil 5.8: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı	78
Şekil 5.9: Çelik tank duvar tepe noktası yatay deplasman-zaman grafiği	78
Şekil 5.10: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	79
Şekil 5.11: İzolatörlü sistemlerin LS-DYNA programında modellenmesi	79
Şekil 5.12: HDRB SI-N 900/204 izolatörünün mekanik özelliklerinin LS-DYNA programına girilmesi.....	80
Şekil 5.13: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler.....	80
Şekil 5.14: Çelik tank duvar gerilme-zaman grafiği.....	80
Şekil 5.15: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an.....	81
Şekil 5.16: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği.....	81
Şekil 5.17: Çelik tank duvar maksimum yanıl deformasyonu	81
Şekil 5.18: Çelik tank duvar yanıl deformasyon-zaman grafiği	82

Şekil 5.19: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı	82
Şekil 5.20: Çelik tank taban-duvar tepe noktası yatay deplasman farkı-zaman grafiği	82
Şekil 5.21: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	83
Şekil 5.22: HDRB izolator yatay kuvvet-deplasman grafiği	83
Şekil 5.23: HDRB izolator düşey kuvvet-zaman grafiği	84
Şekil 5.24: LRB SN 900/225-185 izolatorün mekanik özelliklerinin LS-DYNA programına girilmesi	84
Şekil 5.25: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler.....	85
Şekil 5.26: Çelik tank duvar gerilme-zaman grafiği.....	85
Şekil 5.27: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an.....	85
Şekil 5.28: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği.....	86
Şekil 5.29: Çelik tank duvar maksimum yanal deformasyonu	86
Şekil 5.30: Çelik tank duvar yanal deformasyon-zaman grafiği	86
Şekil 5.31: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı	87
Şekil 5.32: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman-zaman grafiği	87
Şekil 5.33: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	87
Şekil 5.34: LRB izolator yatay kuvvet-deplasman grafiği	88
Şekil 5.35: LRB izolator düşey yük grafiği	88
Şekil 5.36: FIP-D M 1600/600(3700) izolatorün mekanik özelliklerinin LS-DYNA programına girilmesi.....	89
Şekil 5.37: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler.....	89
Şekil 5.38: Çelik tank duvar gerilme-zaman grafiği.....	90
Şekil 5.39: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an.....	90
Şekil 5.40: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği.....	90
Şekil 5.41: Çelik tank duvar maksimum yanal deformasyonu	91
Şekil 5.42: Çelik tank duvar yanal deformasyon-zaman grafiği	91
Şekil 5.43: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı	91
Şekil 5.44: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman-zaman grafiği	92
Şekil 5.45: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	92
Şekil 5.46: FPS izolatorde meydana gelen yatay kuvvet deplasman grafiği....	93
Şekil 5.47: FPS izolator düşey yük grafiği	93
Şekil 6.1: Imperial Valley-1979 depreminde Calxico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank duvarında oluşan gerilmeler	95
Şekil 6.2: Imperial Valley-1979 depreminde Calxico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre LNG sıvısının dalga yükseklikleri	96
Şekil 6.3: Imperial Valley-1979 depreminde Calxico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank duvarında oluşan deformasyon grafiği	97
Şekil 6.4: Sabit mesnetli Sistem-I için Imperial Valley-1979 depreminde Calxico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları.....	98

Şekil 6.5: HDRB izolatörlü Sistem-II için Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları.....	98
Şekil 6.6: LRB izolatörlü Sistem-III için Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları.....	99
Şekil 6.7: FPS izolatörlü Sistem-IV için Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları.....	99
Şekil 6.8: Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre LNG tankının tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri	100
Şekil 6.9: Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	101
Şekil 6.10: Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre LRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	101
Şekil 6.11: Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre FPS deprem yalıtımında yatay kuvvet-deplasman grafiği.....	102
Şekil 6.12 Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre izolatörlere gelen düşey kuvvetlerin zaman içerisindeki değişimleri.....	103
Şekil A1.1: LNG sıvısının 1. çalkalanma frekansı f: 0.1011Hz (T: 9.888s) ..	118
Şekil A1.2: LNG sıvısının 2. çalkalanma frekansı f: 0.1343Hz (T: 7.447s) ..	118
Şekil A1.3: LNG sıvısının 3. çalkalanma frekansı f: 0.1509Hz (T: 6.629s) ..	118
Şekil A1.4: LNG sıvısının 4. çalkalanma frekansı f: 0.1580Hz (T: 6.33s)	118
Şekil A1.5: LNG sıvısının 5. çalkalanma frekansı f: 0.1780Hz (T: 5.618s) ..	119
Şekil A1.6: LNG sıvısının 6. çalkalanma frekansı f: 0.1782Hz (T: 5.612s) ..	119
Şekil A1.7: LNG sıvı ve çelik tankın 1. salınım frekansı f: 3.9718 Hz (T: 0.252s).....	119
Şekil A1.8: LNG sıvı ve çelik tankın 2. salınım frekansı f: 4.0986 Hz (T: 0.244s).....	119
Şekil A1.9: LNG sıvı ve çelik tankın 3. salınım frekansı f: 4.1754 Hz (T: 0.239s).....	119
Şekil A1.10: LNG sıvı ve çelik tankın 4. salınım frekansı f: 4.7762 Hz (T: 0.209s).....	120
Şekil A1.11: LNG sıvı ve çelik tankın 5. salınım frekansı f: 5.0602Hz (T: 0.197s).....	120
Şekil A1.12: LNG sıvı ve çelik tankın 6. salınım frekansı f: 5.7193 Hz (T: 0.175s).....	120
Şekil A1.13: LNG betonarme tankı 1. salınım frekansı f: 3.9718 Hz (T: 0.252s).....	120
Şekil A1.14: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 4.7762 Hz (T: 0.209s).....	120
Şekil A1.15: LNG betonarme tankı 3. salınım frekansı f: 5.7193 Hz (T: 0.175s).....	121
Şekil A2.1: LNG sıvısının 1. çalkalanma frekansı f: 0.1011Hz (T: 9.893s) ..	121
Şekil A2.2: LNG sıvısının 2. çalkalanma frekansı f: 0.1343Hz (T: 7.448s) ..	121
Şekil A2.3: LNG sıvısının 3. çalkalanma frekansı f: 0.1509Hz (T: 6.629s) ..	121

Şekil A2.4: LNG sıvısının 4. çalkalanma frekansı f: 0.1580Hz (T: 6.331s) ..	122
Şekil A2.5: LNG sıvısının 5. çalkalanma frekansı f: 0.1780Hz (T: 5.618s) ..	122
Şekil A2.6: LNG sıvısının 6. çalkalanma frekansı f: 0.1782Hz (T: 5.612s) ..	122
Şekil A2.7: LNG sıvı ve çelik tankın 1. salınım frekansı f: 3.9706 Hz (T: 0.252s).....	122
Şekil A2.8: LNG sıvı ve çelik tankın 2. salınım frekansı f: 4.0975 Hz (T: 0.244s).....	122
Şekil A2.9: LNG sıvı ve çelik tankın 3. salınım frekansı f: 4.1741 Hz (T: 0.240s).....	123
Şekil A2.10: LNG sıvı ve çelik tankın 4. salınım frekansı f: 4.7417 Hz (T: 0.211s).....	123
Şekil A2.11: LNG sıvı ve Çelik Tankın Beraber 5. Salınım Frekansı f: 5.0593 Hz (T: 0.198s)	123
Şekil A2.12: LNG sıvı ve çelik tankın 6. salınım frekansı f: 5.7174 Hz (T: 0.175s).....	123
Şekil A2.13: LNG betonarme tankı 1. salınım frekansı f: 3.9716 Hz (T: 0.252s).....	123
Şekil A2.14: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 4.7417Hz (T: 0.211s).....	124
Şekil A2.15: LNG betonarme tankı 3. salınım frekansı f: 5.7174Hz (T: 0.175s).....	124
Şekil A3.1: LNG sıvısının 1. Çalkalanma frekansı f: 0.1006Hz (T: 9.942s) ..	124
Şekil A3.2: LNG sıvısının 2. Çalkalanma frekansı f: 0.1343Hz (T: 7.448s) ..	124
Şekil A3.3: LNG sıvısının 3. Çalkalanma frekansı f: 0.1509Hz (T: 6.629s) ..	125
Şekil A3.4: LNG sıvısının 4. Çalkalanma frekansı f: 0.1580Hz (T: 6.33s) ...	125
Şekil A3.5: LNG sıvısının 5. Çalkalanma frekansı f: 0.178Hz (T: 5.618s) ...	125
Şekil A3.6: LNG sıvısının 6. Çalkalanma frekansı f: 0.1781Hz (T: 5.615s) ..	125
Şekil A3.7: LNG sıvısı ve çelik tankın 1. Salınım frekansı f: 3.4718 Hz (T: 0.288s).....	125
Şekil A3.8: LNG sıvısı ve çelik tankın 2. Salınım frekansı f: 3.8823Hz (T: 0.258s).....	126
Şekil A3.9: LNG sıvısı ve çelik tankın 3. Salınım frekansı f: 3.9885Hz (T: 0.251s).....	126
Şekil A3.10: LNG sıvısı ve çelik tankın 4. Salınım frekansı f: 4.0999 Hz (T: 0.244s).....	126
Şekil A3.11: LNG sıvısı ve çelik tankın 5. Salınım frekansı f: 4.8246 Hz (T: 0.207s).....	126
Şekil A3.12: LNG sıvısı ve çelik tankın 6. Salınım frekansı f: 5.01 Hz (T: 0.200s).....	126
Şekil A3.13: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 3.4718Hz (T: 0.288s).....	127
Şekil A3.14: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 3.8823Hz (T: 0.258s).....	127
Şekil A3.15: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 4.8246Hz (T: 0.207s).....	127
Şekil B.1: IV2-270-1940 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)	128
Şekil B.2: IV2-270-1940 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)	128
Şekil B.3: KC-111-1952 Taft Lincoln School istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)	128

Şekil B.4: KC-111-1952 Taft Lincoln School istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)	129
Şekil B.5: BM-270-1968 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)	129
Şekil B.6: BM-270-1968 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)	129
Şekil B.7: IV06-315-1979 Calxico Fire istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)	130
Şekil B.8: IV06-315-1979 Calxico Fire istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)	130
Şekil B.9: IV06-262-1979 Delta istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE).....	130
Şekil B.10: IV06-262-1979 Delta istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE).....	131
Şekil B.11: VM-102-1979 Chihuahua ivme-zaman grafiği (SSE).....	131
Şekil B.12: VM-102-1979 Chihuahua ivme-zaman grafiği (OBE).....	131
Şekil B.13: IITA-000-1980 Bisaccia istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)...	132
Şekil B.14: IITA-000-1980 Bisaccia istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)..	132
Şekil C1.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	133
Şekil C1.2: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	134
Şekil C1.3: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	134
Şekil C1.4: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	134
Şekil C1.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	135
Şekil C1.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	135
Şekil C1.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	135
Şekil C1.8: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği	136
Şekil C1.9: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	136
Şekil C1.10: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	137
Şekil C1.11: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	137
Şekil C1.12: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	137
Şekil C1.13: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	138
Şekil C1.14: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	138
Şekil C1.15: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	138
Şekil C1.16: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	139
Şekil C1.17: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği	139
Şekil C1.18: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	139
Şekil C1.19: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	140
Şekil C1.20: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	140
Şekil C1.21: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	140
Şekil C1.22: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	141
Şekil C1.23: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	141
Şekil C1.24: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	141
Şekil C1.25: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	142
Şekil C1.26: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği	142
Şekil C1.27: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	142
Şekil C1.28: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	143
Şekil C1.29: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	143
Şekil C1.30: LNG sıvısı dalga yüksekliği analiz modeli	143
Şekil C1.31: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	144
Şekil C1.32: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	144

Şekil C1.33: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	144
Şekil C1.34: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli .	145
Şekil C1.35: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği	145
Şekil C1.36: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	145
Şekil C1.37: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	146
Şekil C1.38: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	146
Şekil C1.39: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	146
Şekil C1.40: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	147
Şekil C1.41: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	147
Şekil C1.42: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	147
Şekil C1.43: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	148
Şekil C1.44: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği	148
Şekil C1.45: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	148
Şekil C1.46: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	149
Şekil C1.47: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	149
Şekil C1.48: LNG sıvısı dalga yüksekliği analiz modeli	149
Şekil C1.49: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	150
Şekil C1.50: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	150
Şekil C1.51: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	150
Şekil C1.52: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	151
Şekil C1.53: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği	151
Şekil C1.54: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	151
Şekil C2.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	152
Şekil C2.2: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	153
Şekil C2.3: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	153
Şekil C2.4: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	153
Şekil C2.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	154
Şekil C2.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	154
Şekil C2.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli.....	154
Şekil C2.8: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	155
Şekil C2.9: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	155
Şekil C2.10: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	156
Şekil C2.11: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği.....	156
Şekil C2.12: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	157
Şekil C2.13: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	157
Şekil C2.14: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	157
Şekil C2.15: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	158
Şekil C2.16: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	158
Şekil C2.17: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	158
Şekil C2.18: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	159
Şekil C2.19: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	159
Şekil C2.20: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	159
Şekil C2.21: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	160
Şekil C2.22: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği.....	160
Şekil C2.23: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	161

Şekil C2.24: Çelik tank duvar gerilme grafiği	161
Şekil C2.25: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	161
Şekil C2.26: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	162
Şekil C2.27: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	162
Şekil C2.28: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	162
Şekil C2.29: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	163
Şekil C2.30: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	163
Şekil C2.31: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	163
Şekil C2.32: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	164
Şekil C2.33: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği.....	164
Şekil C2.34: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	165
Şekil C2.35: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	165
Şekil C2.36: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliği analiz modeli.....	165
Şekil C2.37: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	166
Şekil C2.38: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	166
Şekil C2.39: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	166
Şekil C2.40: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	167
Şekil C2.41: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	167
Şekil C2.42: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	167
Şekil C2.43: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	168
Şekil C2.44: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği.....	168
Şekil C2.45: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	169
Şekil C2.46: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	169
Şekil C2.47: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	169
Şekil C2.48: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	170
Şekil C2.49: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	170
Şekil C2.50: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	170
Şekil C2.51: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli.....	171
Şekil C2.52: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	171
Şekil C2.53: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	171
Şekil C2.54: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	172
Şekil C2.55: HDRB izolatör düşey kuvvet grafiği.....	172
Şekil C2.56: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	173
Şekil C2.57: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	173
Şekil C2.58: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	173
Şekil C2.59: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	174
Şekil C2.60: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	174
Şekil C2.61: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	174
Şekil C2.62: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli.....	175
Şekil C2.63: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	175
Şekil C2.64: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	175
Şekil C2.65: HDRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	176
Şekil C2.66: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği.....	176

Şekil C3.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	177
Şekil C3.2: Çelik tank duvar gerilme analiz-zaman grafiği	178
Şekil C3.3: LNG sıvısı dalga yüksekliği analizi modeli	178
Şekil C3.4: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	178
Şekil C3.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	179
Şekil C3.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	179
Şekil C3.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli.....	179
Şekil C3.8: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	180
Şekil C3.9: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	180
Şekil C3.10: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	181
Şekil C3.11: LRB izolatör düşey kuvveti grafiği	181
Şekil C3.12: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	182
Şekil C3.13: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	182
Şekil C3.14: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	182
Şekil C3.15: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği.....	183
Şekil C3.16: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	183
Şekil C3.17: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	183
Şekil C3.18: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası analiz modeli	184
Şekil C3.19: Çelik tank taban-duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	184
Şekil C3.20: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	184
Şekil C3.21: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	185
Şekil C3.22: LRB izolatör düşey kuvveti grafiği	185
Şekil C3.23: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	186
Şekil C3.24: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	186
Şekil C3.25: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	186
Şekil C3.26: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	187
Şekil C3.27: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	187
Şekil C3.28: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	187
Şekil C3.29: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	188
Şekil C3.30: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği	188
Şekil C3.31: LNG tankı taban kesme kuvveti grafiği	188
Şekil C3.32: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	189
Şekil C3.33: LRB izolatör düşey kuvveti grafiği	189
Şekil C3.34: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	190
Şekil C3.35: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	190
Şekil C3.36: LNG sıvısı maksimum dalga yükseklik analiz modeli.....	190
Şekil C3.37: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	191
Şekil C3.38: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	191
Şekil C3.39: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	191
Şekil C3.40: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	192
Şekil C3.41: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman grafiği	192
Şekil C3.42: LNG tankı taban kesme kuvveti grafiği	192
Şekil C3.43: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	193
Şekil C3.44: LRB izolatör düşey kuvvet grafiği	193
Şekil C3.45: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	194
Şekil C3.46: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	194

Şekil C3.47: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	194
Şekil C3.48: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği.....	195
Şekil C3.49: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	195
Şekil C3.50: Çelik tank duvarı yanal deformasyon grafiği	195
Şekil C3.51: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	196
Şekil C3.52: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman grafiği	196
Şekil C3.53: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği	196
Şekil C3.54: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	197
Şekil C3.55: LRB İzolatörü düşey kuvvet grafiği	197
Şekil C3.56: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	198
Şekil C3.57: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	198
Şekil C3.58: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	198
Şekil C3.59: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	199
Şekil C3.60: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	199
Şekil C3.61: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	199
Şekil C3.62: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli .	200
Şekil C3.63: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman grafiği	200
Şekil C3.64: LNG tank taban kesme kuvvet grafiği.....	200
Şekil C3.65: LRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	201
Şekil C3.66: LRB İzolatörü düşey kuvvet grafiği	201
Şekil C4.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	202
Şekil C4.2: Çelik tank duvar gerilme analizi grafiği	203
Şekil C4.3: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	203
Şekil C4.4: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	203
Şekil C4.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	204
Şekil C4.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	204
Şekil C4.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasmanı analiz modeli.....	204
Şekil C4.8: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği	205
Şekil C4.9: LNG tank taban kesme kuvvet grafiği	205
Şekil C4.10: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	206
Şekil C4.11: FPS izolatörü düşey kuvvet grafiği	206
Şekil C4.12: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	207
Şekil C4.13: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	207
Şekil C4.14: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	207
Şekil C4.15: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	208
Şekil C4.16: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	208
Şekil C4.17: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	208
Şekil C4.18: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli .	209
Şekil C4.19: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği ..	209
Şekil C4.20: LNG tank taban kesme kuvvet grafiği.....	209
Şekil C4.21: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	210
Şekil C4.22: FPS izolatörü düşey kuvvet grafiği	210
Şekil C4.23: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	211
Şekil C4.24: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	211
Şekil C4.25: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	211
Şekil C4.26: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği	212
Şekil C4.27: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	212
Şekil C4.28: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği	212

Şekil C4.29: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli .	213
Şekil C4.30: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği	213
Şekil C4.31: LNG tank toplam taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	213
Şekil C4.32: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği.....	214
Şekil C4.33: FPS izolatör düşey kuvvet-zaman grafiği.....	214
Şekil C4.34: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	215
Şekil C4.35: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	215
Şekil C4.36: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	215
Şekil C4.37: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	216
Şekil C4.38: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	216
Şekil C4.39: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz grafiği.....	216
Şekil C4.40: Çelik tank taban-tavan deplasman analiz modeli	217
Şekil C4.41: Çelik tank taban-tavan deplasman grafiği	217
Şekil C4.42: LNG tankı toplam taban kesme kuvvet grafiği	217
Şekil C4.43: FPS izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	218
Şekil C4.44: FPS izolatörü düşey kuvvet grafiği	218
Şekil C4.45: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	219
Şekil C4.46: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	219
Şekil C4.47: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli.....	219
Şekil C4.48: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	220
Şekil C4.49: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli	220
Şekil C4.50: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz grafiği.....	220
Şekil C4.51: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli.....	221
Şekil C4.52: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği	221
Şekil C4.53: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	221
Şekil C4.54: FPS izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği	222
Şekil C4.55: FPS izolatör düşey kuvvet grafiği	222
Şekil C4.56: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli	223
Şekil C4.57: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği	223
Şekil C4.58: LNG sıvısı dalga yüksekliği analiz modeli	223
Şekil C4.59: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği.....	224
Şekil C4.60: Çelik tank duvar yanal deplasman hareketi modeli.....	224
Şekil C4.61: Çelik tank duvar yanal deplasman analiz grafiği	224
Şekil C4.62: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli .	225
Şekil C4.63: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği	225
Şekil C4.64: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği.....	225
Şekil C4.65: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği	226
Şekil C4.66: FPS izolatör düşey kuvvet grafiği	226
Şekil D.1: Dört farklı sistem IV02-1940 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği	227
Şekil D.2: Dört farklı sistem KC-1952 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği.....	227
Şekil D.3: Dört farklı sistem BM-1968 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği	228
Şekil D.4: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği	228

Şekil D.5: Dört farklı sistem VM-1980 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği	229
Şekil D.6: Dört farklı sistem IITA-1980 depremi çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği.....	229
Şekil D.7: Dört farklı sistem IV02-1940 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği.....	230
Şekil D.8: Dört farklı sistem KC-1952 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği.....	230
Şekil D.9: Dört farklı sistem BM-1968 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği.....	231
Şekil D.10: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği.....	231
Şekil D.11: Dört farklı sistem Victoria-1980 depreminde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği.....	232
Şekil D.12: Dört farklı sistem Irpinia-1980 depreminde LNG sıvısının dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği.....	232
Şekil D.13: Dört farklı sistem IV02-1940 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonların karşılaştırılması grafiği	233
Şekil D.14: Dört farklı sistem KC-1952 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonların karşılaştırılması grafiği	233
Şekil D.15: Dört farklı sistem BM-1968 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonların karşılaştırılması grafiği	234
Şekil D.16: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği	234
Şekil D.17: Dört farklı sistem VM-1980 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği	235
Şekil D.18: Dört farklı sistem IITA-1980 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği	235
Şekil D.19: Dört farklı sistem IV02-1940 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	236
Şekil D.20: Dört farklı sistem KC-1952 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	236
Şekil D.21: Dört farklı sistem BM-1968 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	237
Şekil D.22: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	237
Şekil D.23: Dört farklı sistem VM-1980 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	238
Şekil D.24: Dört farklı sistem IITA-1980 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	238
Şekil D.25: IV02-1940 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	239
Şekil D.26: KC-1952 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	239
Şekil D.27: BM-1968 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	240
Şekil D.28: IV06-II-1979 depremi LNG tank altı mesneti HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvet-zaman grafiği.....	240
Şekil D.29: VM-1980 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılması grafiği.....	241

Şekil D.30: IITA-1980 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği	241
---	-----



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Tankın H/R oranının bir fonksiyonu olarak 1. itkisel ve 1. taşınımlı modların titreşimi ile tavsiye edilen dizayn değerleri. Bütün katsayılar tank-sıvı sisteminde yere rijit olarak bağlanmıştır (Malhotra ve diğ. 2000).....	6
Tablo 2.1: Şekil 2.3'deki elemanların tarifleri	29
Tablo 4.1: LNG depolama tankının malzeme özellikleri.....	49
Tablo 4.2: 232,000 m ³ hacimli LNG depolama tankının geometrik karakteristikleri.....	50
Tablo 4.3: Çelik tank ve sıvının doğal frekansları ve periyotları.....	59
Tablo 4.4: LNG betonarme tankının sabit mesnette doğal frekansları ve periyotları	60
Tablo 4.5: LNG tank toplam ağırlığı.....	62
Tablo 4.6: HDRB SI-N 900/204 tipi izolatörün geometrik özellikleri (FIPMEC 2022).....	62
Tablo 4.7: HDRB SI-N 900/204 tipi izolatörün mekanik özellikleri (FIPMEC 2022).....	62
Tablo 4.8: İç çelik tankın doğal frekansları ve periyotları	63
Tablo 4.9: LNG tankı betonarme yapının doğal frekansları ve periyotları	64
Tablo 4.10: LRB SN 900/225-185 tipi izolatörün geometrik özellikleri (FIPMEC 2022).....	65
Tablo 4.11: LRB SN 900/225-185 tipi izolatörün mekanik özellikleri (FIPMEC 2022).....	65
Tablo 4.12: Çelik tankın doğal frekansları ve periyotları	66
Tablo 4.13: LNG betonarme yapının doğal frekansları ve periyotları.....	66
Tablo 4.14: FIP-D M 1600/600(3700) tipi izolatörün geometrik özellikleri (FIPMEC 2022).....	67
Tablo 4.15: FPS izolatör sürtünme katsayısı (FIPMEC 2022)	67
Tablo 4.16: Çelik tankın doğal frekansları ve periyotları	69
Tablo 4.17: LNG betonarme yapının doğal frekansları ve periyotları.....	69
Tablo 4.18: Kısa Periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TDY 2018).....	71
Tablo 4.19: 1.0 saniye periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TDY 2018).....	71
Tablo 4.20: Deprem ivme kayıtları	74
Tablo 6.1: LNG sıvısının periyotları (itkisel periyotlar)	94
Tablo 6.2: LNG sıvısı ve iç çelik tankın beraber hareket ettiği periyotlar (taşınımlı periyotlar).....	94
Tablo 6.3: Betonarme dış kabuk yapının periyotları.....	94
Tablo 6.4: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmelerin (MPa) karşılaştırılması ve izolatörlü sistemlerin sabit sisteme göre oranları (%).....	95
Tablo 6.5: LNG sıvısının maksimum dalga yüksekliklerinin (mm) karşılaştırılması	96
Tablo 6.6: Çelik tank duvarının yanal deformasyon (mm) değerleri ve izolatörlü sistemlerin sabit mesnetli sisteme göre oranları (%)	97

Tablo 6.7: Çelik tank tabanı ve duvar tepe noktasının deplasman (mm) değerleri ve izolatörlü sistemlerin sabit mesnetli sisteme göre oranları (%)	99
Tablo 6.8: LNG tankın tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri (kN) ve sabit mesnete göre izolatörlü sistemlerin oranları (%).....	100
Tablo 6.9: LNG tank taban izolatörleri maksimum yatay kuvvet–deplasman değerleri.....	102
Tablo 6.10: Taban izolatörleri maksimum düşey kuvvet değerleri (kN)	103



RESİM LİSTESİ

Sayfa

Resim 2.1: Fil ayağı burkulması(https://blog.cartif.com), (Malhotra ve diğ. 2000), (DiCarliccio ve diğ. 2008)	21
Resim 2.2: Elmas şeklinde burkulma, (www.shellbuckling.com), (Christovasilis ve Whittaker 2006)	21
Resim 2.3: Sıvının dalga hareketinden dolayı tankın üst kısımlarda oluşan burkulma, Sıvının dalga hareketinin simülasyonu (Anumod ve diğ. 2014), (Malhotra ve diğ. 2000), (Castano 2016).....	22
Resim 2.4: Tankın kayması (Anumod ve diğ. 2014), (Sari ve diğ. 2016), (Hamada 2016).....	23
Resim 2.5: Tank çatısının göçmesi (Sezen ve diğ. 2000), (Soules 2009)	24
Resim 2.6: Tankta ankraj bulonunun betondan ayrılması, ankraj plakasının eğilmesi, ankrajın kopması (Brunesi ve diğ. 2015), (Dizhur ve diğ. 2017).....	24
Resim 2.7: Tankta farklı oturmalar nedeniyle tankın yana yatması (https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa)	25
Resim 2.8: Tanka bağlı boru sistemlerinin hasar görmesi, (Di Carliccio ve diğ. 2008), (Cooper 1997)	25
Resim 2.9: Alaska (1964), Niigata (1964), Kocaeli (1999), Japonya (2011), (Brocher ve diğ. 2014), (https://www.gettyimages.ca), (Hamada 2016).....	26
Resim 2.10: Tek muhafazalı (a), çift muhafazalı (b), tam muhafazalı (c) ve yere gömülü (d) LNG Tankları (ARUP 2018).	28
Resim 2.11: İzmir Aliğa Egegaz 140,000 m ³ hacimli LNG Tankları Her biri için 112 LRB 241 HDRB kullanılmıştır. D:85 m H:35 m (www.terbayinsaat.com).	33
Resim 2.12: Yunanistan Atina yakınlarındaki Revithoussa adası 130,000 m ³ hacimli LNG Tankları 212 FPS kullanılmıştır. D:68.8 m H:32.3 m 2.75 s dinamik periyod. Depremin oluşturduğu taban kesme kuvvetini % 80 azaltmaktadır (Earthquake Protection Systems 2004).....	33
Resim 2.13: Peru Melchorita 130,000 m ³ hacimli LNG Tankları 256 FPS kullanılmıştır. D:78 m H:32.9 m. Depremin oluşturduğu taban kesme kuvvetini % 85 azaltmaktadır (Earthquake Protection Systems 2008).	34
Resim 2.14: Güney Kore Incheon 100,000 m ³ hacimli LNG Tankları 392 HDRB kullanılmıştır. 3 s dinamik periyod. D:70 m, H:36 m. (Dr. Yang 2011).....	34
Resim 3.1: Dünya’da ilk izolatörlü yapı 1969’da Makedonya’da yapılan Pestalozzi ilkokul binası (Farzad ve Kelly 1999).....	37
Resim 4.1: Marmara Ereğlisi BOTAŞ Tesisi LNG Tankları	72

SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

A	:	HDRB ve LRB izolatör kauçuğun plandaki enkesiti
a	:	HDRB izolatör bir kenar uzunluğu
C_i	:	İtkisel katsayılar
C_c	:	Konvektif katsayılar
D	:	FPS izolatör ankraj elemanlar hariç çapı
D_g	:	HDRB ve LRB izolatör çapı
d_{max}	:	HDRB ve FPS izolatör maksimum yatay yerdeğiştirme değeri
C1	:	HDRB ve LRB izolatör akma dayanımındaki deplasman miktarı
C2	:	LRB izolatör maksimum deplasman miktarı
E	:	Çelik tank malzemesinin elastisite modülü
E_c	:	HDRB ve LRB izolatör belirli düzeydeki bir düşey yük etkisi altında kauçuk ve çelikten oluşan kompozit elemanın basınç modülü
F	:	FPS izolatör sistemde meydana gelen tepki kuvveti
F_{max}	:	FPS izolatöre gelen maksimum yatay kuvvet
$F_{sür}$	:	FPS izolatör sürtünme kuvveti
F_y	:	LRB izolatör kurşun çekirdeğin akma kuvveti
F_1	:	HDRB ve LRB izolatör akma dayanımındaki yatay kuvvet
G_L	:	LRB izolatör kurşun çekirdeğin kayma modülü
G_r	:	HDRB ve LRB izolatör elastomerin kayma modülü
H	:	LNG sıvı yüksekliği
H_c	:	Konvektif kütlelerin merkezlerinden hidrodinamik basınç kuvvetlerin tabana olan mesafesi
H_i	:	İtkisel kütlelerin merkezlerinden hidrodinamik basınç kuvvetlerin tabana olan mesafesi
H_r	:	HDRB, LRB ve FPS izolatör dış plaka dahil toplam yükseklik
h_r	:	HDRB ve LRB izolatör dış plaka hariç toplam yükseklik
K_c	:	Tanımlanan rijitlik
K_e	:	HDRB, LRB ve FPS izolatör yatay efektif rijitlik
K_r	:	FPS izolatör düzeltilmiş rijitlik
K_v	:	HDRB, LRB ve FPS izolatör düşey rijitlik
K_1	:	HDRB ve LRB izolatör akma öncesi yatay yön için etkili rijitlik
K_2	:	HDRB ve LRB izolatör C2 (maksimum) deplasmanında etkili yatay rijitlik
K_2 / K_1	:	LRB izolatör akma sonrası yatay yön için etkili rijitliğin akma öncesi yatay yön için etkili rijitliğe oranı
M	:	HDRB izolatör eğilme momenti
MCE_R	:	Yer hareketi için dikey ve yatay ivme spektrumları
N_{ed}	:	FPS izolatöre deprem yükleri altında gelen düşey kuvvet
N_{sd}	:	FPS izolatöre etkiyen düşey yük
Q	:	LRB izolatör kurşun çekirdeğin karakteristik dayanımı
P	:	LNG tank altı toplam izolatör adeti
R	:	Çelik tank yarıçapı
R_{HDRB}	:	HDRB izolatör yarıçaplı dairesel tampon
R_{FPS}	:	FPS izolatörde küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı

S	:	HDRB izolatör elastomer kauçuk malzemenin tek bir tabakasına ait boyutsuz bir oran ölçüsü
T_{con}	:	Konvektif modların periyodu
T_{HDRB}	:	HDRB izolatör efektif periyot
T_{LRB}	:	LRB izolatör efektif periyot
T_{FPS}	:	FPS izolatör efektif periyot
T_{imp}	:	İtkisel modların periyodu
t	:	HDRB ve LRB izolatör tek bir kauçuk tabakasının kalınlığı
t_r	:	HDRB ve LRB izolatör kauçuğun toplam kalınlığı
t_{st}	:	Çelik tank duvar kalınlığı
W	:	HDRB, LRB ve FPS izolatör için ağırlık ankraj elemanları hariç
W_D	:	LRB izolatör tam periyot zamanında dağıtılan enerji
W_i	:	HDRB, LRB ve FPS izolatörlerin taşıyabileceği maksimum düşey yük
W_{FPS}	:	FPS izolatörüne gelen maksimum düşey yük
Y	:	FPS izolatör plan üzerindeki bir uçtan bir uca maksimum genişlik
Z	:	HDRB ve LRB izolatör dış taraftaki çelik plakaların kenar uzunluğu, FPS izolatör ankrajları içine alan ankraj elemanlar hariç çapı
α	:	HDRB izolatör üst ve alt levhalar arasındaki rölatif açı
γ_b	:	HDRB izolatör eğilme nedeniyle oluşan kayma şekil değiştirmesi
γ_c	:	Betonarme malzemenin özkütlesi
γ_{cg}	:	Cam yünü özkütlesi
γ_{LNG}	:	LNG sıvısının özkütlesi
γ_p	:	Perlit özkütlesi
γ_m	:	HDRB izolatör maksimum kayma şekil değiştirmesi
γ_p	:	Perlit özkütlesi
γ_{st}	:	Çelik tankın özkütlesi
ϵ_c	:	HDRB izolatör nominal basınç şekil değiştirmesi
ϵ_b	:	HDRB ve LRB izolatör eğilme nedeniyle oluşan basınç şekil değiştirme
μ	:	FPS izolatör sürtünme katsayısı
ξ_e	:	HDRB, LRB ve FPS izolatör maksimum deplasmanında akışkan olmayan sönüm katsayısı
σ_{11}	:	Düşey yönde çelik tank içi gerilmeler
σ_{22}	:	Yatay yönde çelik tank içi gerilmeler
ρ	:	HDRB izolatör yer değiştirme tarafından meydana getirilen eğrilik yarıçapı
ν_L	:	Çelik tank poisson oranı
ϖ	:	Taşınımli modun frekansı
ω	:	LRB izolatör doğal titreşim frekansı
LNG	:	(Liquified Natural Gas): Sıvılaştırılmış doğal gaz
HDRB	:	(High Damping Rubber Bearing): Yüksek sönümlü kauçuk izolatör.
LRB	:	(Lead Rubber Bearing): Düşük sönümlü kurşun çekirdekli kauçuk izolatör.

- FPS : (Friction Pendulum System): Sürtünmeli sarkaç sistemli izolatör.
OBE : (Operating Basis Earthquake): 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi.
SSE : (Safe Shutdown Earthquake): 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi.
ALE : (Aftershock Level Earthquake): SSE yer hareketi düzeyinde alınacak ivme kayıt değerlerinin yarısı olarak alınır.



Doktora çalışmalarım sırasında bana inanan ve sahip çıkan, bir öğretmen gibi değil abi gibi davranan değerli hocam Prof. Dr. Abdullah Cem Koç'a; depremler, izolatorler ve çelik tanklar ile ilgili engin bilgisi ile tez konumun fikir babası Prof. Dr. Bülent Akbaş'a; değerli fikirleri ile yol gösteren tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Tezcan Şekercioğlu ve Dr. Öğr. Üy. Bayram Tanık Çaycı'ya; ANSYS Workbench ve LS-DYNA programındaki üstün bilgisi ile modelleme ve analizlerde bana yardımcı olan Makine Yüksek Mühendisi Hakan Balaban'a; deprem ivmeleri seçimi ve izolatorler ile ilgili fikirleriyle tezime ışık tutan İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora öğrencisi Murat Çelik'e ve inşaat mühendisliğinde ondan çok şey öğrendiğim rahmetle andığım Prof. Dr. Nahit Kumbasar hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca doktora çalışmalarım boyunca bana katlanan, evin maddi manevi tüm yükünü çeken eşime, dualarıyla bana manevi güç olan anneme, bugünleri görmesini çok istediğim rahmetli babama minnet ve şükranlarımı sunarım.

1. GİRİŞ

Sıvı depolama tankları su, petro-kimya tesislerinde önemli bir yer tutar. Su depolama tankları şehir merkezine yakın bir yerde yapılırken, petrol ve doğal gaz depolama tankları rafineri tesis içinde yer alır. Tank tiplerinin çoğu silindirik, düşey çelik ya da ard-germeli betonarme tanklardır. Yapının ekonomik değerinden dolayı sıvı depolama tanklarının deprem performansı daha da önem arz etmektedir. Bu yapılar depremden hemen sonra da kullanılması insanların yaşamları için acil ihtiyaçlarından dolayıdır. Özellikle su depoları depremin yıkıcı etkilerinden dolayı binalarda oluşan yangınlar, doğal gaz patlamaları için önem arzeder. Diğer taraftan tehlike arzeden yakıtlar petrol ve doğalgaz depolama tankları deprem sonrasında büyük çevresel felaketlere de yol açarlar. Alaska-A.B.D. (1964), Niigata –Japonya (1964), Kobe–Japonya (1995), Kocaeli-Türkiye (1999).

Bu yüzden bilim adamları geçmiş yer sarsıntılarında tehlike arzeden sıvı depolama tanklarını deprem karşısındaki performansını incelemek için deneysel ve analitik araştırmalara teşvik etmiştir. Çalışmaların çoğu ankrajlı tanklar üzerine yoğunlaşmıştır. Bu sayede deprem salınımı boyunca tankın kalkması önlenmiş, ankraj bulonlarının temelle birleştiği yerlerde büyük gerilmeler oluştuğu belirlenmiştir. Bununla birlikte ankraj çubuklarında oluşan büyük gerilmeler ile tank alt bölge duvarında veya ankraj bölgelerinde gözlemlendiği saptanmıştır. Tankın kalkmasının önlenmesi temelin kütlesine bağlıdır. Ankrajlı tanklar ankrajsız tanklara göre maliyeti daha yüksek olmasına rağmen güçlü yer hareketinde tankın kayması tehlikesinin önüne geçmiş olur. Ne zaman ki silindirik tanklar deprem dalgalarına maruz kalır, düşey kuvvetler ve devrilme momentlerinin sonucu olarak düşey çekme kuvvetleri tank duvarlarının ağırlığı aşmasına neden olabilir. Ankrajsız olduğu takdirde taban plakasının kalkmasına ve dengeleyici kuvvet olan sıvının ağırlığı tank duvarı ile taban plakasının ayrılmasına neden olur. Bu olay tank duvarında büyük gerilmelere ve taban plakasında düzlem içi gerilmelere neden olur. Bunun sonucu olarak malzemenin akması elastik ve elastik olmayan davranışı gözlemlenir.

1.2 Ankrajlı Sıvı Depolama Tankları ile İlgili Bilimsel Çalışmalar

Sıvı depolama tankları ile ilgili araştırmalar 1930 yıllarına kadar gitmiştir. Araştırmalarda en çok ilgi çeken kısım tank içindeki sıvının tank duvarıyla yaptığı etkileşimdir. Yer hareketi ile düşey doğrultudaki sıvının kütlesi tankın duvarına doğru hareket ederken sıvının sismik enerjisi tankın duvarına transfer edilmiş olur. Sıvının bir bölüm kütlesi tank ile beraber hareket ederken diğer kalan sıvının kütlesi çalkalanma hareketi yapar. Bu dalga hareketi sıvının en üst yüzeyinde oluşur. Geniş tanklar için bu dalga hareketi 6-10 s'lik periyotlar halindedir. Bu çalkalanma hareketi yer ivmesinden daha çok yer değişiminden etkilenir. Tankın üst kısımlarında görülen bu hareket olayı çok karmaşık ve lineer olmayan davranıştır. Temelin kalkması ile beraber büyük deplasmanların oluşumu, temel-duvar birleşimindeki eğilmeler, tankın geometrisine bağlı olarak zemin-temel etkileşimi ve sönümlenme göz önüne alınmalıdır (Christovasilis ve Whittaker 2006).

Deprem boyunca dinamik sıvı basınçlarının belirlenmesi baraj ve tank yapılarının dizaynında önemlidir. Problemin çözümüne yönelik ilk çalışma Westergard (1933), yaptığı araştırmadır. Bu çalışmada sıvının yatay ivmesinin baraj yüzeyine yaptığı basıncı tanımladı. Jacobsen (1949, 1951), sıvı içeren silindirik bir tankta sıvı tarafından silindirik her yüzeyine bu sıvı basıncın olduğunu kanıtladı. Werner ve Sundquist (1949), Jacobsen'in bu çalışmasını dikdörtgen, üçgen, yarım ay ve yarım küre yapılarda denedi. Graham ve Rodriguez (1952), dikdörtgen sıvı içeren bir tanktaki çalışmalarında sıvının itkisel (impulsive) ve taşınımlı (convective) bir basınç ile yüzeylere etki ettiğini görmüştür (Housner 1957).

Housner (1957), Şekil 1.1'de görüldüğü gibi sıvının birinci kısmının tank duvarı ile rijit geri kalan üst tarafın ise yer hareketine göre çalkalanma davranışı yaptığını gözlemlemiştir. Fakat bu davranış şeklinin tank duvarı ile bağlantılı olacağı öngörmüştür. Sıvı yapı etkileşiminin etkileri ve sıvının çalkalanması hidrodinamik basınç etkileri olarak iki bileşene ayırmıştır. Sıvının birinci kısmı itkisel basınç yani tankın ivmesi ile beraber hareket eden tank duvarına rijit bir sıvı kütlesi M_i , sıvının diğer kalan kısmının taşınımlı basınç, yani tankın içindeki çalkalanma hareketi M_c . Bu iki bileşende tek serbestlik dereceli elektro manyetik dalgalar yayan bir cihaz ile modellemiştir (Housner 1963).

Housner (1957 ve 1963) çalışmalarında her iki kütlenin tabanın üstündeki yüksekliklerde ilgili basınç merkezlerinin yüksekliklerine eşit olduğunu varsaymıştır. H, sıvı yüksekliği ve R, tank yarıçapı olmak üzere H/R oranına göre itkisel ve taşınımli kütle oranlarının aşağıdaki denklemlere göre değiştiği kabul edilmiştir. Tankın ve LNG sıvısının boyutlarından itkisel ve taşınımli kütle M_i ve M_c , rijitlik ve yükseklikleri Denklemler 1.1-1.5’de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$M_i = M \frac{\tanh(\frac{\sqrt{3}R}{H})}{(\frac{\sqrt{3}R}{H})} \quad (1.1)$$

$$H_i = \frac{3}{8} H \quad (1.2)$$

$$M_c = \frac{M}{4} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{H} \tanh(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{H}) \quad (1.3)$$

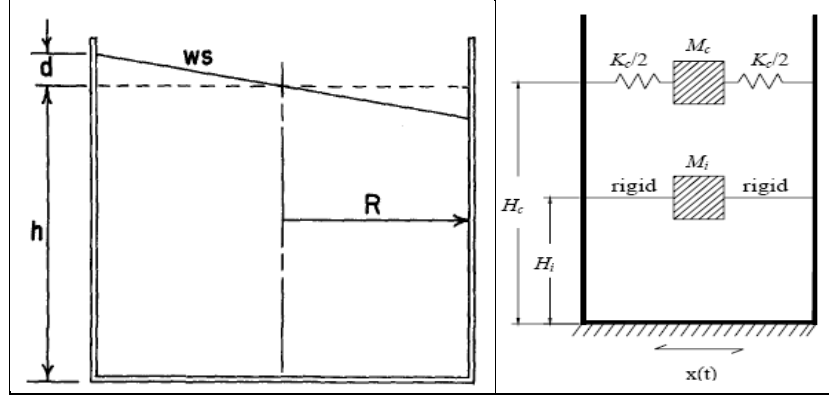
Burada, H_i ve H_c itkisel ve taşınımli kütlelerin merkezlerinden hidrodinamik basınç kuvvetlerin tabana olan mesafesidir.

$$H_c = H \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H}{R} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H}{R}\right)} + \frac{1}{\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H}{R} \sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H}{R}\right)} \right] \quad (1.4)$$

$$K_c = M_c \frac{g}{R} \sqrt{\frac{27}{8}} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H}{R}\right) \quad (1.5)$$

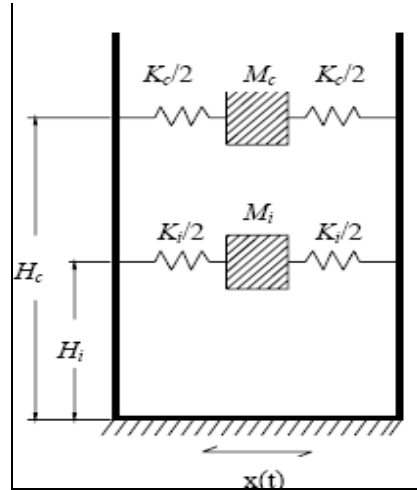
Burada, K_c , tanımlanan rijitlik ve g , yerçekimi ivmesidir.

Tez konusuyla ilgili literatür üç başlık altında incelenebilir. Bunlar, sıvı ve LNG depolayan tankların deprem davranışları, deprem izolatörleri, izolatörlü LNG tanklarının deprem davranışlarıdır.



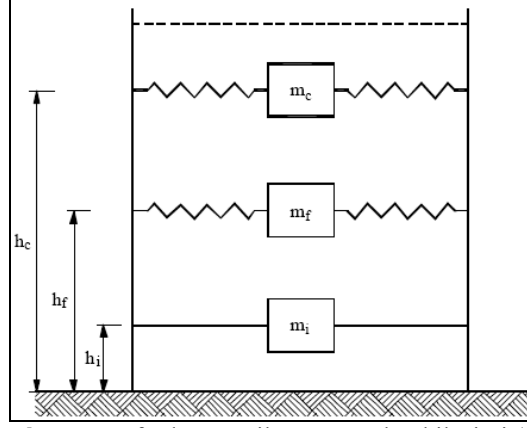
Şekil 1.1: Sıvının dinamik hareketi (Housner 1957)

Daha ileriki yıllardaki çalışmalarda Housner basitleştirilmiş modeli temel baz olarak özellikle sıvının tank duvarı ile olan esneklik durumu incelemiştir. Veletsos (1974), Veletsos ve Yang (1976), sadece itkisel bileşeni için bir kütle kullanmıştır. İtkisel modun frekansı ile yerin salınımı ile benzeştiğini farketti. Haroun ve Housner (1981) kütleyi böldü. M_i kütlesi, iki bölüm içindeki yer ile bağlantılı olan rijit hareket ediyordu. Geriye kalan bölüm ise tankın deformasyonundan dolayı göreceli hareket etmektedir (Veletsos 1984). Veletsos 1976, 1984 ve 1990 yıllarındaki çalışmalarını göz önüne alarak kütle ve frekans hesaplamalarını basit prosedürler halinde daha uygulanabilir hale getirmiştir. Malhotra ve diğ. (2000), Housner'ın 1957 ve 1963'de önerdiği itkisel kütlelerin rijit sayılması yerine tankın alt çeperi ile etkileşimli kabul edilmesinin daha uygun olacağını belirtmişlerdir (bkz. Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Sıvının dinamik hareketi (Malhotra ve diğ. 2000)

Veletsos (1976 ve 1984) Şekil 1.3'deki gibi tankın yapı ile sıvının etkileşiminden bir kütlelerin ayrı hareket ettiğini belirtmiştir.



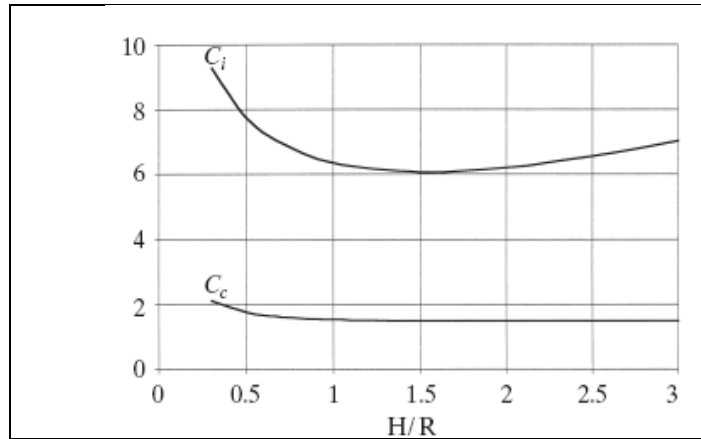
Şekil 1.3: Veletsos tarafından önerilen sıvı-tank etkileşimi (Barros 2008)

Malhatro ve diğ. (2000), H/R oranına göre itkisel ve taşınımlı C_i ve C_c katsayıları (bkz. Şekil 1.4) ile sıvının kütle ve yükseklik oranlarını belirlemişlerdir (bkz. Tablo 1.1). İtkisel ve taşınımlı 1. Modlar Denklemler 1.6 ve 1.7'ye göre hesaplanır.

$$T_{imp} = C_i \frac{H\sqrt{\gamma_{LNG}}}{\sqrt{\left(\frac{t_{st}}{R}\right)\sqrt{E_{st}}}} \quad (1.6)$$

$$T_{con} = C_c \sqrt{R} \quad (1.7)$$

Burada, γ_{LNG} , LNG sıvısının özgül ağırlığı, E_{st} , çelik tank malzemesinin elastisite modülü ve t_{st} , çelik tank duvar kalınlığı, T_{imp} ve T_{con} , itkisel ve taşınımlı modların periyodlarıdır.

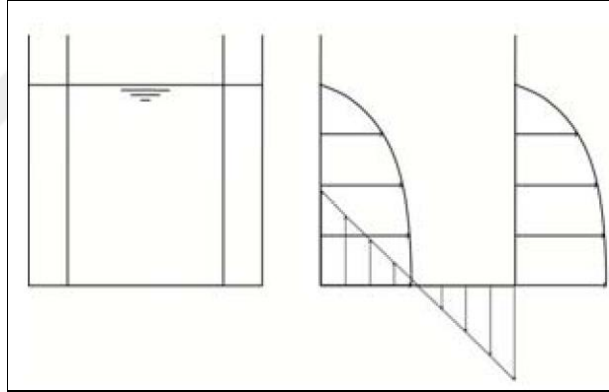


Şekil 1.4: C_i ve C_c için itkisel ve taşınımlı katsayılar (Malhotra ve diğ. 2000).

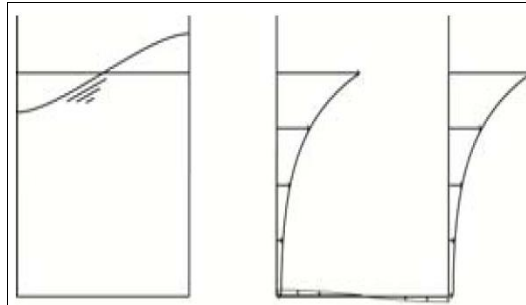
Tablo 1.1: Tankın H/R oranının bir fonksiyonu olarak 1. itkisel ve 1. taşınımlı modların titreşimi ile tavsiye edilen dizayn değerleri. Bütün katsayılar tank-sıvı sisteminde yere rijit olarak bağlanmıştır (Malhotra ve diğ. 2000).

H / R	C_i	$C_c \times \left[s / \sqrt{m} \right]$	M_i / M	M_c / M	H_i / H	H_c / H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543
0.7	6.97	1.52	0.414	0.586	0.401	0.571
1.0	6.36	1.48	0.548	0.452	0.409	0.616
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825

Sıvının deprem sırasında itkisel ve taşınımlı kütlelerin duvar ve tabana basınç kuvvetleri Şekil 1.5 ve Şekil 1.6’da verilmiştir.



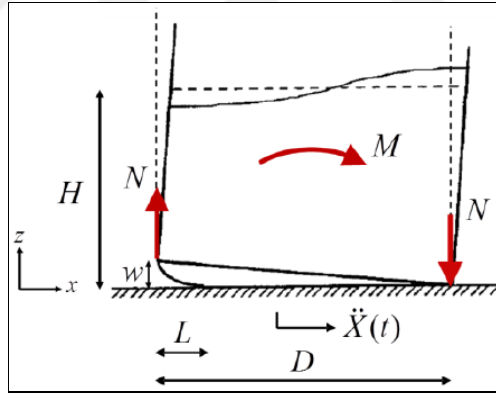
Şekil 1.5: Sıvının depremde duvar ve zemine yaptığı itkisel ve taşınımlı basınç kuvveti (Rosin ve Butenweg 2014)



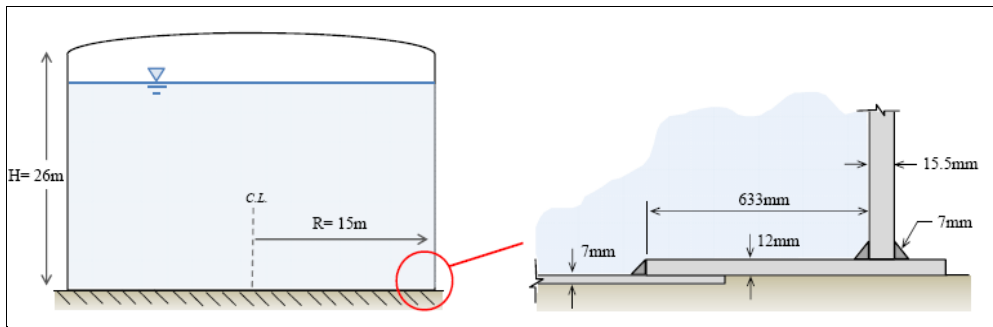
Şekil 1.6: Sıvının depremde duvar ve zemine yaptığı taşınımlı basınç kuvveti (Rosin ve Butenweg 2014)

1.3 Sıvı Depolayan Ankrajsız Tankların Deprem Davranışları ile İlgili Bilimsel Çalışmaları

Betonarme temele sabitlenmeyen tanklara “*ankrajsız tanklar*” denir. Özellikle büyük çaplı tanklarda tercih edilir. Bunun nedeni ankrajların maliyeti, betonarme temellere sabitlenme işçiliği ve deprem yükleri altında tank duvarlarının taban plakası ile birleştiği yerleri koparmasıdır. Ankrajsız tankların dış kısmına bazen devrilme momentini engelleyici çembersel bir profil taban plakası ve duvarın birleştiği yere kaynaklanır. Bu sebeple tankın kalkmasına bir nebze engel olur. Hidrodinamik basınç tarafından derilme momenti tank duvarının betonarme temelden ayrılıp kalkmasına neden olur. Şekil 1.7’de görüleceği üzere bir tarafının üzerine devrilmeye çalışan tankın o kısmında taban plakasında biriken aşırı su miktarı hesap edilen basınç miktarından daha fazla bir basınç uygular. Yükselen diğer taban plakasının duvar ile birleşim yerinde burkulmaya neden olur. Sıvının statik yatay yüklerden dolayı çelik tankın gövde plakasının tabana yakın kısmı kalındır. Taban plakalar ise ince olması hasibiyle kaynak yapılabilmesi açısından ara plaka Şekil 1.8’deki gibi yapılır.



Şekil 1.7: Ankrajsız tankın devrilme parametreleri (Vathi ve Karamanos 2015)



Şekil 1.8: Örnek bir ankrajsız tankın bağlantı şekli (Prinz ve diğ. 2012)

Bu dinamik davranış ankrajlı tanklardan bir miktar farklıdır. Dönme momentinin neticesi olarak depremden dolayı dinamik şekilde harekete geçirilmiş basınç taban plakasının bir bölümünün yukarıya kalkmasına sebep olur. Yukarıya kalkan taban plakası aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

- Güçlü bir doğrusal olmayan sıvı-kabuk-toprak etkileşimi dikkate alınmalı
- Tankın duvarına maksimum eksenel duvar basınç kuvvetinin önemli derecede artması ve stabilite kaybolması neticesinde dönme momentinin azalmasına da neden olur.
- Taban plakasının yükselmesi tüm sıvı-kabuk sisteminin sertlik kaybına yol açar. Sıvı-kabuk etkileşiminin doğal frekans titreşimi azalır. Mod şekillerinin durumunu, azalan değerler ve dinamik şekilde hareket eden basınçlar değiştirir.
- Çalkalanmadan dolayı dinamik hareket yüklerinin katkısı artabilir bundan dolayı doğal frekans etkileşim vibrasyonu azalmış olur (Tavano 2010).

Kabuğun gerilme seviyesini tahmin etmek için şu anda yaklaşık bir kaç yöntem vardır ve bunların hiçbiri doğrusal olmayan analiz yöntemi değildir. Tam aksine ankrajlı tanklarda dinamik davranışı araştırmak için son derece karmaşık analizler yapılmıştır. Bu tür yapılar için temel seviyesindeki tank duvarının dikey hareketi engellenmiş ve bu nedenle sismik davranışları doğal modların titreşimleri değerlendirilerek analiz edilir. Saha gözlemleri ve geçmiş depremler sırasında tankların performanslarında büyük hasarlar görüldüğü tespit edilmiştir (Tavano 2010).

- Büyük basınç gerilmeleri nedeniyle tank duvarlarında görülen burkulma,
- Aşırı plastik eğilmeden dolayı kabuk-taban plakası birleşimlerinde kırılmalar,
- Tankın yükselmesinden ötürü duvar boru birleşim yerlerinde kopmalar (Tavano 2010).

Ankrajsız tankların dizaynı ile ilgili kuralları ilk Wozniak ve Mitchell (1978) yayınladı. Bu çalışmada ankrajsız tanklarda duvara eksenel yönde etkiyen kuvvetin arttığını belirledi. Bu öneri API 650 - 1979 standardına girdi. Teorik çalışmalarda dinamik şekilde hareket edilmiş basınçlar, mod şekilleri ve doğal frekansa bağlı genlik hesaplamaları doğrusal olmayan modellerde yapıldı. Malhatro ve Veletsos ise (1994) silindirik tankların tabanın yükselmesi nedeniyle dinamik karakteristikleri üzerinde

analitik bir araştırma yürütmüştür. Silindirik tankın duvarının tabanla birleşim noktasına yarı rijit çembersel kirişler monte edilmiştir. Bu kirişler onların uzunlukları boyunca düşey şekilde kaynaklandı. Bu metod tankın duvarının esnekliğini sağlamak, duvarının kalkmasını engellemek ve kabuğun bir bölümünde aşırı eksenel basınçlarından kaynaklanan büyük deplasmanları engellemek için düşünülmüştür. Malhotra (1997), tankın altında zemin ile birleşiminde esnek bir yay tanımladı. Bu yay ile zemin içindeki enerjinin tabanın dönmesini azaltıcı bir etki yarattığını belirtmiştir.

Al-Zeiny (2003), sonlu elemanlar programı ile deprem hareketleri boyunca ankrajsız ve ankrajlı, geniş ve uzun sıvı depolama tanklarda sıvının hidrodinamik basınçlarının etkilerinin araştırmasını yapmıştır. Nümerik analizler sonucunda geçmişteki araştırmaların gözlemleri ile benzer sonuçlara varmıştır. Özellikle ankrajlı tanklarda tabana yakın bölgelerde çembersel çekme gerilmeleri geniş tanklarda uzun tanklara göre daha büyük olduğunu gözlemledi. Bundan dolayı geniş tanklarda fil ayağı burkulması olayının daha yaygın olduğunu görmüştür. Ayrıca 1. mod olan itkisel itme frekansında ankrajsız tanklarda benzer tipte ankrajlı tanklara göre daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. Hidrodinamik dinamik basınçların az olmasına rağmen tankın alt kısmına yakın bölgede ankrajlı tanklardan eksenel ve çembersel gerilmelerde daha büyük olduğunu gördü. Bu nedenle tankın yükselmesine neden olduğunu belirtmiştir.

Ayrıca ankrajsız tanklarda esnek temellerde daha rijit temellere göre daha düşük basınç gerilmesi ve daha yüksek tankın kalkmasıydı. Bu esnek temeller rijit temellere göre daha geniş ve zemine gelen basınç miktarı daha düzenli olduğunu araştırmalarında görmüştür. Daha yumuşak zemine oturan temellerde daha sert zemine oturan temellere göre daha uzun periyot ve daha az hidrodinamik kuvvetlerle karşılaştı. Kabuk kuvvetlerinin azalması da deplasmanlar, iç basınç gerilmeleri ve tank duvarı yükselmesinde de azalmalar kaydetmiştir. Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'da görüldüğü üzere taban plakası ve tank duvarı arasındaki plastik mafsallarda yerleşiminde ise tankın yukarı kalkma eğiliminde olduğu, diğer taraftan taban plakasının kalınlığının azaltılmasında ise tank duvarının yükselmesinin ve eksenel basınçların arttığını görmüştür.

alan üzerindeki yatak basıncının dağılımı demektir. Bununla birlikte, zeminin esnekliği, tank duvarında çember basınç gerilmeleri ve yükselmenin artmasına yol açabilir. Bu gerilimler, büyük deplasmanların ikinci mertebeden etkilerinden dolayı duvarın yükselen kısmında gözlenir. Özetlersek, taban plakası yükseldiğinde radyal olarak içeri doğru hareket etme eğilimindedir. Bu eğilim ile plakadaki geniş çevresel basınç gerilmeleri ve tank duvarındaki çembersel basınç gerilmeleri ile karşı karşıyadır (Christovasilis ve Whittaker 2006).

1.4 LNG Depolama Tankları ile İlgili Yapılan Bilimsel Çalışmalar

1960 yıllarda LNG tanklarının inşası ile başlayan süreçte API 650 petrol tankları yönetmeliğine göre tasarlanmaktaydı. Bombard ve Stempiniewski 1993 yılında yaptığı bilimsel çalışmalar LNG tanklar için bir ilk özelliği taşır. LNG tankları için dizayn kriterlerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

LNG tankları içerde bir tank ve onu koruyucu bir betonarme yapıdan oluşur. İki yapı arasında yalıtım malzemesi bulunur. Tank betonarme temel ile yere sabitlenir. Hava sirkülasyonun sağlanması için içerdeki çelik tank altına beton kolonlarla destek sağlanır. Bu kapalı devre sistemden gaz sızıntıları ile büyük patlamalara, yangınlara, çevresel felaketlere ve hatta çevrede yaşayan insanların ölümünü engellemek için dizayn kriterleri çok katıdır.

Geniş tanklar deprem boyunca 2 - 10 Hz arasında bir frekansla salınım gösterir (Tajirian 1998). Yapının tasarımında, elastik olmayan tepkiden dolayı sismik enerji emilimi tolere edilir. LNG tanklarında içerdeki tanklar ankrajlar ile yere sabitlenmesinden kaçınılır. Diğer taraftan içerdeki tankın kalkmasını minimize etmek için tankın çap/yükseklik oranı iyi ayarlamak gerekir.

Northridge depreminde özellikle hastaneler ve su depolar büyük zarar görmüştü. Tajirian (1998), makalesinde sismik izolasyonların inşaat yapılarındaki tanklar ve endüstriyel tesislerin kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Bina veya bina olmayan yapılarda farklı dizayn kriterleri ile birlikte deprem izolatörlerinin uygunluğunu örnekleriyle anlatmıştır. Pahalı olmasına karşın deprem izolatörleri yapının güvenliği açısından önemli bir araç olduğunu söylemiştir. Endüstriyel

tesislerde sismik izolatörler teknolojik olarak uygun olmasına rağmen kullanımı binalarda daha fazla yaygındır. Gelecekteki uygulamalarda deprem yalıtımlarının tanklar ve mekanik ekipmanların kullanımında öneminin daha fazla artacağı bildirilmiştir.

Castellano ve diğ. (2000), içteki çelik tankı modelleyerek laboratuvarında testler yapmıştır. Çapı 3.975 m, yüksekliği 1.425 m ve sıvı yüksekliği 1.365 m olan model aşağıda belirtilen dört farklı konfigürasyonla test edilmiştir.

- Taban sabit,
- Dört adet düşük sönümlü kauçuk izolatör,
- Dört çelik histerik sönümleyici + bir adet düşük sönümlü kauçuk izolatör,
- İki çelik histerik sönümleyici + bir adet düşük sönümlü kauçuk izolatör.

Tüm konfigürasyonlarda 25 adet sismik test yapılmıştır. Sabit tabanlı sisteme izolatörlü sistemlerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- İvmeler % 80 - 90, dinamik basınçlar % 80 oranında azaldı.
- Göreceli deplasmanlarda % 50 oranında azalma tespit edildi.
- Testler boyunca tank duvarlar üzerindeki dinamik basınçların mutlak değerlerinde % 40 - 70 oranında azalma görüldü.

• Daha güçlü depremlerde izolatörlerin sönümleme etkisinin daha yüksek olduğu görüldü.

• Çelik histerik sönümleyicilerin kullanımının büyük deplasmanların azalmasını sağladığı gözlemlendi. Bu da çatıdaki boru bağlantılarının zarar görmesini engelledi.

Jin ve diğ. (2004), yaptıkları çalışmada depremde LNG tanklarında dalga boyunun tahmin edilemediğini bu yüzden çalkalanma modu üzerinde araştırmalarını yoğunlaştırdı. 200,000 m³ hacimli geniş bir LNG tankını tam dolu olarak modelledi. Kesintisiz kullanım performansına göre 0.2 g'lık maksimum ivme kaydı alarak El-Centro, Taft depremlerini standartlaştırdı. Maksimum dalga yükseklikleri, içerdeki %9 Ni alaşımlı çelik tank ve ard-germeli koruyucu betonarme tankın deplasmanlarını karşılaştırdı. Ayrıca teorik hesaplar ile çalışma sonucu çıkan yapının frekanslarında ana periyotlarda çok az farklılıklar olurken ileriki modlarda bu sapma oranları arttığını gördü. Sıvı yapı etkileşimini incelenirken, içerdeki tank ile koruyucu betonarme perde

arasında izolasyon malzemesinin olduğu varsayılmıştır. 1 - 21 arası frekansda sıvının çalkalanmadan dolayı içerdeki çelik tankın hareketi, sonraki frekanslarda ise etkileşim hareketleri ve koruyucu betonarme tankın davranışını gördü.

Gregoriou ve diğ. (2006), çalışmalarında 100,000 m³ ve 60,000 m³'lük iki tip LNG tankını yüksek sönümlü ve kurşun çekirdekli düşük sönümlü kauçuk izolatör kullanarak modellemişlerdir. Burada zemin sınıfı olarak Eurocode-8'de belirtilen C tipi seçilmiştir. Her iki modelde de lineer olmayan yaylar ile, HDRB-LRB ve izolatörsüz tankların taban kesme kuvvetleri, çalkalanma yüksekliği ve içerdeki çelik tankın deplasmanı karşılaştırılmıştır. Bu modelde, sonlu elemanlarla detaylandırılan yapı ve sıvının etkileşimi ANSYS programını kullanılarak belirlenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- HDRB ve LRB'li her iki tank da taban kesme kuvvetlerinde % 70 oranında azalma tespit edildi,
- İçerdeki çelik tankın kabuğundaki gerilmelerde izolatörsüz yapılara göre her iki izolatörde de yaklaşık % 60'lık bir gerilme farkı gözlemlendi,
- Dalga boyunda HDRB'li her iki yapıda da izolatörsüz tanklara göre artış gösterdiğini, tank hacmi büyüdükçe bunun daha da azaldığını görülmüştür. LRB'li yapıda ise sabit izolatörsüz yapıya göre paralel gittiğini gözlemlendi. Bu farkın nedeni, HDRB izolatörlü tankta iki genlik arası periyodun 2.04 s iken, LRB izolatörlü tanklardaki hedef periyodun 2 s olmasıdır. Periyottaki farklılık HDRB izolatörlü tanklarda, LRB izolatörlü ve sabit mesnetli tanklara göre dalga yüksekliklerinin fazla olmasına neden olur. Bunun sebebi, taban hareketinin daha büyük genliğe sahip olması nedeniyle, iki harmonik hareketin üst üste binerek, 1.dalga sırasında aynı periyot içinde ikincisinin oluşmasıdır. Bu mekanik davranış farklılığından dolayı LRB izolatörlü tankların taban hareketinde büyük frekanslar oluşmaz. HDRB izolatörlü tankların hidro dinamik basınç kuvvetlerini sönümlemesinin LRB izolatörlü tanklara göre daha zayıf olması nedeniyle, dalga yüksekliğinin kontrolü açısından LRB izolatörlü tankların daha kullanışlı olduğu tespit edilmiştir.

Christovasilis ve Whittaker (2006, 2008), yapmış olduğu tez ve makalesinde 160,000 m³'lük LNG tankın izolatörlü ve geleneksel yöntemlerle yapının dinamik davranışını incelemiştir. Malhotra tarafında önerilen geleneksel yöntemlerle ve ANSYS programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan bu incelemelerde

sismik izolatörlü ankrajsız ile ankrajlı ve deprem yalıtımsız tabanda oluşan kesme kuvvetini, devrilme momentini ve dalga yüksekliğini karşılaştırmıştır.

- Ankrajlı ve sismik yalıtımsız her ANSYS ve mekanik hesaplama yöntemi arasındaki farklar, taban kesme kuvvetlerinde % 5, devrilme momentinde -% 4, dalga yüksekliğinde -% 5.1; izolatörlü yapıda taban kesme kuvveti, devrilme momentinde yaklaşık %1 farklılık vardır.

- H/R oranı 1 olan silindirik yapılarda kesme kuvveti ve devrilme momentinin dalga yüksekliğine katkısı ihmal edilebilir. Taşınımlı periyotların itkisel periyotlara oranla çok büyük olmasından dolayı çalkalanma modunun oranı spektral ivmelerde azdır.

- 3 s periyotlu sismik yalıtımlı sistemlerde ankrajlı yapıya göre taban kesme kuvveti % 85, devrilme momentinde % 86.2 s periyotlarda ise taban kesme kuvveti %80, devrilme momenti % 82 oranında azalır.

- LNG tanklarda itkisel kütle katılımı tek bir mod içinde yer alır.
- İzolatörün periyodu ve taşınımlı modlar iyi ayrılmadı bu yüzden ankrajlı sismik yalıtımsız tank ile deprem yalıtımlı tankta dalga yüksekliği benzerlikler gösterdi.

Amprik formüllerle yapılan sonuçlarda gerek geleneksel gerekse izolatörlü tanklarda doğruya yakın sonuçlar vermiştir. Ön dizayn sonuçlar için kullanılabilir

Summers ve diğ. (2008), LNG ve petro-kimya tesislerinde taban izolatörlerin gelişimi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. İzolatörlerin amacı deprem risklerini azaltmak ve yapının performanslarını güvenilir bir biçimde arttırmak için özellikle kritik tesislerde yüksek deprem riski olan yerlerde kullanılması zorunlu hale geldiğini belirtmiştir. Yazar bunun için Yunanistan Aspropyrgos Rafinerisi ve İspanya Huelva LNG Terminalini incelemiştir. Farklı seviyelerde sıvının dinamik davranışı, zemin-yapı ve sıvı-yapı etkileşimi, farklı doluluk seviyelerinde çalkalanma hareketi etkileri ve izolatörün lineer olmayan davranışını gözönüne alarak sayısal analizlerini yapmıştır. Sonuç olarak petro kimya tesislerinde kritik yapıların yeni izolatör sistemlerin geliştirilmesi için desteklenmesi gerektiğini bildirmiştir.

Marti ve diğ. (2010), yer ivme kayıtlarında hesap edilen 0 g - 1 g arası 160,000 m³'lük izolatörlü LNG tankının davranışını ve sismik yalıtımların yapıya zarar vermeden hangi aralıkta mali açıdan daha uygun olduğunu araştırdı.

Sismik yalıtımlar yatay etkileri azaltmakta kullanılmaktadır. Düşey kuvvetlerde değil. Düşey yer hareketlerinde sıvının kütlesi rijit bir kütle ve diğer salınım kütlesi olarak ayrılmaktadır.

- 0.25 g - 0.30 g altındaki yer hareketlerinde izolatörsüz tank yeterli olabilir. İzolatörlü tanka göre 2 M€ daha ucuz imal edilir.

- 0.25 g - 0.30 g ve yaklaşık 0.50 g - 0.65 g arasındaki yer hareketlerinde izolatör kullanılmayabilir. Fakat ankraj kullanılması zorunludur. 0.4 g - 0.65 g arasında 160,000 m³ gibi geniş tanklarda depremin verdiği hasarı azaltmak için deprem yalıtımsız tanklarda kazık kullanılması maliyet oranına göre tercih edilebilir.

- 0.50 g aşan yer hareketlerinde sismik yalıtım kullanılmaması yapının güvenilirliği açısından pek mümkün görünmüyor. İzolatörsüz içerdeki tank deprem boyunca sağa-sola kayma hareketi yapar. 0.65 g - 0.90 g arasında ise deprem yalıtımlı tank kullanılması zorunludur.

- 0.90 g aşan yer hareketlerde izolataörlü tanklar bile kayma hareketinin engelleyemez.

Gregoriou ve diğ. (2011), 60,000 m³'lük LNG tankının farklı tipte sismik yalıtımların performansı ile ilgili başka bir çalışmaya da imza atmıştır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve lineer olmayan viskoz sönümleyici ile lineer kauçuk izolatörün kombinesi. Her iki sistemde güçlü enerji sönümleyici mekanizma karakteristiğine sahiptir. Bu izolatör sistemlerinin özellikleri deneysel bilgi içeren kaynaklardan alınarak lineer olmayan amortisör elemanları olarak modellenmiştir. Taban kesme kuvvetini, dalga yüksekliğini, içerdeki çelik tankın yatay deplasman hareketini karşılaştırdı. Aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır.

- Her iki sismik yalıtımda da ankrajlı ve deprem yalıtımsız LNG tankına göre taban kesme kuvvetinde % 70 oranında azalma tespit etti.

- İçerdeki çelik tankın maksimum gerilmelerinde yaklaşık % 60 oranında azalma gözlemlendi.

- LRB'li sismik yalıtımda içerdeki çelik tankta tabanda 10 cm deplasman olurken, lineer olmayan viskoz sönümlü kauçuk izolatörde 5 cm'yi geçmemiştir.

- İçerdeki tankın 2/3'ü dolu iken her iki sismik yalıtımda da göreceli deplasman 1cm civarındayken deprem yalıtımsız ankrajlı LNG tankta 10 cm'yi bulmuştur.

- Dalga yükseklikleri her iki sismik yalıtımda da benzer özellikler görülmüştür. Ankrajlı izolatörsüz LNG tanka göre çok az farklılıklar vardır. Maksimum 80 cm'yi geçmemiştir.

Yazarın da 60,000 m³'lük LNG tankta LRB ve lineer olmayan viskoz sönümlü kauçuk izolator arasında yaptığı araştırmalardan anlaşılaçağı üzere dinamik basınçlar altında benzer davranışlar göstermiş olup maliyet ve uygulama açısından bakmak gerekecektir.

Ruifu ve diğ. (2011), 160,000 m³'lük LNG tankını 360 adet betonarme kazık ve sürtünmeli sarkaç izolatörlü, izolatörsüz ve 360 adet betaname kazık olan yapının, 0.16 g'lik bir depremde kesintisiz kullanım ve 0.30 g'lik bir depremde sınırlı hasar performans hedeflerine bakarak tankın 1/3, 2/3 ve tam dolu hallerindeki sıvının dalga yüksekliğı, kazıklara gelen kesme kuvvetleri, izolatörlü yapının deplasmanı, itkisel ve taşınımli kütleinin ivmesi, dış tankının kütleinin ivmesini karşılaştırdı.

- LNG tanklarda sürtünmeli sarkaç sistemi depremlerde çok iyi sonuçlar vermiştir.
- MFPS'li LNG tankın periyodu orjinal yapıya göre daha uzun olduğı görölüyor. Özellikle ve LNG dış tank ve itkisel kütle periyodu.
- Farklı sıvı seviyelerine göre MFPS mükemmel uyuma sahip. Kazık kesme kuvvetleri, itkisel kütle ve dış tankın ivmesinde azalma gözleniyor.
- Dalga yüksekliğinde MPFS bir etkisi olmuyor. Çünkü izolatorün periyodu ve taşınımli modlar iyi ayrılmıyordu ve MFPS'nin düşey deplasmanları çok düşüktür.

Lee ve diğ. (2013), çalışmasında yerüstündeki LNG depolama tanklarının sismik kırılğanlığı üzerindeki taban izolatorünün etkisini incelemiştir. Bir izolatörsüz LNG depolama tankı ve 3.5 T ve 5.5 T aralığında iki adet taban yalıtımı seçilmiştir. İki taban izolatörlü ve ankrajlı yapı modeline analizini 20 adet yer hareketi ile lineer olmayan zaman tanım aralığında analizi yapıldı. Sabit ve taban izolatörlü tankın kırılğanlık eğrisinin karşılaştırılmasında görüldü ki taban izolatorün depremin belirlenmiş seviyelerindeki hasar risklerini oldukça azalttığını görmüştür. Bu çalışmada yazar taban izolatorlerini elastik durumlar içinde sınırlandırıldığı varsayımına göre hareket etmiştir. Bu çalışmanın hedefi sismik kırılğanlığına bağılı kalarak yapının performansını kontrol ederek taban izolatorlerinin geliştirilmesidir.

Zhou ve diğ. (2018), yaptığı çalışmada tam içerikli 160,000 m³'lük LNG tankını Abaqus programını kullanarak sonlu elemanlar metodu ile içerdeki çelik tankın sıvının doluluk oranlarına göre kurşun çekirdekli izolator kullanarak ve izolatörsüz yapının deprem sırasındaki davranışını izlemiştir. Tam içerikli bu tankta içerdeki çelik tank ile koruyucu betonarme tankın birbirleriyle olan etkileşimini araştırmıştır. Bu sırada itkisel ve taşınımlı hidrodinamik kuvvetlerin tank duvarındaki etkiyi, dalga yüksekliklerini ve farklı periyotları gözlemlemiştir. Kurşun çekirdekli izolatorün kullanma nedeni sayısal sonuçlarda deprem kuvvetlerini azaltıcı en mükemmel sonuçlar verdiği kanısına varmıştır. Dinamik analizler sonucu;

- Kurşun çekirdekli izolator tank duvarına etkileyen ivmeyi, hızı ve taban kesme kuvvetini azaltmıştır. Bununla birlikte tank duvarındaki deplasman kontrolü belli değildir ve hatta uzun periyotlu deprem dalgasını da büyüttüğünü görmüştür. Bu nedenle de uzun periyotlara sahip olan sıvı kütlesinin bir bölümü olan taşınımlı ile dalgalanma yüksekliği ve darbe etkileri ile tank duvarındaki deplasmanların arttığı sonucuna varmıştır.

- Sıvının doluluk oranlarının artışına göre daha yüksek oranlarda gerilme kuvvetlerinin düştüğünü görür. Tank duvarı üzerindeki itkisel ve sıvının çalkalanma hareketinin etkilerini deprem hareketlerindeki titreşim emilmesi ve enerji azaltıcı mekanizmaların kullanılmasıyla tahmin edilebilir bir seviye düşmesi sağlanacağı kanısına varmıştır.

Zhao ve diğ. (2020), LNG sıvısı doluluk oranı % 25, % 50, % 75, % 100 olan, 160.000 m³'lük kapasiteli, boyuna ve enine 80 cm kalınlığında ard-germeli dış betonarme duvarı, ardgermesiz 40 cm kalınlığında betonarme çatıyı, içerdeki çelik tankın kalınlığı 24.9 mm'den başlayarak 12 mm'ye kadar düşen, Imperial Valley - 01 -1940, Northridge – 01 - 1994, Kern County - 1994 depremlerin, zemin sınıfı II olan Abaqus programını kullanarak zaman tanım aralığında analizi yapmıştır. Bu analiz sonuçlarında;

- Statik koşullar altında tank duvarı gerilmesi artan bir sıvı kütlesi ile doğrusal oranda artarken, dinamik koşullar altında linner olmayan bir gerilim gözlemlenir.

- % 100 doluluk oranında % 9 nikel alaşımlı çelik tankın tabanından 1. ve 2. tabakalarında gerilmeler 500 MPa aşmaktadır. Buda yapının güvenliği açısından risk teşkil etmektedir.

- İçerdeki çelik tank ile koruyucu dış betonarme perde duvardaki deprem yükleri altında benzer gerilmeler oluşturmaktadır. Dış betonarme duvarın yatay deplasmanı 4.16 mm, tabanda oluşan toplam maksimum kesme kuvveti $7.99 \cdot 10^4$ kN.

Barone ve Sartori (2020), İtalya'nın Ravenna kentindeki Corsini limanında yapım aşamasında olan her biri 10,130 m³ tam kapasiteli ve 91 adet FPS izolasyonlu 2 tam alanlı LNG tankını inceledi. Tankların sismik tepkisini hafifletilmesi ve kontrolü için taban izolatörleri kısa betonarme kolonlar üzerine mesnetlenmiştir. Bu çalışmada, yüksek yanıl esneklik ve yüksek sürtünme katsayısının zemin hareketini yapıdan etkili bir şekilde ayırdığını ve sismik enerjinin bir kısmını sönümlediğini deneylerde gözlemlenmiştir.

Kılıç ve diğ. (2022), lineer olmayan dinamik zaman alanı analizleri gerçekleştirerek iki ve üç boyutlu elastomerik mesnetli bir geniş tank, bir orta tank ve bir narin tankın performanslarını araştırdı. 2D izolatörler tiplerinden LRB ve FPS kesme kuvvetleri önemli derecede azaltırken, LRB'de oyuklaşma, FPS'de sarkaç sistemi nedeniyle yapının yukarı kalkma gibi sorunlar ile karşılaşılır. 3D izolatörler ise konik yaylar, hidrolik aletler gibi ekstra özel bir sisteme sahip olmasından dolayı 2D izolatörlü sistemlerden daha verimlidir. 3D izolatörler bu özelliğinden dolayı depremlerde petrol rafineleri ve nükleer santrallerde 2D izolatörlere göre çok daha az hasarla atlatmış olur.

Chen ve diğ. (2022), izolatörlerin etkisini ve sismik dinamik tepkisini incelemek için 200,000 m³'lük LNG depolama tankı seçti. Analizden sonra, izolatörlü depolama tank modelinin X ve Y yönlerindeki doğal titreşim frekansının önemli ölçüde azaldığı gördü. LNG depolama tankının sayısal analiz sonuçlarına göre taban kesme kuvveti ve devrilme eğilme momentinin ortalama sismik izolasyon oranları sırasıyla % 66 ve % 36 ve ivmenin ortalama sismik izolasyon oranı % 47.1'e ulaştığını tespit etti. Sismik tasarımında sismik izolasyon mesnetlerinin kullanılması LNG depolama tanklarının yapım maliyetlerinin düşürülmesi açısından faydalı olmasına rağmen izolatörlü depolama tankının yer değiştirmesi önemli ölçüde artacağını bu nedenle, tanka bağlı mekanik ve boru sistemi için tehlike arz ettiğini görmüşlerdir.

Sharari ve diğ., (2022), 4 farklı zemin yapısında, 2500 yılda gelecek bir depreme göre ölçeklendirilmiş Chi/Chi-1999, Hachinohe - 1968 depremleri, 289 adet 30 m derinliğinde betonarme kazıklara oturan 160,000 m³ kapasiteli full-containment LNG tankın Abaqus programını kullanarak analizleri yapılmıştır. LNG sıvısı programında modellenmemiş çelik tank ile arasında X ve Y yönünde yay tanımlanmıştır.

- Zayıf zeminde içerdeki çelik tankın akma dayanımını aştığını gözlemledi. Tankın tabana yakın çeperinde elosto-plastik burkulma tespit etmiştir. Fil ayağı burkulması diye tabir ettiğimiz bir burkulma tipi tankın çeperinde oluşmaktadır.
- LNG tankın yatay deplasmanı, toplam taban kesme kuvveti ve eğilme momenti sert zemin sınıfından yumuşak zemin sınıfına doğru yöneldikçe betonarme kazıklarda arttığını analizlerinde gördü. Yumuşak zemin derinliği de arttıkça kazığın radye temel ile birleşim noktalarında kazığın eğilme momenti kapasitesini aşmıştır.

2. SIVI ve SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ DEPOLAYAN ÇELİK TANKLAR VE DEPREM HASARLARI

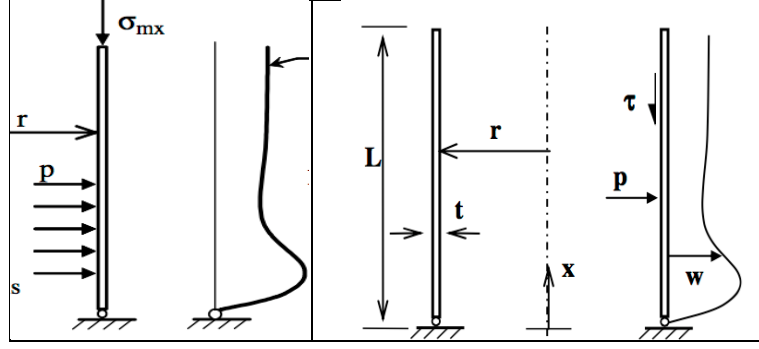
Petrol, su, yağ ve LNG gibi sıvıların depolandığı çelik tankların geçmiş depremler sonrası gördüğü hasarlar ile LNG depolama tanklarının genel yapısı incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

2.1 Sıvı Depolayan Çelik Tankların Depremde Gördüğü Hasarlar ve Nedenleri

Geçmiş depremlerde bu tez çalışmasında da göz önüne alınacak olan çelik tanklarda görülen hasarlar aşağıda belirtilmiştir.

2.1.1 Fil Ayağı Burkulması

Silindirik çelik tanklar, gövde tasarımında ince levha elemanlarının kullanıldığı yapılardır. Bu yapılar depolanan sıvıdan gelen iç basınç, çatıdan gelen düşey yükler ve duvar ile depolanan sıvının sürtünme kuvvetlerine maruz kalır. Deprem yükleri altında, devrilme duvardaki eksenel basınç kuvvetleri tarafından karşı koyulur. Büyük modlarda genellikle eksenel basınç kuvvetleri altında burkulur. Hidrostatik ve hidrodinamik basınçlar tarafından uygulanan içsel basınç önemli derecede burkulma kuvvetini arttırabilir. Fakat yüksek içsel basınç taban yakın bölgede lokal eğilmeye neden olur. Lokal eğilme elastik-plastik burkulma hatasına sebep olur. Bu hataya fil ayağı burkulması denir. Eksenel basınç gerilmeleri tankın temele yakın yerde olur (Rotter, 2006). Şekil 2.1’de tank içi sıvının tankın yüzeyine yaptığı yanal basınçların tank duvarının şekil değiştirmesi, özellikle deprem sonucu oluşan fil ayağı burkulması Resim 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Fil ayağı burkulması-basınç (www.shellbuckling.com)



Resim 2.1: Fil ayağı burkulması(https://blog.cartif.com), (Malhotra ve diğ. 2000), (DiCarliccio ve diğ. 2008)

2.1.2 Elmas Şekilli Burkulma

İnce cidarlı çelik tanklarda malzemenin akmasından önce elastik bölgede burkulma nedeniyle oluşan kalıcı şekil değişimdir.



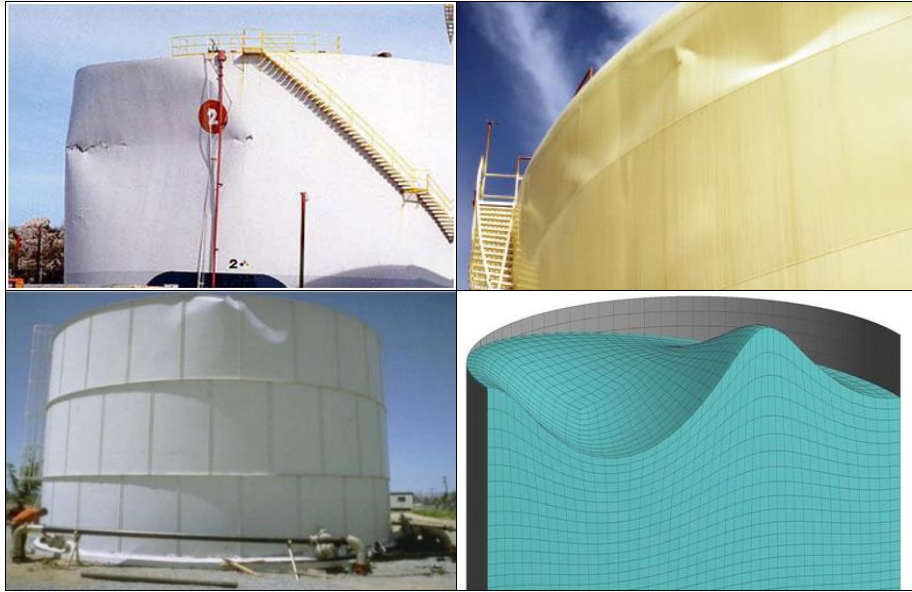
Resim 2.2: Elmas şeklinde burkulma, (www.shellbuckling.com), (Christovasilis ve Whittaker 2006)

Resim 2.2’de görüldüğü üzere tankın burkulmasına neden olan basınç gerilmesi, tank çeperinde oluşan iç basınç, aksenal gerilmenin çevresel değişimi ve tankın malzeme kusurlarından dolayı oluşur. Elastik burkulma genellikle, Yarıçap/Cidar et kalınlığı oranı düşük ve temele ankrajlı ince ve uzun tanklarda

görülmüştür. Elastik olmayan burkulma ise çoğunlukla geniş ya da Yükseklik/Yarıçap oranı küçük ve ankrajsız tanklarda gözlemlenmiştir (Christovasilis ve Whittaker 2006).

2.1.3 Çelik Tankın Üst Kısımında Meydana Gelen Burkulma

Sıvının deprem boyunca çalkalanması esnasında tankın üst kısmına yakın bölgede meydana gelen elastik burkulma türüdür. Analizlerde ve deprem sonrası depolama tanklarında yapılan gözlemlerde tam dolu ya da doluya yakın tanklarda olduğu tespit edilmiştir. Yükseklik/Yarıçap oranı düşük yani geniş tanklarda görülür. Depremde sıvının çalkalanmasının tankın en üst bölgesinde yaptığı burkulma ve sıvının dalga hareketi Resim 2.3’de görülmektedir.



Resim 2.3: Sıvının dalga hareketinden dolayı tankın üst kısımlarda oluşan burkulma, Sıvının dalga hareketinin simülasyonu (Anumod ve diğ. 2014), (Malhotra ve diğ. 2000), (Castano 2016).

2.1.4 Çelik Tankın Kayması

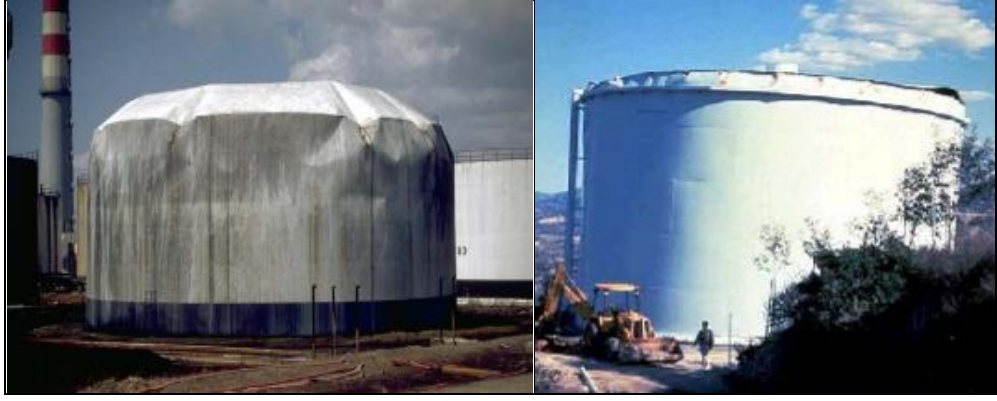
Taban kesme kuvvetinin tank tabanı ile zemin arasında oluşan sürtünme kuvvetini aşması tankın kaymasına neden olabilir. Ankre edilmemiş ya da kısmen bağlı tanklarda tankı kaldırma boru bağlantılarına zarar verebilir. Yatay yer değiştirmeler tankın boru bağlantılarının kopmasına ve temelin düzgün olmayacak bir biçimde yerleşmesine neden olur. Çelik tankların bulunduğu yerden ayrılıp hareket etmesine en güzel örnekler olarak Resim 2.4’de verebiliriz.



Resim 2.4: Tankın kayması (Anumod ve diğ. 2014), (Sari ve diğ. 2016), (Hamada 2016)

2.1.5 Çelik Tank Çatısının Göçmesi

Deprem sırasında tank duvarının yatay deplasman yapması sonucunda çatı bağlantısının kopması ile oluşan göçme şeklidir. Ayrıca çatının duvara kaynaklı olduğu durumlarda sıvının çalkalanma hareketi ile tank duvarındaki elastik burkulma ile çatının eğilme deformasyonuna uğraması durumudur. Tank çatısının göçmesine bir örnek Resim 2.5’de verilmiştir.



Resim 2.5: Tank çatısının göçmesi (Sezen ve diğ. 2000), (Soules 2009)

2.1.6 Çelik Tank Ankrajlarının Kopması ve Zarar Görmesi

Resim 2.6’da görüldüğü üzere çelik tankları temele bağlayan ankraj çubuklarında depremde oluşan çekme ve kesme kuvvetlerinden dolayı kopma veya betondan blok halinde ayrılma oluşabilir. Bunun nedeni bulonların yetersiz dizaynı, betonun yeteri kadar kaliteli olmaması, ankraj çubuklarının betonarme temel kenarına olan mesafesinin yetersiz olması ve kötü beton işçiliğidir.



Resim 2.6: Tankta ankraj bulonunun betondan ayrılması, ankraj plakasının eğilmesi, ankrajın kopması (Brunesi ve diğ. 2015), (Dizhur ve diğ. 2017).

2.1.7 Çelik Tanklarda Farklı Oturmalar

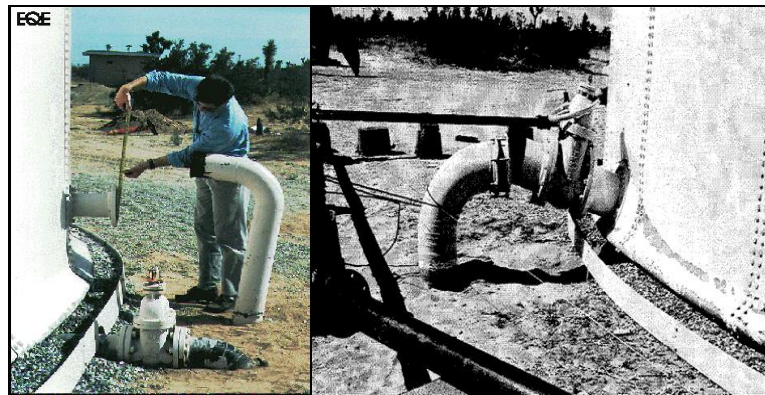
Farklı oturmaların nedeni zeminin sıvılaşması sonucunda taşıma kapasitesini yitirmesidir. Kobe depremi sonucunda sıklıkla görülen zeminin taşıma kapasitesini yitirmesi nedeniyle tankların yana yatması olaylarına örnekler Resim 2.7’de verilmiştir.



Resim 2.7: Tankta farklı oturmalar nedeniyle tankın yana yatması
(<https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa>)

2.1.8 Çelik Tanka Bağlanan Boru Sistemlerinin Zarar Görmesi

Resim 2.8’de gösterildiği gibi yer hareketi sonucunda tank cidarının taban plakası ile birleştiği yerde aşırı plastikleşme nedeniyle kopma oluşur ve depoya bağlanan boru sisteminden ayrılır.



Resim 2.8: Tanka bağlı boru sistemlerinin hasar görmesi, (Di Carliccio ve diğ. 2008), (Cooper 1997)

2.1.9 Çelik Tankta Oluşan Yangınlar

Deprem sırasında tankın yer hareketi ile beraber salınımı bazı parçaların sürtünmesi ve kıvılcımın oluşması ile tankta önü alınmaz yangınların oluşması olayıdır. Niigata (1964) depremi sonrası Sekiyu Niigata Rafinerisinde yangın 12 gün sürmüştür. Resim 2.9’da sunulan Alaska, Niagata (1964), Kocaeli (1999), Japonya (2011) depremlerinde petrol tankları günlerce yanmış ve çevre felaketlerine neden olmuştur.



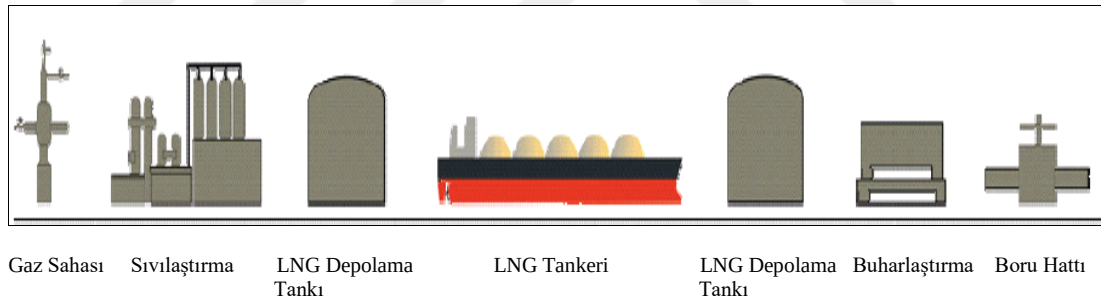
Resim 2.9:Alaska (1964), Niigata (1964), Kocaeli (1999), Japonya (2011), (Brocher ve diğ. 2014), (<https://www.gettyimages.ca>), (Hamada 2016)

2.2 LNG Depolama Tankları

Doğalgaz dünya da ve ülkemizde her geçen gün daha fazla ısınma ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Ülkemizde elektrik üretiminin yıl içi aylara göre değişmekle birlikte ortalama % 25'e yakın kısmını karşılamaktadır.

Doğal gaz fosil bir yakıttır. Bileşeni % 90 metan geri kalanı nitrojen, oksijen, karbondioksit, sülfür birleşiminden oluşur. Sıvılaştırılmış doğalgaz kısaca LNG (Liquified Natural Gas) adıyla bilinir. Metan 46.96 bar basınç ve -82.62°C sıcaklık altında sıvılaşır. Atmosfer basıncı altında ise -161.52°C sıcaklıkta sıvılaşır. Sıvılaşma sonucu doğalgazın hacmi 600 kat küçülür. Böylece deniz aşırı çok uzak yerlere tankerlerle nakledilebilir ve tanklarda depolanabilir. Bu işlem 1917 yılında kanıtlandı ve ilk defa 1950'li yıllarda A.B.D.'de kullanıldı. LNG kokmaz, çürümez, renksiz ve zehirsiz bir yakıttır (Lun ve diğ. 2005).

Doğal gazın gaz alanı çıkarılışından boru hattına kadar geçen süreçteki akış diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir.



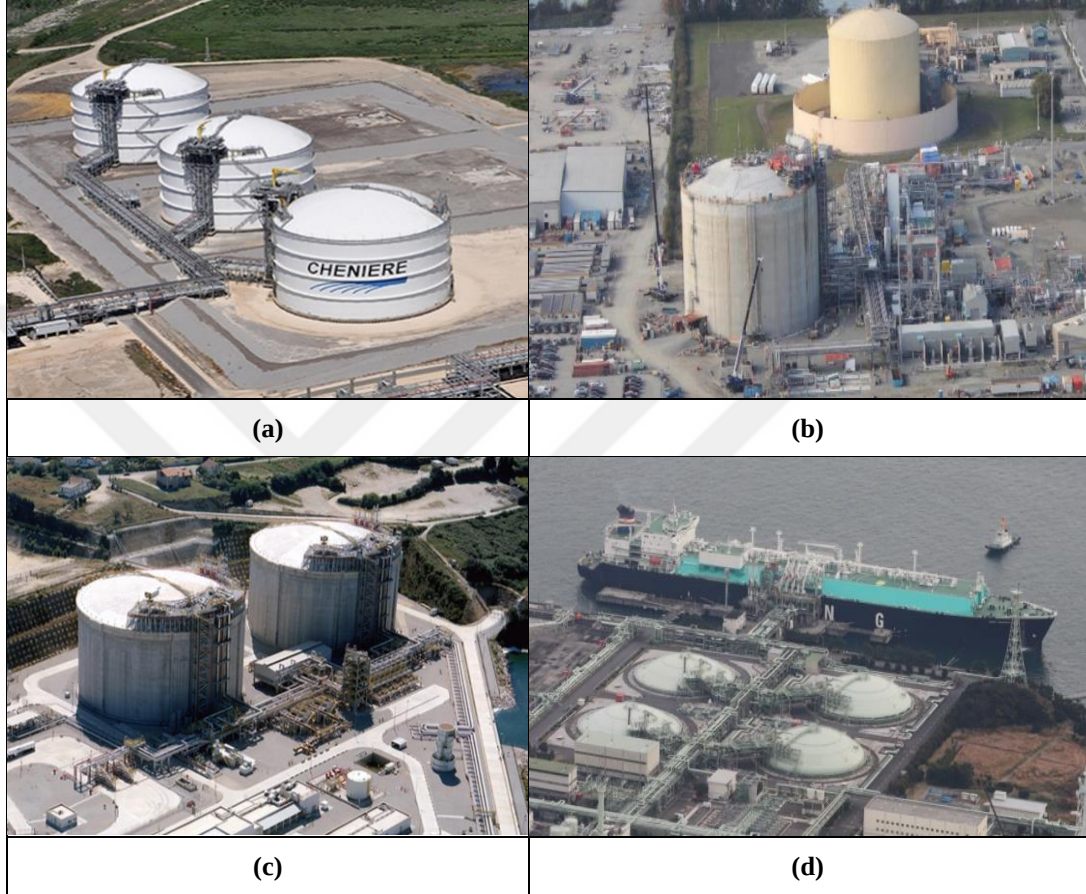
Şekil 2.2: Doğalgaz akış diyagramı (Datoli ve diğ. 2007)

Devletlerin zaman zaman birbirleriyle olan anlaşmazlıkları veya çetin kış şartlarında doğalgaz sevkiyatındaki akışın azalması yüzünden doğalgaz depolama tanklarının önemi ortaya çıkmıştır.

Depolama tanklarının tipi geniş ölçeklerde olup yeraltı ve yerüstünde inşaa edilir. Yeraltındaki tanklar çok pahalı ve inşası elverişsiz yapılardır. Yeraltı depolama tankları Türkiye'deki Tuz Gölü gibi elverişli yerlerin bulunması veya Japonya'daki gibi arazinin pahalı olduğu durumlarda tercih edilir.

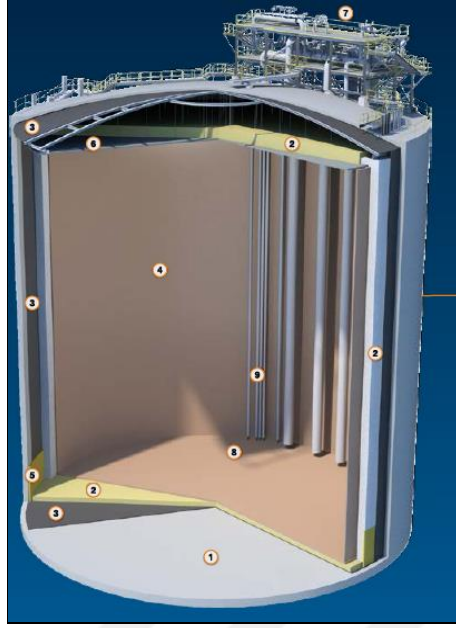
2.2.1 LNG Depolama Tanklarının Türleri

LNG tankları dış etkilere korunma durumlarına göre tek muhafazalı tank (SCT), çift muhafazalı tank (DCT), tam muhafazalı tank (FCT) ve yere gömülü tank (BGT) olmak üzere dört tipte inşa edilebilmektedir (bkz. Resim 2.10).



Resim 2.10: Tek muhafazalı (a), çift muhafazalı (b), tam muhafazalı (c) ve yere gömülü (d) LNG Tankları (ARUP 2018).

Bu tez kapsamında tasarımı yapılacak olan tank tam muhafazalı tipte olacaktır. Tam muhafazalı tank SCT ve DCT sistemlerine benzer fakat kubbesi de betonarmedir. İçerideki gazın depolandığı tank mevcuttur ve dış karbon çeliği bulunmaz. İçerideki tankı koruyucu bir betonarme yapı mevcuttur (bkz. Şekil 2.3 ve Tablo 2.1) ve en yaygın kullanılan tank çeşididir (Oliinyk ve Laciak 2013).



Şekil 2.3: Tam muhafazalı LNG tankı (Wartsila Corp. 2018)

Tablo 2.1: Şekil 2.3'deki elemanların tarifleri

1. Betonarme yapı	6. Cam elyaf izolasyon
2. Cam köpük izolasyon	7. Ana operasyon platformu
3. Çelik kaplama	8. Koruyucu kaplama
4. İçerdeki çelik tank (%9Ni alaşımlı)	9. Gas ve soğutma boruları
5. Isıl koruma sistemi	

Tam muhafazalı LNG tankının farklı kısımlarında kullanılan malzemelerin özellikleri şunlardır:

- **İç tank:** Sıvılaştırılmış doğalgazın depolandığı ana bölümdür. Kriyojenik çelik adı verilen % 9 nikel içeren ve -168°C sıcaklıkta bile mukavemetini koruyan malzemedir. Ostenitli çelikler, alüminyum ve nikel çelik birleşiminden oluşur. Bu malzemelerin seçiminin sebebi, çok düşük sıcaklıklarda gevrekleşmemesi, yüzeyde basınç ve gerilme ile çatlaklığı önleyen koruyucu bir özelliğe sahip olmasıdır (Oliinyk ve Laciak 2013). Japon Osaka Gas nikelin dünya da az bulunması ve pahalı bir malzeme olmasından dolayı % 9 olan Nikel oranını % 7'ye düşürmüştür. Bu çelik Thermo Mechanical Control process olarak bilinen bilgisayar kontrollü bir ileri işlem ile yapılır (<https://www.osakagas.co.jp/en/>).

- **Yalıtım kaplaması:** LNG buharlaşma bölgesinde bulunur. Taneli perlit (volkanik cam) dolgulu yuvarlak yüzeylidir. Nitrojen gazını nemden korunmak için yapılır. İç tankın desteklenmesi için yeterli dayanıma sahip yalıtım tabana yerleştirilir (<https://www.osakagas.co.jp/en/>).

- **Dış tankın çatısı ve iç tankın üst kaplaması:** İzolasyonu tutmak ve nitrojen gazı sızdırmaz hale getirmek için, yan çelik astar ve alt çelik astar, sırasıyla dış tank ve taban plakaları üzerine yerleştirilir. Dış tank çatısının kubbesi ve iç tankın üst kısmı da çelik malzemedendir.

- **Ard germeli betonarme dış tank:** Dış cephe ard-germeli betonarme perde ile yapılır. Beton yüzeyinde oluşan çekme kuvvetlerini ard-germe çelik kablolar ile çembersel ve düşey yönde konularak alınır. Ard-germeli kabloları betonarme dış perdelerin düşey ve yatay koyulmasının amacı, kubbenin ağırlığından dolayı perdeler gelen düşey yüklerin ve sıvının yanal basıncı ile çembersel çekme kuvvetlerinin alınması, buna ilaveten LNG tankında oluşacak çatlakların oluşmasının engellenmesidir.

- **Soğuğa dayanıklı malzemeler (PUF):** Dış tank ile iç tank arasında poliüretan köpük yerleştirilir. Bu PUF malzemesi, iç tanktan bir LNG sızıntısı durumunda bir soğuk direnç giderme malzemesi olarak çalışır (<https://www.osakagas.co.jp/en/>).

- **Taban döşemesi:** Dünya da iki çeşit yapılır. İzolatörlü yapılarda altta bir radye temel üzerinde bir döşeme iki plak arasında izolatörler veya alttaki radye temelden çıkan betonarme kaideler üzerinde deprem izolatörleri ve o izolatörlerin üzerinde plak döşeme bulunur. Radye temel altında betonarme veyahut çelik kazıklar çakılır. İzolatörsüz yapılarda ise zemin üzerine tek betonarme radye temel ve temel üzeri ısı izolasyonu yapılır.

- **Alt tabaka ısıtıcısı:** Çelik tank içerisindeki -168 °C'lik sıcaklığın betonarme temel vasıtasıyla zeminin donmasını önlemek için betonarme temel içine ısıtıcı kablo sistemi yerleştirilir (<https://www.osakagas.co.jp/en/>).

2.2.2 LNG Depolama Tankı Deprem Performans Hedefleri

LNG tankları için tasarım gereklilikleri API 625 / 2014, NFPA 59A / 2016 yönetmeliklerinde açıklanmıştır. Bu tanklarda yüksek enerjili bir kimyasal maddenin depolanması nedeniyle tasarım kriterleri çok yüksektir. LNG tank sistemleri, aşağıda açıklanan üç sismik etki seviyesine göre tasarlanır.

- **Deprem sonrasında işletmenin az hasarla atlatılması (Operating Basis Earthquake-OBE):** Tekrarlanma periyodu 475 yıl olan diğer bir deyişle 50 yılda oluşacak bir depremin olma olasılığı % 10'u aşma durumunda işletmenin kullanımının devam etmesi ve hiçbir hasar görmemesi durumudur. Yapı ve sistemler OBE'den sonra çalışabilir olacak şekilde tasarlanır. Azaltma katsayıları 1 olarak hesap edilir.

- **Deprem sonrasında işletmenin kesintisiz çalışması (Safe Shutdown Earthquake-SSE):** Tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan yani 50 yılda oluşacak bir depremin olma olasılığı % 2 aşma durumunda gelecek depremin ASCE 7-16 standardı Bölüm 21'e göre belirtilen şekilde tanımlanmasıdır. Tek, çift ve tam alanlı LNG tankları ve deprem yalıtımları ile LNG içeren ana çelik tankın SSE dizaynında hasar görmemesi kabul edilir. SSE dizaynında kullanılan azaltma faktörleri performans kriterlerini azaltmadığı gösterilmelidir. API 620 / 2014 standardı Ek 7'de verilen değerlerdir.

- **Artçı depremlerin göz önüne alınması (Aftershock Level Earthquake-ALE):** ALE yer hareketi SSE'nin yarısı olarak tanımlanır. İçerdeki çelik tankın maksimum seviyesinde LNG dolu iken ALE yer hareketinde dış betonarme tankta hasarın meydana gelmemesi istenir.

2.2.3 LNG Depolama Tanklarının İnşası ve Deprem Yalıtımı Uygulamaları

LNG depolama tankları genellikle denize dolgu yapılan liman bölgelerine yapılır. Bu yüzden önce zemin iyileştirilmesine gidilir. Kazık çakılarak veya jet-grout yapılarak veyahut dolgu zemin alınarak yerine ince daneli sıkıştırılabilen malzeme doldurulur. -168 °C soğukluktaki tankda izolasyon malzemesi olmasına rağmen temelin çatlamasını engellemek için temel donatı yerleşimi beton döküm öncesi temel içine ısıtıcı kablolar yerleştirilir. Taşıma kapasitesi arttırılan zemine betonarme temel atılır. Betonarme temel üzerine kolon kaideleri inşaa edilirken depremin önem derecesine göre sismik yalıtımlar montajı yapılır. Bazı inşaat gruplarında izolatörler radye temel üzerine montajı yapılarak ikinci bir döşeme yapılır. Dış betonarme perdeler tırmanır kalıp vasıtasıyla yükseltilmeye başlatılır. Bu perdeler boyuna ve enine donatı ile beraber boyuna ve enine ard germe kablo kılıfları bırakılır. Yüksek dozajlı betonlar atılıp 28 günlük mukavemetine ulaştıktan sonra bu kılıflar içine boyuna ve enine yüksek çekme dayanımına sahip kablolar döşenir ve makineler ile kablonun çekme dayanımı % 70'ine tekabül edecek biçimde gerilme işlemi yapılır. Bununla birlikte tankın iç bölgesinde çelik çatı kubbesi ve askılı alüminyum döşemesi montajı yapılır. Dış betonarme perde inşaatı ve içerdeki çelik çatı kubbesi ve ona asılı çelik plaka döşemesi bittikten sonra alttan basınçlı hava verilerek çelik çatı kubbe en üste kota kadar kaldırılır. Perdenin en üst kısmındaki çelik ankraj plakalara kaynatılır.

Kaynak işi bittikten sonra dış betonarme perde üst ucundaki 150 / 320 cm ebatlarındaki betonarme kiriş bu çatı döşemesindeki donatılar bağlanarak 40cm kalınlığında betonarme bir üst döşeme atılır. İç kısımda %9 Nikel alaşımlı çelik tank montajına başlanır. Bu arada tabana 70 cm, çelik çatı kubbeye asılı alüminyum döşemenin üzerine 100cm kalınlığında cam yünü izolasyon malzemesi serilir. Tabana serilen cam yünün üstüne 5mm kalınlığında % 9 nikel içeren çelik plakalar yerleştirilir. Çelik tankın içine hesap edilen yüksekliğe kadar su doldurulur. Çelik tankta kaynaklardan sızıntının olup olmadığı ve çelik plakaların gerilme kontrol yapılır. Bu işlemden olumlu sonuç alındıktan sonra çelik tank ile dış betonarme perde arasına yine soğuğu absorbe eden perlit izolasyon malzemesi döşenir. Bu perlit izolasyon malzemesi kalınlığı 100 - 120 cm arasındadır. Üst-alt ve yanlarda yapılan izolasyonun amacı içerdeki tankda depolanan LNG'nin buharlaşma ve ısı kaybını engellemektir.

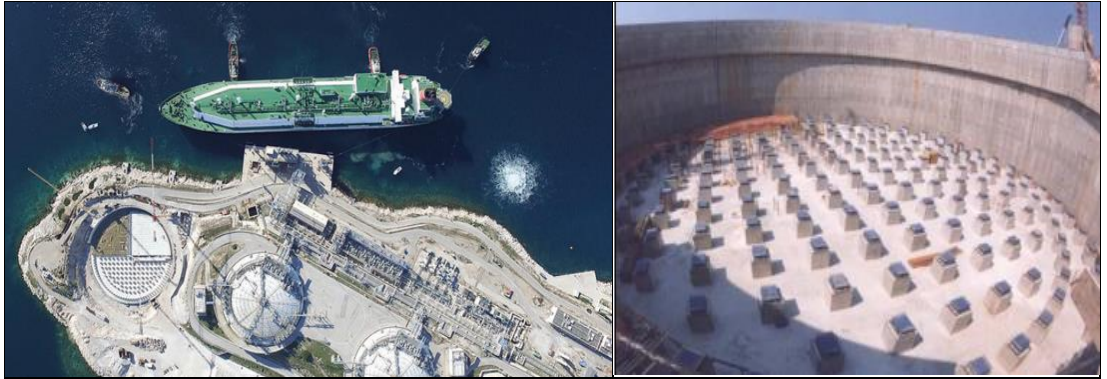
Yani -168°C soğukluğu muhafaza etmek ve aynı zamanda dış betonarme perde ve temele ısı transferini engelleyerek çatlamasını önlemektir.

İnşaat kısmı bittikten sonra çatıya bırakılan donatı filizlere betonarme kolonlar inşaa edilir. Bu kolonlara çelik karkas yapı yapılır. Çelik karkas yapı tank ve borulamayı taşımak içindir. Tabanda dış betonarme perdesinde bırakılan boşluk ise kapatılır. Bu boşluğu bırakılmasının amacı çelik çatı kubbesine verilen basınçlı hava ve içeriye çelik tank plakalarının taşınma işlemi içindir.

Dünyada uygulaması yapılmış HDRB, LRB ve FPS izolatör mesnetli LNG tankların örnekleri Resim 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14’te verilmiştir.



Resim 2.11: İzmir Aliğa Egegaz 140,000 m³ hacimli LNG Tankları Her biri için 112 LRB 241 HDRB kullanılmıştır. D:85 m H:35 m (www.terbayinsaat.com).



Resim 2.12: Yunanistan Atina yakınlarındaki Revithoussa adası 130,000 m³ hacimli LNG Tankları 212 FPS kullanılmıştır. D:68.8 m H:32.3 m 2.75 s dinamik periyod. Depremin oluşturduğu taban kesme kuvvetini % 80 azaltmaktadır (Earthquake Protection Systems 2004).



Resim 2.13: Peru Melchorita 130,000 m³ hacimli LNG Tankları 256 FPS kullanılmıştır. D:78 m H:32.9 m. Deprem'in oluşturduğu taban kesme kuvvetini % 85 azaltmaktadır (Earthquake Protection Systems 2008).



Resim 2.14: Güney Kore Incheon 100,000 m³ hacimli LNG Tankları 392 HDRB kullanılmıştır. 3 s dinamik periyod. D:70 m, H:36 m. (Dr. Yang 2011).

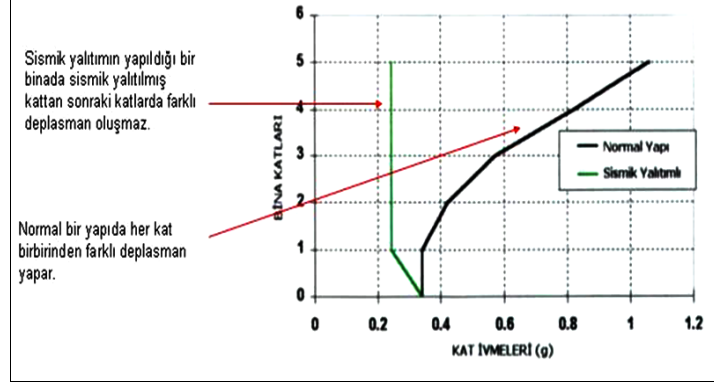
3. SİSMİK YALITIM SİSTEMLERİ

Sismik yapı yalıtımı; yapıların deprem etkilerinden korunması amacıyla geliştirilmiş bir sistemdir. Sistemin amacı, bir yapıyı etkileyen deprem yüklerinin azaltılmasıdır. Sismik yalıtım yapının depreme dayanma kapasitesini arttırmak yerine, binaya gelen sismik enerjiyi binaların periyodunu uzatarak azaltma esasına dayanan depreme dayanıklı bir düzenleme yaklaşımıdır (T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, 2011).

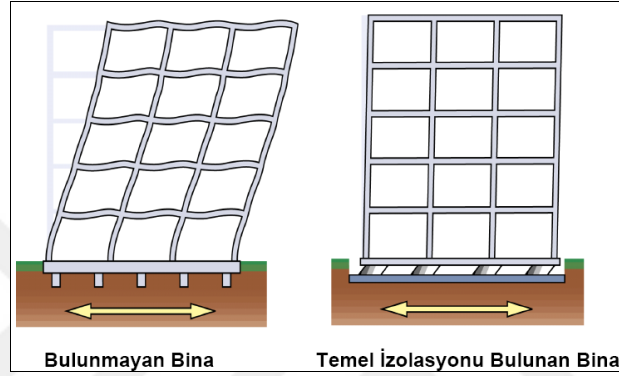
Deprem nedeniyle yapıya etki eden enerji ya ısıya dönüşüp kaybolur ya da yutulan enerji olarak kinetik ve potansiyel enerji olmak üzere iki çeşit enerjiye dönüşür. Sismik taban izolasyon sistemleri gibi, yapıya ilave edilen bazı araçlar ile yapı sistemine giren enerjinin bir kısmı yutularak yapının sismik performansı artırılmaktadır. Bu yöntem ile yapıya etkiyen enerji miktarının taban izolatörleri tarafından küçültülerek yapıya aktarılması sağlandığından, yapının maruz kaldığı deprem enerjisi küçülmekte ve yapının depreme karşı dayanımı artmaktadır (Şengel ve diğ. 2009).

Depreme dayanıklı geleneksel tasarım yöntemlerinde yapıların şiddetli deprem hareketlerine karşı direnci, ya yüksek süneklik ya da yüksek dayanım ve rijitlik ile sağlanır. Bu yöntemlere alternatif olarak geliştirilen “sismik izolasyon” yönteminde ise, ana felsefe yapının tabanına esnek ve enerji sönümleyici elemanlar yerleştirilerek yapının periyodunu artırıp zeminden yapıya aktarılan deprem kuvvetlerinin azaltılmasıdır (Şengel ve diğ. 2009).

Sismik yalıtımlı ve yalıtımsız yapıların depremde yaptığı yatay deplasmanlar Şekil 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Katlar arası deplasman hareketleri grafiği (T.C. Millî Eğitim Bakanlığı 2011)



Şekil 3.2: Ankastre yapı ile deprem izolasyonlu yapıda katlar arasındaki deplasman hareketleri (Wang Yen-Po 2002)

3.1 Sismik Yalıtım Uygulamasının Tarihsel Gelişimi ve Özellikleri

Sismik yalıtım fikri ilk defa, Tokyo Üniversitesi'nde çalışan Doktor Milne (1876-1985) tarafından geliştirilmiş olan “*Sismik Taban Yalıtımı*” ile başlamıştır. Doktor Milne, örnek bir bina inşaatında 25 cm çapında bilyeler kullanarak yapıyı zeminden ayırmış ve hafif depremler süresince olumlu sonuçlara ulaşmıştır. Bu yöntem çok basit olmasına rağmen pratik ve kullanılabilir olmamıştır. Çünkü bilyeler üzerinde duran yapı rüzgâr yükü etkisiyle bile kolayca hareketlenebilmiş ve herhangi bir yükleme sonrasında ilk konumuna dönememiştir. Daha sonra taban izolasyonunda kullanılan bilyelerin çapı 2.5cm'ye düşürülmüş ve sonuç daha olumlu olmuştur. Fakat yapı deprem sonrası ilk konumuna dönme mekanizmasına sahip olmadığı için pek kullanım alanı bulamamıştır. Ukrayna Sivastopol'da ve Mexico City'deki birer okul binasının bilyeler üzerine inşaat edildiği bilinmektedir (Farzad ve Kelly 1999).

Daha sonra, İngiltere'de yaşayan Doktor J.A. Calantarients, 1909 yılında binaların yapımı sırasında, yapı altına talk (kimyasal bileşimi magnezyum, silisyum,

oksijen ve hidrojenenden oluşan, kristal yapılı ve oldukça yaygın bulunan bir mineral), mika veya kumdan oluşturulan bir katmanın eklenmesi durumunda, yapıların hareket serbestliğine izin verecek bir düzenek olacağını ve bu sayede de yapıya transfer edilecek kuvvetin azaltılabildiğinin mümkün olabileceğini savunmuştur. Bu önerilen yöntem tamamıyla yapının zeminden yalıtılarak deprem kuvvetlerinin etkilerinden korunmasına dayanır. Resim 3.1’de verilen 1969’da Üsküp, Makedonya’da bir ilkokulda ilk defa kauçuk izolatörler kullanılmıştır (Farzad ve Kelly 1999).



Resim 3.1: Dünya’da ilk izolatörlü yapı 1969’da Makedonya’da yapılan Pestalozzi ilkokul binası (Farzad ve Kelly 1999).

Yeni Zelanda ve Japonya’da kullanılan sismik yalıtım sistemlerinde düşük sönümlü doğal kauçuk ile birlikte, mekanik sönümleyiciler kullanılmıştır. Bu yalıtım sistemleri, hidrolik sönümleyicilerden, çelik çubuklardan, çelik yaylardan ya da kurşun çekirdekli taşıyıcılardan oluşmuştur. Sismik taban yalıtımlı yapılarda kullanılan sönümleyicilerden, içinde kurşun çekirdek bulunanı hariç, mekanik birleştirme gerektirmeleri, sürekli bakıma ihtiyaç duymaları, sismik taban yalıtımlı yapıların dinamik analizini zorlaştıran sönümleyici metalin akmasıyla oluşan doğrusal olmayan tepkilerin oluşması gibi sakıncaları taşımaktaydılar. 1975 yılında kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin yapılarda kullanılması için çalışmalar başlatılmıştır. İlk defa Yeni Zelanda’da uygulanan bu sistem, Japonya’da ve Amerika Birleşik Devletleri’nde birçok yapıda uygulanmıştır (Farzad ve Kelly 1999).

Gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan sistemin geliştirilmesi için özellikle Japonya’da birçok şirket tarafından önemli çalışmalar yapılmaktadır. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler kullanılarak inşa edilen ilk bina Yeni Zelanda’nın Wellington şehrinde 1981 yılında yapılan hükümet binasıdır (Hışman 2011).

Bir diğerk sismik izolasyon yöntemi olarak önerilen sistem olan “Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi” bir sürtünmeli kayan mekanizmadan ibarettir. Bu sistemde, yatay sürtünme kuvvetleri, enerjiyi yok eder ve harekete karşı koyar. Bina temelinde bir silindir veya bir kum tabakası kullanımı bu sisteme verilebilecek en basit örnektir. Özellikle Çin’de az katlı yapıların depreme karşı koruması amacıyla geliştirilmiştir. Mostaghel ve Tanbakuchi (1983), Kelly ve Beucke (1983), sürtünmeli sistemin deprem ve sinüzoidal (dalga şeklinde) hareketler altındaki davranışlarını incelenmişlerdir. Sürtünmeli izolasyon sistemlerinin geleneksel kauçuk mesnet sistemlerine göre; geniş frekans dağılımı için etkili olabilmesi, sürtünme kuvveti temelde meydana gelirken kayan mesnedin rijitlik merkezi ve kütle merkezi yapının kütlesi ile orantılı olabilmesi ve simetrik olmayan yapılarda meydana gelen burulma etkilerinin azalması gibi üstünlükleri bulunmaktadır. (Yücesoy 2005).

3.2 Sismik Yalıtımın Kullanım Alanları

- Yüksek deprem performansı istenen tüm yapılar,
- Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları,
- Stratejik öneme sahip binalar (kamu, askerî, sivil savunma vb. binalar),
- İtfaiye bina ve tesisleri,
- PTT ve diğerk iletişim tesisleri,
- Ulaşım istasyonları, hava alanları ve terminaller, köprü, viyadük gibi sanat yapıları,
- Enerji üretim ve dağıtım tesisleri,
- İlk yardım, kriz merkezleri, afet plânlama merkezleri,
- Toksik, patlayıcı vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı tesisler,
- Bilgi işlem merkezleri,
- Tarihî binalar, müzeler.

Sismik izolatörlerin kullanılmasının uygun olmadığı durumlar ise:

- Çok yumuşak toprak yapısının olması,
- Binanın hareket edememesi (nükleer santraller),

- Rüzgâr yükünün bina ağırlığının %10'undan büyük olması,
- Hareketli yükün çok fazla ve değişken olmasıdır.

3.3 Sismik Yalıtımın Sağladığı Avantajlar

- Yüksek can güvenliği,
- Yapının taşıyıcı sistemi ve mimarî elemanlarında minimum deprem hasarı,
- Şiddetli depremlerden sonra bile hemen kullanım,
- Hemen kullanım sayesinde iş kaybının önlenmesi ve pazar payının korunması,
- Yapının değerli eşya ve cihaz içeriğine etkin koruma,
- Ulaşım yapılarında süreklilik,
- Köprü ve viyadüklerin hasar görmeden kullanılmasının devamı,
- Yıkılma ve hasar olmayacağından yeniden inşaat ya da onarım maliyetlerine gerek kalmaması,
- Minimum bakım gereksinimi,
- Araştırma ve geliştirme projelerinin korunması,
- Tarihî bina ve değerlerin korunmasıdır.

Sonuç olarak sismik yalıtılmış yapıda şu özellikler elde edilir;

- Elastik davranış,
- Yapıya gelen kuvvetler azalır, kat ivmeleri (hareket değişim farklılıkları) küçülür,
- Katlar arası deplasmanlar küçülür, hemen hemen bütün katlar yaklaşık aynı deplasmanı yapar.

3.4 Yapı İzolatörlerinin Sınıflandırılması

Yapı izolatörleri çalışma prensibine göre 3 ana gruba ayrılır:

Kauçuk esaslı izolatörler

- Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk izolatörler (LDRB)
- Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler (HDRB)
- Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler (LRB)

Kaymaya dayalı izolatör sistemleri-

- Sürtünmeli sarkaç sistemler (FPS)
- Elektrikli Fransız sistem (EDF)
- EERC Birleşik Sistemleri
- TASS Sistemleri
- Geri Şekillenebilen Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi (RFBI)

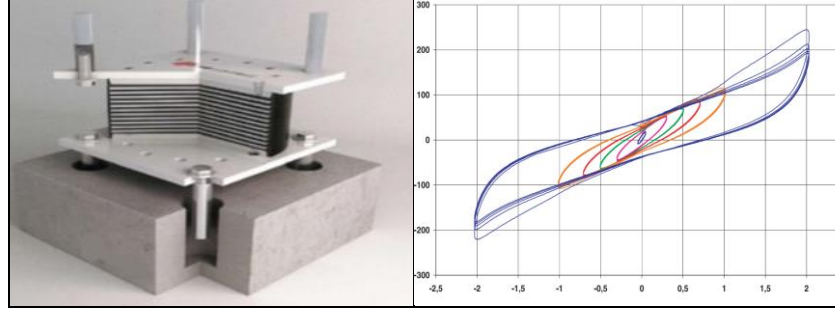
Yay tipi izolatörler

- Gerb firmasının ürettiği Helezonik Yay Sistemleri

3.4.1 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDRB)

Düşük sönümlü kauçuk izolatörlerin ek sönümleyici ihtiyacını ortadan kaldırmak için Malezya Kauçuk Üreticileri Birliği (MRPRA) tarafından 1982’de “Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler” geliştirilmiştir. Sönüm oranı, eklenen karbon blokları, reçineler (veya yağlar) ve diğer dolgu maddeleri ile artırılmıştır. Bu sönüm % 100 kayma deformasyonları altında % 10 - 20 oranında arttırılmıştır. İzolatörlerdeki sönüm ne viskoz ne de çevrimseldir, ikisinin arasında bir davranış göstermektedir. Deney sonuçları göstermiştir ki, bu elemanların davranışı lineer viskoz ve elasto-plastik elemanların davranışının bir kombinasyonudur. Bu izolatörlerin diğer bir avantajı da, trafik veya trenlerden kaynaklanan yüksek frekanslı düşey titreşimlerin filtre edilmesinde başarılı olmalarıdır (Kılınç 2011). Yüksek sönümlü kauçuk izolatörün kesit görünüşü ve yatay kuvvet deplasman davranışı

Şekil 3.3 a, b, c’de verilmiştir. Kauçuk esaslı sismik izolatör yatay kuvvet testlerine tabi tutulduğunda, 130 mm kalınlıkta ve 650 mm çaplı HDRB izolatörün, 4500 kN yatay kuvvet altında 650 - 700 mm yatay deplasman yaptığı görülmektedir.



a.Kesit görünüşü (FIPMEC 2022) b. Histeresis Eğrisi (FIPMEC 2022))



c.Yatay yerdeğiştirme davranışı (Demir 2008)

Şekil 3.3: HDRB izolatörün yatay kuvvet altındaki şekil değişimi

Yüksek Sönümlü Kauçuk izolatörlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Denklemler 3.1 - 3.14 ile hesaplanır:

$$K_e = \frac{GA}{t_r} \quad (3.1)$$

Burada; K_e , Yatay rijitlik, G_r , Elastomerin kayma modülü, A , kauçuğun plandaki enkesiti, t_r , kauçuğun toplam kalınlığıdır.

$$\gamma_c = \frac{D_g}{t_r} \quad (3.2)$$

γ_c , maksimum kayma şekil değiştirmesi, D_g , HDRB çapıdır.

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (3.3)$$

K_v , düşey rijitlik, E_c , belirli düzeydeki bir düşey yük etkisi altında kauçuk ve çelikten oluşan kompozit elemanın basınç modülüdür.

$S = \text{Yüklü alan} / \text{Kuvvet uygulanmayan alan}$

S , elastomer kauçuk malzemenin tek bir tabakasına ait boyutsuz bir oran ölçüsüdür.

Çapı D_g , t kalınlığında bir dairesel izolatör için;

$$S = D_g / 4t \quad (3.4)$$

Bir kenar uzunluğu a , t kalınlığında kare bir izolatör için;

$$S = a / 4t \quad (3.5)$$

Daire için basınç modülü;

$$E_c = 6GS^2 \quad (3.6)$$

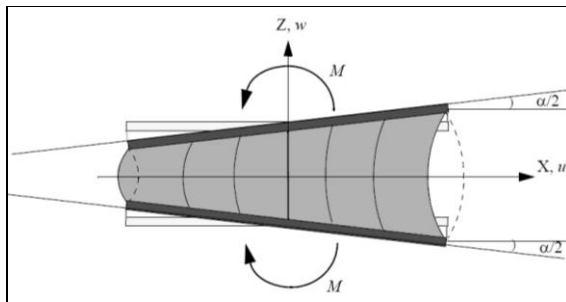
$$\epsilon_c = \frac{\Delta}{t_r} \quad (3.7)$$

Basınç etkisi altında, birbirine bağlı çelik levhalar nedeniyle kauçuktan γ_c ile gösterilen bir maksimum kayma şekil değiştirmesi meydana gelir.

$$\gamma_{ort} = \sqrt{(6S\epsilon_c)} \quad (3.8)$$

$$\gamma_c = 6S\epsilon_c \quad (3.9)$$

Burada; ϵ_c , nominal basınç şekil değiştirmesi; γ_c , maksimum kayma şekil değiştirmesidir. Kauçuk izolatörde eğilme ile meydana gelen rölatif açı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Yalnız eğilme etkisi altında rijit tabakalar arasında kauçuk tabaka (Farzad ve Kelly 1999)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha}{t} \quad (3.10)$$

α , üst ve alt levhalar arasındaki rölatif açı, ρ , yer değiştirme tarafından meydana getirilen eğrilik yarıçapıdır.

R_{HDB} yarıçaplı dairesel bir izolatör için,

$$M = \frac{3\alpha G \pi R_{HDB}^6}{24t^3} \quad (3.11)$$

Burada; t , tek bir kauçuk tabakasının kalınlığı, M , eğilme momentidir.

$$\gamma_b = 6S\varepsilon_b \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_b = R_{HDB}(\alpha/t) \quad (3.13)$$

γ_b , eğilme nedeniyle oluşan kayma şekil değiştirmesi, ε_b , eğilme nedeniyle oluşan kenar basınç şekil değiştirmesidir.

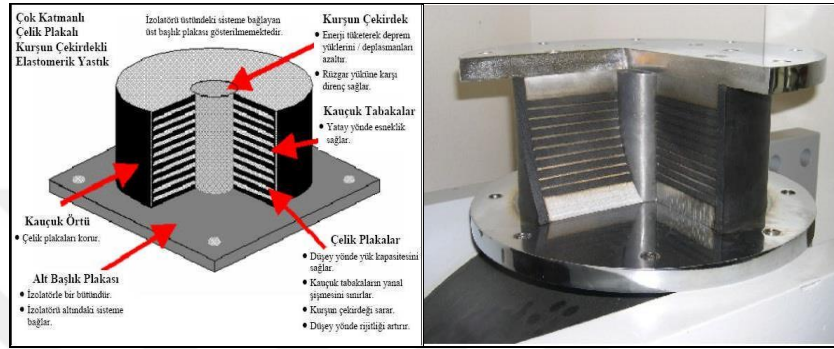
$$\gamma_{bort} = \frac{\sqrt{2}}{4} S\varepsilon_b \quad (3.14)$$

3.4.2 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB)

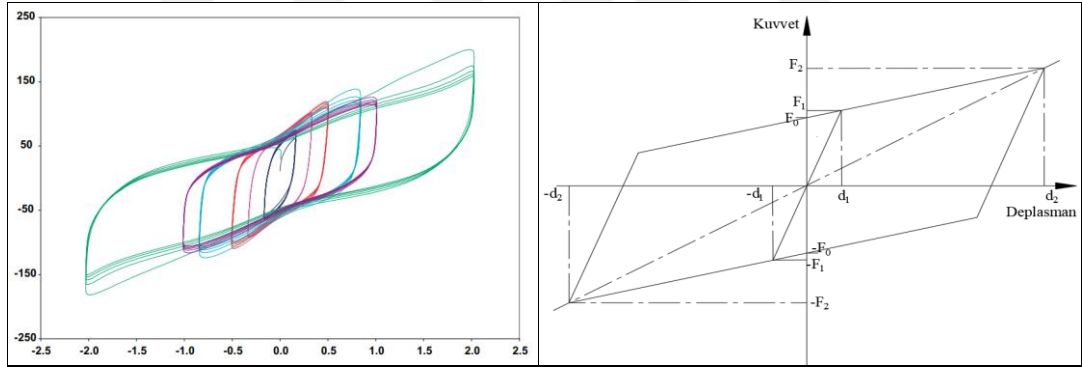
Kurşun çekirdekli izolatörler ilk defa 1975’de Yeni Zelanda’da üretilmiştir. Yeni Zelanda, Japonya ve ABD’de yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu izolatörler, düşük sönümlü kauçuk izolatörlere benzemektedir. Fakat izolatörün orta boşluğunda Resim 3.3’de görüldüğü gibi, bir kurşun çekirdek vardır. Bu çekirdek, kauçuğun yüksek kayma deformasyonlarını engellemektedir. Elemana, deplasmana bağımlı etkili bir başlangıç rijitliği ve sönümü vermektedir (Kılınç 2011). Bu izolatörlerin düşey rijitliği yatay rijitliğinden çok daha fazladır. Böylelikle yapının salınım yapması önlenir veya en aza indirilir. Yatay esneklik sayesinde yapının frekansı tehlikeli deprem frekansının dışında kalır ve rezonans engellenmiş olur. Bu sistemlerin, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir (Polat 2007).

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün kesit görünüşü ve “Yatay Kuvvet-Deplasman” davranışı sırasıyla Resim 3.3 ve Şekil 3.5 a, b’de gösterilmiştir. Kurşun çekirdekli izolatörler, düşük kayma rijitliğine sahip olduklarından büyük şekil

değiştirmeler yapabilirler. Buna karşın, sistemin ortasındaki kurşun çekirdek ise gerilme karşısında akma durumuna gelir ve plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Kauçuk ve kurşundan oluşan sistem başlangıçta küçük bir bölgede elastik davranır daha sonra ise plastik davranış gösterir. İlk olarak elastik rijitliğin ortaya çıkması küçük titreşimlerde sönüm etkisinin belirgin olmamasına neden olur. Hassas aletlerin bulunduğu binalarda küçük titreşimler karşısında cihazlar zarar görebileceğinden bu durum risk oluşturabilir (Hışman 2011).



Resim 3.3: Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör Kesit ve Görünüşü (Demir 2008), (Özpalkanlar 2004)



a. Deneysel histeresis eğrisi

b. İdealize edilmiş histeresis eğrisi

Şekil 3.5: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün histeresis eğrisi, (FIPMEC 2022), (Keskin 2008)

Kurşun çekirdekli izolatörlerin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda verilen denklemlerle (Denklemlerle 3.15 - 3.25) hesaplanır:

$$K_1 = \frac{F_1}{d_1} \quad (3.15)$$

$$K_2 = \frac{F_2 - F_1}{d_2 - d_1} \quad (3.16)$$

Uygulamada elastik rijitlik K_1 , plastik bölgedeki rijitlik K_2 değerinin yaklaşık 10 katı alınır .

$$K_1 = 10K_2 \quad (3.17)$$

$$d_1 = \frac{F_0}{K_1 - K_2} \quad (3.18)$$

$$F_0 = Q(\text{Kurşunun çekirdek alanı}) \quad (3.19)$$

$$F_1 = F_0 + K_2 d_1 \quad (3.20)$$

$$K_e = K_2 + \frac{Q}{d_2} = \frac{F_2}{d_2}; d_2 > d_1 \quad (3.21)$$

Burada; K_1 , akma öncesi yatay yön için elastik rijitlik, K_2 , akma sonrası yatay yön için etkili rijitlik, K_e , efektif rijitlik, F_0 , kurşunun kuvvet, F_1 , kurşunun akma dayanımındaki kuvvet, F_2 , izolatörün kurşunun akma dayanımındaki kuvvet, G_r , kauçuğun kayma modülü, E_c , elastomerin elastisite modülü, A , kauçuğun plan kesiti, t_r , kauçuğun toplam kalınlığı, K_2 / K_1 , akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı, Q , merkezinde bulunan kurşunun karakteristik dayanımı (10.3 MPa), d_1 , akma sırasındaki deplasman miktarı, d_2 , maksimum deplasman miktarıdır.

$$\omega = \sqrt{\frac{K_e}{W_i/g}} \quad (3.22)$$

Burada; ω , izolatör doğal titreşim frekansı, W_i , deprem yükleri içeren bir izolatöre gelen maksimum düşey yükü belirtir.

T_{LRB} , izolatöre ait efektif periyot ise;

$$T_{LRB} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.23)$$

Kurşun çekirdekli döngüsel davranış eğrisinin içinde kalan alan “ W_D ”, aynı zamanda kurşun başlıklı izolatörün bir tam döngüsünde dağıttığı enerjiye eşittir.

Öyleyse, bir tam periyot zamanında dağıtılan enerji;

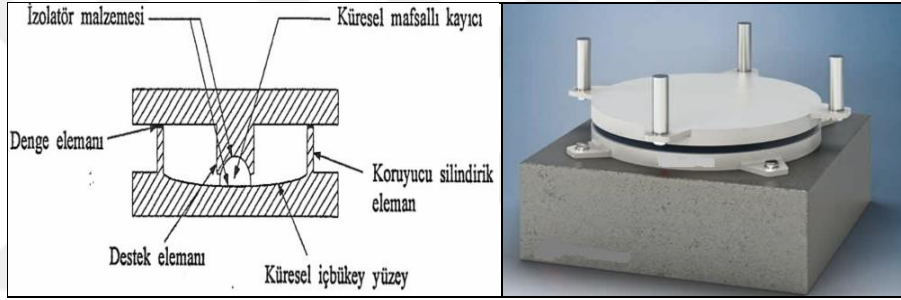
$$W_D = 4F_0(d_2 - d_1) \quad (3.24)$$

$$\xi_e = \frac{W_D}{2\pi K_e d^2} \quad (3.25)$$

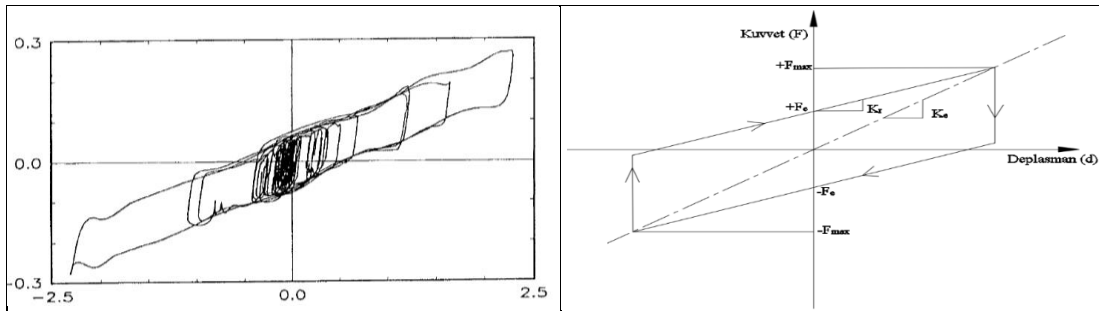
Burada; ξ_e , d_2 deplasmanında viskoz sonüm katsayısıdır.

3.4.3 Sürtünmeli Sarkaç Sistemi (FPS)

Geometrisi yardımıyla bir kayma hareketini ve bir geri dönüş kuvvetini birleştiren, sürtünmeli bir sistemdir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi paslanmaz çelikten küresel bir yüzey üzerinde hareket eden, mafsallı bir kayıcıya sahiptir. Mafsallı kayıcının kenarı, düşük sürtünmeli kompozit bir malzeme ile kaplanmıştır. Kayıcının diğer kenarı da tam küresel olup, paslanmaz çelik ile kaplıdır ve yine düşük sürtünmeli kompozit malzeme ile kaplanmış küresel bir oyuk içine oturmaktadır (Polat 2007). Özel metaller kullanılarak iç bükey küresel yüzey üzerinde kayabilen mesnet elemanı, bu yatay hareket sırasında binayı yükselterek gelen deprem enerjisini ortalama %80 oranında sönümler (Farzad ve Kelly 1999). FPS izolatörün yatay kuvvet boyunca yaptığı deplasman hareketi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6: Sürtünmeli Sarkaç İzolatörün Çalışma Prensibi (Polat 2007), (FIPMEC 2022)



a. Deneyel histeresis eğrisi

b. İdealize edilmiş histeresis eğrisi

Şekil 3.7: FPS izolatörün histeresis eğrisi (Farzad ve Kelly 1999), (FIPMEC 2022)

Sürtünmeli sarkaç sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda verilen denklemlerle (Denklemlerle 3.26 - 3.31) hesaplanır:

$$F = \frac{W_i}{R_{FPS}} d_{max} + \mu W_i (\text{sgn} d_{max}) \quad (3.26)$$

$$K_r = \frac{W_i}{R_{FPS}} \quad (3.27)$$

Burada; W_i , izolatörün üzerine gelen maksimum düşey yük, d_{max} , maksimum yatay deplasman, μ , sürtünme katsayısı, R_{FPS} , küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı, F , sistemde meydana gelen tepki kuvveti ve K_r , izolatör düzeltilmiş rijitliktir.

Denklem 3.28’de verildiği üzere, T_{FPS} , izolatörlü yapı yapı periyodu taşınan kütleden bağımsızdır.

$$T_{FPS} = 2\pi\sqrt{R_{FPS}/g} \quad (3.28)$$

Basınç değeri arttıkça sürtünme katsayısı azalmakta ve 51mm/s’nin üzerindeki hızlar için ve yaklaşık 14 MPa üzerindeki basınçlarda hızdan bağımsız hale gelmektedir. Şekil 3.7 (a)’da görüleceği üzere; kayma hareketi meydana gelmeden önce kuvvet çok doğrusal bir özellik gösterirken, kayma hareketi ile oluşan sürtünme nedeniyle enerji azalımı meydana gelir (Farzad ve Kelly 1999).

K_e , efektif rijitlik ise Denklem 3.29’deki gibi hesap edilir.

$$K_e = \frac{W_i}{R_{FPS}} + \frac{\mu W_i}{d_{max}} \quad (3.29)$$

Burada; ξ_e , sönüm oranı ise,

$$\xi_e = \frac{2}{\pi(\frac{d_{max}}{R_{FPS}} + \mu)} \quad (3.30)$$

d yatay maksimum yer değiştirmesinden sonra düşey yöndeki K_v yer değiştirmesi ise Denklem 3.31’deki gibi hesap edilir.

$$K_v = \frac{d_{max}^2}{2R_{FPS}} \quad (3.31)$$

4. LNG DEPOLAMA TANKI MODELLEME VE MODAL ANALİZİ

Tez kapsamında Tekirdağ'daki Marmara Ereğlisi Botaş tesislerinde yapılacağı varsayılan, 232,000 m³ kapasiteli, LNG sıvısı H/R oranı 1 olan, dünyadaki en büyük kapasiteli LNG tankı gözönüne alınmıştır. Bölgenin zemin sınıfı deniz dolgusu olduğu için ZD olarak kabul edilmiştir. Tankın dört farklı mesnetlenme tipi için deprem performansı ANSYS ve LS-DYNA programları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapı-sıvı etkileşimi de göz önüne alınarak incelenmiştir. Betonarme dış perdenin yanı sıra kubbe ve temel plakası da dört noktalı, 24 serbestlik dereceli (DOF) dikdörtgen kabuk elemanlarıyla, camyünü ve perlit izolasyon katmanı, sekiz düğümlü 12 DOF katı elemanlarla modellenmiştir. LNG sıvısı sekiz düğümlü 12 DOF sıvıları ile modellenmiştir. Akışkan-yapı etkileşimi, akışkan-yapı ara yüzündeki düğümlerdeki uygun bağlantı denklemlerinin belirlenmesiyle yaklaşık olarak hesaplanır. Dış betonarme duvar, iç çelik tank, betonarme kubbe ve çevre kirişi, temel döşemesi, taban cam köpük izolasyonu ve yan perlit izolasyonu dörtgen kabuk elemanlarla modellenmiştir. Analiz çalışmalarında akışkan tarafı akustik eleman olarak atanır ve teorik hesaplamalara uygun sonuçlar elde etmek amacıyla birleştirme seçeneği ile yapısal tarafla birleştirilir. ANSYS Workbench'te geliştirilen sismik analiz sonlu elemanlar modeli LS-DYNA'ya dönüştürülmüş ve daha sonra sismik doğrusal olmayan analizler LS-DYNA'da gerçekleştirilmiştir. Kabuk ve katı elemanlar benzer serbestlik derecesi ve tipte tutulmuştur. Metal parçalarda kullanılan MAT_24 parçalı çoklu doğrusal malzeme modeli, beton ve izolasyon parçalar için ise MAT_01 elastik model seçilmiştir. Akışkan tarafı için Lagrangian seçenekleriyle MAT_NULL kullanılmış ve çalkantı efektlerinin otomatik düğümden yüzeye bağlantısı sunulmuştur. Ayrıca dinamik analiz sırasında LNG sıvısı ile ilgili şu kabuller de yapılmıştır. Hareketsiz sıvı yüzeyindeki basınç atmosferik basınca eşittir, sıvı yükselmesi sonucunda hareketsiz yüzeydeki basınç yükselen sıvının oluşturduğu statik basınca eşittir, tank duvarı ile ona temas halindeki sıvının yanal hızları eşittir ve sıvı sıkışmazdır.

2475 yılda bir gelecek deprem baz alınarak 7 farklı depremin ivme kayıtlarının ortalaması deprem performans hedefi olarak seçilmiştir. Mesnetlenme tipi olarak yüksek sönümlü kauçuk izolatör (HDRB), kurşun çekirdekli izolatör (LRB),

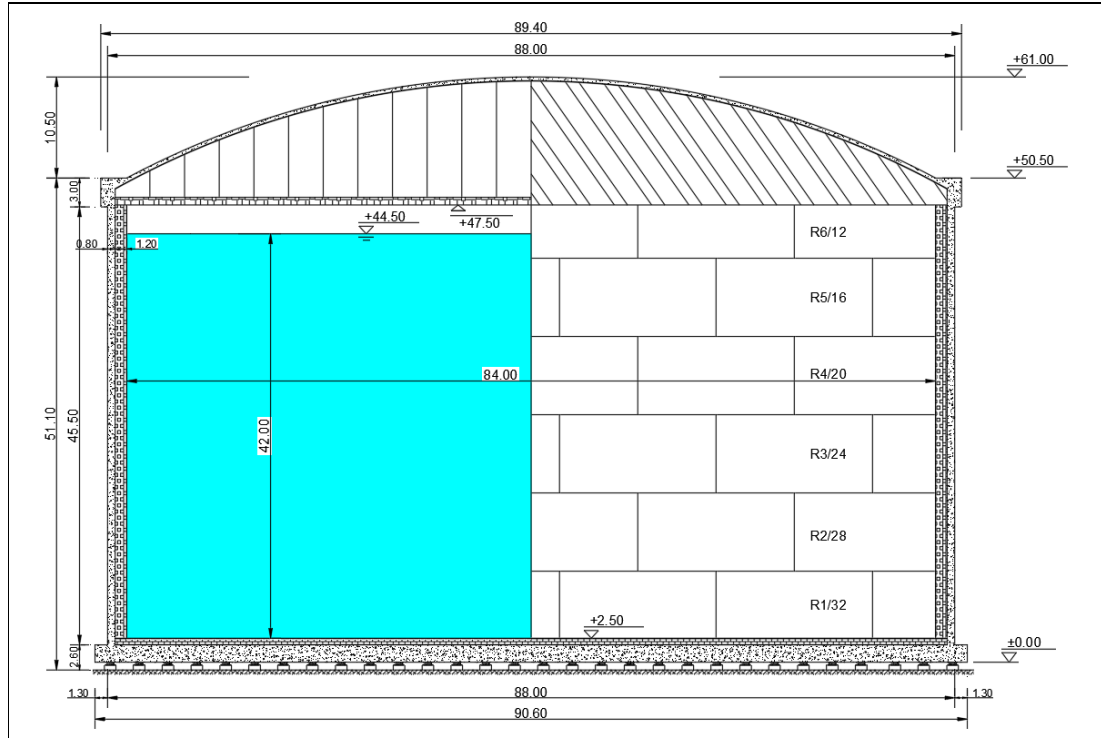
sürtünmeli sarkaç sistemli izolatör (FPS) ve geleneksel biçim olan sismik yalıtımsız içerdeki tankın radye temele ankraj bulonları sabitlenmiş durumu gözönüne alınmıştır. Analizlerde farklı tipteki sismik yalıtımlar, tabanda lineer olmayan yay katsayıları ile modellenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen yapının taban kesme kuvvetleri, LNG sıvısı çalkalanma yükseklikleri, çelik tanktaki gerilme değerleri, çelik tank taban ve duvar tepe noktasının deplasman farkları, çelik duvarın fil ayağı elasto-plastik burkulma deformasyonları, her bir izolatöre gelen yatay kuvvet – deplasmanları ve düşey kuvvetlerin zamanla değişimleri karşılaştırılmıştır. Yapının ve kullanılan malzemelerin özellikleri, Tablolar 4.1-4.2 ile Şekiller 4.1-4.3’de verilmektedir.

Tablo 4.1: LNG depolama tankının malzeme özellikleri

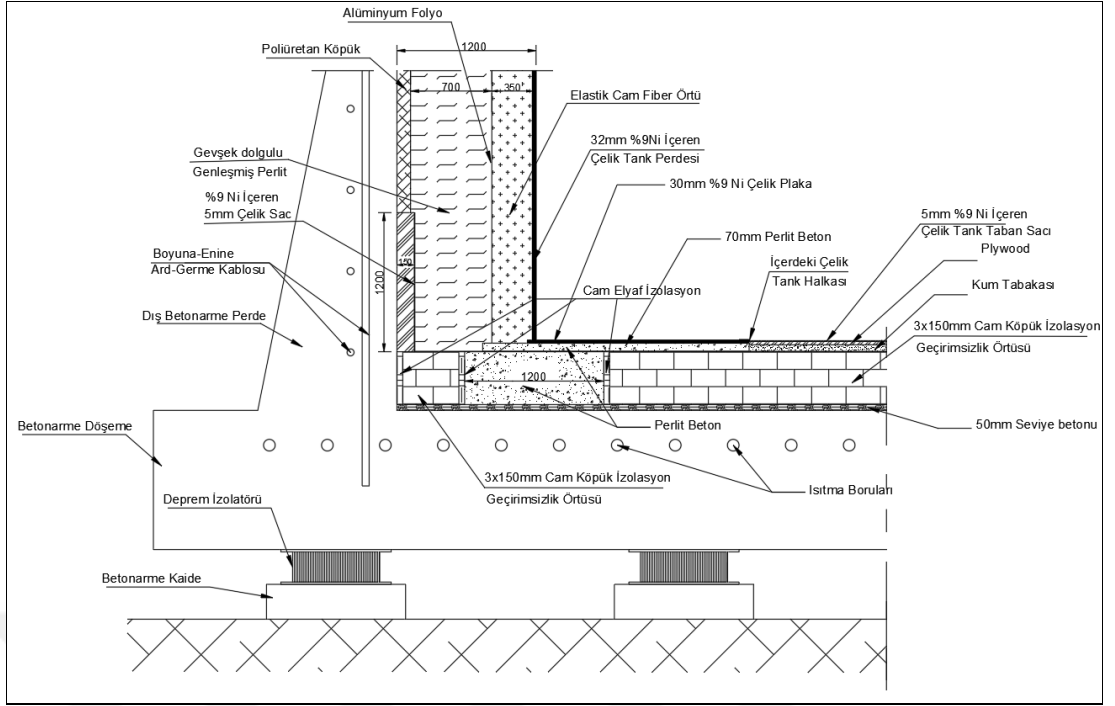
Yapı Bölümü	Malzeme Özeliği	Ölçü
İç Çelik Tank	Elastisite Modülü (kPa)	2.0E+08
	Poisson oranı ν_s	0.3
	Ağırlık γ_{st} (kN/m ³)	78.0
LNG sıvısı	Elastisite Modülü (kPa)	2.0E+06
	Poisson oranı ν_L	0.0
	Vizkosite	0.0
	Ağırlık γ_{LNG} (kN/m ³)	4.80
Betonarme temel, çatı, dış perde duvar	Elastisite Modülü (kPa)	3.70E+08
	Poisson oranı ν_s	0.2
	Ağırlık γ_c (kN/m ³)	25
Perlit izolasyon	Elastisite Modülü (kPa)	7.50E+06
	Ağırlık γ_p (kN/m ³)	2.40
Cam yünü izolasyon	Elastisite Modülü (kPa)	1.20E+06
	Ağırlık γ_{cg} (kN/m ³)	1.500

Tablo 4.2: 232,000 m³ hacimli LNG depolama tankının geometrik karakteristikleri

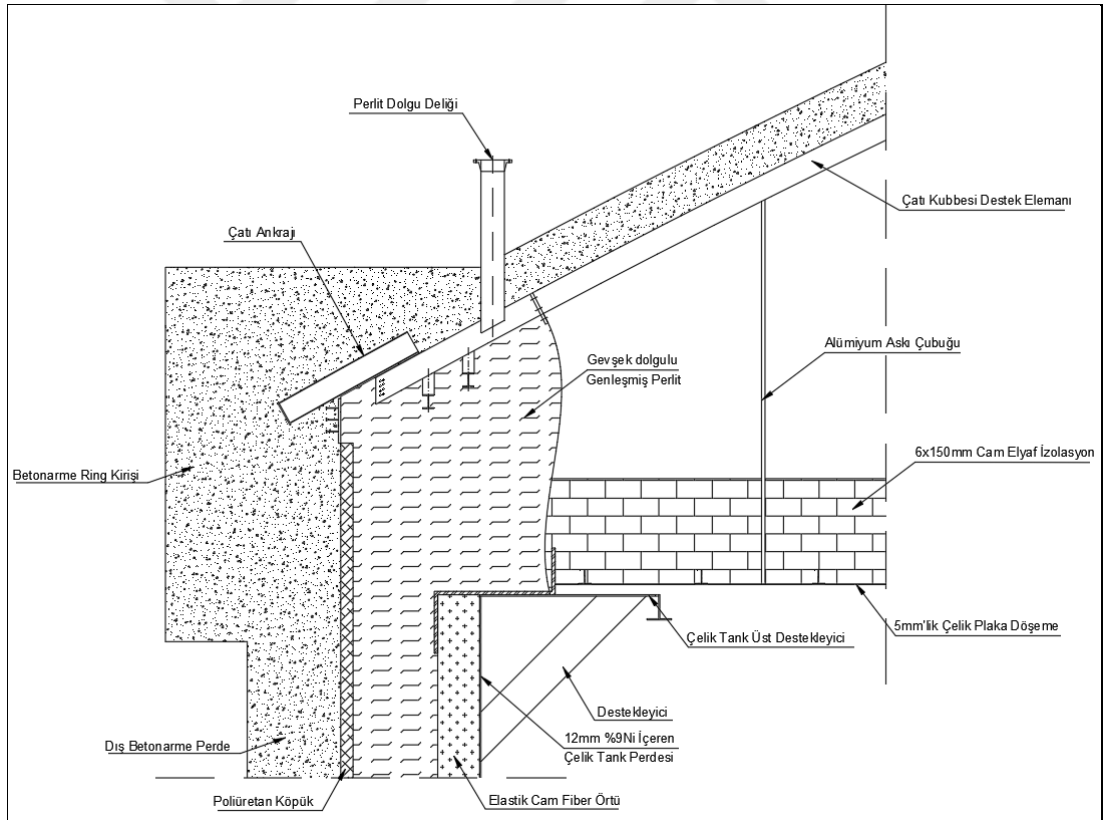
Açıklama	Ölçü
İçerdeki Çelik Tank Yüksekliği	45.00 m
İçerdeki Çelik Tank Çapı	84.00 m
İçerdeki Çelik Tankın Yan Duvar Cidar Kalınlığı	32 mm – 12 mm
İçerdeki Çelik Tankın Alt Taban Cidar Kalınlığı	5 mm
LNG Sıvının Yüksekliği	42.00 m
Dışardaki Betonarme Tank Yüksekliği	61.00m
Dışardaki Betonarme Tank Çapı	88.00m
Dışardaki Betonarme Tankın Cidar Kalınlığı	0.80 m
Çatı Kubbe Betonarmenin Cidar Kalınlığı	0.40 m
Çatı Kubbe Sac Kalınlığı	10 mm
Askı ile Çatı Kubbeye Mesnetlenmiş Alüminyum Döşeme Kalınlığı	5 mm
Çatı İzolasyon Kalınlığı	1.00 m
Dış Betonarme Duvar ile İç Tank Arası İzolasyon Kalınlığı	1.20 m
Alt Taban İzolasyon Kalınlığı	0.70 m
Temel Kalınlığı	1.80 m



Şekil 4.1: LNG depolama tankı kesiti



Şekil 4.2: LNG depolama tankı alt taban ve perde kesiti (Abd ve diğ. 2018)



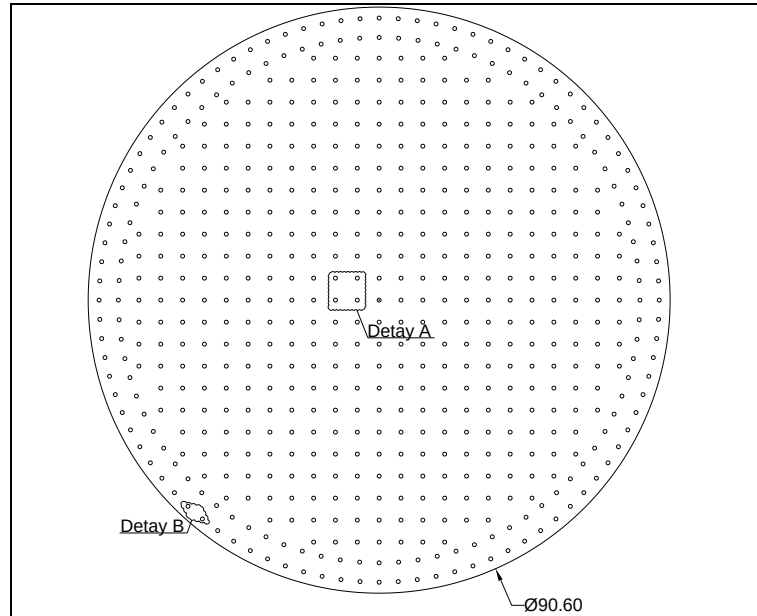
Şekil 4.3: LNG depolama tankı çatı kesiti (Abd ve diğ. 2018)

4.1 Deprem Yalıtımı Sisteminin Yerleştirilmesi

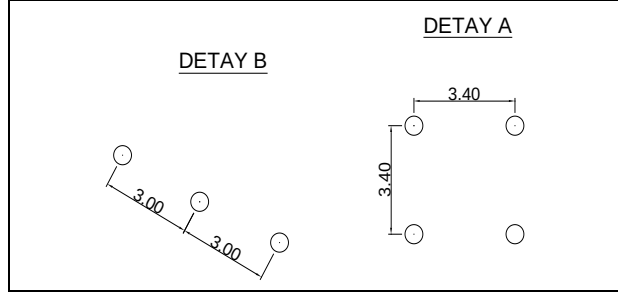
Bir deprem yalıtımı yaklaşık 10 - 12 m²'lik bir alanın desteklenmesi için kullanılır (Gregio ve diğ. 2006, 2011), bu durumda 232,000 m³ kapasiteli LNG tankında toplam 597 adet izolator gerekli olacaktır. Dış dairesel izolatorlerin merkezleri arasındaki mesafe bunlara gelen düşey yük daha fazla olduğu için 3.00m; ve iç izolatorlerin merkezleri arasındaki mesafe ise 3.40 m olarak alınmıştır. Temel 90.60 m çapında olup, toplam alan 6446.83 m²'dir. Buna göre bir izolatorün taşıdığı alan 10.80 m² olmaktadır. LNG tank altı HDRB, LRB ve FPS izolatorlerin plan ve kesitleri Şekil 4.4-4.5'de verilmiştir.

Çeşitli tipteki izolatorlerin 4 farklı sistemi oluşturulmuştur.

- I. Sistem: Çelik tankın betonarme döşemeye ankraj bulonları ile sabitlendiği sistem,
- II. Sistem: Betonarme döşemenin altında 597 adet HDRB izolatorlü sistem,
- III. Sistem: Betonarme döşemenin altında 597 adet LRB izolatorlü sistem,
- IV. Sistem: Betonarme döşemenin altında 597 adet FPS izolatorlü sistem.

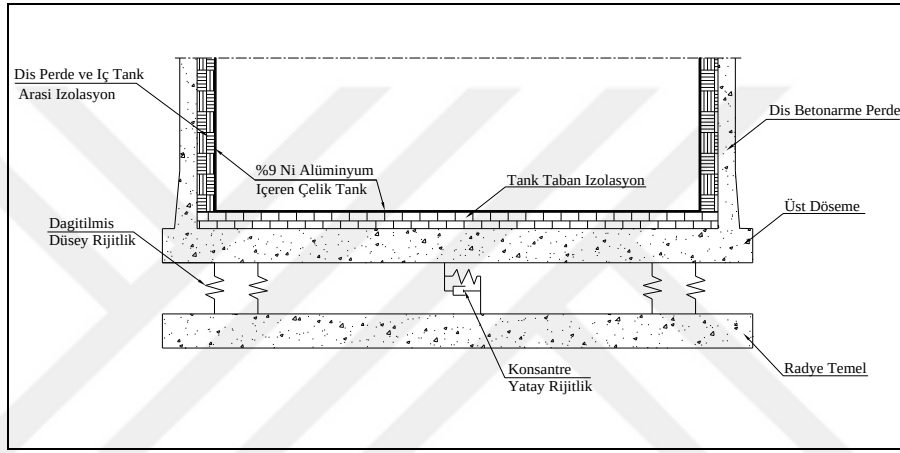


Şekil 4.4: İzolatorlerin yerleşim planı



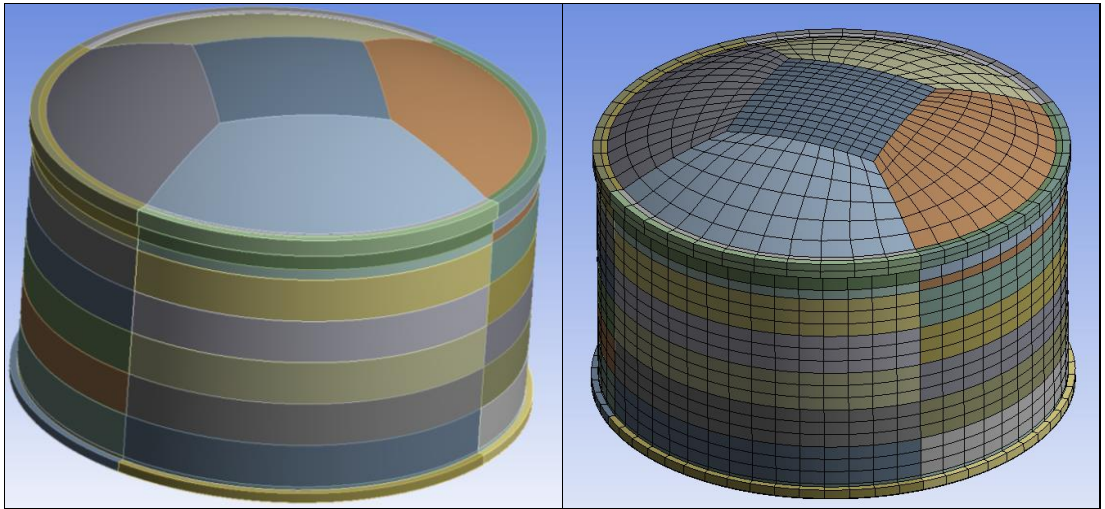
Şekil 4.5: İzolatörlerin aks arası mesafe detayları

ANSYS ve LS-DYNA programında yayların girilmesi ile ilgili modelleme aşağıda Şekil 4.6’da yer almaktadır.

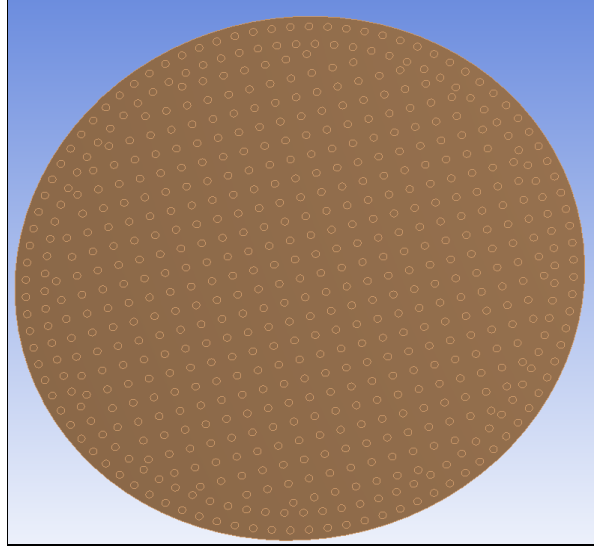


Şekil 4.6: İzolatör sistemlerinin modellenmesi

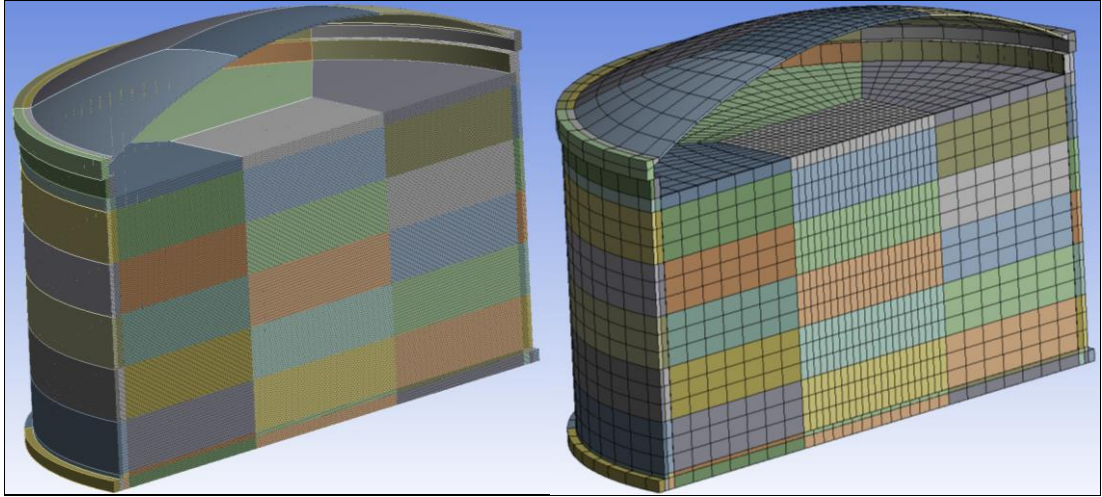
ANSYS Workbench programında LNG tank kesit, görünüşler, HDRB, LRB ve FPS izolatör yerleşim planı Şekil 4.7-4.11’de modellenmiştir.



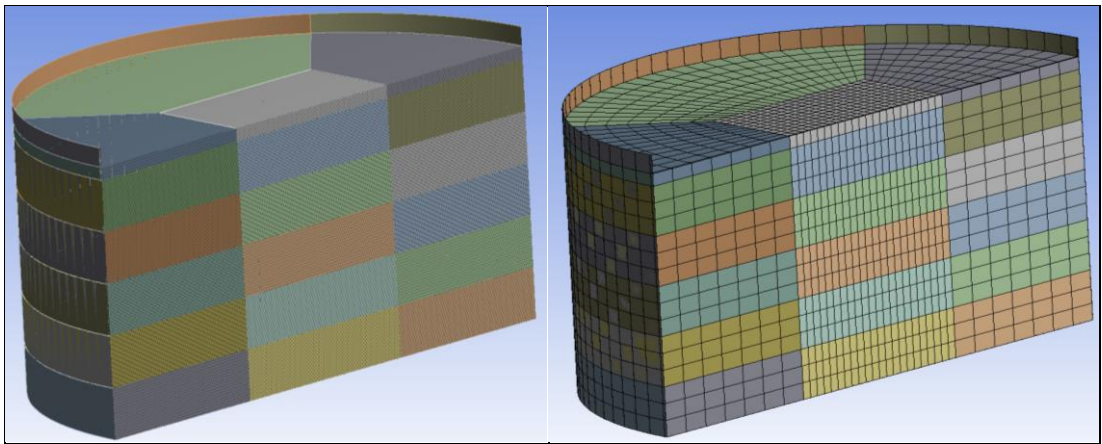
Şekil 4.7: LNG tankının ANSYS Workbench programında sonlu elemanlar metodu kullanarak üç boyutlu katı modellenmesi



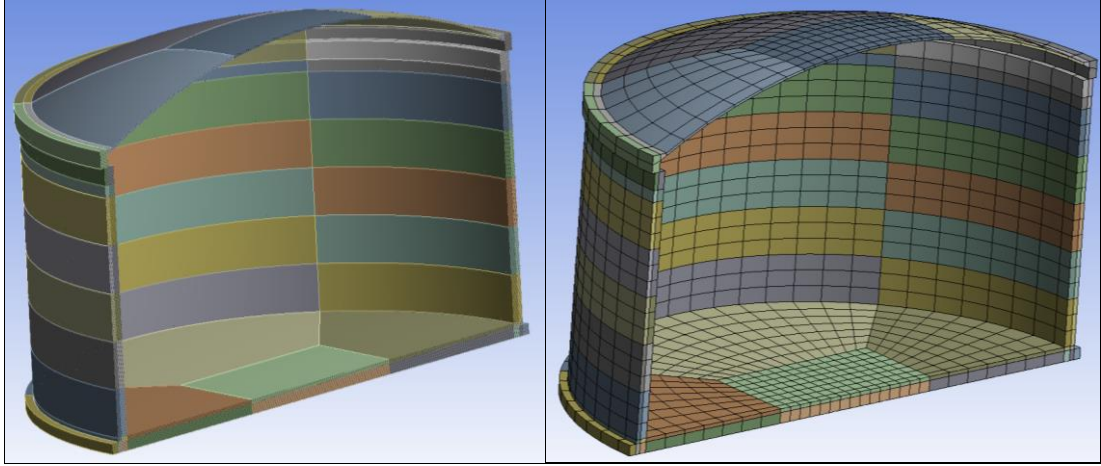
Şekil 4.8: ANSYS Workbench programında LNG Tankının taban izolatörlerin yerlerinin modellenmesi



Şekil 4.9: ANSYS Workbench programında LNG tank ve sıvının kesit görüntüleri



Şekil 4.10: ANSYS Workbench programında çelik tank ve LNG sıvısının kesit görüntüleri



Şekil 4.11: ANSYS Workbench programında betonarme yapı taban ve yan ısı izolasyon malzemelerinin kesit görünüşleri

4.2 LNG Sıvısının Dinamik Yükler Altındaki Mekanik Analojisi

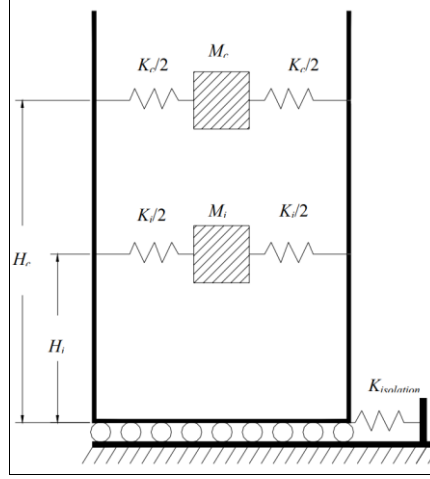
İç çelik tankda bulunan LNG sıvısının dinamik yükler altındaki davranışı kütle ve yaylardan oluşan bir sisteme benzetilmiştir. Çelik tankın sabit ve izolatörlü mesnetlenme durumları için bu mekanik analogiler aşağıda belirtilmiştir.

4.2.1 Sabit Mesnetli Sistem

Tank içinde bulunan sıvı iki bağımsız ayrı kütleden oluşur. Bu kütlelerin deprem sırasında tankın yüzeyine farklı zamanlarda yaptığı basınçların hesaplanmasından oluşur. Her bir kütle yerdeki bir kiriş eleman boyunca bağlanmıştır. Fakat üstteki deplasman ve yerdeki moment 0'dır. Bu durumu Şekil 1.2'de gösterilmektedir. (Malhotra ve diğ. 2000)

4.2.2 İzolatörlü Sistemler

LNG tankının sonlu elemanlar modelinde tankın tabanında sismik izolatörler tanımlanır. Bu mafsalların düşey rijitlikleri sağladığı varsayılır. Bu varsayıma göre yer hareketinin çıkış yönündeki yatay deplasman sınırlaması tank duvarlarının tabanı maruz kalmıştır. Yerin tank tabanı ile birleşim noktası hareket eden ve lineer olmayan yaylar ile bağlantı elde edilmiş olur.(bkz. Şekil 4.12)



Şekil 4.12: Deprem yalıtımlı LNG tankındaki sıvının mekanik anolojisi (Christovasilis 2006)

4.3 Modal Analiz

Sabit ve deprem yalıtımlı çelik tank, dış koruyucu betonarme yapı ve LNG sıvısının modal analizler sonucu bulunan periyot ve frekansları aşağıda verilmiştir.

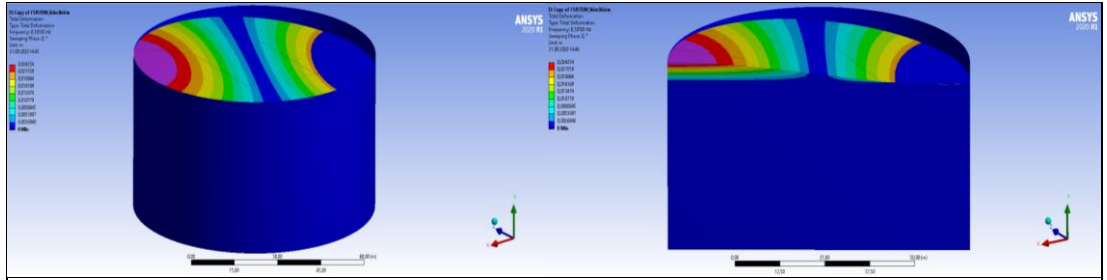
4.3.1 I. Sistem

Çelik tankın betonarme döşemeye ankraj bulonları ile bağlandığı durumda, LNG sıvısı, çelik tank, dış betonarme perde ve çatıda oluşan salınım hareketleri aşağıdaki gibidir.

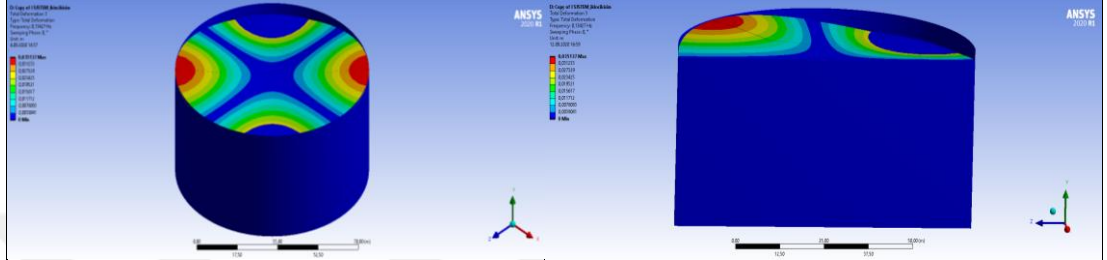
- Çelik tank ve LNG sıvısı

I. sistemde çelik tankın ve LNG sıvısının periyot ve frekansları ANSYS Workbench programında hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4.13-4.24, Tablo 4.3), 1. Mod değerleri ayrıca Malhotra'nın geliştirdiği amprik formüle göre de elde edilmiştir. $H/R=1$ için Şekil 1.4'te verilen grafikten itkisel ve taşıyımli katsayılar sırasıyla $C_i=6.36$ ve $C_c=1.52$ olarak okunmuştur. Çelik plakanın ağırlıklı ortalama kalınlığı $t_{st}=0.0234$ m hesaplanmıştır. Bu değerler Denklem 1.6 ve 1.7'de yerlerine konarak itkisel ve taşıyımli periyotlar sırasıyla $T_i=0.55$ s $T_{con}=9.85$ s olarak bulunmuştur.

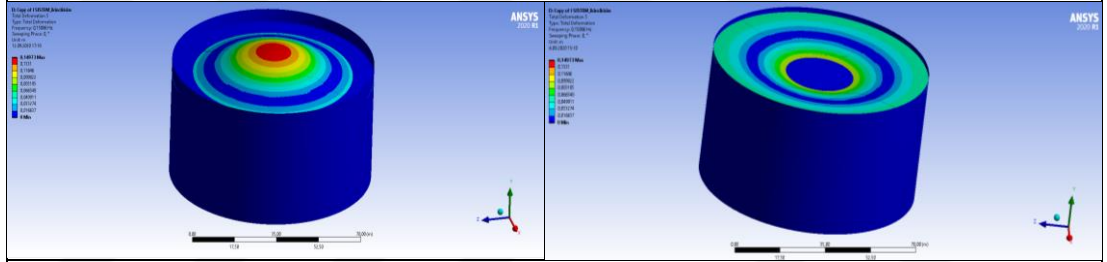
Modal Analiz: I. Sistem Çelik Tank ve LNG Sıvısının Taşınımli Modları



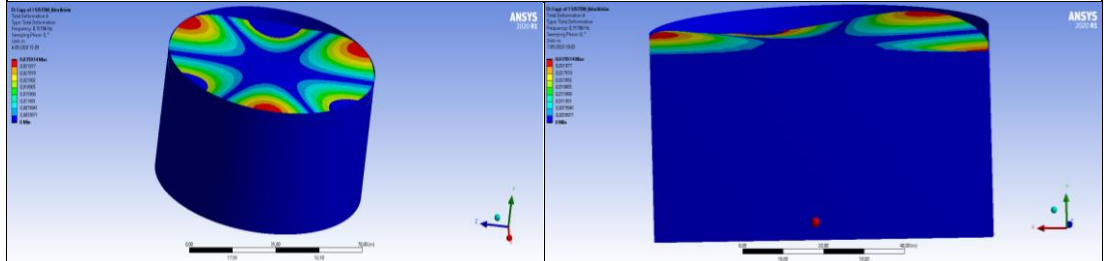
Şekil 4.13: LNG sıvısının 1. çalkalanma frekansı f : 0.1018 Hz (T: 9.823 s)



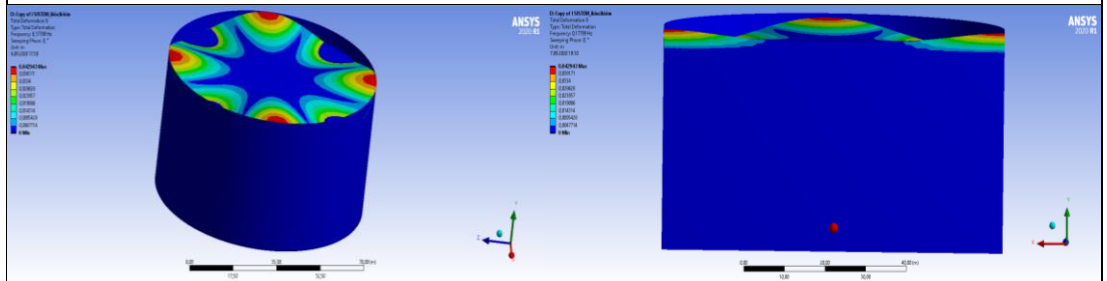
Şekil 4.14: LNG sıvısının 2. çalkalanma frekansı f : 0.1343 Hz (T: 7.446 s)



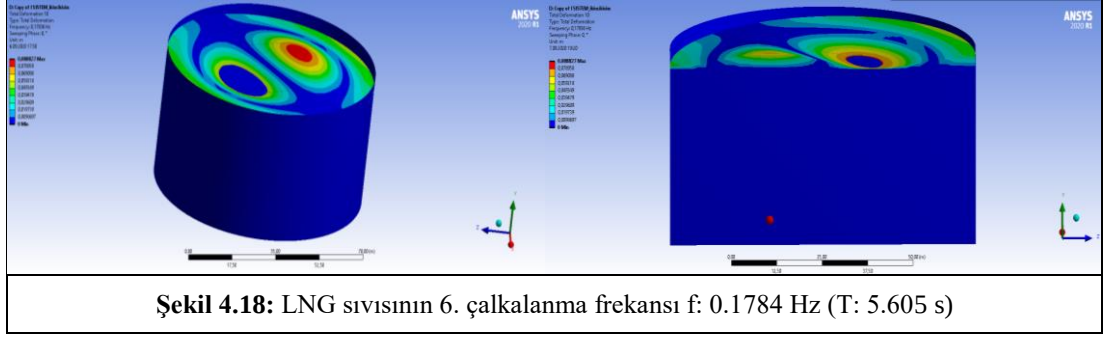
Şekil 4.15: LNG sıvısının 3. çalkalanma frekansı f : 0.1509 Hz (T: 6.627 s)



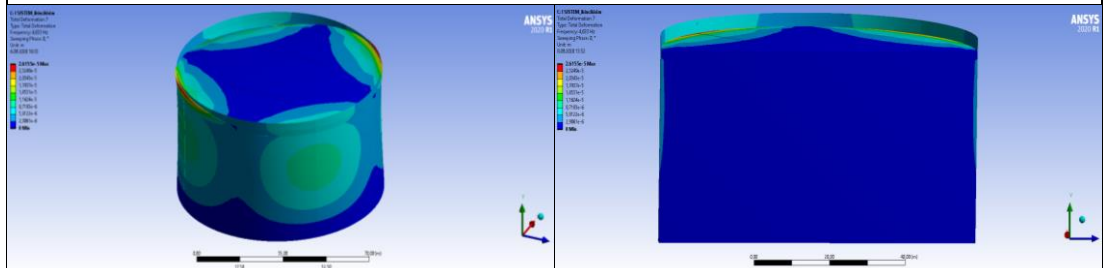
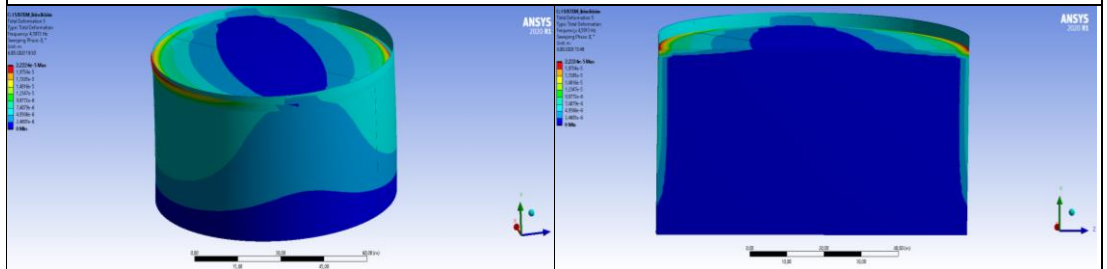
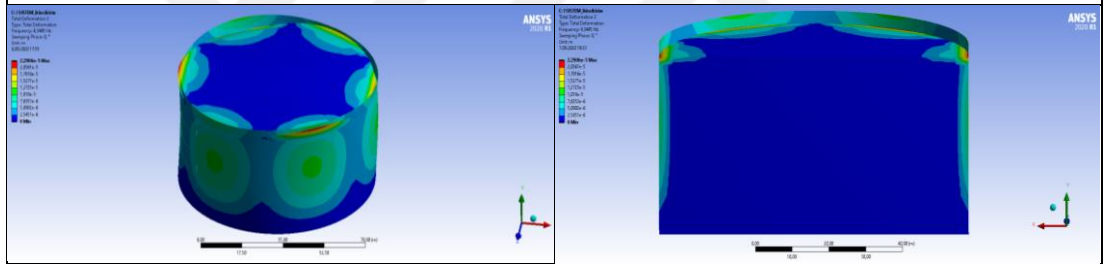
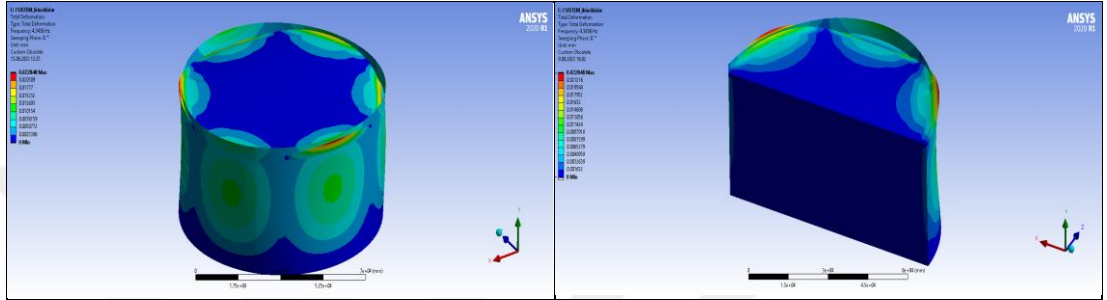
Şekil 4.16: LNG sıvısının 4. çalkalanma frekansı f : 0.1580 Hz (T: 6.331 s)

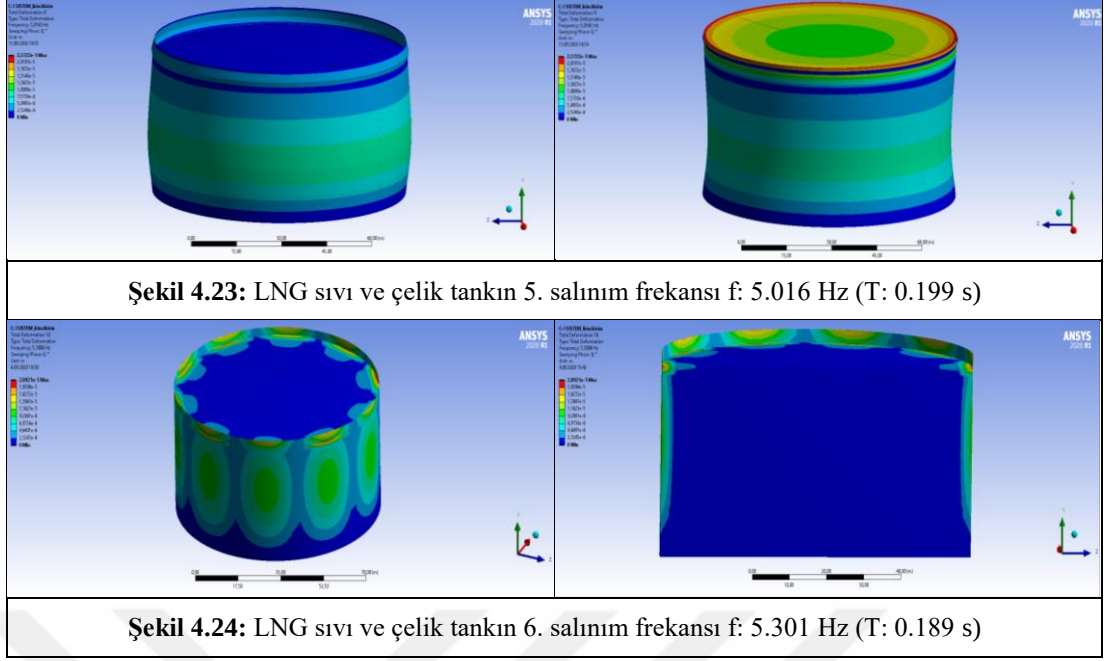


Şekil 4.17: LNG sıvısının 5. çalkalanma frekansı f : 0.1780 Hz (T: 5.618 s)



Çelik tank ve LNG sıvının hareket ettiği İtkisel modlar:





Tablo 4.3: Çelik tank ve sıvının doğal frekansları ve periyotları

Çelik Tank ve LNG Sıvının ANSYS ve Malhotra Modelinde Doğal Periyotları			
Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Malhotra (2000) (s)
LNG Sıvısının 1.Modu	0.1018	9.823	9.85
LNG Sıvısının 2.Modu	0.1343	7.446	
LNG Sıvısının 3.Modu	0.1509	6.627	
LNG Sıvısının 4.Modu	0.1580	6.331	
LNG Sıvısının 5.Modu	0.1780	5.618	
LNG Sıvısının 6.Modu	0.1784	5.607	
Çelik Tank+Sıvının 1. Modu	4.3436	0.230	0.55
Çelik Tank+Sıvının 2. Modu	4.3445	0.230	
Çelik Tank+Sıvının 3. Modu	4.5913	0.218	
Çelik Tank+Sıvının 4. Modu	4.633	0.216	
Çelik Tank+Sıvının 5. Modu	5.016	0.199	
Çelik Tank+Sıvının 6. Modu	5.301	0.189	

İlk modlarda çelik tankta bir hareket olmadığı halde içerdeki LNG sıvısının üst kısımları salınım hareketi yapar. Bunun nedeni çelik tankın LNG sıvısına göre daha rijit olması ve özgür hareket etmemesidir. İlerki modlarda ise tank ve sıvı beraber hareket ederler.

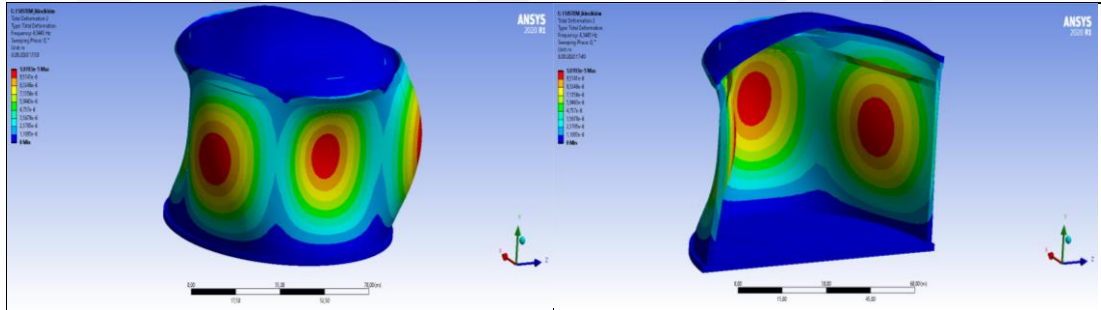
- **Dış betonarme tank**

Doğal frekans ve periyotları Tablo 4.4’de verilen alt betonarme döşeme, dış enine-boyuna ardgermeli betonarme duvarlar ve üst çatı betonarme kubbe rijit bir davranış gösterir. Birinci modda dış perdeler yatay koordinatlar yönünde deplasman yaparken çatı kubbesinde yanlamasına bir hareket gözlenmez. İkinci modda dış perde, ring kirişi ve çatı kubbesi yanal yönde deplasman hareketi yaparken, üçüncü modda yapı tamamen düşey vibrasyon hareketi yapar (bkz. Şekil 4.25-4.27). Yapının katı elemanları olan dış betonarme kabuk ve iç çelik tankın rijitliği LNG sıvısına göre daha fazla olduğundan tüm modlardaki salınım periyotları daha düşüktür.

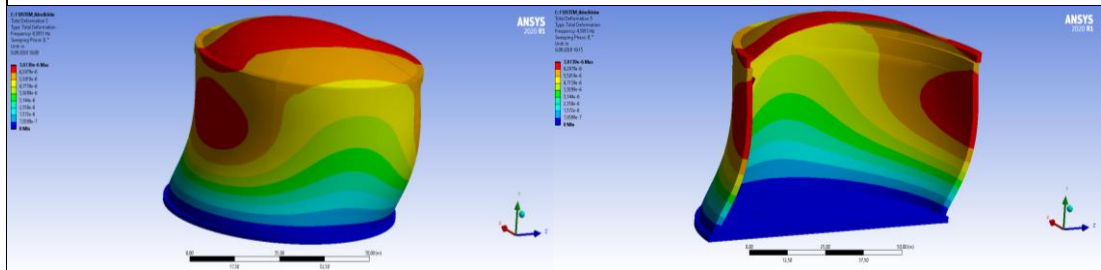
Tablo 4.4: LNG betonarme tankının sabit mesnette doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
Betonarme LNG Tankın 1. Modu	4.3445	0.230
Betonarme LNG Tankın 2. Modu	4.5913	0.218
Betonarme LNG Tankın 3. Modu	5.0163	0.199

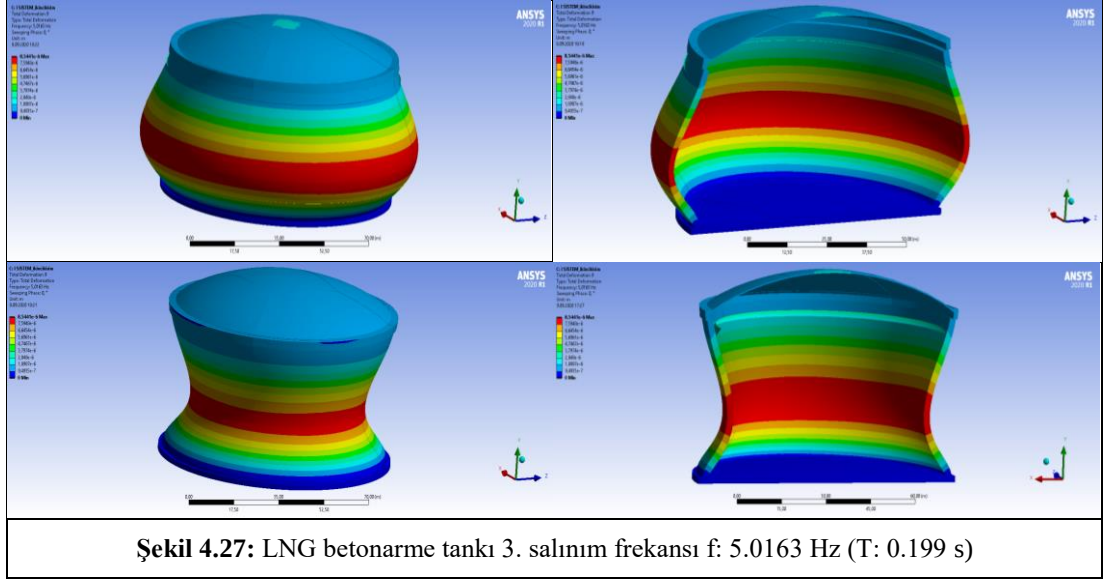
I. Sistem Dış Betonarme Tank



Şekil 4.25: LNG betonarme tankı 1. salınım frekansı f: 4.3445 Hz (T: 0.230 s)



Şekil 4.26: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f: 4.5913 Hz (T: 0.218 s)



4.3.2 II. Sistem

İç çelik tankın betonarme döşemeye serbest şekilde oturduğu, betonarme döşemenin altında yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin (HDRB) kullanıldığı durumda oluşan salınım hareketleri Şekiller A1.1 - A1.15’de verilmiştir. İzolatörlere gelen düşey yükler, izolatörlerin yatay ve düşey rijitlikleri, çelik tank ve LNG sıvısı ile dış betonarme tankın frekans ve periyotları aşağıda hesaplanmıştır.

- İzolatörlere gelen düşey yükler

Tank altındaki her bir izolatöre gelen düşey yük değeri, toplam tank ağırlığının izolatör sayısına bölünmesi ile hesaplanmıştır (bkz. Denklem 4.1). Tankı oluşturan bileşenlerin ağırlıkları Tablolar 4.1-4.6’da verilen değerlere göre hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.5’de verilmiştir. Buna göre 597 adet izolatörün her birine gelen düşey yük 2359kN’dur.

$$W_i = \frac{W_T}{P} \quad (4.1)$$

Burada; W_T , toplam tank ağırlığı; P , toplam izolatör sayısı ve W_i , her bir izolatöre gelen düşey yüküdür.

Tablo 4.5: LNG tank toplam ağırlığı

Tank Bileşeni	Ağırlık (kN)
LNG sıvısı	1117221
Çelik tank duvarı sac plaka	21130
Çelik Tank Taban Sac Plaka	2176
Betonarme Radye Temel	267511
Tank Toplam	1408038

- **Yüksek sönümlü kauçuk izolatörün düşey ve yatay rijitlikleri**

Bu çalışmada, HDRB izolatörün D_g dış çapı, t_r kauçuğun toplam kalınlığı, h_r dış plaka hariç toplam yüksekliği, H_r dış plaka dahil toplam yüksekliği, Z dış çelik plakalar dahil kenar uzunluğu, W izolatörün taşıyabileceği maksimum düşey yük, K_e efektif yatay rijitliği, K_1 elastik rijitliği, K_2 plastik rijitliği, K_v düşey rijitliği, F_1 akma dayanımındaki yatay kuvvet, F_2 taşıyabileceği maksimum yatay kuvvet, d_1 akma dayanımındaki deplasman miktarı, d_2 maksimum deplasman miktarı, W izolatörün ankrajlar hariç ağırlığı, G_{din} dinamik kayma modülü, γ_b kesme gerilmesi, ξ_e eşdeğer viskoz sönüm katsayısıdır (bkz. Tablo 4.6 ve 4.7). Seçilen izolatörün yatay kuvvet ile teorik olarak yaptığı deplasman grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir.

Tablo 4.6: HDRB SI-N 900/204 tipi izolatörün geometrik özellikleri (FIPMEC 2022)

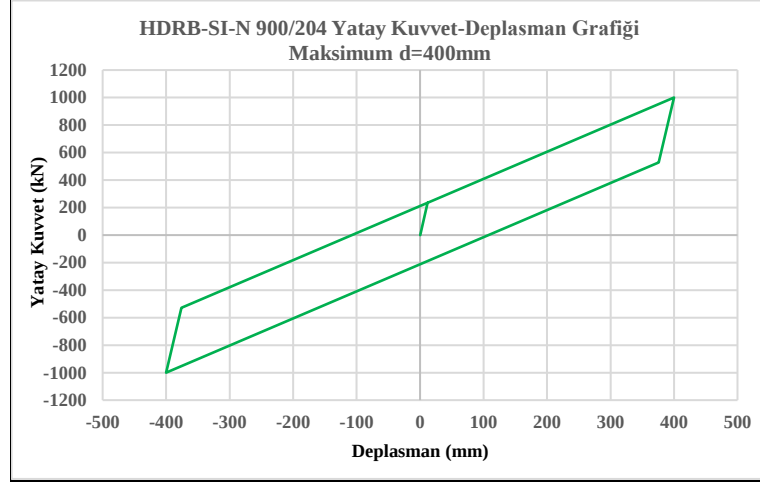
D_g	t_r	h_r	H_r	Z	W	G_{din}	γ_b
mm	mm	mm	mm	mm	kg	MPa	MPa
900	204	318	378	950	1136	0.80	1

Tablo 4.7: HDRB SI-N 900/204 tipi izolatörün mekanik özellikleri (FIPMEC 2022)

W_i	ξ_e	K_e	K_1	K_2	K_v	F_1	F_2	d_1	d_2
kN	%	kN/mm	kN/mm	kN/mm	kN/mm	kN	kN	mm	mm
7980	15	2.50	19.67	1.969	2317	236	1000	12	400

İzolatörün periyodu (T_{HDRB}) Denklem 4.2 ile 3.52 s hesaplanmıştır.

$$T_{HDRB} = \sqrt{\frac{4\pi^2 M}{K_e}} \quad (4.2)$$



Şekil 4.28: HDBR-SI-N 900/204 d:400 mm yatay kuvvet-deplasman grafiği

- İç çelik tank ve LNG sıvısı modları

Sadece LNG sıvısının çalkalanma, çelik tankın sıvı ile beraber frekans ve periyotları Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8: İç çelik tankın doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
LNG Sıvısının 1. Modu	0.1011	9.888
LNG Sıvısının 2. Modu	0.1343	7.447
LNG Sıvısının 3. Modu	0.1509	6.629
LNG Sıvısının 4. Modu	0.1580	6.330
LNG Sıvısının 5. Modu	0.1780	5.618
LNG Sıvısının 6. Modu	0.1782	5.612
Çelik Tank+LNG Sıvısının 1. Modu	3.9718	0.252
Çelik Tank+LNG Sıvısının 2. Modu	4.0986	0.244
Çelik Tank+LNG Sıvısının 3. Modu	4.1754	0.239
Çelik Tank+LNG Sıvısının 4. Modu	4.7762	0.209
Çelik Tank+LNG Sıvısının 5. Modu	5.0602	0.197
Çelik Tank+LNG Sıvısının 6. Modu	5.7193	0.175

- **Dış betonarme tank modları**

Doğal frekans ve periyotları Tablo 4.11’de verilen alt betonarme döşeme, dış enine-boyuna ardgermeli betonarme duvarlar ve üst çatı betonarme kubbe rijit bir davranış gösterir. Birinci modda dış perdeler yatay koordinatlar yönünde deplasman yaparken çatı kubbesinde yanlamasına bir hareket gözlenmez. İkinci modda dış perde, ring kirişi ve çatı kubbesi yanal yönde deplasman hareketi yaparken, üçüncü modda yapı tamamen düşey vibrasyon hareketi yapar (bkz. Şekil A1.13 - A1.15).

Tablo 4.9: LNG tankı betonarme yapının doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
Dış Betonarme Kabuk 1. Modu	3.9718	0.252
Betonarme LNG Tankın 2. Modu	4.7762	0.209
Betonarme LNG Tankın 3. Modu	5.7193	0.175

4.3.3 III. Sistem

İç çelik tankın betonarme döşemeye serbest şekilde oturduğu, betonarme döşemenin altında kurşun çekirdekli düşük sönümlü kauçuk izolatörlerin (LRB) kullanıldığı durumda oluşan salınım hareketleri Şekiller A2.1 - A2.12 verilmiştir. İzolatörlere gelen düşey yükler, izolatörlerin yatay ve düşey rijitlikleri, çelik tank ve LNG sıvısı ile dış betonarme tankın frekans ve periyotları aşağıda hesaplanmıştır

- **Düşük sönümlü kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün düşey ve yatay rijitlik hesabı**

Bu çalışmada; LRB izolatörün D_g dış çapı, t_r kauçuğun toplam kalınlığı, h_r dış plaka hariç toplam yüksekliği, H_r dış plaka dahil toplam yüksekliği, Z dış çelik plakalar dahil kenar uzunluğu, W izolatörün taşıyabileceği maksimum düşey yük, K_e efektif yatay rijitliği, K_1 elastik rijitliği, K_2 plastik rijitliği, K_v düşey rijitliği, F_1 akma dayanımındaki yatay kuvvet, F_2 taşıyabileceği maksimum yatay kuvvet, d_1 akma dayanımındaki deplasman miktarı, d_2 maksimum deplasman miktarı, G_{din} dinamik kayma modülü, γ_b kesme gerilmesi, ξ_e eşdeğer viskoz sönüm katsayısıdır (bkz. Tablo

4.10 ve 4.11). Seçilen izolatörün yatay kuvvet ile teorik olarak yaptığı deplasman grafiği Şekil 4.29’da verilmiştir.

Tablo 4.10: LRB SN 900/225-185 tipi izolatörün geometrik özellikleri (FIPMEC 2022)

D _g	t _r	h _r	H _r	Z	G _{din}	γ _b
mm	mm	mm	mm	mm	MPa	MPa
900	225	371	431	950	0.60	1

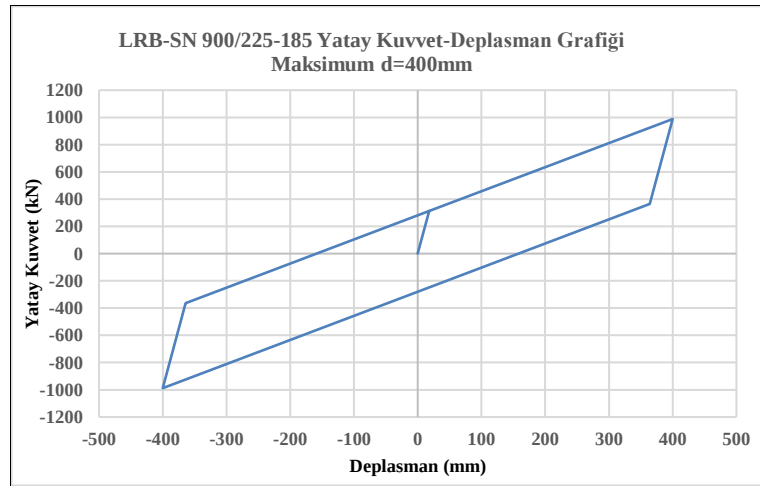
Tablo 4.11: LRB SN 900/225-185 tipi izolatörün mekanik özellikleri (FIPMEC 2022)

W _i	ξ _e	K _e	K ₁	K ₂	K _v	F ₁	F ₂	d ₁	d ₂
kN	%	kN/mm	kN/mm	kN/mm	kN/mm	kN	kN	mm	mm
6630	21	2.47	17.33	1.77	2198	312	824	18	400

İzolatörün periyodu (T_{LRB}) Denklem 4.3 ile 3.22 s olarak hesaplanmıştır

$$T_{LRB} = \sqrt{\frac{4\pi^2 M}{K_e}} \quad (4.3)$$

LRB-SN 900/225 izolatörün yatay kuvvet boyunca yaptığı deplasman grafiği ise Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29: LRB-SN 900/225 izolatörün kuvvet-deplasman grafiği

- **İç çelik tank ve LNG sıvısı modları**

Sadece LNG sıvısının çalkalanma, çelik tankın sıvı ile beraber frekans ve periyotları Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12: Çelik tankın doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
LNG Sıvısının 1. Modu	0.1011	9.893
LNG Sıvısının 2. Modu	0.1343	7.446
LNG Sıvısının 3. Modu	0.1509	6.627
LNG Sıvısının 4. Modu	0.1580	6.330
LNG Sıvısının 5. Modu	0.1780	5.618
LNG Sıvısının 6. Modu	0.1782	5.612
Çelik Tank+Sıvının 1. Modu	3.9706	0.252
Çelik Tank+Sıvının 2. Modu	4.0975	0.244
Çelik Tank+Sıvının 3. Modu	4.1741	0.240
Çelik Tank+Sıvının 4. Modu	4.7417	0.211
Çelik Tank+Sıvının 5. Modu	5.0593	0.198
Çelik Tank+Sıvının 6. Modu	5.7174	0.175

- **Dış betonarme tank**

Doğal frekans ve periyotları Tablo 4.13’de verilen alt betonarme döşeme, dış enine-boyuna ardgermeli betonarme duvarlar ve üst çatı betonarme kubbe rijit bir davranış gösterir. Birinci modda dış perdeler yatay koordinatlar yönünde deplasman yaparken çatı kubbesinde yanlamasına bir hareket gözlenmez. İkinci modda dış perde, ring kirişi ve çatı kubbesi yanal yönde deplasman hareketi yaparken, üçüncü modda yapı tamamen düşey vibrasyon hareketi yapar (bkz. Şekil A2.13 - A2.15).

Tablo 4.13: LNG betonarme yapının doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
Betonarme LNG Tankın 1. Modu	3.9716	0.252
Betonarme LNG Tankın 2. Modu	4.7174	0.211
Betonarme LNG Tankın 3. Modu	5.7174	0.175

4.3.4 IV. Sistem

İç çelik tankın betonarme döşemeye serbest şekilde oturduğu, betonarme döşemenin altında sürtünmeli sarkaç sistemli izolatörlerin (FPS) kullanıldığı durumda oluşan salınım hareketleri Şekiller A3.1 - A3.12 verilmiştir. İzolatörlere gelen düşey yükler, izolatörlerin yatay ve düşey rijitlikleri, çelik tank ve LNG sıvısı ile dış betonarme tankın frekans ve periyotları aşağıda hesaplanmıştır

- **Sürtünmeli sarkaç sistemlerin düşey ve yatay rijitliği**

Tablo 4.14’de D FPS izolatörün ankraj elemanalar hariç dış çapı, Y izolatör plan üzerindeki bir uçtan bir uca genişlik, Z dış çelik plakalar dahil kenar uzunluğu, H_r dış plaka dahil toplam yüksekliği, n ankraj adeti, W izolatörün ağırlığı, verilmektedir (FIPMEC 2022).

Tablo 4.14: FIP-D M 1600/600(3700) tipi izolatörün geometrik özellikleri (FIPMEC 2022)

D	Y	Z	H_r	n	W
mm	mm	mm	mm	adet	kg
940	1270	970	199	4	810

Tablo 4.14’de izolatörün tipine göre sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 4.15: FPS izolatör sürtünme katsayısı (FIPMEC 2022)

FFM Tipi	L (Yavaş Sürtünme)	M (Normal Sürtünme)
Minimum Sürtünme Katsayısı (%)	2.5	5.5

FIP-D M 1600/600(3700) izolatörün Denklem 4.3 - 4.10’da W_{FPS} ve W_i , sırasıyla deprem yükleri içeren bir izolatöre gelen ve taşıyabileceği maksimum düşey yük, μ , sürtünme katsayısı, R_{FPS} , eğrilik yarıçapı, F_0 , sürtünme kuvveti, F_{max} , maksimum yatay kuvvet, K_e , efektif rijitlik, K_v , düşey rijitlik, d_{max} , maksimum yatay yerdeğiştirme, ξ_e , efektif viskoz sönüm oranı, T_{FPS} , efektif ana periyotlarını ifade eder (bkz. Tablo 4.16).

$$\mu(\%) = 5.5 \left(\frac{W_{FPS}}{W_i} \right)^{-0.563} \quad (4.3)$$

$$F_0 = \mu W_{FPS} \quad (4.4)$$

$$K_r = \frac{W_{FPS}}{R_{FPS}} \quad (4.5)$$

$$F_{max} = F_0 + K_r d_{max} = \mu W_i + \frac{W_i}{R_{FPS}} d_{max} \quad (4.6)$$

$$K_e = \frac{F_{max}}{d_{max}} = W_i \left(\frac{1}{R_{FPS}} + \frac{\mu}{d_{max}} \right) \quad (4.7)$$

$$\xi_e = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \quad (4.8)$$

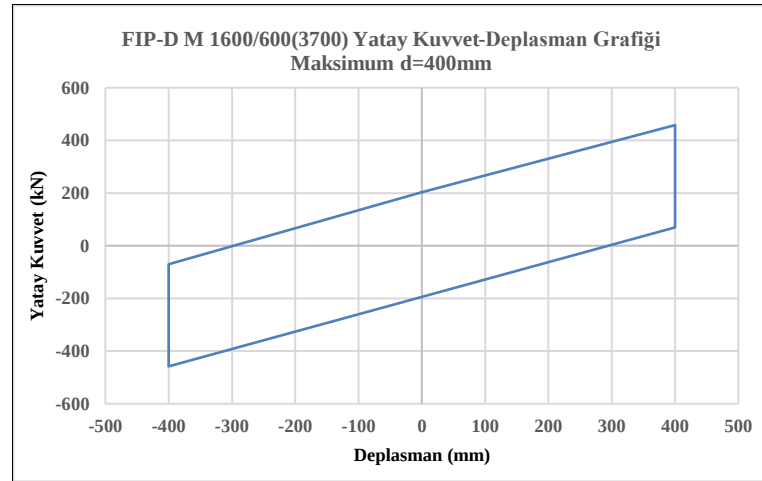
$$T_{FPS} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \left(\frac{1}{R_{FPS}} + \frac{\mu}{d_{max}} \right)}} \quad (4.9)$$

$$K_v = \frac{AE}{h} \quad (4.10)$$

Tablo 4.16: FIP-D M 1600/600(3700) tipi izolatörün mekanik özellikleri (FIPMEC 2022)

μ	F_0	F_{max}	K_e	K_r	K_v	ξ_e	T_{FPS}
%	kN	kN	kN/mm	kN/mm	kN/mm		(s)
8.629	203.5	458	1.145	0.6376	36715	0.2826	2.88

FIP-D M 1600/600(3700) izolatörün yatay kuvvet boyunca yaptığı deplasman grafiği ise Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.30: FPS 1600/600(3700) yatay kuvvet-deplasman grafiği

- **İç çelik tank ve LNG sıvısı modları**

Sadece LNG sıvısının çalkalanma, çelik tankın sıvı ile beraber frekans ve periyotları Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4.16: Çelik tankın doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
LNG Sıvısının 1. Modu	0.1006	9.942
LNG Sıvısının 2. Modu	0.1343	7.448
LNG Sıvısının 3. Modu	0.1509	6.629
LNG Sıvısının 4. Modu	0.1580	6.330
LNG Sıvısının 5. Modu	0.1780	5.618
LNG Sıvısının 6. Modu	0.1781	5.615
Çelik Tank+Sıvının 1. Modu	3.4718	0.288
Çelik Tank+Sıvının 2. Modu	3.8823	0.258
Çelik Tank+Sıvının 3. Modu	3.9885	0.251
Çelik Tank+Sıvının 4. Modu	4.0999	0.244
Çelik Tank+Sıvının 5. Modu	4.8246	0.207
Çelik Tank+Sıvının 6. Modu	5.010	0.200

- **Dış betonarme tank**

Doğal frekans ve periyotları Tablo 4.17’de verilen alt betonarme döşeme, dış enine-boyuna ardgermeli betonarme duvarlar ve üst çatı betonarme kubbe rijit bir davranış gösterir. Birinci modda dış perdeler yatay koordinatlar yönünde deplasman yaparken çatı kubbesinde yanlamasına bir hareket gözlenmez. İkinci modda dış perde, ring kirişi ve çatı kubbesi yanal yönde deplasman hareketi yaparken, üçüncü modda yapı tamamen düşey vibrasyon hareketi yapar (bkz. Şekil A3.13 - A3.15).

Tablo 4.17: LNG betonarme yapının doğal frekansları ve periyotları

Açıklama	Frekans (Hz)	Periyot (s)
Betonarme LNG Tankın 1. Modu	3.4718	0.288
Betonarme LNG Tankın 2. Modu	3.8823	0.258
Betonarme LNG Tankın 3. Modu	4.8246	0.207

4.4 LNG Tankının Bulunduğu Bölgenin Spektral İvme Katsayılarının Hesaplanması

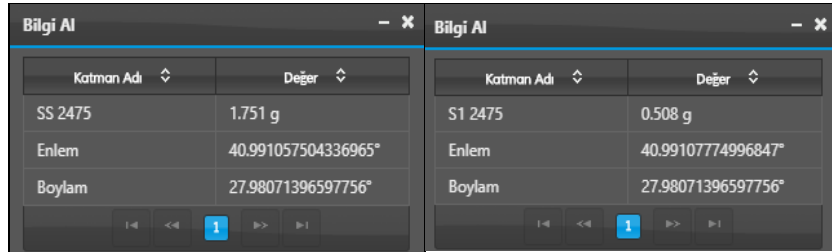
Tez kapsamında incelenen LNG tankının Deprem yer hareketi düzeyi DD-1 olarak alınacaktır. Bu düzey spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının % 2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, gözönüne alınan en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır (TDY 2018).

LNG tankı Resim 4.1’de gösterildiği gibi Tekirdağ Marmara Ereğlisi Botaş tesisi içerisinde boş olan bölgeye inşaa edilecektir. Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_S) ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1) AFAD internet sitesindeki Türkiye deprem tehlike haritalarından alınmıştır (<https://tdth.afad.gov.tr>) ve (bkz. Şekil 4.31).

Harita spektral ivme katsayıları S_S ve S_1 , Denklem 4.11 ve 4.12’deki gibi tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} ’e dönüştürülür. F_S ve F_1 yerel zemin etki katsayıları zemin sınıfı ZD kabulü ile Tablo 4.18-4.19’dan okunmuştur (TDY 2018).

$$S_{DS} = S_S F_S \quad (4.11)$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \quad (4.12)$$



Katman Adı	Değer
SS 2475	1.751 g
Enlem	40.991057504336965°
Boylam	27.98071396597756°

Katman Adı	Değer
S1 2475	0.508 g
Enlem	40.99107774996847°
Boylam	27.98071396597756°

Şekil 4.31: Marmara Ereğlisi BOTAŞ tesisi harita spektral ivme katsayıları (<https://tdth.afad.gov.tr>)

S_{DS} ve S_{D1} 1.1 ve 1.3 katsayısı ile arttırılarak (Huang ve diğ. 2008) sırasıyla 1.9261g ve 0.6604g olarak hesaplanmıştır. Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodları (T_A ve T_B) denklemler 4.13 - 4.14’e göre 0.117 s ve 0.582 s olarak hesaplanmıştır. Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu T_L , TDY 2018’de 6 s verilmiştir.

$$T_A = 0.2 \frac{S_{C1}}{S_{Ds}} \quad (4.13)$$

$$T_B = \frac{S_{C1}}{S_{Ds}} \quad (4.14)$$

Tablo 4.18: Kısa Periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TDY 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Tablo 4.19: 1.0 saniye periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TDY 2018)

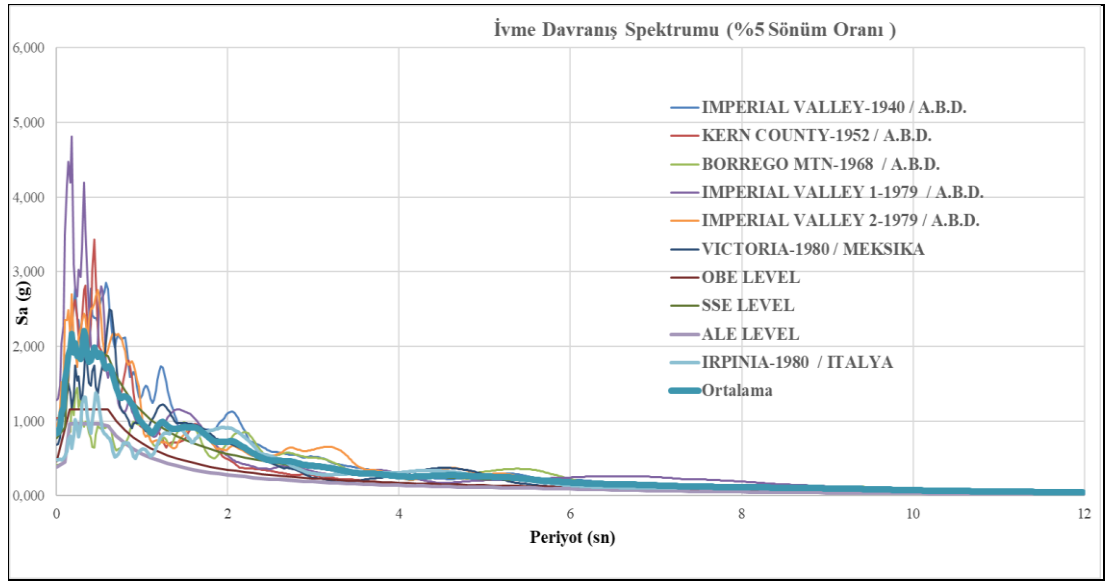
Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					



Resim 4.1: Marmara Ereğlisi BOTAŞ Tesisi LNG Tankları

TDY 2018 binalar için hazırlanmış bir deprem yönetmeliği olduğu için LNG tanklarına yönelik standartları içermemektedir. Bu nedenle tez kapsamında gerekli olan LNG tank deprem performans kriterleri Amerikan API 625 / 2014 ve NFPA 59A/2016 yönetmeliklerinden alınmıştır.

İlgili yönetmeliklerce kullanılması istenen yer ivmesi yüksek yedi adet depremin ivme kaydı Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi sitesinden alınmıştır (<https://peer.berkeley.edu>). Bu depremler son yüzyıl içinde dünyanın değişik bölgelerinde meydana gelen, periyot aralığı 12 s'ye kadar olan uzun süreli, yapılara büyük zarar vermiş, yüksek ivme spektrumlarına sahip oldukları için seçilmiştir. Gözönüne alınan depremlerin ivme karakteristiklerinin ortalaması baz alınacak şekilde; OBE ile SSE'ye göre ölçek katsayıları deneme yanılma yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve tepe yer ivmeleri Tablo 4.20'de verilmiştir. Her bir depremin % 5 sönüm oranı ile çizilen ivme spektrum grafiği Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.32: İvme Davranış Spektrumu

Tablo 4.20: Deprem ivme kayıtları

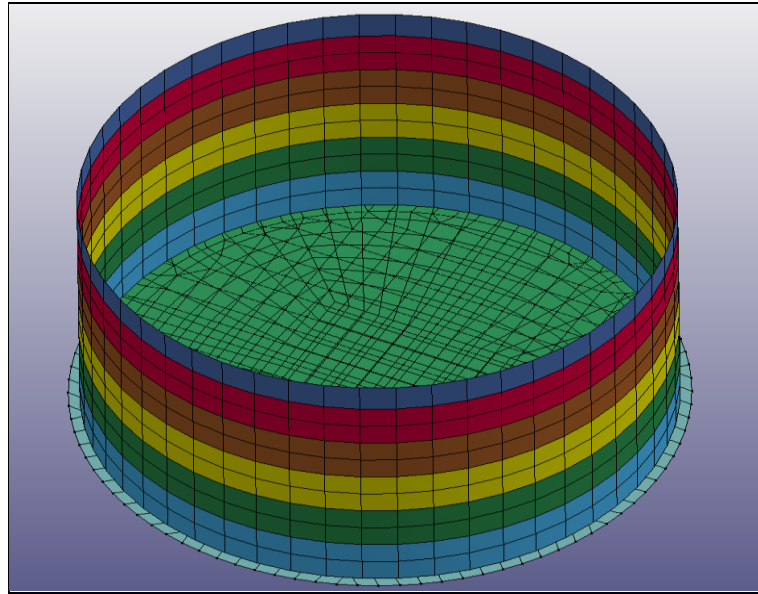
No	Deprem Hareketi	PEER Kayıt No	İstasyon	Kayıt Bileşen Yönü	Kısaltma	Yıl	M _w	Faylanma	Vs30 (m/s)	Rjb(km)	Rrup(km)	Süre (s)	OBE Ölçek Katsayısı	SSE Ölçek Katsayısı	Tepe Yer İvmesi (OBE)	Tepe Yer İvmesi (SSE)
1	Imperial Valley / A.B.D.	RSN6	El Centro Array	270	IV2	1940	6.95	Strike-Slip	213	6.09	6.09	53.72	2.70	4.85	0.569	1.022
2	Kern County / A.B.D.	RSN15	Taft Lincoln School	111	KC	1952	7.36	Reverse	385	38.42	38.89	54.35	3.20	5.75	0.577	1.037
3	Borrego Mtn / A.B.D.	RSN36	El Centro Array	270	BM	1968	6.80	Strike-Slip	213	45.12	45.66	79.99	4.00	7.20	0.230	0.414
4	Imperial Valley-I/ A.B.D.	RSN162	Calexico Fire Station	315	IV06-1	1979	6.53	Strike-Slip	231	10.45	10.45	37.86	3.50	6.30	0.712	1.282
5	Imperial Valley-II/ A.B.D.	RSN169	Delta	262	IV06-2	1979	6.53	Strike-Slip	242	22.03	22.03	70.00	2.20	3.95	0.519	0.931
6	Victoria / Meksika	RSN266	Chihuahua	102	VM	1980	6.33	Strike-Slip	242	18.53	18.96	27.00	2.50	4.50	0.377	0.679
7	Irpinia / Italya	RSN286	Bisaccia	0	IITA	1980	6.90	Strike-Slip	496	17.51	21.26	38.26	2.80	5.05	0.267	0.482

5. LNG DEPOLAMA TANKININ LİNEER OLMAYAN ANALİZ SONUÇLARI

ANSYS Workbench programında sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen LNG sıvısı ve çelik tank LS-DYNA programı ile yedi farklı depremin ivme zaman kayıtları kullanılarak, TDY2018’de belirtilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile Bölüm 4.1’de tanımlanan sistemlerin, çelik tankta oluşan gerilmeler ve yanal deformasyon hareketi, LNG sıvısının dalga yükseklikleri, çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman farkları, tank tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri, tabanda mesnetlenen her bir izolatörde oluşan yatay kuvvet–yatay deplasman ve düşey kuvvet zaman grafiklerin analizleri sonucu karşılaştırılmaları yapılmıştır. İç çelik tank, LNG sıvısı ve betonarme temel Tablo 4.1’de belirtilen geometrik karakteristikleri ile LS-DYNA programında tanımlanmıştır.

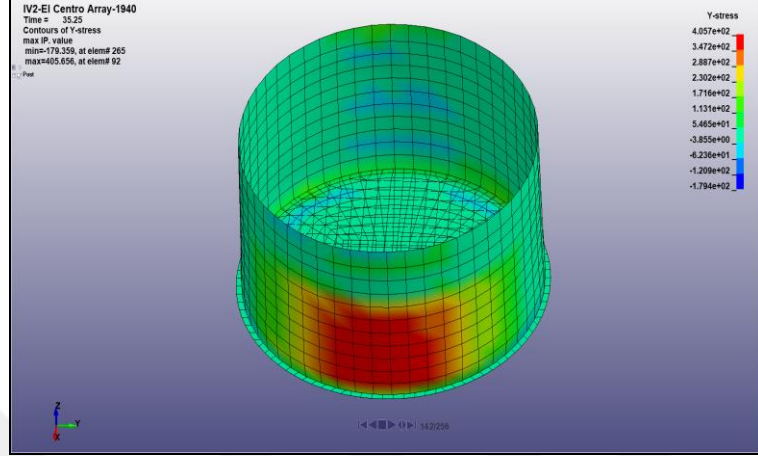
5.1 Sistem-I için Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

Imperyal Valley-1940 depremi El Centro Array istasyonu ivme kaydının SSE deprem performans seviyesine göre Sistem - I için (bkz. Şekil 5.1) lineer olmayan analizinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

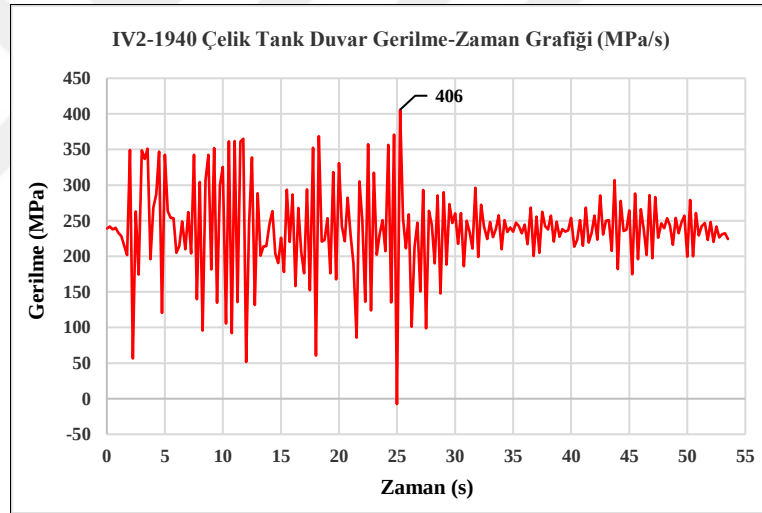


Şekil 5.1: Sistem-I’in LS-DYNA programında modellenmesi

Modelde çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler Şekil 5.2’de, en yüksek gerilmenin olduğu tabakanın gerilmelerinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.3’de verilmiştir.

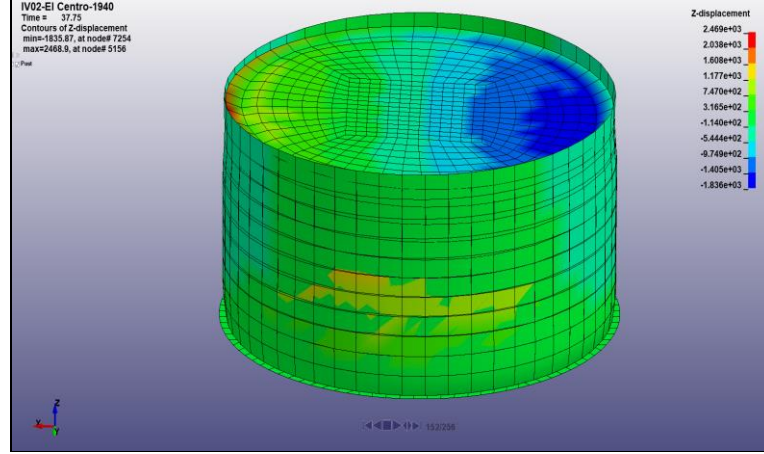


Şekil 5.2: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler

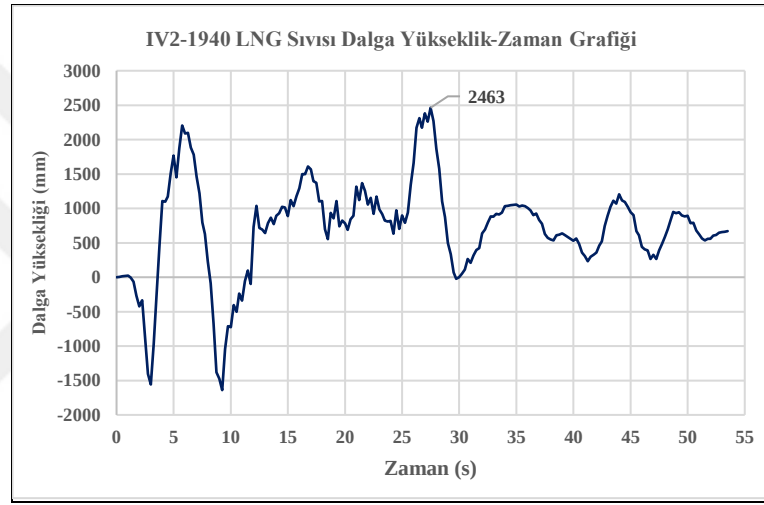


Şekil 5.3: Çelik tank duvar gerilme - zaman grafiği

Modelde LNG sıvısının çalkalanmadan dolayı oluşan maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an Şekil 5.4’de, dalga hareketinin zaman içindeki seviye değişimi Şekil 5.5’de verilmiştir.

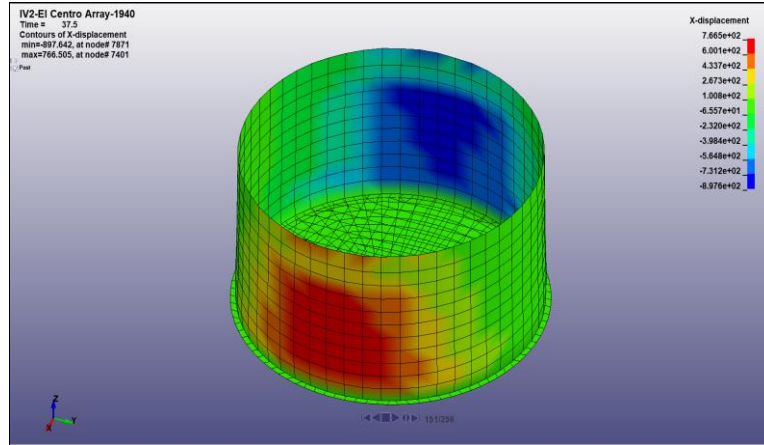


Şekil 5.4: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin oluştuğu an

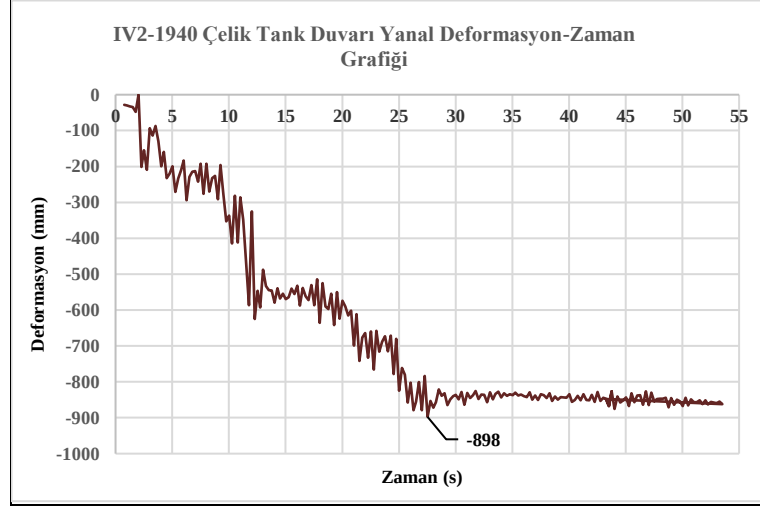


Şekil 5.5: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği

Modelde çelik tank duvarı yanal deformasyonunun maksimum olduğu an Şekil 5.6'da, maksimum yanal deformasyon oluşan tabakanın zaman içindeki deformasyon değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir.

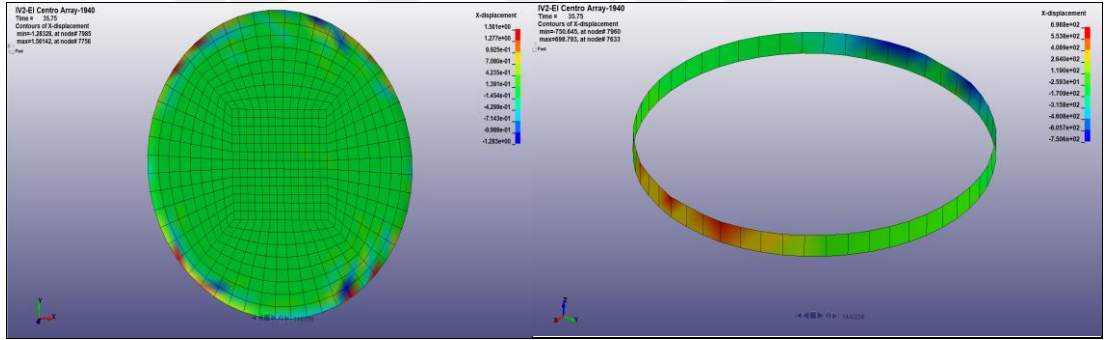


Şekil 5.6: Çelik tank duvar maksimum yanal deformasyonu

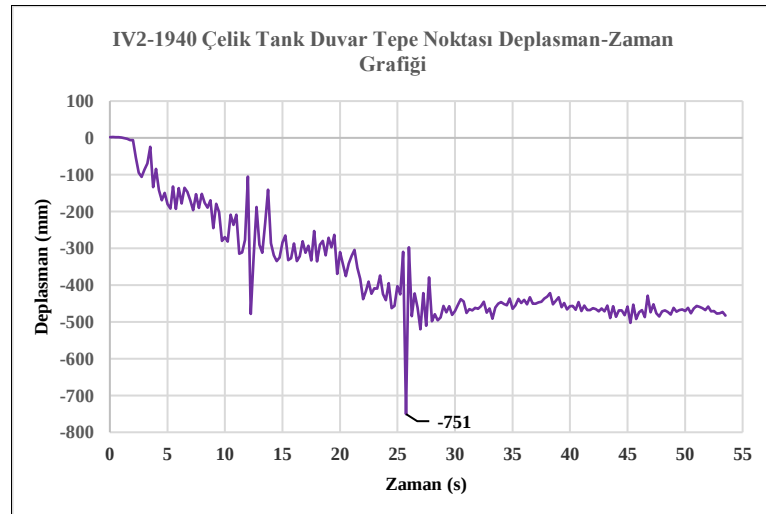


Şekil 5.7: Çelik tank duvarı yanal deformasyon-zaman grafiği

Çelik tankın X yönünde tabanında ve duvar en üst noktasında yaptığı deplasman hareketinin maksimum anı Şekil 5.8’de, çelik tabakanın deplasmanın zaman içindeki değişim grafiği ise Şekil 5.9’da verilmiştir.

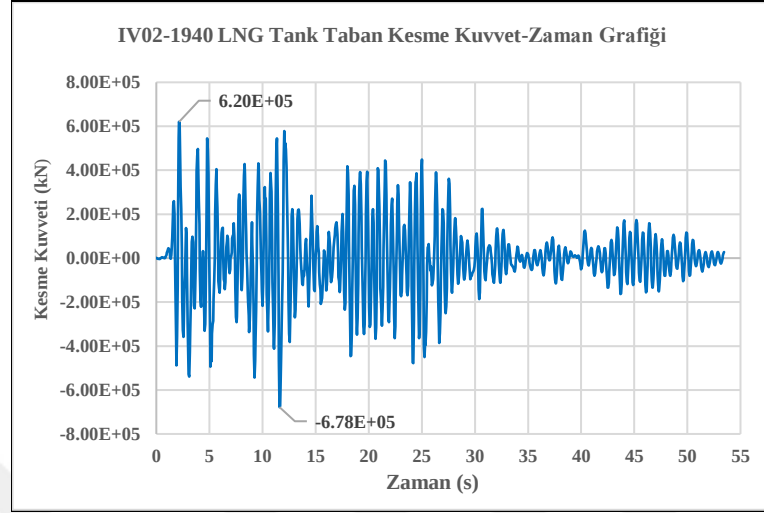


Şekil 5.8: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı



Şekil 5.9: Çelik tank duvar tepe noktası yatay deplasman-zaman grafiği

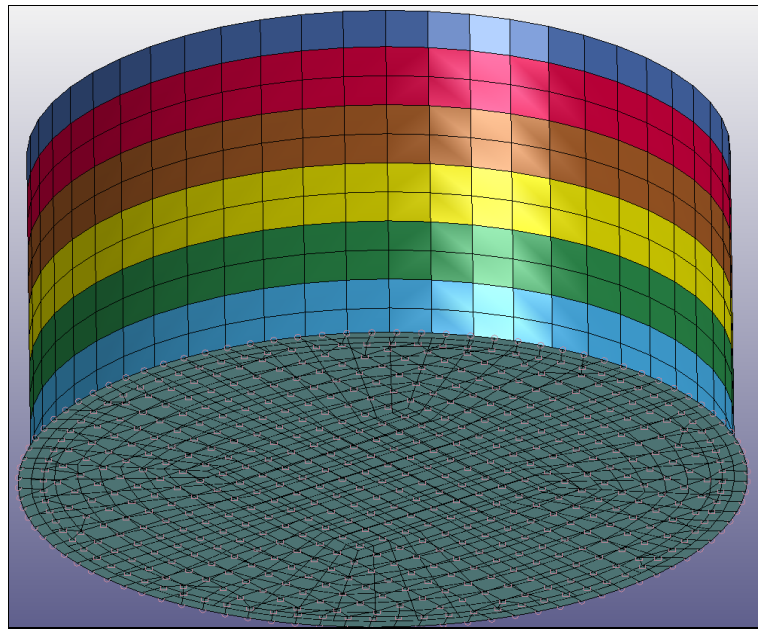
LNG tankının toplam taban kesme kuvvetinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği

5.2 Sistem-II Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

Imperyal Valley-1940 depremi El Centro Array istasyonu ivme kaydının SSE deprem performans seviyesine göre Sistem-II için (bkz. Şekil 5.11), mekanik özellikleri Şekil 5.12'de verilen HDRB SI-N 900/204 izolatöre göre lineer olmayan analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

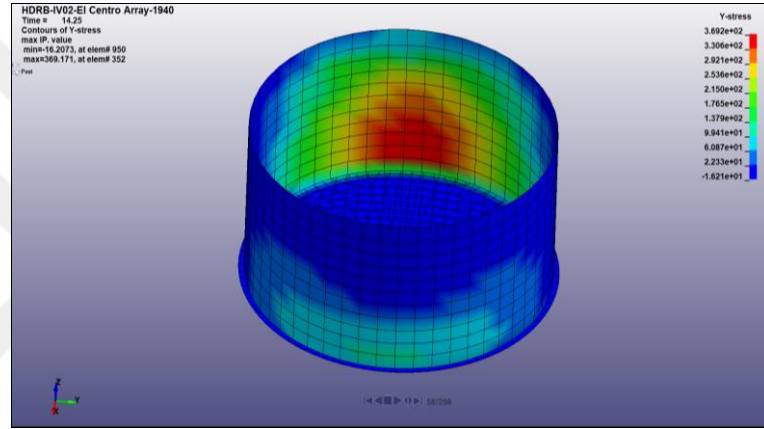


Şekil 5.11: İzolatörlü sistemlerin LS-DYNA programında modellenmesi

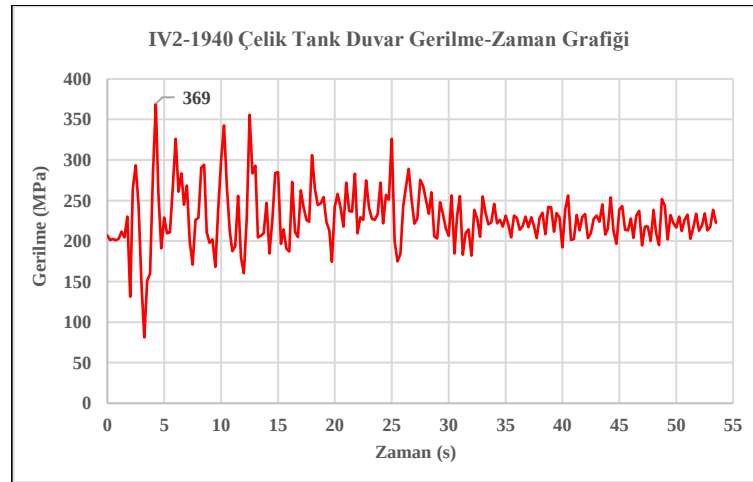
TITLE							
HDRB SI-N 900/204							
1	MID	RO	A	BETA	GAMMA	DISPY	STIFFV
	10007	1.000e-09	1.0000000	0.5000000	0.5000000	12.000000	2.317e+06
2	PRELOAD	DAMP	MX1	MX2	MY1	MY2	
	0.0	1.0000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000	
3	FMAX	DELF	AFRIC	RADX	RADY	RADB	STIFFL
	0.0	0.0	0.0	1.000e+20	1.000e+20	1.000e+20	0.0
4	FORCEY	ALPHA	STIFFT	DFAIL			
	2.360e+05	0.1001000	0.0	1.000e+20			

Şekil 5.12: HDRB SI-N 900/204 izolatörünün mekanik özelliklerinin LS-DYNA programına girilmesi

Modelde çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler Şekil 5.13’de, en yüksek gerilmenin olduğu tabakanın gerilmelerinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.14’de verilmiştir.

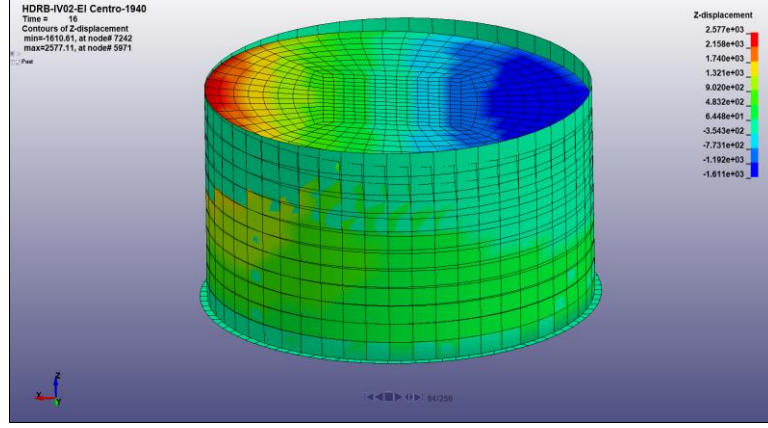


Şekil 5.13: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler

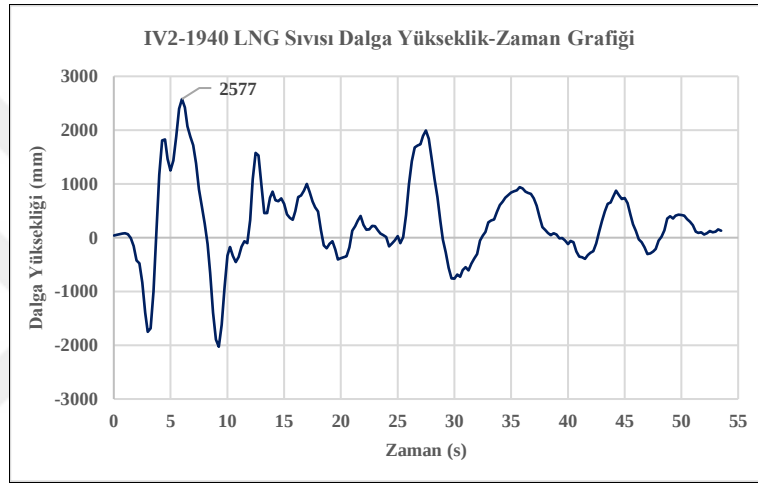


Şekil 5.14: Çelik tank duvar gerilme-zaman grafiği

Modelde LNG sıvısının çalkalanmadan dolayı oluşan maksimum dalga yüksekliği olduğu an Şekil 5.15’de, dalga hareketinin zaman içindeki seviye değişimi Şekil 5.16’da verilmiştir.

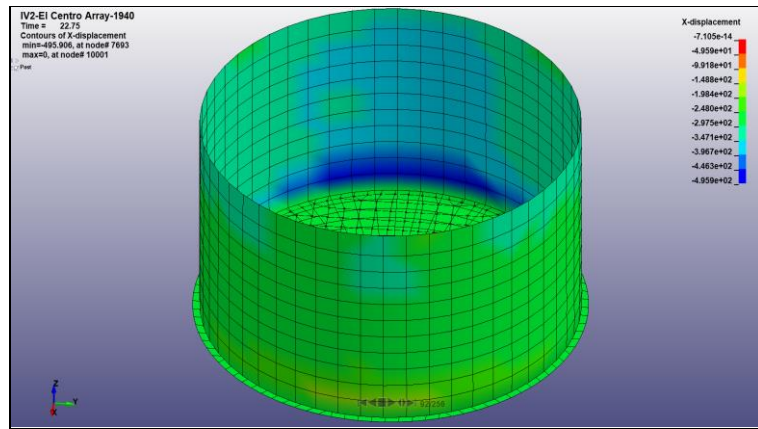


Şekil 5.15: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin oluştuğu an

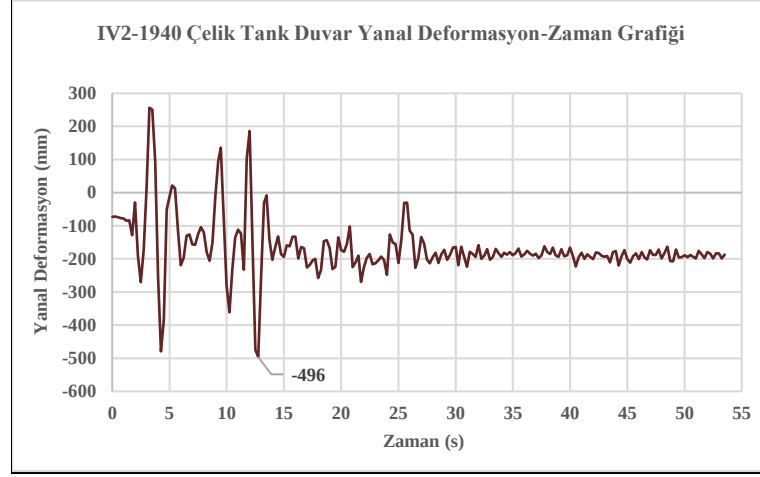


Şekil 5.16: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği

Modelde çelik tank duvarı yanal deformasyonunun maksimum olduğu an Şekil 5.17’de, maksimum yanal deformasyon oluşan tabakanın zaman içindeki deformasyon değişimi Şekil 5.18’de verilmiştir.

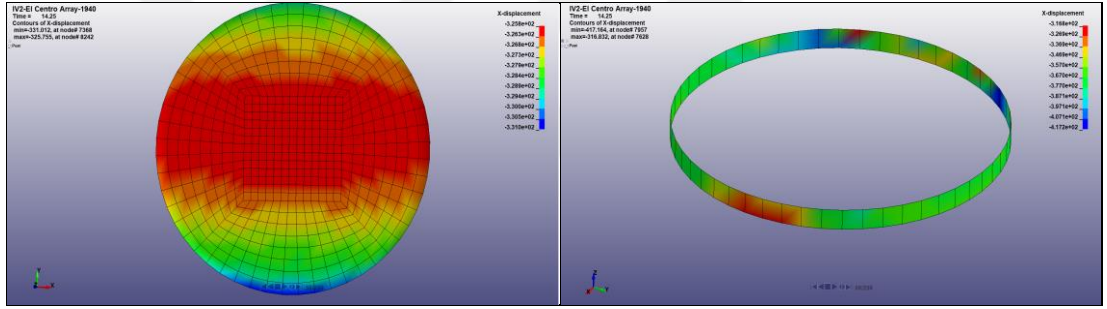


Şekil 5.17: Çelik tank duvar maksimum yanal deformasyonu

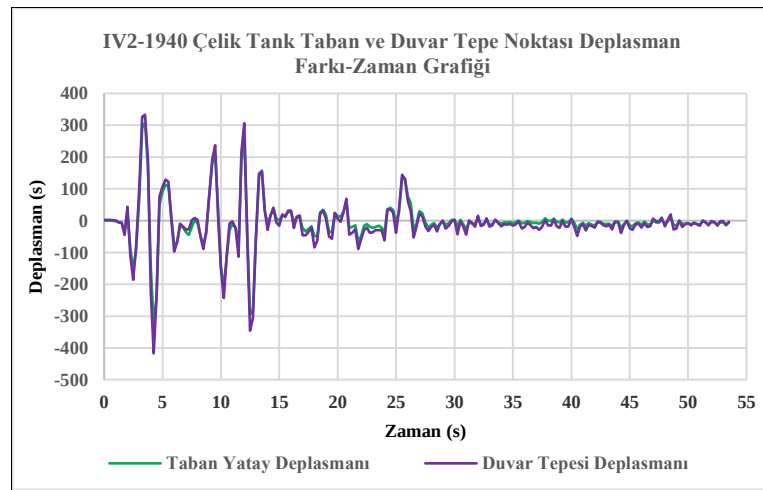


Şekil 5.18: Çelik tank duvar yanal deformasyon-zaman grafiği

Çelik tankın tabanında 326 mm yanal hareket yaparken, duvarın en üst noktasında maksimum deplasman 417 mm'dir (bkz. Şekil 5.19). Çelik tabakanın zaman içindeki değişim grafiği ise Şekil 5.20'de verilmiştir.

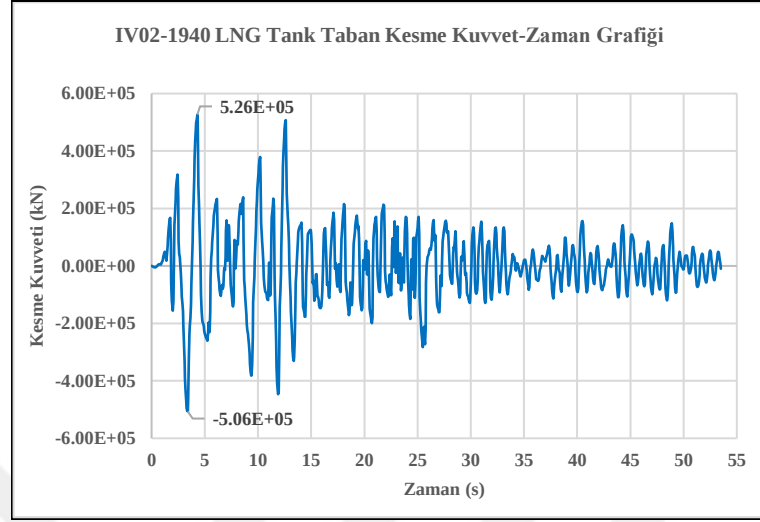


Şekil 5.19: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı



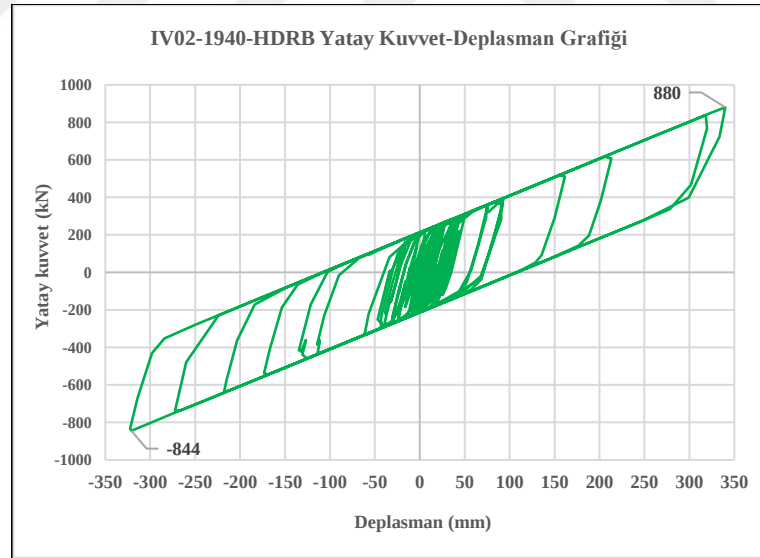
Şekil 5.20: Çelik tank taban-duvar tepe noktası yatay deplasman farkı-zaman grafiği

LNG tankının toplam taban kesme kuvvetinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.21’de verilmiştir.



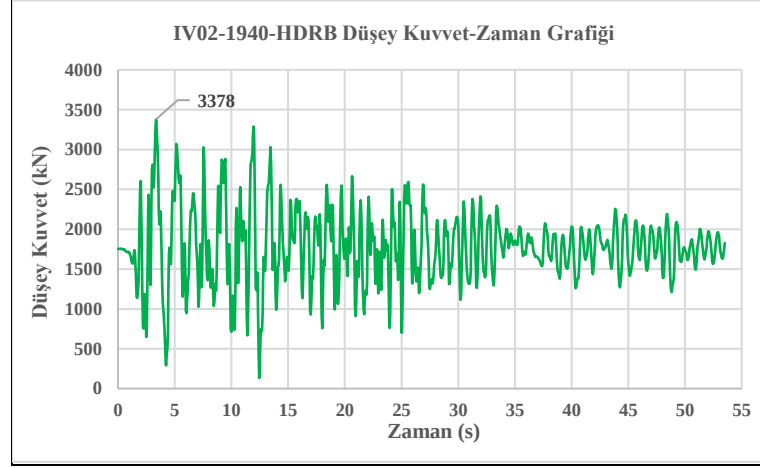
Şekil 5.21: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği

880 kN yatay kuvvet ile HDRB izolatörün yaptığı maksimum deplasman 340 mm olmuştur (bkz. Şekil 5.22).



Şekil 5.22: HDRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolatöre gelen düşey kuvvetin zaman içerisindeki değişim grafiği Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23: HDRB izolatör düşey kuvvet-zaman grafiği

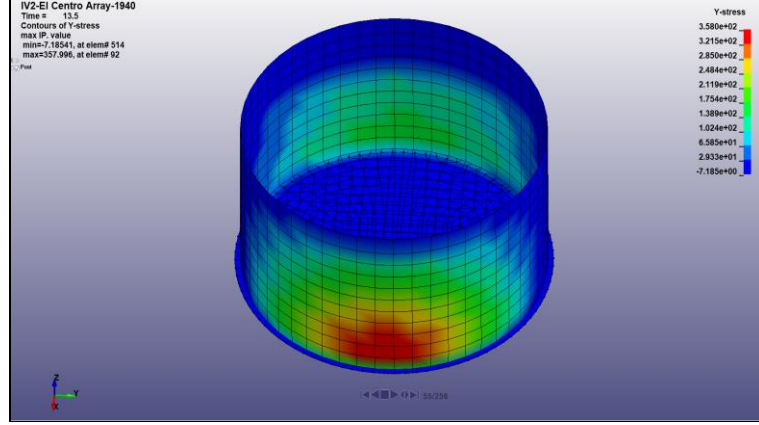
5.3 Sistem-III Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

Imperial Valley-1940 depremi El Centro Array istasyonu ivme kaydının SSE deprem performans seviyesine göre Sistem-III için (bkz. Şekil 5.11), mekanik özellikleri Şekil 5.24’de verilen LRB SN 900/225-185 izolatöre göre lineer olmayan analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

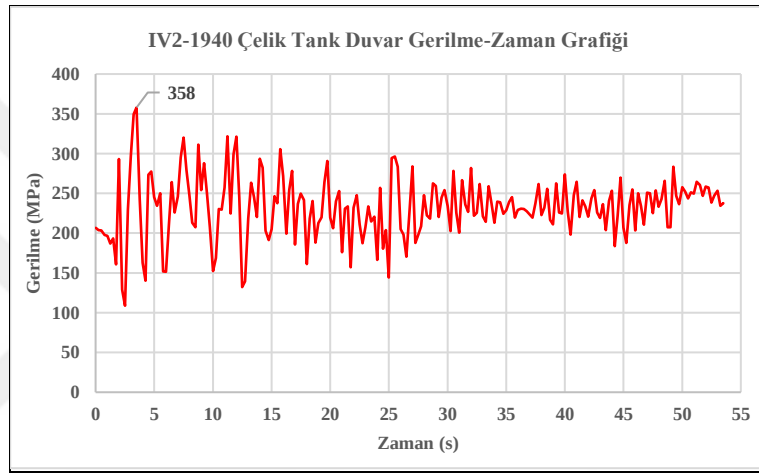
TITLE									
LRB SN 900/225-185									
1	MID	RO	A	BETA	GAMMA	DISPY	STIFFV	ITYPE	
	10007	1.000e-09	1.0000000	0.5000000	0.5000000	18.000000	2.198e+06	4	
2	PRELOAD	DAMP	MX1	MX2	MY1	MY2			
	0.0	1.0000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000			
3	FMAX	DELF	AFRIC	RADX	RADY	RADB	STIFFL	STIFFTS	
	0.0	0.0	0.0	1.000e+20	1.000e+20	1.000e+20	0.0	0.0	
4	FORCEY	ALPHA	STIFFI	DFAIL					
	3.120e+05	0.0937680	0.0	1.000e+20					

Şekil 5.24: LRB SN 900/225-185 izolatörün mekanik özelliklerinin LS-DYNA programına girilmesi

Modelde çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler Şekil 5.25’de, en yüksek gerilmenin olduğu tabakanın gerilmelerinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.26’da verilmiştir.

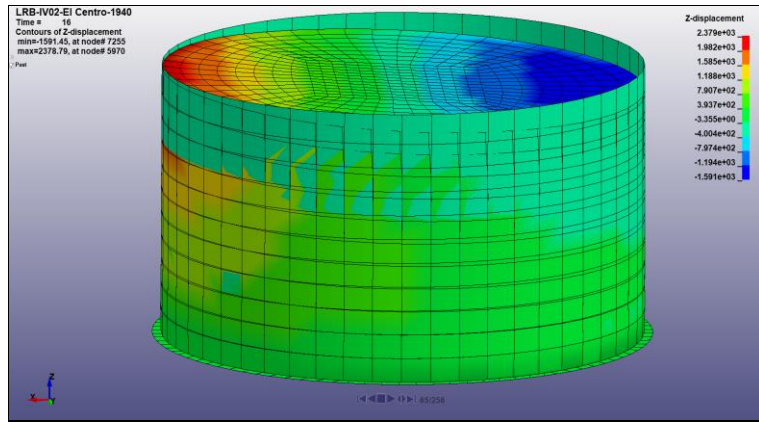


Şekil 5.25: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler

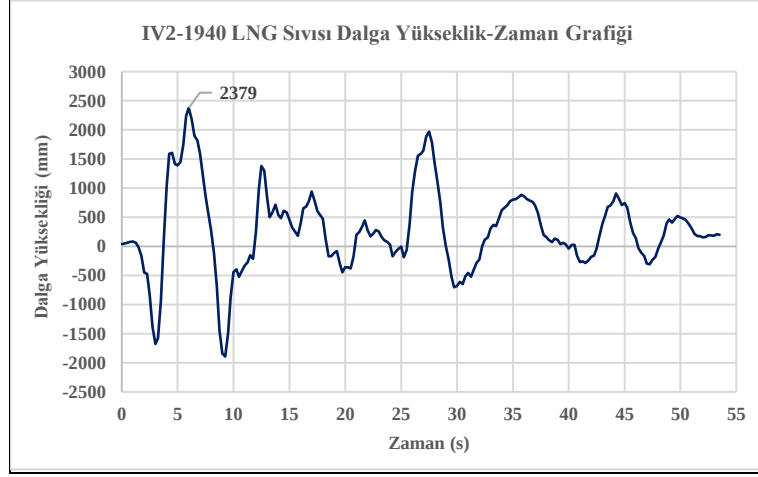


Şekil 5.26: Çelik tank duvar gerilme-zaman grafiği

Modelde LNG sıvısının çalkalanmadan dolayı oluşan maksimum dalga yüksekliği olduğu an Şekil 5.27’de, dalga hareketinin zaman içindeki seviye değişimi Şekil 5.28’de verilmiştir.

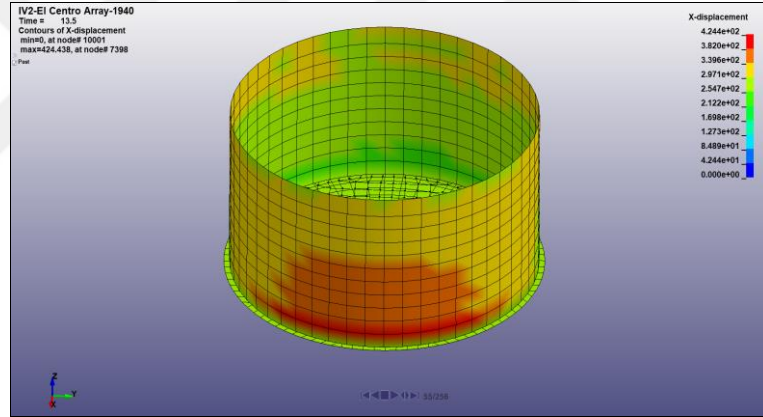


Şekil 5.27: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an

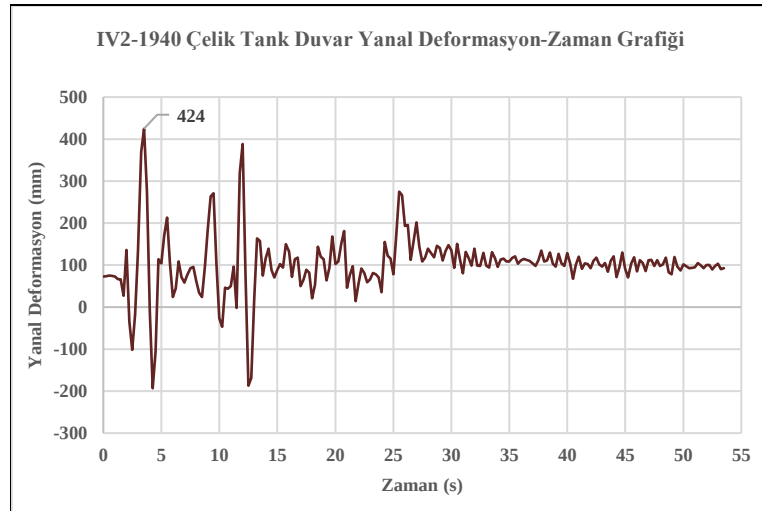


Şekil 5.28: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği

Modelde elik tank duvarı yanal deformasyonunun maksimum olduğu an Şekil 5.29’da, maksimum yanal deformasyon oluşan tabakanın zaman içindeki deformasyon değişimi Şekil 5.30’da verilmiştir.

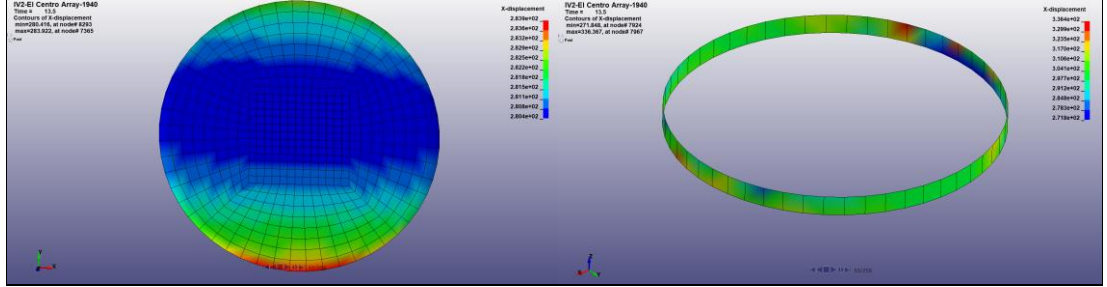


Şekil 5.29: elik tank duvar maksimum yanal deformasyonu

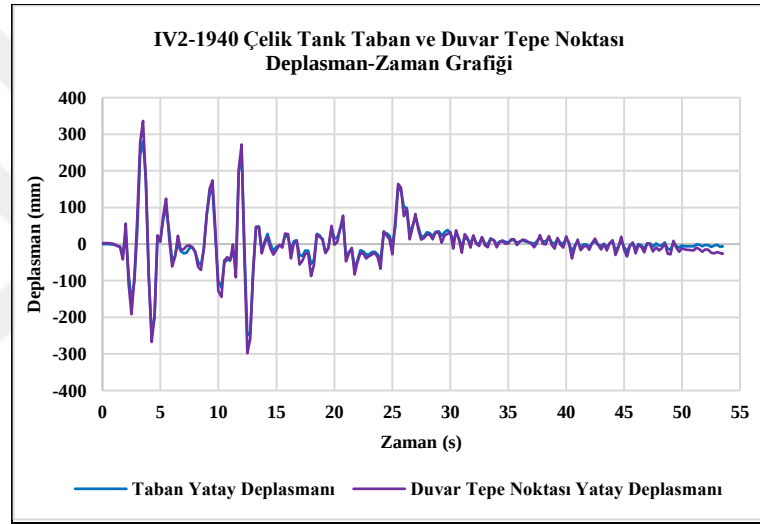


Şekil 5.30: elik tank duvar yanal deformasyon-zaman grafiği

Çelik tankın tabanında 280 mm yanal hareket yaparken, duvarın en üst noktasında maksimum deplasman 336 mm'dir (bkz. Şekil 5.31). Çelik tabakanın zaman içindeki değişim grafiği ise Şekil 5.32'de verilmiştir.

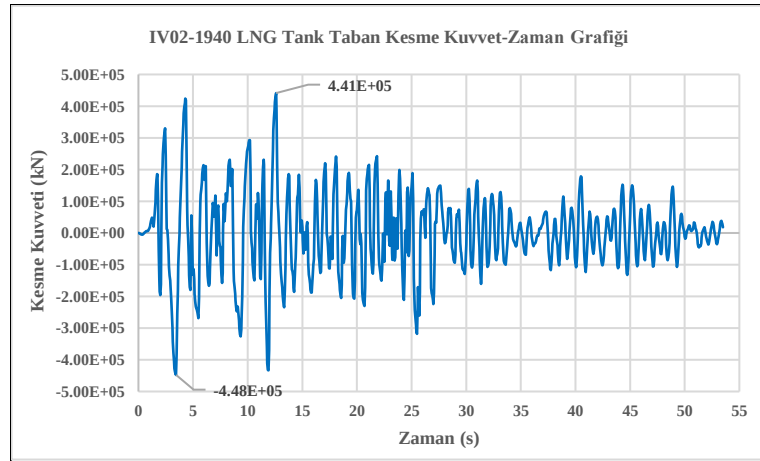


Şekil 5.31: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı



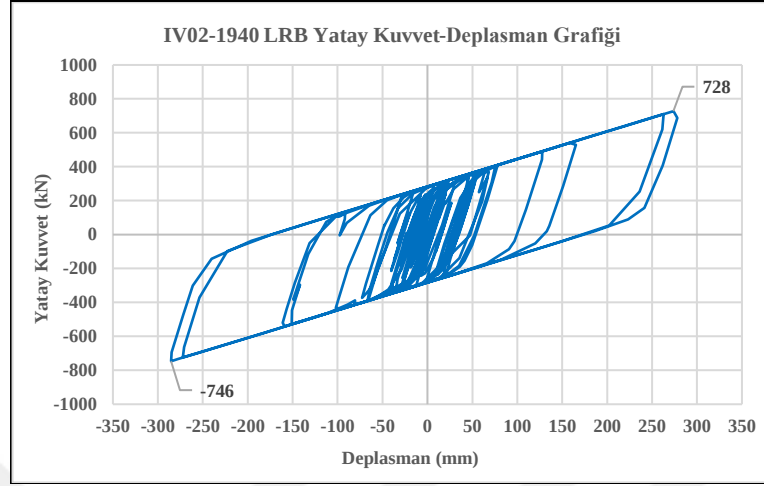
Şekil 5.32: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman-zaman grafiği

LNG tankının toplam taban kesme kuvvetinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.33'de verilmiştir.



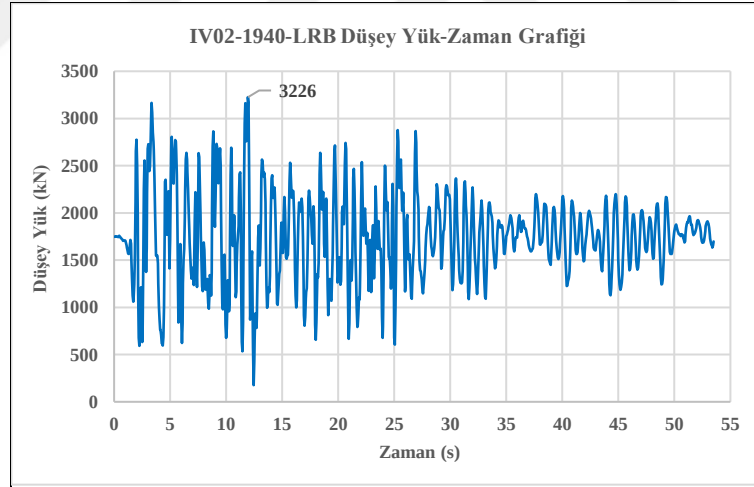
Şekil 5.33: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği

746 kN yatay kuvvet ile LRB izolatörün yaptığı maksimum deplasman 286 mm olmuştur (bkz.Şekil 5.34).



Şekil 5.34: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatöre gelen düşey kuvvetin zaman içindeki değişim grafiği Şekil 5.35’de verilmiştir.



Şekil 5.35: LRB izolatör düşey yük grafiği

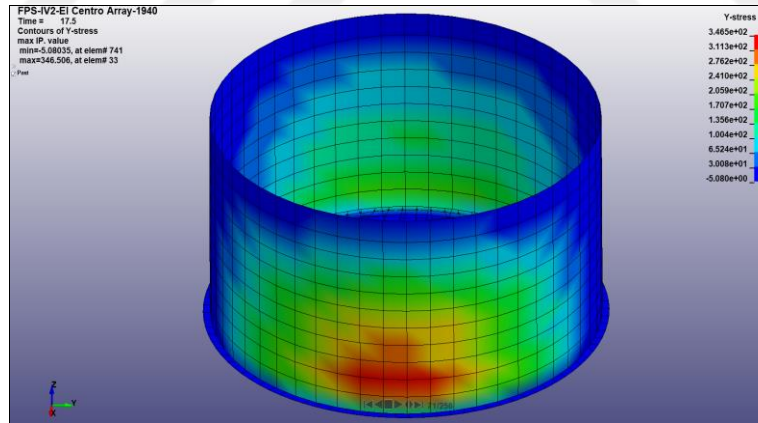
5.4 Sistem-IV Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

Imperyal Valley-1940 depremi El Centro Array istasyonu ivme kaydının SSE deprem performans seviyesine göre Sistem-IV için (bkz. Şekil 5.11), mekanik özellikleri Şekil 5.36’da verilen FIP-D M 1600/600(3700) izolatöre göre lineer olmayan analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

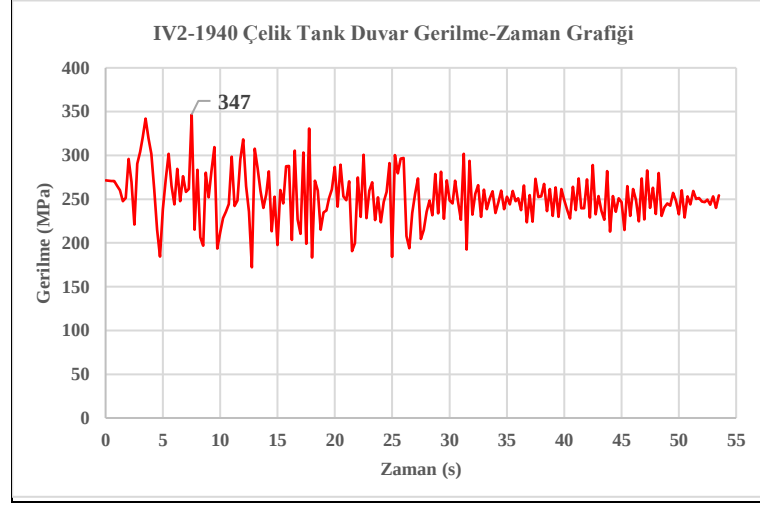
TITLE							
FIP-D M 1600/600(3700)							
1	MID	RQ	A	BETA	GAMMA	DISPY	STIFFV
	10008	1.000e-09	1.0000000	0.5000000	0.5000000	0.2500000	3.672e+06
2	PRELOAD	DAMP	MX1	MX2	MY1	MY2	
	0.0	1.0000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000	
3	FMAX	DELTA	AFRIC	RADY	RADY	RADB	STIFFL
	0.0	0.0	0.0	1.000e+20	1.000e+20	1.000e+20	0.0
4	FORCEY	ALPHA	STIFFT	DFAIL			
	2.030e+05	7.857e-04	0.0	1.000e+20			

Şekil 5.36: FIP-D M 1600/600(3700) izolatörün mekanik özelliklerinin LS-DYNA programına girilmesi

Modelde çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler Şekil 5.37’de, en yüksek gerilmenin olduğu tabakanın gerilmelerinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.38’de verilmiştir.

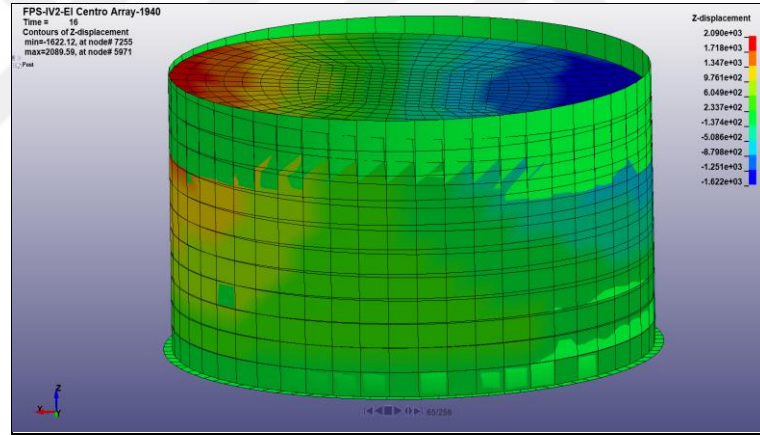


Şekil 5.37: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmeler

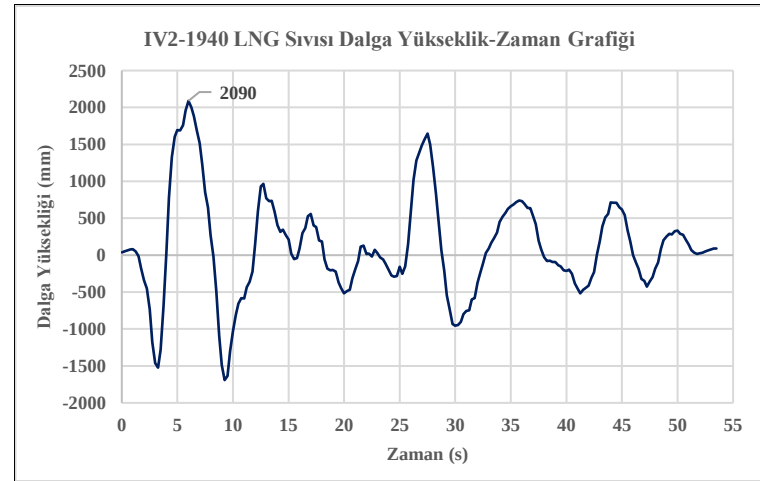


Şekil 5.38: Çelik tank duvar gerilme-zaman grafiği

Modelde LNG sıvısının çalkalanmadan dolayı oluşan maksimum dalga yüksekliği olduğu an Şekil 5.39’da, dalga hareketinin zaman içindeki seviye değişimi Şekil 5.40’da verilmiştir.

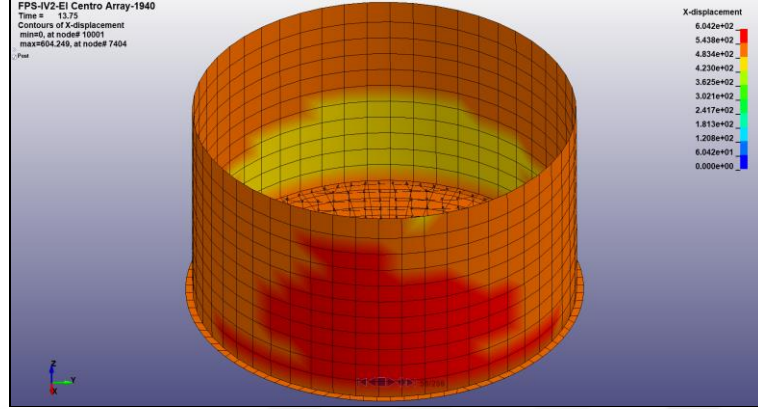


Şekil 5.39: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliğinin olduğu an

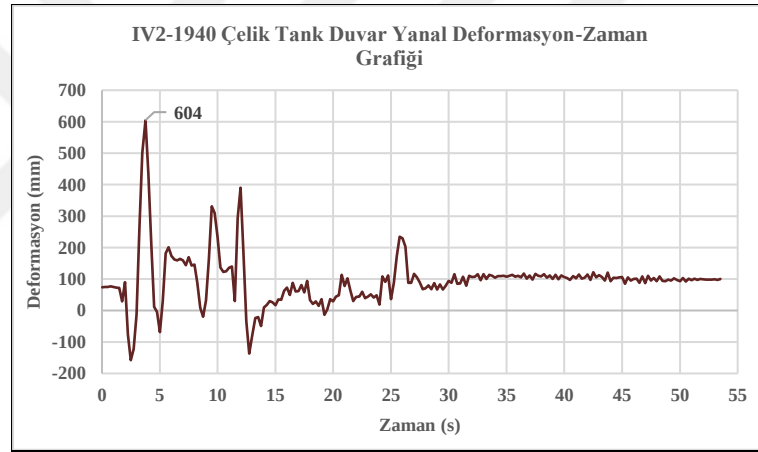


Şekil 5.40: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği

Modelde elik tank duvarı yanal deformasyonunun maksimum olduğu an Şekil 5.41’de, maksimum yanal deformasyon oluşan tabakanın zaman içindeki deformasyon değişimi Şekil 5.42’de verilmiştir.

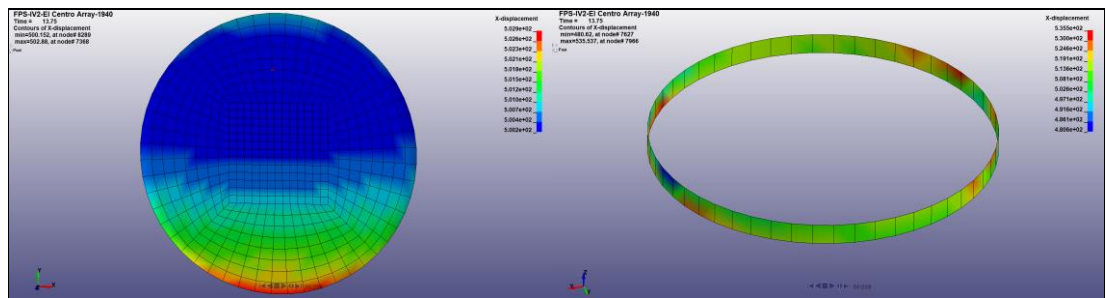


Şekil 5.41: elik tank duvar maksimum yanal deformasyonu

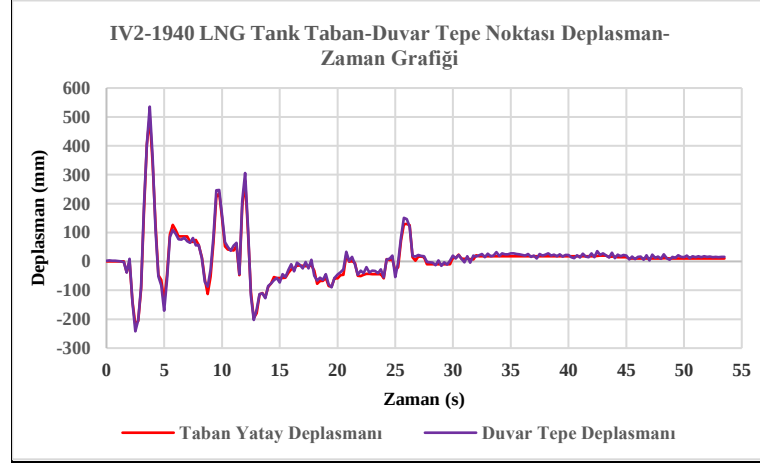


Şekil 5.42: elik tank duvar yanal deformasyon-zaman grafiği

elik tankın tabanında 500 mm yanal hareket yaparken, duvarın en st noktasında maksimum deplasman 536 mm’dir (bkz. Şekil 5.43). elik tabakanın zaman içindeki değişim grafiği ise Şekil 5.44’de verilmiştir.

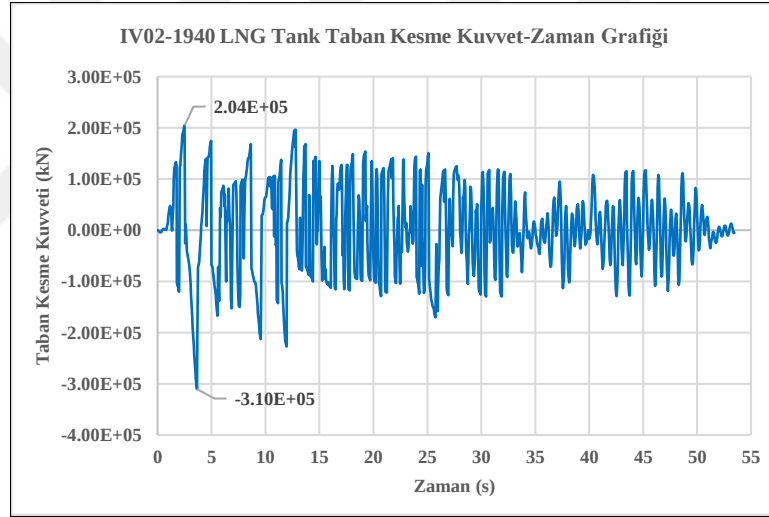


Şekil 5.43: elik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum deplasman farkı



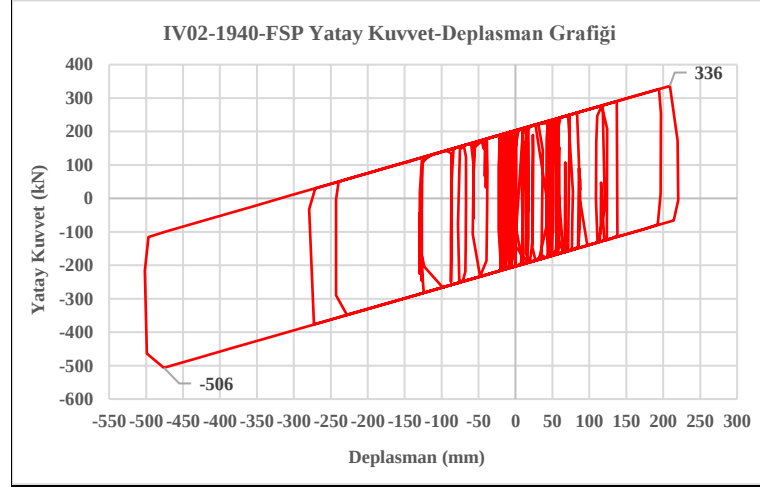
Şekil 5.44: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman-zaman grafiği

LNG tankının toplam taban kesme kuvvetinin zaman içindeki değişimi Şekil 5.45’de verilmiştir.



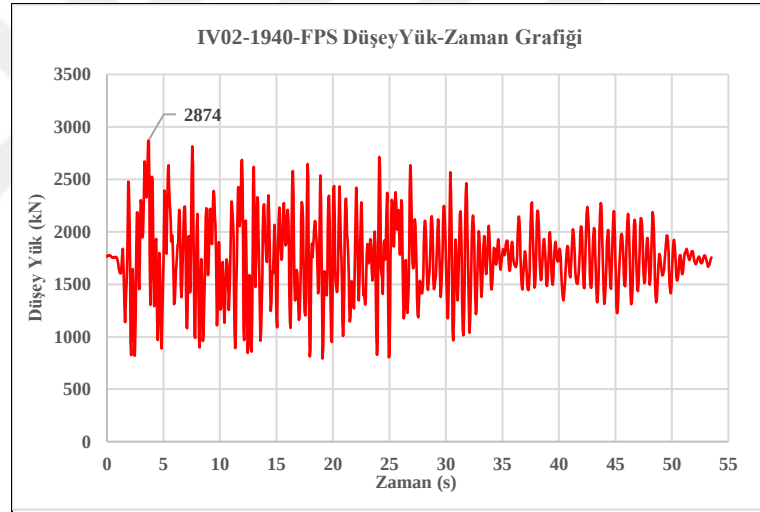
Şekil 5.45: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği

506 kN yatay kuvvet ile FPS izolatörün yaptığı maksimum deplasman 499 mm olmuştur (bkz.Şekil 5.46).



Şekil 5.46: FPS izolatörde meydana gelen yatay kuvvet deplasman grafiği

Analiz sonucu zaman içerisinde FPS izolatöre düşey yönde gelen kuvvetin grafiği Şekil 5.47’de verilmiştir.



Şekil 5.47: FPS izolatör düşey yük grafiği

6. SABİT MESNETLİ ve HDRB-LRB-FPS İZOLATÖRLÜ LNG DEPOLAMA TANKLARININ LİNEER OLMAYAN ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

6.1 Modal Analizlerin Karşılaştırılması

Sıvı gibi rijit olmayan maddeleri depolayan yapılarda farklı tipteki izolatörler ve sabit mesnetli sistemlerdeki periyotların birbirine yakın olduğu görülmektedir (bkz. Tablo 6.1, 6.2 ve 6.3). İzolatörlerin yapının salınımına etkisinin olmamasının sebebi sıvının çalkalanma salınımı izolatörlerin periyotlarından fazla olmasıdır.

Tablo 6.1: LNG sıvısının periyotları (itkisel periyotlar)

Modal Analiz	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri			
	Sabit Mesnet (s)	HDRB izolator(s)	LRB izolator (s)	FPS izolator (s)
I. Mod	9.823	9.888	9.893	9.942
II. Mod	7.446	7.447	7.446	7.448
III. Mod	6.627	6.629	6.627	6.629
IV. Mod	6.331	6.330	6.330	6.330
V. Mod	5.618	5.618	5.618	5.618
VI. Mod	5.607	5.612	5.612	5.615

Tablo 6.2: LNG sıvısı ve iç çelik tankın beraber hareket ettiği periyotlar (taşınımlı periyotlar)

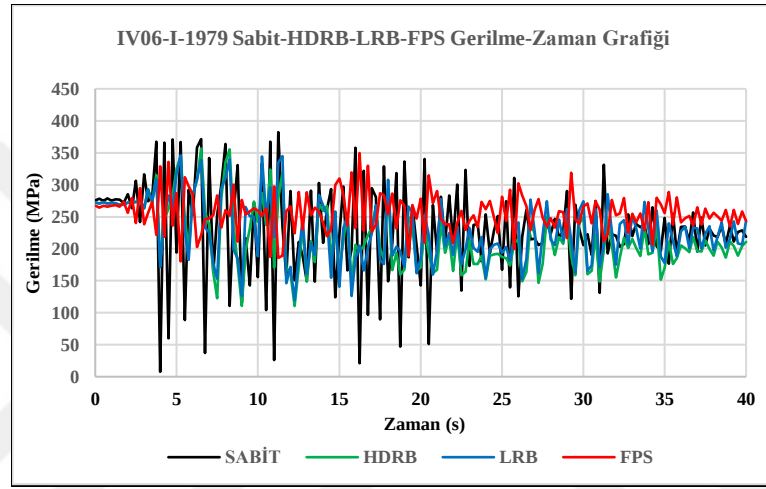
Modal Analiz	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri			
	Sabit Mesnet (s)	HDRB izolator (s)	LRB izolator (s)	FPS izolator (s)
I. Mod	0.230	0.252	0.252	0.288
II. Mod	0.230	0.244	0.244	0.258
III. Mod	0.218	0.239	0.240	0.251
IV. Mod	0.216	0.209	0.211	0.244
V. Mod	0.199	0.197	0.198	0.207
VI. Mod	0.189	0.175	0.175	0.200

Tablo 6.3: Betonarme dış kabuk yapının periyotları

Modal Analiz	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri			
	Sabit Mesnet (s)	HDRB izolator (s)	LRB izolator (s)	FPS izolator (s)
I. Mod	0.230	0.252	0.252	0.288
II. Mod	0.218	0.209	0.211	0.258
III. Mod	0.199	0.175	0.175	0.207

6.2 Çelik Tank Duvarında Oluşan Gerilmelerin Farklı Mesnet Sistemleri ve Depremler için Karşılaştırılması

Tüm sistemlerin SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperial Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydının çelik tank duvarındaki en büyük gerilmenin olduğu tabakanın gerilmelerinin zaman içindeki değişiminin karşılaştırılması Şekil 6.1’de, farklı deprem ivme kayıtlarına göre oluşan maksimum gerilmeler ise Tablo 6.4’de verilmiştir.



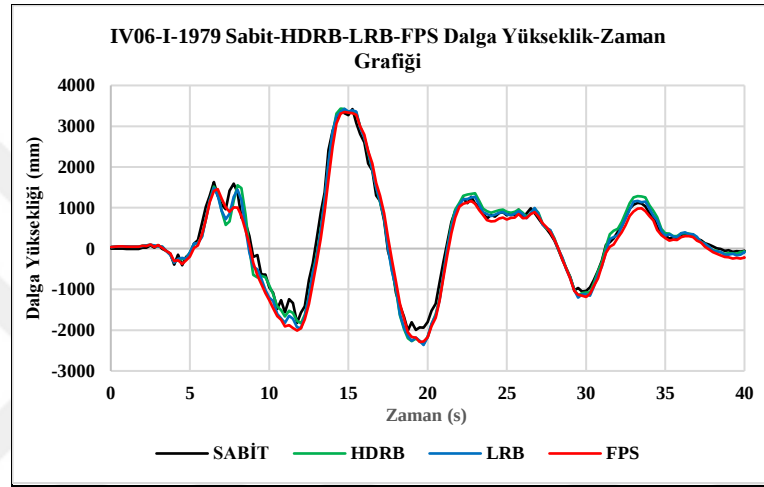
Şekil 6.1: Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank duvarında oluşan gerilmeler

Tablo 6.4: Çelik tank duvarında oluşan maksimum gerilmelerin (MPa) karşılaştırılması ve izolatörlü sistemlerin sabit sisteme göre oranları (%)

Deprem Yer Hareketleri	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri							
	Sabit Mesnet		HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator	
IV2-1940	406	%100	369	%91	358	%88	347	%85
KC-1952	378	%100	354	%94	354	%94	349	%92
BM-1968	380	%100	348	%92	348	%92	346	%91
IV06-I-1979	392	%100	357	%91	346	%88	350	%89
IV06-II-1979	405	%100	348	%86	355	%88	345	%85
VM-1980	382	%100	352	%92	352	%92	345	%90
IITA-1980	375	%100	351	%94	356	%95	328	%88

6.3 LNG Sıvısı Dalga Yüksekliklerinin Farklı Mesnet Sistemleri ve Depremler için Karşılaştırılması

Farklı mesnetlenen sistemler için SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperial Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydına göre LNG sıvısının maksimum dalga yüksekliğinin zaman içindeki değişimi Şekil 6.2’de, farklı deprem ivme kayıtlarına göre oluşan maksimum dalga yükseklikleri ise Tablo 6.5’de verilmiştir.



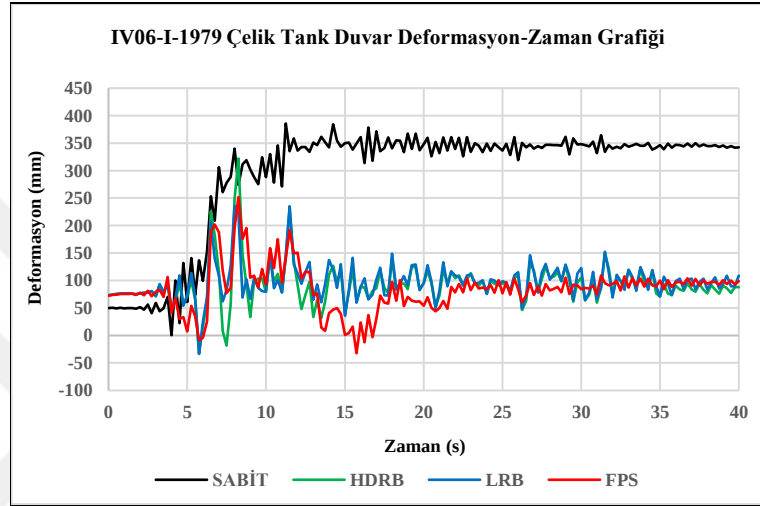
Şekil 6.2: Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre LNG sıvısının dalga yükseklikleri

Tablo 6.5: LNG sıvısının maksimum dalga yüksekliklerinin (mm) karşılaştırılması

Deprem Yer Hareketleri	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri			
	Sabit Mesnet	HDRB izolator	LRB izolator	FPS izolator
IV2-1940	2463	2577	2379	2090
KC-1952	2119	1920	1934	1932
BM-1968	3317	3638	3560	3550
IV06-I-1979	3421	3433	3428	3348
IV06-II-1979	2006	1959	1880	1899
VM-1980	2567	2836	2470	2760
IITA-1980	3355	3488	3438	3276

6.4 Çelik Tank Duvar Yanal Deformasyonlarının Farklı Mesnet Sistemleri ve Depremler için Karşılaştırılması

SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperyal Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydına göre çelik tankın maksimum yanal deformasyonlarının zaman içindeki değişimi Şekil 6.3’de, farklı deprem ivme kayıtlarına göre oluşan maksimum deformasyonlar ise Tablo 6.6’da verilmiştir.



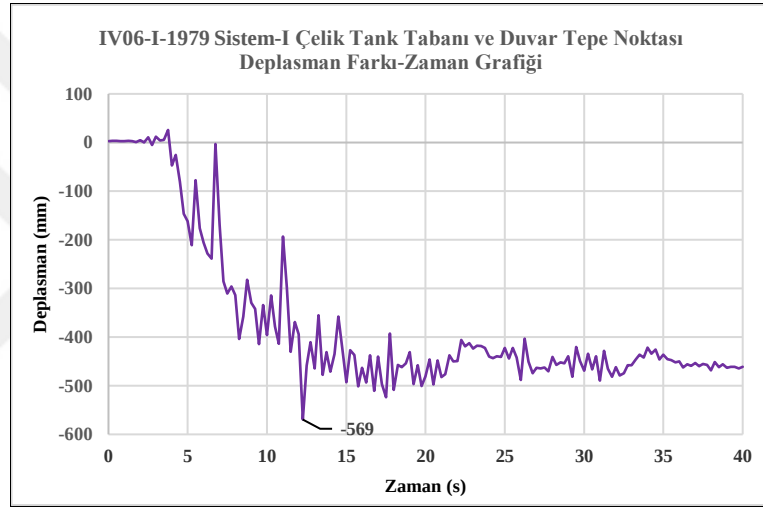
Şekil 6.3: Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank duvarında oluşan deformasyon grafiği

Tablo 6.6: Çelik tank duvarının yanal deformasyon (mm) değerleri ve izolatörlü sistemlerin sabit mesnetli sisteme göre oranları (%)

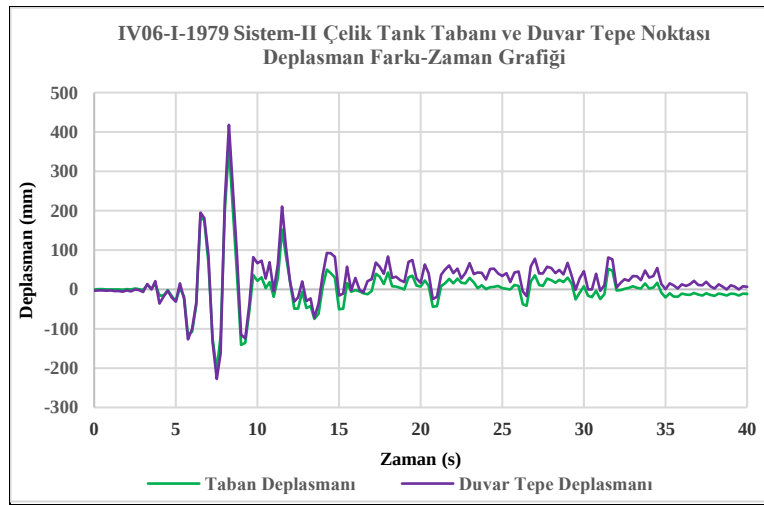
Deprem Yer Hareketleri	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri							
	Sabit Sistem		HDRB İzolatör		LRB İzolatör		FPS İzolatör	
IV2-1940	898	%100	496	%55	424	%47	604	%67
KC-1952	578	%100	361	%62	369	%64	329	%57
BM-1968	369	%100	322	%87	278	%75	345	%93
IV06-I-1979	706	%100	553	%78	430	%61	299	%42
IV06-II-1979	1120	%100	287	%26	287	%26	401	%36
VM-1980	449	%100	444	%99	312	%70	440	%98
IITA-1980	171	%100	262	%153	253	%148	297	%174

6.5 Çelik Tank Taban ve Duvar Tepe Noktası Deplasman Farklarının Karşılaştırılması

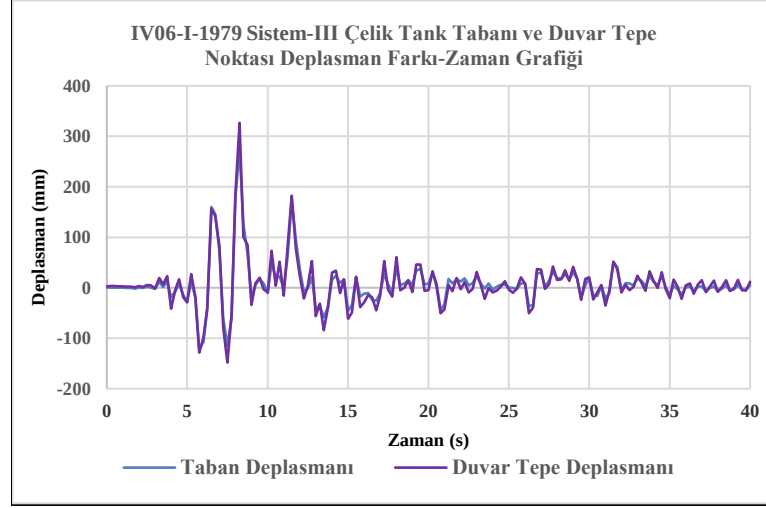
SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperyal Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydına göre çelik tank tabanı ve duvarın en üst noktasındaki deplasmanların farkının zaman içindeki değişimi, sabit mesnetli Sistem-1 için Şekil 6.4’de, HDRB izolatörlü Sistem-II için Şekil 6.5’de, LRB izolatörlü Sistem-III için Şekil 6.6’da ve FPS izolatörlü Sistem-IV için Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Farklı deprem ivme kayıtlarına göre çelik tank tabanı ve duvarın en üst noktasındaki deplasmanların farkları Tablo 6.7’de verilmiştir.



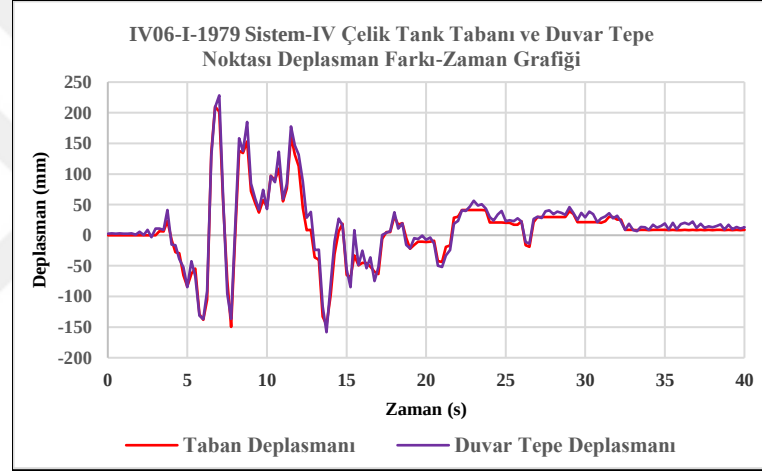
Şekil 6.4: Sabit mesnetli Sistem-I için Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları



Şekil 6.5: HDRB izolatörlü Sistem-II için Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları



Şekil 6.6: LRB izolatörlü Sistem-III için Imperial Valley-1979 depreminde Calxico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları



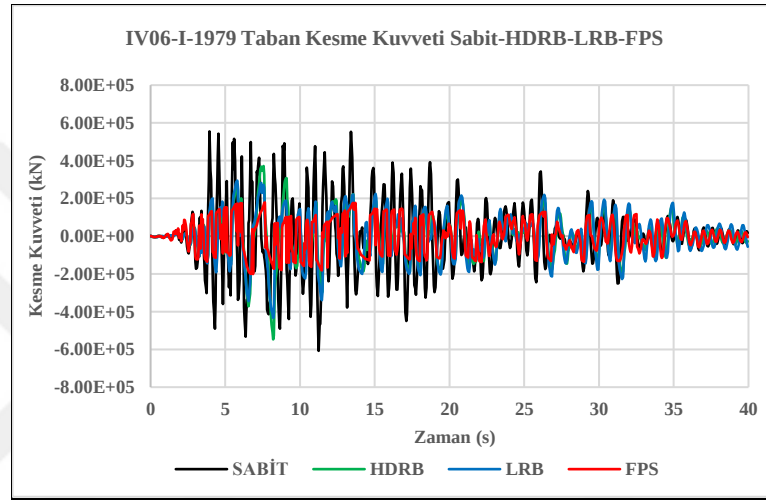
Şekil 6.7: FPS izolatörlü Sistem-IV için Imperial Valley-1979 depreminde Calxico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman farkları

Tablo 6.7: Çelik tank tabanı ve duvar tepe noktasının deplasman (mm) değerleri ve izolatörlü sistemlerin sabit mesnetli sisteme göre oranları (%)

Deprem Yer Hareketleri	Yapı Tabanı Mesnet Tipleri							
	Sabit Sistem		HDRB İzolatör		LRB İzolatör		FPS İzolatör	
	Taban Depl.(mm)	Tepe Nok. Depl.(mm)	Taban Depl.(mm)	Tepe Nok. Depl.(mm)	Taban Depl.(mm)	Tepe Nok. Depl.(mm)	Taban Depl.(mm)	Tepe Nok. Depl.(mm)
IV2-1940	0	751	326	417	280	336	500	536
KC-1952	0	434	231	259	234	288	227	245
BM-1968	0	205	194	223	155	192	255	259
IV06-I-1979	0	569	362	418	275	327	210	230
IV06-II-1979	0	1009	163	203	158	183	303	320
VM-1980	0	261	286	320	186	214	346	369
IITA-1980	0	67	117	163	136	175	202	228

6.6 LNG Tankının Maksimum Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperyal Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydına göre LNG tankının tabanında oluşan kesme kuvvetlerinin zaman içerisindeki değişimleri Şekil 6.8’de, farklı deprem ivme kayıtlarına göre hesaplanan maksimum kesme kuvvet değerleri ise Tablo 6.8’de verilmiştir.



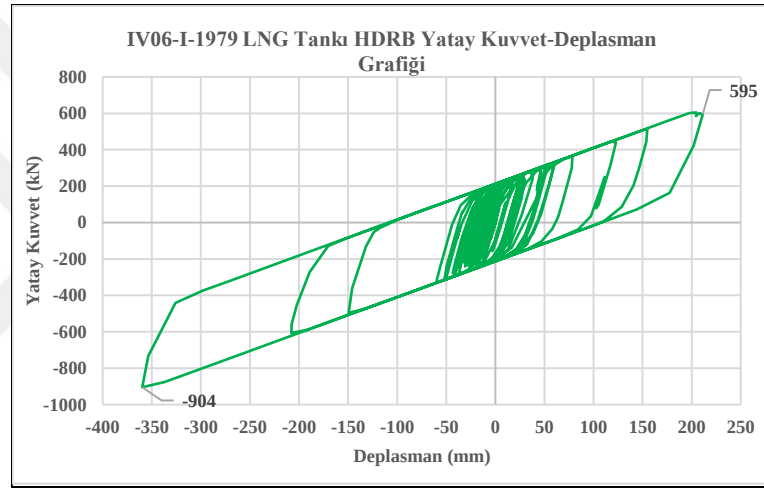
Şekil 6.8: Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre LNG tankının tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri

Tablo 6.8: LNG tankın tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri (kN) ve sabit mesnete göre izolatörlü sistemlerin oranları (%)

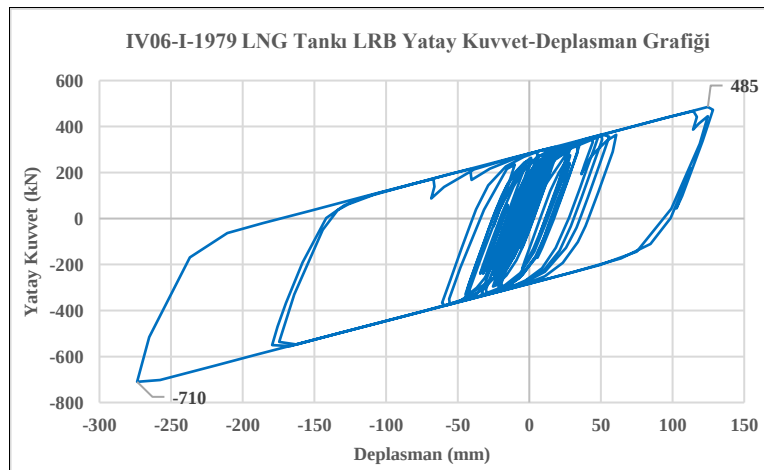
Deprem Yer Hareketleri	Mesnet tipi							
	Sabit Mesnet		HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator	
IV2-1940	6.78×10^5	%100	5.26×10^5	%78	4.48×10^5	%66	3.10×10^5	%46
KC-1952	5.92×10^5	%100	3.98×10^5	%67	3.94×10^5	%66	2.08×10^5	%35
BM-1968	4.87×10^5	%100	3.70×10^5	%76	3.38×10^5	%69	2.18×10^5	%45
IV06-I-1979	6.08×10^5	%100	5.47×10^5	%90	4.33×10^5	%71	2.01×10^5	%33
IV06-II-1979	6.44×10^5	%100	3.19×10^5	%50	3.27×10^5	%51	2.36×10^5	%37
VM-1980	6.29×10^5	%100	4.72×10^5	%75	3.56×10^5	%57	2.53×10^5	%40
IITA-1980	3.89×10^5	%100	3.21×10^5	%83	3.09×10^5	%79	1.97×10^5	%51

6.7 HDRB-LRB-FPS İzolatörlerin Yatay Kuvvet-Deplasman Analizleri

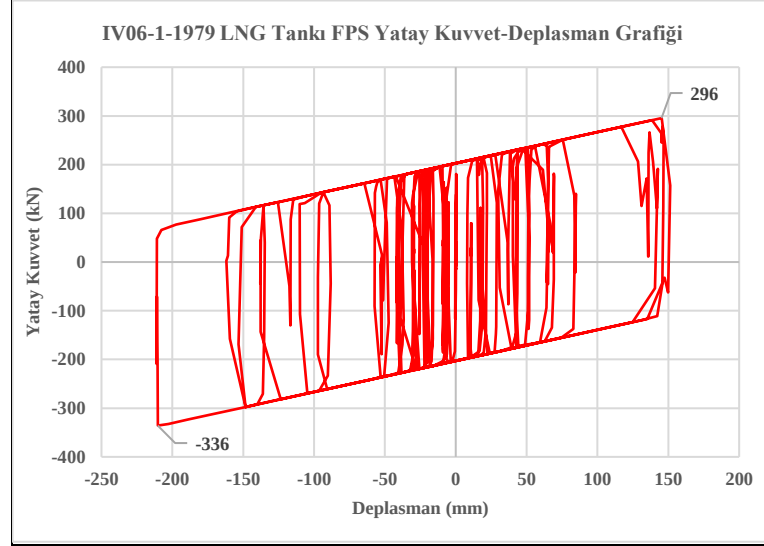
SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperyal Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydına göre LNG tankın tabanına sabitlenmiş her bir izolatörün yatay kuvvet deplasman grafikleri HDRB izolatör için Şekil 6.9’da, LRB izolatör için Şekil 6.10’da, FPS izolatör için Şekil 6.11’de gösterilmektedir. Farklı deprem ivme kayıtlarına göre hesaplanan maksimum yatay kuvvet-deplasman değerleri ise Tablo 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9: Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 6.10: Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre LRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği



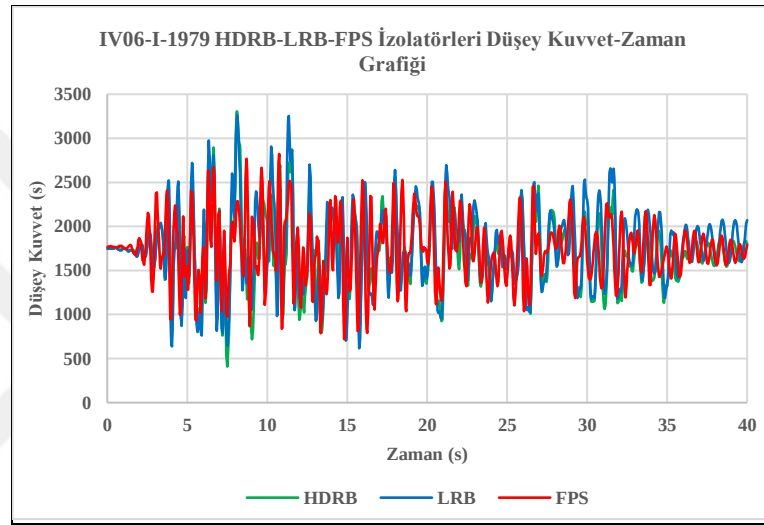
Şekil 6.11: Imperial Valley-1979 depreminde Calexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre FPS deprem yalıtımında yatay kuvvet–deplasman grafiği

Tablo 6.9: LNG tank taban izolatörleri maksimum yatay kuvvet–deplasman değerleri

Deprem Yer Hareketleri	Taban İzolatörü					
	HDRB izolatör		LRB izolatör		FPS izolatör	
	Kuvvet (kN)	Depl. (mm)	Kuvvet (kN)	Depl. (mm)	Kuvvet (kN)	Depl. (mm)
IV2-1940	880	340	746	286	506	500
KC-1952	656	225	658	232	345	229
BM-1968	615	205	564	173	363	256
IV06-I-1979	904	360	710	274	336	210
IV06-II-1979	534	164	544	164	395	302
VM-1980	791	296	595	194	422	346
IITA-1980	536	165	518	145	328	195

6.8 HDRB-LRB-FPS İzolatörlerin Düşey Kuvvet-Zaman Analizleri

SSE deprem seviyesine göre ölçeklendirilmiş Imperyal Valley-1979 depremi Callexico Fire istasyonu ivme kaydına göre LNG tankının tabanına sabitlenmiş her bir izolatöre gelen düşey kuvvetlerin zaman içerisindeki değişimleri Şekil 6.12’de, farklı ivme kayıtlarına göre hesaplanan maksimum düşey kuvvet değerleri ise Tablo 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.12 Imperial Valley-1979 depreminde Callexico Fire istasyonu ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına göre izolatörlere gelen düşey kuvvetlerin zaman içerisindeki değişimleri

Tablo 6.10: Taban izolatörleri maksimum düşey kuvvet değerleri (kN)

Deprem Yer Hareketleri	Taban İzolatörü		
	HDRB izolatör	LRB izolatör (kN)	FPS izolatör (kN)
IV2-1940	3378	3326	2874
KC-1952	2947	2995	2774
BM-1968	2743	2629	2635
IV06-I-1979	3305	3255	2822
IV06-II-1979	3054	3156	2852
VM-1980	3254	2775	2604
IITA-1980	2973	3025	2622

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, dört farklı taban tipi üzerine yerleştirilmiş 232,000 m³ hacimli LNG tankı yedi farklı deprem etkisi altında incelenmiştir. Maksimum LNG seviyesi için yüksekliğin yarıçapa oranı 1 olarak seçilmiştir. Dış betonarme kabuk, LNG sıvısı ve iç çelik tankın modal analizleri, taban kesme kuvveti, dalga yüksekliği, çelik tankın yanal deformasyonu, çelik tankın gerilmeleri, tankın tabanı ve duvarın en üst noktası arasındaki deplasman farkı, izolatörlerin yatay kuvvet etkisiyle yer değiştirmesi ve bir izolatöre gelen düşey kuvvetin zaman içerisindeki değişimleri incelenmiştir.

Ankraj çubukları ile sabitlenmiş (Sistem - I) ve HDRB, LRB, FPS izolatörlü serbest çelik tanklarda (Sistemler - II, III, IV) gerek itkisel gerekse taşınımli modların periyotları arasında fark olmadığı görülmektedir (bkz. Tablolar 4.3, 4.4, 4.8, 4.9, 4.12, 4.13, 4.17, 4.18). Sıvının çalkalanma periyodu izolatörlerin periyodundan yüksek olduğu için izolatörlerin periyotları etkilemediği görülmüştür. Sıvı katı gibi rijit hareket etmediği için taşınımli periyotlar yüksek olur.

Statik yüklemekten dolayı çelik tank duvarın tabana yakın bölgesinde ortalama 270 MPa gerilme oluşmuştur. Gerilmelerin depremin şiddetine ve yapının izolatörlü ya da sabit mesnetli olmasına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Sabit mesnetli sistemde 400 MPa gerilme değeri oluşurken, HDRB, LRB, FPS tipi deprem izolatörlü sistemler için bu değerler ortalama 350 MPa'dır. Tank gövdesini oluşturan çelik kabuk elemanın malzeme sınıfına ait akma sınırı 515 - 585 MPa arasındadır (SAC 2010). API 620 standardına göre bu değer (412 - 468 MPa) %80'i SSE için geçilmemelidir.

Ankrajlı ve izolatörlü tanklarda LNG sıvısının çalkalanma periyodu 9.82 - 9.94 saniye arasında değişmektedir (bkz. Tablo 6.1). LNG sıvısının maksimum dalga yüksekliği, deprem ivmelerinin büyüklüğünden ziyade ivmenin harmonik hareketleriyle orantılıdır. Örneğin, BM - 1968 depreminin 20 saniye içinde ortalama ± 0.3 g arasında değişen ivme değerlerinde görülen dalga yüksekliği, maksimum -0.93 g ivme görülen IV06-II-1979 depreminden daha büyüktür. Burada dalga hareketi ile yer hareketinin rezonansa girmesi çalkalanma değerlerinin yüksek olmasını sağlamıştır. Öte yandan, LRB merkezindeki kurşun çekirdeğin sağladığı sönümleme ve FPS'de oluşan sürtünme nedeniyle ivme değerlerinin azalması HDRB izolatörlü tanklara göre daha düşük dalga yüksekliğine neden olmuştur. Ayrıca düşük ivmeli

depremlerde (BM-1968) sabit mesnetli tankın dalga yüksekliği izolatörlü sistemlere göre daha az olduğu görülmüştür (Ek L API 620 2014).

Fil ayağı burkulması denilen iç çelik tankın elasto-plastik burkulması IITA-1980 depremi gibi orta ve zayıf depremlerde çelik tanktaki itkisel kütle basıncı tank tabanında bulunan ankrajlarla bloke edildiği için izolatörlü sistemlere göre daha az gerçekleşmektedir. Diğer depremlerde görüldüğü üzere 0.4 g ve üzeri ivme kayıtlı depremlerde ankrajlı sistemlerin çelik tankın gövdesinin yanal burkulması izolatörlü sistemlerden daha fazladır. Örneğin Imperyal Valley-1940, Imperyal Valley-1979 Calexico ve Delta istasyonu depremlerinde sabit mesnetli sistemlerde zamanla ivme değerleri azalmasına rağmen plastikleşme nedeniyle elasto-plastik burkulma değerleri artmaktadır. İzolatörlü sistemlerde ise ivme değeri azaldıkça elastik geri dönüş gözlenmektedir (bkz. Tablo 6.6).

İç çelik tank yan duvarının taban ve tepe noktası arasındaki deplasman farkları burkulmaya, dolayısıyla tank duvarında göçme mekanizması oluşarak LNG sıvısının patlamasına ve yangınlara neden olmaktadır. Örneğin sabit mesnetli sistemin IV06-II-1979 depremi sonucu oluşan deplasman farkı 1009 mm'dir (Ek E API 650 2013). İzolatörlü sistemlerde ise, deplasman farklarının 20-70mm arasında olduğu görülmektedir (bkz. Tablo 6.7). İzolatörler arasında deplasman farkı açısından en iyi performansı LRB göstermektedir. LRB izolatörü merkezindeki kurşun çekirdek sayesinde yapının yatay ötelenmesini azaltmakta, ancak çekirdek çevresindeki plakalı kauçuk sistem ile yatay ötelenme istenilen sınırlar içinde kalmaktadır.

Yer ivmesindeki artışla birlikte LNG tankına etki eden toplam taban kesme kuvveti de artar. Ayrıca izolatörlü sistemlerde tabandaki maksimum kesme kuvvetlerinin artması ile izolatörün kesme kuvvetlerini azaltma yüzdesi de o oranda artmaktadır. HDRB ve LRB izolatörlü LNG tanklarında taban kesme kuvvetlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. FPS sistemli LNG tanklarında diğer iki izolatör tipine göre daha iyi performans elde edilmektedir (bkz. Tablo 6.8). Bu durum her bir FPS izolatörünün yaklaşık 200 kN taban kesme kuvvetini sönümleyen sürtünmesiyle açıklanabilir.

Limana yanaşan gemilerden borularla taşınan sıvılaştırılmış doğal gaz, LNG tankının çatısından çelik tanka boşaltılır. Tez kapsamında kullanılan izolatörler

maksimum yatay deplasmanı 400 mm olacak şekilde seçilmiştir. Dolayısıyla yapıya bağlanan mekanik ve borulama sisteminin de bu deplasman gözönüne alınarak tasarlanması gereklidir. Deprem anında LNG tankının yatay yer değiştirmesinin sınırlı olması ve bu süre zarfında mekanik ve borulama sisteminin hasar görmemesi istenir. (Ek E API 650 2013). HDRB, LRB ve FPS izolatörlü LNG tanklarının yatay kuvvet-deplasman grafikleri incelendiğinde LRB izolatörün diğer deprem izolatörlerine göre en az yatay deplasmana sahip olduğu görülmektedir. Düşük ivmeli depremler (KC-1952) dışında FPS izolatörlü sistemlerin yanal yerdeğiştirmeleri HDRB ve LRB izolatörlü sistemlere göre daha fazladır (bkz. Tablo 6.9). Bu durum, deprem kuvvetlerinin sürtünme kuvvetini aşması ve FPS izolatörün sarkaç sisteminden dolayı daha yüksek bir yatay yer değiştirme yapmasıyla açıklanabilir. Öte yandan LRB izolatörün merkezindeki kurşun çekirdeğin yatay kuvveti sönmülmesi sayesinde HDRB izolatöre göre % 10 - 15 civarında daha az yer değiştirme yaptığı bulunmuştur. LNG tankının büyük yatay yer değiştirmesi mekanik ve borulama sistemlerine zarar vererek yangın ve patlamalara neden olacağı için istenmeyen bir durumdur.

Her bir izolatöre gelen statik düşey yük 1770 kN civarındadır. Deprem nedeniyle hareket eden LNG sıvısının derinliğinin artmasıyla birlikte izolatörlere gelen düşey yükünde arttığı görülmüştür. FPS izolatörü kesme kuvvetini sürtünme ile azaltarak LNG sıvısının yanal hareketini de azaltır. Böylece her bir FPS izolatörüne gelen düşey kuvvetin, HDRB ve LRB izolatörlerinden 200 - 400kN arasında daha düşük olduğu görülmüştür. HDRB ve LRB izolatörlere gelen düşey yüklerin ise yakın olduğu görülmektedir (bkz. Tablo 6.10). Tasarım aşamasında HDRB, LRB ve FPS izolatörlerine her birine gelen düşey statik yükün % 60 - 100 arasında değişen oranlarda arttırılarak dinamik düşey yüklerin de hesaba katılması gerekmektedir.

LNG depolama tanklarında kullanılan deprem izolatörlerinin 2475 yılda bir gelebilecek olan en büyük depremlerde dahi, sabit mesnetli LNG tanklara göre çok iyi performans gösterdiği görülmüştür. Büyük çevre felaketlerine ve yıkımlara sebebiyet verebilecek olan LNG depolama tanklarının deprem güvenliği için izolatörlü sistemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

Abd, A. A., Naji, S. Z. and Lafta F., “Efficient design of a large storage tank for liquefied natural gas”, 26(6), (2018).

ANSYS Workbench 20 and LS-DYNA 2018, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA, (2022).

Anumod, A.S., Harinarayanan, S. and Usha, S., “Finite element analysis of steel storage tank under seismic load”, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, ISSN:2248-9622, (2014).

API Standard 620, “Design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks”, *American Petroleum Institute (API) Publishing Services*, (12th Edition), Addendum 1, Washington D.C., USA., (2014).

API Standard 625, Tank systems for refrigerated liquefied gas storage, *American Gas Association (AGA) Publishing Services*, (1th Edition), Addendum 2, Washington D.C., USA, (2014).

API Standard 650, “Welded Tanks for Oil Storage”, *American Petroleum Institute (API) Publishing Services*, (12th Edition), Washington D.C., USA, (2013).

ARUP, “Gas and LNG Storage Tank / The Future of Modular LNG Tank”, (2018).

ASCE/SE 7-16, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures”, *American Society of Civil Engineers (ASCE) Publishing Services*, Washington D.C., USA., (2016).

Bomhard, H., and Stempniewski, L., “LNG tanks for seismically highly affected sites”, *Intl. Post SMiRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures (IAEA)*, Capri, Italy, (1993).

Barros, R. C., “Parametric Study of The Seismic Response of Anchored Metallic Tanks by International Design Codes”, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, (2008).

Brocher, T. M., Filson, J. R., Fuis, G. S., Haeussler, P. J., Holzer, T. L., Plafker, G. and Blair, J. L., ”The 1964 great Alaska earthquake and tsunami a modern perspective and enduring legacies”, *United State Geological Survey (USGS)*, 10(3113), 3018, (2014).

Brunesi, E., Nascimbene, R., Pagani, M. and Beilic, D., “Seismic Performance of Storage Steel Tanks during the May 2012 Emilia, Italy, Earthquakes”, *Journal of Performance Constructed Facilities* (ASCE), 29(5), doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000628, (2015).

Castano, J., “Multifísica computacional: interacción fluido-estructura”, *Blog Cartif*, <http://www.blog.cartif.com/en/multifisica-computacional-interaccion-fluido-estructura>, (2016).

Castellano, M. G., Infanti, S., Dumoulin, C., Ducoup, L., Martelli, A. and Dusi, A., “Shaking table tests on a liquefied natural gas storage tank mock-up seismically protected with elastomeric isolators and steel hysteretic torsional dampers”, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, February, (1999).

Chen, Z., Xu, Z., Teng, L., Fu, J., Xu, T. and Zhao, Z., “Experimental and Numerical Investigation for Seismic Performance of a Large-Scale LNG Storage Tank Structure Model”, *Applied Sciences (MDPI)*, 12(17), 8390, doi:10.3390/app12178390, (2022).

Christovasilis, I. P., “Seismic Analysis of Liquefied Natural Gas Tanks”, A Master of Science, *The State University of New York at Buffalo*, Structural and Environmental Engineering , New-York / U.S.A., 15-23, (2006).

Christovasilis, I. P., M. Eeri M., Whittaker, A. S., “Seismic analysis of conventional and isolated LNG tanks using mechanical analogs”, *Earthquake Spectra*, 24(3), 599-616, doi:10.1193/1.2945293, (2008).

Cooper, T. W., “A Study Of The Performance Of Petroleum Storage Tanks During Earthquakes, 1933-1995”, 17-24, 67-88, *Building and Fire Research Laboratory*, Gaithersburg, Maryland, , MD 20899, (1997).

Datoli, R., Danilo, B. and Perillo, M., “Sloshing response of a LNG storage tank subjected to seismic loading”, *6th European LS-DYNA Users’ Conference*, Gothenburg, Sweden, May, (2007).

Demir, S., “Sismik İzolasyon Sistemleriyle Yapıların Tasarımı ve Mevcut Bir Yapıya Uygulanması”,Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya, (2008).

Di Carliccio, A., Fabbrocino, G. and Manfredi, G., “Fem Seismic Analysis of Steel Tanks For Oil Storage In Industrial Facilities”, *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October (2008).

Dizhur, D., Simkin, G., Giaretton, M., Loporcaro, G., Palermo, A., and Ingham, J., “Performance of Winery Facilities During The 14 November 2016 Kaikōura Earthquake”, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 50(2), (2017).

Earthquake Protection Systems, “The largest seismically isolated tanks in the world use Friction Pendulum bearings”, *Seismic Isolation of LNG Tanks Revithoussa Greece*, 451 Azuar Drive, Bldg. 759 Mare Island Vallejo, California, USA, January, (2004).

Earthquake Protection Systems, “Triple Pendulum bearings protect critical storage tanks”, *Peru LNG Melchorita Peru*, 451 Azuar Drive, Bldg. 759 Mare Island Vallejo, California, USA, December, (2008).

Farzad, N. and Kelly, J. M., “Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice”, John Wiley & Sons,Inc., New York, USA, (1999).

FIPMEC Srl., Via Scapacchio, 41/35030 Selvazzano Dentro (PD), Italy, (2022).

Graham, E. W. and Rodriguez, A. M., “The Characteristics of Fuel Motion which Affect Airplane Dynamics”, *Journal of Applied Mechanics*, 19(3), 381-388, (1952).

Gregoriou, V. P., Tsinopoulos, S. V. and Karabalis, D. L., “Base isolated LNG tanks: Seismic analyses and comparison studies”, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, September, (2006).

Gregoriou, V. P., Tsinopoulos, S. V. and Karabalis, D. L., “Dynamic analysis of liquefied natural gas tanks seismically protected with energy dissipating base isolation systems”, *3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, May, (2011).

Haroun, M. A. and Housner, G. W., “Dynamic interaction of liquid storage tanks and foundation soil”, *In Dynamic Response of Structures: Experimentation: Observation, Prediction and Control*, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, NY, USA, (1981).

Hamada, M., “Measures for Earthquake-Resistance Enhancement of Industrial Complexes around The Tokyo Bay”, *International Symposium on Natural and Technological Risk Reduction in Industrial Parks*, Waseda University, Tokyo, Japan, (2016).

Hışman K., “Sismik İzolasyon Platformlarının Performanslarının Sismik İzolatörlerin Mekanik Özelliklerindeki Küçük Sapmalara Olan Duyarlılığı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2011).

Housner, G. W., “Dynamic pressures on accelerated fluid containers”, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 47(1), 15-35, doi:10.1785/BSSA0470010015, (1957).

Housner, G. W., “The dynamic behavior of water tanks”, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 53(2), 381-387, doi:10.1785/BSSA0530020381, (1963).

Huang, Y. N., Whittaker, A. S. and Luco, N., “Maximum Spectral Demands in the Near-Fault Region”, 24(1), 319-341, doi:10.1193/1.2830435, (2008).

https://www.concreteconstruction.net/products/tank-construction-on-a-two-week-cycle_o, (2007).

<https://www.gettyimages.ca/detail/news-photo/black-smoke-is-seen-rising-into-the-air-as-the-tank-of-news-photo/91961112>

<https://www.kellerindia.com/expertise/markets/oil-and-gas>

<https://peer.berkeley.edu>.

<http://www.pratikiskele.com/tirmanir-kalip-sistemleri.html>.

<https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/earthquake-hazards/liquefaction-tanks/>.

<https://www.shellbuckling.com>

<https://www.terbayinsaat.com>.

<https://tdth.afad.gov.tr>, (2018)

Jacobsen, L. S., “Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier”, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 39(3), 189-204, doi:10.1785/BSSA0390030189, (1949).

Jacobsen, L. S. and Ayre, R. S., “Hydrodynamic experiments with rigid cylindrical tanks subjected to transient motions”, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 41(4), 313-346, doi:10.1785/BSSA0410040313, (1951).

Jin, B. M., Jeon, S. J., Kim, S. W., Kim, Y. J. and Chung, C. H., “Earthquake Response Analysis Of LNG Storage Tank By Axisymmetric Finite Element Model And Comparison To The Results Of The Simple Model”, 394, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, (2004).

Keskin, A., “Deprem izolatörleri, tasarım ve uygulama esasları”, İ.M.O-İzmir Şubesi, Kasım, (2008).

Kılınç, O. F., “Taban İzolatörlü Yapıların Deprem Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Niğde, (2011).

Kılıç, S., Akbaş, B., Shen, J. and Paolacci F., “Seismic behavior of liquid storage tanks with 2D and 3D base isolation systems”, *Structural Engineering and Mechanics*, 83(5), 627-644, doi:10.12989/sem.2022.83.5.627, (2022).

Lun, H., Filippone, F., Roger, D. C., Poser, M., “Design and Construction Aspects Of Post-Tensioned LNG Storage Tanks In Europe And Australasia”, (2005).

Lee, T. H., Choi, W. S. and Han, T.S., “Effect Of Base Isolation On Seismic Fragility of Aboveground Lng Storage Tanks”, *The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*, Sapporo, Japan, <ftp://ftp.hdl.handle.net/2115/54391>, September, (2013).

Malhotra, P. K. and Veletsos, A. S., “Uplifting Analysis Of Base Plates In Cylindrical Tanks”, *Journal of Structural Engineering*, 120(12), 6879, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:12(3489), (1994).

Malhotra, P. K., Wenk, T., and Wieland, M. (2000), “Simple procedures for seismic analysis of liquid storage tanks”, *Structural Engineering International*, 10(3), 197–201, doi:10.2749/101686600780481509, (2000).

Marti, J., Crespo, M. and Martinez, F., “Seismic isolation of liquefied natural gas tanks: A comparative assessment”, *The Journal of the Anti-Seismic Systems International Society*, 1(1), 125-140, doi:10.2140/siaps.2010.1.125, (2010).

NFPA 59A, “Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas (LNG)”, *National Fire Protection Association (NFPA) Publishing Services*, The latest 2016 Ed., Washington D.C., USA, (2016).

Oliinyk, A. and Laciak, M., “Safety Technical Problems Associated With The Storage of Liquefied Natural Gas”, *AGH University of Science and Technology*, 30(1), 181, doi:10.7494/drill.2013.30.1.181, (2013).

Osaka Gas Co., “Development and Construction of Flarge-Capacity Full Containment LNG Tank”, Daigas Group, 4-1-2 Hiranomachi Chuo-ku Osaka Japan, ftp://ftp.osakagas.co.jp/en/rd/technical/1198900_6995.html#, (2020).

Özpalanlar, C. G., “Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon ve Enerji Sönümleyici Sistemler”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2004).

Polat, H. I., “Perde-Çerçeve Çerçevelerden Oluşan Yapıların Taban İzolatörleri Kullanılarak Analizi ve Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2007).

Rosin, J., and Butenweg, C., “Seismic isolation of cylindrical liquid storage tanks”, (eds: A. Cunha, E. Caetano, P. Ribeiro and G. Müller), *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, EUROLYN 2014, Porto, Portugal, June-July, (2014).

Prinz, G. S., Nussbaumer, A. and Cortes, G., “Fatigue Analysis of Unanchored Steel Liquid Storage Tank Shell to Base Connections during Earthquake Induced Uplift”, *15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisbon, Portugal, September, (2012).

Rotter J. M., “Elephant’s foot buckling in pressurized cylindrical shells”, *Shalbau*, 75(9), 742-747, doi:10.1002/stab.200610079, September, (2006).

Ruifu, Z., Dagen W. and Xiaosong R., “Seismic analysis of a LNG storage tank isolated by a multiple friction pendulum system”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10(2), 253-262, doi:10.1007/s11803-011-0063-3, (2011).

Sharari, N., Behzad, F., Hokmabadi A., and Xu R., “Seismic resilience of extra-large LNG tank built on liquefable soil deposit capturing soil-pile-structure interaction”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(4), 3385-3441, doi:10.1007/s10518-022-01384-1, April, (2022).

Sari, A., Arablouei, A., Azimov, U., Sahasakkul, W. And Dara S., “A novel approach for risk assessment of large oil storage tanks”, *66th Canadian Chemical Engineering Conference*, 82-89, 102-103, October, (2016).

Sezen, H., Elwood, K. J. ,Whittaker, A. S. ,Mosalam, K. M., Wallace, J. H., Stanton, J. F., “Structural Engineering Reconnaissance of the August 17, 1999, Kocaeli (Izmit), Turkey, Earthquake”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, *College of Engineering University of California*, Berkeley, USA, December, (2000).

Soules, J. G., “Non-Building Structure Design”, Chapter 13, Instructional Material Complementing, FEMA P-751, Design Examples, (2009).

SAC, “9% Nickel Steel Plates for Pressure Vessels with Specified Low Temperature Properties”, *Standardization Administration Committee of the People’s Republic of China (SAC)*, Beijing, China, (2010).

Sofregaz Company, “Large Cryogenic above ground LNG Tank Full Containment Typical Construction”, Tour Vista, 52, quai de Dion Bouton, CS 80037 – 92806, Puteaux, France, (2011).

Summers, P. B., Castellano, M. G., Bergamo, G., Gatti, F., Marti, J. and Poggianti, A., “Seismic Risk Reduction At Petrochemical And LNG Facilities: Main Results From Indepth Project”, *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October, (2008).

Şengel H.S., Erol H. ve Yavuz E., “Sismik İzolasyon Tekniği ve Kullanılışına İlişkin Örnek Uygulama”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), (2009).

Tajirian, F. F., “Base Isolation Design for Civil Components and Civil Structures”, *Structural Engineers World Congress*, San Francisco, California, USA, July, (1998).

Tavano M., Savoia, M. And Buratti, N., “Seismic Response of Tank-Fluid Systems: State Of The Art Review And Dynamic Buckling Analysis Of A Steel Tank With The Added Mass Method”, *International Master Course In Civil*

Engineering, *Earthquake Engineering*, *Università degli Studi di Bologna*, Italy, 3-34, (2010).

T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, “Deprem İzolatör Sistemleri”, İnşaat Teknolojisi, 440FB0005, Ankara, (2011).

TDY2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018).

Vathi M., and Karamanos S.A., “Seismic Response of Unanchored Liquid Storage Tanks”, *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Division Conference*, Boston, Massachusetts, USA, July 19-23, (2015).

Veletsos A., “Seismic effects in flexible liquid storage tanks,” in *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Rome, Italy, June, (1974).

Veletsos A. and Yang J., “Dynamics of fixed-base liquid storage tanks”, in *Proceedings of the US–Japan Seminar for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems*, Tokyo, Japan, November, (1976).

Veletsos, A. S., “Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks”, *Guidelines for Seismic Design of Oil and Gas Pipeline System*, ASCE, NY, 255-370, (1984).

Veletsos, A. S. and Kumar, A., “Dynamic Response of Vertically Excited Liquid Storage Tanks”, *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, California, 7, 453-459, (1984).

Veletsos, A. S., and Tang, Y. "Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid-storage tanks." *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(4), 473-496, doi:10.1002/eqe.4290190402, (1990).

Wang, Y. P., “Fundamentals of Seismic Base Isolation”, *National Science Council*, (2002).

Wartsila Corporation, “Small and Medium Scale LNG Terminals”, Hiililaiturinkuja 2 FI-00180, Helsinki, Finland, (2018).

Westergaard, H.M., “Water pressures on dams during earthquakes,”

Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), 98(2), Washington D.C., USA, (1933).

Yang, Y. M., “Latest Tank Design For The World’s Largest 270,000m³ Full Containment LNG Tank”, International Gas Union Research Conference (IGRC), Seoul, (2011).

Yücesoy, A., “Sismik İzolatörler ile Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Antakya, (2005).

Zeiny, A., “Factors Affecting The Nonlinear Seismic Response of Unanchored Tanks”, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle, USA, July, (2003).

Zhao, Y., Li, H. N., Fu, X., Zhang, S., Mercan, O., “Seismic analysis of a large LNG tank considering the effect of liquid volume”, *Hindawi*, Article ID 8889055, 1-18, doi:10.1155/2020/8889055, (2020).

Zhou, Y., Li, X. and Chen, Z. (2018), “Seismic responses analysis of base-isolated LNG storage tank”, *Proceeding of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, Springer, Singapore, May

Zhou, Y., Li, H., Zhang S., Mercan O. and Caiyan, Z., “Seismic analysis of a large LNG tank considering different site conditions”, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 10(22), 8121, doi:10.3390/app10228121, (2020).



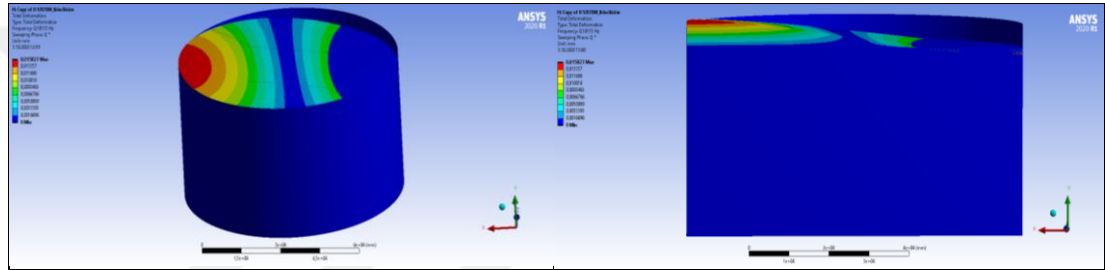
EKLER

EK A: Modal Analiz Sonuçları

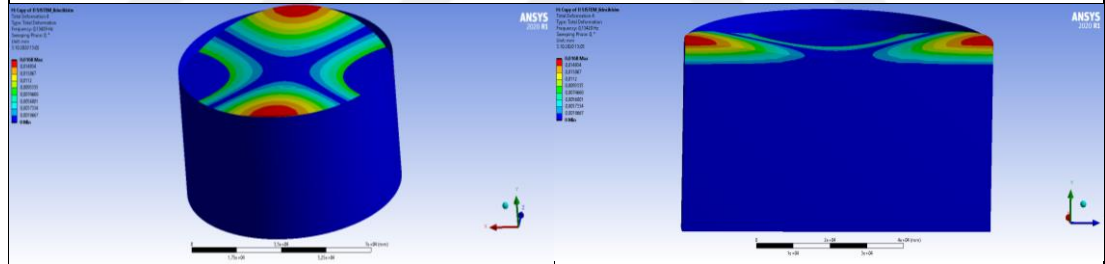
EK A1 HDRB İzolatörlü Sistemin Modları

ANSYS Workbench program analiz sonucu HDRB izolatörlü çelik tankın ve LNG sıvısının periyot ve frekansları Şekil A1.1-12’de, betonarme duvar, temel ve çatının periyot ve frekansları Şekil A1.13-15’de gösterilmiştir.

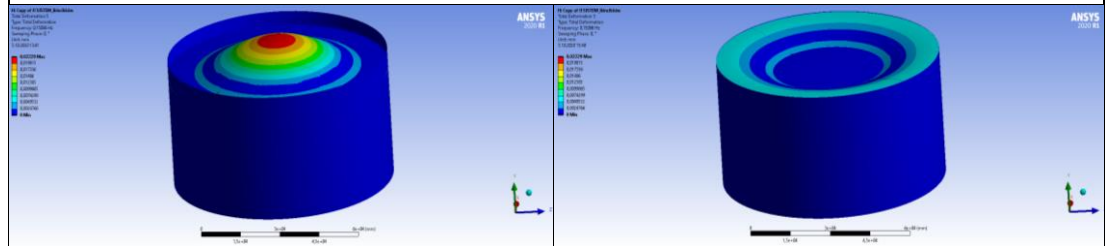
- LNG sıvısının taşınımli modlar



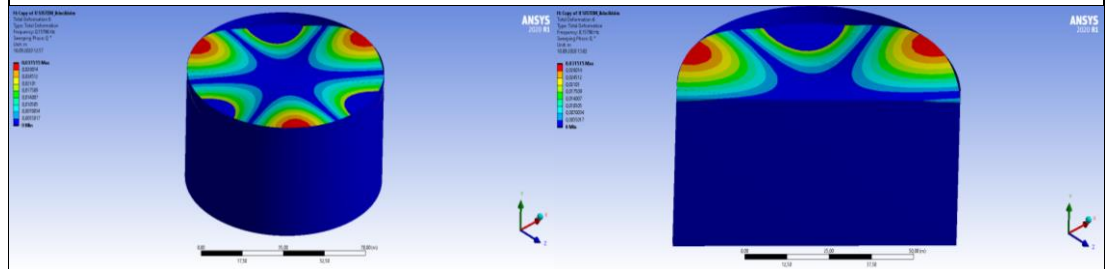
Şekil A1.1: LNG sıvısının 1. çalkalanma frekansı $f: 0.1011\text{Hz}$ ($T: 9.888\text{s}$)



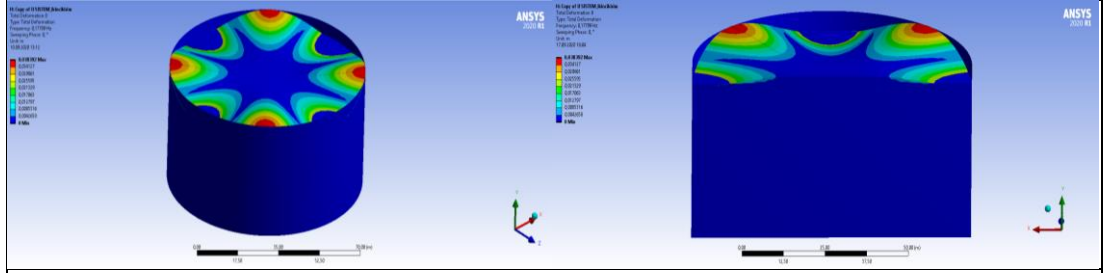
Şekil A1.2: LNG sıvısının 2. çalkalanma frekansı $f: 0.1343\text{Hz}$ ($T: 7.447\text{s}$)



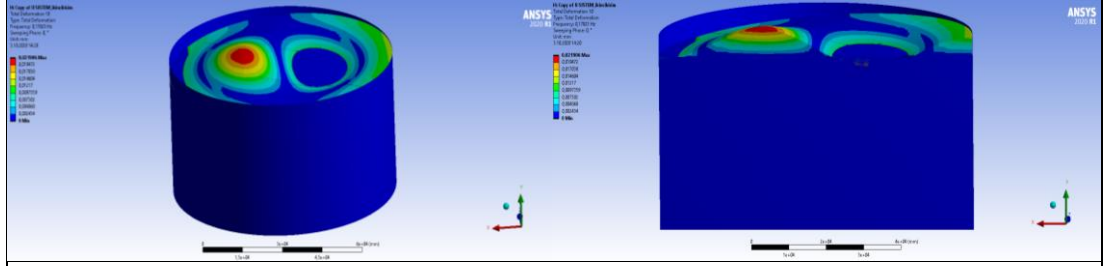
Şekil A1.3: LNG sıvısının 3. çalkalanma frekansı $f: 0.1509\text{Hz}$ ($T: 6.629\text{s}$)



Şekil A1.4: LNG sıvısının 4. çalkalanma frekansı $f: 0.1580\text{Hz}$ ($T: 6.33\text{s}$)

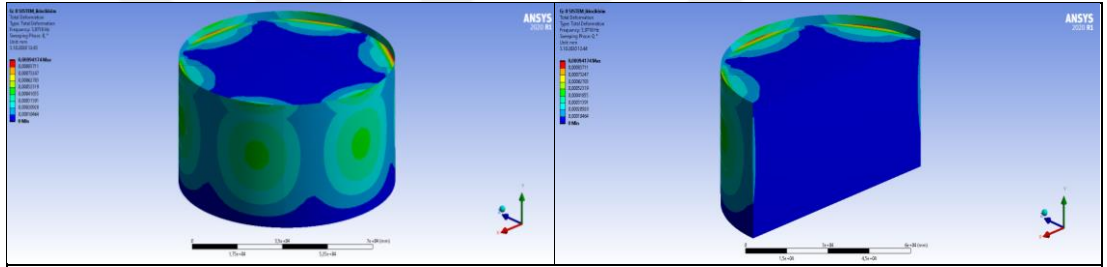


Şekil A1.5: LNG sıvısının 5. çalkalanma frekansı f : 0.1780Hz (T: 5.618s)

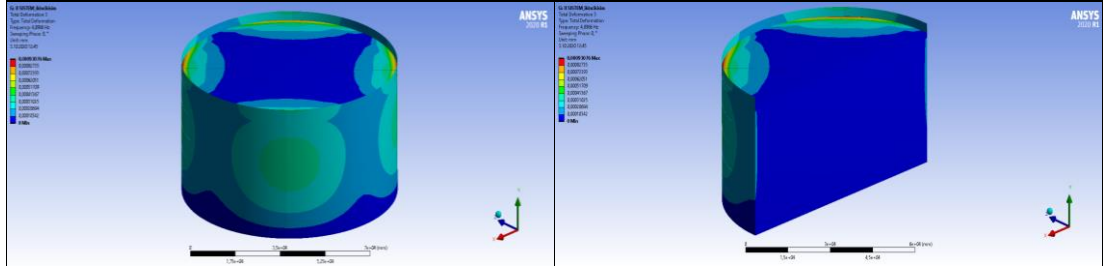


Şekil A1.6: LNG sıvısının 6. çalkalanma frekansı f : 0.1782Hz (T: 5.612s)

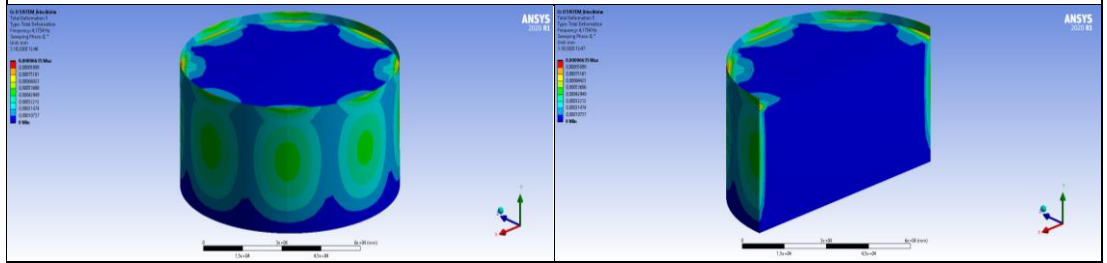
- Çelik tank ve LNG sıvısının itkisel modları



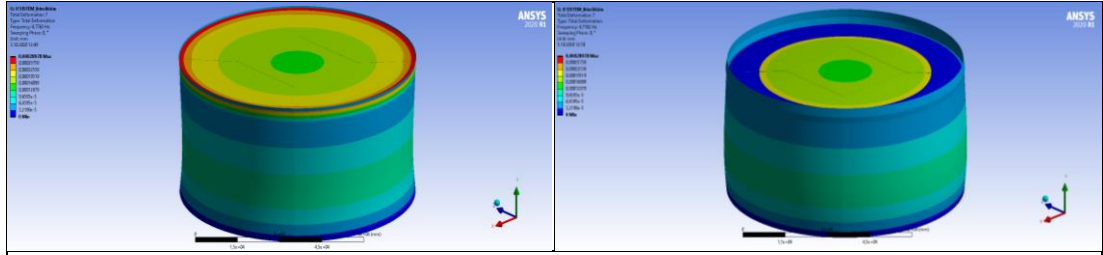
Şekil A1.7: LNG sıvı ve çelik tankın 1. salınım frekansı f : 3.9718 Hz (T: 0.252s)



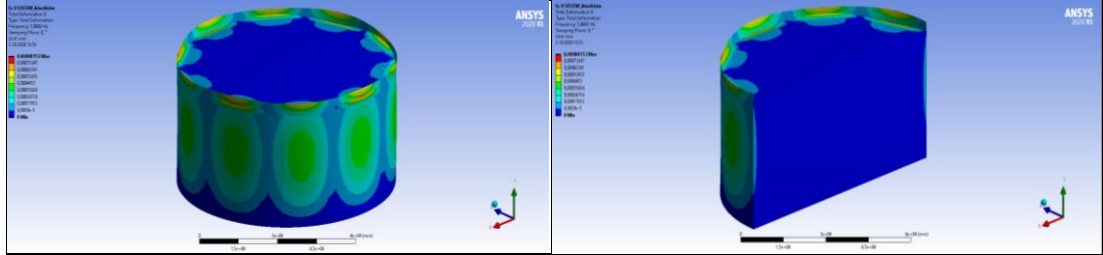
Şekil A1.8: LNG sıvı ve çelik tankın 2. salınım frekansı f : 4.0986 Hz (T: 0.244s)



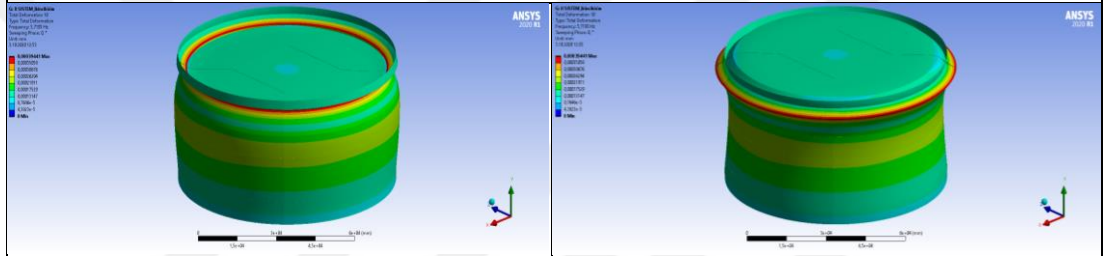
Şekil A1.9: LNG sıvı ve çelik tankın 3. salınım frekansı f : 4.1754 Hz (T: 0.239s)



Şekil A1.10: LNG sıvı ve çelik tankın 4. salınım frekansı f : 4.7762 Hz (T: 0.209s)

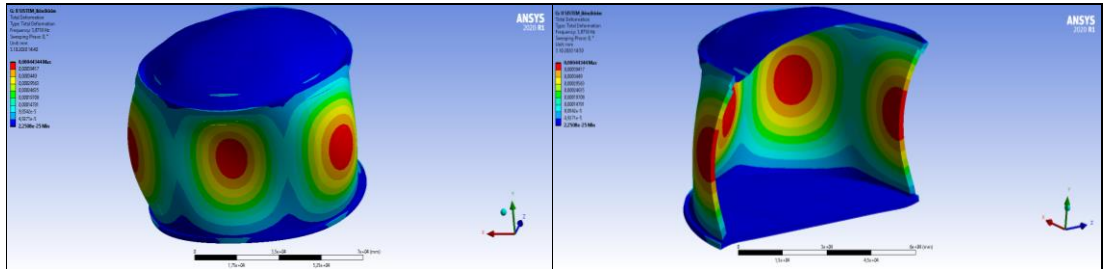


Şekil A1.11: LNG sıvı ve çelik tankın 5. salınım frekansı f : 5.0602Hz (T: 0.197s)

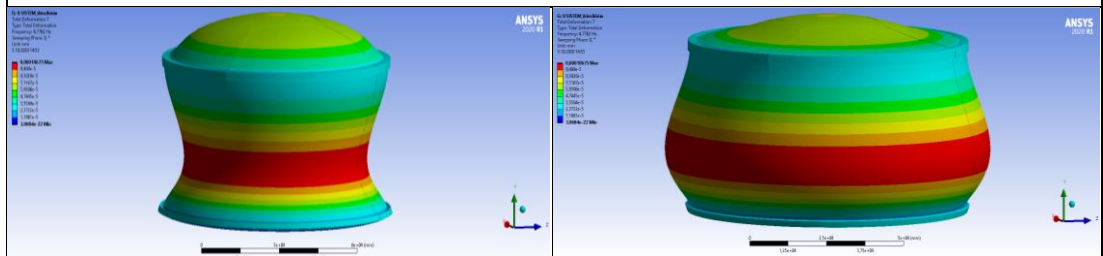


Şekil A1.12: LNG sıvı ve çelik tankın 6. salınım frekansı f : 5.7193 Hz (T: 0.175s)

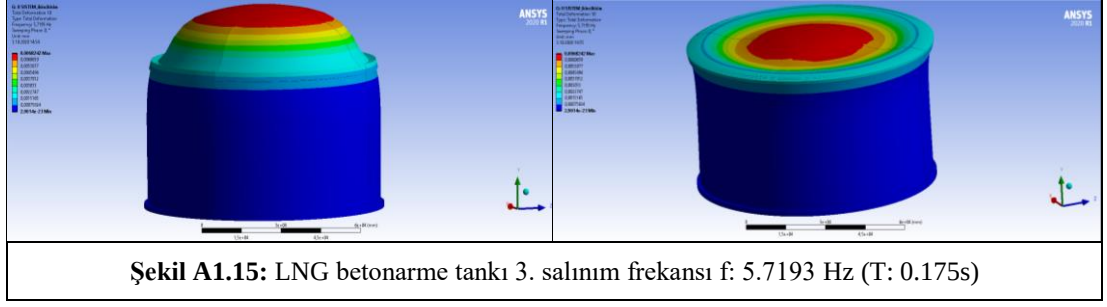
- Dış betonarme tank



Şekil A1.13: LNG betonarme tankı 1. salınım frekansı f : 3.9718 Hz (T: 0.252s)



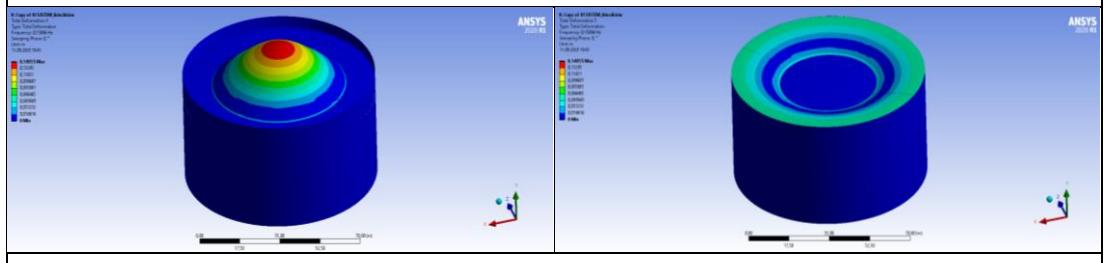
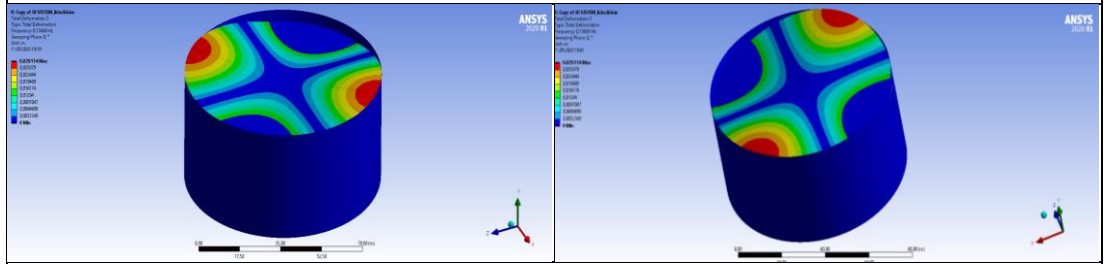
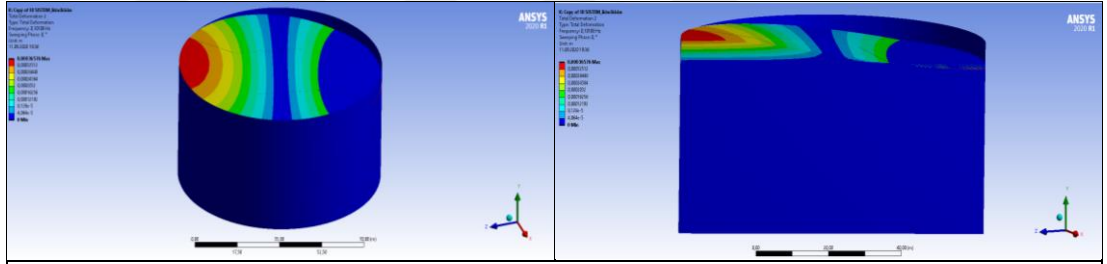
Şekil A1.14: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f : 4.7762 Hz (T: 0.209s)

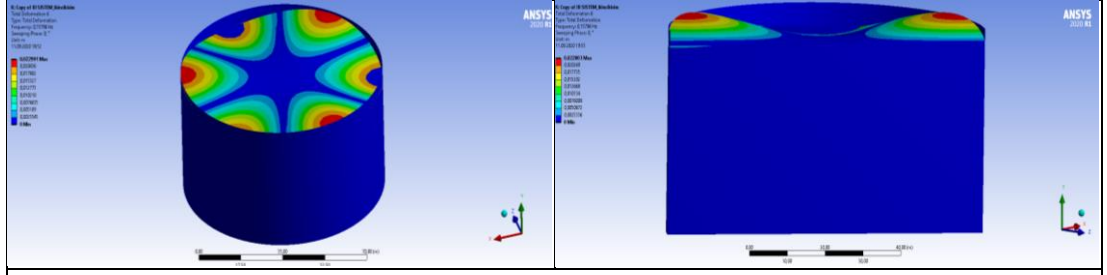


EK A2 LRB İzolatörlü Sistemin Modları

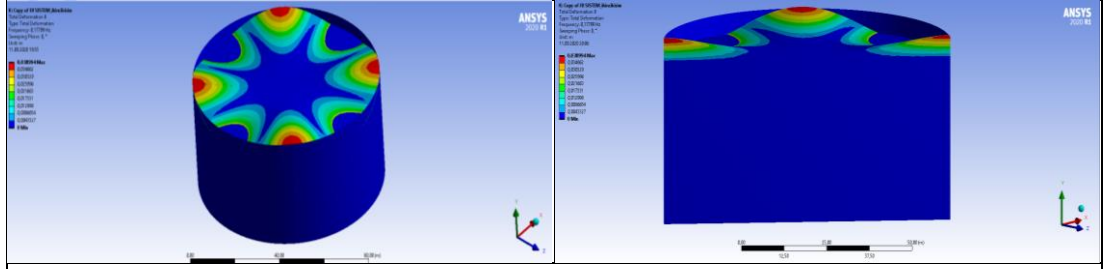
ANSYS Workbench program analiz sonucu LRB izolatörlü çelik tankın ve LNG sıvısının periyot ve frekansları Şekil A2.1-12’de, betonarme duvar, temel ve çatının periyot ve frekansları Şekil A2.13-15’de gösterilmiştir.

- LNG sıvısının çalkalanma modları

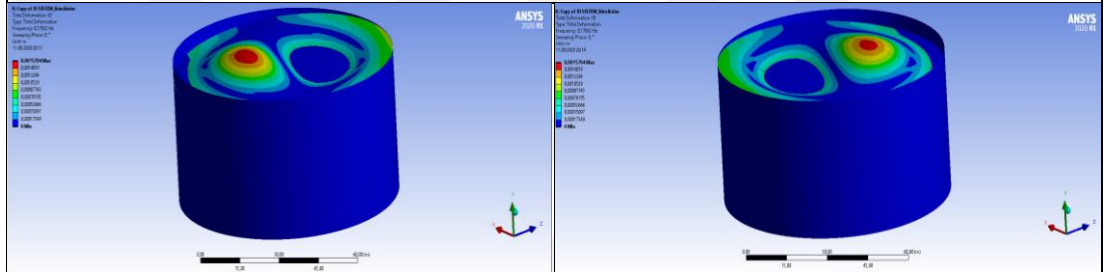




Şekil A2.4: LNG sıvısının 4. çalkalanma frekansı f: 0.1580Hz (T: 6.331s)

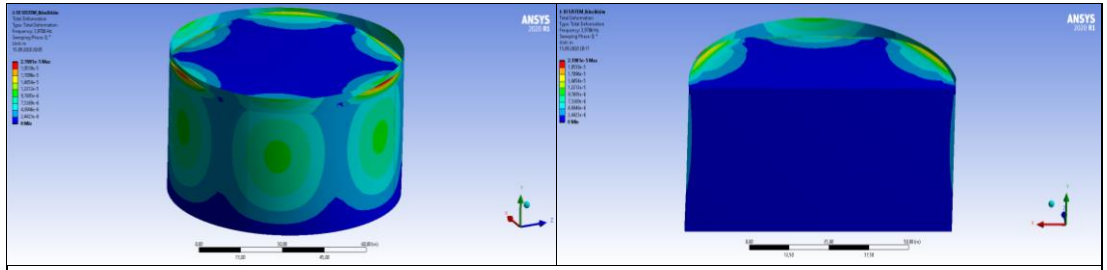


Şekil A2.5: LNG sıvısının 5. çalkalanma frekansı f: 0.1780Hz (T: 5.618s)

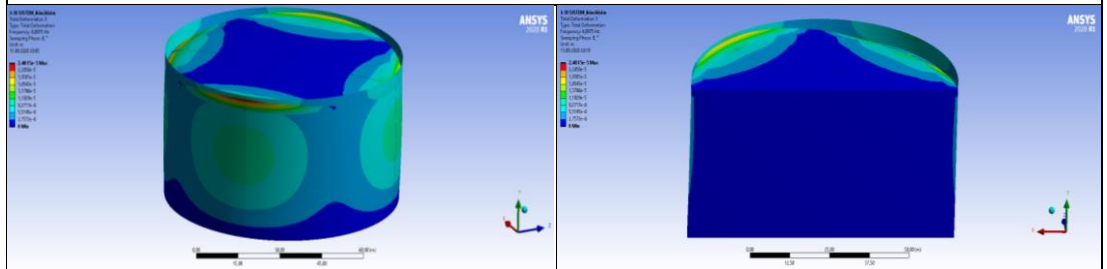


Şekil A2.6: LNG sıvısının 6. çalkalanma frekansı f: 0.1782Hz (T: 5.612s)

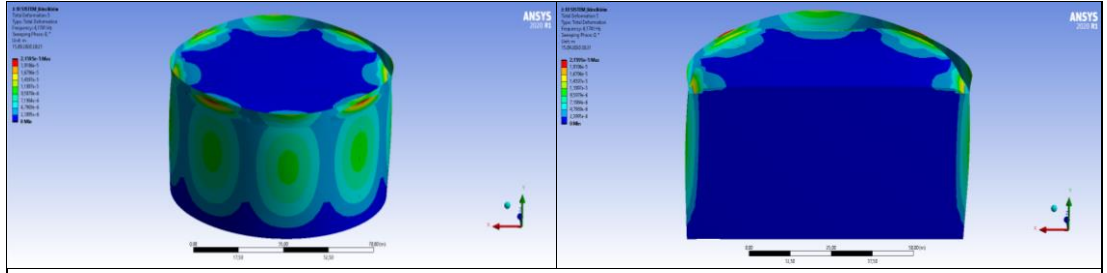
- Çelik tank ve LNG sıvısının beraber hareket ettiği modlar



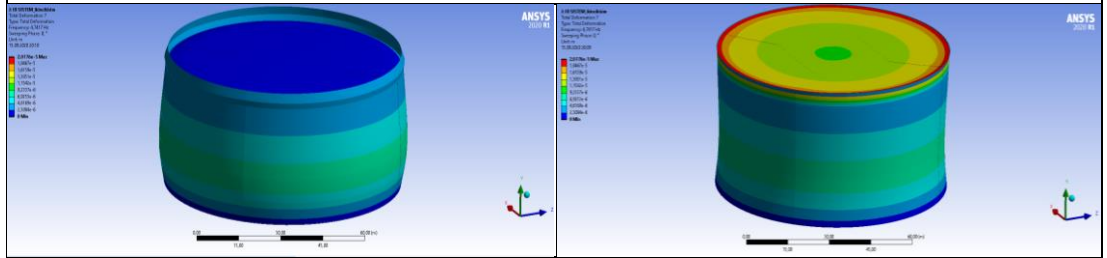
Şekil A2.7: LNG sıvı ve çelik tankın 1. salınım frekansı f: 3.9706 Hz (T: 0.252s)



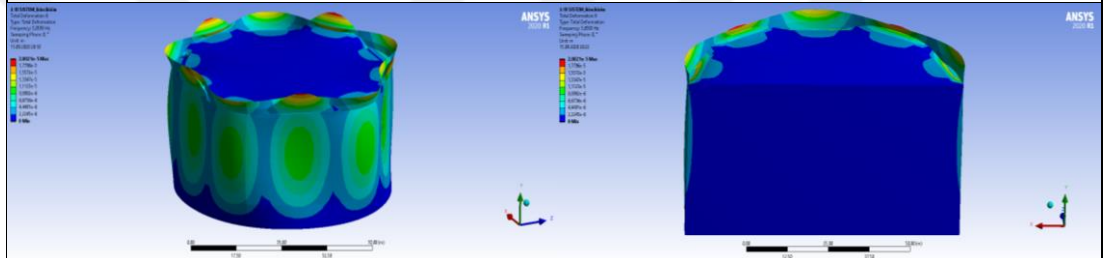
Şekil A2.8: LNG sıvı ve çelik tankın 2. salınım frekansı f: 4.0975 Hz (T: 0.244s)



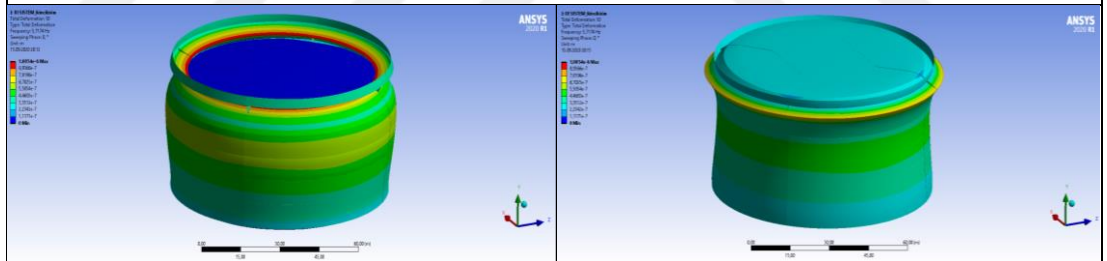
Şekil A2.9: LNG sıvı ve çelik tankın 3. salınım frekansı $f: 4.1741 \text{ Hz}$ ($T: 0.240\text{s}$)



Şekil A2.10: LNG sıvı ve çelik tankın 4. salınım frekansı $f: 4.7417 \text{ Hz}$ ($T: 0.211\text{s}$)

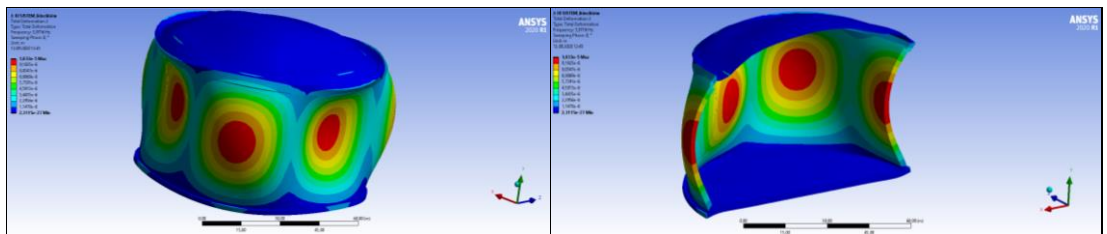


Şekil A2.11: LNG Sıvı ve Çelik Tankın Beraber 5. Salınım Frekansı $f: 5.0593 \text{ Hz}$ ($T: 0.198\text{s}$)

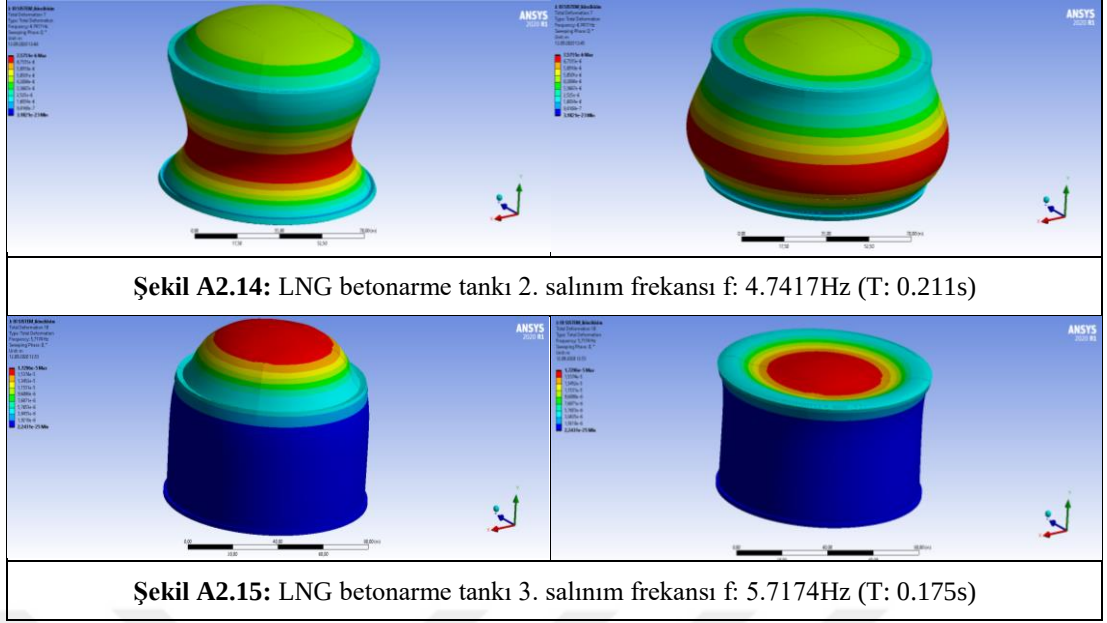


Şekil A2.12: LNG sıvı ve çelik tankın 6. salınım frekansı $f: 5.7174 \text{ Hz}$ ($T: 0.175\text{s}$)

- Dış betonarme tank



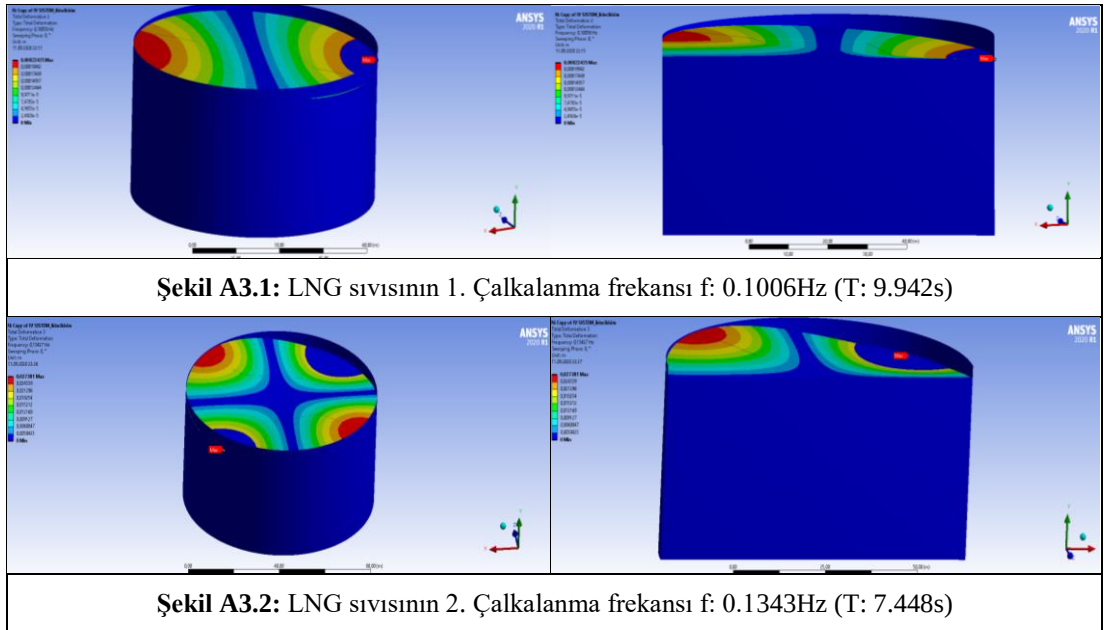
Şekil A2.13: LNG betonarme tankı 1. salınım frekansı $f: 3.9716 \text{ Hz}$ ($T: 0.252\text{s}$)

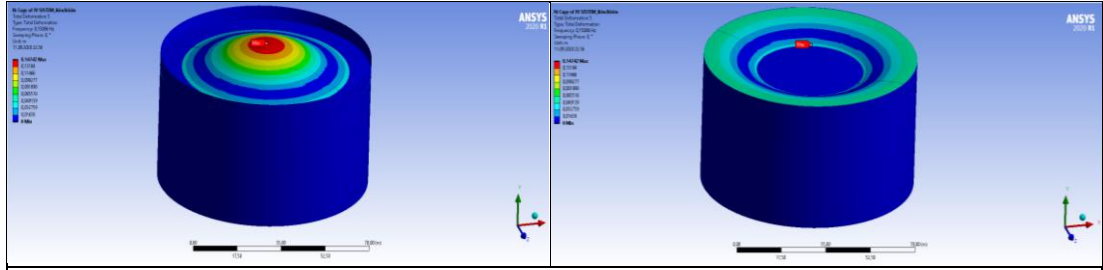


EK A3 FPS İzolatörlü Sistemin Modları

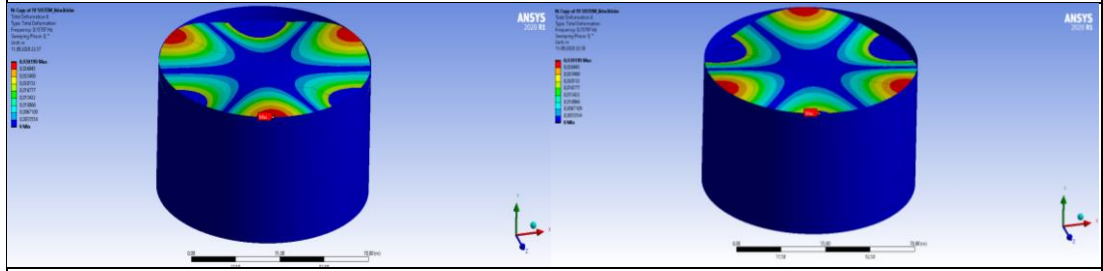
ANSYS Workbench program analiz sonucu FPS izolatörlü çelik tankın ve LNG sıvısının periyot ve frekansları Şekil A3.1-12’de, betonarme duvar, temel ve çatının periyot ve frekansları Şekil A3.13-15’de gösterilmiştir.

- LNG sıvısının çalkalanma modları

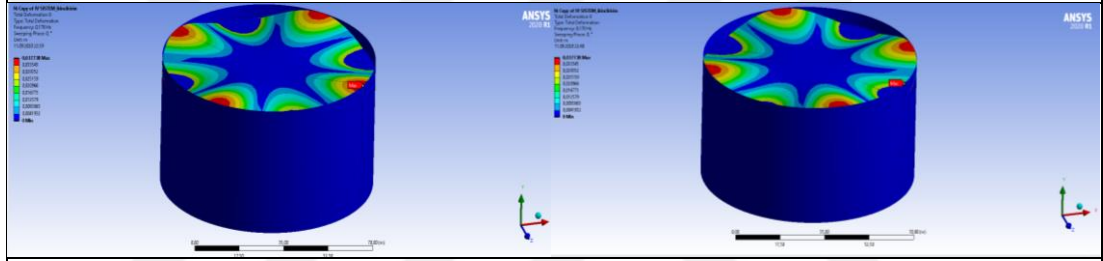




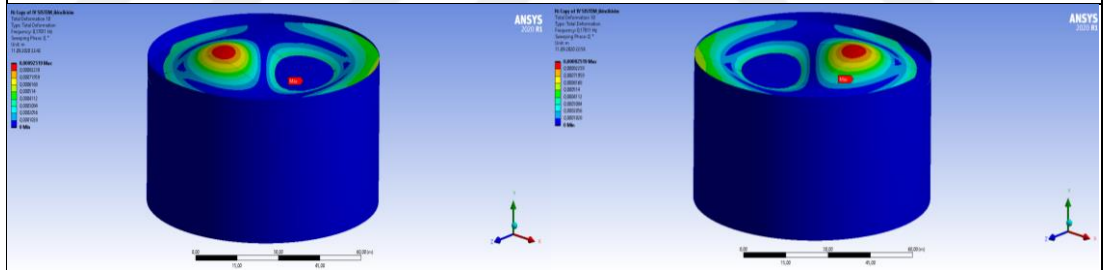
Şekil A3.3: LNG sıvısının 3. Çalkalanma frekansı f : 0.1509Hz (T: 6.629s)



Şekil A3.4: LNG sıvısının 4. Çalkalanma frekansı f : 0.1580Hz (T: 6.33s)

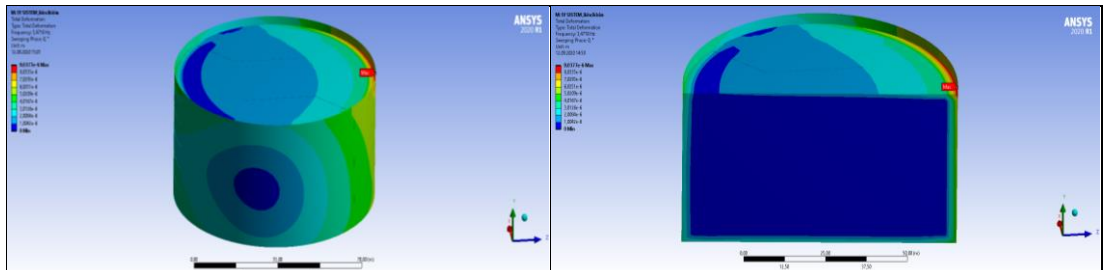


Şekil A3.5: LNG sıvısının 5. Çalkalanma frekansı f : 0.178Hz (T: 5.618s)

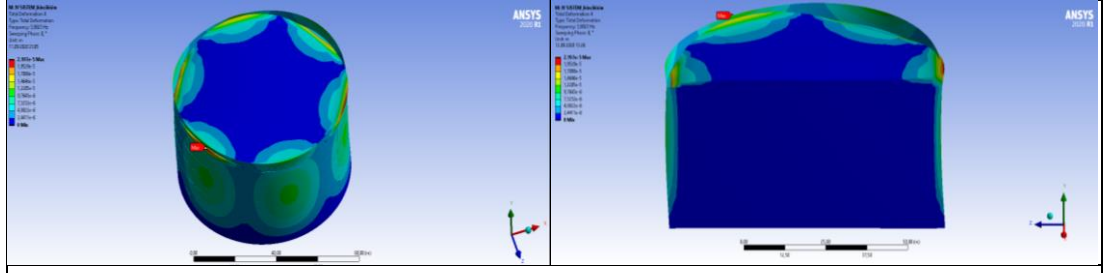


Şekil A3.6: LNG sıvısının 6. Çalkalanma frekansı f : 0.1781Hz (T: 5.615s)

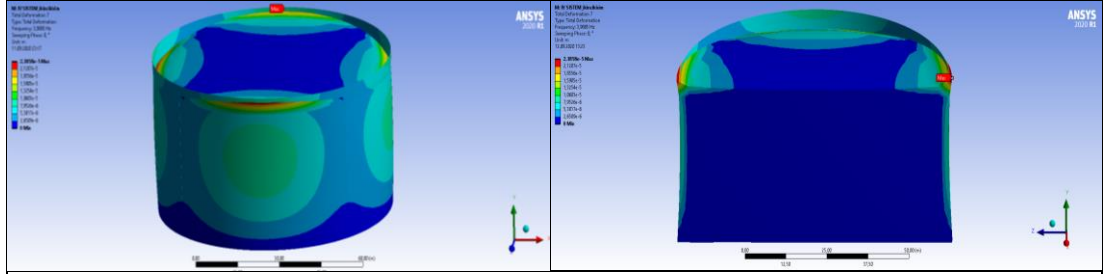
- Çelik tank ve LNG sıvısının modları



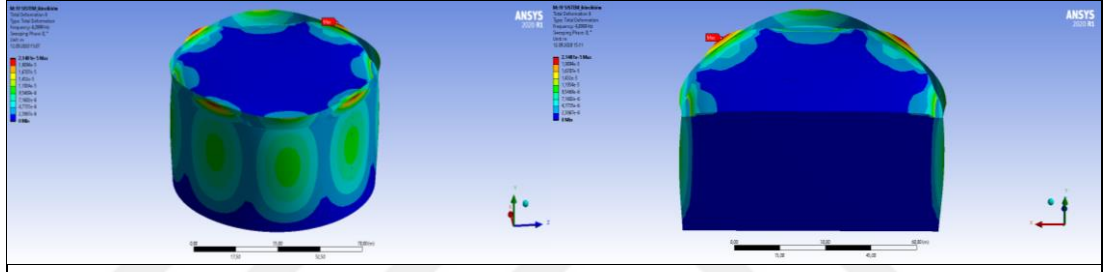
Şekil A3.7: LNG sıvısı ve çelik tankın 1. Salınım frekansı f : 3.4718 Hz (T: 0.288s)



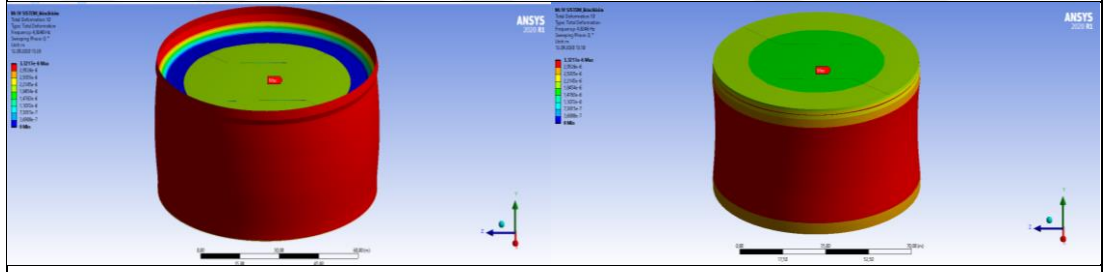
Şekil A3.8: LNG sıvısı ve çelik tankın 2. Salınım frekansı f : 3.8823Hz (T: 0.258s)



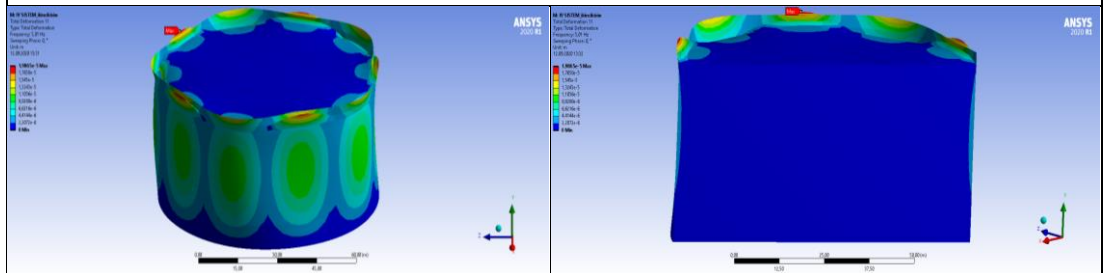
Şekil A3.9: LNG sıvısı ve çelik tankın 3. Salınım frekansı f : 3.9885Hz (T: 0.251s)



Şekil A3.10: LNG sıvısı ve çelik tankın 4. Salınım frekansı f : 4.0999 Hz (T: 0.244s)

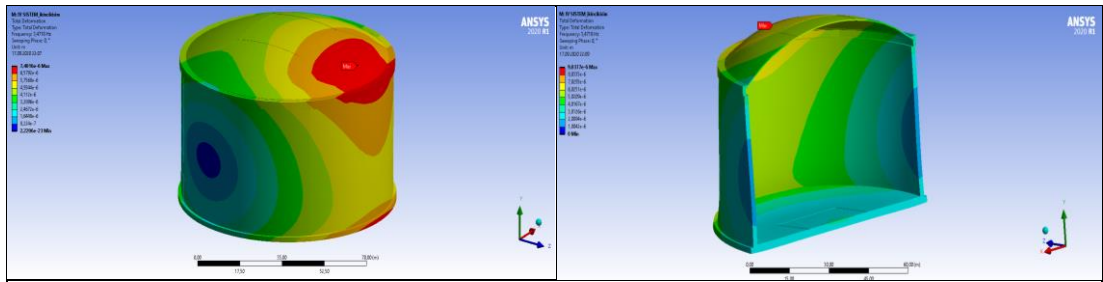


Şekil A3.11: LNG sıvısı ve çelik tankın 5. Salınım frekansı f : 4.8246 Hz (T: 0.207s)

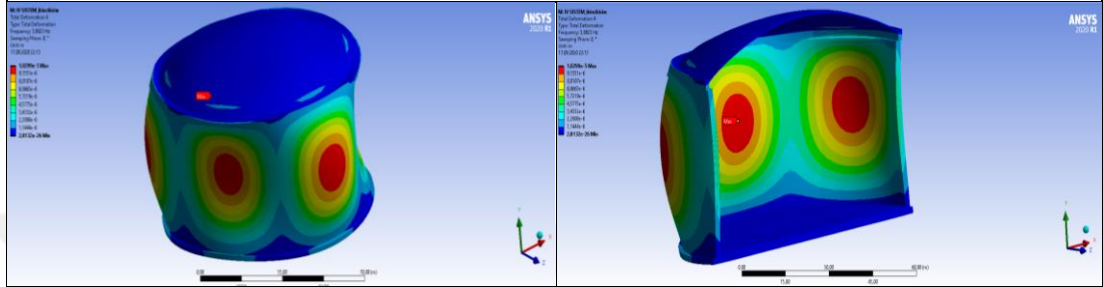


Şekil A3.12: LNG sıvısı ve çelik tankın 6. Salınım frekansı f : 5.01 Hz (T: 0.200s)

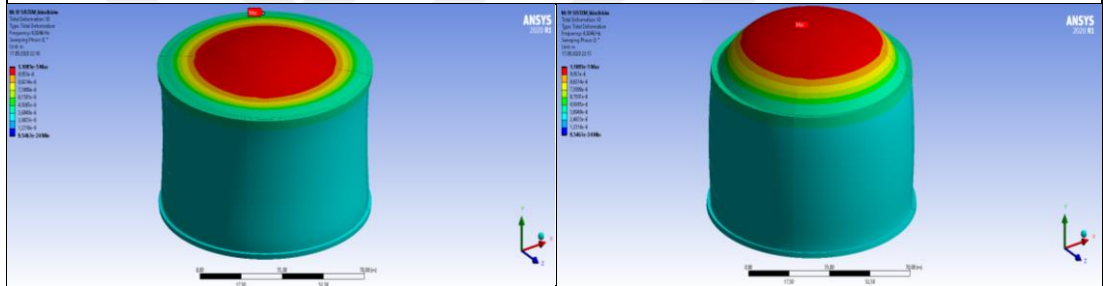
- Dış betonarme tank



Şekil A3.13: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f : 3.4718Hz (T: 0.288s)



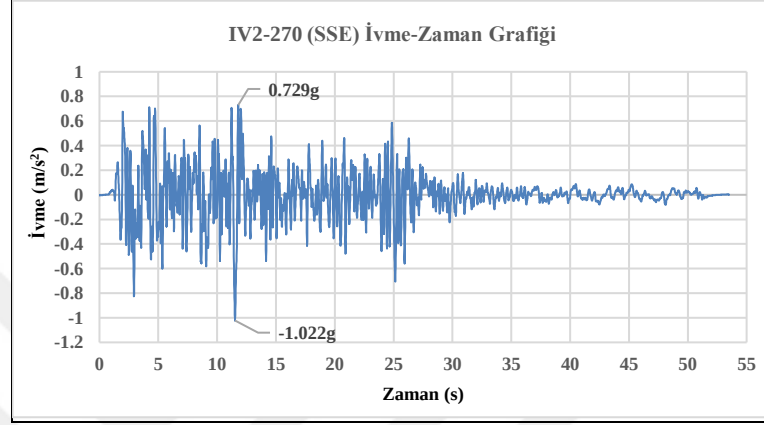
Şekil A3.14: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f : 3.8823Hz (T: 0.258s)



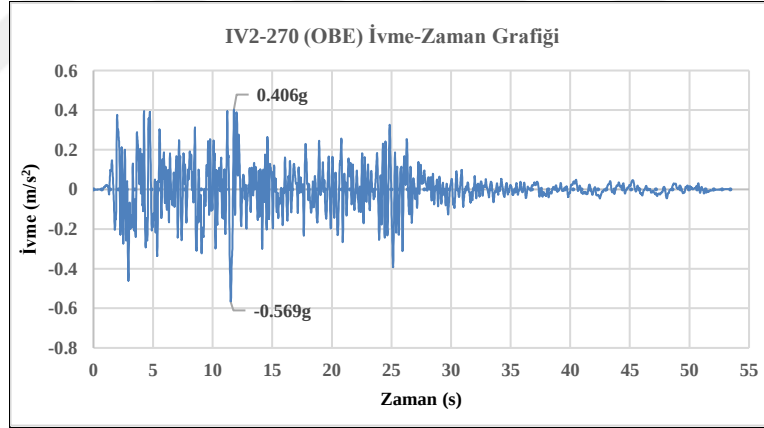
Şekil A3.15: LNG betonarme tankı 2. salınım frekansı f : 4.8246Hz (T: 0.207s)

EK B: İvme-Zaman Grafikleri

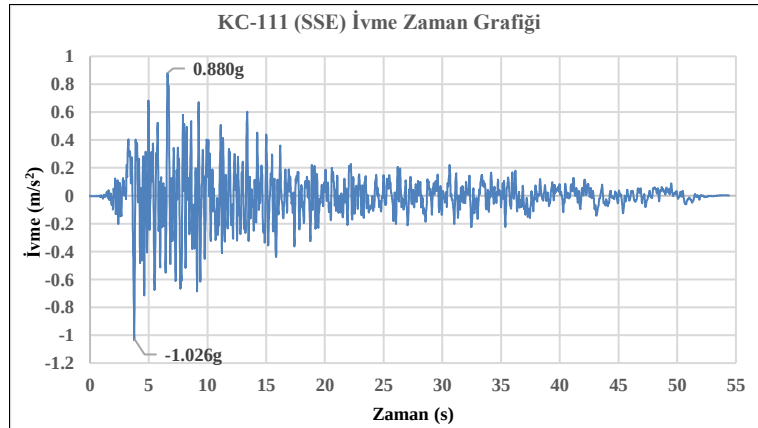
- SSE ve OBE'ye Göre 7 Adet Depremin Ölçeklendirilmiş İvme - Zaman Grafikleri



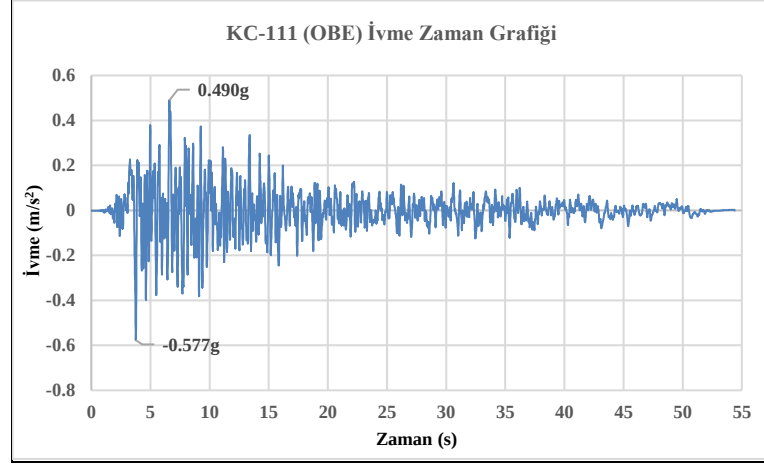
Şekil B.1: IV2-270-1940 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)



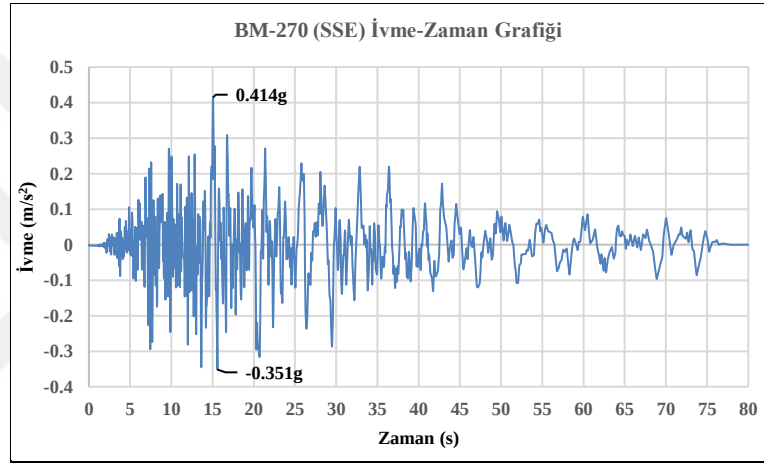
Şekil B.2: IV2-270-1940 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)



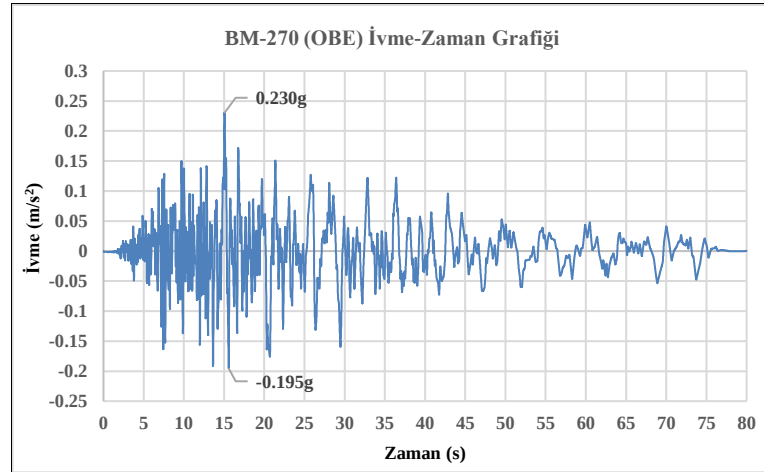
Şekil B.3: KC-111-1952 Taft Lincoln School istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)



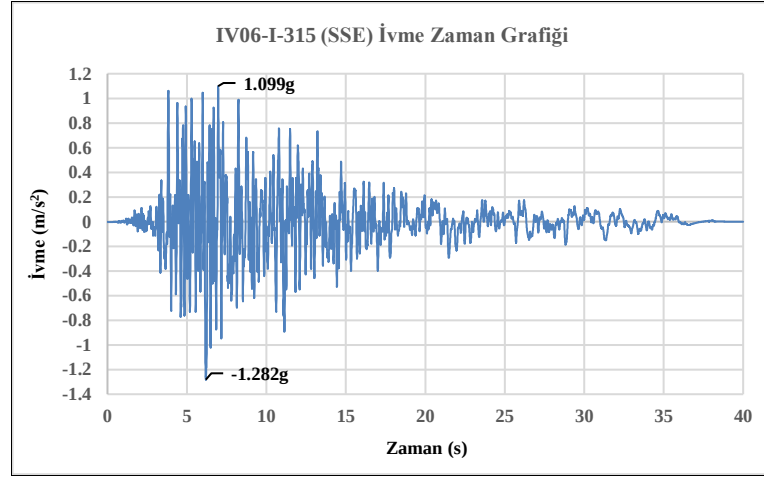
Şekil B.4: KC-111-1952 Taft Lincoln School istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)



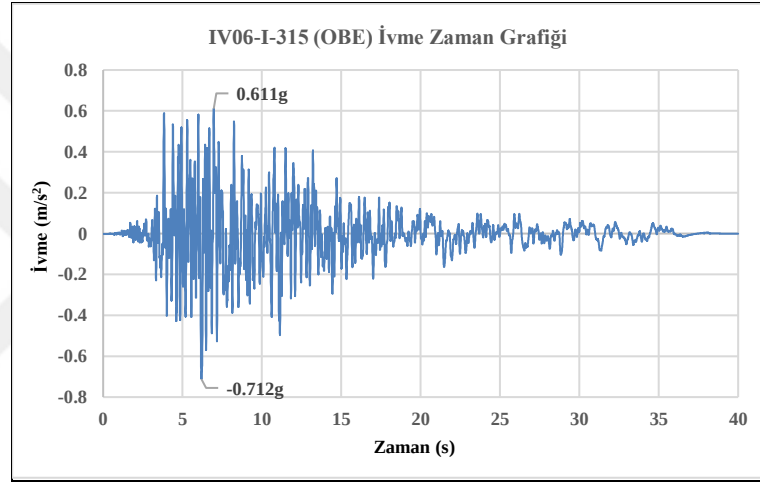
Şekil B.5: BM-270-1968 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)



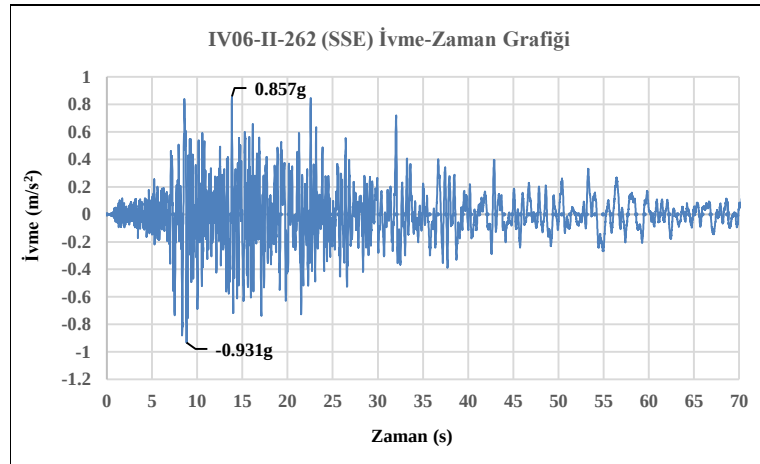
Şekil B.6: BM-270-1968 El Centro Array istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)



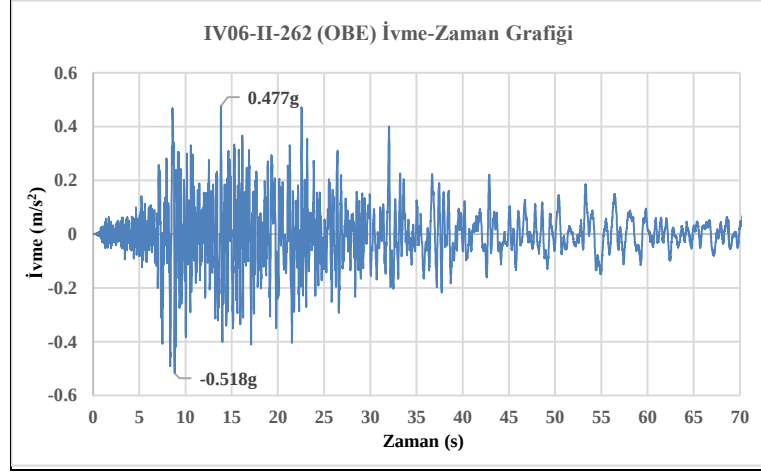
Şekil B.7: IV06-315-1979 Calexico Fire istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)



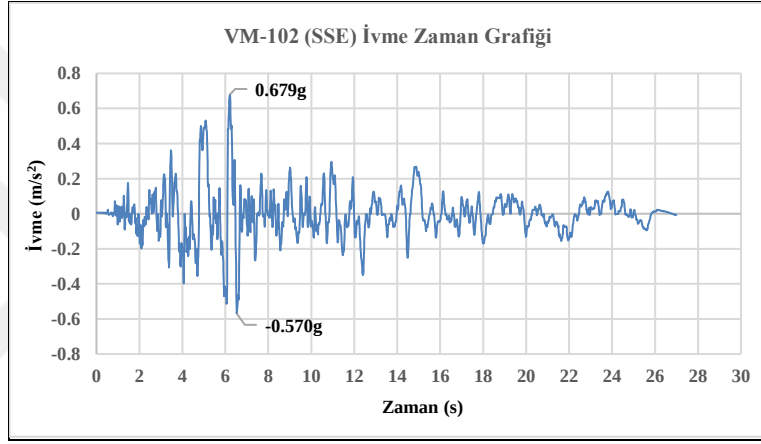
Şekil B.8: IV06-315-1979 Calexico Fire istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)



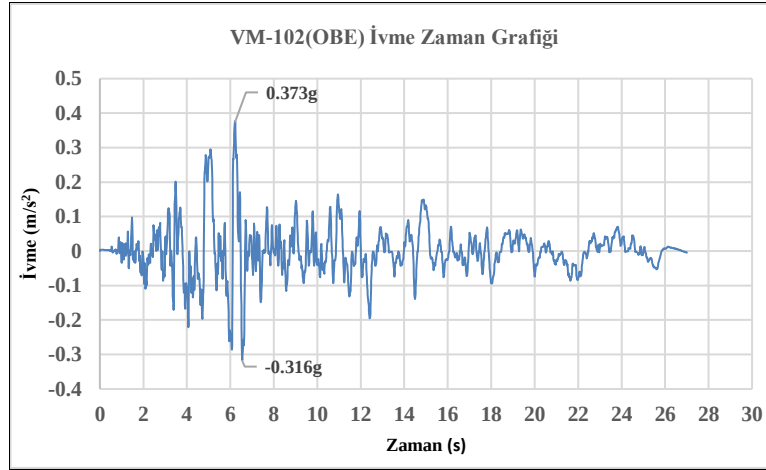
Şekil B.9: IV06-262-1979 Delta istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)



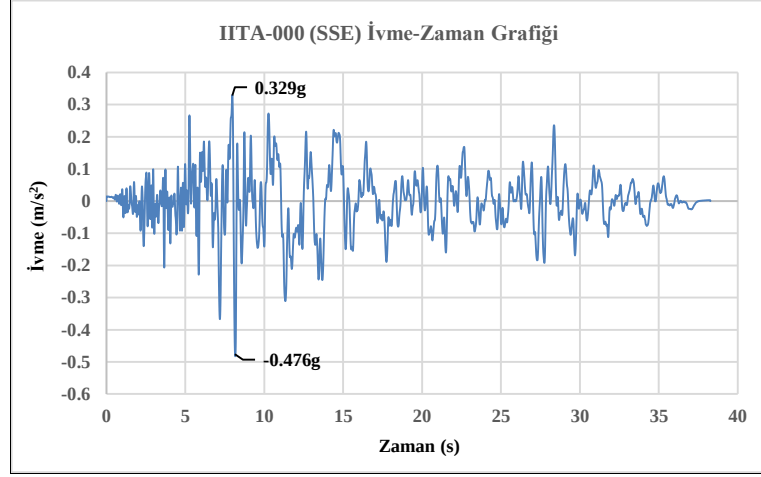
Şekil B.10: IV06-262-1979 Delta istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)



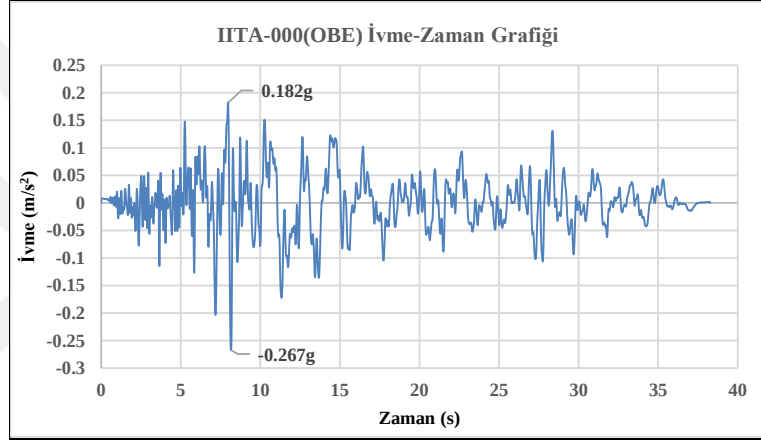
Şekil B.11: VM-102-1979 Chihuahua ivme-zaman grafiği (SSE)



Şekil B.12: VM-102-1979 Chihuahua ivme-zaman grafiği (OBE)



Şekil B.13: IITA-000-1980 Bisaccia istasyonu ivme-zaman grafiği (SSE)



Şekil B.14: IITA-000-1980 Bisaccia istasyonu ivme-zaman grafiği (OBE)

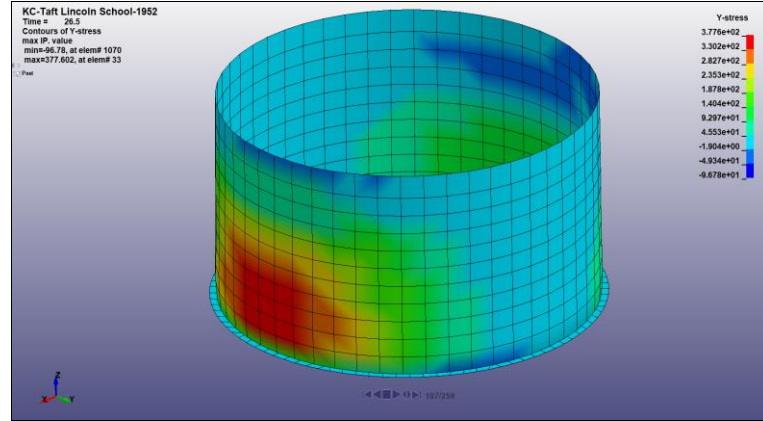
EK C: Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

EK C1 Sabit Mesnetli LNG Tankın Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

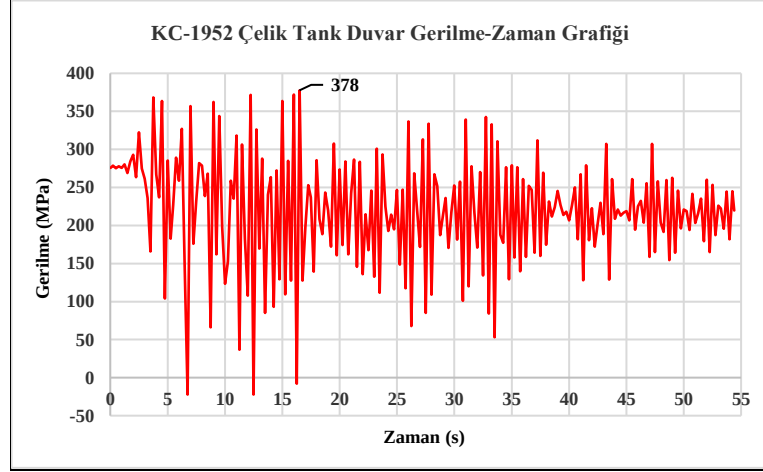
Kern County depremi Taft Lincoln School istasyonu, Borrego Mtn depremi El Centro Array istasyonu, Imperial Valley depremi Calexico Fire istasyonu, Imperial Valley Depremi Delta istasyonu, Victoria depremi Chihuahua istasyonu ve Irpina depremi Bisaccia istasyonu ivme kayıtlarının 2475 yılda bir oluşacak depreme göre (SSE deprem performans seviyesi) ölçeklendirilmiş sabit (ankrajlı) mesnetli LNG tank modelinin lineer olmayan analiz sonuçlarına çelik tank duvar gerilmesi, LNG sıvısı dalga yüksekliği, çelik tank duvar yanal deformasyonu, çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman farkı ve tabanda oluşan maksimum kesme kuvvet analizleri Şekil C1.1-54’de model ve grafiklerde verilmiştir.

C1-A Kern County Depremi Taft Lincoln School İstasyonu -1952

- Çelik tank duvar gerilme analizi

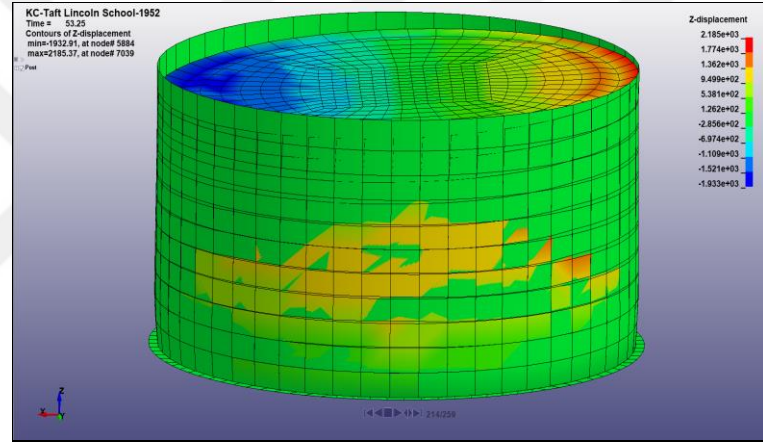


Şekil C1.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

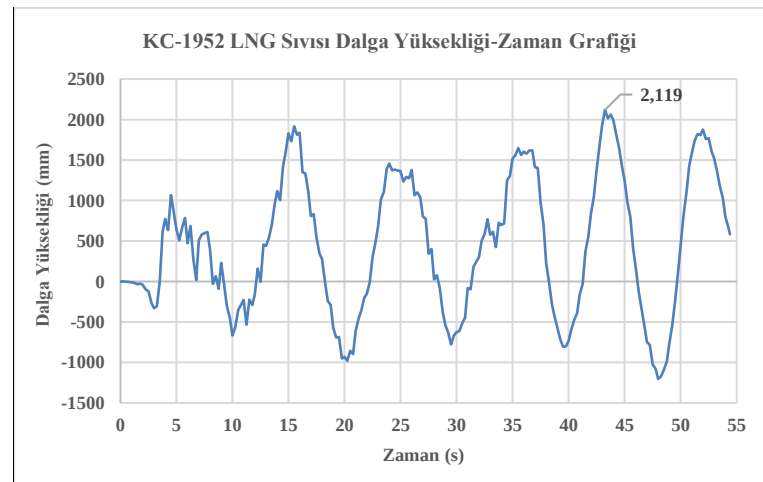


Şekil C1.2: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

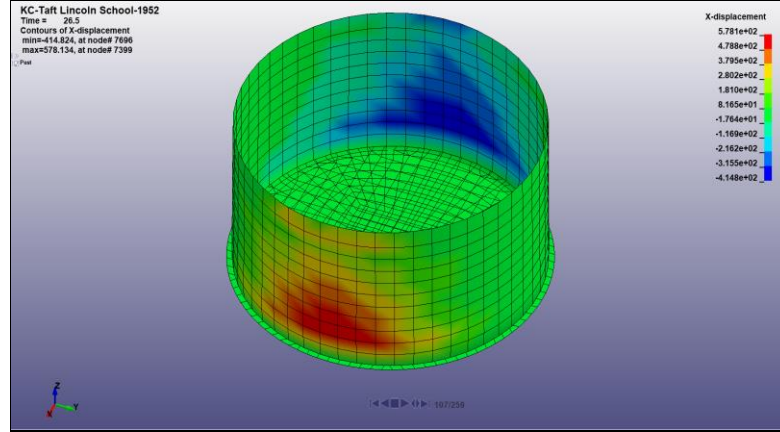


Şekil C1.3: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

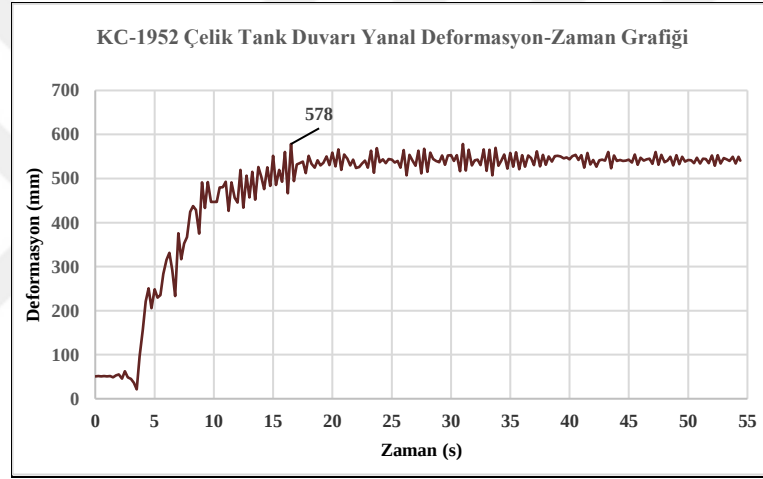


Şekil C1.4: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

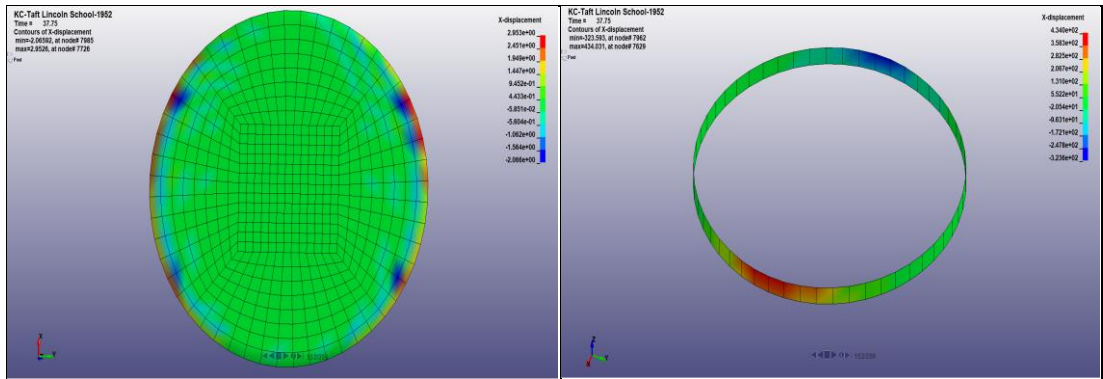


Şekil C1.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

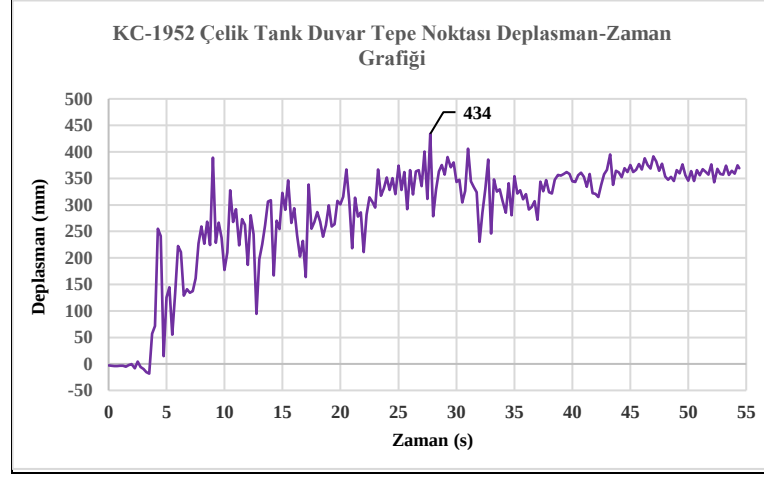


Şekil C1.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C1.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



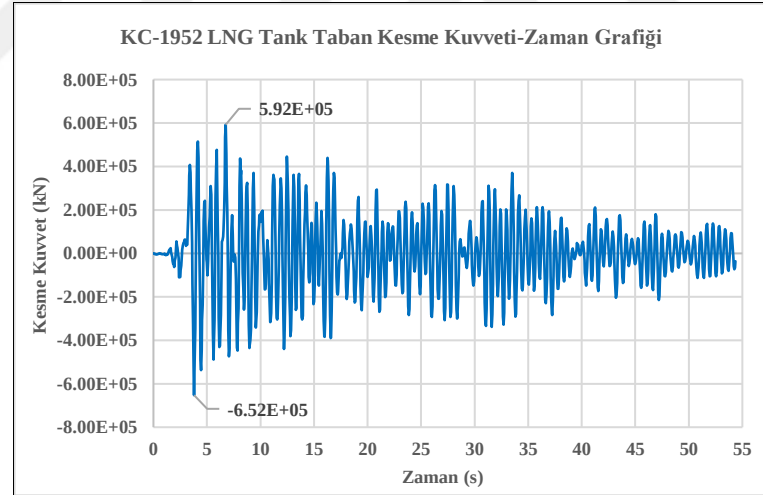
Şekil C1.8: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank tabanı maksimum yatay deplasmanı: 0 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum yatay deplasmanı: 434 mm

Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 434 mm

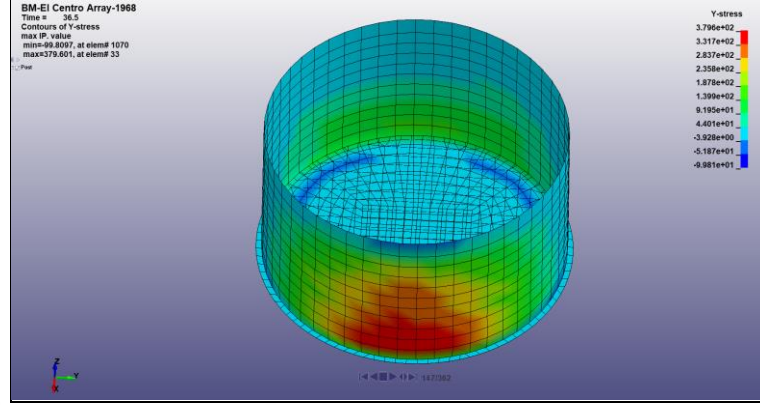
- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



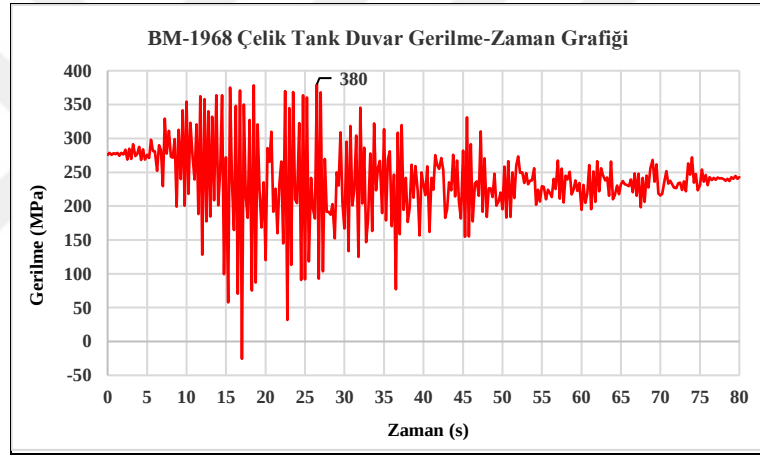
Şekil C1.9: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

C1-B Borrego Mtn Depremi El Centro Array İstasyonu -1968

- Çelik tank duvar gerilme analizi

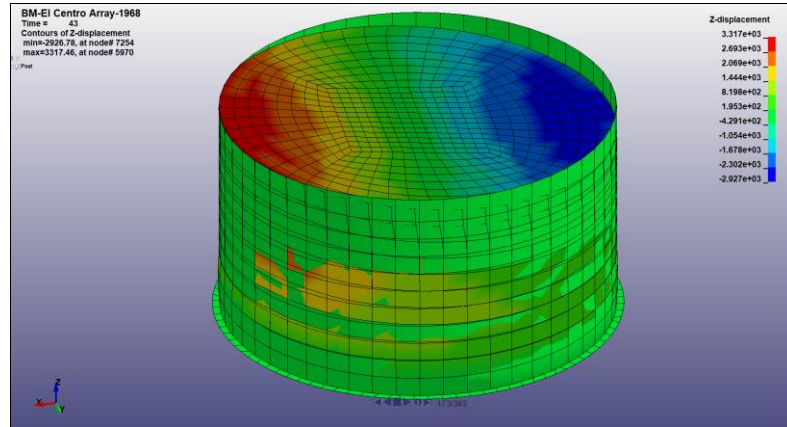


Şekil C1.10: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

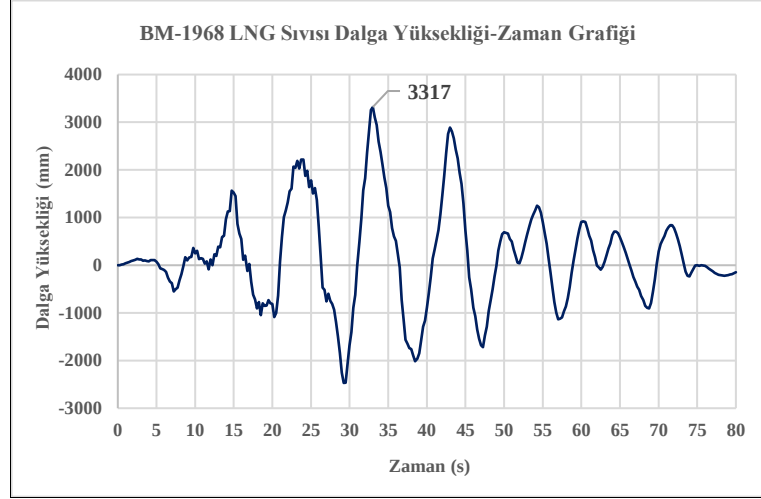


Şekil C1.11: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

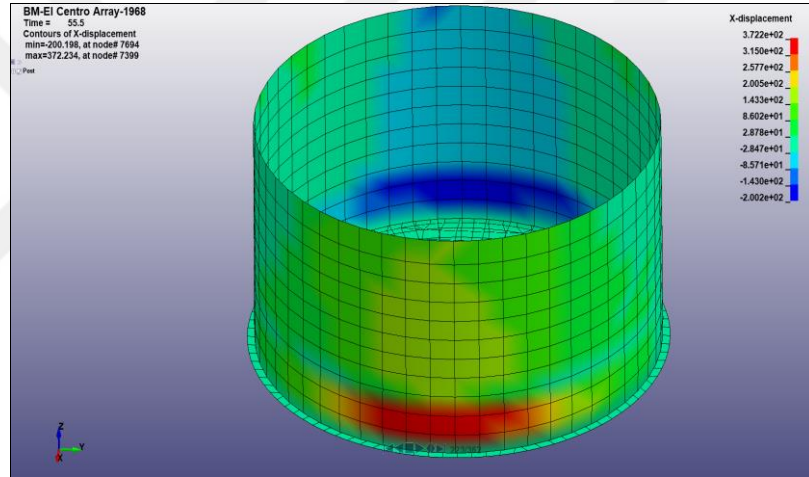


Şekil C1.12: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

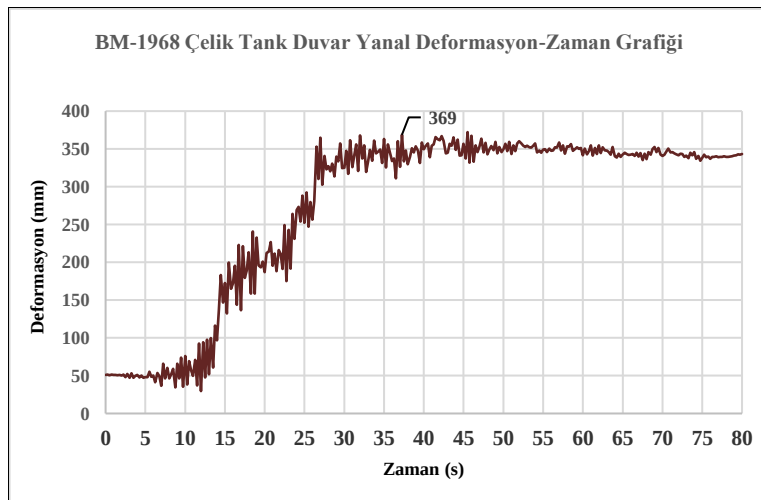


Şekil C1.13: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

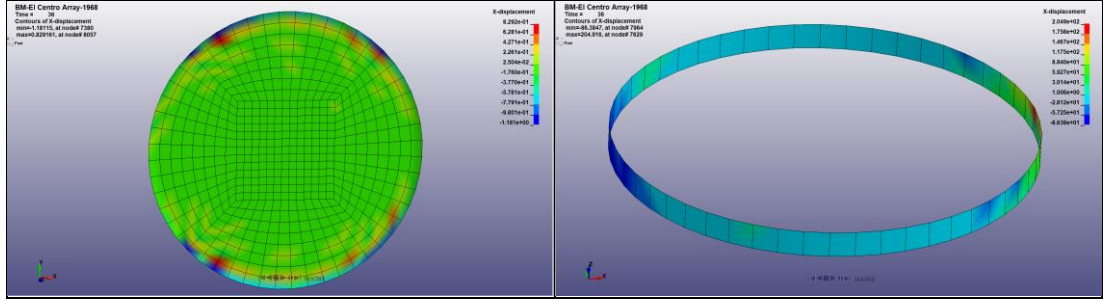


Şekil C1.14: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

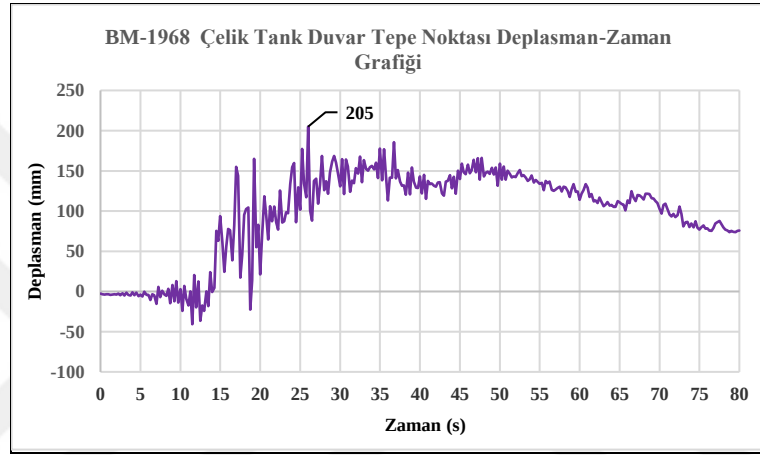


Şekil C1.15: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C1.16: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



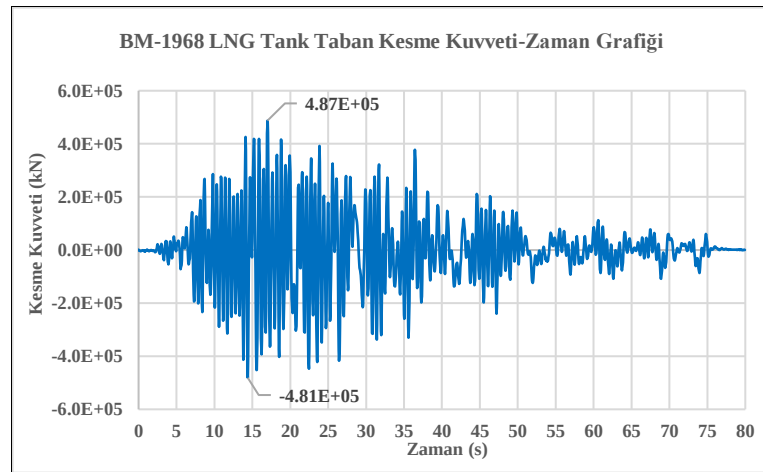
Şekil C1.17: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank tabanı maksimum yatay deplasmanı: 0 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum yatay deplasmanı: 205 mm

Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 205 mm

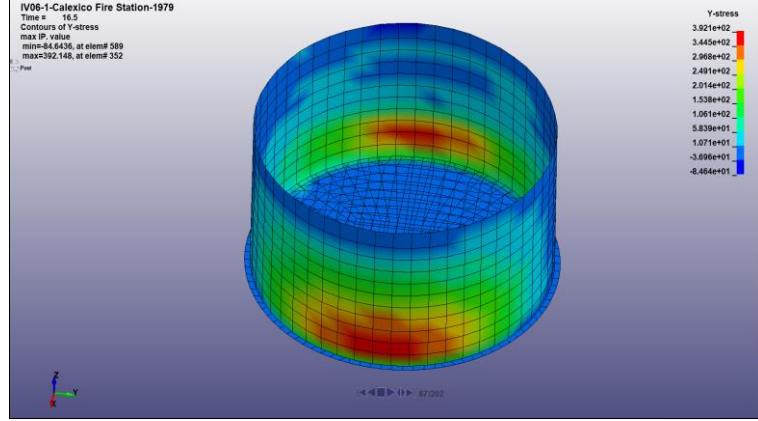
- LNG tank taban kesme kuvveti analizi



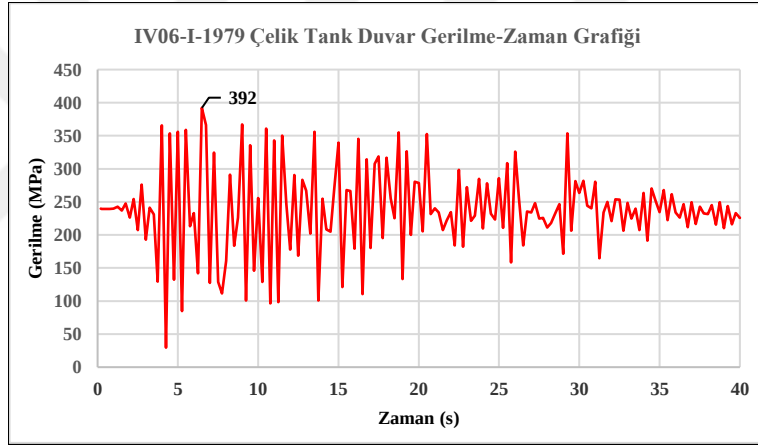
Şekil C1.18: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

C1-C Imperial Valley Depremi Calexico Fire İstasyonu – 1979

- Çelik tank duvar gerilme analizi

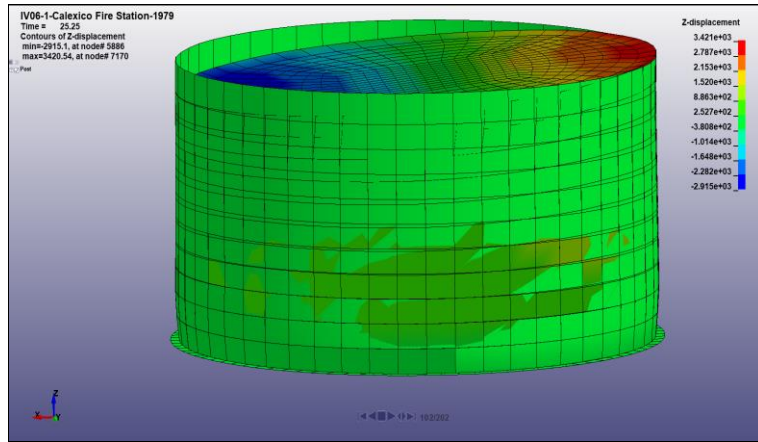


Şekil C1.19: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

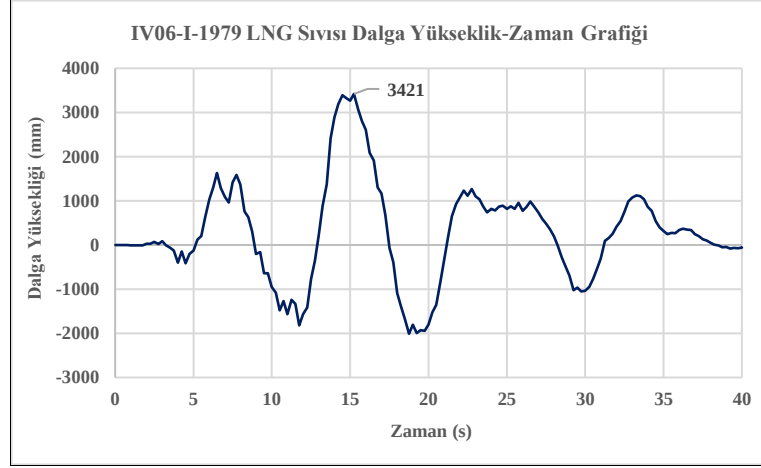


Şekil C1.20: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

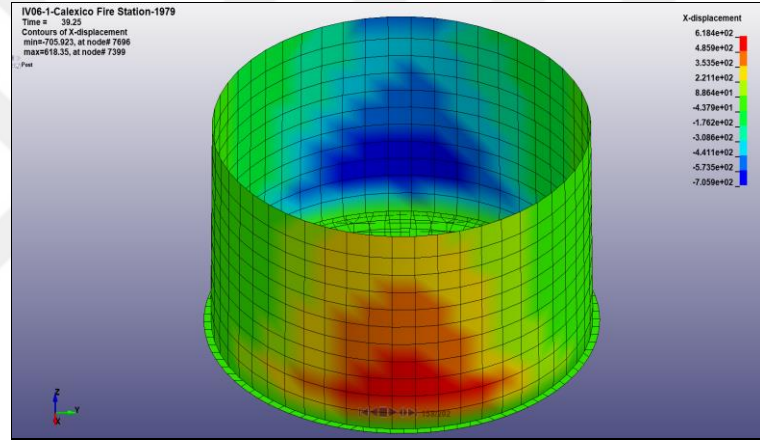


Şekil C1.21: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

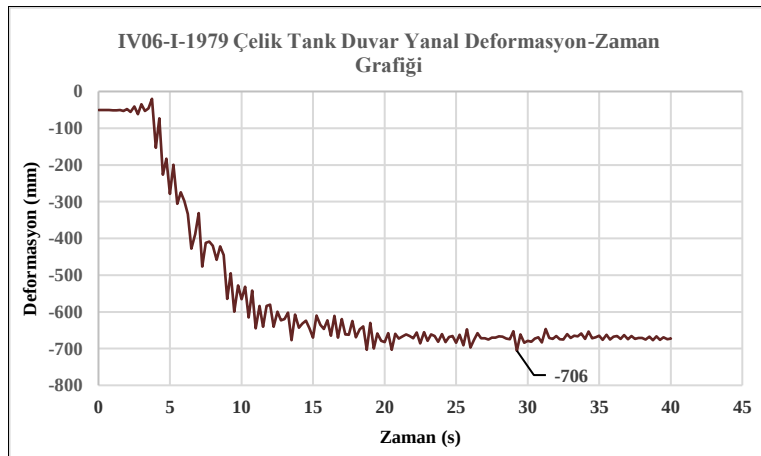


Şekil C1.22: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

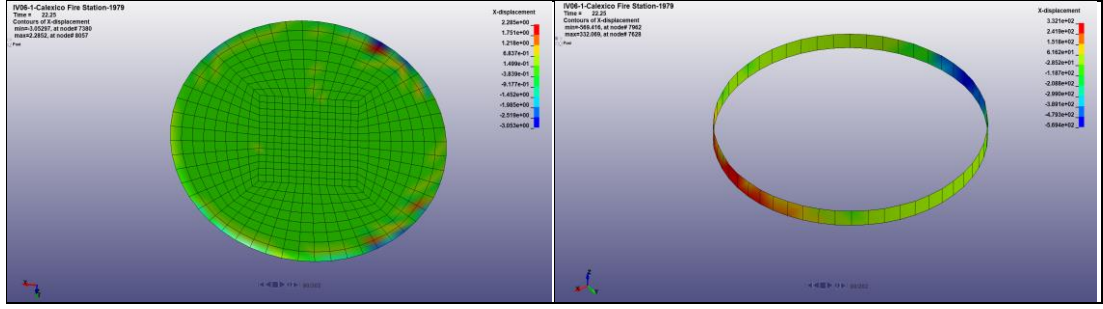


Şekil C1.23: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

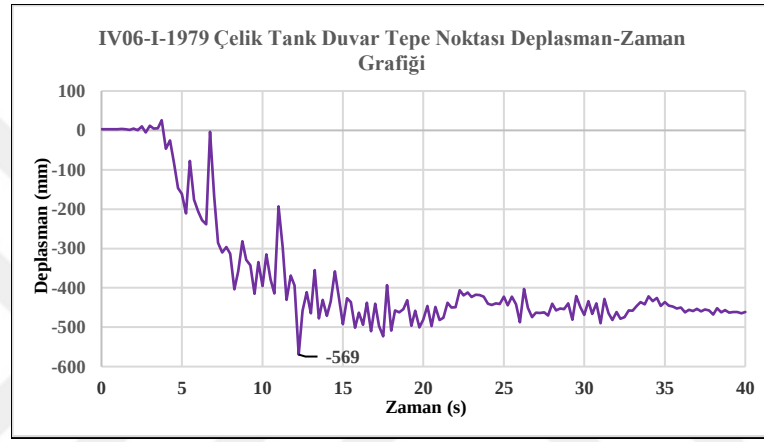


Şekil C1.24: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C1.25: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi modeli



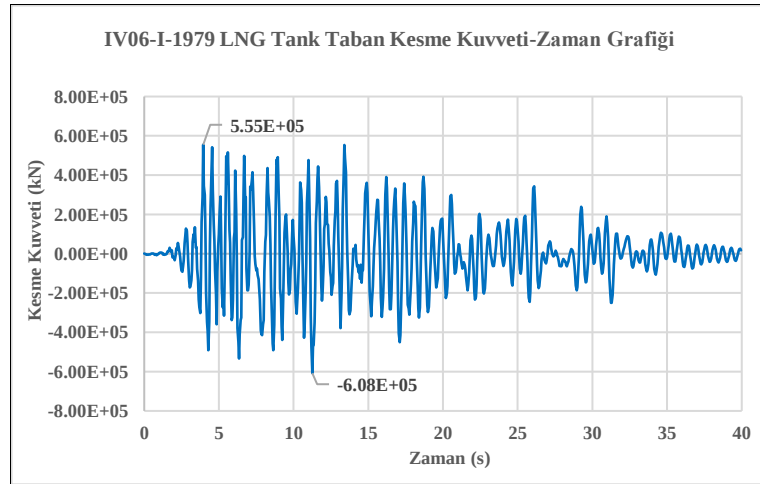
Şekil C1.26: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank taban maksimum yatay deplasmanı: 0 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum yatay deplasmanı: 569 mm

Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 569 mm

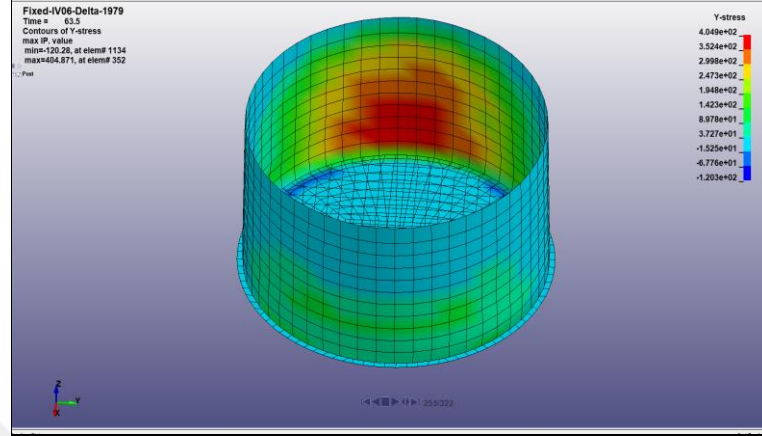
- LNG tank taban kesme kuvveti analizi



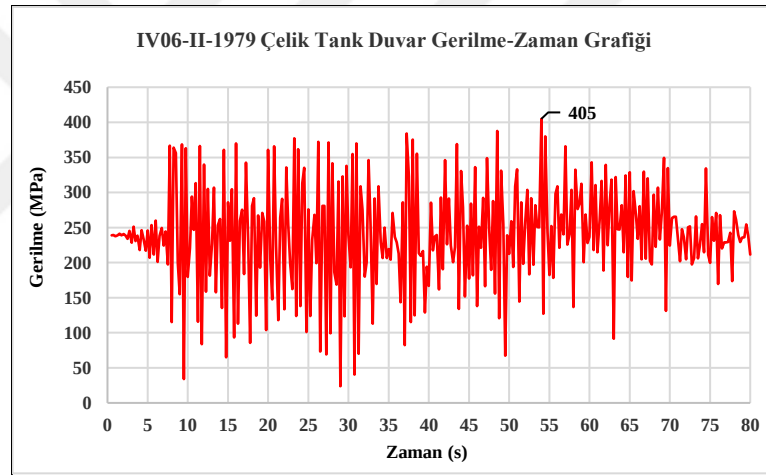
Şekil C1.27: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

C1-D Imperial Valley Depremi Delta İstasyonu - 1979

- Çelik tank duvar gerilme analizi

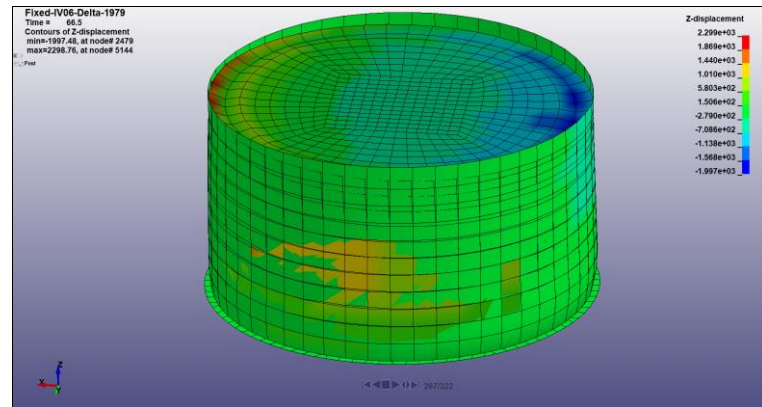


Şekil C1.28: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

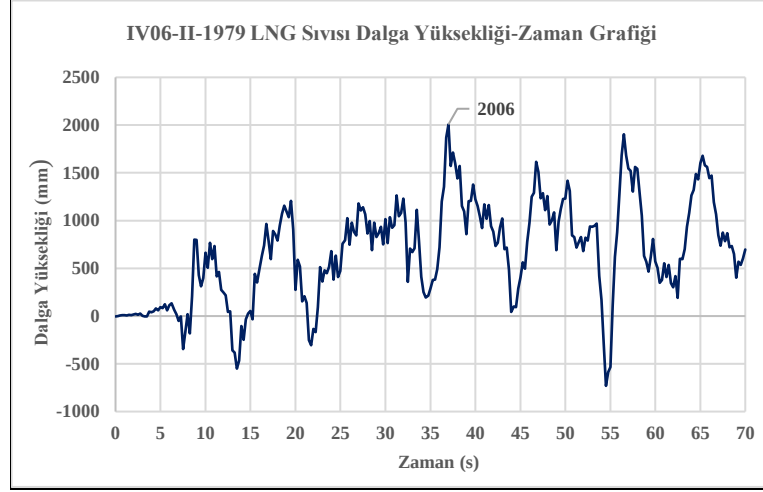


Şekil C1.29: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

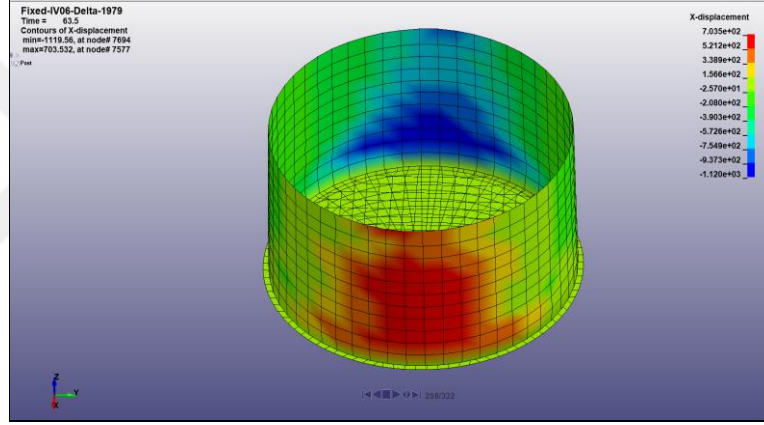


Şekil C1.30: LNG sıvısı dalga yüksekliği analiz modeli

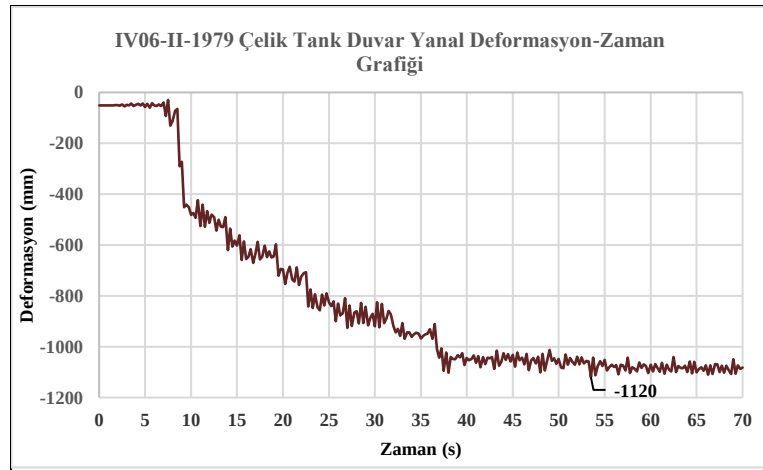


Şekil C1.31: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

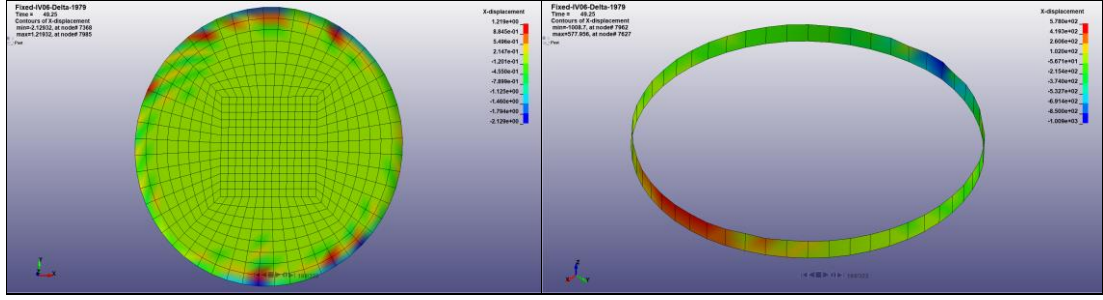


Şekil C1.32: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

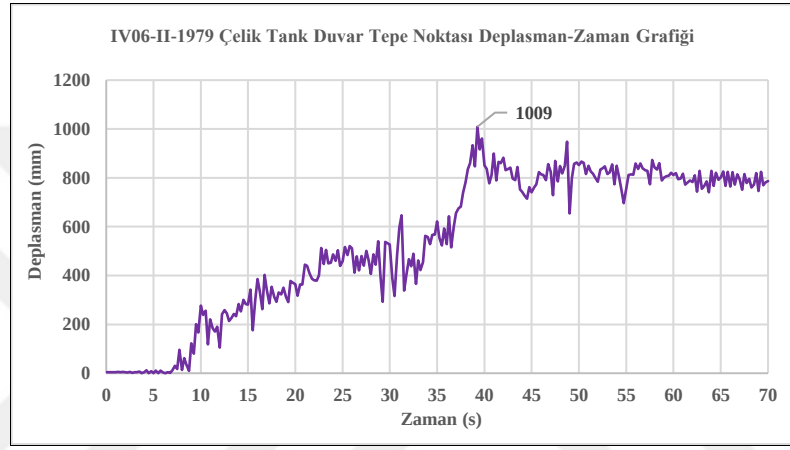


Şekil C1.33: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C1.34: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



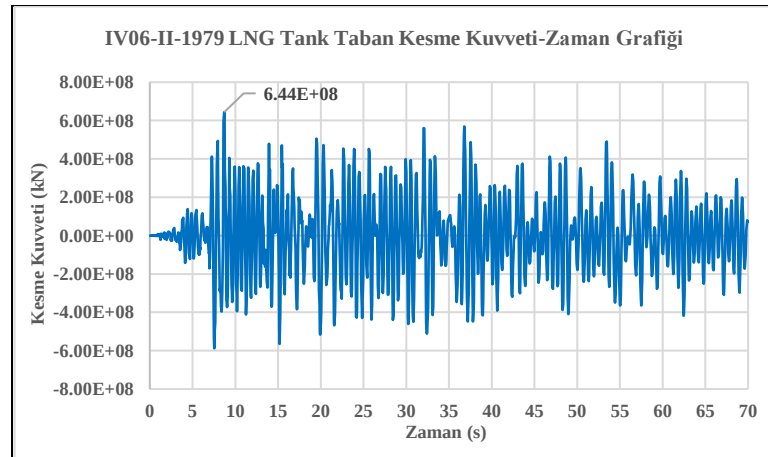
Şekil C1.35: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank taban maksimum yatay deplasmanı: 0 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum yatay deplasmanı: 1009 mm

Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 1009 mm

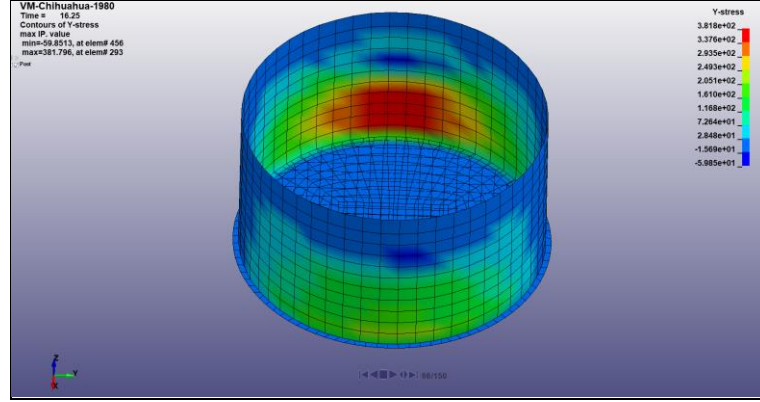
- LNG tank toplam taban kesme kuvveti analizi



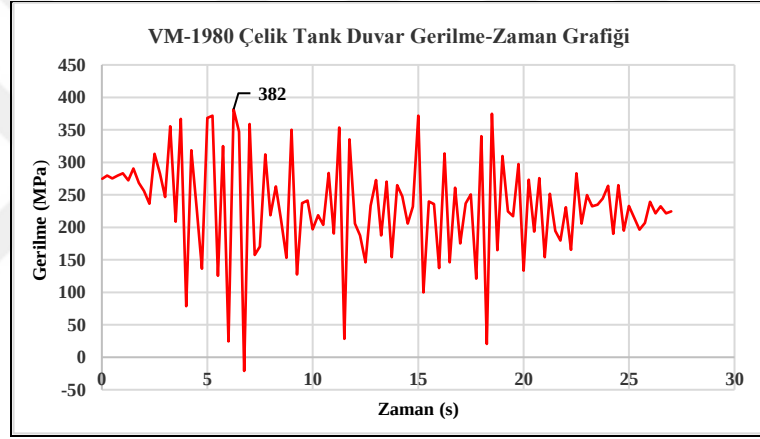
Şekil C1.36: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

C1-E Victoria Depremi Chihuahua İstasyonu - 1980

- Çelik tank duvar gerilme analizi

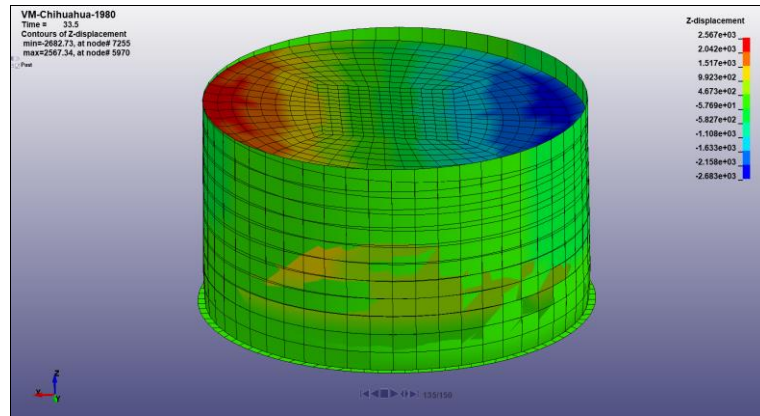


Şekil C1.37: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

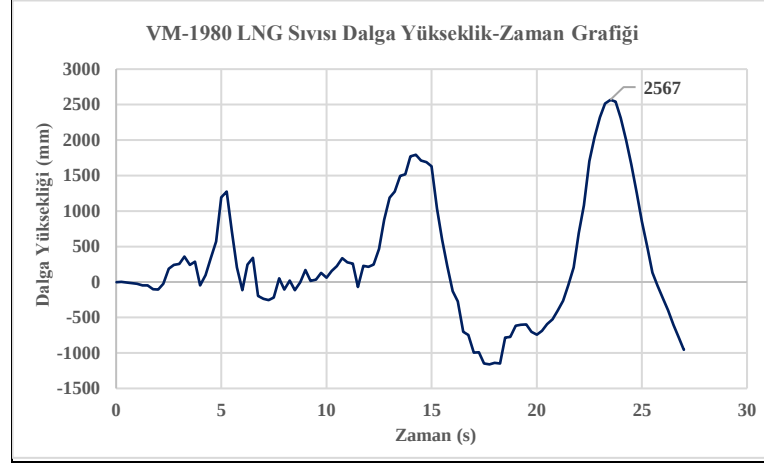


Şekil C1.38: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

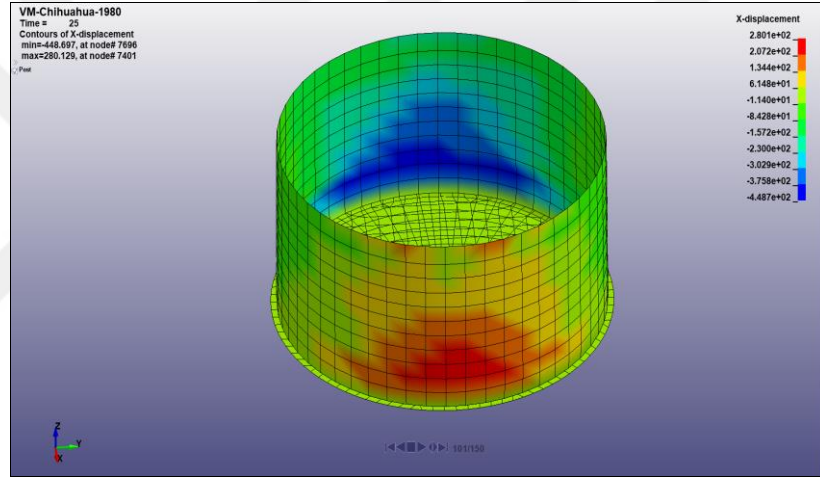


Şekil C1.39: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

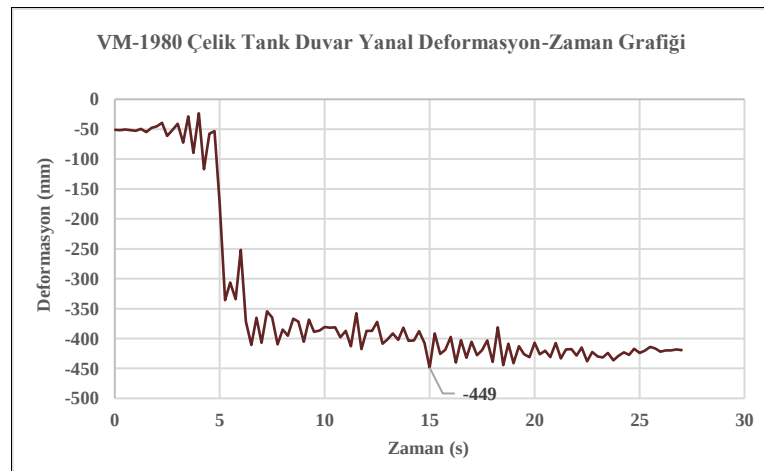


Şekil C1.40: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

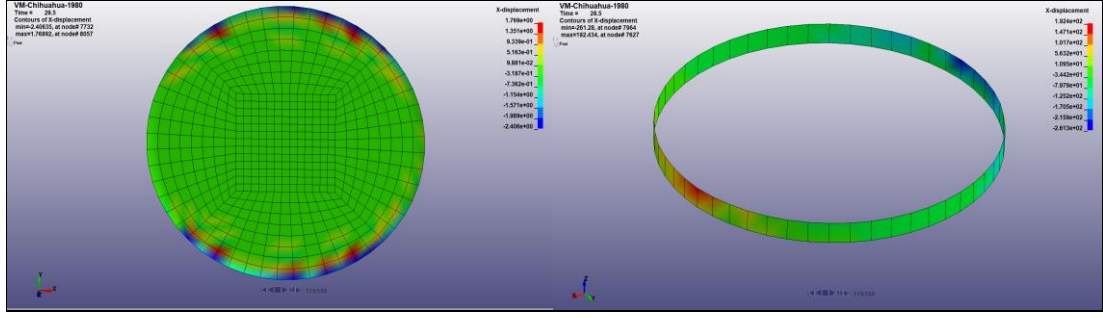


Şekil C1.41: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

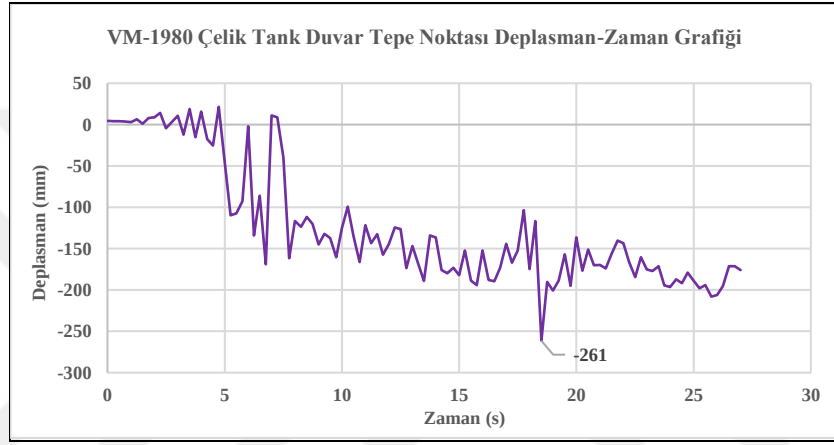


Şekil C1.42: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C1.43: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



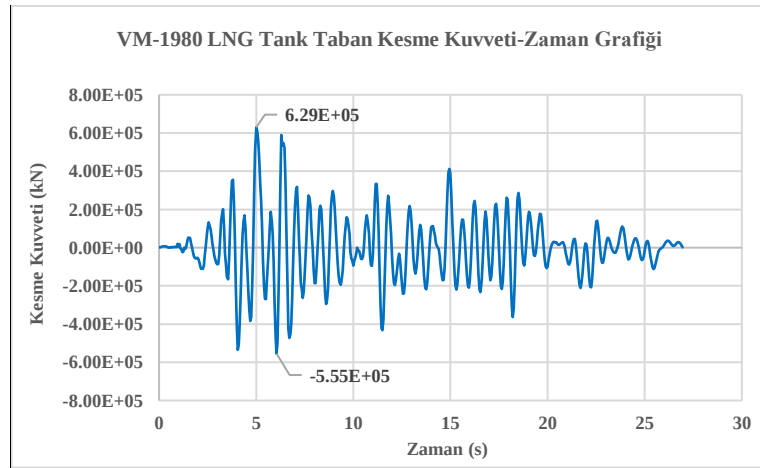
Şekil C1.44: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank taban maksimum yatay deplasmanı: 0 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum yatay deplasmanı: 261 mm

Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 261 mm

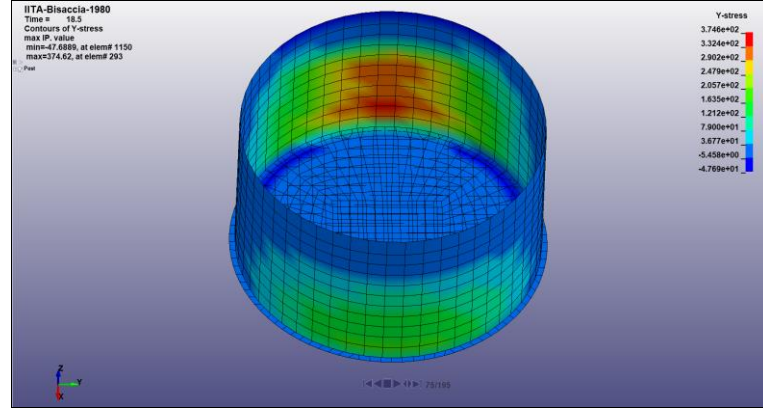
- LNG tank taban kesme kuvveti analizi



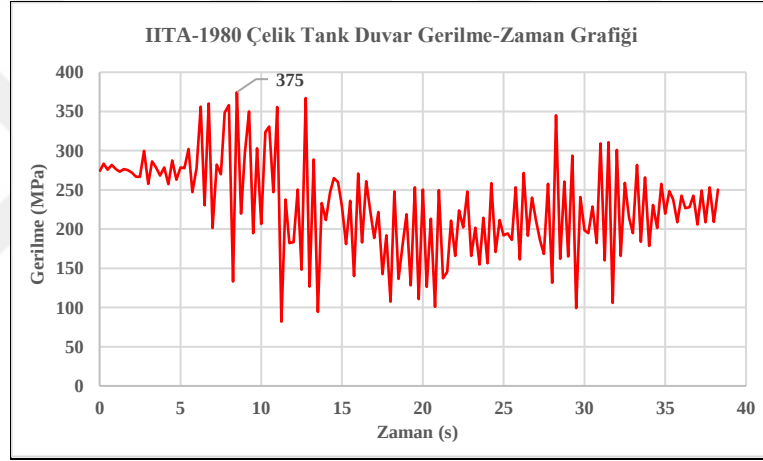
Şekil C1.45: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

C1-F Irpina Depremi Bisaccia İstasyonu - 1980

- Çelik tank duvar gerilme analizi

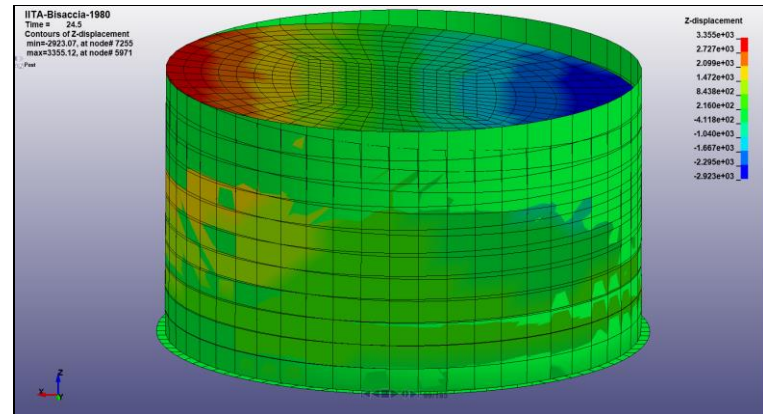


Şekil C1.46: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

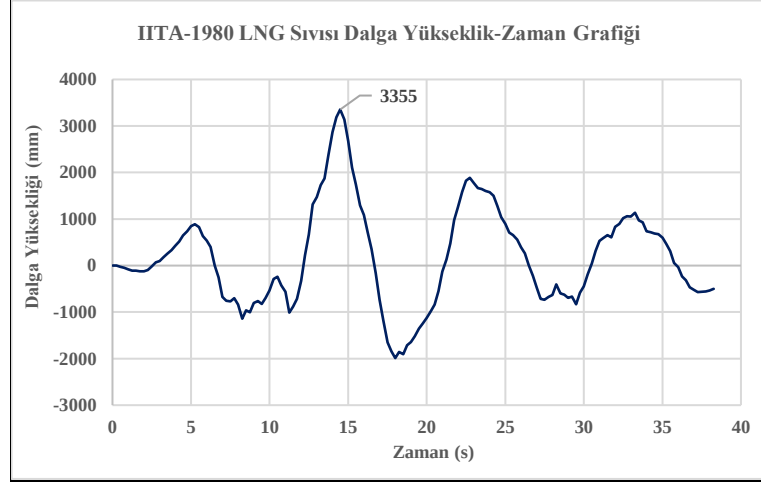


Şekil C1.47: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

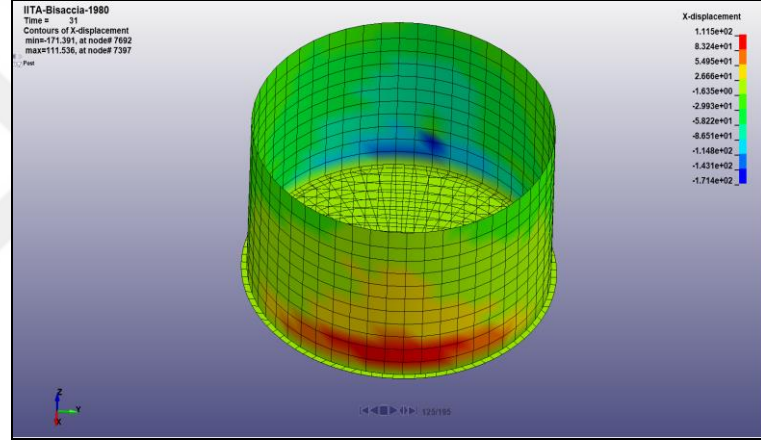


Şekil C1.48: LNG sıvısı dalga yüksekliği analiz modeli

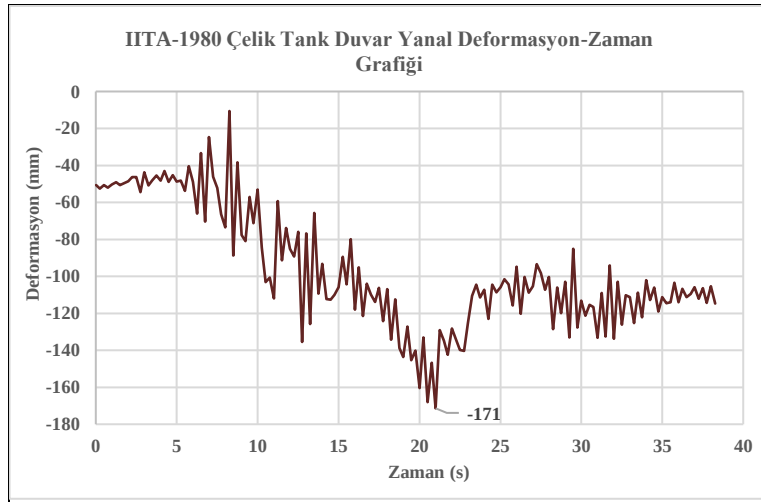


Şekil C1.49: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

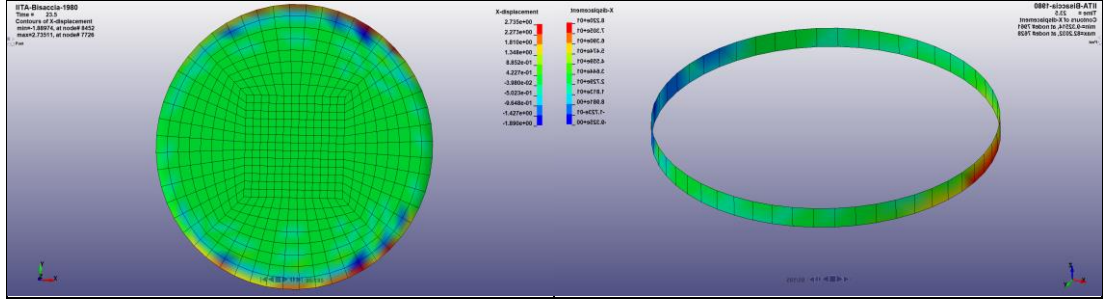


Şekil C1.50: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

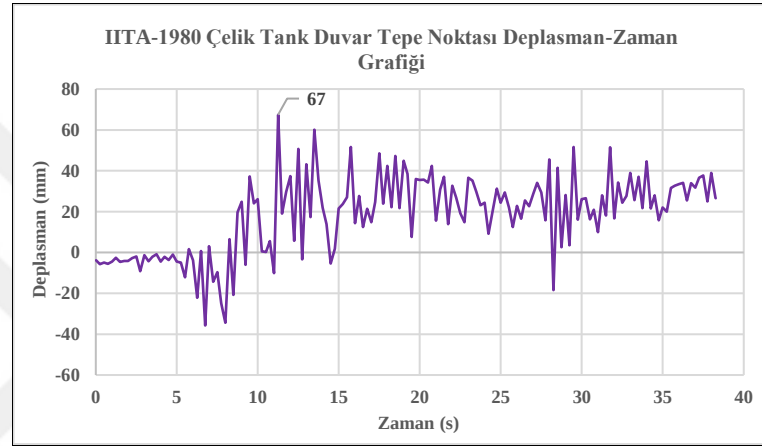


Şekil C1.51: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C1.52: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



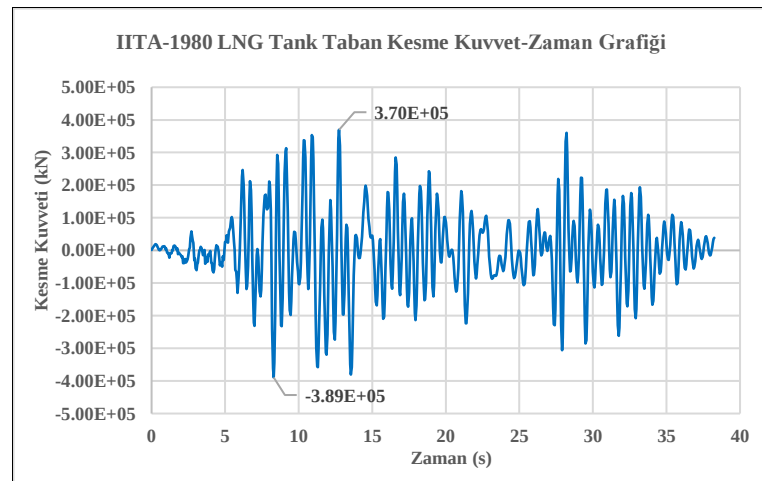
Şekil C1.53: Çelik tank duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank taban deplasmanı: 0mm

Çelik tank tavan deplasmanı: 67mm

Çelik tank taban-tavan deplasman farkı: 67mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



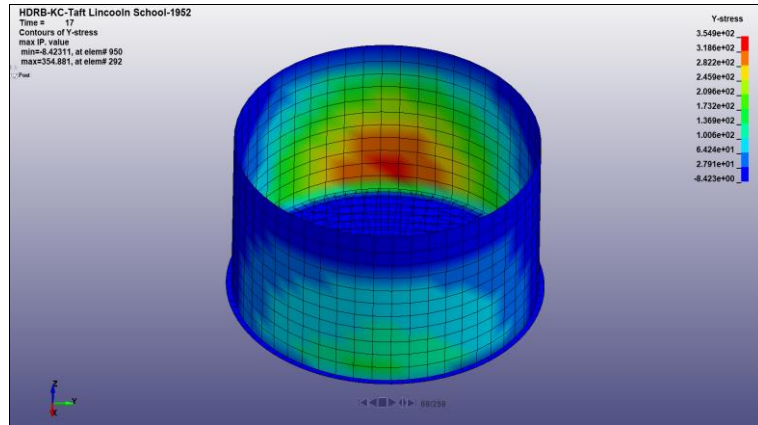
Şekil C1.54: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

EK C2 HDRB İzolatörlü LNG Tankın Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

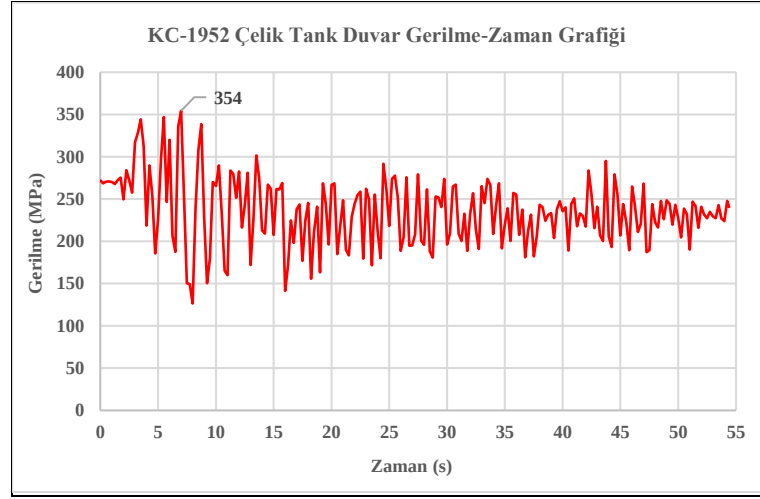
Kern County depremi Taft Lincoln School istasyonu, Borrego Mtn depremi El Centro Array istasyonu, Imperial Valley depremi Calexico Fire istasyonu, Imperial Valley Depremi Delta istasyonu, Victoria depremi Chihuahua istasyonu ve Irpina depremi Bisaccia istasyonu ivme kayıtlarının 2475 yılda bir oluşacak depreme göre (SSE deprem performans seviyesi) ölçeklendirilmiş HDRB izolatörlü LNG tank modelinin lineer olmayan analiz sonuçlarına çelik tank duvar gerilmeleri, LNG sıvısı dalga yükseklikleri, çelik tank duvar yanal deformasyonları, çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman farkları, tabanda oluşan maksimum kesme kuvvetleri, izolatöre gelen yatay kuvvetin yapmış olduğu deplasmanlar ve her bir izolatöre gelen düşey kuvvet analiz sonuçları Şekil C2.1-66'da model ve grafiklerde verilmiştir.

C2-A Kern County Depremi Taft Lincoln School İstasyonu-1952

- Çelik tank duvar gerilme analizi

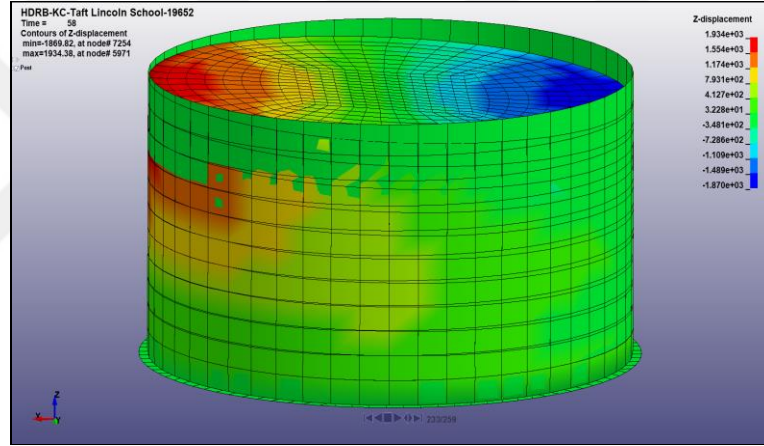


Şekil C2.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

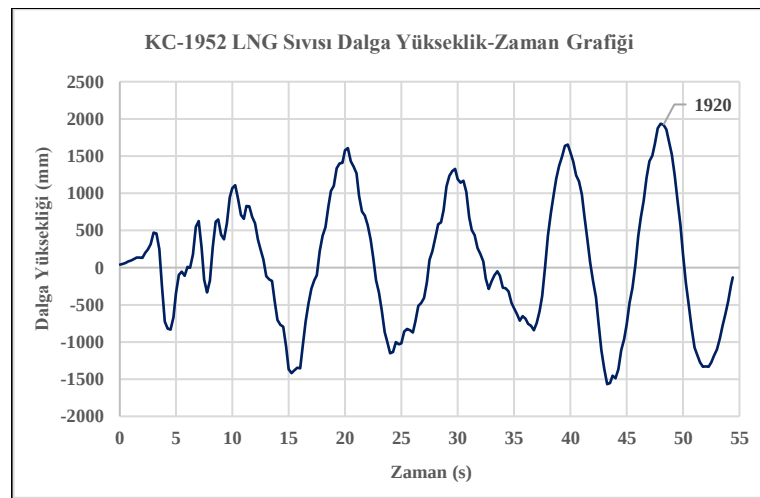


Şekil C2.2: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

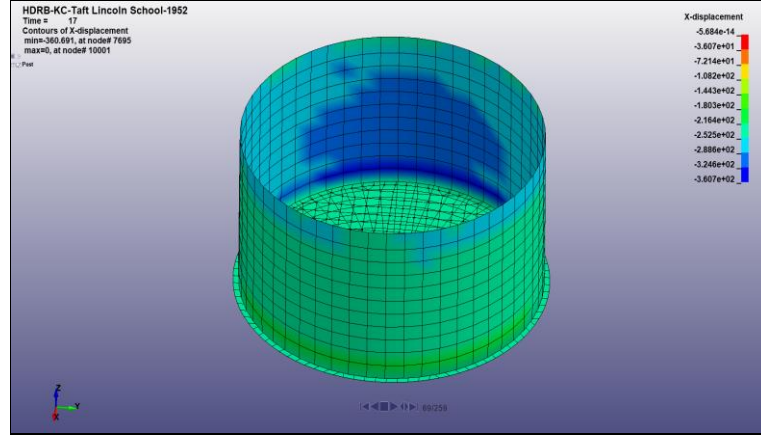


Şekil C2.3: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

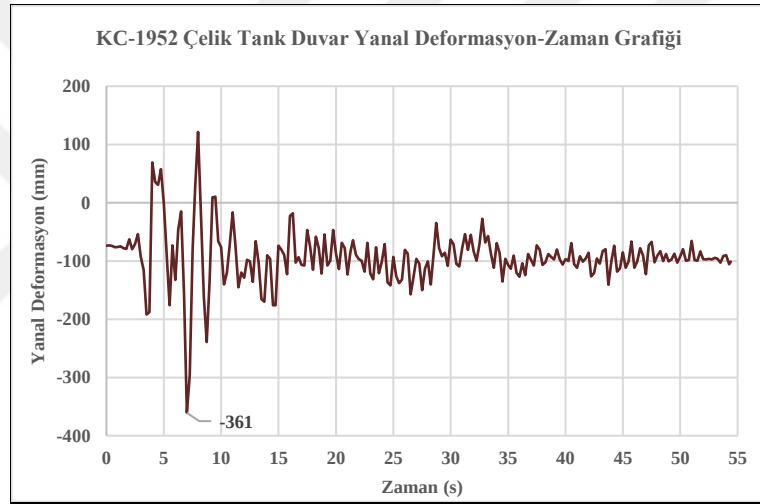


Şekil C2.4: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

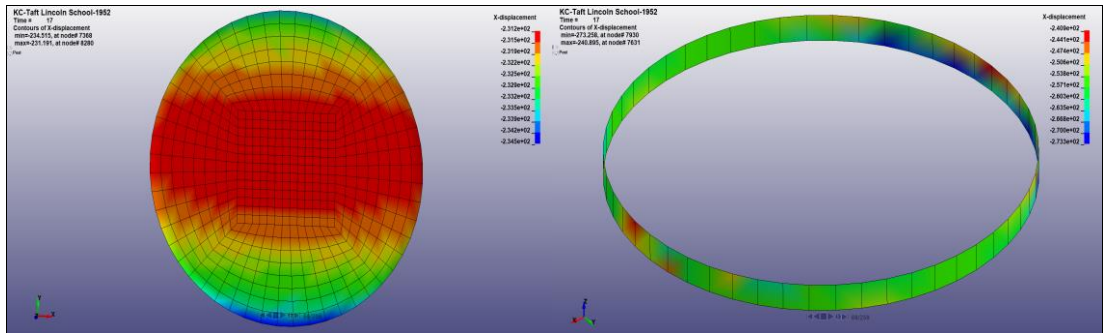


Şekil C2.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

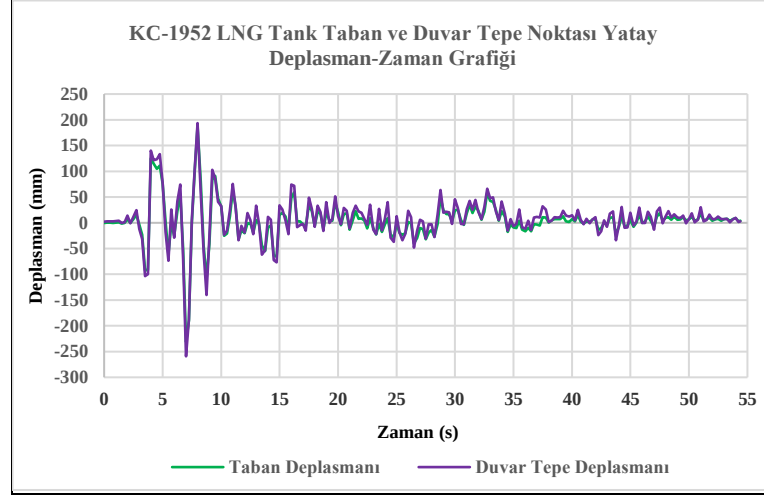


Şekil C2.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C2.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli



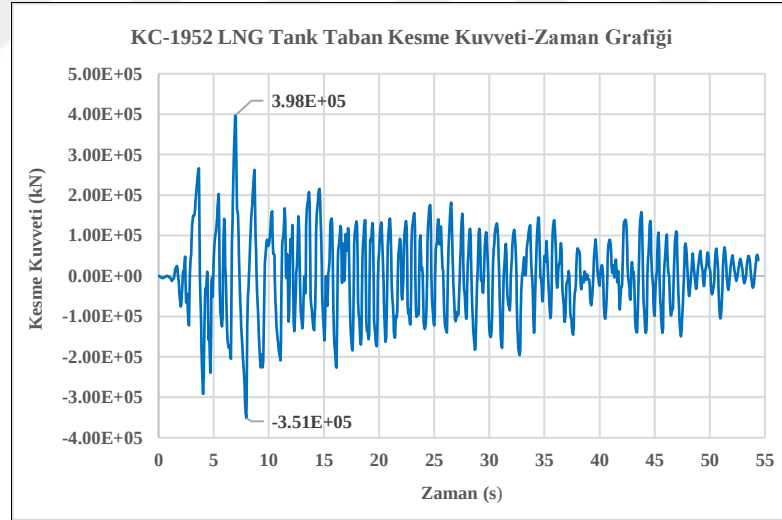
Şekil C2.8: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 231 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 259 mm

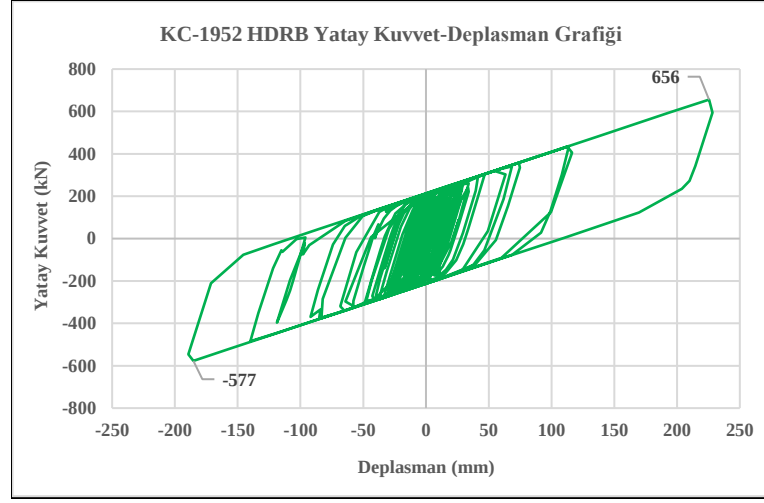
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 28 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C2.9: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman analizi

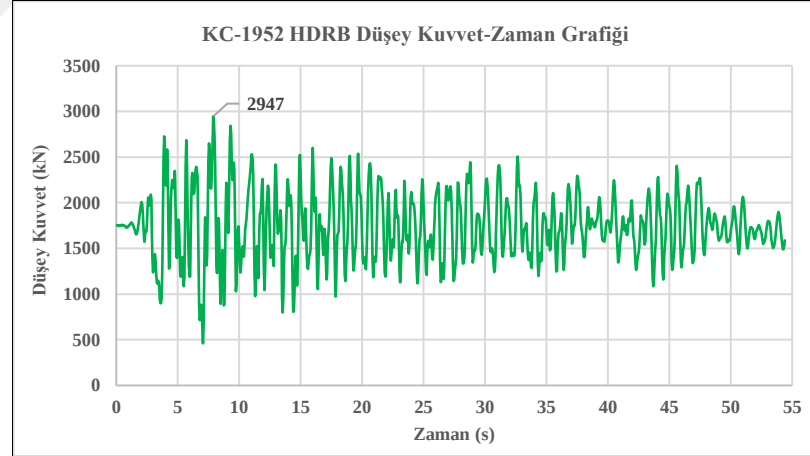


Şekil C2.10: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolatörde oluşan maksimum yatay kuvvet: 656 kN

HDRB izolatörde oluşan maksimum yatay deplasman miktarı: 225 mm

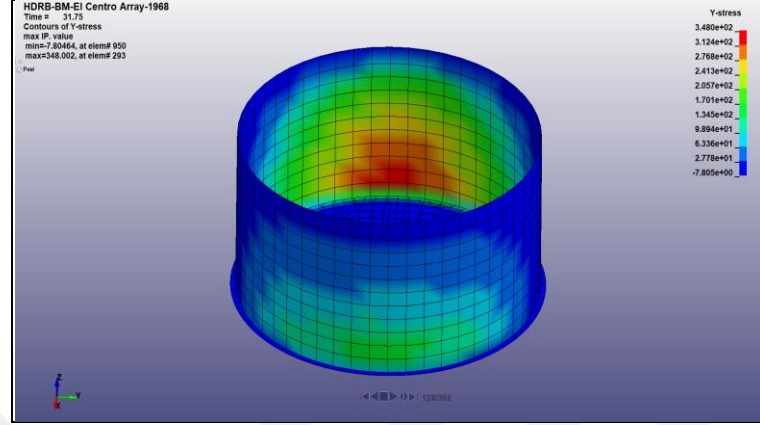
- HDRB izolatörü düşey kuvvet-zaman analizi



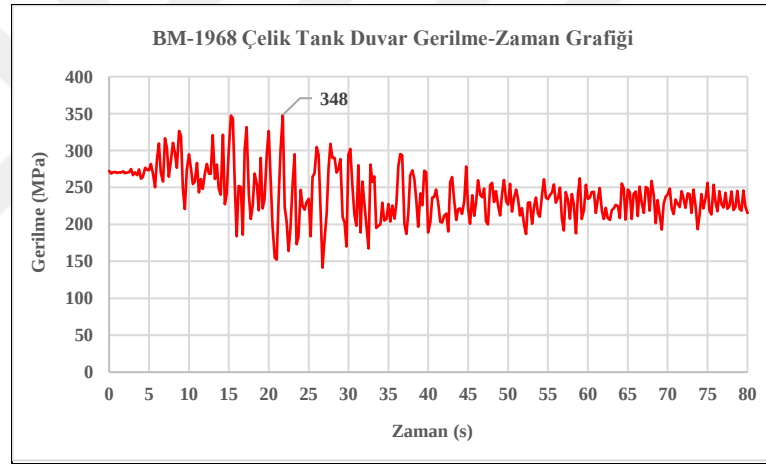
Şekil C2.11: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği

C2-B Borrego Mtn Depremi El Centro Array İstasyonu-1968

- Çelik tank gerilme analizi

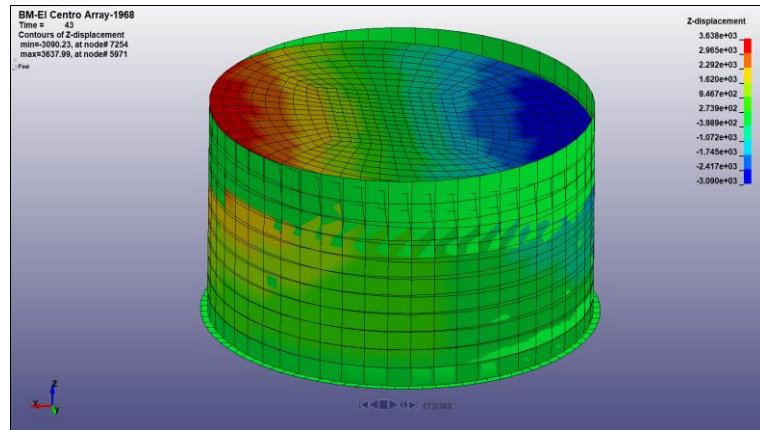


Şekil C2.12: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

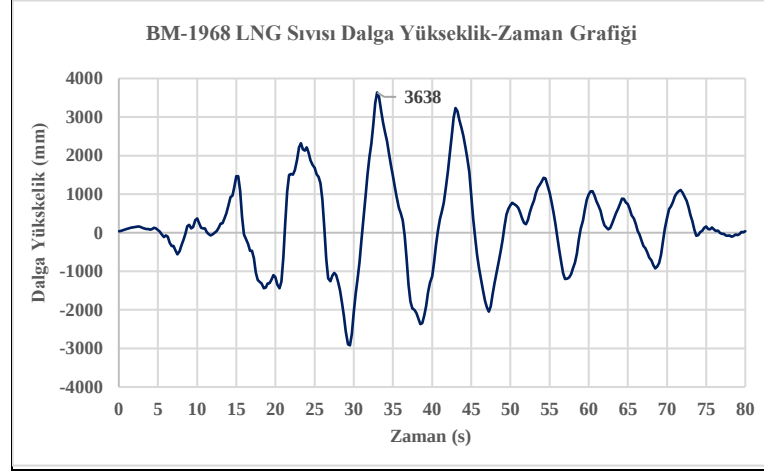


Şekil C2.13: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

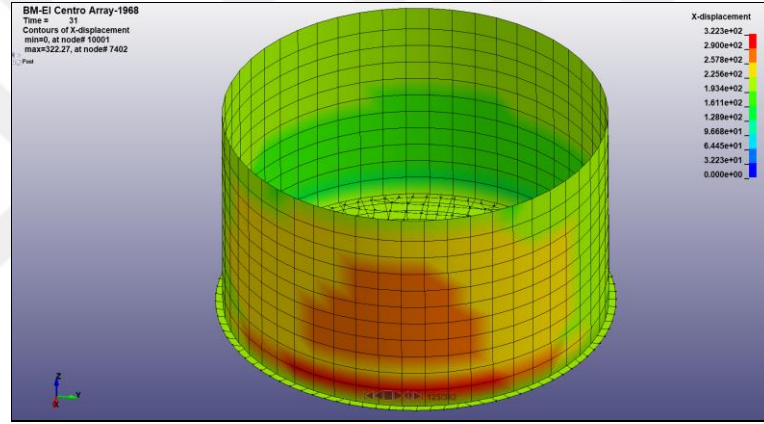


Şekil C2.14: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

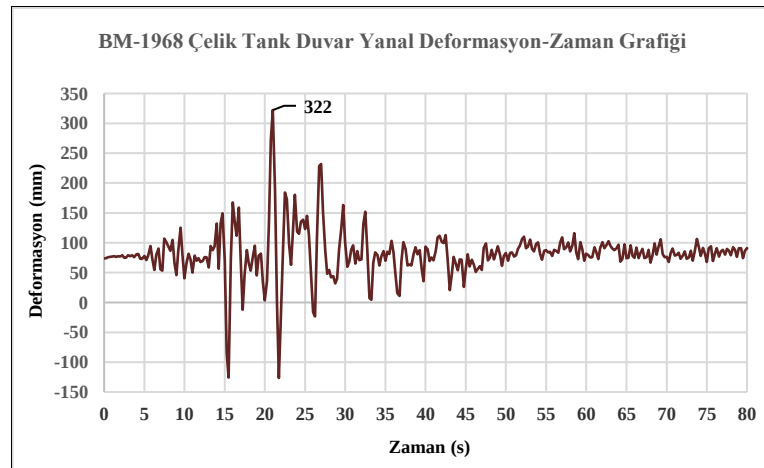


Şekil C2.15: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

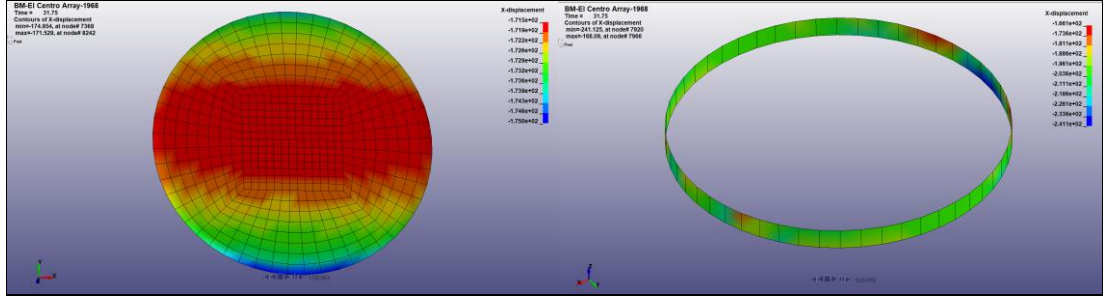


Şekil C2.16: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

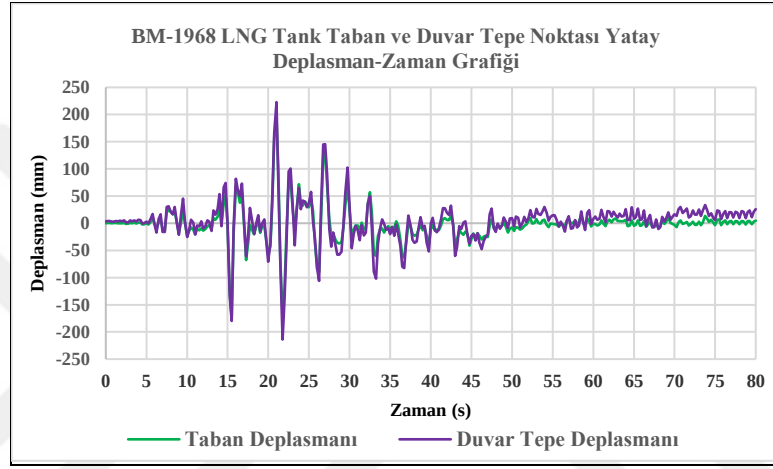


Şekil C2.17: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C2.18: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



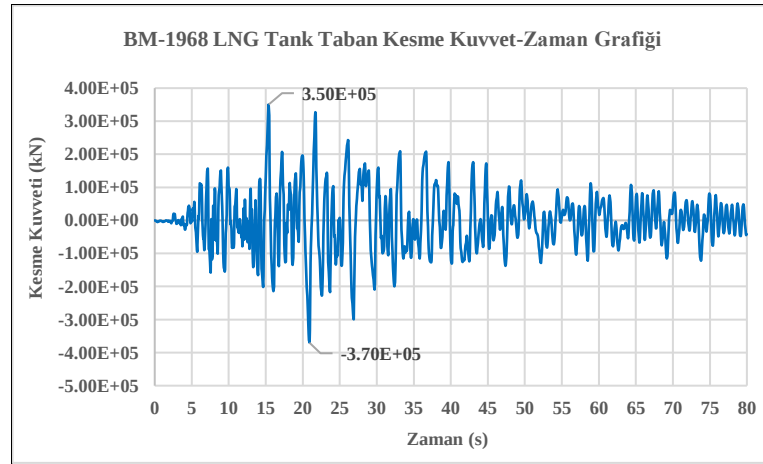
Şekil C2.19: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 231 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 259 mm

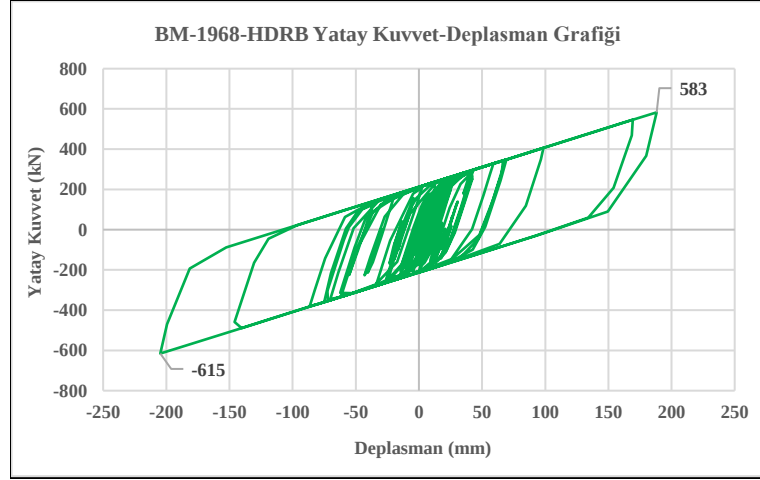
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 28 mm

- LNG tank taban kesme kuvveti analizi



Şekil C2.20: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- HDRB izolator yatay kuvvet-deplasman analizi

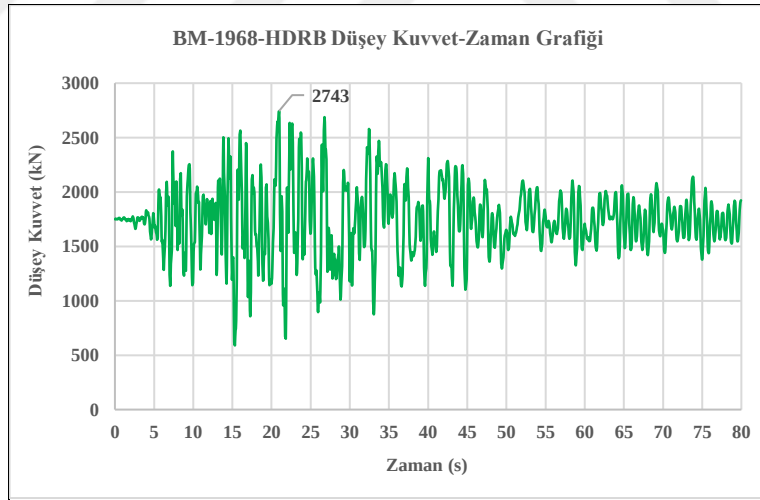


Şekil C2.21: HDRB izolatorü yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolatorde oluşan maksimum yatay kuvvet: 615 kN

HDRB izolatorde oluşan maksimum yatay deplasman miktarı: 205 mm

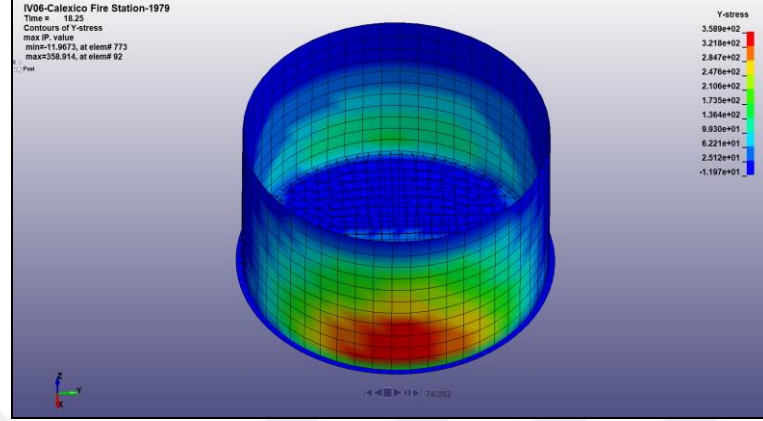
- HDRB izolatorü dışey kuvvet analizi



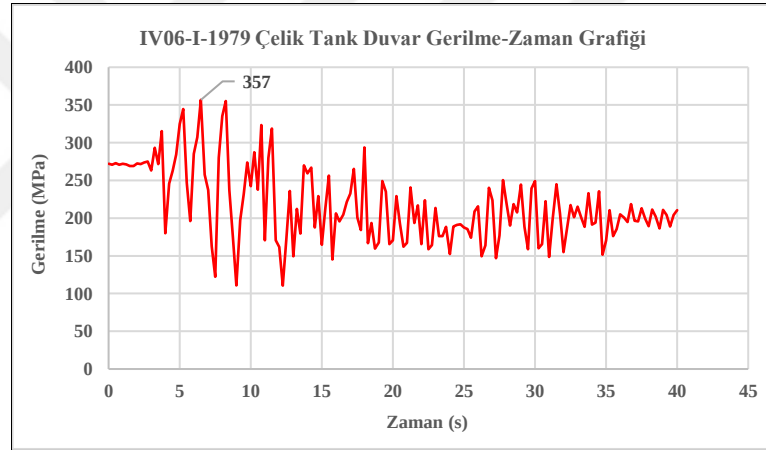
Şekil C2.22: HDRB izolatorü dışey kuvvet grafiği

C2-C Imperyal Valley Depremi Calexico Fire İstasyonu-1979

- Çelik tank duvar gerilme analizi

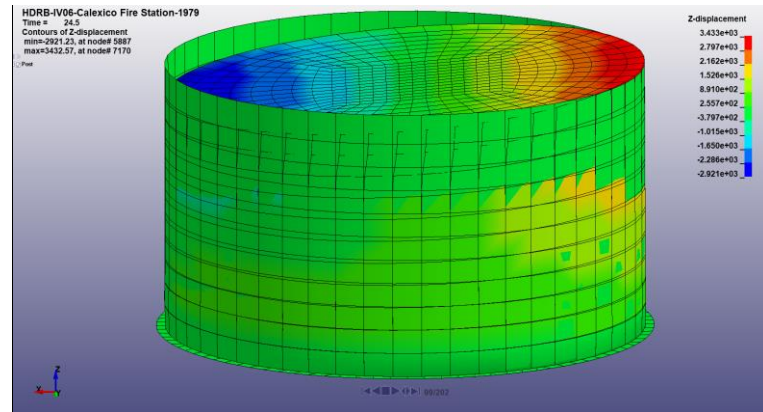


Şekil C2.23: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

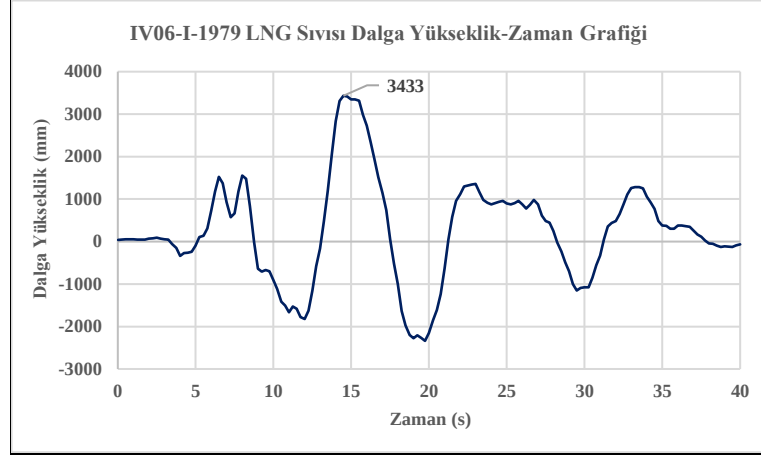


Şekil C2.24: Çelik tank duvar gerilme grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

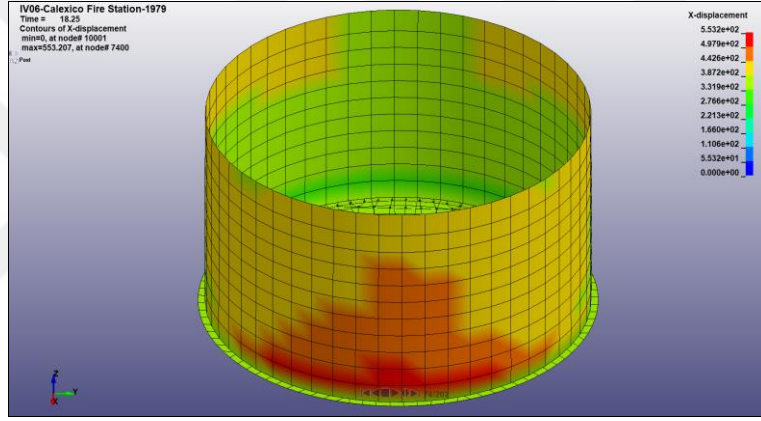


Şekil C2.25: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

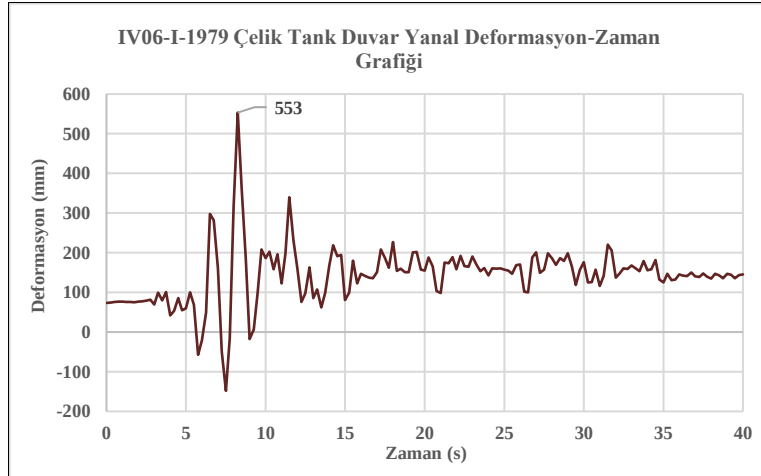


Şekil C2.26: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

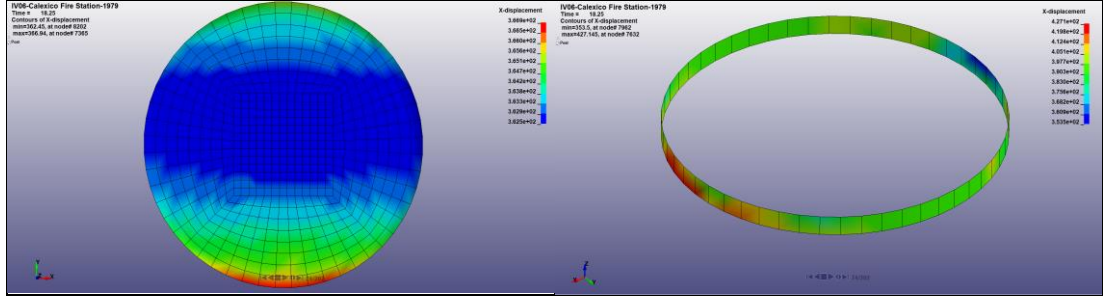


Şekil C2.27: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

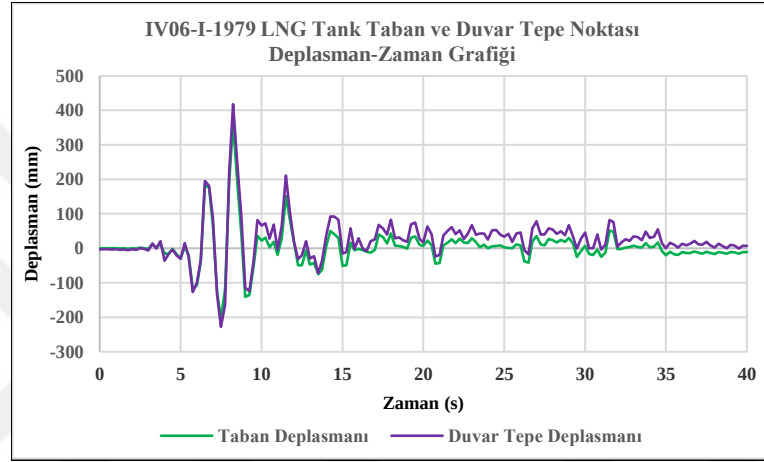


Şekil C2.28: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C2.29: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



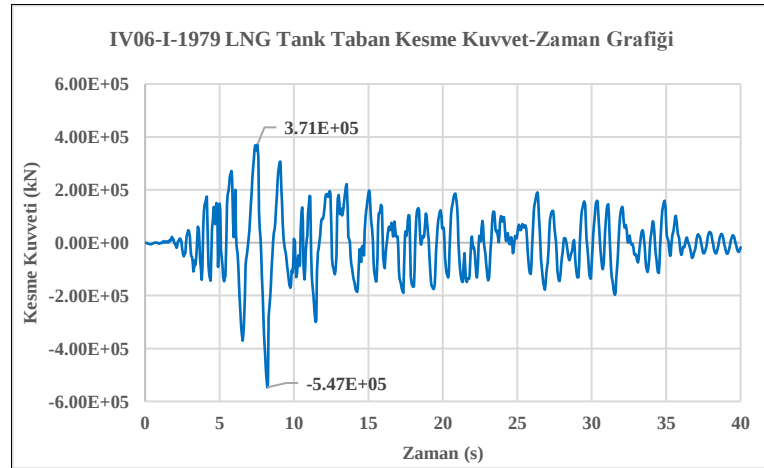
Şekil C2.30: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 362 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 418 mm

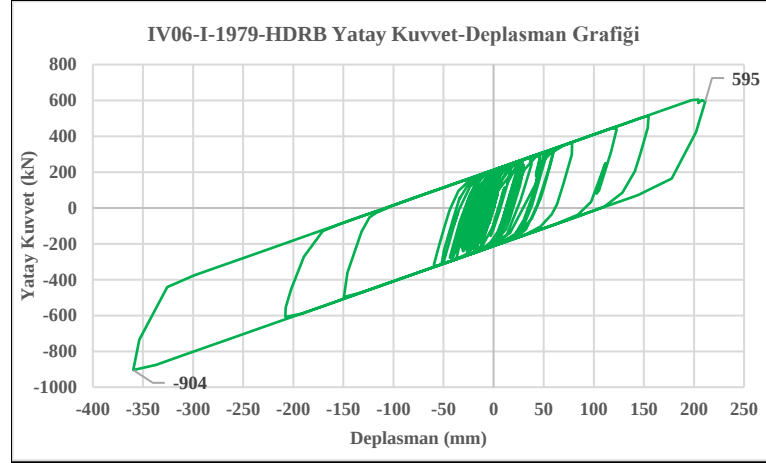
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 56mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C2.31: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman analizi

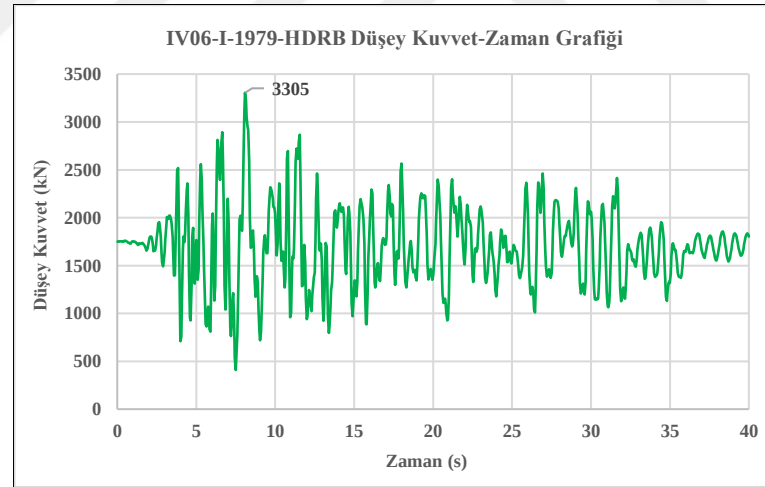


Şekil C2.32: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolatörde oluşan maksimum yatay kuvvet : 904kN

HDRB izolatörde oluşan maksimum yatay deplasman miktarı : 360mm

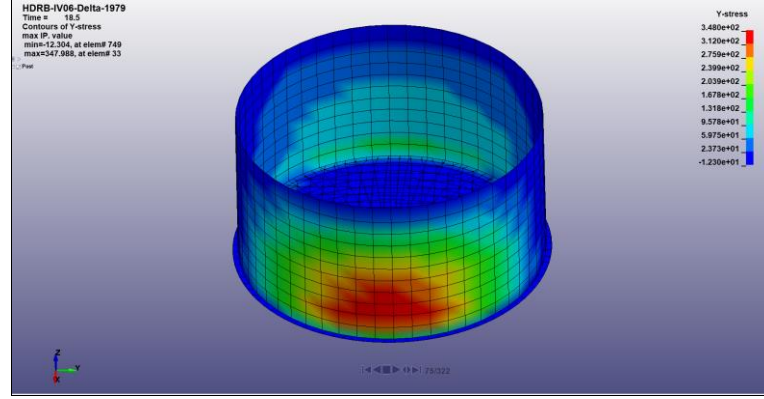
- HDRB izolatörü düşey kuvvet analizi



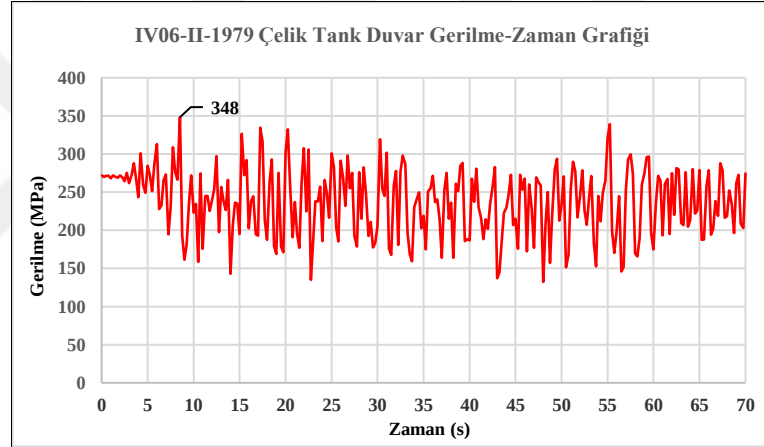
Şekil C2.33: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği

C2-D Imperyal Valley Depremi Delta İstasyonu-1979

- Çelik tank gerilme analizi

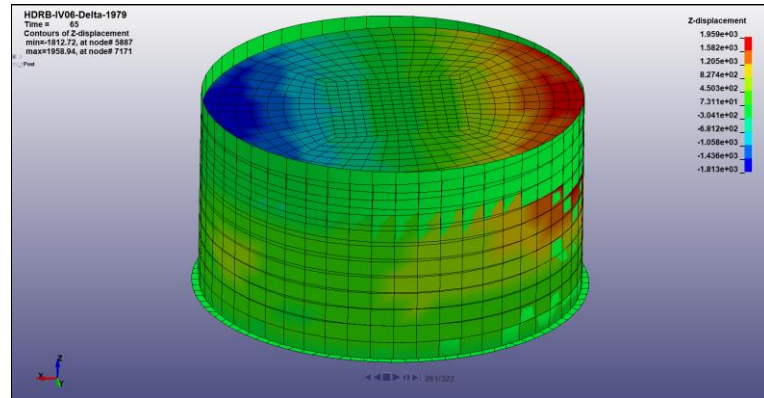


Şekil C2.34: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

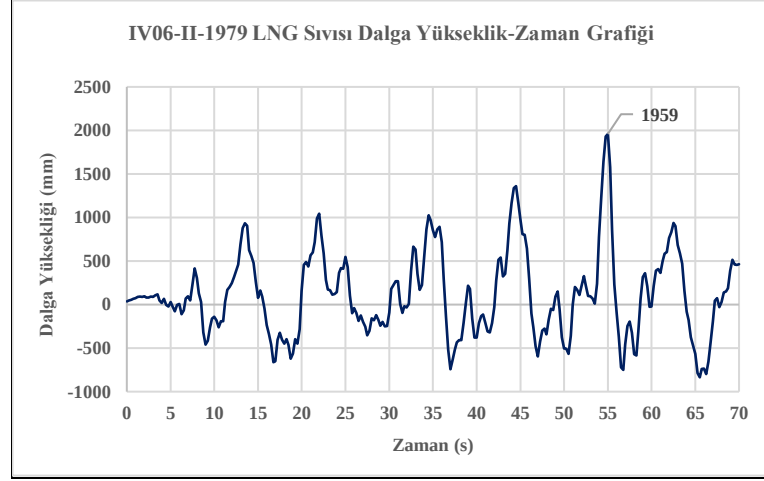


Şekil C2.35: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

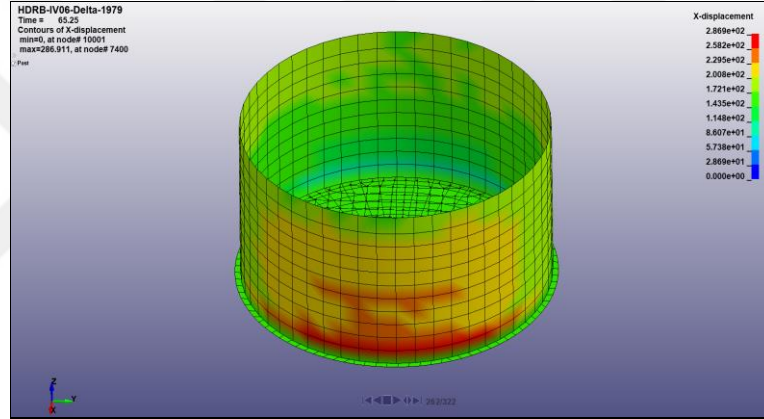


Şekil C2.36: LNG sıvısı maksimum dalga yüksekliği analiz modeli

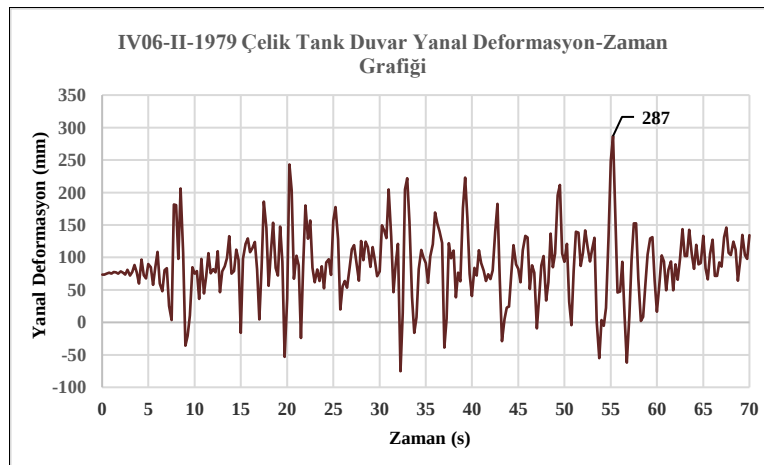


Şekil C2.37: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

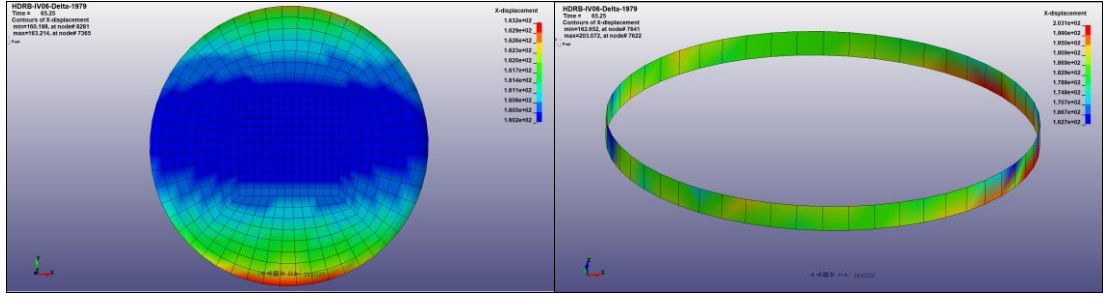


Şekil C2.38: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

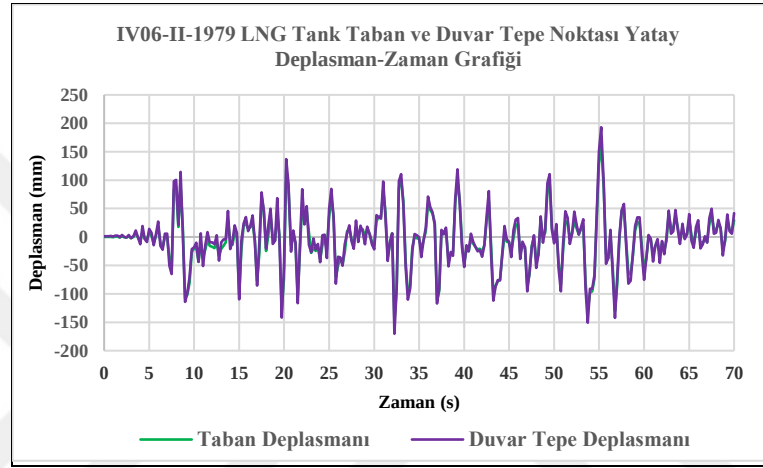


Şekil C2.39: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C2.40: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



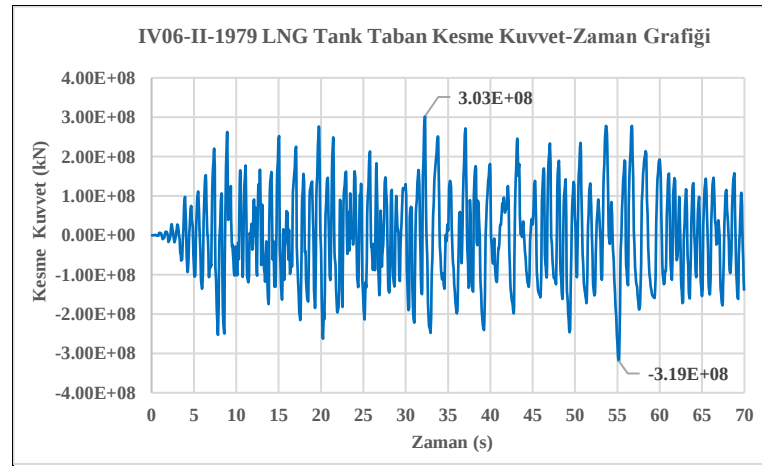
Şekil C2.41: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 163 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 203 mm

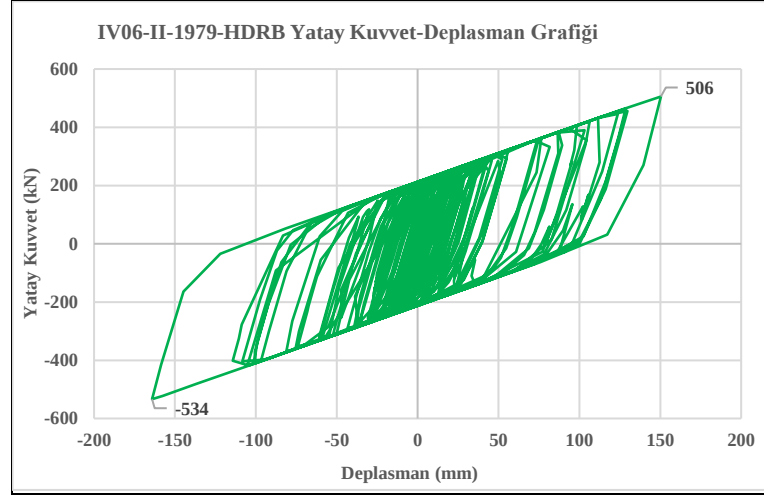
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 40 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C2.42: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman analizi

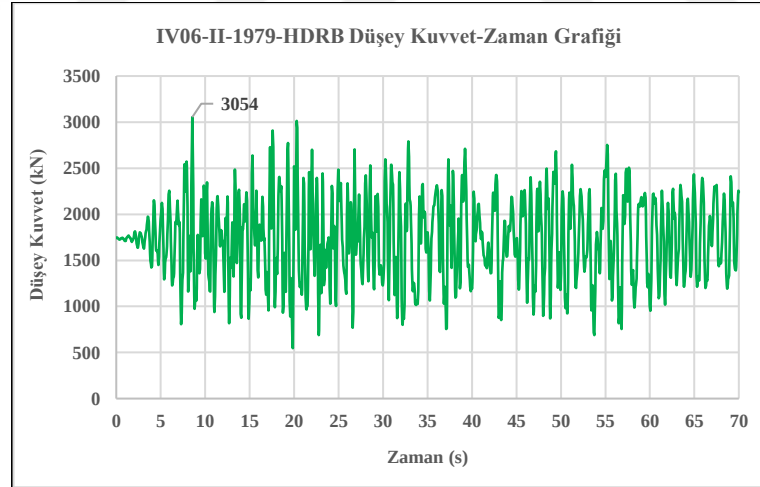


Şekil C2.43: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolatörde maksimum taban kesme kuvveti : 534 kN

HDRB izolatörde maksimum yatay deplasman miktarı : 164 mm

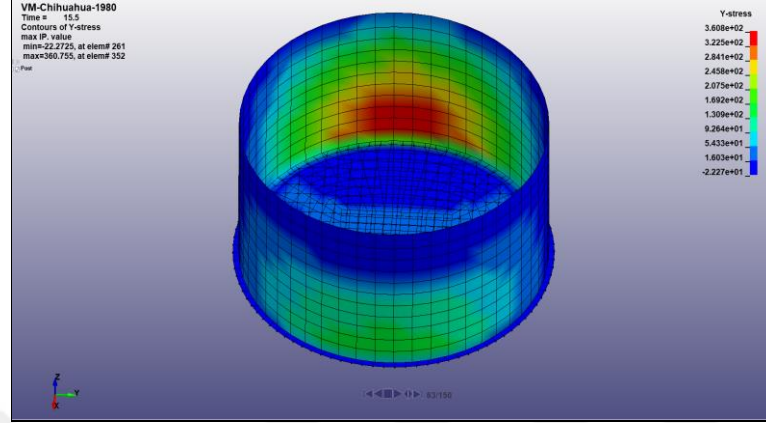
- HDRB izolatörü düşey kuvvet analizi



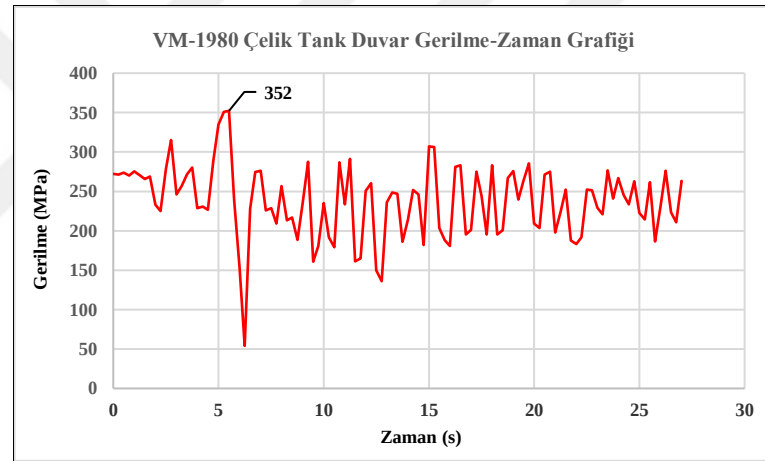
Şekil C2.44: HDRB izolatörü düşey kuvvet grafiği

C2-E Victoria Depremi Chihuahua İstasyonu-1980

- Çelik tank duvar gerilme analizi

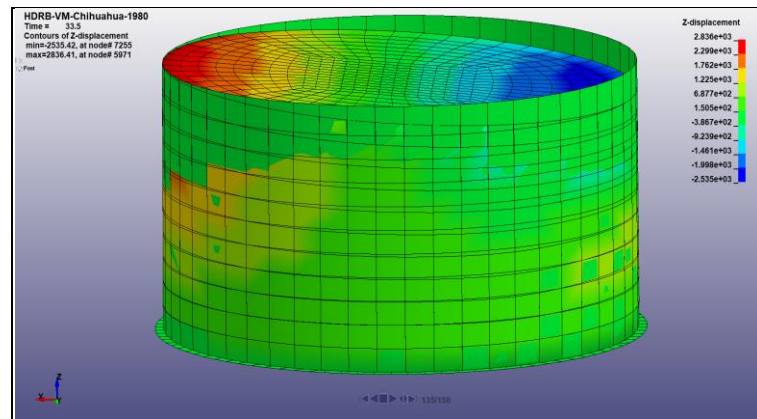


Şekil C2.45: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

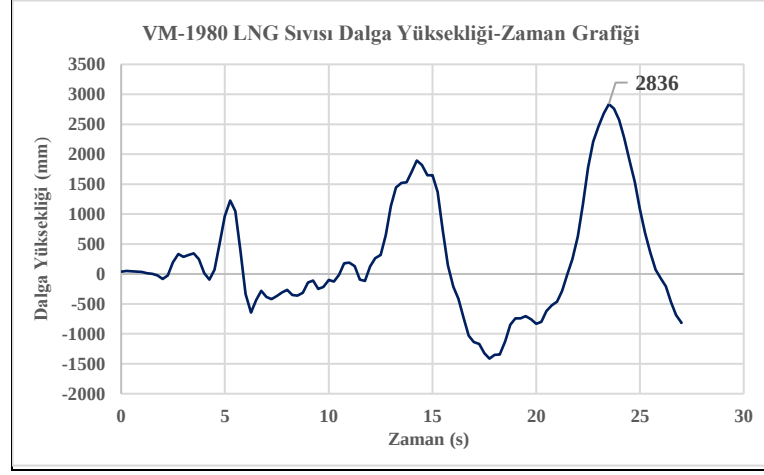


Şekil C2.46: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

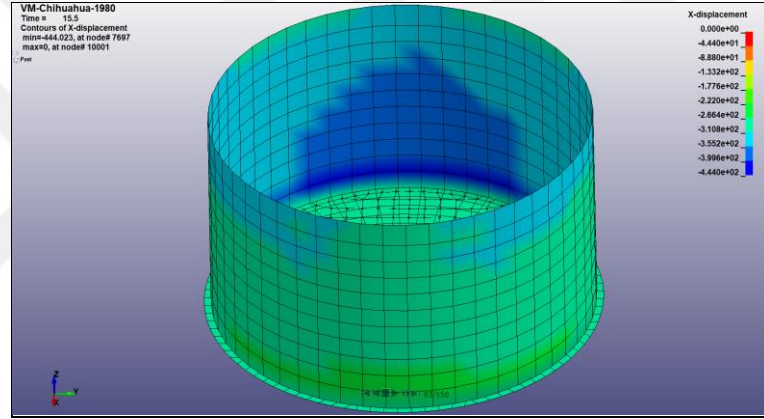


Şekil C2.47: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

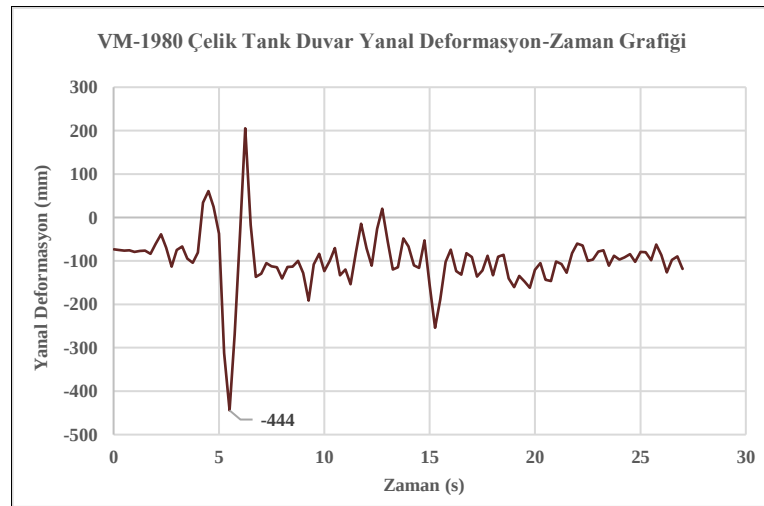


Şekil C2.48: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

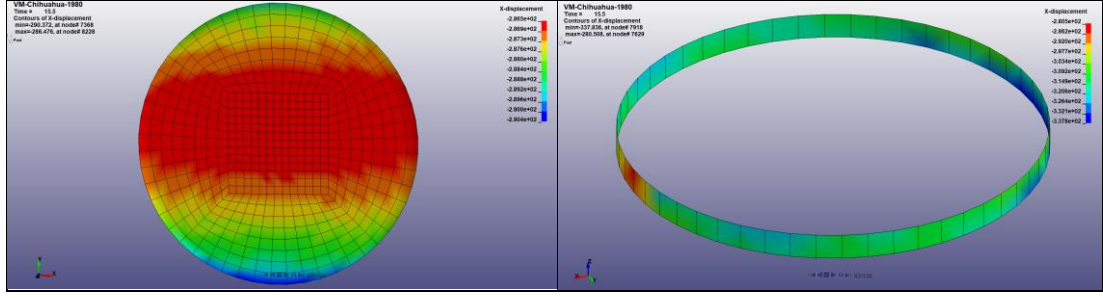


Şekil C2.49: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

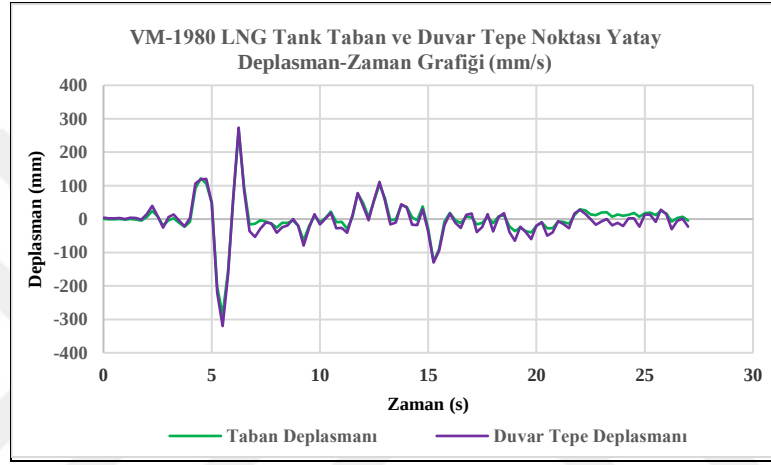


Şekil C2.50: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C2.51: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli



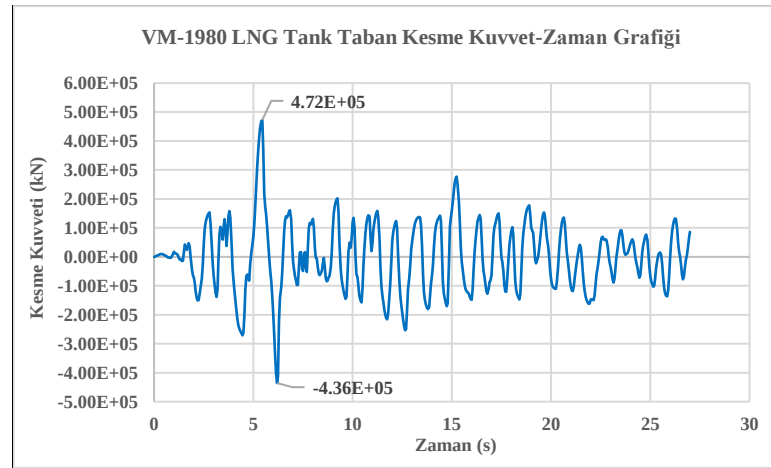
Şekil C2.52: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 286 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 320 mm

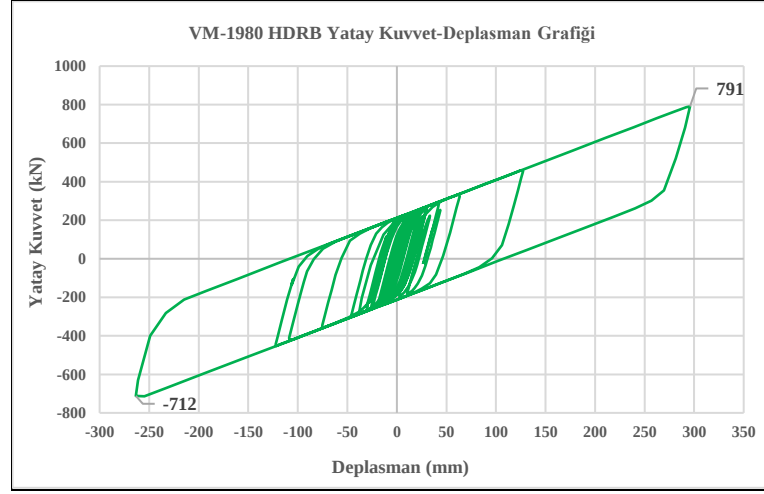
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 46 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C2.53: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman analizi

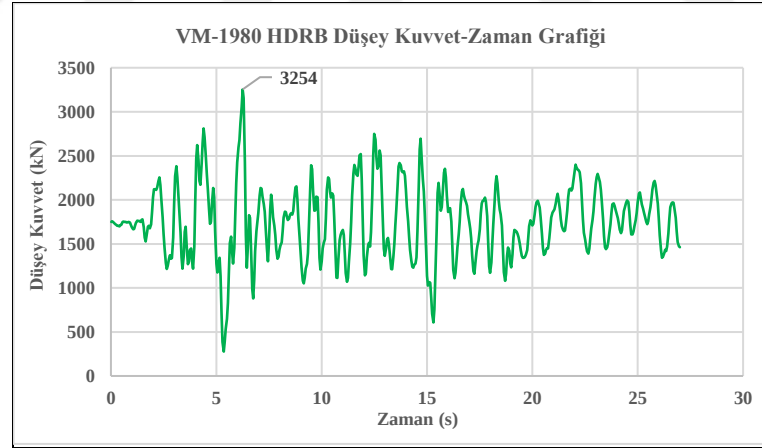


Şekil C2.54: HDRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolatörde meydana gelen maksimum taban kesme kuvveti : 791kN

HDRB izolatörde meydana gelen maksimum yatay deplasman miktarı : 296mm

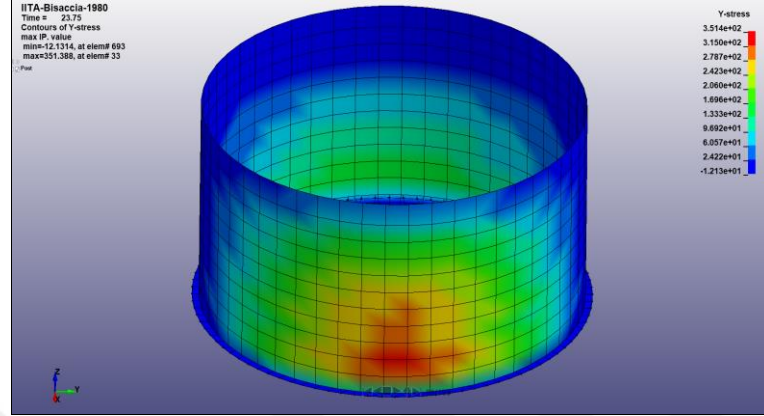
- HDRB izolatörü düşey kuvvet analizi



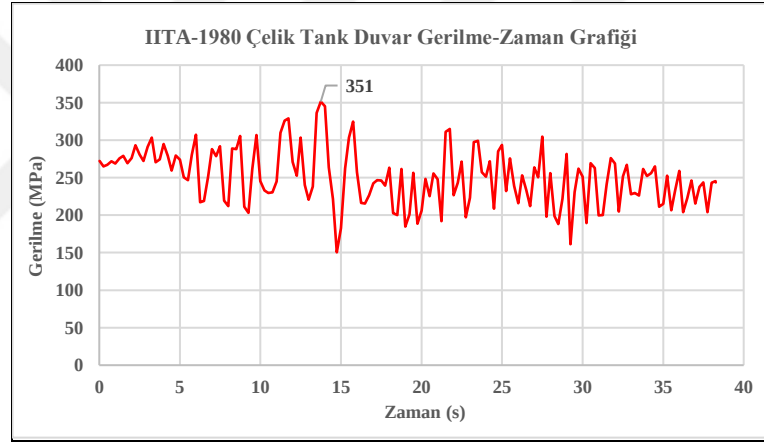
Şekil C2.55: HDRB izolatör düşey kuvvet grafiği

C2-F Irpina Depremi Bisaccia İstasyonu-1980

- Çelik tank duvar gerilme analizi

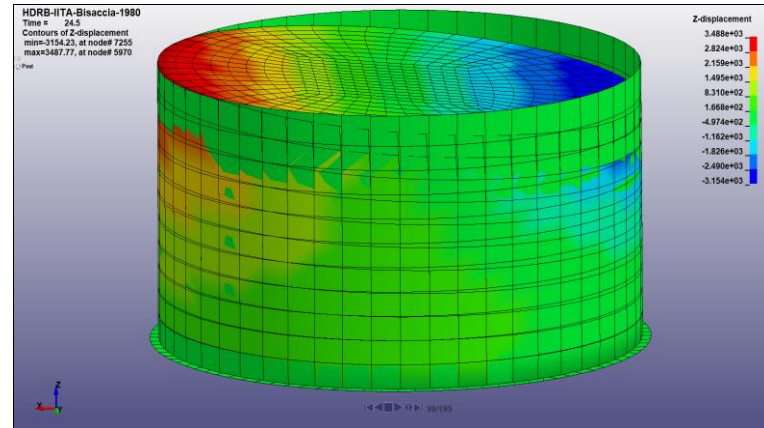


Şekil C2.56: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

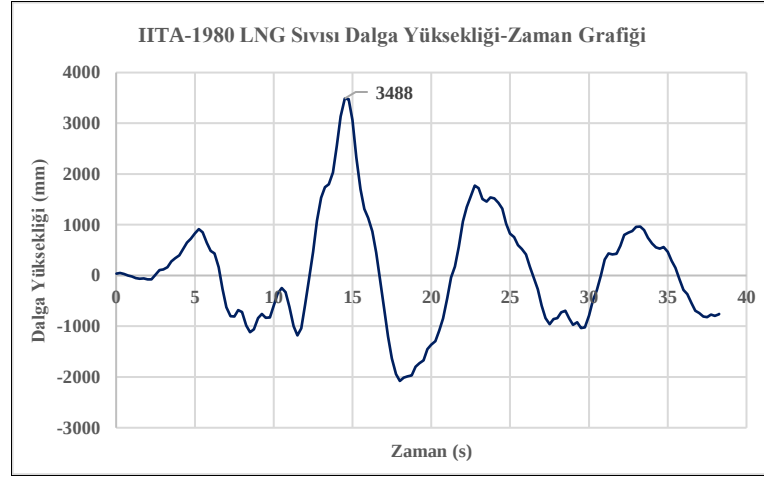


Şekil C2.57: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

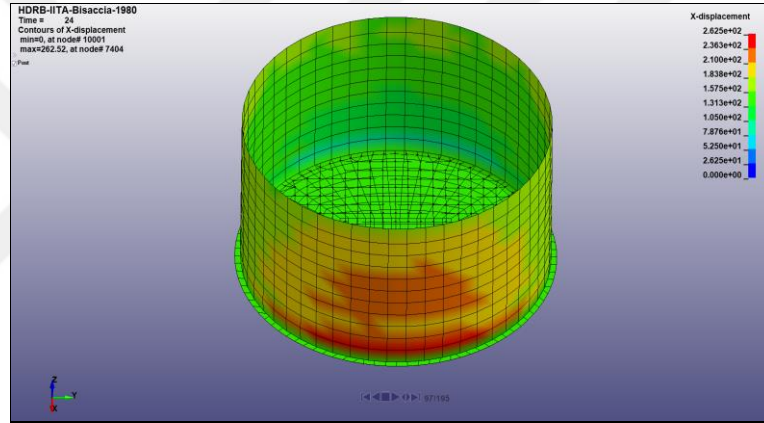


Şekil C2.58: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

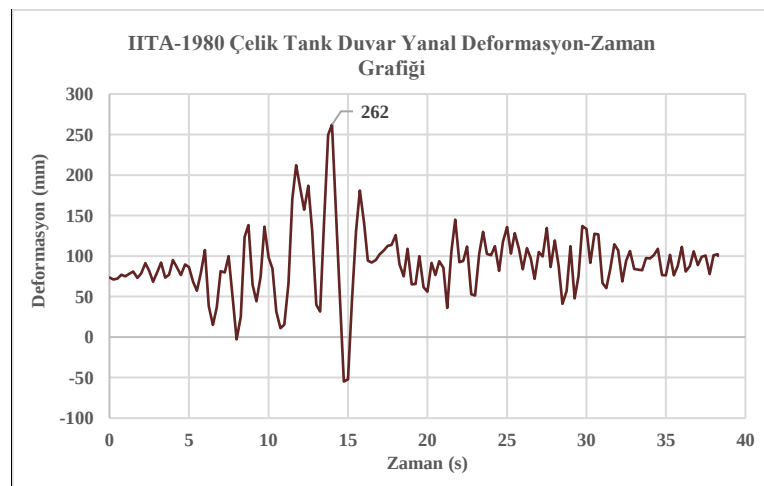


Şekil C2.59: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

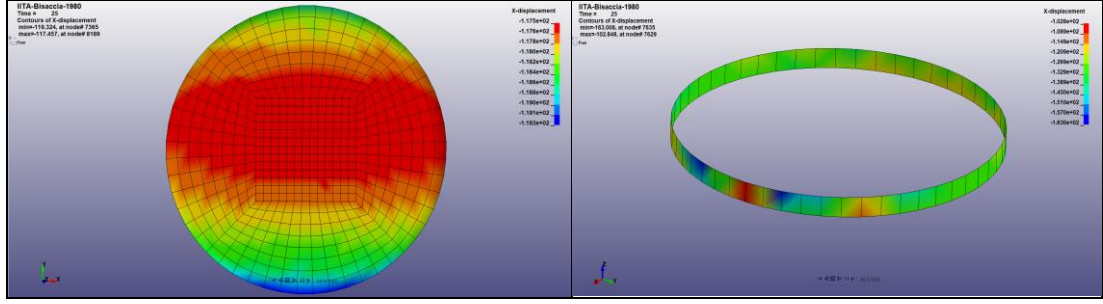


Şekil C2.60: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

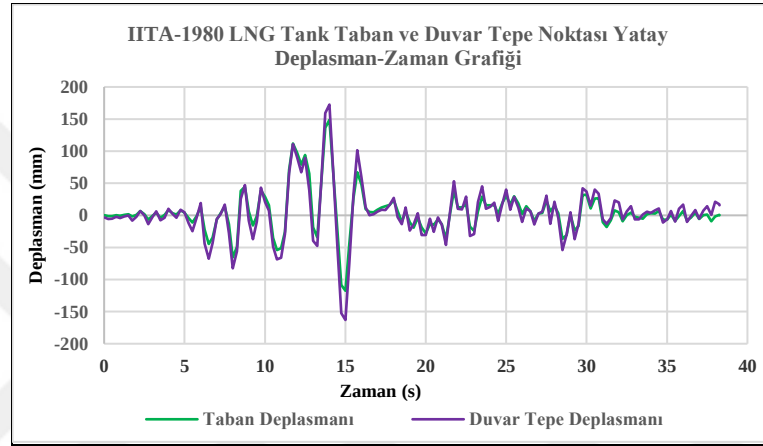


Şekil C2.61: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C2.62: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli



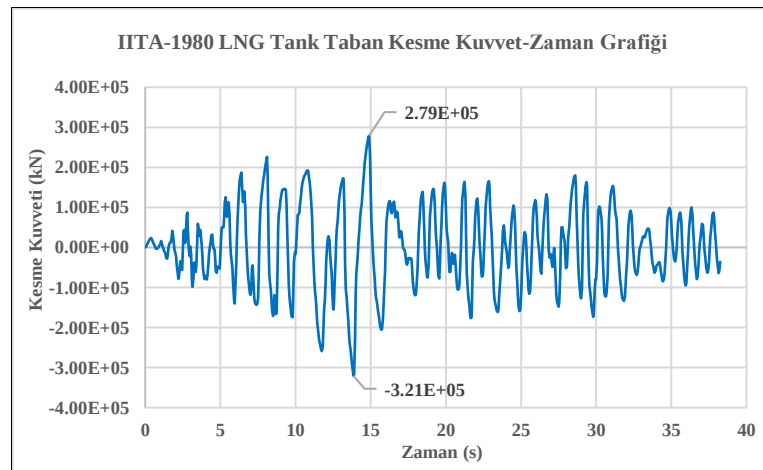
Şekil C2.63: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 117 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 163 mm

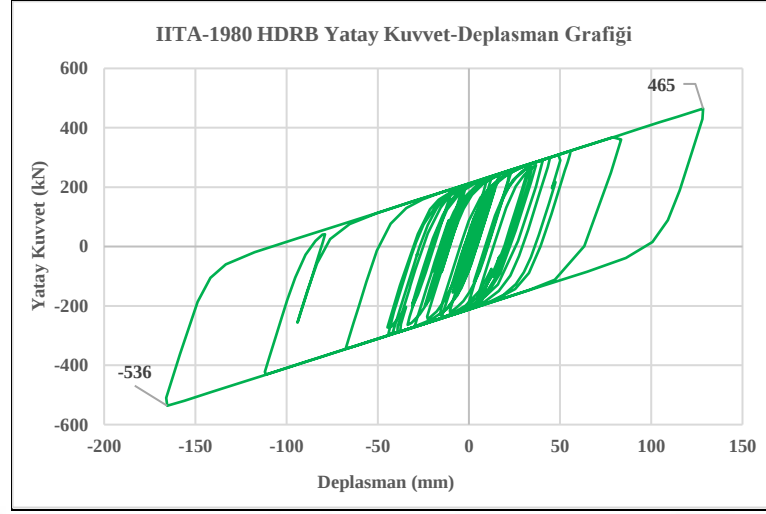
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 46 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C2.64: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- HDRB izolator yatay kuvvet-deplasman analizi

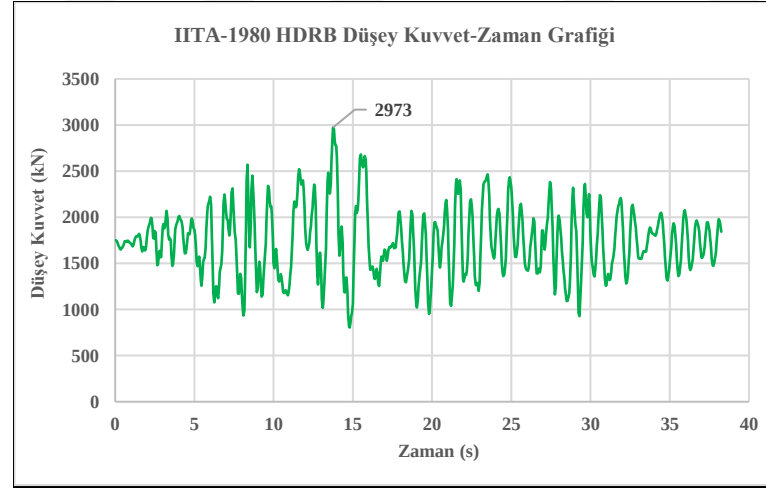


Şekil C2.65: HDRB izolator yatay kuvvet-deplasman grafiği

HDRB izolator maksimum taban kesme kuvveti : 536kN

HDRB izolator maksimum yatay deplasman miktarı : 165mm

- HDRB izolator düşey kuvvet analizi



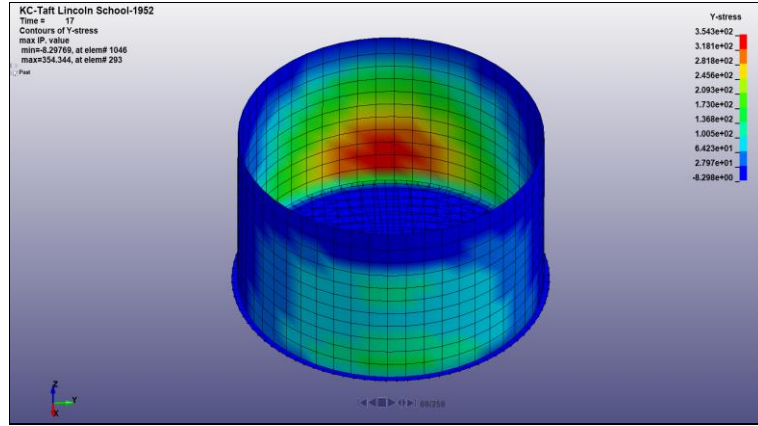
Şekil C2.66: HDRB izolatorü düşey kuvvet grafiği

EK C3 LRB İzolatörlü LNG Tankın Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

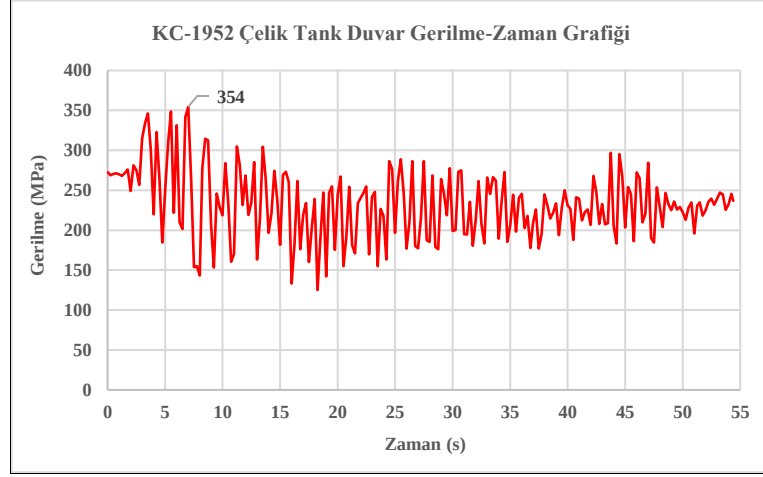
Kern County depremi Taft Lincoln School istasyonu, Borrego Mtn depremi El Centro Array istasyonu, Imperial Valley depremi Calexico Fire istasyonu, Imperial Valley Depremi Delta istasyonu, Victoria depremi Chihuahua istasyonu ve Irpina depremi Bisaccia istasyonu ivme kayıtlarının 2475 yılda bir oluşacak depreme göre (SSE deprem performans seviyesi) ölçeklendirilmiş LRB izolatörlü LNG tank modelinin lineer olmayan analiz sonuçlarına çelik tank duvar gerilmeleri, LNG sıvısı dalga yükseklikleri, çelik tank duvar yanal deformasyonları, çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman farkları, tabanda oluşan maksimum kesme kuvvetleri, izolatöre gelen yatay kuvvetin yapmış olduğu deplasmanlar ve her bir izolatöre gelen düşey kuvvet analiz sonuçları Şekil C3.1-66'da model ve grafiklerde verilmiştir.

C3-A Kern County Depremi Taft Lincoln School İstasyonu-1952

- Çelik tank duvar gerilme analizi

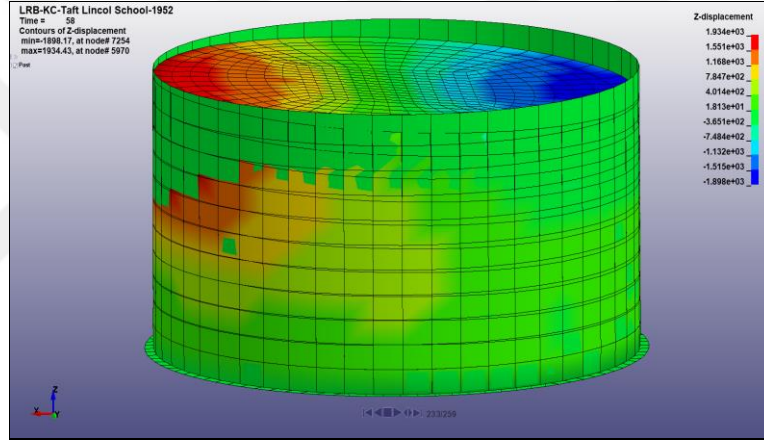


Şekil C3.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

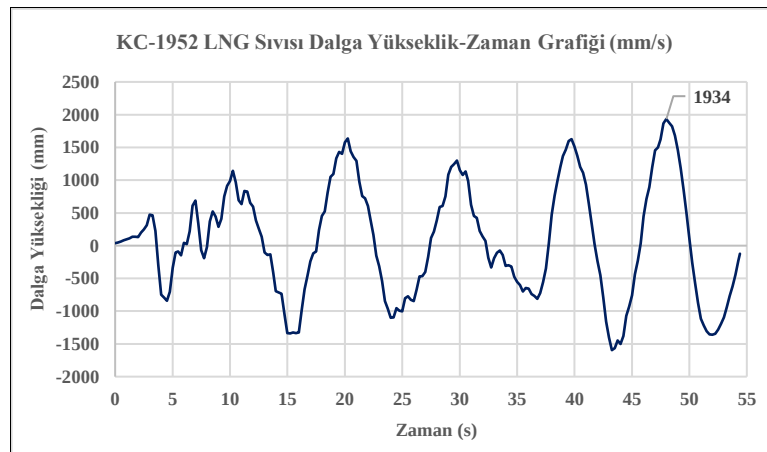


Şekil C3.2: Çelik tank duvar gerilme analiz-zaman grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

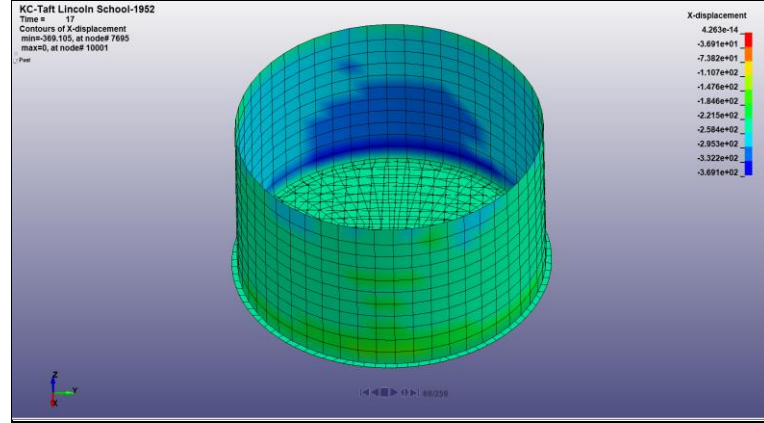


Şekil C3.3: LNG sıvısı dalga yüksekliği analizi modeli

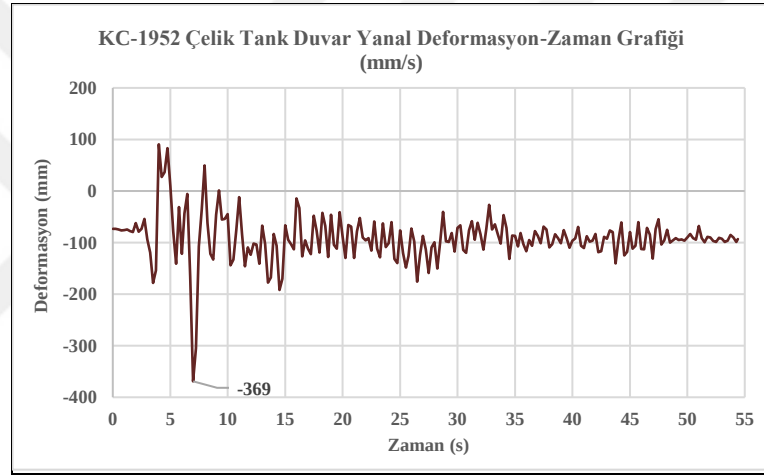


Şekil C3.4: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

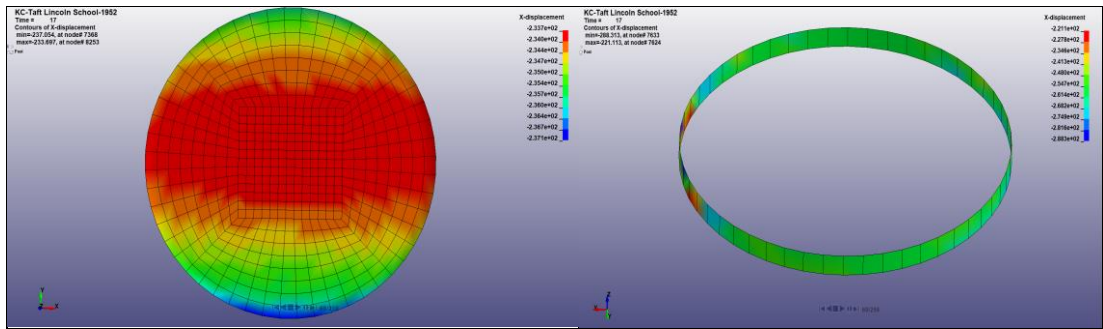


Şekil C3.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

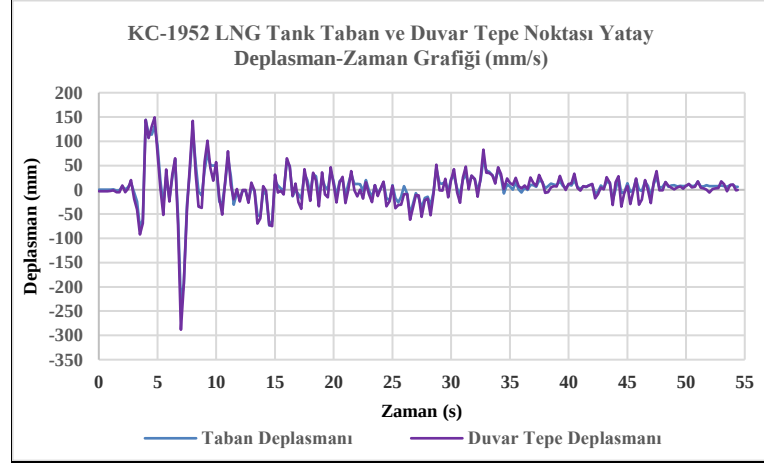


Şekil C3.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C3.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman analiz modeli



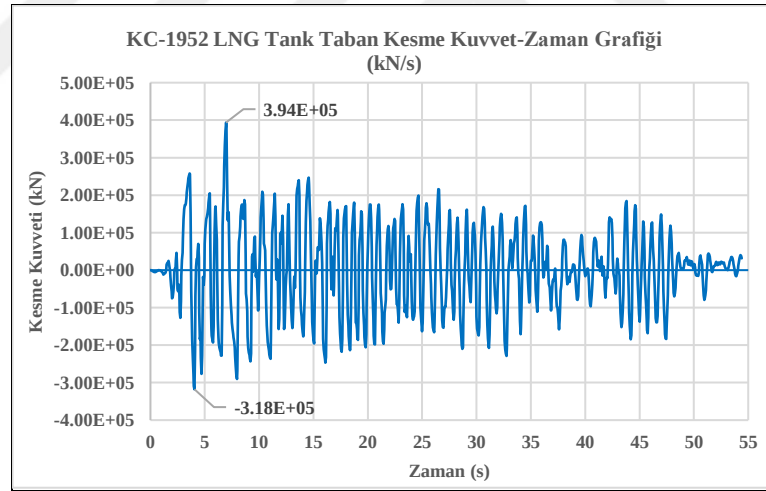
Şekil C3.8: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 234 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 288 mm

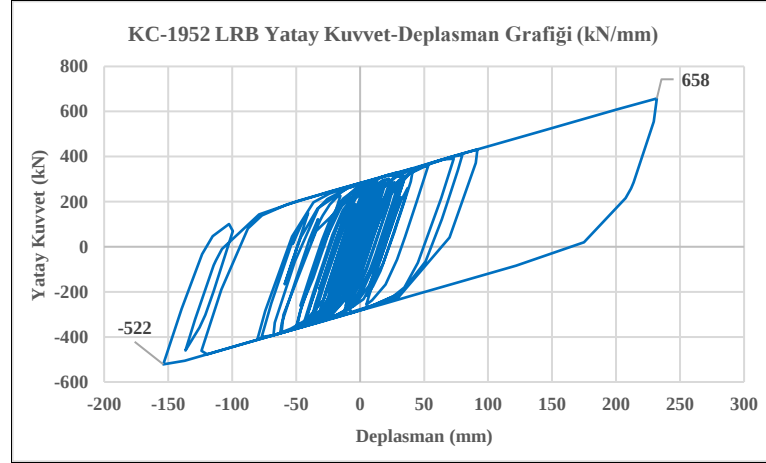
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 54 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C3.9: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- LRB izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

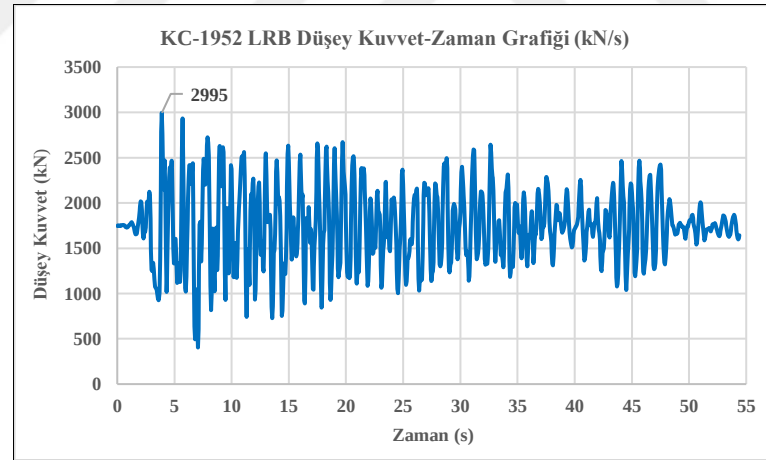


Şekil C3.10: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatörde oluşan maksimum kesme kuvveti: 658kN

LRB izolatörde oluşan maksimum yatay deplasman miktarı: 232mm

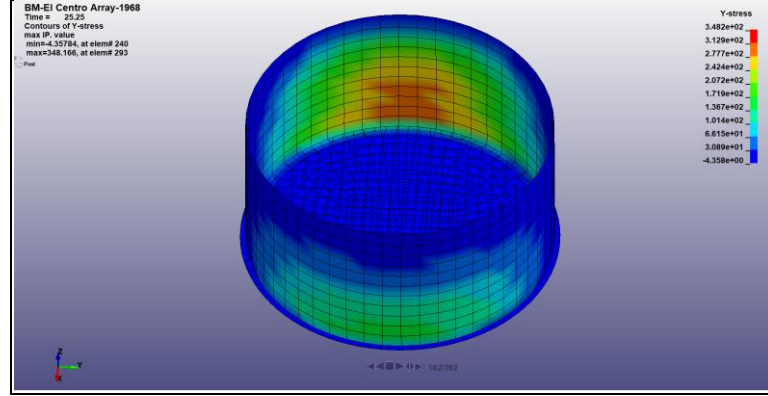
- LRB izolatör düşey kuvvet analizi



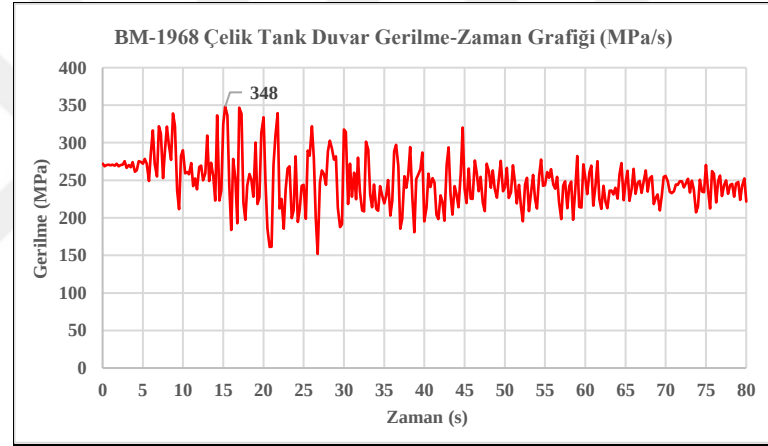
Şekil C3.11: LRB izolatör düşey kuvveti grafiği

C3-B Borrego Mtn Depremi El Centro Array İstasyonu-1968

- Çelik tank duvar gerilme analizi

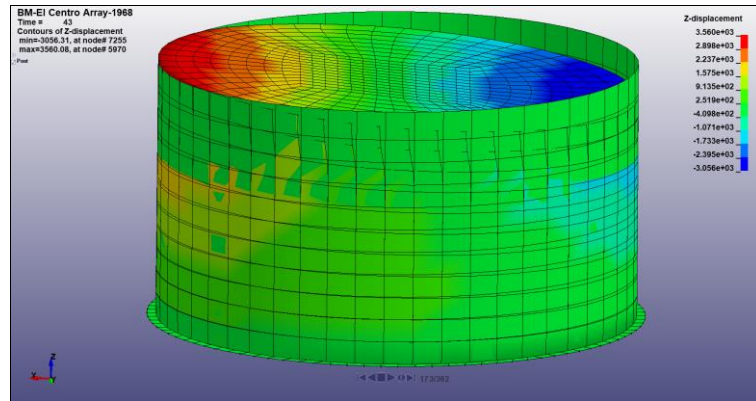


Şekil C3.12: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

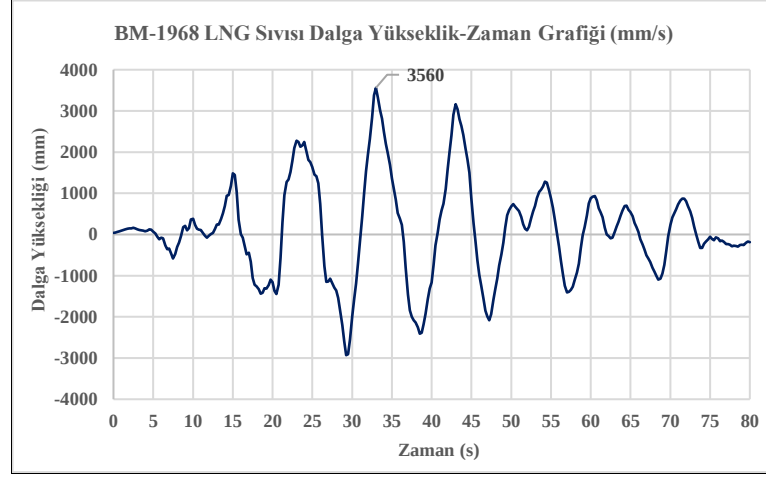


Şekil C3.13: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

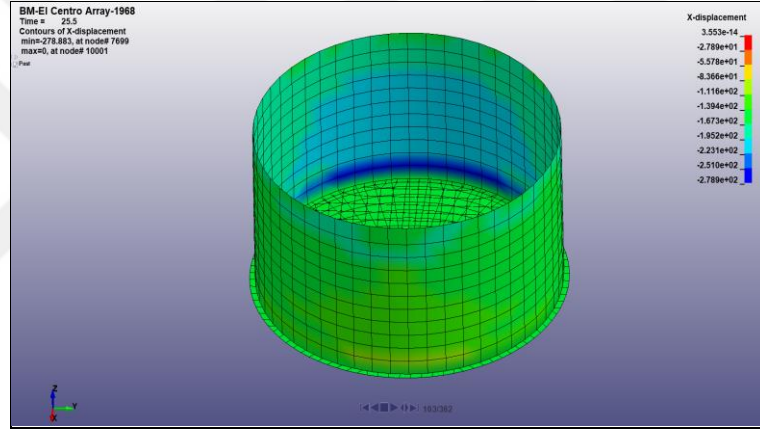


Şekil C3.14: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

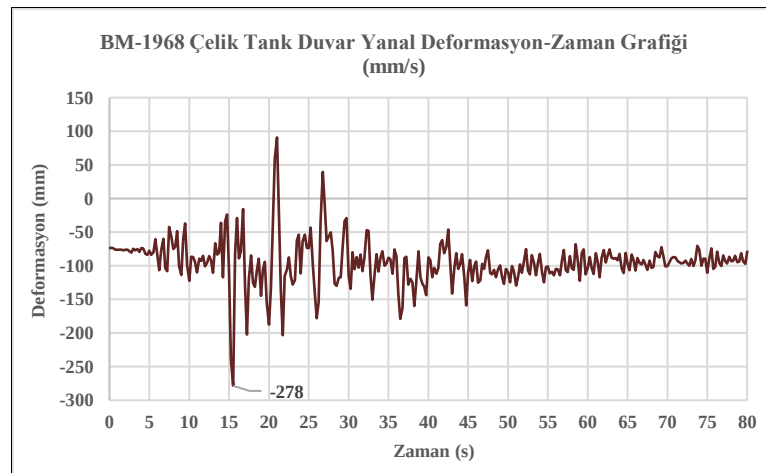


Şekil C3.15: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

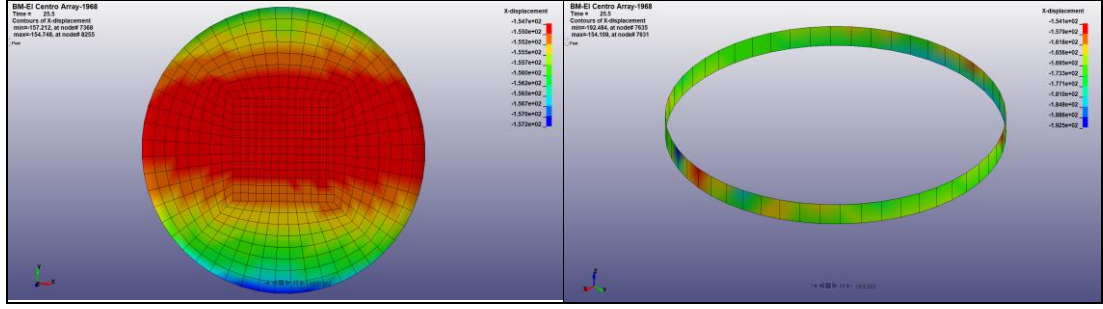


Şekil C3.16: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

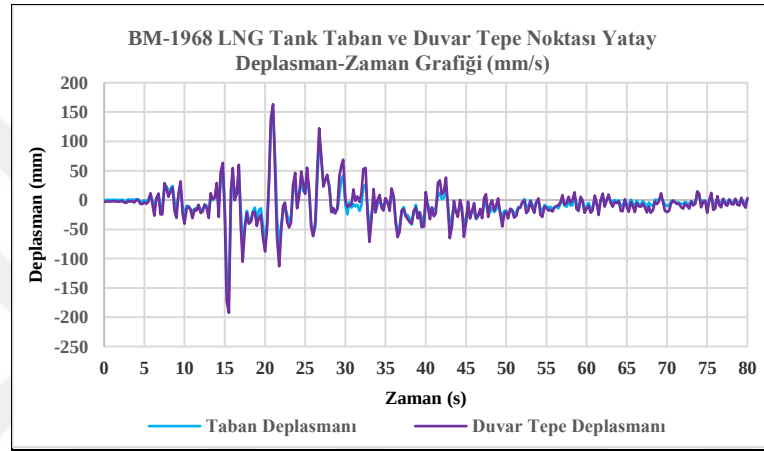


Şekil C3.17: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C3.18: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası analiz modeli



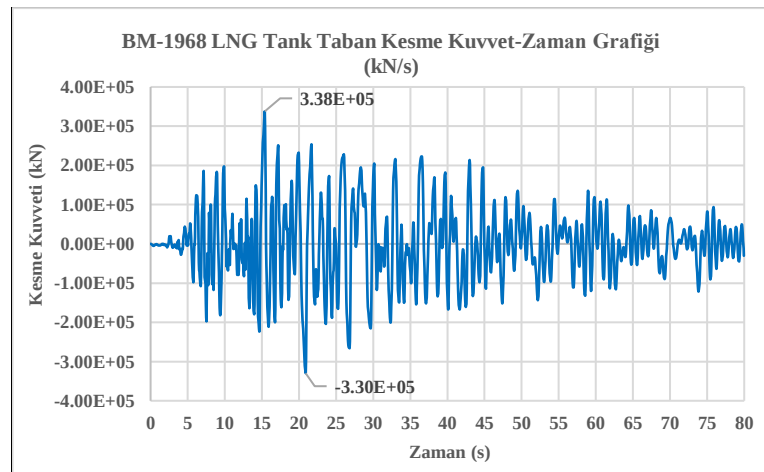
Şekil C3.19: Çelik tank taban-duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 155 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 192 mm

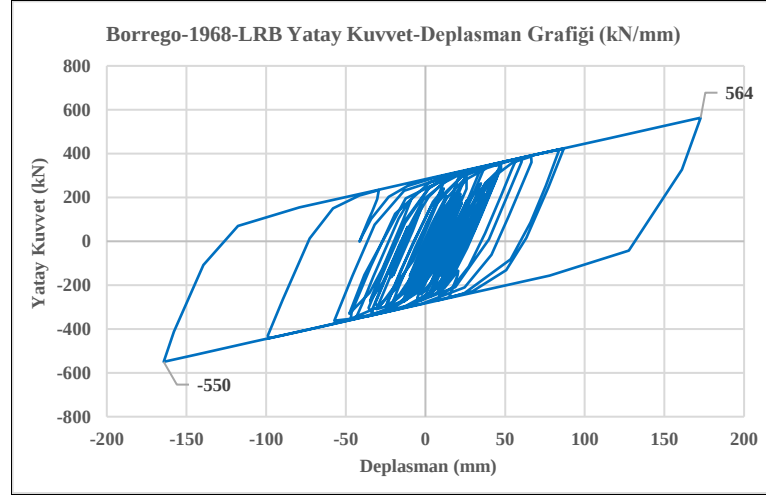
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 37 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C3.20: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- LRB izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

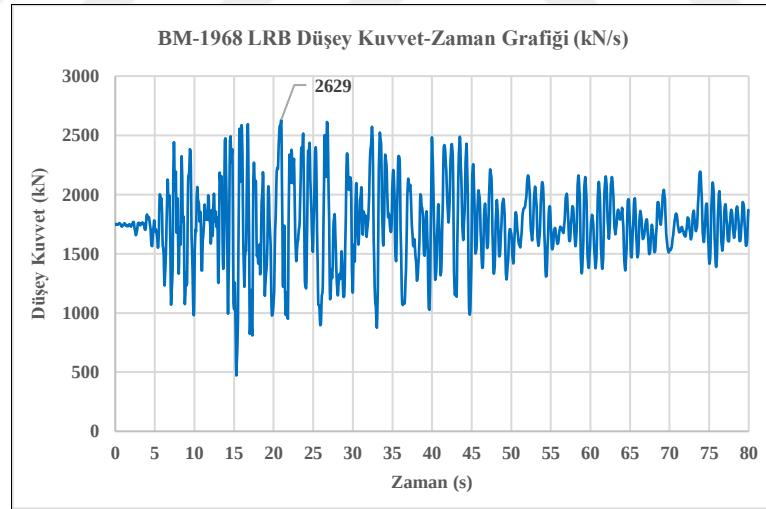


Şekil C3.21: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatörde oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 564kN

LRB izolatörde oluşan maksimum yatay deplasman miktarı: 173mm

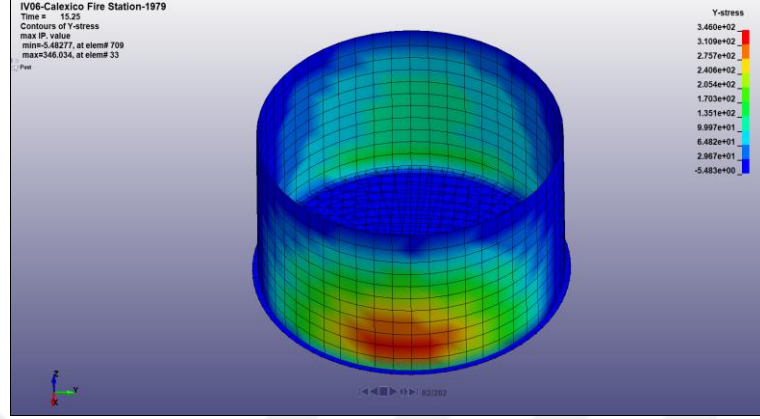
- LRB izolatör düşey kuvvet analizi



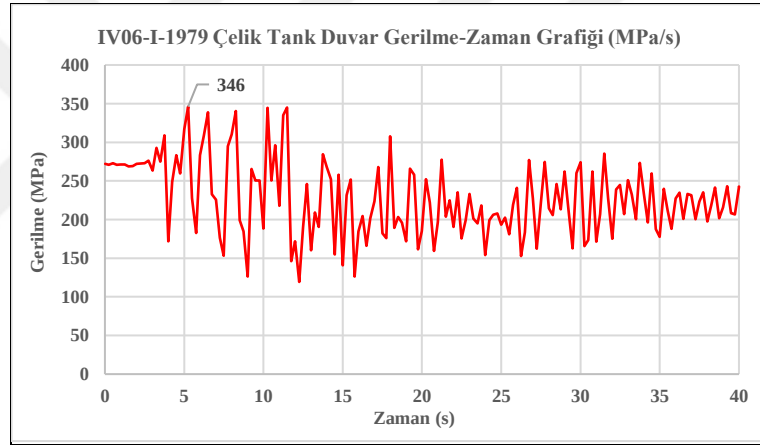
Şekil C3.22: LRB izolatör düşey kuvveti grafiği

C3-C Imperial Valley Depremi Calexico Fire İstasyonu-1979

- Çelik tank duvar gerilme analizi

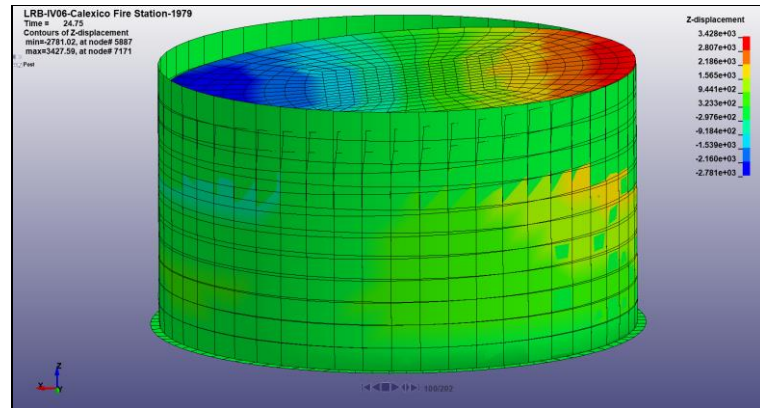


Şekil C3.23: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

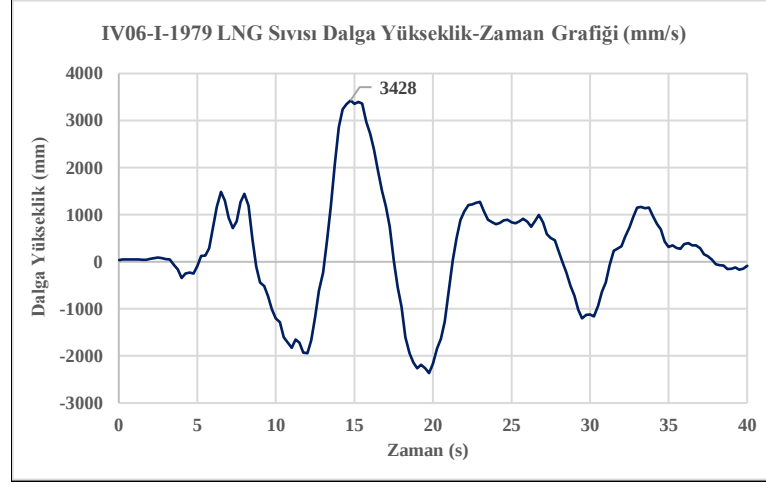


Şekil C3.24: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

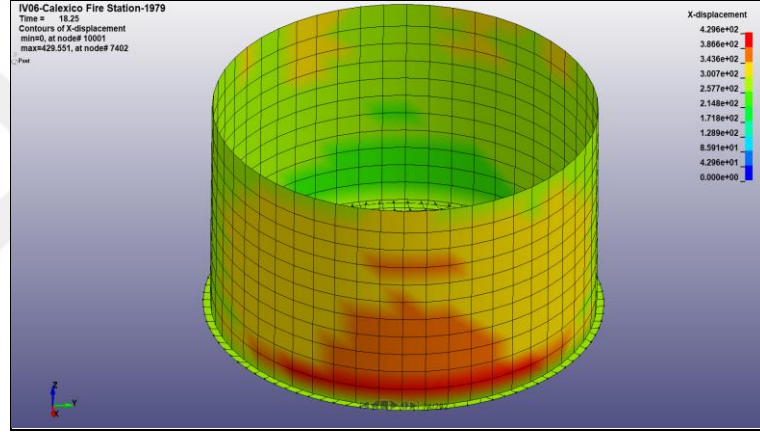


Şekil C3.25: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

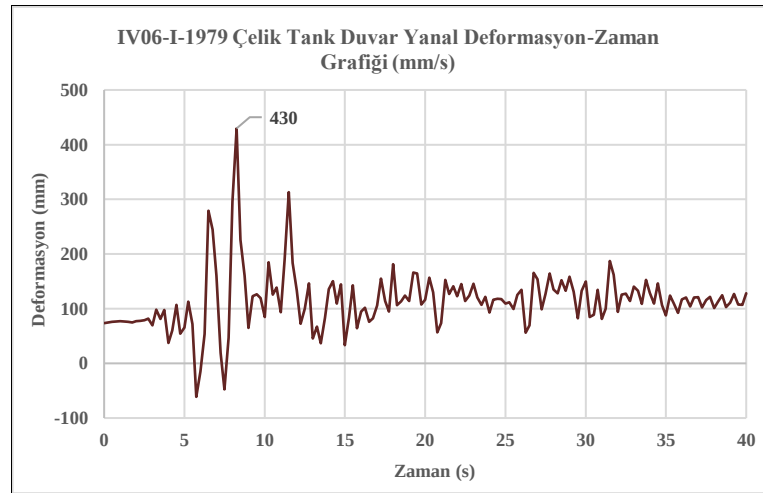


Şekil C3.26: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

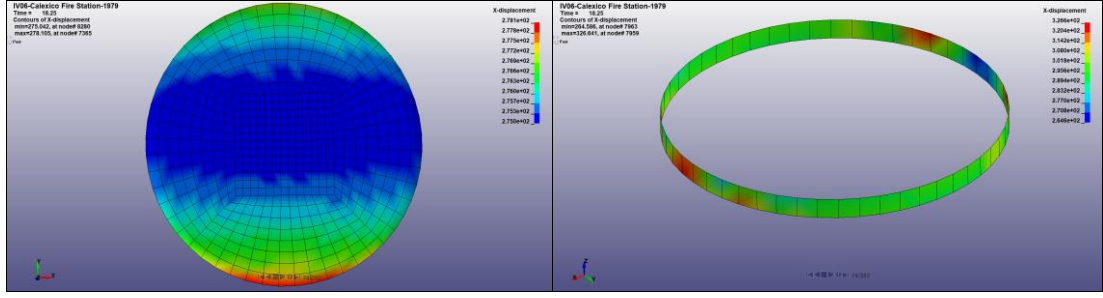


Şekil C3.27: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

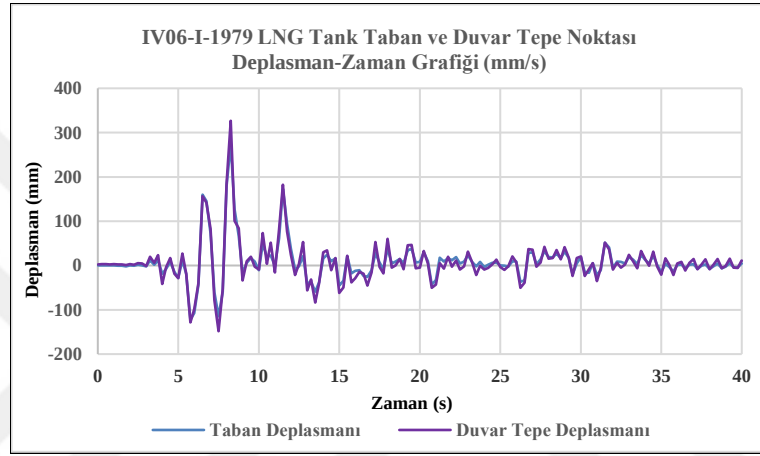


Şekil C3.28: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C3.29: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



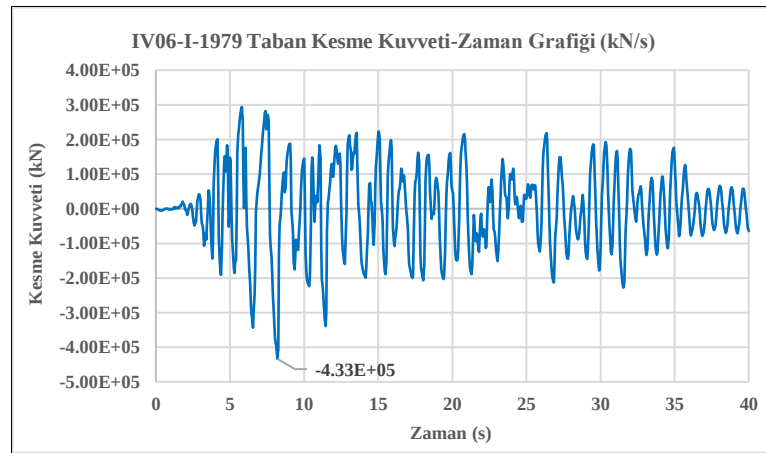
Şekil C3.30: Çelik tank taban ve duvar en üst noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 275 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 327 mm

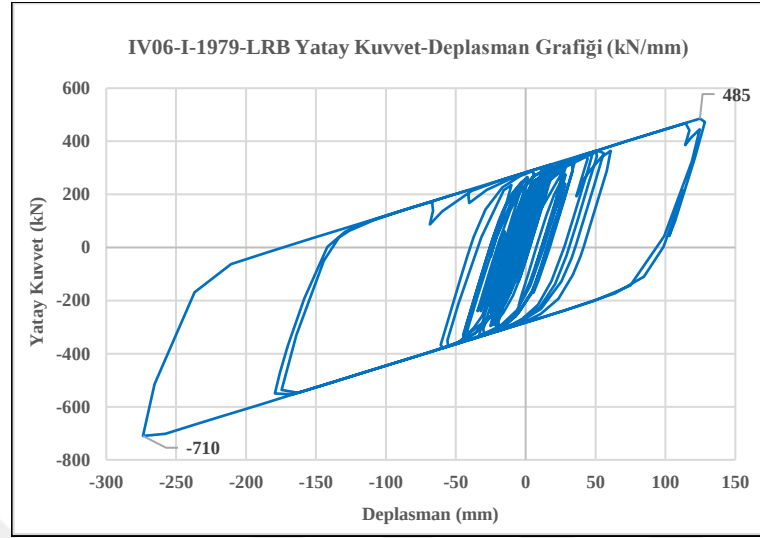
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 52 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C3.31: LNG tankı taban kesme kuvveti grafiği

- LRB izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

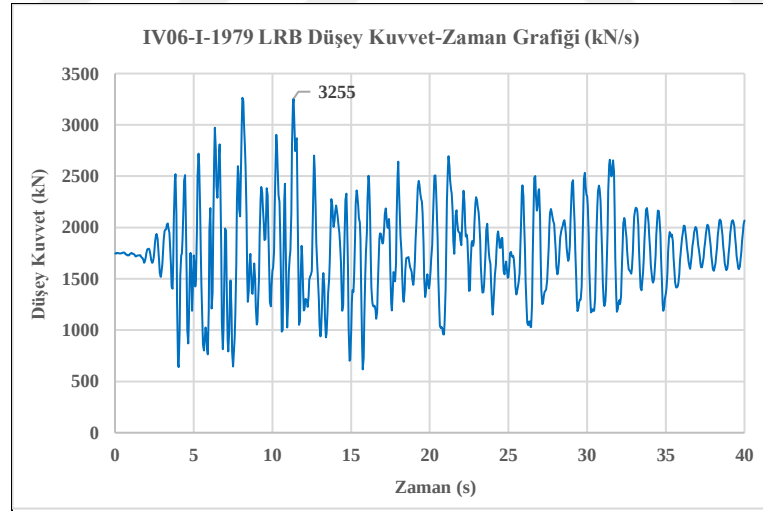


Şekil C3.32: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatörde maksimum taban kesme kuvveti: 710kN

LRB izolatörde maksimum yatay deplasman miktarı: 274mm

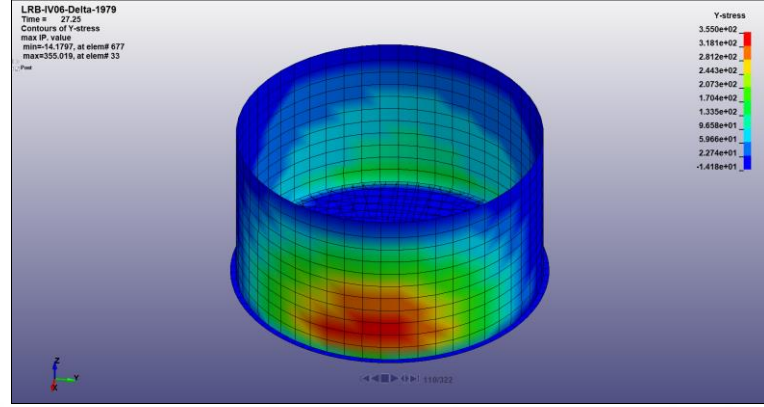
- LRB izolatör düşey kuvvet analizi



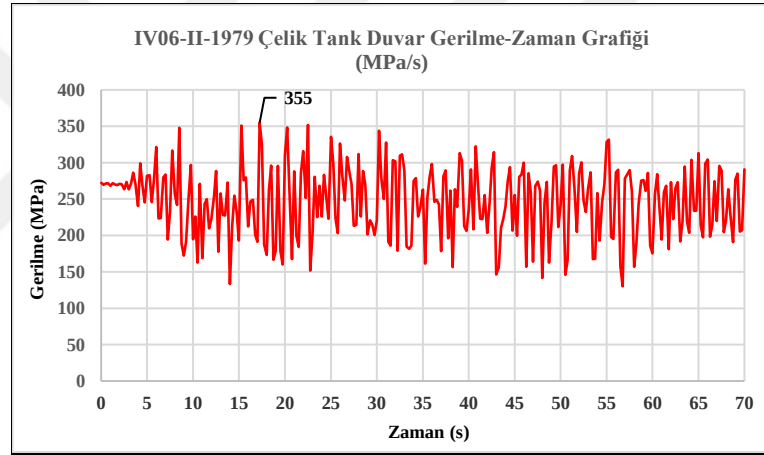
Şekil C3.33: LRB izolatör düşey kuvveti grafiği

C3-C Imperial Valley Depremi Delta İstasyonu-1979

- Çelik tank duvar gerilme analizi

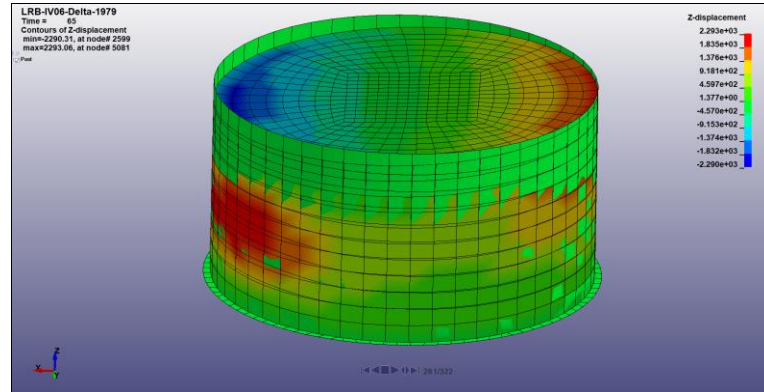


Şekil C3.34: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

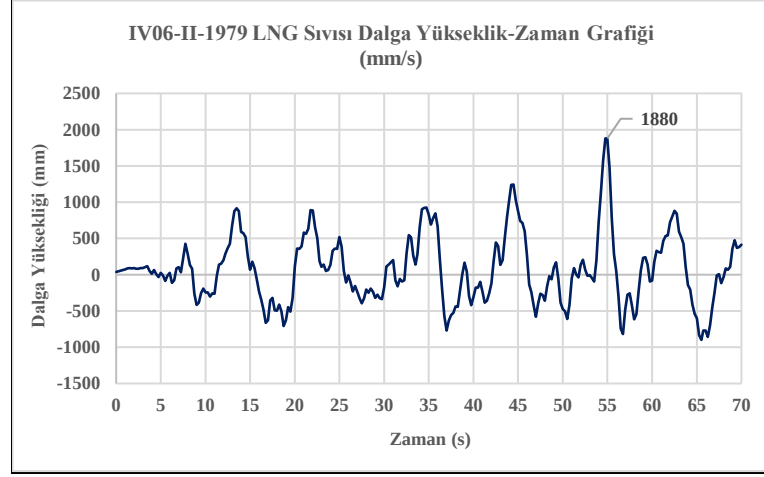


Şekil C3.35: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

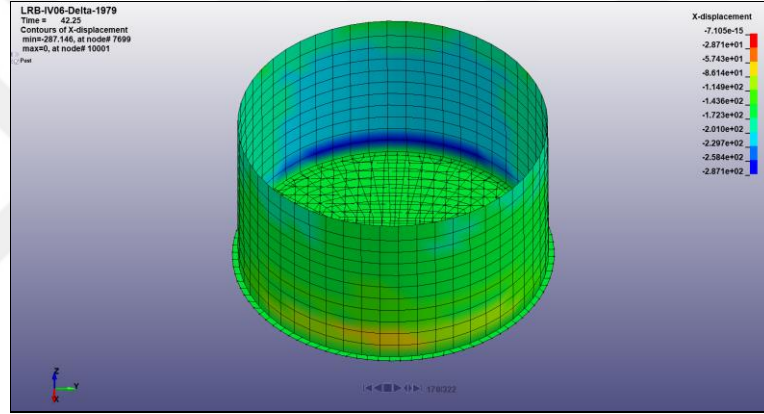


Şekil C3.36: LNG sıvısı maksimum dalga yükseklik analiz modeli

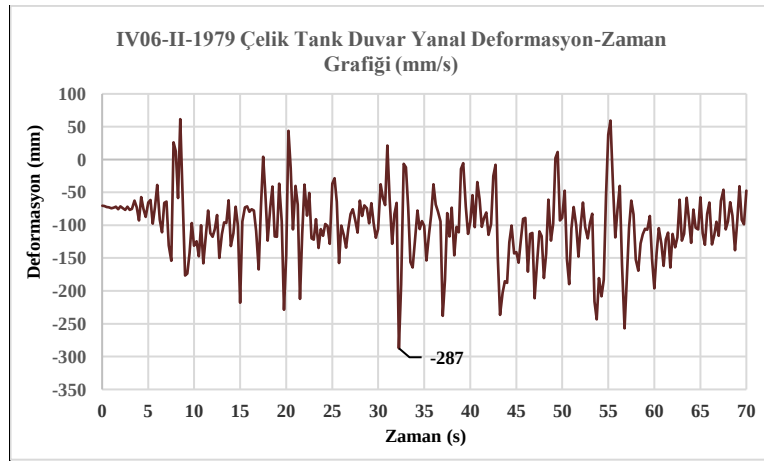


Şekil C3.37: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

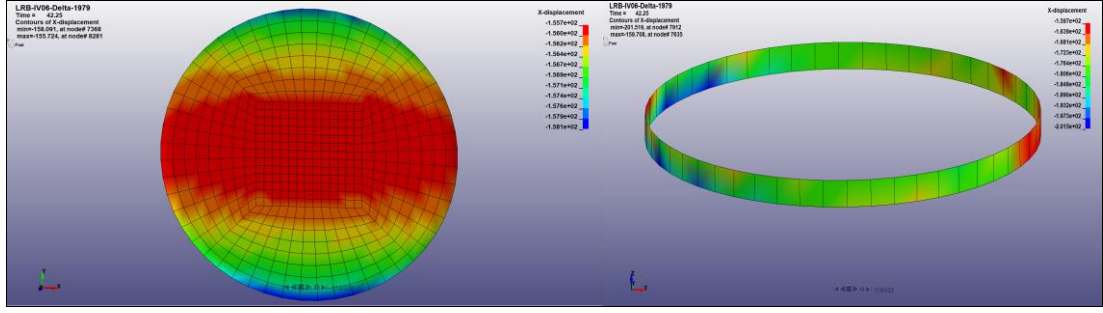


Şekil C3.38: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

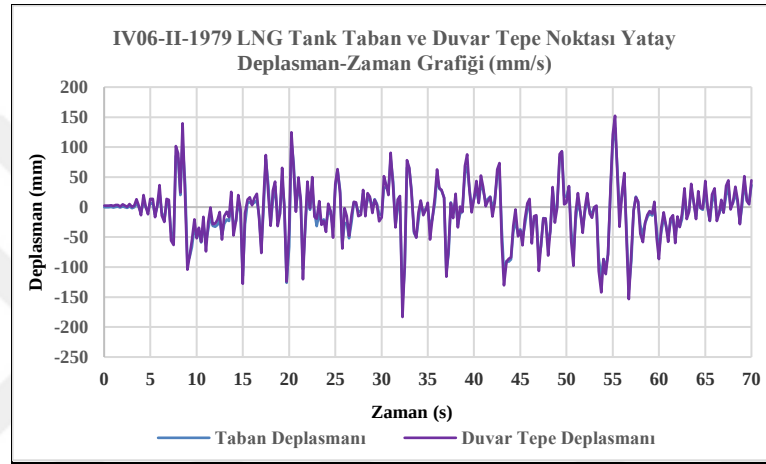


Şekil C3.39: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C3.40: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



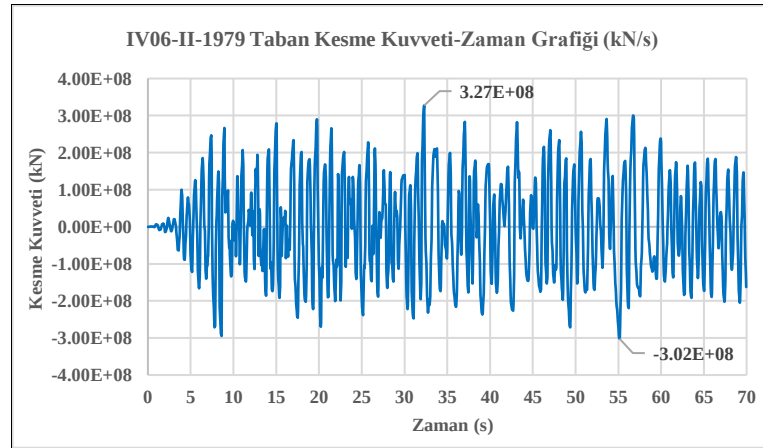
Şekil C3.41: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 158 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 183 mm

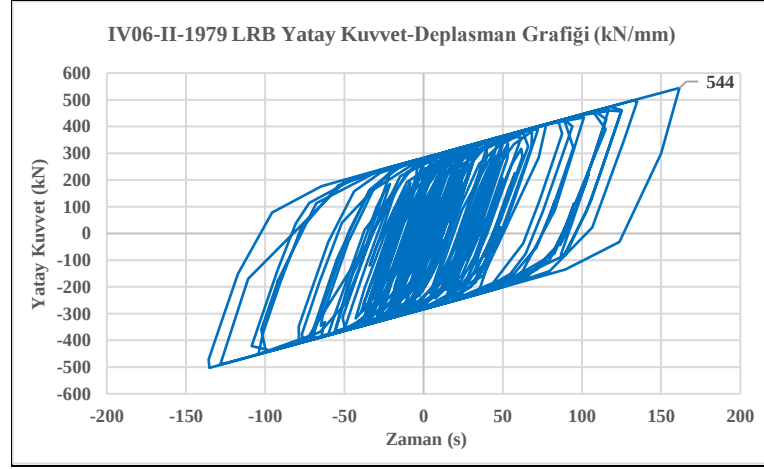
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 25 mm

- LNG tank tabanında oluşan toplam kesme kuvveti analizi



Şekil C3.42: LNG tankı taban kesme kuvveti grafiği

- LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman analizi

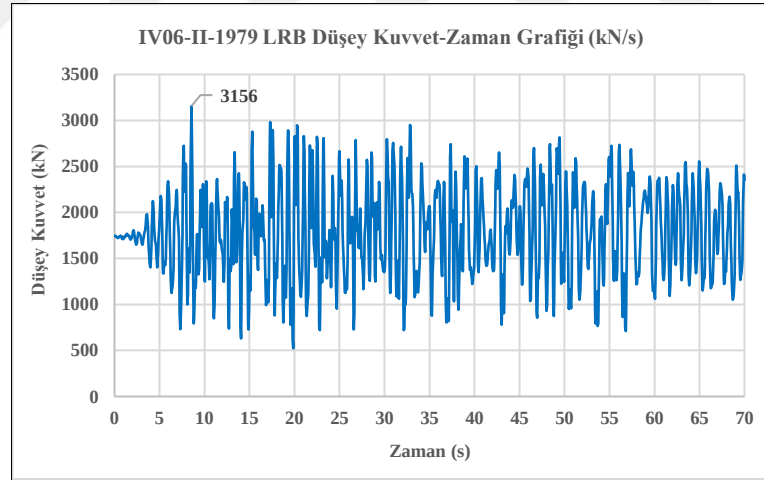


Şekil C3.43: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatörde maksimum taban kesme kuvveti: 544 kN

LRB izolatörde maksimum yatay deplasman miktarı: 164 mm

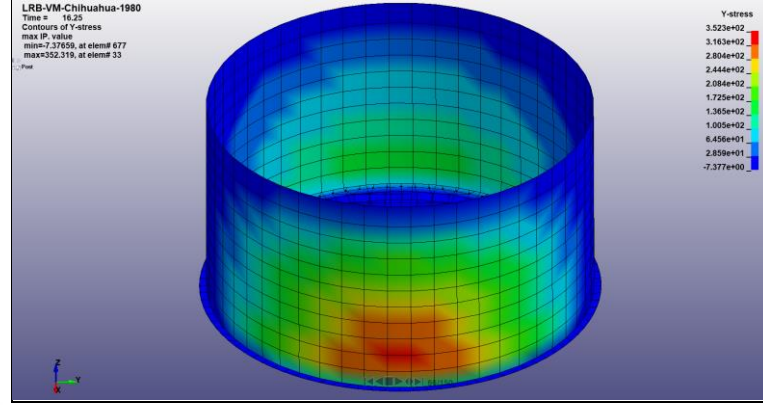
- LRB izolatör düşey kuvvet analizi



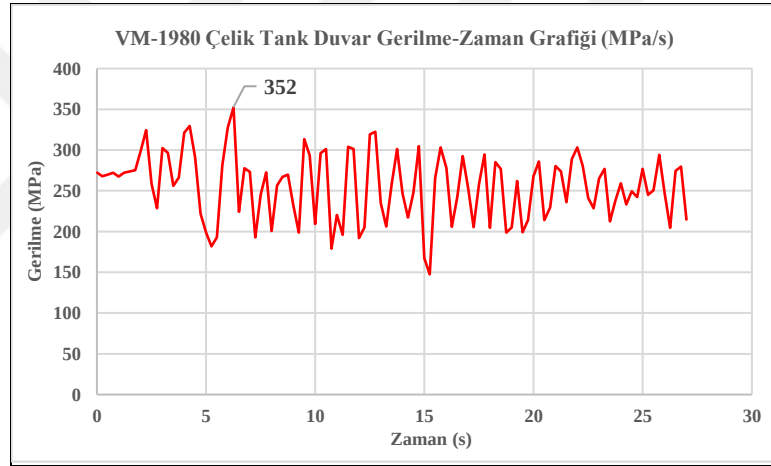
Şekil C3.44: LRB izolatör düşey kuvvet grafiği

C3-D Victoria Depremi Chihuahua İstasyonu-1980 Analizi

- Çelik tank duvar gerilme analizi

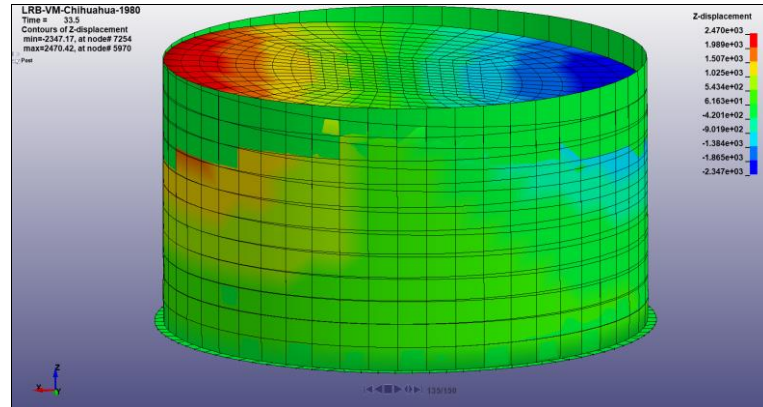


Şekil C3.45: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

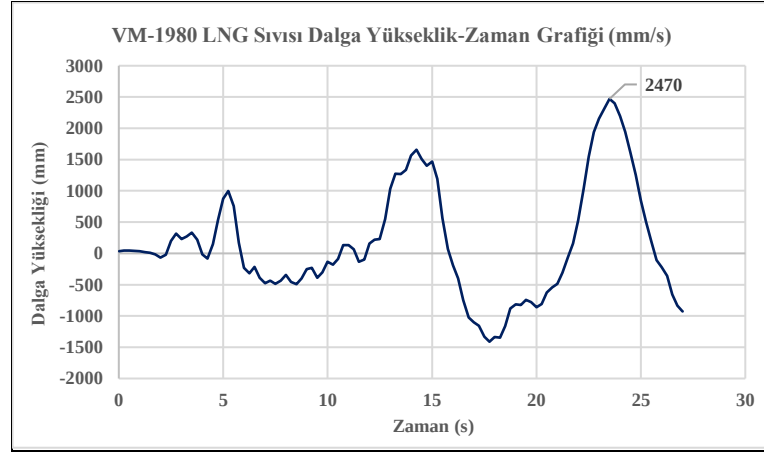


Şekil C3.46: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

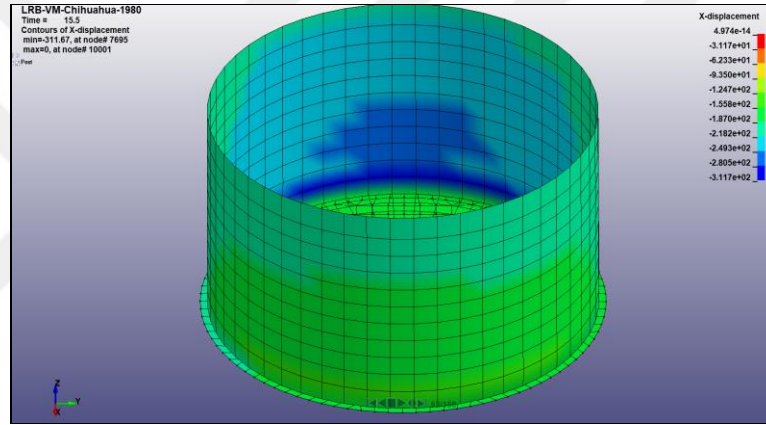


Şekil C3.47: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

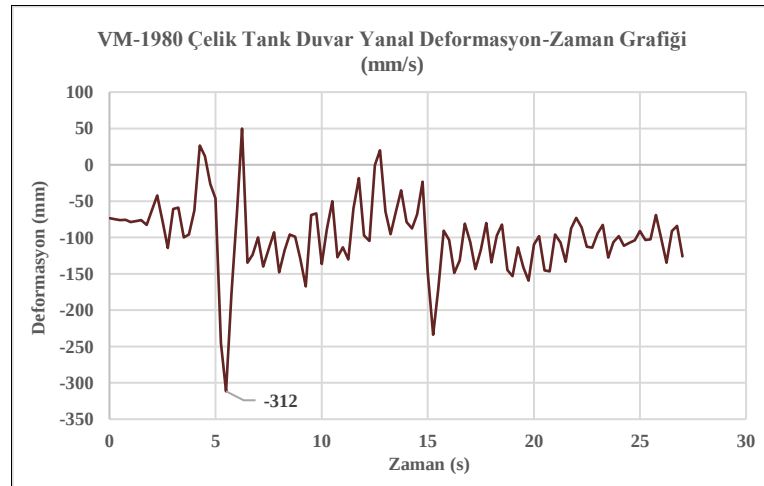


Şekil C3.48: LNG sıvısı dalga yükseklik-zaman grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

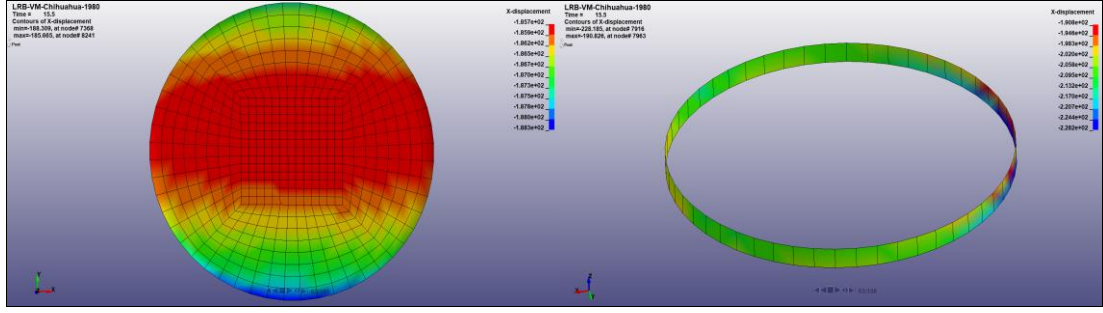


Şekil C3.49: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

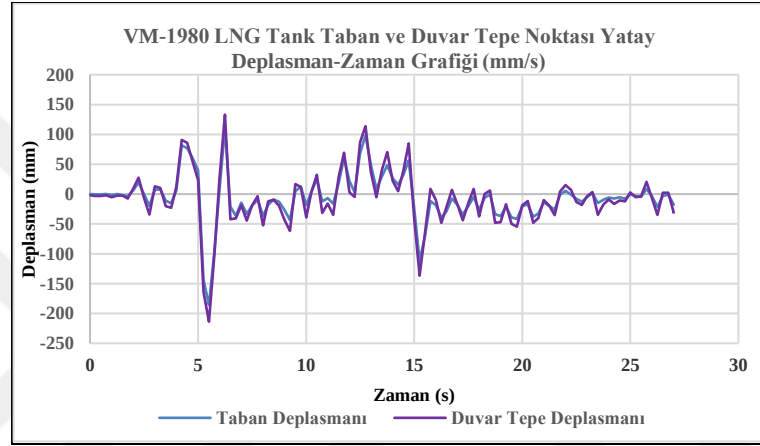


Şekil C3.50: Çelik tank duvarı yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C3.51: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



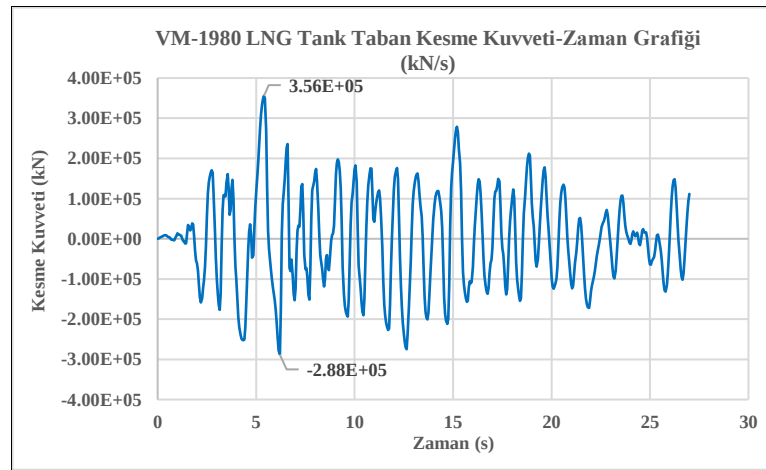
Şekil C3.52: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 186 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 214 mm

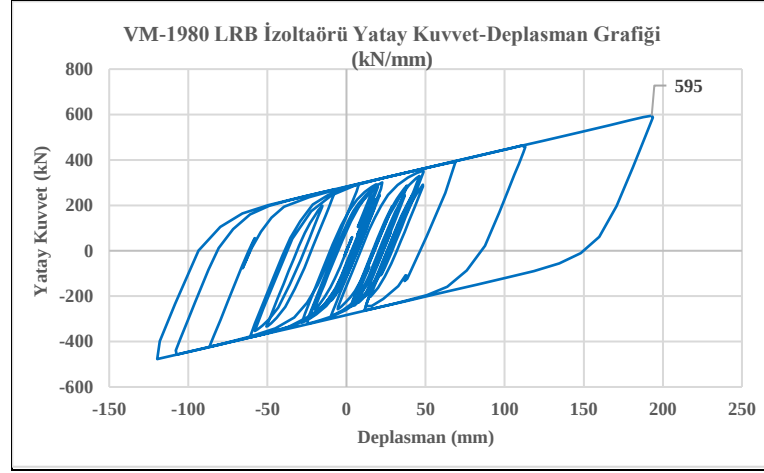
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 28 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C3.53: LNG tank taban kesme kuvveti grafiği

- LRB izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

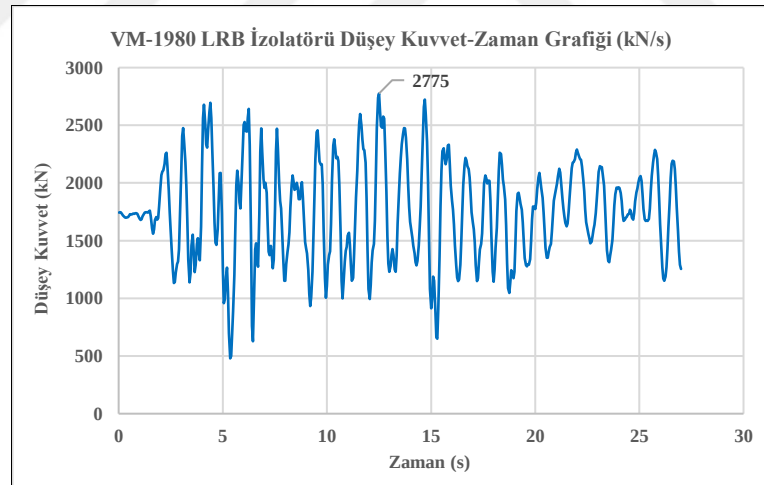


Şekil C3.54: LRB izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatör maksimum taban kesme kuvveti: 595 kN

LRB izolatör maksimum yatay deplasman miktarı: 194 mm

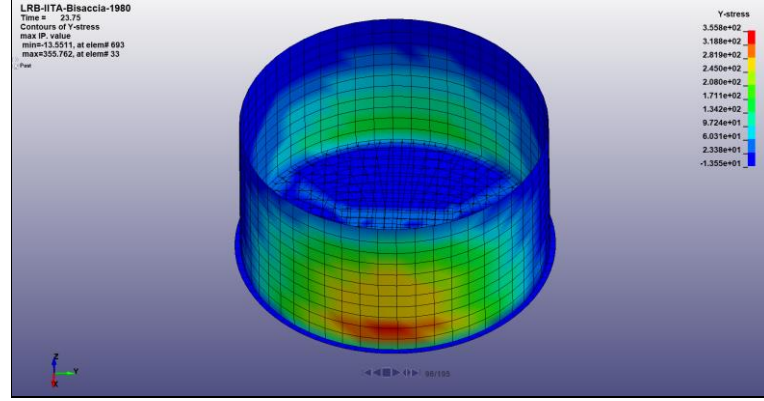
- LRB izolatör düşey kuvvet analizi



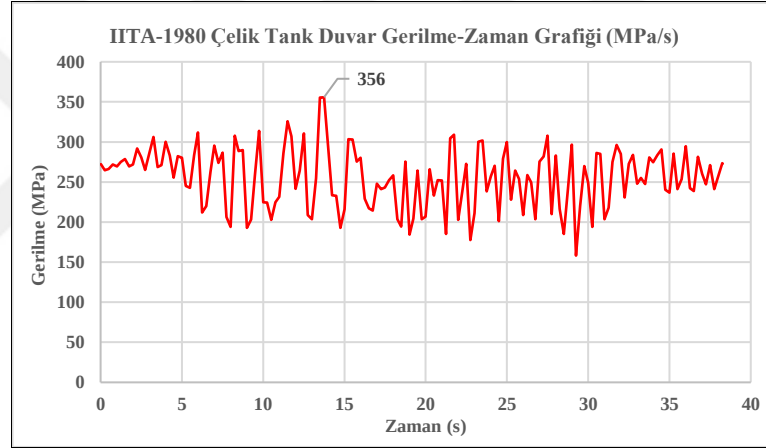
Şekil C3.55: LRB İzolatörü düşey kuvvet grafiği

C3-E Irpina Depremi Bisaccia İstasyonu-1980 Analizi

- Çelik tank duvar gerilme analizi

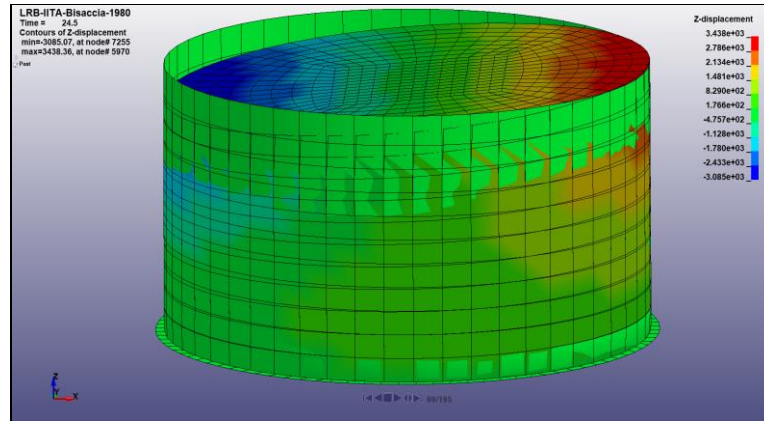


Şekil C3.56: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

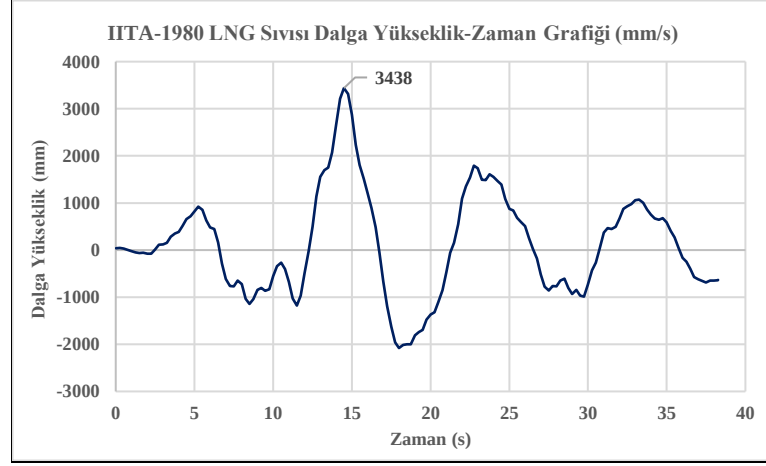


Şekil C3.57: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

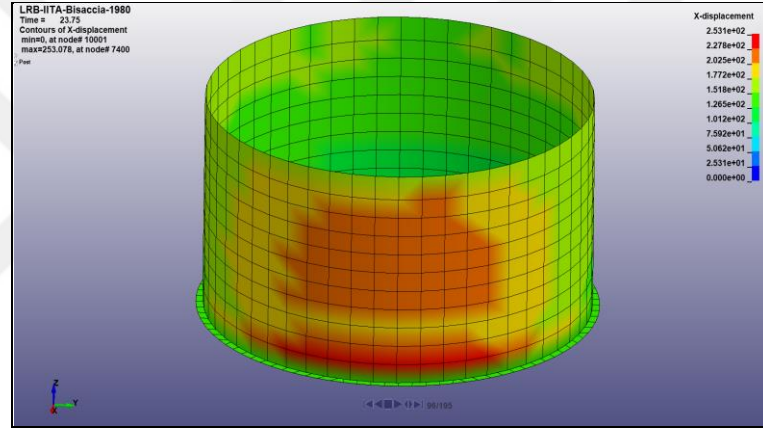


Şekil C3.58: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

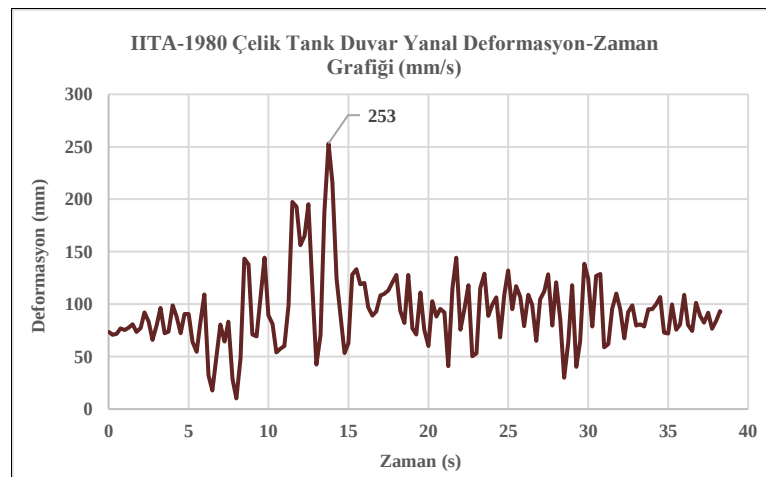


Şekil C3.59: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

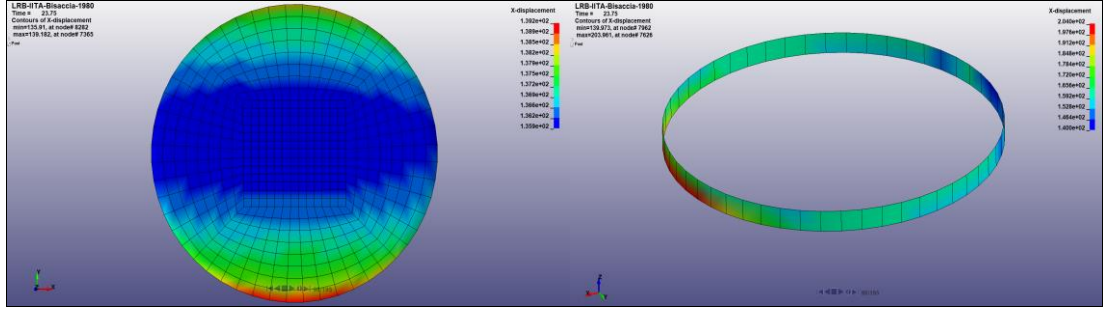


Şekil C3.60: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

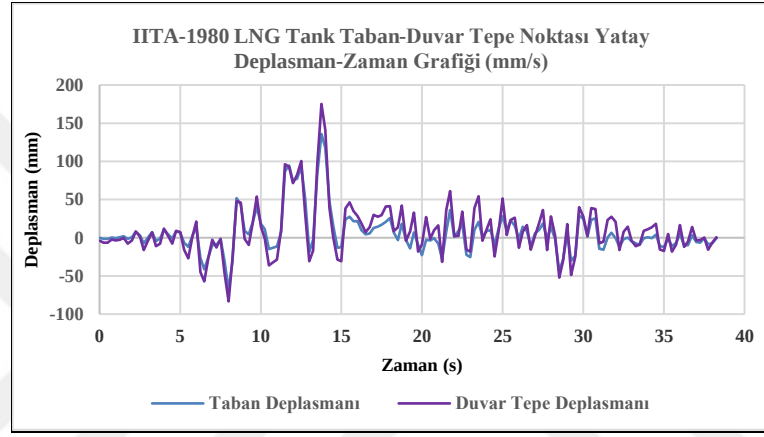


Şekil C3.61: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C3.62: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



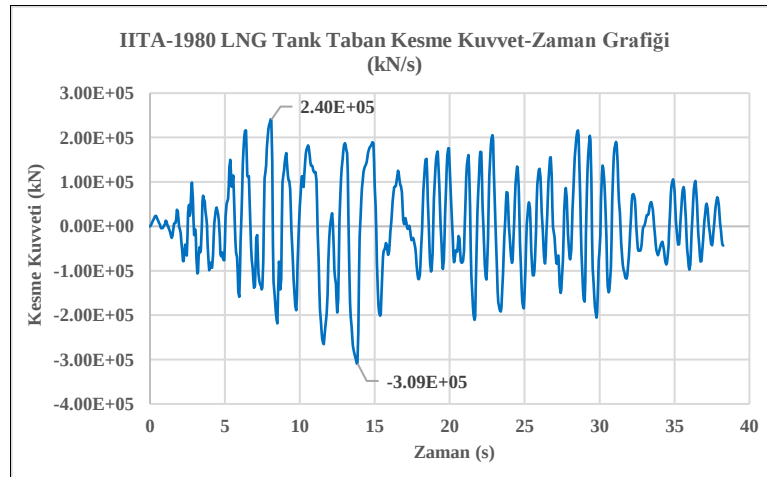
Şekil C3.63: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 136 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 175 mm

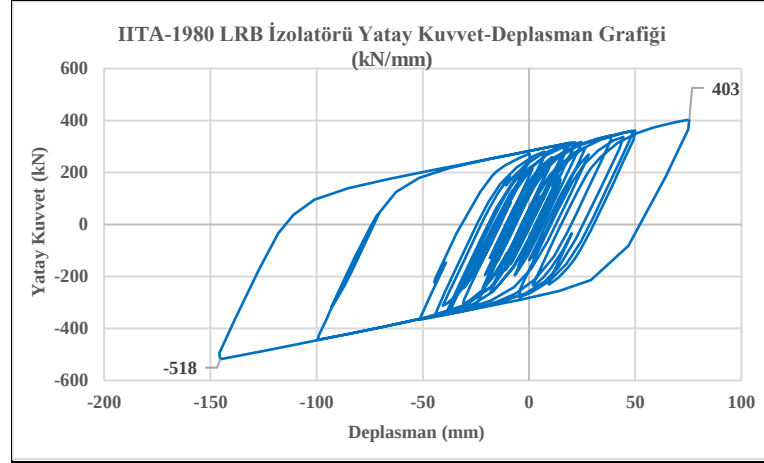
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 39 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C3.64: LNG tank taban kesme kuvvet grafiği

- LRB izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

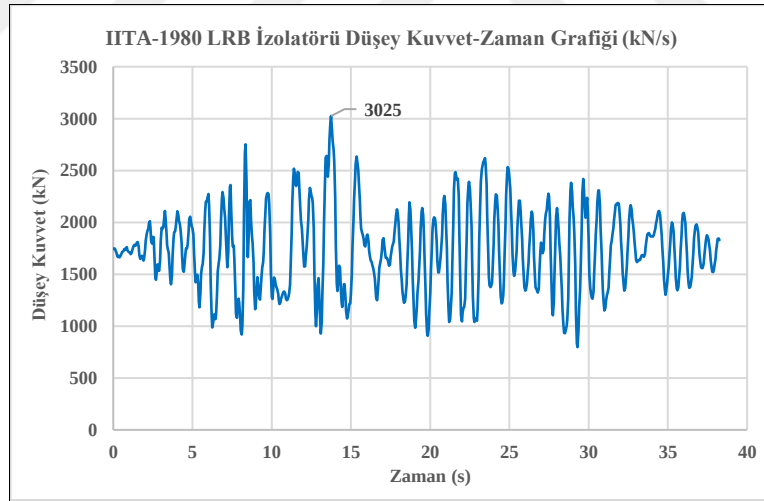


Şekil C3.65: LRB izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

LRB izolatörde maksimum taban kesme kuvveti : 518kN

LRB izolatörde maksimum yatay deplasman miktarı : 145mm

- LRB izolatör düşey kuvvet analizi



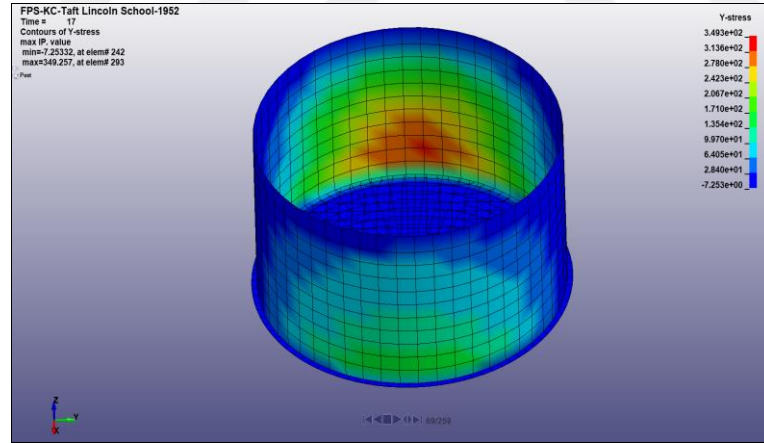
Şekil C3.66: LRB İzolatörü düşey kuvvet grafiği

EK C4 FPS İzolatörlü LNG Tankın Lineer Olmayan Analiz Sonuçları

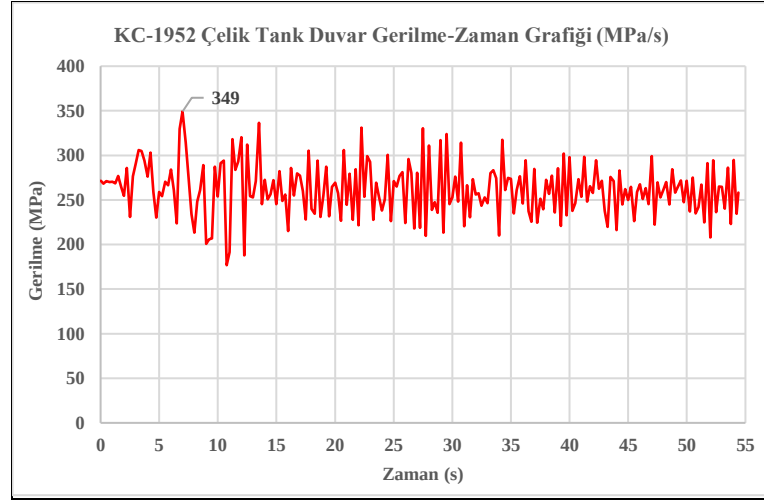
Kern County depremi Taft Lincoln School istasyonu, Borrego Mtn depremi El Centro Array istasyonu, Imperial Valley depremi Calexico Fire istasyonu, Imperial Valley Depremi Delta istasyonu, Victoria depremi Chihuahua istasyonu ve Irpina depremi Bisaccia istasyonu ivme kayıtlarının 2475 yılda bir oluşacak depreme göre (SSE deprem performans seviyesi) ölçeklendirilmiş FPS izolatörlü LNG tank modelinin lineer olmayan analiz sonuçlarına çelik tank duvar gerilmeleri, LNG sıvısı dalga yükseklikleri, çelik tank duvar yanal deformasyonları, çelik tank taban ve duvar tepe noktası yatay deplasman farkları, tabanda oluşan maksimum kesme kuvvetleri, izolatöre gelen yatay kuvvetin yapmış olduğu deplasmanlar ve her bir izolatöre gelen düşey kuvvet analiz sonuçları Şekil C3.1-66'da model ve grafiklerde verilmiştir.

C4-A Kern County Depremi Taft Lincoln School İstasyonu-1952

- Çelik tank duvar gerilme analizi

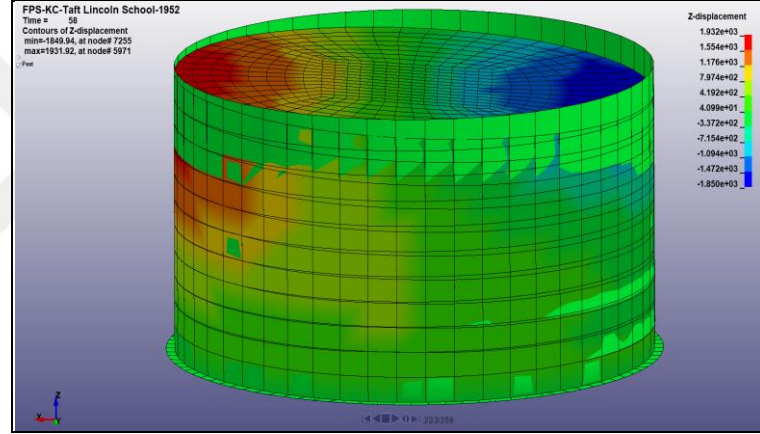


Şekil C4.1: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

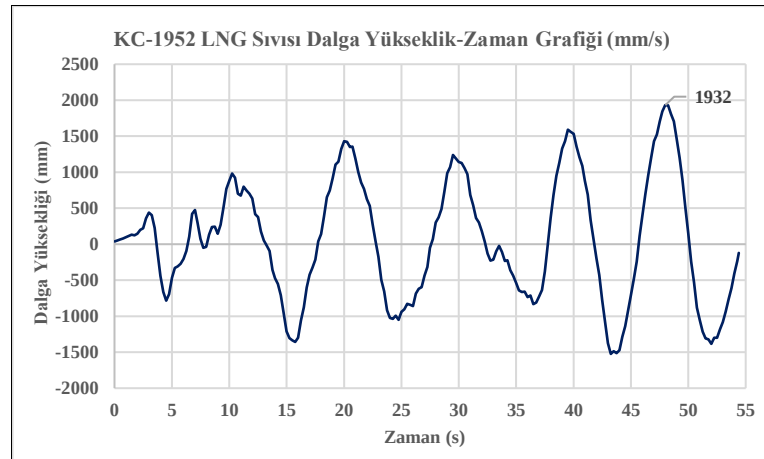


Şekil C4.2: Çelik tank duvar gerilme analizi grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

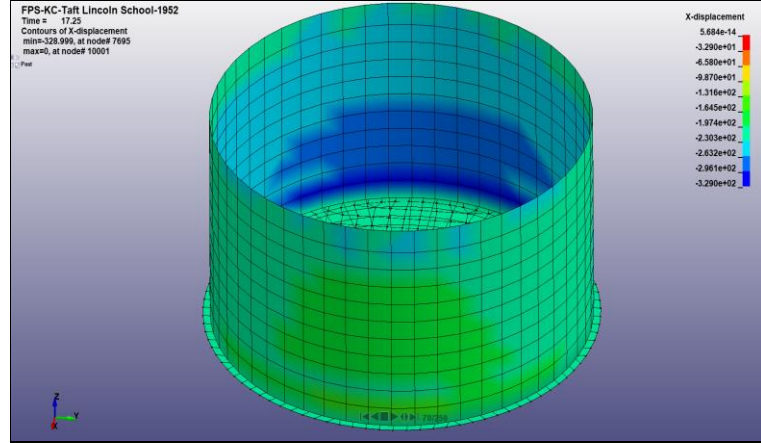


Şekil C4.3: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

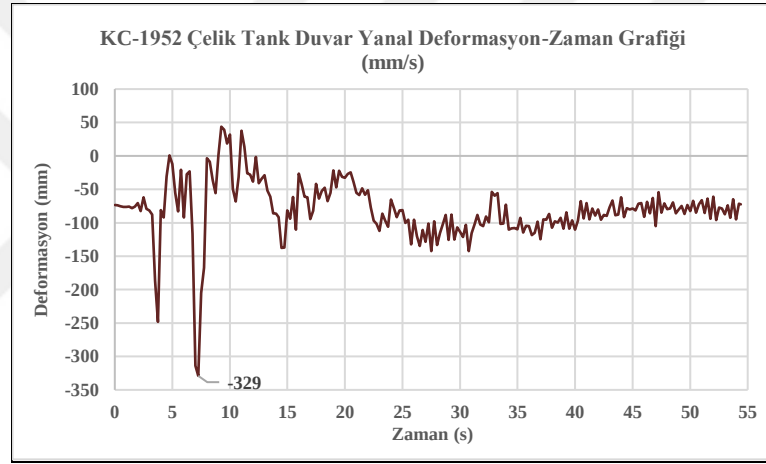


Şekil C4.4: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

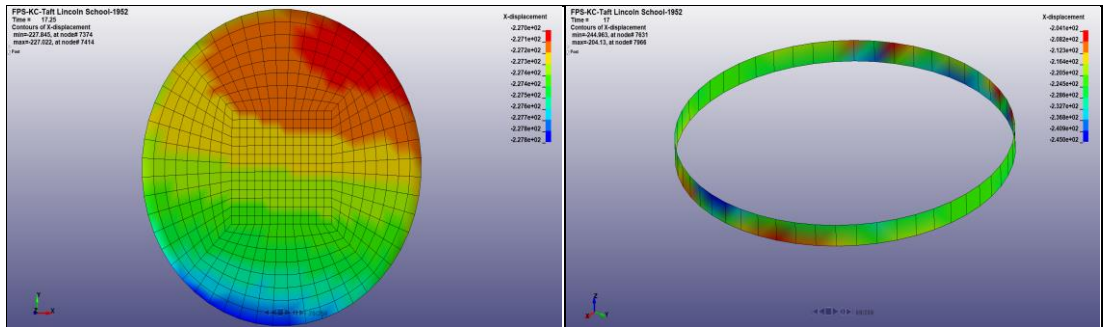


Şekil C4.5: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

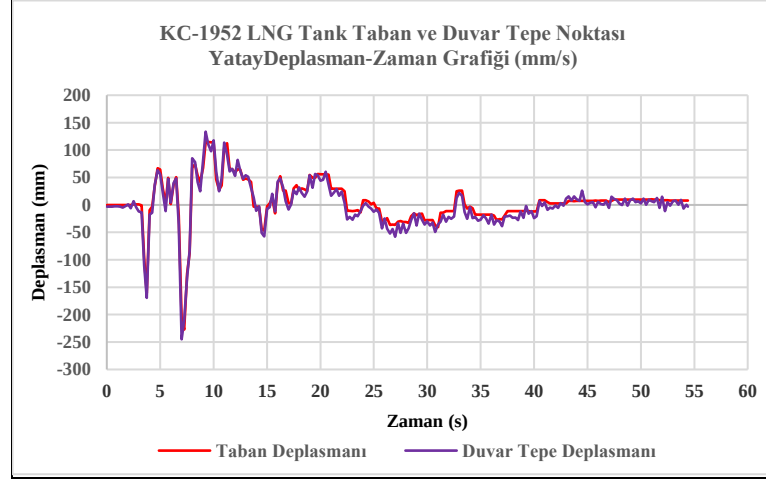


Şekil C4.6: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C4.7: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasmanı analiz modeli



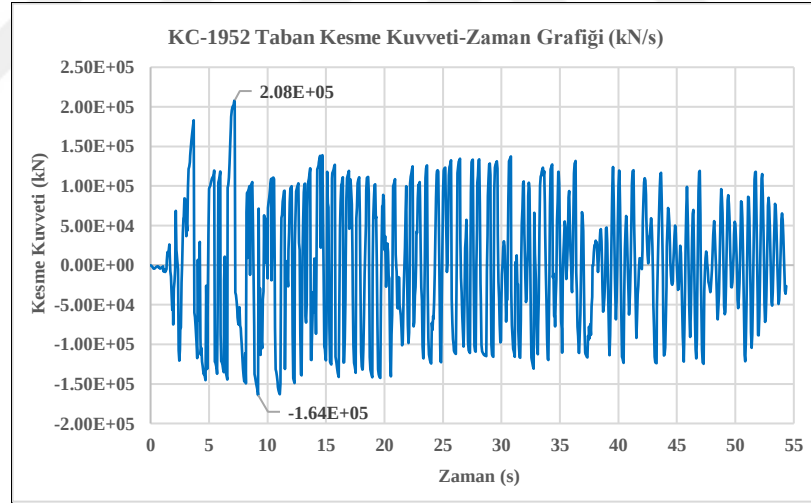
Şekil C4.8: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 227 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 245 mm

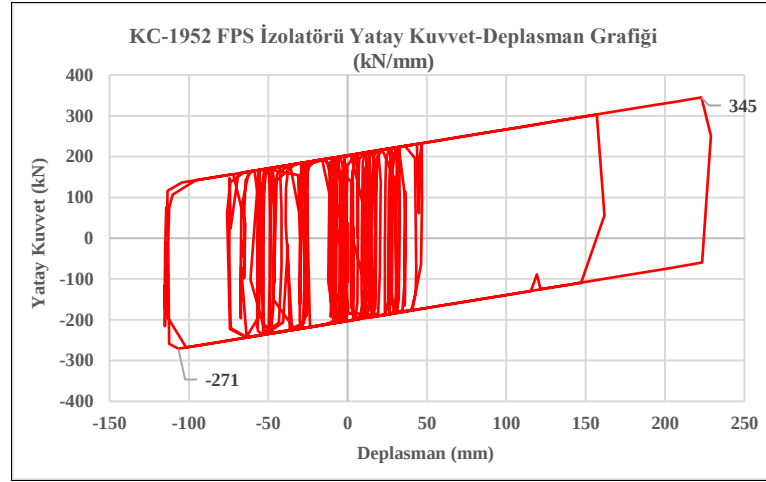
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 18 mm

- LNG tank taban kesme kuvvet analizi



Şekil C4.9: LNG tank taban kesme kuvvet grafiği

- FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman analizi

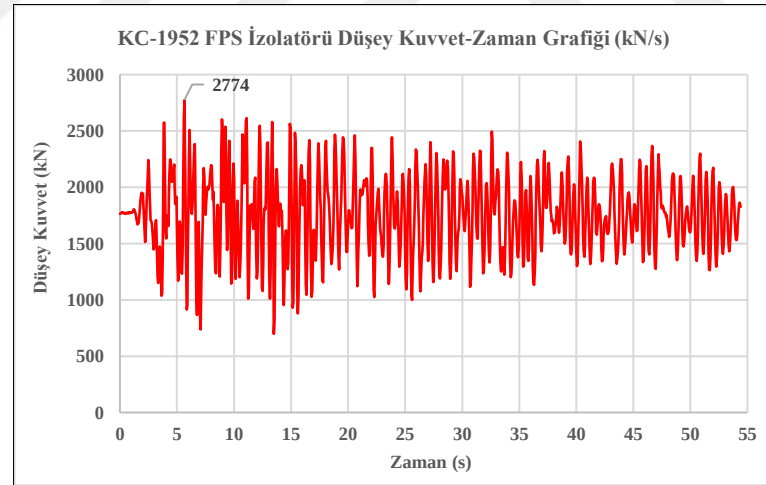


Şekil C4.10: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

FPS izolatör maksimum taban kesme kuvveti : 345kN

FPS izolatör maksimum yatay deplasman miktarı : 229mm

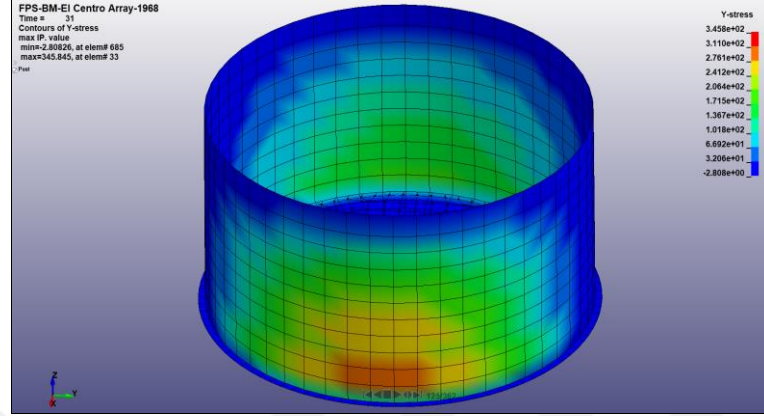
- FPS izolatör düşey kuvvet analizi



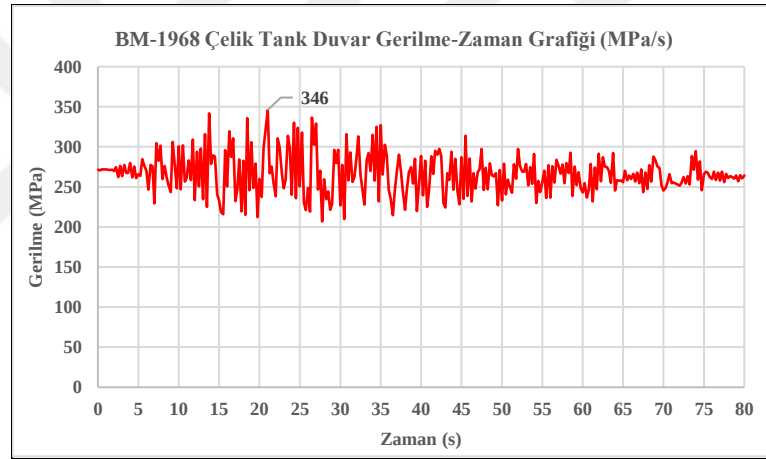
Şekil C4.11: FPS izolatörü düşey kuvvet grafiği

C4-B Borrego Mtn Depremi El Centro Array İstasyonu-1968

- Çelik tank duvar gerilme analizi

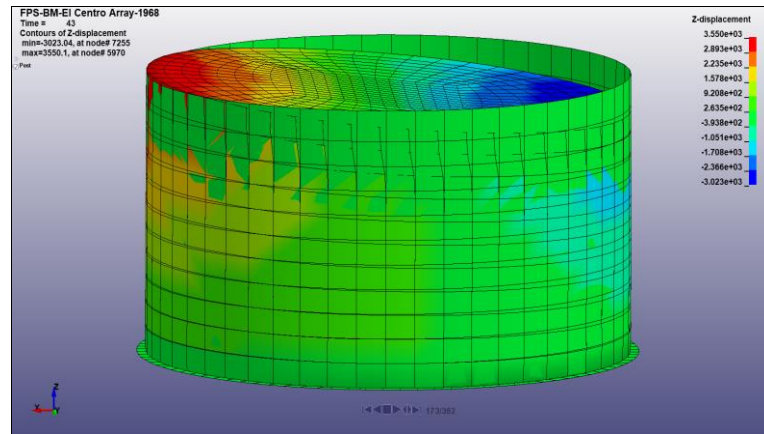


Şekil C4.12: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

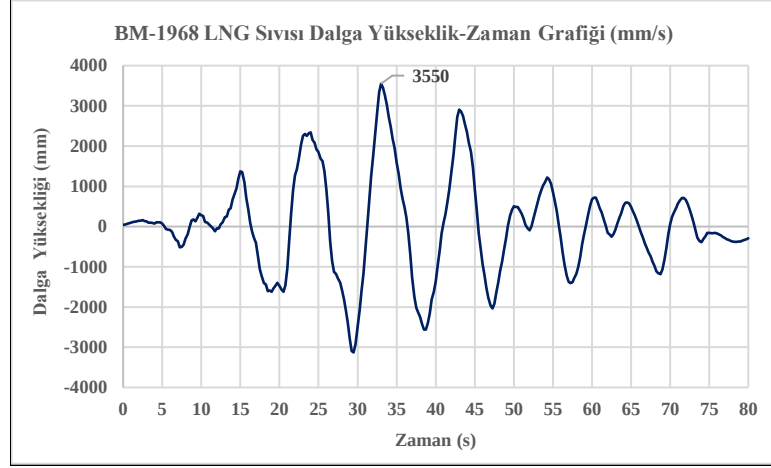


Şekil C4.13: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

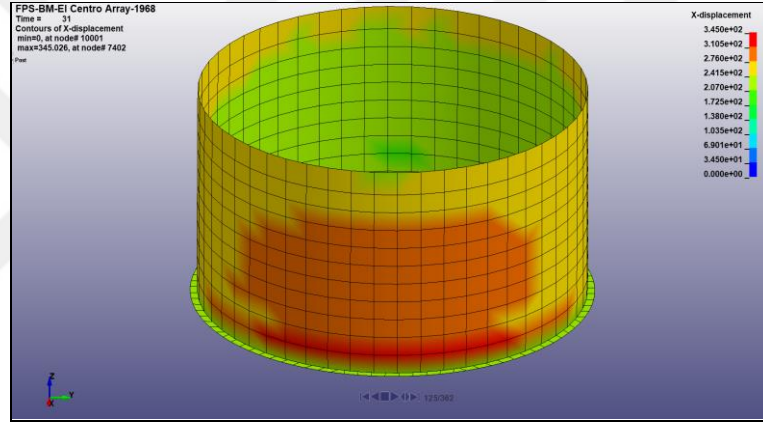


Şekil C4.14: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

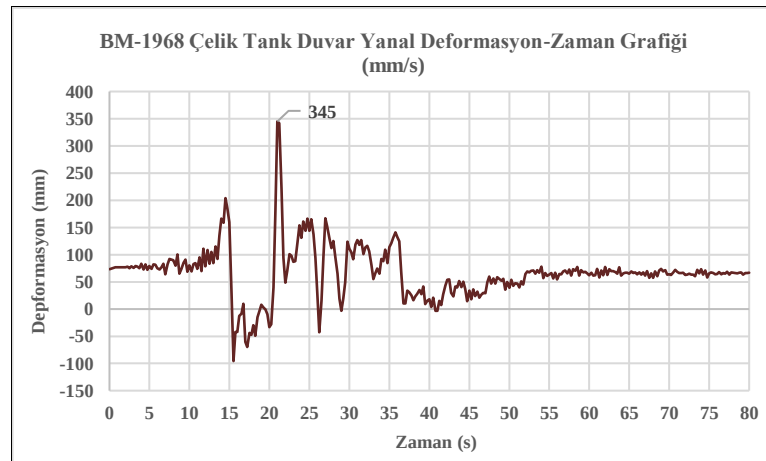


Şekil C4.15: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

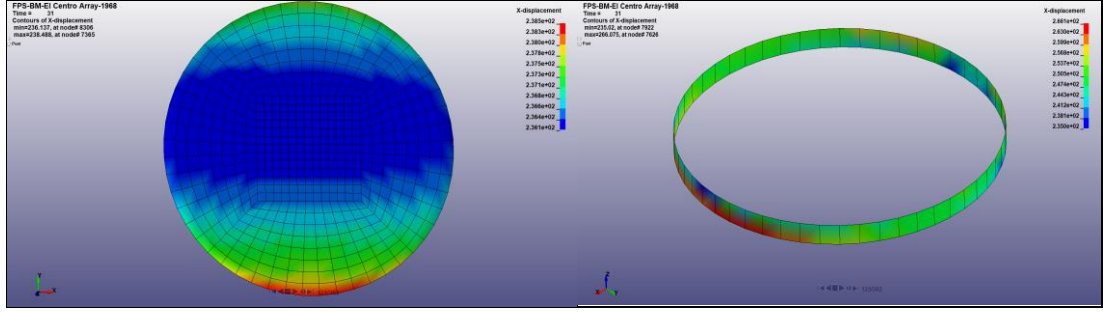


Şekil C4.16: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

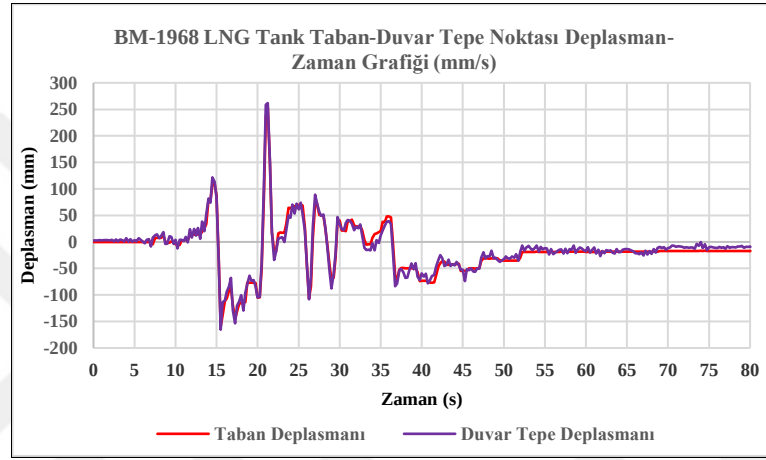


Şekil C4.17: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C4.18: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



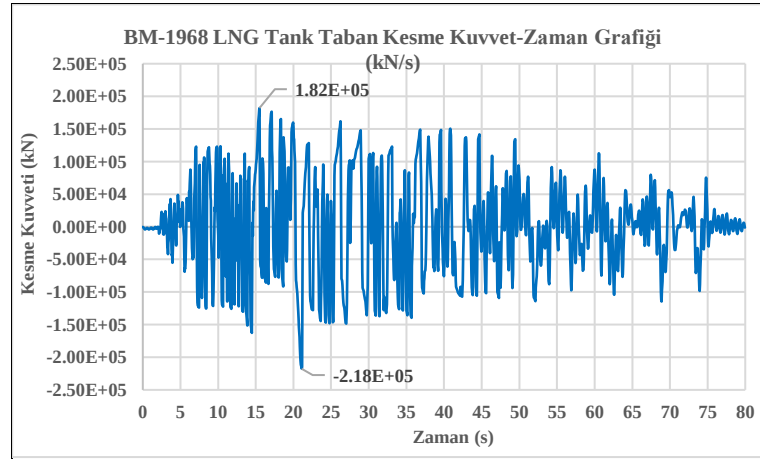
Şekil C4.19: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 255 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 259 mm

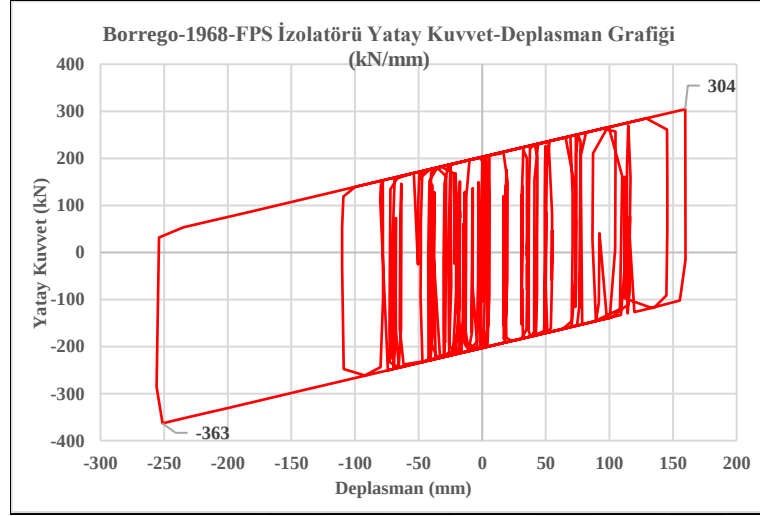
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 4 mm

- LNG tank toplam taban kesme kuvvet analizi



Şekil C4.20: LNG tank taban kesme kuvvet grafiği

- FPS izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

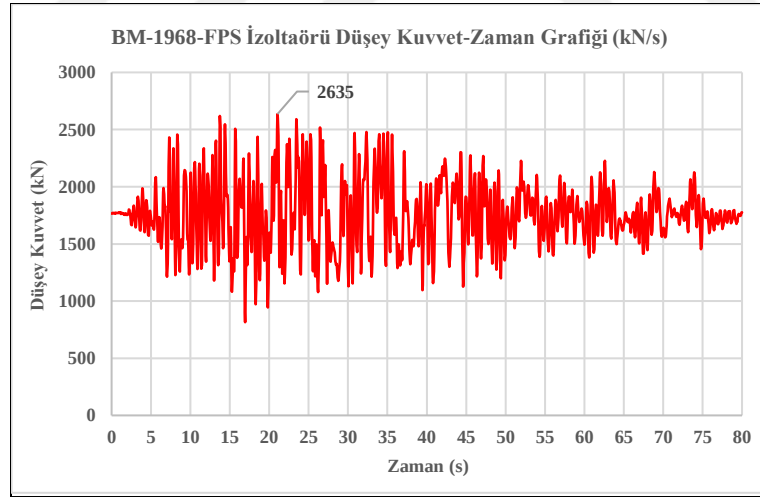


Şekil C4.21: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

FPS izolatör maksimum taban kesme kuvveti : 363kN

FPS izolatör maksimum yatay deplasman miktarı : 256mm

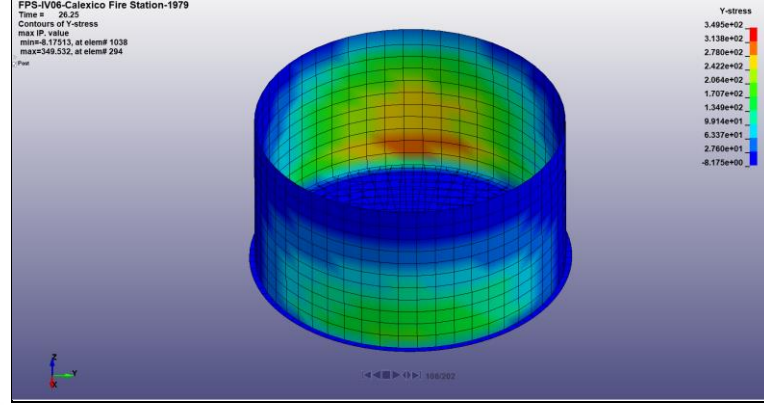
- FPS izolatör düşey kuvvet analizi



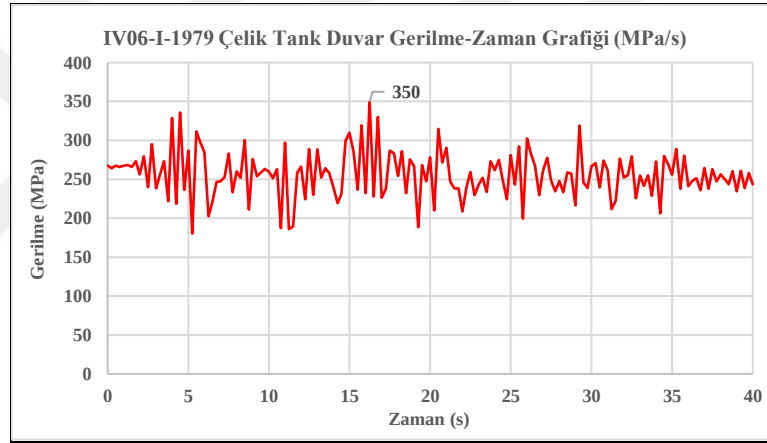
Şekil C4.22: FPS izolatörü düşey kuvvet grafiği

C4-C Imperial Valley Depremi Calessico Fire İstasyonu - 1979 Analizi

- Çelik tank duvar gerilme analizi

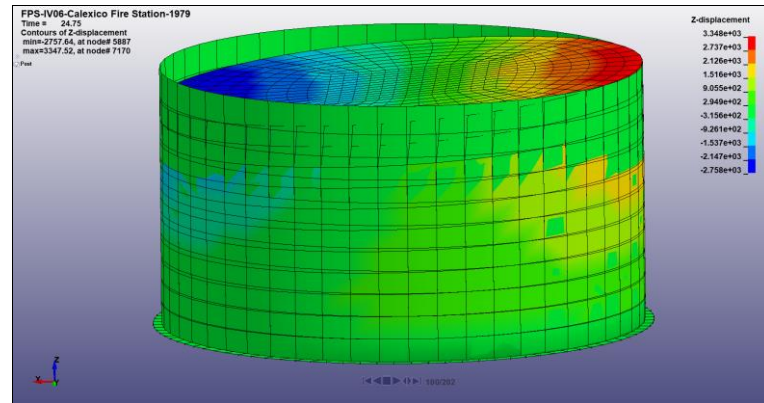


Şekil C4.23: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

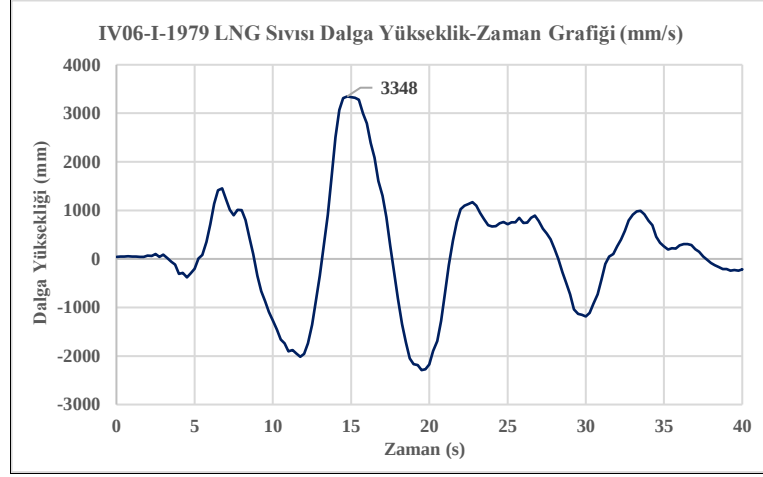


Şekil C4.24: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

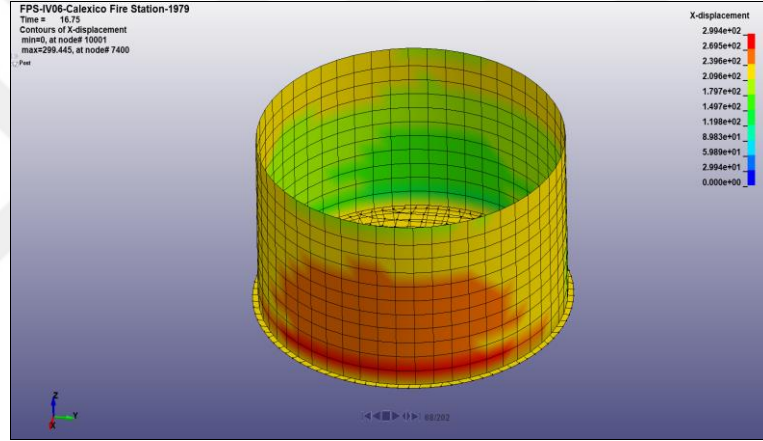


Şekil C4.25: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

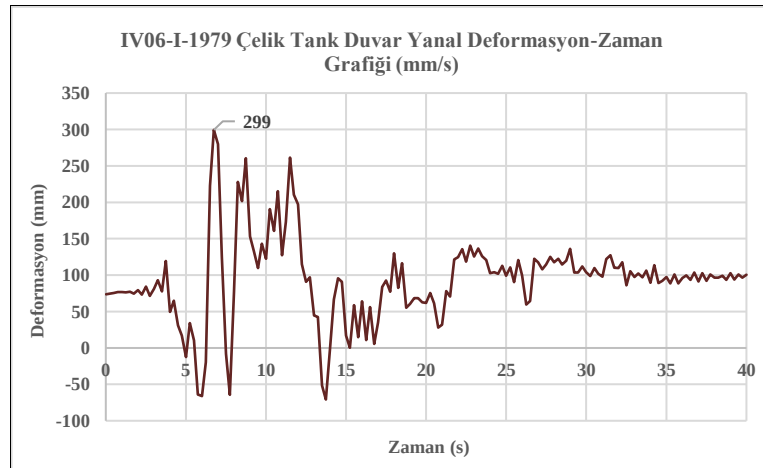


Şekil C4.26: LNG sıvısı dalga yüksekliği grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

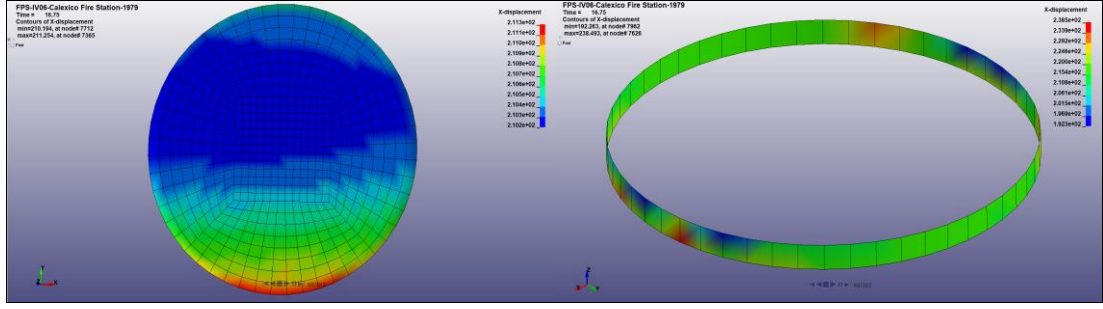


Şekil C4.27: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

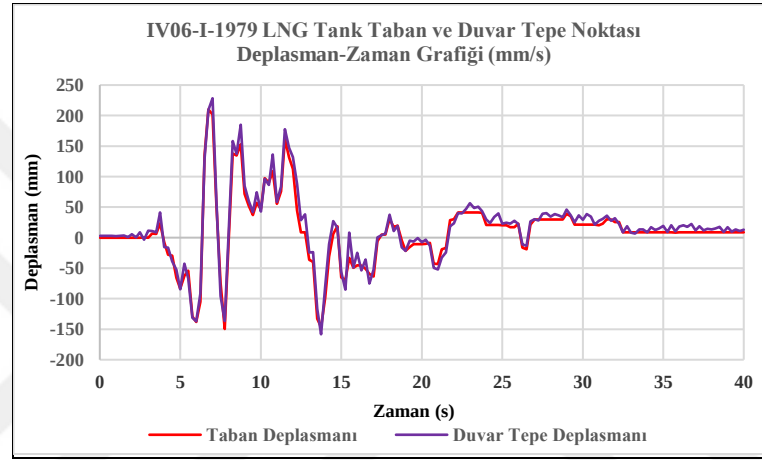


Şekil C4.28: Çelik tank duvar yanal deformasyon grafiği

- Çelik tank tabanve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C4.29: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



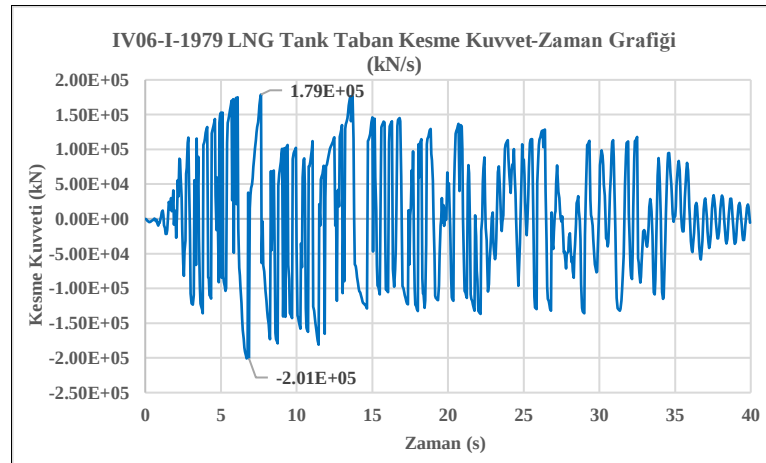
Şekil C4.30: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 210 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 230 mm

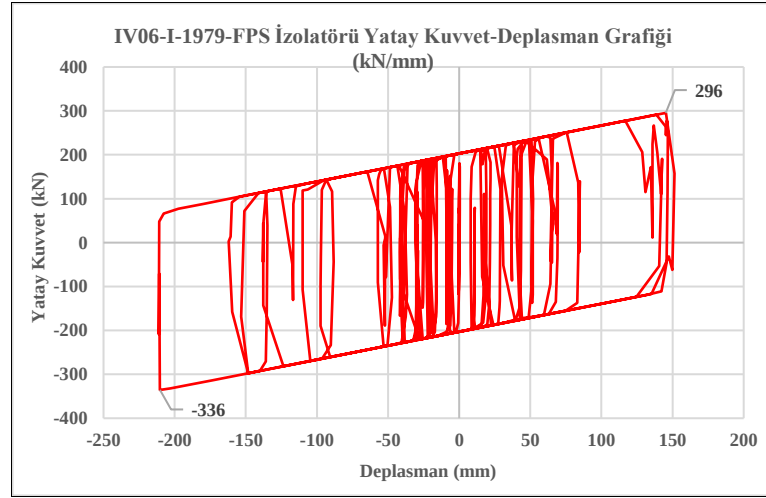
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 20 mm

- LNG tank toplam taban kesme kuvvet analizi



Şekil C4.31: LNG tank toplam taban kesme kuvvet-zaman grafiği

- FPS izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

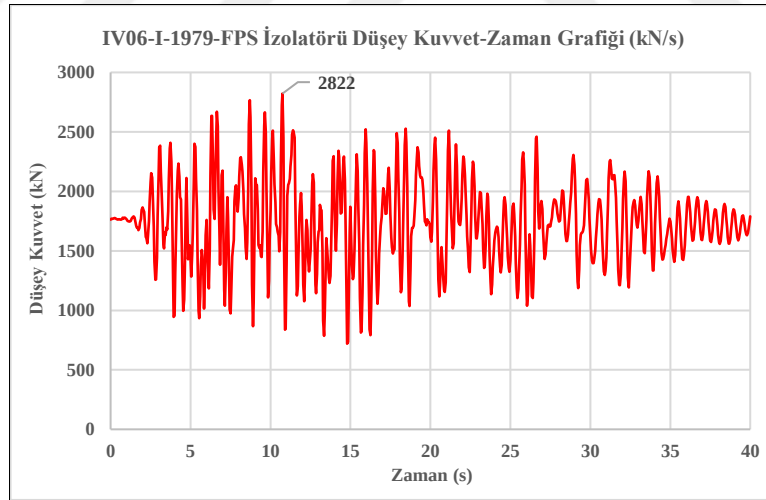


Şekil C4.32: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

FPS izolatör maksimum taban kesme kuvveti : 336kN

FPS izolatör maksimum yatay deplasman miktarı : 210mm

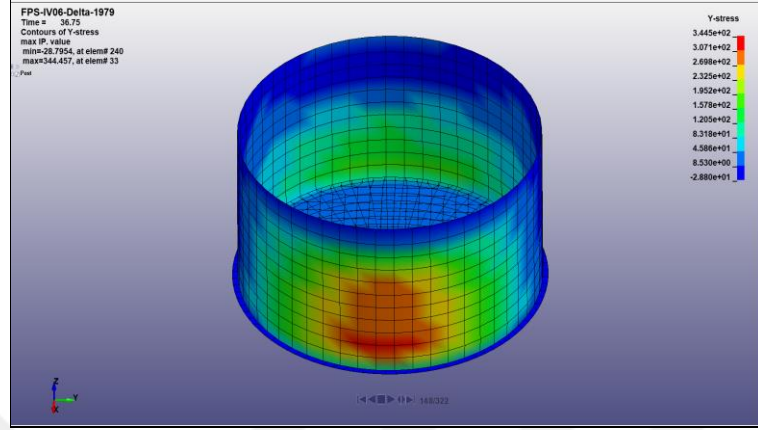
- FPS izolatör düşey kuvvet analizi



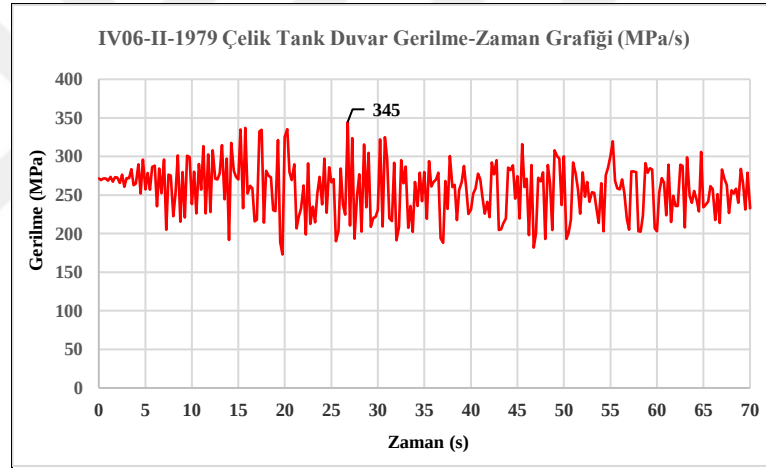
Şekil C4.33: FPS izolatör düşey kuvvet-zaman grafiği

C4-D Imperial Valley Depremi Delta İstasyonu - 1979 Analizi

- Çelik tank duvar gerilme analizi

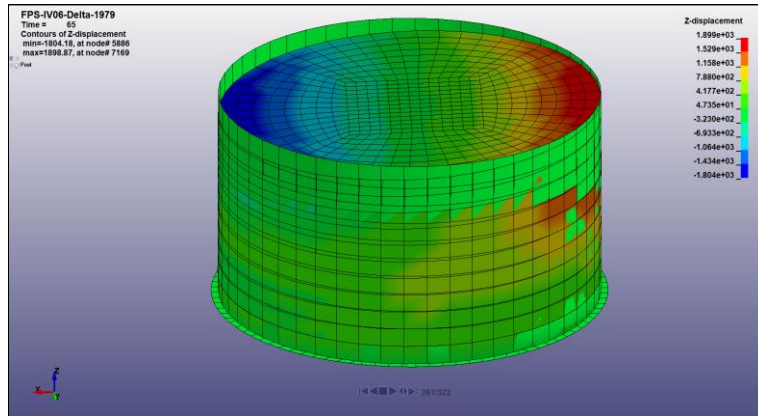


Şekil C4.34: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

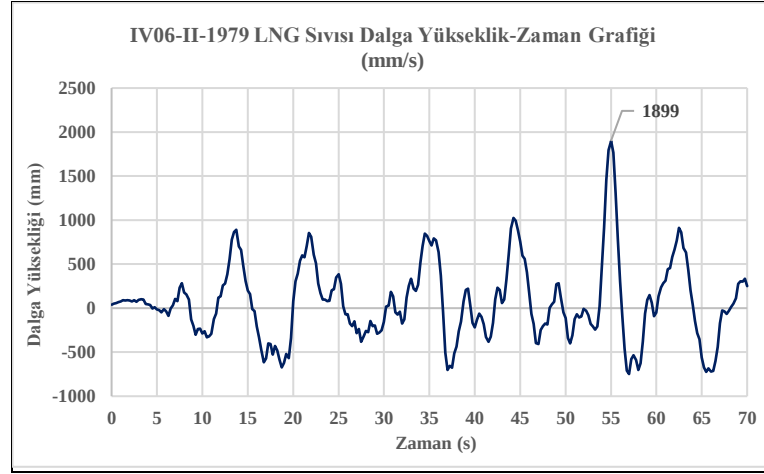


Şekil C4.35: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

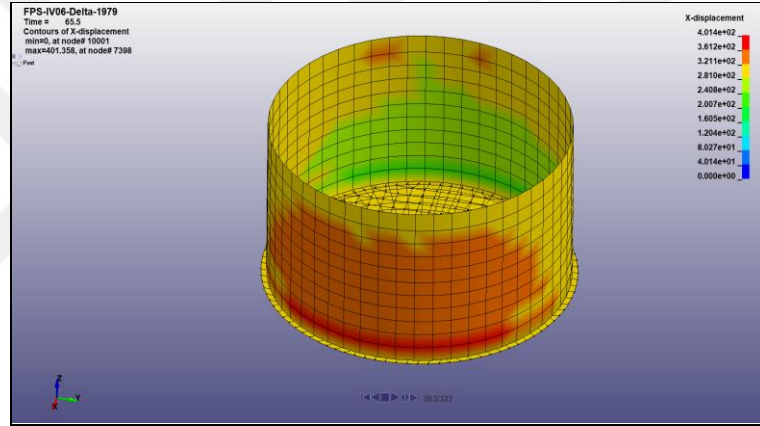


Şekil C4.36: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

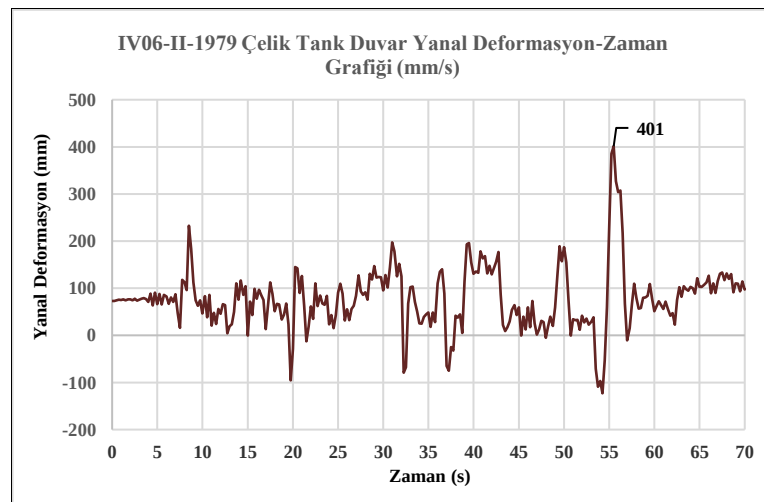


Şekil C4.37: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

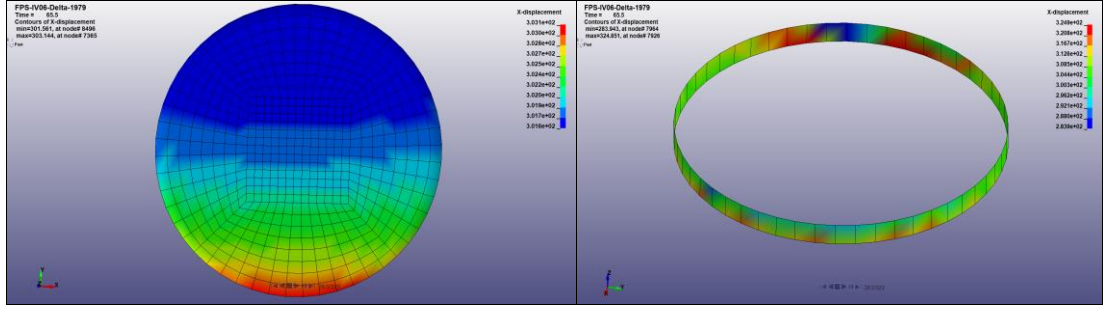


Şekil C4.38: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

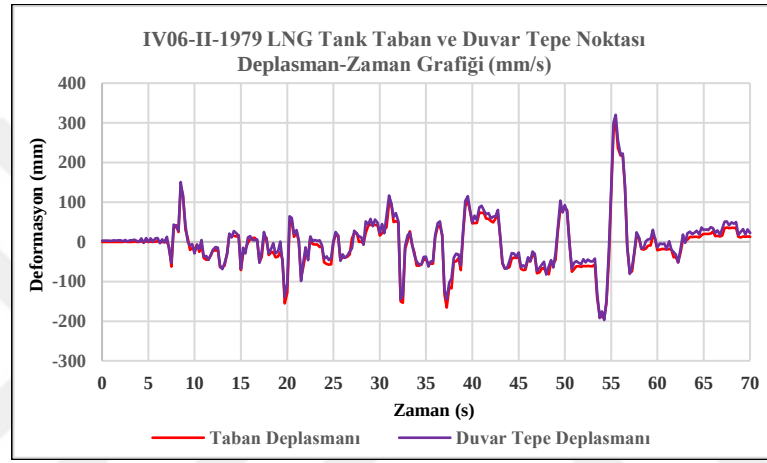


Şekil C4.39: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz grafiği

- Çelik tank taban-tavan deplasman fark analizi



Şekil C4.40: Çelik tank taban-tavan deplasman analiz modeli



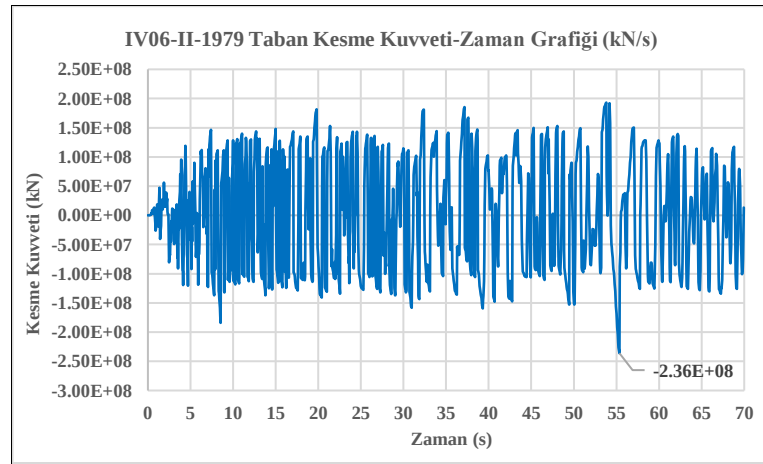
Şekil C4.41: Çelik tank taban-tavan deplasman grafiği

Çelik tank taban deplasmanı : 303 mm

Çelik tank tavan deplasmanı : 320 mm

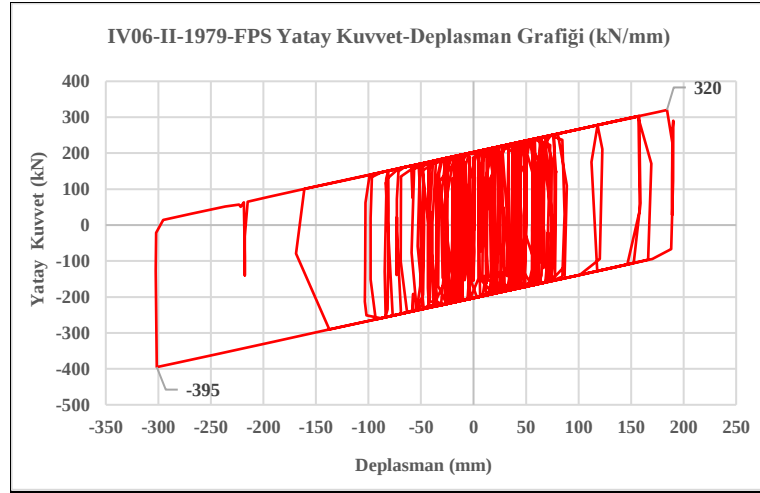
Çelik tank taban-tavan deplasman farkı : 17 mm

- LNG tank toplam taban kesme kuvvet analizi



Şekil C4.42: LNG tankı toplam taban kesme kuvvet grafiği

- FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman analizi

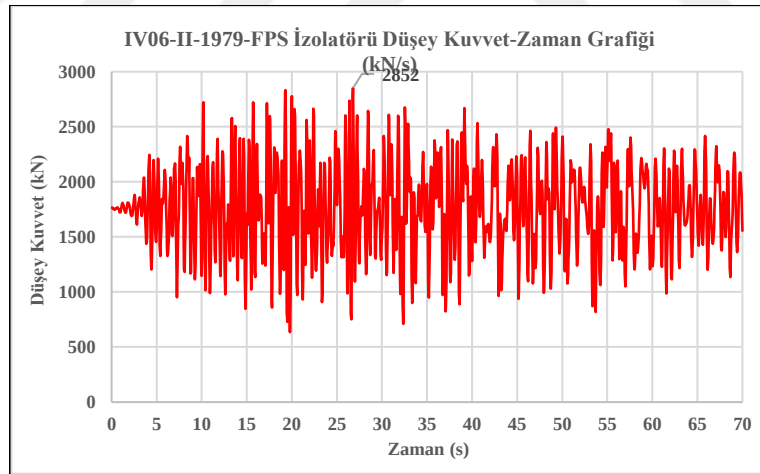


Şekil C4.43: FPS izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

FPS izolatörde maksimum taban kesme kuvveti: 395kN

FPS izolatörde maksimum yatay deplasman miktarı: 302mm

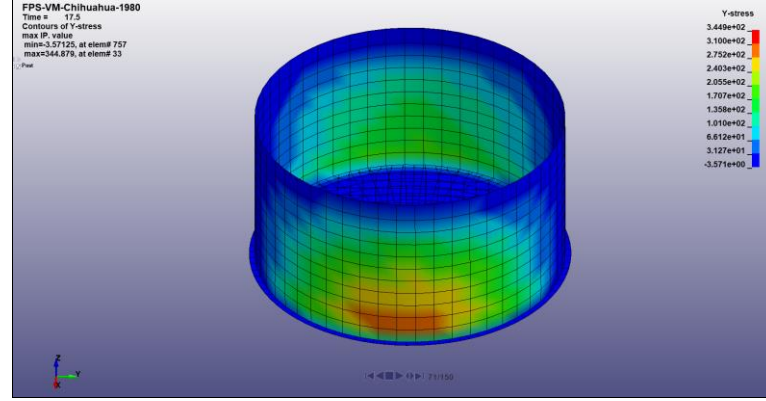
- FPS izolatöre gelen düşey kuvvet analizi



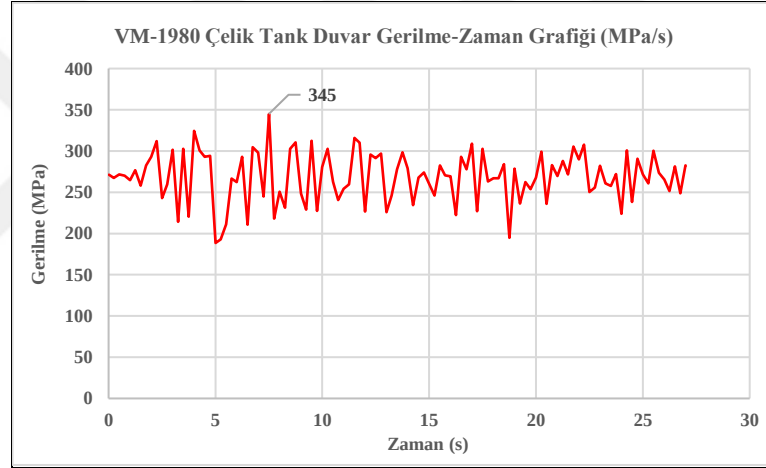
Şekil C4.44: FPS izolatörü düşey kuvvet grafiği

C4-E Victoria Depremi Chihuahua İstasyonu - 1980 Analizi

- Çelik tank duvar gerilme analizi

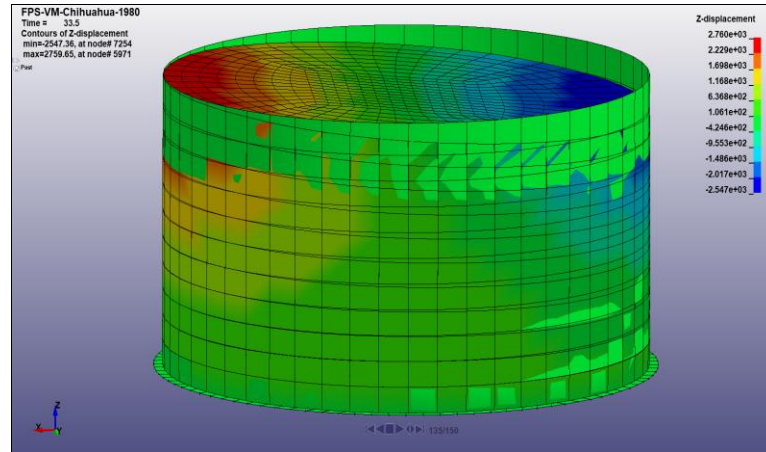


Şekil C4.45: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

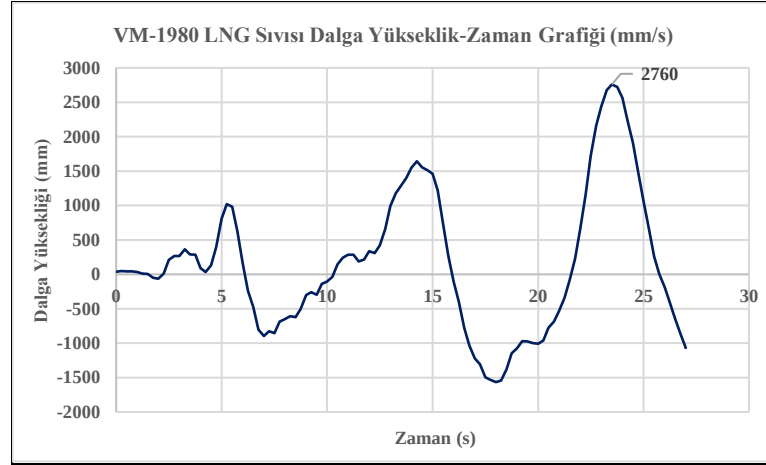


Şekil C4.46: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

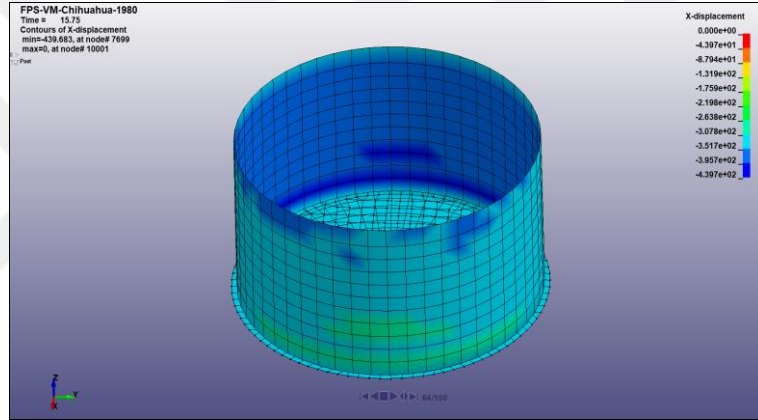


Şekil C4.47: LNG sıvısı dalga yükseklik analiz modeli

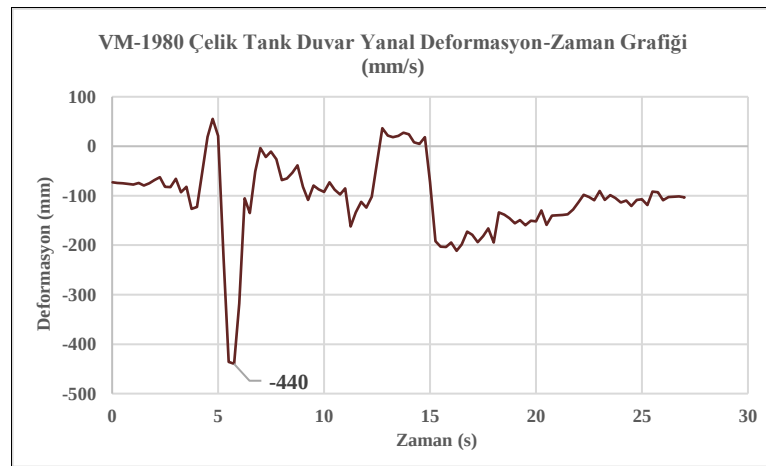


Şekil C4.48: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

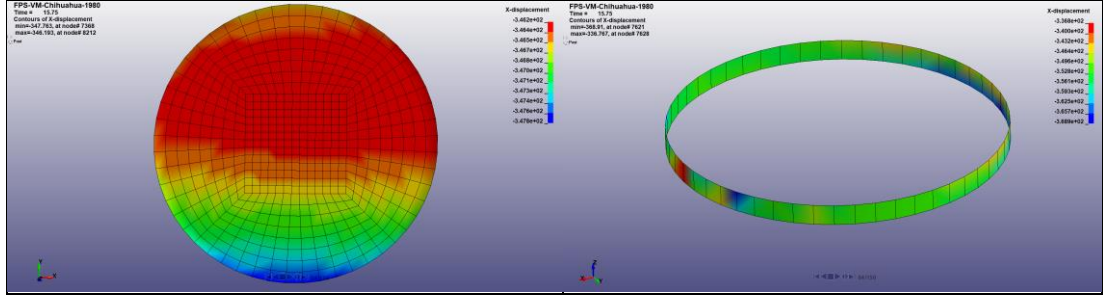


Şekil C4.49: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz modeli

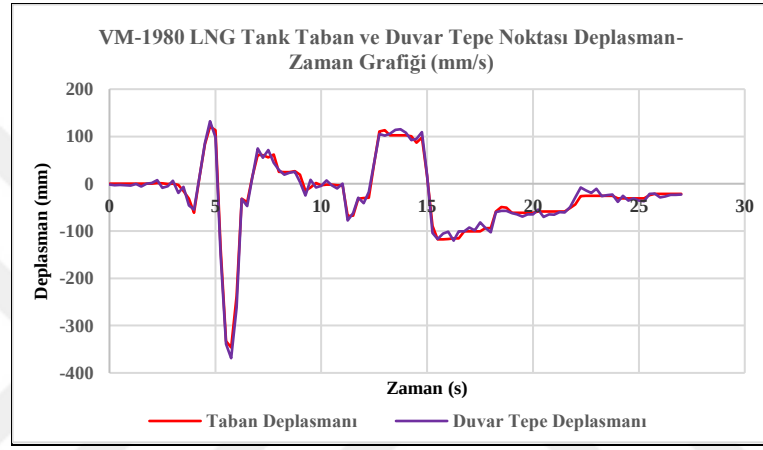


Şekil C4.50: Çelik tank duvar yanal deformasyon analiz grafiği

- Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analizi



Şekil C4.51: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



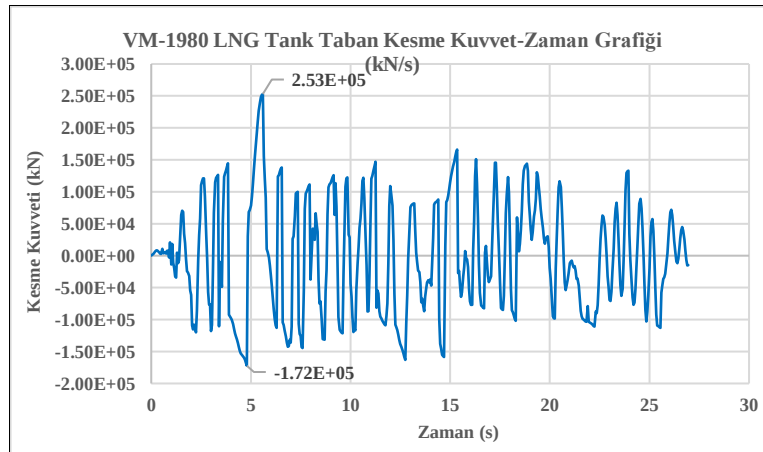
Şekil C4.52: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 346 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 369 mm

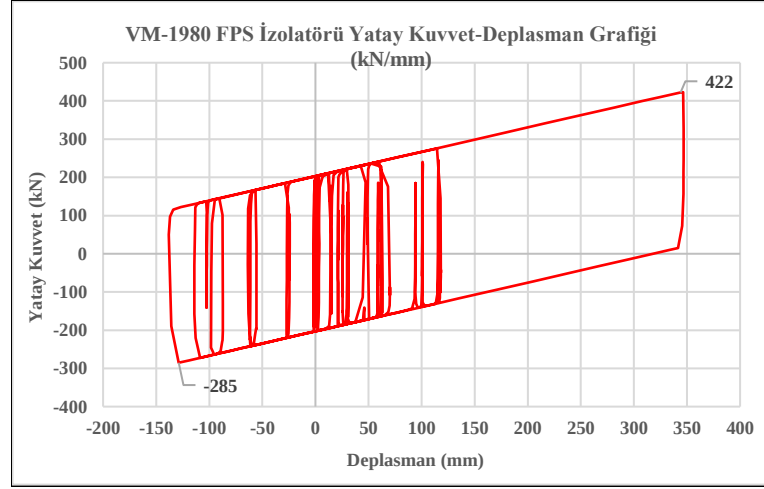
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 23 mm

- LNG tank toplam taban kesme kuvvet analizi



Şekil C4.53: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği

- FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman analizi

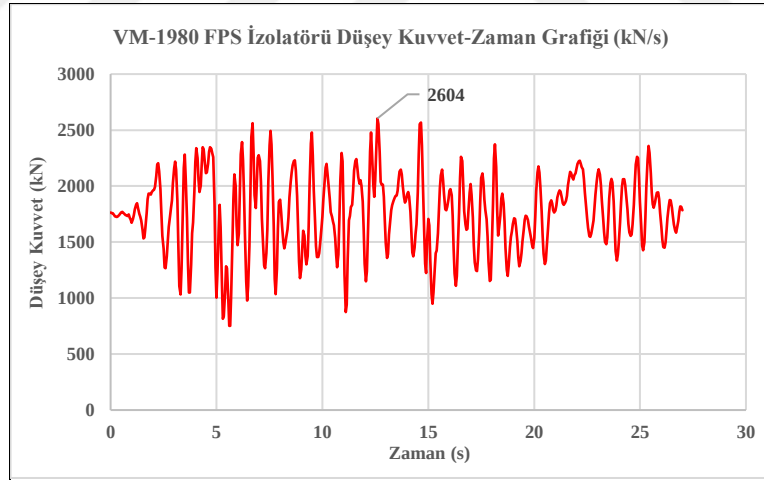


Şekil C4.54: FPS izolatörü yatay kuvvet-deplasman grafiği

FPS izolatör maksimum taban kesme kuvveti : 422kN

FPS izolatör maksimum yatay deplasman miktarı : 346mm

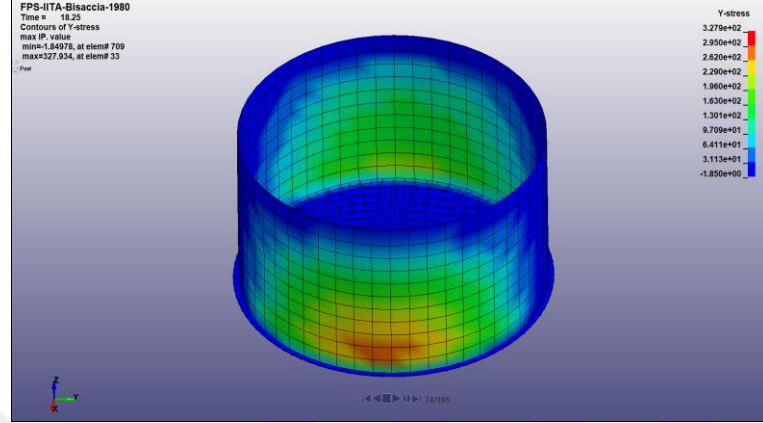
- FPS izolatör düşey kuvvet analizi



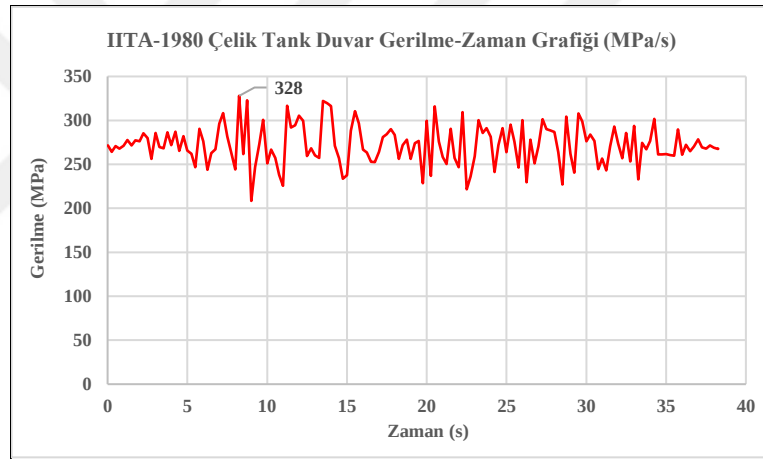
Şekil C4.55: FPS izolatör düşey kuvvet grafiği

C4-F Irpina Depremi Bisaccia İstasyonu - 1980 Analizi

- Çelik tank duvar gerilme analizi

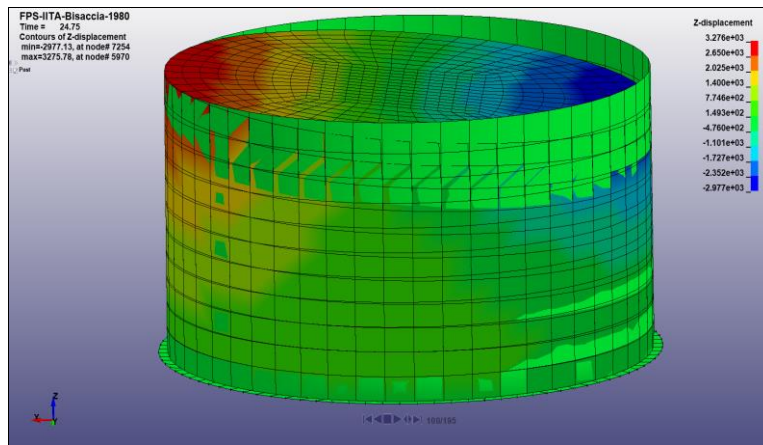


Şekil C4.56: Çelik tank duvar gerilme analiz modeli

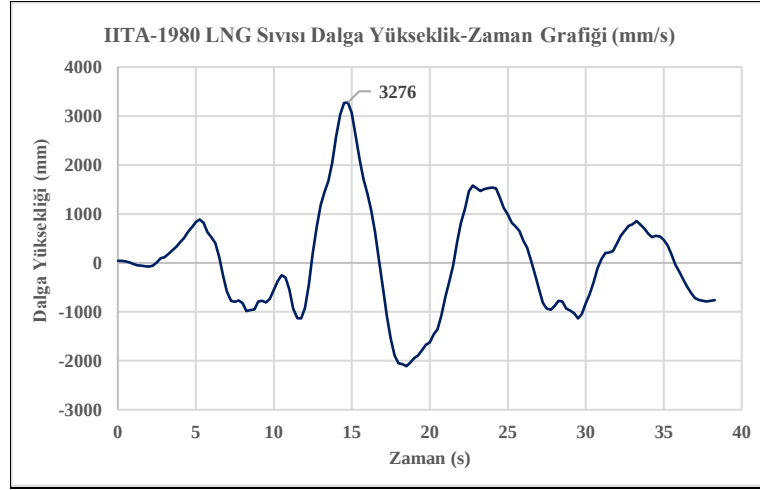


Şekil C4.57: Çelik tank duvar gerilme analiz grafiği

- LNG sıvısı dalga yükseklik analizi

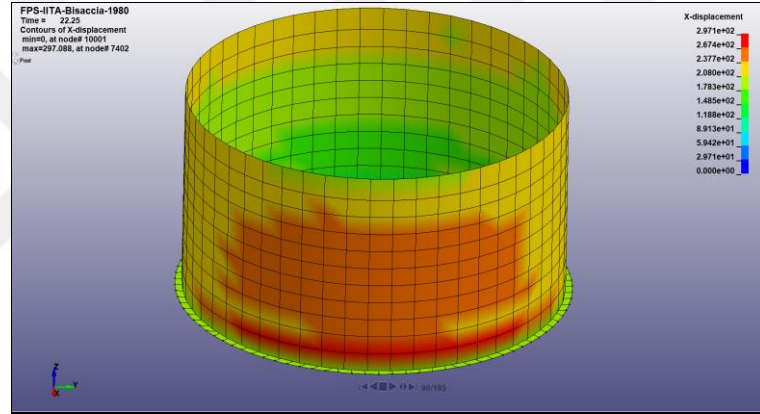


Şekil C4.58: LNG sıvısı dalga yüksekliği analiz modeli



Şekil C4.59: LNG sıvısı dalga yükseklik grafiği

- Çelik tank duvar yanal deformasyon analizi

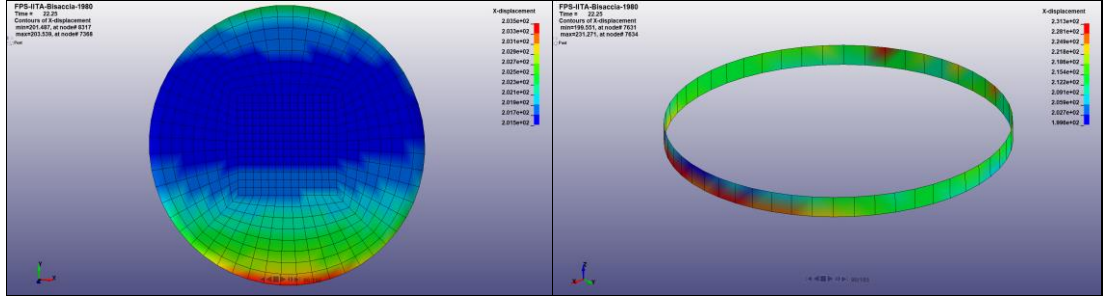


Şekil C4.60: Çelik tank duvar yanal deplasman hareketi modeli

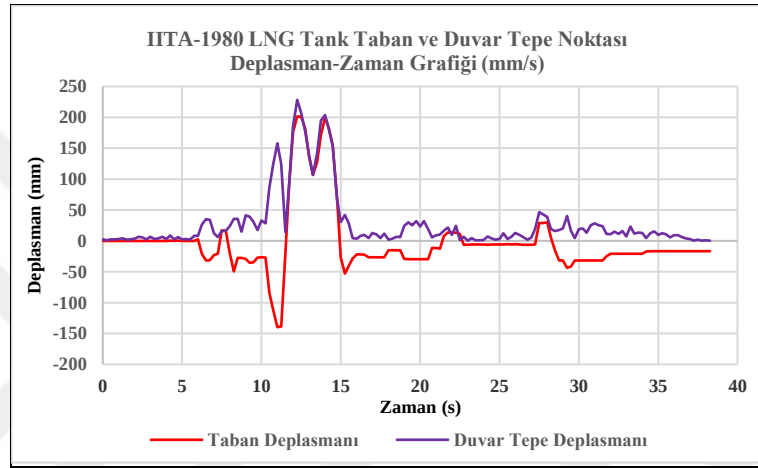


Şekil C4.61: Çelik tank duvar yanal deplasman analiz grafiği

- Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman fark analizi



Şekil C4.62: Çelik tank taban-duvar tepe noktası deplasman analiz modeli



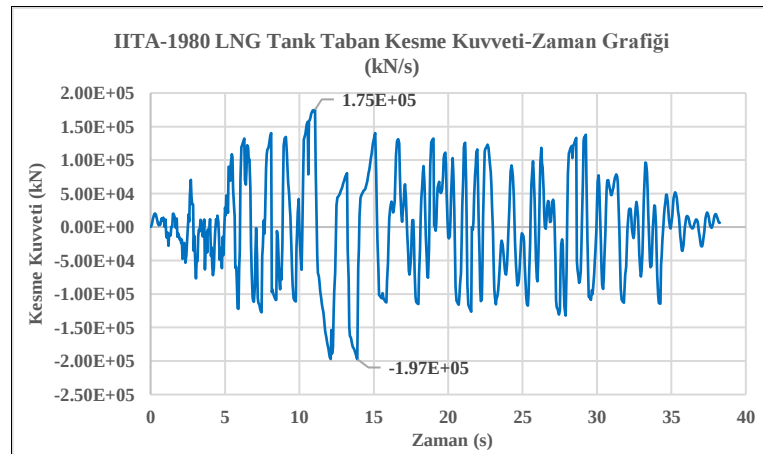
Şekil C4.63: Çelik tank taban ve duvar tepe noktası deplasman analiz grafiği

Çelik tank maksimum taban deplasmanı: 202 mm

Çelik tank duvar tepe noktası maksimum deplasmanı: 228 mm

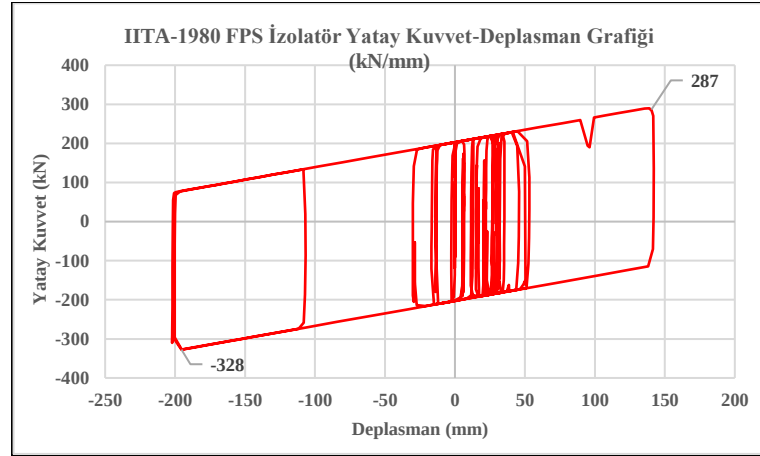
Çelik tank taban ve duvar tepe noktası maksimum yatay deplasman farkı: 26 mm

- LNG tank toplam taban kesme kuvvet analizi



Şekil C4.64: LNG tank taban kesme kuvvet-zaman grafiği

- FPS izolatör yatay kuvvet deplasman analizi

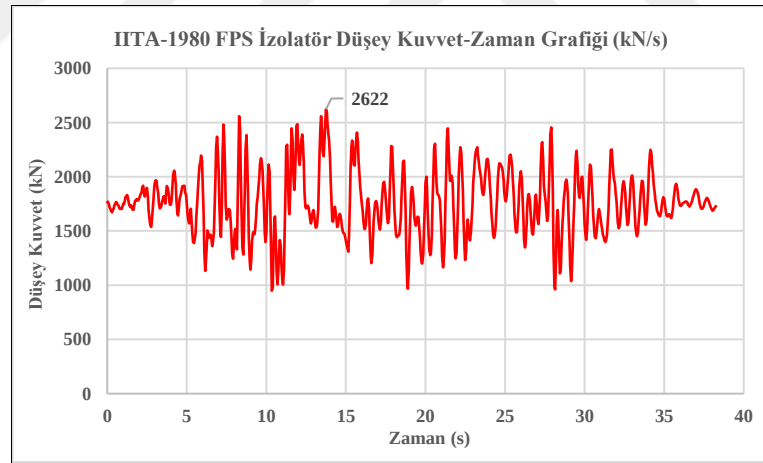


Şekil C4.65: FPS izolatör yatay kuvvet-deplasman grafiği

FPS izolatör maksimum taban kesme kuvveti : 328kN

FPS izolatör maksimum yatay deplasman miktarı : 195mm

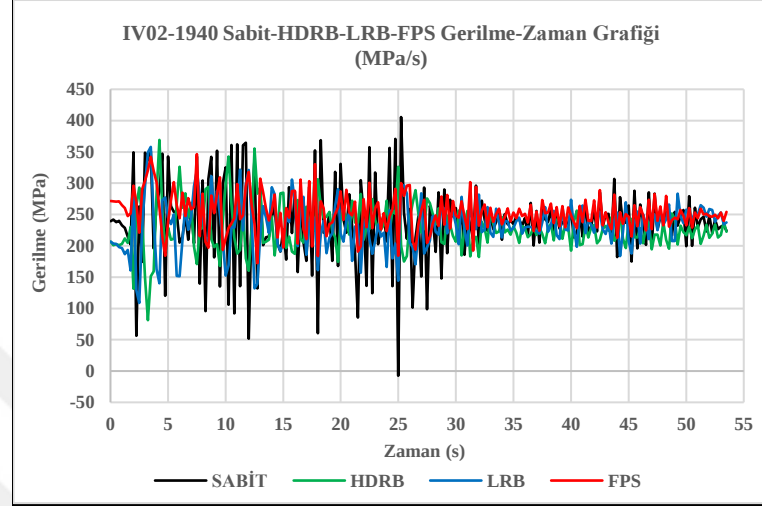
- FPS izolatör düşey kuvvet analizi



Şekil C4.66: FPS izolatör düşey kuvvet grafiği

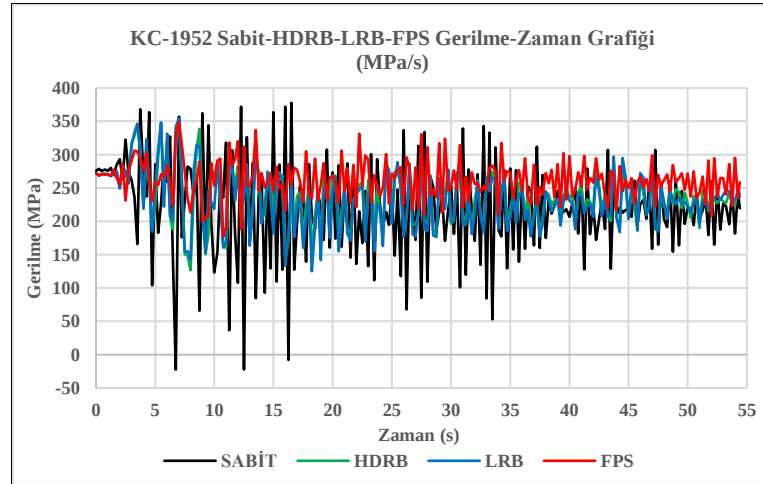
EK D: Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

- 4 Farklı Sistem ve 7 Farklı Depremde LNG Tank Duvarında Oluşan Gerilmeler



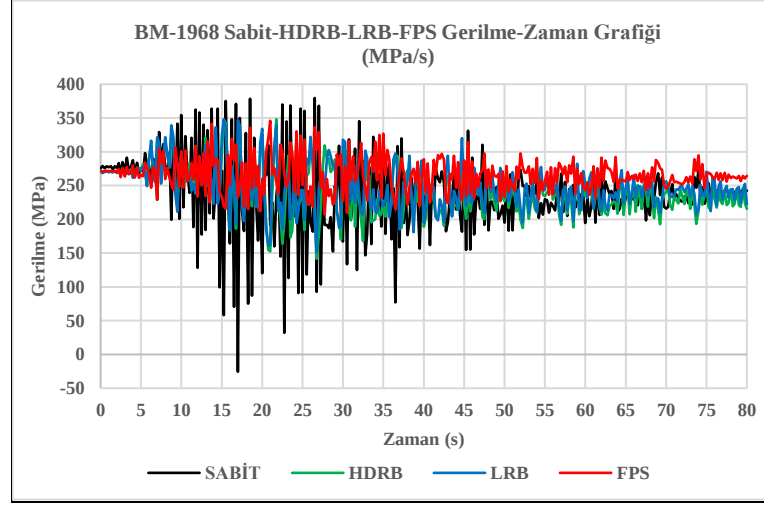
Şekil D.1: Dört farklı sistem IV02-1940 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 406MPa; HDRB: 369MPa; LRB: 358MPa; FPS: 347MPa



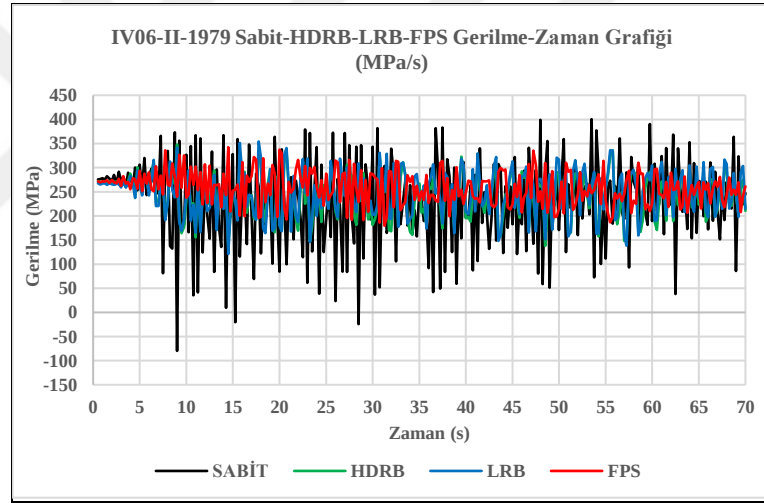
Şekil D.2: Dört farklı sistem KC-1952 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 378MPa; HDRB: 354MPa; LRB: 354MPa; FPS: 349MPa



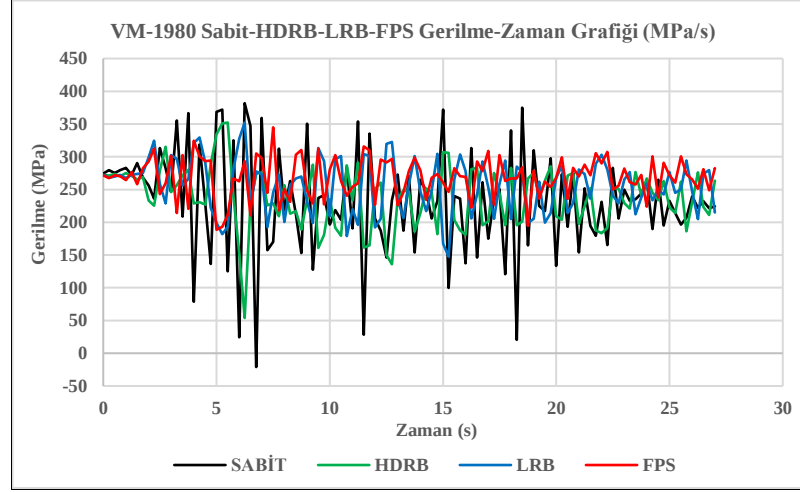
Şekil D.3: Dört farklı sistem BM-1968 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 380MPa; HDRB: 348MPa; LRB: 348MPa; FPS: 346MPa



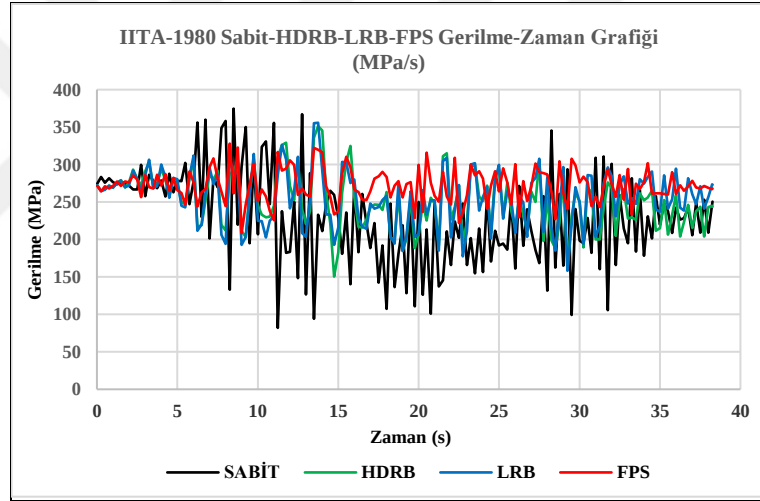
Şekil D.4: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 400MPa; HDRB: 348MPa; LRB: 354MPa; FPS: 342MPa



Şekil D.5: Dört farklı sistem VM-1980 depremde çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği

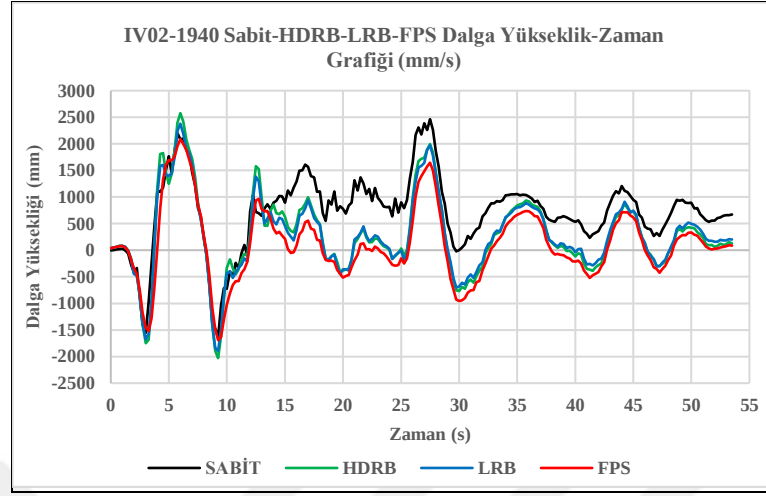
Sabit mesnet : 382MPa; HDRB: 352MPa; LRB: 352MPa; FPS: 345MPa



Şekil D.6: Dört farklı sistem IITA-1980 depremi çelik tank duvarı gerilmelerin karşılaştırılması grafiği

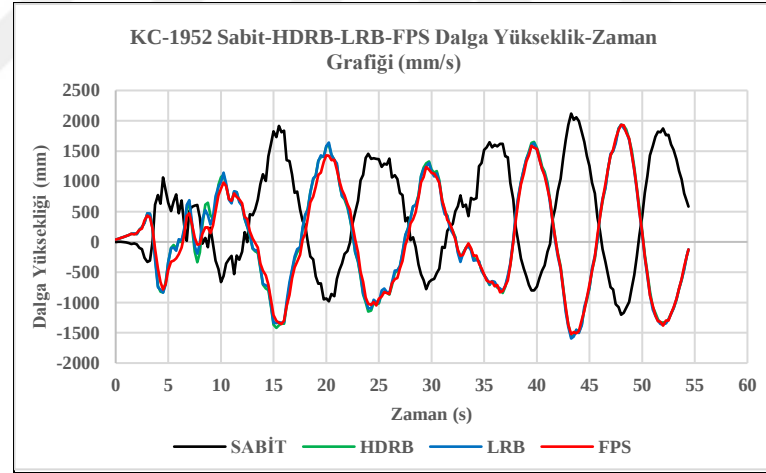
Sabit mesnet : 374 MPa; HDRB: 352 MPa; LRB: 356 MPa; FPS: 328 MPa

- 4 Farklı Sistem ve 7 Farklı Depremde LNG Sıvısı Dalga Yükseklik Analizlerin Karşılaştırılması



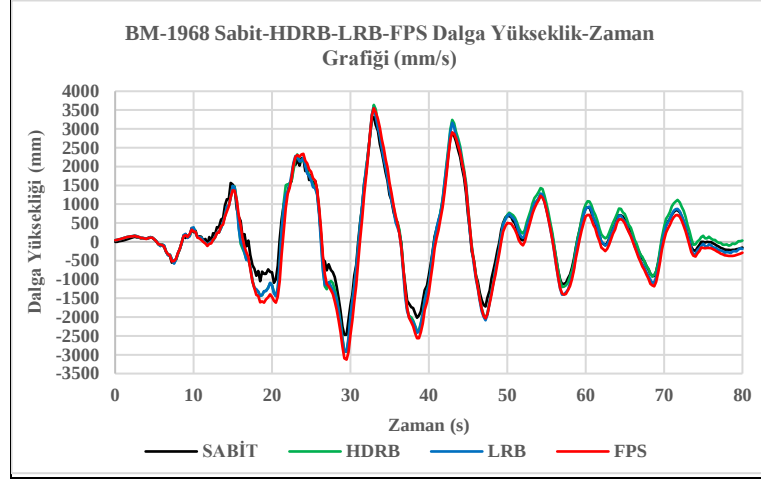
Şekil D.7: Dört farklı sistem IV02-1940 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 2469mm; HDRB: 2577mm; LRB: 2379mm; FPS: 2090mm



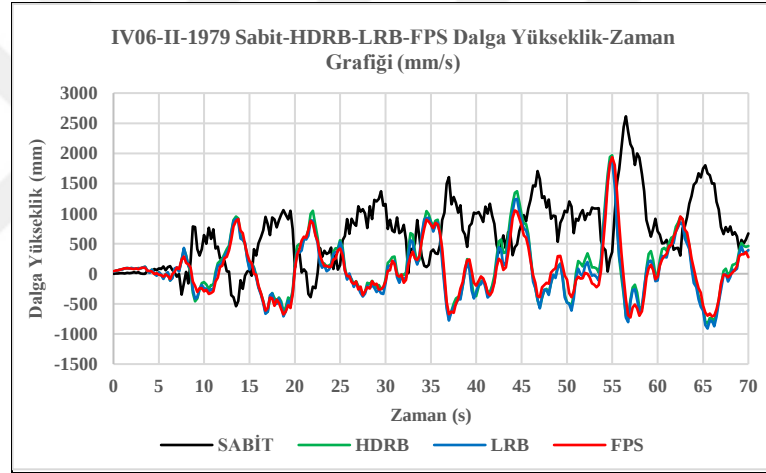
Şekil D.8: Dört farklı sistem KC-1952 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 2119mm; HDRB: 1934mm; LRB: 1934mm; FPS: 1932mm



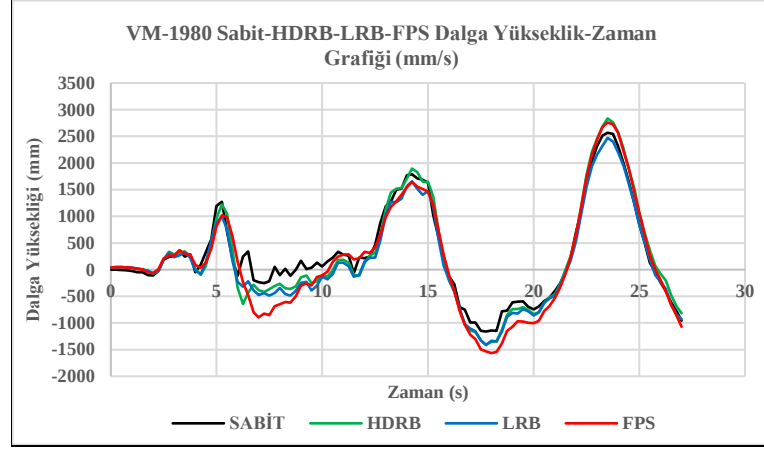
Şekil D.9: Dört farklı sistem BM-1968 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 3317mm; HDRB: 3638mm; LRB: 3560mm; FPS: 3550mm



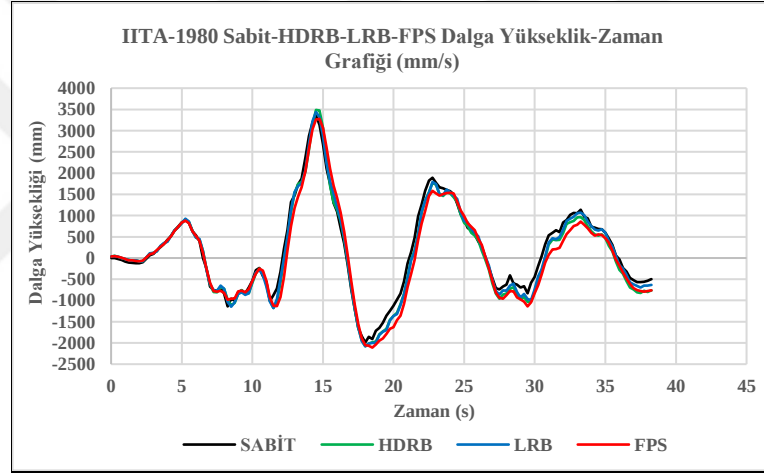
Şekil D.10: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 2615mm; HDRB: 1967mm; LRB: 1869mm; FPS: 1937mm



Şekil D.11: Dört farklı sistem Victoria-1980 depreminde LNG sıvısı dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği

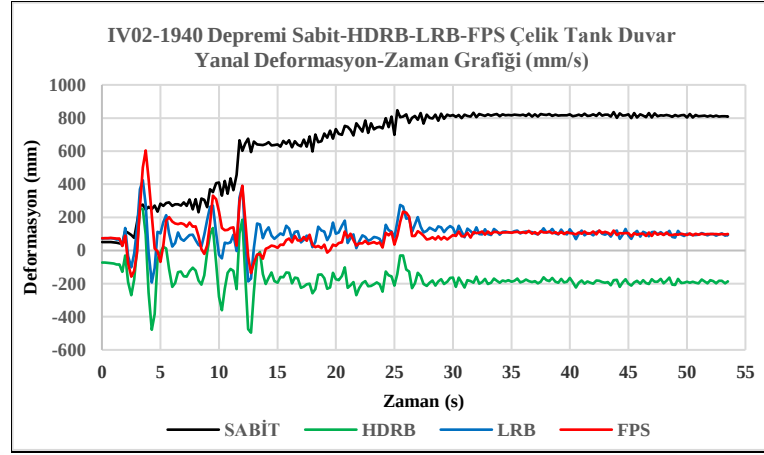
Sabit mesnet : 2567mm; HDRB: 2837mm; LRB: 2470mm; FPS: 2760mm



Şekil D.12: Dört farklı sistem İrpinia-1980 depreminde LNG sıvısının dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması grafiği

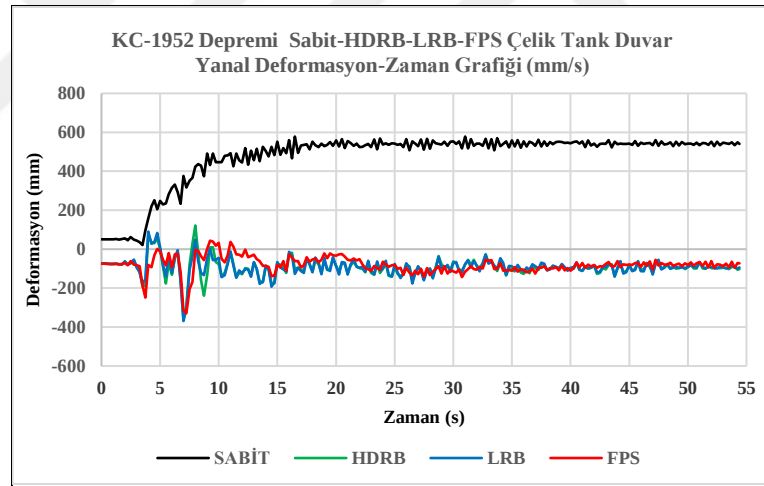
Sabit mesnet : 3355mm; HDRB: 3488mm; LRB: 3438mm; FPS: 3278mm

- 4 Farklı Sistem ve 7 Farklı Depremde LNG Tank Duvarının Yanal Deformasyon Analizlerin Karşılaştırılması



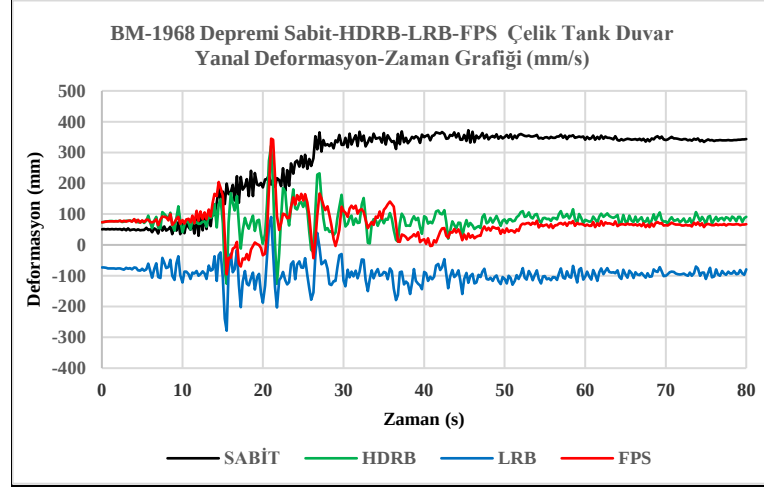
Şekil D.13: Dört farklı sistem IV02-1940 depremi LNG tank duvar yanıl deformasyonların karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 847 mm; HDRB: 496 mm; LRB: 424 mm; FPS: 604 mm



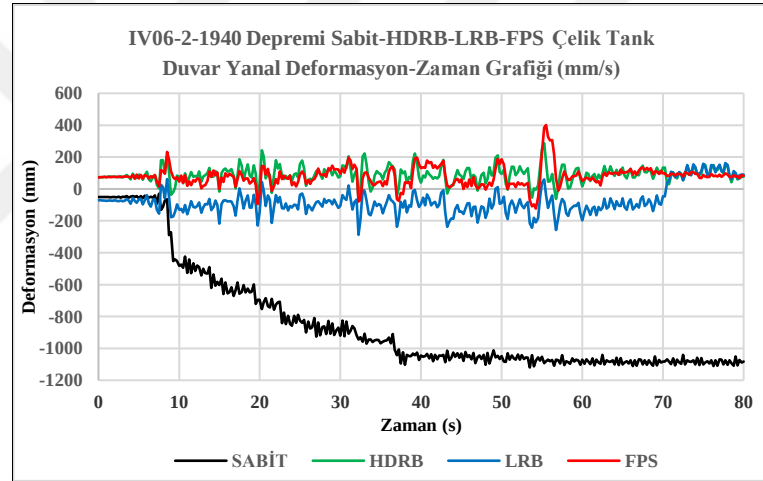
Şekil D.14: Dört farklı sistem KC-1952 depremi LNG tank duvar yanıl deformasyonların karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 578 mm; HDRB: 361 mm; LRB: 369 mm; FPS: 329 mm



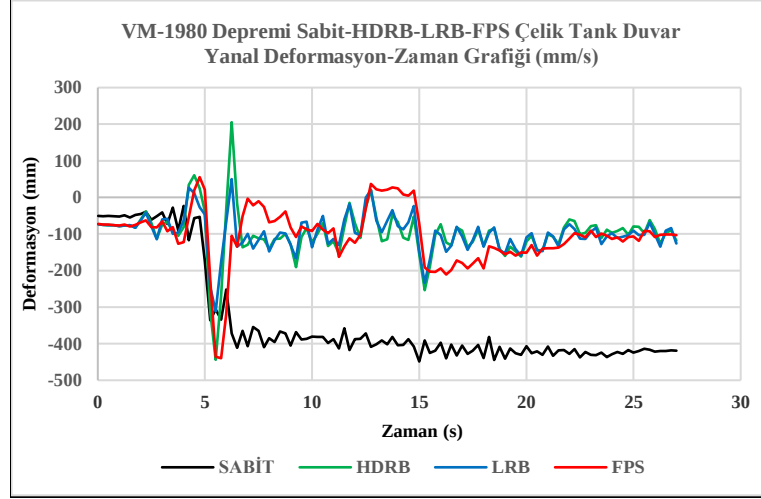
Şekil D.15: Dört farklı sistem BM-1968 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 372 mm; HDRB: 322 mm; LRB: 278 mm; FPS: 345 mm



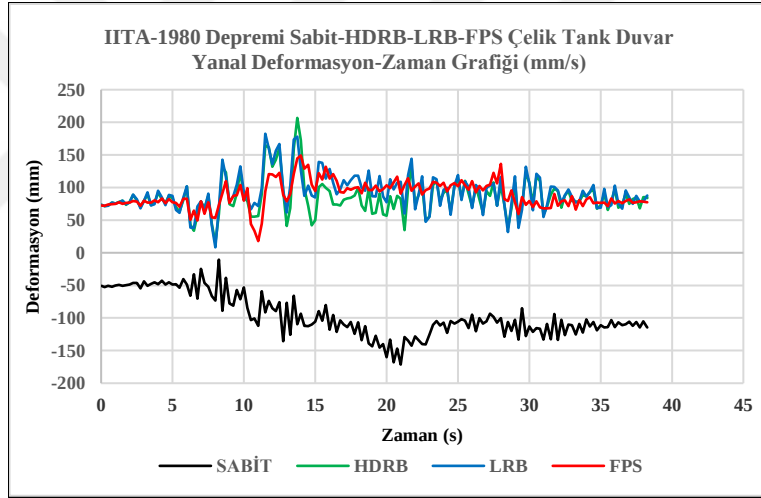
Şekil D.16: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği

Sabit mesnet : 1120 mm; HDRB: 287 mm; LRB: 287 mm; FPS: 402 mm



Şekil D.17: Dört farklı sistem VM-1980 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği

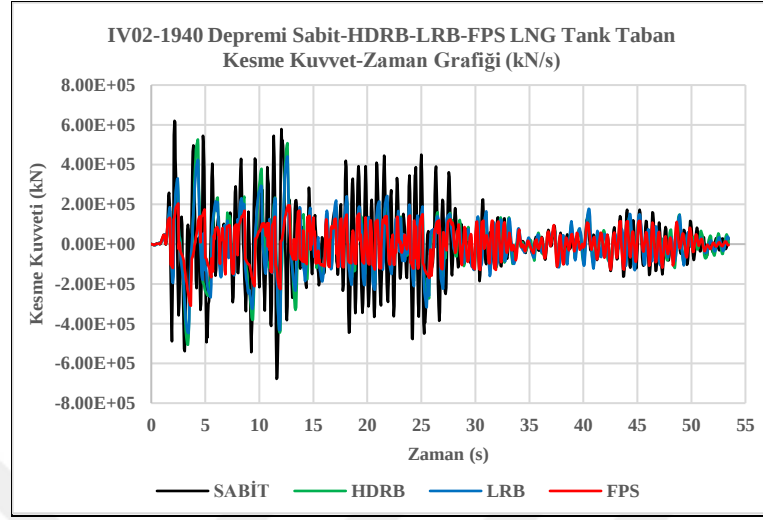
Sabit mesnet: 448 mm; HDRB: 444 mm; LRB: 312 mm; FPS: 440 mm



Şekil D.18: Dört farklı sistem IITA-1980 depremi LNG tank duvar yanal deformasyonlarının karşılaştırılması grafiği

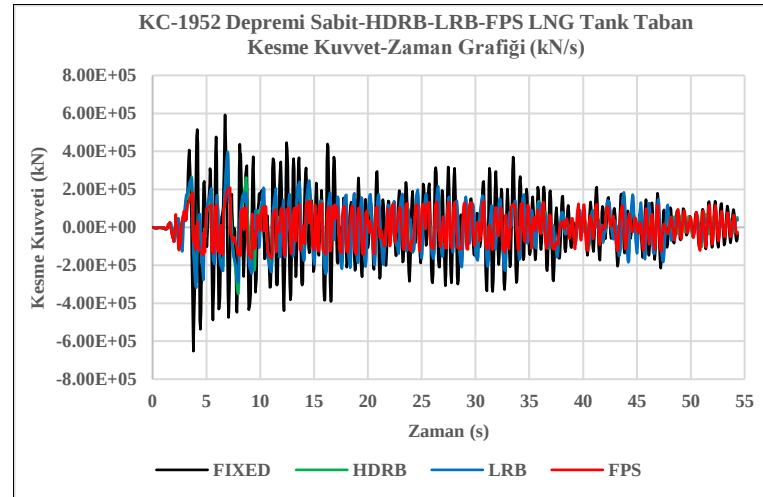
Sabit mesnet: 171 mm; HDRB: 263 mm; LRB: 253 mm; FPS: 298 mm

- 4 Farklı Sistem ve 7 Farklı Depremde LNG Tank Taban Kesme Kuvvetlerin Karşılaştırılması



Şekil D.19: Dört farklı sistem IV02-1940 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

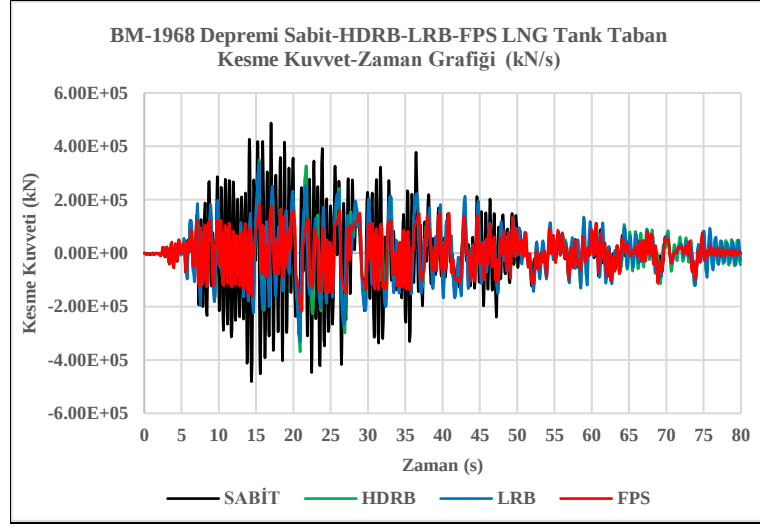
Sabit mesnette LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 6.78×10^5 kN
HDRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 5.26×10^5 kN
LRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 4.48×10^5 kN
FPS izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.10×10^5 kN



Şekil D.20: Dört farklı sistem KC-1952 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

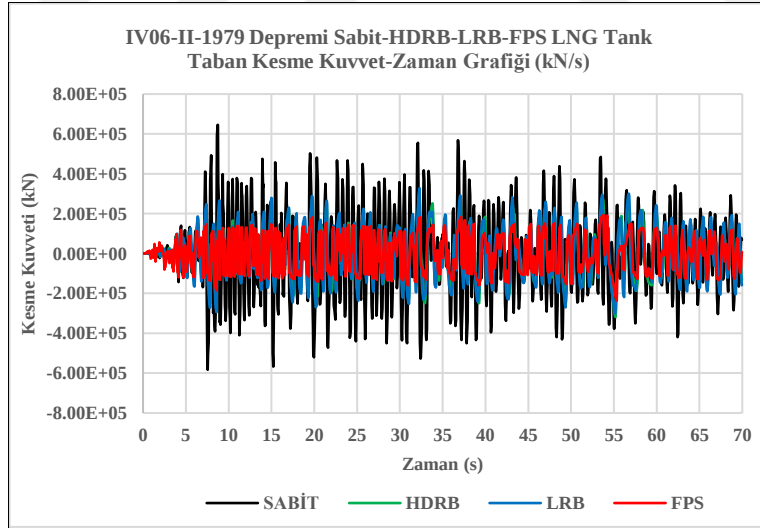
Sabit mesnette LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 6.52×10^5 kN
HDRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.98×10^5 kN
LRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.94×10^5 kN

FPS izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 2.08×10^5 kN



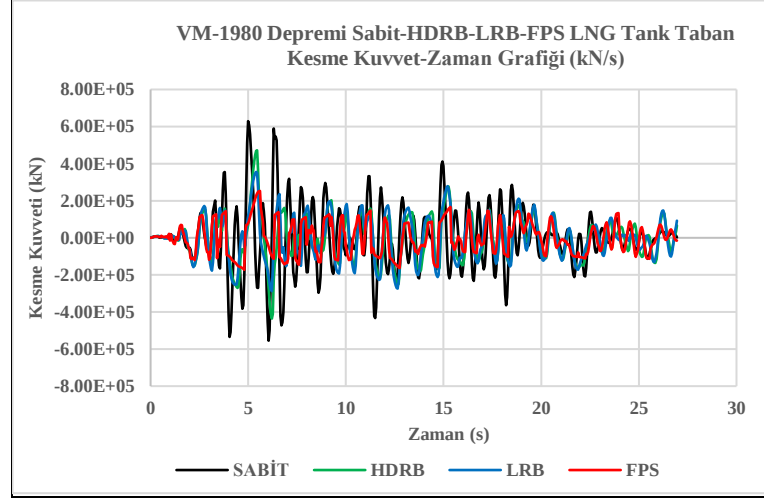
Şekil D.21: Dört farklı sistem BM-1968 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

Sabit mesnette LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 4.87×10^5 kN
HDRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.70×10^5 kN
LRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.38×10^5 kN
FPS izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 2.18×10^5 kN



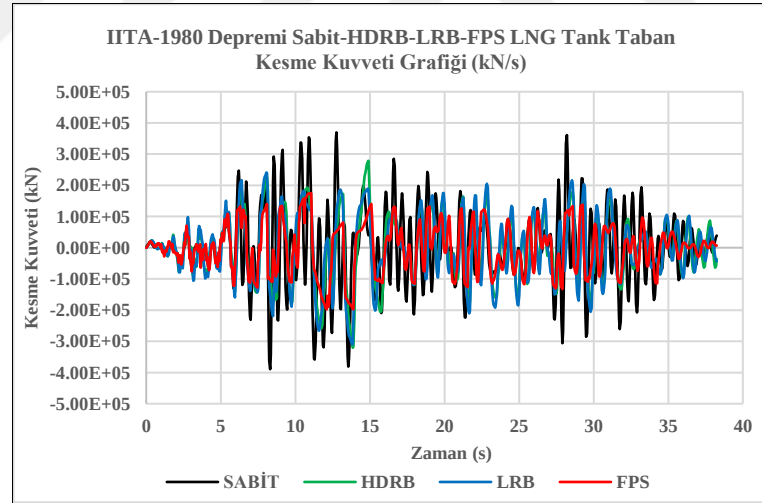
Şekil D.22: Dört farklı sistem IV06-II-1979 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

Sabit mesnette LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 6.44×10^5 kN
HDRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.19×10^5 kN
LRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.28×10^5 kN
FPS izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 2.36×10^5 kN



Şekil D.23: Dört farklı sistem VM-1980 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

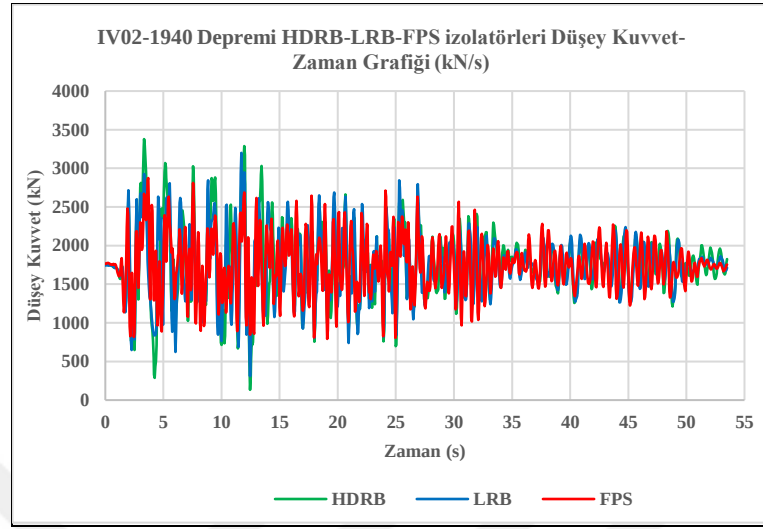
Sabit mesnette LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 6.29×10^5 kN
HDRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 4.72×10^5 kN
LRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.56×10^5 kN
FPS izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 2.53×10^5 kN



Şekil D.24: Dört farklı sistem IITA-1980 depremi LNG tank toplam taban kesme kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

Sabit mesnette LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.89×10^5 kN
HDRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.21×10^5 kN
LRB izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 3.09×10^5 kN
FPS izolatörlü LNG tankta oluşan maksimum taban kesme kuvveti: 1.97×10^5 kN

- 7 Farklı Depremde LNG Tank HDRB-LRB-FPS İzolatör Düşey Kuvvet Analizlerin Karşılaştırılması

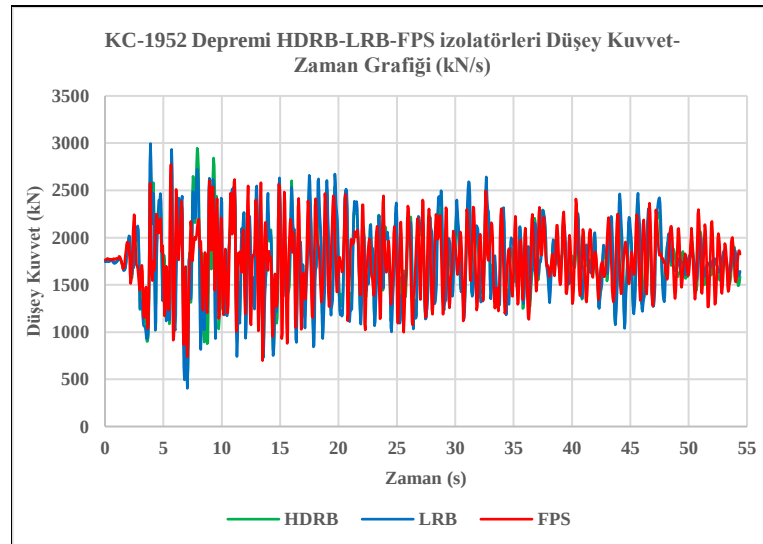


Şekil D.25: IV02-1940 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

HDRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 3378 kN

LRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 3226 kN

FPS izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2874 kN

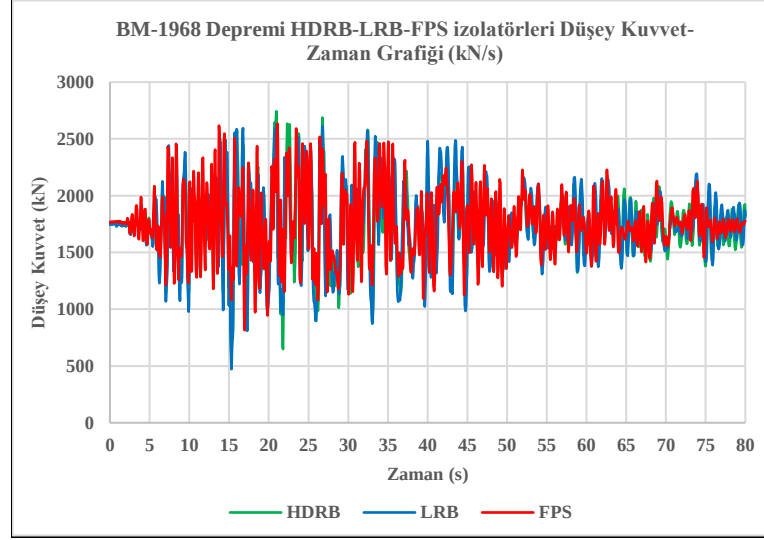


Şekil D.26: KC-1952 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

HDRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2947 kN

LRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2995 kN

FPS izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2774 kN

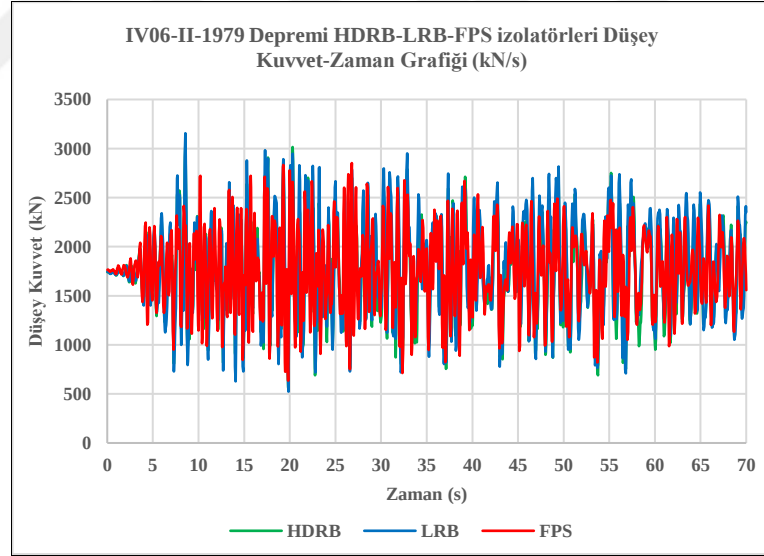


Şekil D.27: BM-1968 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

HDRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2743 kN

LRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2629 kN

FPS izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2635 kN

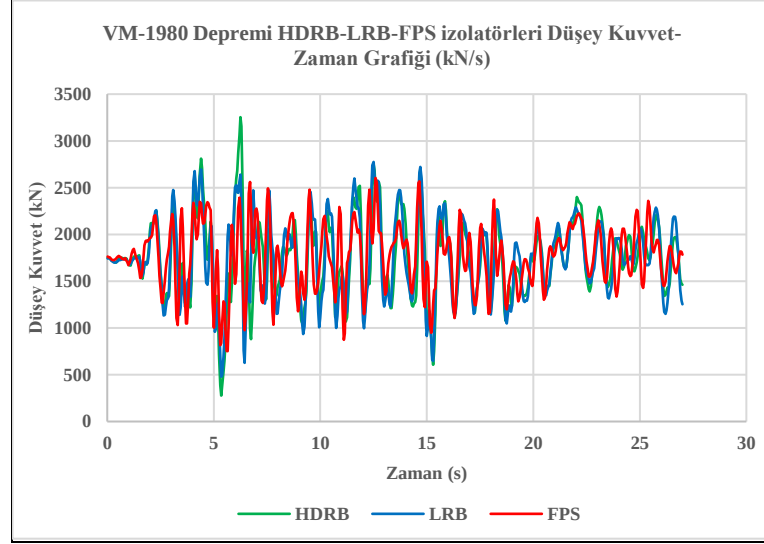


Şekil D.28: IV06-II-1979 depremi LNG tank altı mesneti HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvet-zaman grafiği

HDRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 3054 kN

LRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 3156 kN

FPS izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2852 kN

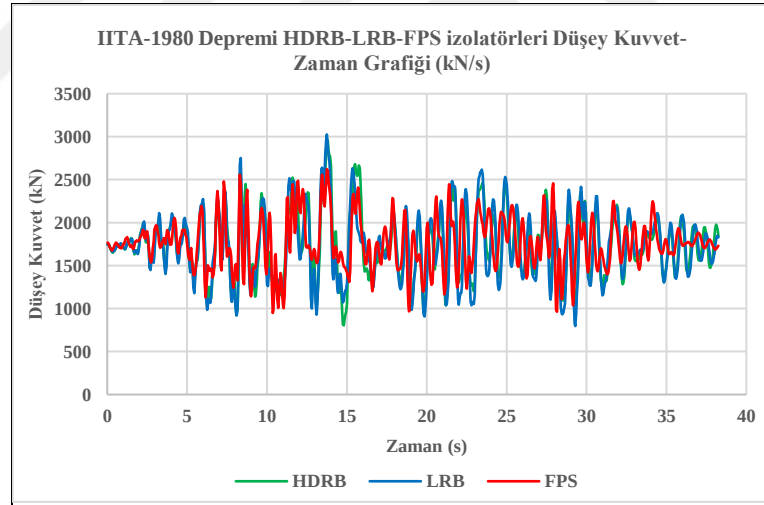


Şekil D.29: VM-1980 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

HDRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 3254 kN

LRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2775 kN

FPS izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2604 kN



Şekil D.30: IITA-1980 depremi LNG tank HDRB-LRB-FPS izolatörleri düşey kuvvetlerin karşılaştırılmalı grafiği

HDRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2973 kN

LRB izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 3025 kN

FPS izolatöre gelen maksimum düşey kuvvet : 2622 kN