



## Observational and Numerical Investigation of Seismic Fragility of Pressurized Tanks

Sezer Ozturk<sup>1</sup>, Kayahan Akgul<sup>2</sup> and Ali Sari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, Department of Civil Engineering, 34445, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Istanbul University-Cerrahpaşa, Department of Civil Engineering, 34320, Istanbul, Turkey

<sup>3</sup> Istanbul Technical University, Department of Civil Engineering, 34469, Istanbul, Turkey  
ORCID: 0000-0003-2165-3687, 0000-0001-7116-529X, 0000-0002-6888-1276

### Keywords

Fragility curves, Spherical tank, Horizontal cylindrical tank, Dynamic analysis, Finite element analysis

### Highlights

- \* Collecting damage data of tanks from past earthquakes
- \* Expanding data with numerical studies due to the relatively inadequacy of observational data
- \* Derivation of fragility curves by using numerical studies and observational data

### Acknowledgements

--

### Aim

To collect seismic damage data for pressurized tanks and derive fragility curves for spherical tanks.

### Location

All the world for observational damage data and Turkey for numerical study.

### Methods

Logistic regression method for curve fitting, nonlinear dynamic time history analysis for numerical studies.

### Results

Observational data is insufficient for horizontal and spherical tanks. Obtained fragility curves are logical for spherical tanks. Main damage is that failure of the brace members placed between the columns. Performing more numerical studies will develop the curves.

### Supporting Institutions

--

### Manuscript

Research Article

Received: 28.04.2021

Revised: 24.05.2021

Accepted: 28.05.2021

Printed: 30.06.2021

### DOI

10.46464/tdad.928967

### Corresponding Author

Sezer Ozturk

Email: sezer.ozturk@fsm.edu.tr

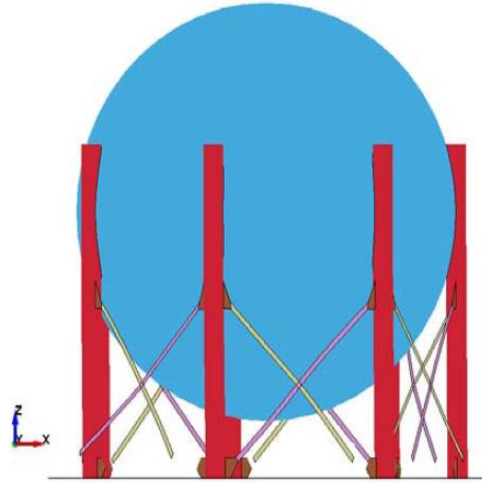


Figure  
Tank damage mechanism

### How to cite

Ozturk S., Akgul K., Sari A., 2021. Observational and Numerical Investigation of Seismic Fragility of Pressurized Tanks, South Marmara, Turk. J. Earthq. Res. 3 (1), 33-52, <https://doi.org/10.46464/tdad.928967>



## Basınçlı Tankların Sismik Kırılgenliklerinin Gözlemsel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Sezer Öztürk<sup>1</sup>, Kayahan Akgül<sup>2</sup> ve Ali Sarı<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34445, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye  
ORCID: 0000-0003-2165-3687, 0000-0001-7116-529X, 0000-0002-6888-1276

### ÖZET

Bu çalışmada, küresel tanklar için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar ile geçmiş depremlerde gözlemlenen hasar verileri birleştirilerek kırılgenlik eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca yatay silindirik tankların hasar verileri de derlenmiştir. Bu araştırmalar sonucunda küresel ve yatay silindirik basınçlı tanklar ile ilgili geçmiş depremlerden elde edilen gözleme dayalı hasar verilerinin atmosferik silindirik tanklara göre oldukça az sayıda olduğu görülmüştür. Bu sebeple özellikle küresel tanklar için veriler sayısal çalışmalarla desteklenmiş, gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda küresel tanklarda genel olarak çapraz elemanlarda gerilme yığılmalarının meydana geldiği ve bu elemanların kolonlarla bağlantı noktalarından koptukları gözlenmiştir. Analizlerden elde edilen hasar verilerinin de mevcut verilere eklenmesiyle küresel tanklar için geçerli kırılgenlik eğrileri oluşturulmuştur. Yer hareketi şiddet ölçütü ile küresel tanklarda olası depremlerde meydana gelebilecek hasarların gerçekleşme olasılığı değerleri arasındaki bağlantının sunulduğu kırılgenlik eğrilerinin gelecek çalışmaların geliştirilmesinde olumlu etkisinin olacağı düşünülmektedir.

### Anahtar kelimeler

Kırılgenlik eğrileri, Küresel tank, Yatay silindirik tank, Dinamik analiz, Sonlu eleman analizi

### Öne Çıkanlar

- \* Tankların geçmiş yıllardaki depremlerden hasar verilerinin toplanması
- \* Gözleme dayalı verilerin nispeten yetersiz olmasından dolayı verilerin nümerik çalışmalarla desteklenmesi
- \* Sayısal çalışmalar ve gözlemsel verilerin kullanılmasıyla kırılgenlik eğrilerinin türetilmesi

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.04.2021

Düzeltilme: 24.05.2021

Kabul: 28.05.2021

Basım: 30.06.2021

### DOI

10.46464/tdad.928967

### Sorumlu yazar

Sezer Öztürk

Eposta:

sezer.ozturk@fsm.edu.tr

## Observational and Numerical Investigation of Seismic Fragility of Pressurized Tanks

Sezer Ozturk<sup>1</sup>, Kayahan Akgul<sup>2</sup> and Ali Sari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, Department of Civil Engineering, 34445, İstanbul, Turkey

<sup>2</sup> İstanbul University-Cerrahpaşa, Department of Civil Engineering, 34320, İstanbul, Turkey

<sup>3</sup> İstanbul Technical University, Department of Civil Engineering, 34469, İstanbul, Turkey

ORCID: 0000-0003-2165-3687, 0000-0001-7116-529X, 0000-0002-6888-1276

### ABSTRACT

In this study, fragility curves were derived by combining the results obtained in nonlinear time history analyzes and damage data observed in past earthquakes for spherical tanks. In addition, damage data of horizontal cylindrical tanks were collected. As a result of these studies, it has been observed that the observational damage data obtained from past earthquakes related to spherical and horizontal cylindrical pressure tanks are quite low compared to atmospheric cylindrical tanks. For this reason, data for spherical tanks have been supported by numerical studies. As a result of the numerical analysis, it was observed that in spherical tanks, stress concentrations occurred in the braced members and these elements ruptured at the connection points with the columns. By adding the damage data obtained from the analyzes to the existing data, the fragility curves for spherical tanks were created. It is thought that the fragility curves, which present the relationship between the ground motion intensity measure and the probability values of damages that may occur in possible earthquakes, will also have a positive effect on the development of future studies.

### Keywords

Fragility curves, Spherical tank, Horizontal cylindrical tank, Dynamic analysis, Finite element analysis

### Highlights

- \* Collecting damage data of tanks from past earthquakes
- \* Expanding data with numerical studies due to the relatively inadequacy of observational data
- \* Derivation of fragility curves by using numerical studies and observational data

### Manuscript

Research Article

Received: 28.04.2021

Revised: 24.05.2021

Accepted: 28.05.2021

Printed: 30.06.2021

### DOI

10.46464/tdad.928967

### Corresponding Author

Sezer Ozturk

Email:

sezer.ozturk@fsm.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Basınçlı kaplar, dış ortamdan önemli ölçüde farklı bir basınçta gaz veya sıvı içermek üzere tasarlanmış kapalı kaplardır. Büyük hacimlerde sıvı veya gazın basınç altında depolanması ihtiyacı, küresel ve yatay tankların kullanılmasına yol açar. Bu tanklar özellikle petrokimya endüstrisi, gübre üretimi, sıvılaştırılmış gaz üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Depremler her yapıda olduğu gibi bu tür kaplarda da önemli tehlike oluşturmaktadır. Aşırı basınç ve sıcaklık farkı, tehlikeli ve birçok ölümcül kazaya neden olacak patlamalara neden olabilir. 2011 yılında Japonya'nın Chiba şehrinde, Tohoku depremi nedeniyle sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG; liquified petroleum gas) içeren küresel depolama tanklarında patlama ve yangınlar meydana gelmiştir. Küresel bir tankın kolonlarının desteklenmesi amacıyla kullanılan çapraz elemanlar, sismik atalet kuvveti nedeniyle kırılmıştır (Zama ve diğ. 2012). Daha sonra artçı sarsıntılarla kolonlarda burkulma meydana gelmiştir. Küresel tanklarda sismik etkiler tarafından tetiklenen yangın ve patlamalar (domino etkisi) kesintisiz 10 gün sürmüştür (Şekil 1). Günümüzde de dünyada herhangi bir petrol rafinerisinde deprem veya başka bir sebepten meydana gelebilen yangın, patlama gibi kazalar sonucunda büyük felaketler ortaya çıkabilmektedir. İçinde bulunduğumuz 2021 yılının mart ayının son günlerinde Endonezya'nın en büyük petrol rafinerilerinden biri olan, günde 125.000 varil petrolün işlendiği belirtilen Balongan rafinerisinde sebebi henüz belirlenememiş bir patlama sonucunda büyük bir yangın meydana gelmiştir (Şekil 2). Rafinerinin konum olarak yerleşim bölgelerine yakın olması sebebiyle yaşanan patlama ve yangından bölge halkı da etkilenmiştir. Yetkililer olay sırasında bir kişinin kalp krizinden hayatını kaybettiğini, en az 5 kişinin ağır, 15 kişinin hafif yaralandığını ve bölge yakınındaki yaklaşık 1000 kişinin tahliye edildiğini ifade etmiştir (The Guardian 2021, BBC 2021). Bu olaylardan da anlaşılacağı üzere petrol, kimyasal vb. depolama tankı tesislerinde yapılabilecek en ufak bir hatanın büyük felaketlere, can ve mal kayıplarına yol açabileceği görülmektedir ve bu sorunlar güncelliğini korumaktadır. Depremler de geçmişte görüldüğü gibi, bu tür olayların yaşanmasında büyük tehditlerdir. Bu sebeple bu tür yapıların olası deprem senaryolarına karşı risk analizlerinin detaylı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu sebeplerle, bu kaplar domino etkileri olarak adlandırılan kazalara karşı yeterli güvenliğe sahip olmalıdır. Bu çalışmada, farklı endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılan küresel basınçlı tankların sismik performansı ve sismik kırılabilirliği deprem yer hareketleri altında incelenmiştir. Ayrıca yatay basınçlı kapların sismik hasar verileri incelenmiştir. Bu amaçla, küresel ve yatay tanklar için geçmiş depremlerden elde edilen hasar verileri toplanmıştır. Bu verilerin uygun bir kırılabilirlik analizi için nispeten yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Çalışma için küresel bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Genel amaçlı bir sonlu eleman analiz yazılımı kullanılarak oluşturulan küresel tank modelinin zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilerek sonuçları yorumlanmıştır. Gerçekçi tank hasarlarının elde edilebilmesi için sonlu eleman modeline doğrusal olmayan malzeme ve geometrik etkiler ilave edilmiştir. Çalışma sonunda sayısal çalışmalarda elde edilen sismik performans yorumlanmış ve hem gözlemsel verilerden hem de sayısal çalışmalardan elde edilen verilerle, küresel tanklar için kırılabilirlik eğrileri türetilmiştir.

Literatürde atmosferik düşey silindirik tankların sismik performansının ve kırılabilirliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Phan ve diğ. (2018a) çalışmasında, tankların kırılabilirlik eğrilerinin analitik olarak türetilmesi için uygun bir prosedürün sunulması amaçlanmıştır. Geçmiş depremlerde çelik depolama tanklarının kritik hasar durumlarının bir analizi sunulmuştur. Deprem etkisindeki tanklar için sayısal modeller kurularak gerçekleştirilen analizlerle sonuçlar tartışılmıştır. Ayrıca, tanklar için sismik kırılabilirlik metodolojilerine genel bir bakış sunulmuştur. Kritik hasar durumları için elde edilen kırılabilirlik eğrilerinden, tanklarda yüksek sismik kırılabilirliğin gözlemlendiği anlaşılmıştır. Phan ve diğ. (2017) çalışmasında betonarme kolonlar üzerine yerleştirilen yükseltilmiş çelik depolama tanklarının sismik kırılabilirliklerinin olasılıksal değerlendirme yaklaşımı ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, depremler sırasında tank bileşenlerinin deprem performansının değerlendirilmesi

için, üç boyutlu sonlu eleman çubuk modeli üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Tank bileşenlerinin en olası hasar koşullarını gösteren ilgili kırılma eğrileri hem "cloud" hem de artımlı dinamik analiz yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. O'Rourke ve So (2000), Salzano ve diğ. (2003), Paolacci ve diğ. (2015), Phan ve Paolacci (2016), Phan ve diğ. (2016), D'Amico ve Buratti (2019), Phan ve diğ. (2018b) yayınları da düşey silindirik sıvı depolama tankları için yürütülen kırılma ve sismik analizlerin yer aldığı çalışmalardan bazı örneklerdir.



Şekil 1: Deprem ve yangından hasar görmüş küresel tanklar (Zama ve diğ. 2012)



Şekil 2: Endonezya'da petrol rafinerisinde meydana gelen patlama ve yangın (BBC 2021)

Yukarıda açıklandığı gibi, silindirik atmosferik depolama tankları için kırılma eğrilerinin elde edildiği çalışmaların sayısı literatürde oldukça fazladır. Ancak literatürde küresel basınçlı tanklar için kırılma analizlerinin yapıldığı çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Dawood (2019)'un çalışmasında, küresel LPG tankları için statik ve zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Küre duvarı/kolon bağlantısı dışında, kolonların ve duvarın gerilmeleri izin

verilen sınırlar içindedir. Curadelli (2011)'in yayınında, orijinal ve güncellenmiş haliyle küresel bir depolama tankın güvenilirliği gerçekleştirilen simülasyon ile değerlendirilmiştir. Enerji sönmülme sisteminin etkisi, sıvı-yapı etkileşiminin dikkate alındığı ayrıntılı bir modele dayalı olarak küresel bir tank üzerinde bir dizi doğrusal olmayan dinamik analiz gerçekleştirilerek ölçülmüştür. Wieschollek ve diğ. (2011; 2013a; 2013b), küresel tankların sismik tasarımı için Avrupa ve Amerikan yönetmeliklerinin uygulanması konusunda karşılaştırmalar yapmış ve benzer sonuçların elde edildiğini bildirmişlerdir. Moschonas ve diğ. (2014) basınçlı kapların sismik duyarlılığı üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu doğrultuda statik doğrusal olmayan itme analizi yapılmış ve tank yer değiştirme değerlerine göre tank kırılabilirliği ifade edilmiştir. Kolonlar arasında çapraz elemanların kullanılmasıyla tank kırılabilirliğinin azaldığı vurgulanmıştır. Sivy ve Musil (2018) çalışmasında, sismik etki altında tank-sıvı etkileşiminin durumu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Başka bir çalışmada Fiore ve diğ. (2018), küresel tanklarda çalkalanma etkisi ve zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak tankın deprem davranışını incelemişlerdir. Ohno ve diğ. (2015) çalışmasında, küresel bir tankın destek çerçevesinin çapraz boru kesitli elemanlarının hasar mekanizmalarının açıklanabilmesi için elastik ve elasto-plastik sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Ayrıca Yang ve diğ. (2014) yayınında, gerilmelerin yoğunlaştığı kısımların belirlenmesi için sonlu eleman yazılımı kullanılarak küresel tank modeli oluşturulmuş ve sismik etki altında zaman tanım alanında dinamik analiz yoluyla farklı tiplerde küresel tankların sismik performansı belirlenmiştir. Verilen örneklerden de görülebileceği gibi, küresel tankların deprem performansı ile ilgili çok sayıda çalışma mevcutken kırılabilirlik analizi konusunda çok sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, küresel tanklar için bir araya getirilen gözlemsel verilerden ve nümerik sonuçlardan kırılabilirlik eğrilerinin çıkarılması amaçlanmıştır.

Literatürde küresel ve yatay tanklar için geçmiş depremlerden elde edilmiş hasar verileri, atmosferik düşey silindirik tanklara kıyasla çok daha az sayıdadır. Bu çalışma doğrultusunda, küresel basınçlı tanklar için hasar verileri 1952 Kern County, 1978 Miyagi-Ken-Oki, 1985 Şili, 1991 Kosta Rika, 1995 Kobe, 1999 Kocaeli, 2001 Bhuj, 2007 Kashiwazaki, 2010 Şili, 2011 Tohoku depremlerinden elde edilmiştir. Kürelerin mesnetlendiği kolonlarda burkulma, kolonlar arası bağlantıyı sağlayan aksel kuvvet taşıyan çapraz çubuk elemanlarının zarar görmesi, boru hatlarının hasar görmesi, ankraj civatalarının ve ankraj sisteminin hasar görmesi, tank ayaklarının kayması küresel tanklarda görülen başlıca hasar türleridir. Yukarıda belirtilen depremlerde küresel basınçlı kaplarda bu tür hasarlara rastlanmıştır. Örneğin 1991 Kosta Rika depreminde 19.8 metre çapında küresel bir sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG; liquified natural gas) tankı göçmüştür (Mitchell ve Tinawi 1992). Ayrıca yukarıda da bahsedildiği üzere 2011 Tohoku depreminde, küresel bir tankın kolonlarında burkulma meydana geldiği ve çıkan yangınlarla birlikte tankın göçtüğü bildirilmiştir (Zama ve diğ. 2012). Benzer şekilde, 2001 Bhuj, Hindistan depreminde, bazı tanklarda bağlantı çubukları göçmüştür (Malhotra ve diğ. 2002). Görüldüğü gibi atmosferik silindirik tanklarda olduğu gibi farklı zamanlarda ve depremlerde küresel tanklarda da çeşitli hasarlar meydana gelmiştir. Bu nedenle, bu tür tanklar için de detaylı şekilde sismik risk analizleri gerçekleştirilmelidir. Bu verilerin dışında küresel tanklar için 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY 2018) göre doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Bu kapsamda yönetmelikte tanıma uygun olarak 11 deprem kaydı seçilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan, tasarlanacak yapıların talep ve kapasite durumlarının sismik güvenlik açısından her ülkede farklılık gösterdiğini vurgulamak gerekmektedir.

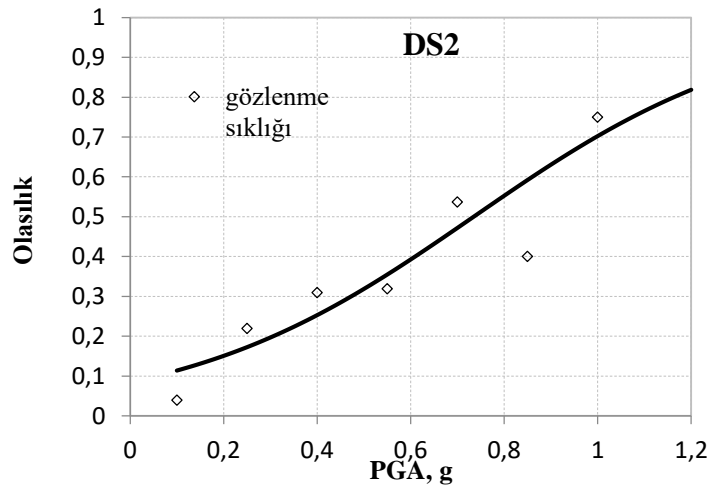
Yatay basınçlı tanklar için hasar verileri ise 1952 Kern County, 1983 Coalinga, 1984 Morgan Hill, 1985 Şili, 1989 Loma Prieta, 1991 Limon, Kosta Rika, 1994 Northridge, 1999 Kocaeli depremlerinden derlenmiştir. Tankın kayması, tabanda çatlama, boru hasarı, kaynak hasarı, ankraj civatalarının hasar görmesi, ayakların hasar görmesi yatay basınçlı tanklarda görülen başlıca hasar türleridir. Özetle bu çalışmada, küresel ve yatay silindirik basınçlı tanklar için geçmiş yıllarda meydana gelmiş depremlerden hasar verileri toplanmıştır. Bu hasar verilerinin atmosferik silindirik tanklara kıyasla oldukça az sayıda olduğu görülmüştür. Olası depremlerde çalkalanma etkileri ve sıvı sızıntısı nedeniyle yangın ve patlamaların meydana gelmesi büyük

felaketlere yol açabilmektedir. Bu nedenle endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan depolama tankları için deprem risk analizlerinin gerçekçi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, küresel depolama tankları için mevcut hasar verilerine ek olarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar kırılma eğrilerinin türetilmesinde kullanılmıştır.

## 2. YÖNTEM

Kırılma eğrileri, yapılarda yer hareketi parametrelerinin (burada PGA; en büyük yer ivmesi) bir fonksiyonu olarak depremlerden kaynaklanan hasar olasılıklarını ifade eder. Deprem etkisi altında belirli bir hasar sınırına ulaşılma veya bu sınırın aşılma olasılığını belirten eğrilerdir. Kırılma eğrileri, herhangi bir deprem sırasında olası hasarın tahmininin sağlanması amacıyla geliştirilmektedir. Bu eğriler, sismik risk değerlendirmesini temsil eder ve en güçlü ana sarsıntı durumunda fiziksel hasarın belirlenmesi için bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Bir yapının deprem sonrasında yeniden kullanım durumuna karar verilmesi için ana sarsıntının yanı sıra, artçı sarsıntı olasılığı da araştırılmalıdır. Kırılma analizleri, sismik bir olay sırasında ekonomik etkileri ve can kaybını azaltmak için de doğrudan kullanılır. Bu nedenle kırılma eğrileri hem deprem öncesi hem de deprem sonrası durumlar için karar verme araçları olarak kullanılabilir. Ek olarak, bu eğriler gelecekteki sismik yönetmelik koşullarının iyileştirilmesine yardımcı olabilir. Bu eğriler genellikle farklı şekillerde elde edilir. Gözleme, analitik çalışmalara ve uzman görüşüne dayalı yöntemler bulunmaktadır. Ayrıca bu yöntemlerden bazılarının bir arada dikkate alınmasıyla hibrit yöntemler de kullanılmaktadır. Bu çalışmada kırılma eğrileri gözlemsel veriler ve sayısal çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak türetilmiştir.

Öncelikle ele alınan tanklarla ilgili geçmiş depremlerden elde edilmiş hasar verileri toplanmıştır. Bu verilerin atmosferik silindirik tank verilerine göre oldukça yetersiz olduğu gözlenmiştir. Daha sonra sayısal analizlerle desteklenen hasar verileri kullanılarak kırılma eğrileri türetilmiştir. Burada veriler, hasarların elde edildiği depremlerin en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerine göre gruplara ayrıştırılmıştır. İvme değerleri 0.2g aralıklara bölünmüş ve her bir aralığa denk gelen hasar verileri incelenmiştir. Göz önüne alınan hasar sınıfları tablosu kullanılarak söz konusu hasar verileri bir hasar sınıfına atanır. Her bir hasar sınıfı için, her PGA aralığındaki tank sayısının, o aralıktaki tüm tank sayısına bölünmesiyle gözlenme sıklığı değerleri elde edilir. Bu gözlenme sıklığı değerlerine uygun olarak farklı istatistiksel yöntemlerle kırılma eğrileri türetilir. Bu çalışmada lojistik regresyon yöntemi kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 3'te küresel tanklardan bağımsız olarak örnek bir kırılma eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3: Gözlenme sıklığı değerleri ve kırılma eğrisi örneği (Öztürk ve diğ. 2021)

Çalışma kapsamında sayısal analizler için küresel tank sonlu eleman modeli kurulmuş ve sıvı-yapı etkileşimi de göz önüne alınarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

### 3. VERİ

Çalışmada kırılma eğrilerinin türetilmesinde hem gözleme dayalı hem de nümerik çalışmalardan elde edilmiş veriler kullanılmıştır.

#### 3.1) Gözlemsel Veriler

Küresel ve yatay basınçlı tankların geçmiş depremlerde meydana gelmiş, çeşitli kaynaklardan elde edilmiş hasar verileri ile ilgili bazı bilgiler burada sunulmaktadır. Küresel tanklar ile ilgili bilgiler Tablo 1’de, yatay silindirik tanklar ile ilgili bilgiler ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1: Küresel depolama tankları için elde edilen hasar verilerinin bulunduğu depremlerle ilgili veriler

Deprem Adı	Yıl	PGA (g)	Tank Sayısı
Kern County	1952	0.2	2
Miyagi-Ken-Okii	1978	0.3	1
Chile	1985	0.332	4
Costa Rica	1991	0.2	1
Kobe	1995	0.5	1
Kocaeli	1999	0.23; 0.32	2
Bhuj	2001	0.236	5
Kashiwazaki	2007	0.2	1
Chile	2010	0.56	2
Tohoku	2011	0.114	1

Tablo 2: Yatay silindirik tanklar için elde edilen hasar verilerinin bulunduğu depremlerle ilgili veriler

Deprem Adı	Yıl	PGA (g)	Tank Sayısı
Kern County	1952	0.15; 0.2	5
Coalinga	1983	0.43	1
Morgan Hill	1984	0.32	1
Chile	1985	0.24-0.332	12
Loma Prieta	1989	0.5	1
Costa Rica	1991	0.24	4
Northridge	1994	0.61	5
Kocaeli	1999	0.23	1

Bu verilerden görüldüğü gibi küresel ve yatay silindirik basınçlı tanklar için geçmiş depremlerden derlenebilecek hasar verisi sayısı atmosferik düşey silindirik tanklara kıyasla çok daha az sayıdadır. Bu verilerin sayısal çalışmalarla desteklenip kapsamlı bir risk analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

### 3.2) Sayısal Veriler

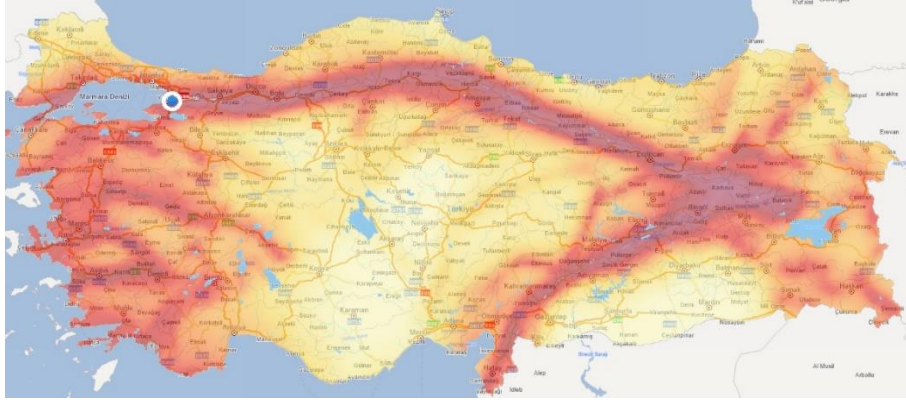
Çalışmada genel amaçlı sonlu elemanlar analiz yazılımı LS-DYNA (LS-DYNA R11.0 2017) kullanılarak küresel tank modelinin dinamik davranışı zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ile gözlemlenmiştir. Tankın sismik tepkisinin değerlendirilmesi için sonlu elemanlar analizine sıvı-yapı etkileşimi algoritmaları dâhil edilmiştir. Doğrusal olmayan malzeme ve geometrik etkiler, tank kabuğunun burkulması ve sıvının doğrusal olmayan çalkalanma davranışı analize dâhil edilmiştir. Çalışmada Lagrangian yöntemlerine göre malzeme sınırları ve karmaşık temas etkileşimlerinin daha gerçekçi tanımlanabildiği ve büyük deformasyon problemlerinin modellenenebildiği keyfi Lagrangian-Eulerian (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE) formülasyonu kullanılmıştır.

Modellenen küresel tank asetik asit içermekte olup 12.105 m çapında, merkezinden 7.73 m yüksekliğindedir ve 7 adet kolon üzerine oturtulmuştur. Tankın yer aldığı konum ve bölgeyi tehdit eden faylar sırasıyla Şekil 4 ve 5'te sunulmuştur. Kolonlar birbirine çapraz elemanlarla bağlanmıştır ve tankın doluluk oranı %90'dır. Kolonlar, tank duvarı, çelik çaprazlar ve plakalar gibi kabuk elemanlar için doğrusal olmayan malzeme modeli kullanılmıştır. Sistemde A516 Grade 70 ve A500 Grade B olmak üzere farklı mekanik özelliklere sahip iki malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 6). Kolon ve tank duvarı için A516 Grade 70 kullanılırken, çapraz elemanlar ve plakalar için A500 Grade B kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 3'te verildiği gibidir.

Analizde toplam on bir yer hareketi ivme kaydı seçilmiştir (her kayıt için birbirine dik iki yatay bileşen ve düşey bileşen). Yer hareketi ivme kayıtları TBDY(2018)'e göre seçilmiş ve ölçeklenmiştir. Zaman tanım alanında analizlerde deprem yer hareketi seviyesine göre depremlerin büyüklükleri, fay mesafeleri, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak sismik hesaplamada kullanılacak kayıtların seçimi yapılır. Tankın bulunduğu bölgede, deprem yer hareket seviyesi ile uyumlu tasarıma esas geçmiş deprem kayıtları kullanılmaktadır. Seçilen kayıtlarla ilgili özellikler Tablo 4'te verilmiştir. Bölge için elde edilen yatay ve düşey tasarım spektrum grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Bölge için elde edilen tasarım spektrum parametreleri ise Tablo 5'te verilmiştir. Bu veriler ile seçilen ölçekli deprem kaydı ivme spektrumları Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Analizlerdeki ölçeklendirilmiş PGA değerleri 0.7g ila 1g arasında değişmektedir. PGA değerleri, tankın bulunduğu konum için azalım ilişkileri ile tahmin edilmiştir. Bu şekilde PGA değerleri dikkate alınarak hem ampirik hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

LS-DYNA programı ile oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 10'da sunulmuştur. Duvar, kolon ve çaprazların modellenmesinde eleman formülasyonu 16 olan kabuk elemanlar kullanılmıştır. Ek olarak, akışkan alanı, eleman formülasyonu 11 olan katı (solid) elemanlar ile modellenirken temel ise rijit taban olarak modellenmiştir.





Şekil 4: Göz önüne alınan bölgenin konumu



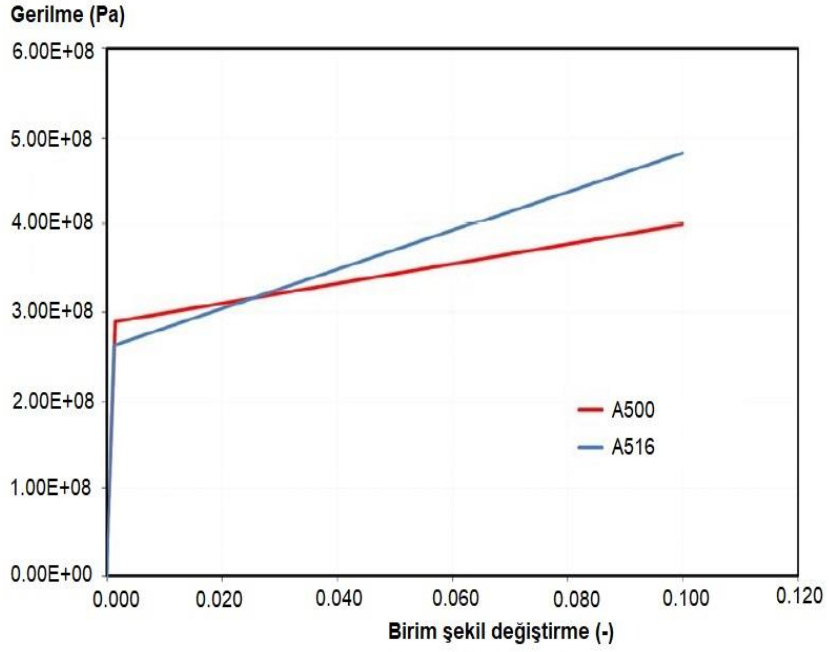
Şekil 5: Bölgeyi tehdit eden faylar (CNNTÜRK 2018)

Tablo 3: Malzeme özellikleri

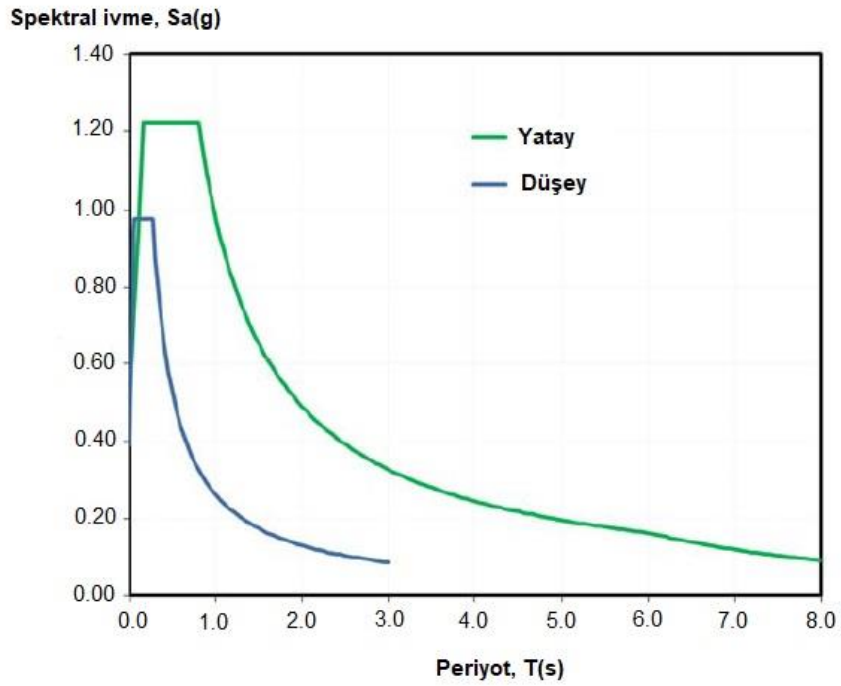
Malzeme adı	Akma day. (MPa)	Çekme day. (MPa)
A516 Grade 70	260	500
A500 Grade B	290	400

Tablo 4: Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler

İsmlendirme	Deprem Adı	Yıl	İstasyon	Mw	PGA(g)
EQ01	Imperial Valley	1940	El Centro Array	7.0	0.1973
EQ02	Parkfield	1966	Cholame-Shandon Array	6.2	0.3728
EQ03	Managua	1972	Managua ESSO	6.2	0.3325
EQ04	Imperial Valley	1979	EC Meloland Overpass	6.5	0.3776
EQ05	Victoria	1980	Victoria Hospital Sotano	6.3	0.0363
EQ06	Superstition Hills	1987	Parachute Test Site	6.5	0.3826
EQ07	Erzincan	1992	Erzincan	6.7	0.4837
EQ08	Kobe	1995	Takatori	6.9	0.6155
EQ09	Düzce	1999	Düzce	7.1	0.5353
EQ10	El Mayor-Cucapah	2010	Cerro Prieto Geothermal	7.2	0.288
EQ11	Darfield	2010	Lincoln School	7.1	0.46



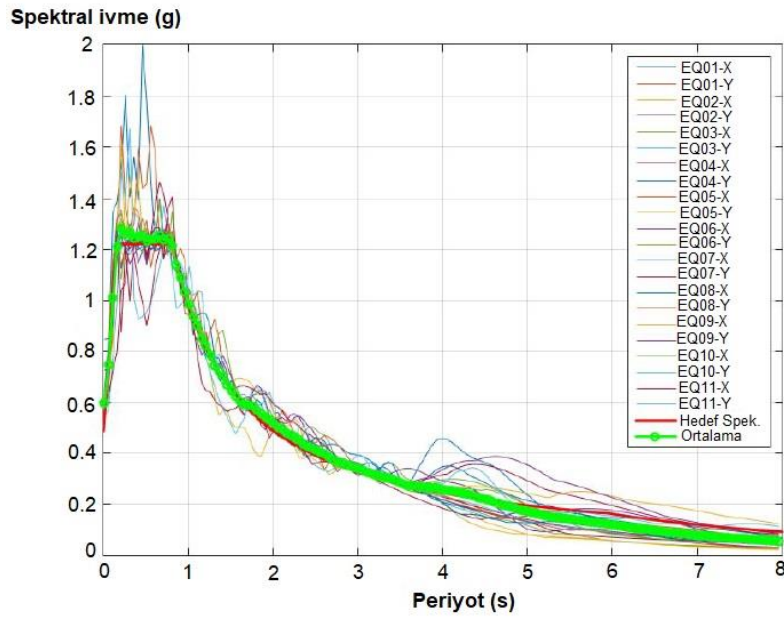
Şekil 6: Malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri



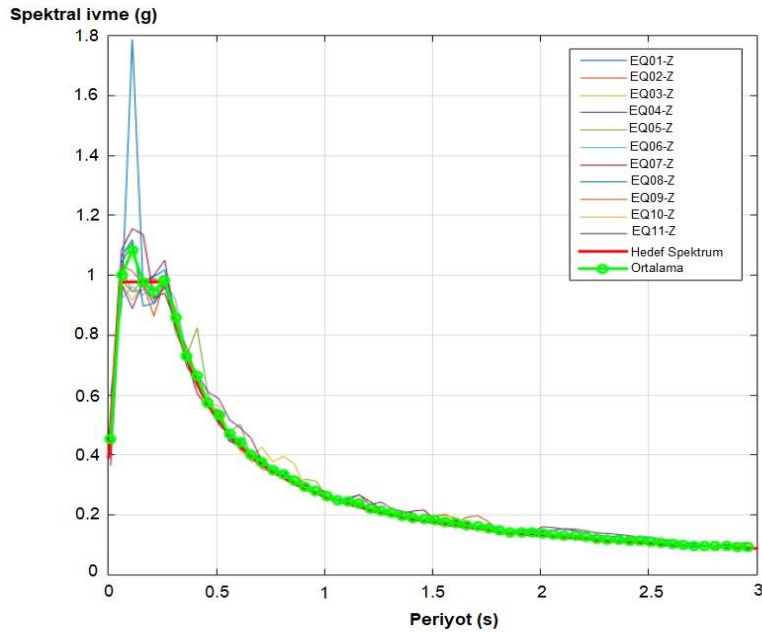
Şekil 7: TBKY (2018)'e göre tasarım spektrumu

Tablo 3: Bölgede tasarıma esas spektrum parametreleri

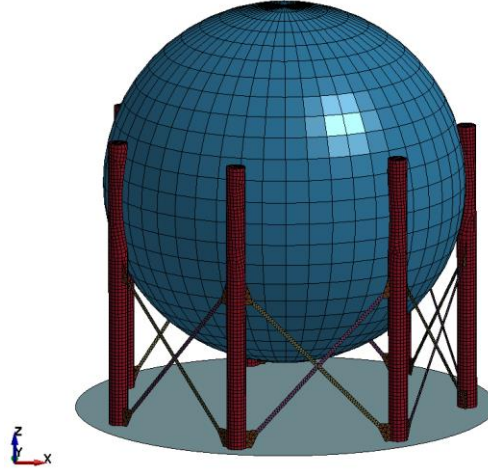
Zemin sınıfı	ZE
Deprem yer hareketi düzeyi	DD2
$S_s$	1.528
$S_1$	0.412
PGA (g)	0.624
PGV (cm/sec)	46.777
$F_s$	0.8
$F_1$	2.376
$S_{DS}$	1.222
$S_{D1}$	0.979



Şekil 8: Tasarım spektrumuna göre yatay olarak ölçeklendirilmiş deprem kaydı ivme spektrumu



Şekil 9: Tasarım spektrumuna göre düşey olarak ölçeklendirilmiş deprem kaydı ivme spektrumu



Şekil 10: Küresel tankın sonlu eleman modeli

### 3.3) Kırılgenlik Analizi

Kırılgenlik eğrileri, yer hareketi parametrelerinin bir fonksiyonu olarak depremlerden kaynaklanan yapısal hasar olasılıklarını ifade eder. Deprem etkisi altında belirli bir hasar durumuna ulaşılma veya bu durumun aşılma olasılıklarını tanımlar. Kırılgenlik eğrileri, bir deprem sırasında olası hasarın tahminini sağlamak için geliştirilmiştir. Bu eğriler, sismik risk değerlendirmesini temsil etmektedir ve en güçlü, ana sarsıntı durumunda fiziksel hasarı belirlemek için bir gösterge olarak kullanılır. Ana sarsıntının yanı sıra, bir yapının yeniden kullanılıp kullanılmayacağına karar vermek için artçı sarsıntıların olasılığının da araştırılması gerekir. Kırılgenlik fonksiyonu, sismik bir olay sırasında ekonomik etkilerin ve can kayıplarının azaltılabilmesi için de doğrudan kullanılır. Bu nedenle kırılgenlik eğrileri hem deprem öncesi hem de deprem sonrası durumlar için karar verme araçları olarak kullanılabilir. Ek olarak, bu eğriler gelecekteki sismik şartname koşullarının iyileştirilmesine yardımcı olabilir.

Kırılgenlik eğrilerinin türetilmesi için ampirik verilere, analitik çalışmalara ve uzman görüşüne dayalı farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Ayrıca bu yaklaşımlardan bazılarının birleştirildiği hibrit yöntemler de kullanılmaktadır. Örneğin, HAZUS-MH'deki kırılgenlik eğrilerinin çoğu hibrit yaklaşımla elde edilmiştir (D'Amico ve Buratti 2018). Bu çalışmada analizler, gözlemsel verilerin sayısal çalışmalardan elde edilen verilerle birleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kırılgenlik eğrilerinin türetilmesinde istatistiksel yaklaşımlar olduğu için veri sayısının artırılması eğrilerin hassasiyetini artırmaktadır.

Şiddet ölçütü (IM; intensity measure), bir sınır durumuna ulaşılma veya bu durumun aşılma olasılığının hesabında dikkate alınan yer hareketi parametresidir. Tanklar için yer hareketi yoğunluğunun bir ölçüsü olarak genellikle en büyük yer ivmesi (PGA) kullanılır. Sismik risk değerlendirmesinde, bir yapının performans seviyeleri sınır durumlar aracılığıyla tanımlanabilir. Sınır durum kavramı, farklı hasar durumları arasındaki geçişi tanımlar. Sismik kırılgenlik eğrilerinin oluşturulması için farklı hasar ölçütleri kullanılabilir. Hasar ölçütleri olarak dikkate alınacak parametreler yapılar arasında farklılık göstermektedir. Örneğin, betonarme eleman uçlarında en büyük dönme talebi ve en büyük kesme kuvveti talebi gibi parametreler hasar ölçütleri olarak kabul edilir. Küresel kaplar için hasar koşulları genel olarak küre kütesinin mesnetlendiği kolonlarda burkulmaya, eksenel kuvvet taşıyan ve kolonlar arası bağlantıyı sağlayan çapraz çubuk elemanların hasar görmesine, boru hatlarının hasar görmesine, ankraj civatalarının, ankraj sisteminin hasar görmesine, tank ayaklarının kaymasına bağlı olarak tanımlanır. Bu çalışmada ele alınan hasar durumları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6: Küresel tanklar için hasar sınıfları

<b>DS1</b>	Belirgin bir hasarın olmaması durumu.
<b>DS2</b>	Küre, kolonlar, çapraz elemanlar, ankraj ve borularda düşük seviyede hasarın meydana gelmesi
<b>DS3</b>	Küre, kolonlar, çapraz elemanlar, ankraj ve borularda orta seviyede hasarın meydana gelmesi
<b>DS4</b>	Küre, kolonlar, çapraz elemanlar, ankraj ve borularda şiddetli biçimde hasarın meydana gelmesi
<b>DS5</b>	Küre, kolonlar, çapraz elemanlar, ankraj ve borularda aşırı hasarın meydana gelmesi veya tankın göçmesi.

Hasar sınıfları tablosu oluşturulurken hasar mekanizmalarının şiddetlerine göre sıralandığı düşünülmektedir. Tabloda örnek olarak belirtilen farklı elemanlar için hasarın şiddeti önemlidir. Örneğin, boru sisteminde sızıntı meydana gelmesi tehlikeli bir durum oluşturur veya sızıntı meydana gelmeden boruların hasar görmesi durumu daha düşük bir hasar sınıfına atanabilir. Aynı şekilde kolonlardaki ve çapraz çubuk elemanlardaki hasarın şiddeti de önemlidir. Gözlemsel veriler ve analizlerden elde edilen sonuçlara göre tanklar hasar durumlarına göre sınıflandırılmıştır. Burada elde edilen kırılma eğrileri, PGA parametresine bağlı bir fonksiyon olarak belirli bir hasar durumunun elde edilmesi veya bu durumun aşılması olasılığını ifade etmektedir. Bu kırılma ilişkileri, hasar matrisi ve lojistik regresyon analizi kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada ampirik ve nümerik çalışmalara bağlı olarak her bir hasar sınıfına atanan tank sayıları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7: Tank sayıları

DS1	31
DS2	21
DS3	16
DS4	12
DS5	4

Tablo 6 ve 7'de DS1'den DS5'e kadar verilen tanımlar hasar sınıflarını (damage state) temsil etmektedir. Kırılma analizinde, değerlendirilen veri setindeki tankların her biri, meydana gelen hasarlara bağlı olarak ilgili hasar durumlarına atanmıştır. Her tank ilgili hasar durumuna atandıktan sonra, her bir hasar sınıfı için tanklarda bu durumun gözlenip gözlenmediği incelenmiştir. Bu veriler dikkate alınarak her bir hasar sınıfında belirli PGA değerleri için "gözlenme sıklığı" değerleri elde edilmiş ve bu verileri temsil edecek en uygun eğrinin oluşturulması amaçlanmıştır. Kırılma eğrilerinde gözlenme sıklığı değerlerinin hesaplanmasında Tablo 6'daki sınıflandırmalardan yararlanılır. Literatürde eğrilerin oluşturulması için farklı yöntemler (eğri uydurma teknikleri) mevcuttur. Çalışma kapsamında uygun eğrilerin oluşturulması için lojistik regresyon yöntemi kullanılmıştır. Bu model Denklem 1'de verildiği gibi ifade edilir.

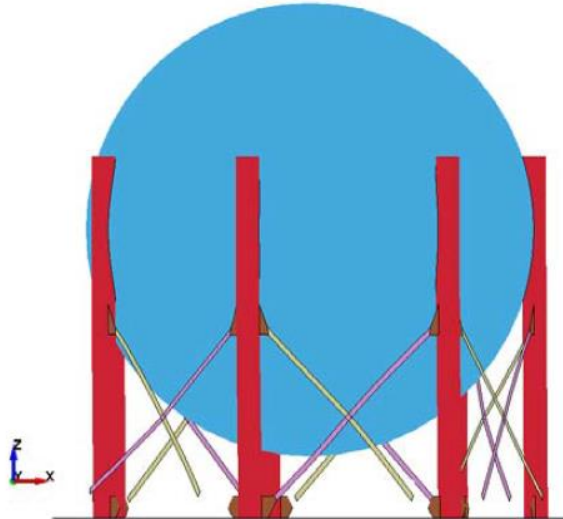
$$\pi(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x}} \quad (1)$$

Denklem 1'de  $\pi(x)$  olasılığı temsil etmektedir ve verilen lojistik regresyon modelinin bir veri kümesine uygun hale getirilmesi için bilinmeyenler  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Doğrusal regresyonda, bilinmeyen parametreleri hesaplamak için kullanılan yöntem, en küçük kareler yöntemidir. Bu yöntemde bilinmeyen parametreler için modele göre tahmin edilen değerler ile gözlemlenen sonuç değişken değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamını minimize eden değerler seçilir. Bununla birlikte, bu yöntem ikili sonuçlara sahip bir modele uygulandığında iyi sonuç vermez (Hosmer ve Lemeshow 1989). Lojistik regresyon modelinde bilinmeyenlerin hesaplanmasında maksimum olabilirlik yöntemi kullanılmaktadır.

#### 4. BULGULAR

Çalışmada, küresel basınçlı kapların geçmiş depremlerden derlenen hasar verileri ve kurulan sonlu elemanlar modeli ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerin sonuçları kullanılarak kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yatay silindirik basınçlı kaplar için de geçmiş depremlerden elde edilen hasar verileri toplanmıştır. Sayısal çalışmalarda, kolonların mesnetlendiği çelik çapraz elemanlar ana hasar merkezi olarak gözlemlenmiştir. Kolonların taban plakalarına birleşim noktalarında yüksek gerilmeler meydana gelmiştir. Çelik çapraz elemanlar, yüksek gerilmelerden dolayı kolonlarla bağlantı noktalarında kırılmıştır. Örnek olarak bir deprem etkisinde meydana gelen hasar mekanizması Şekil 11'de verilmiştir.

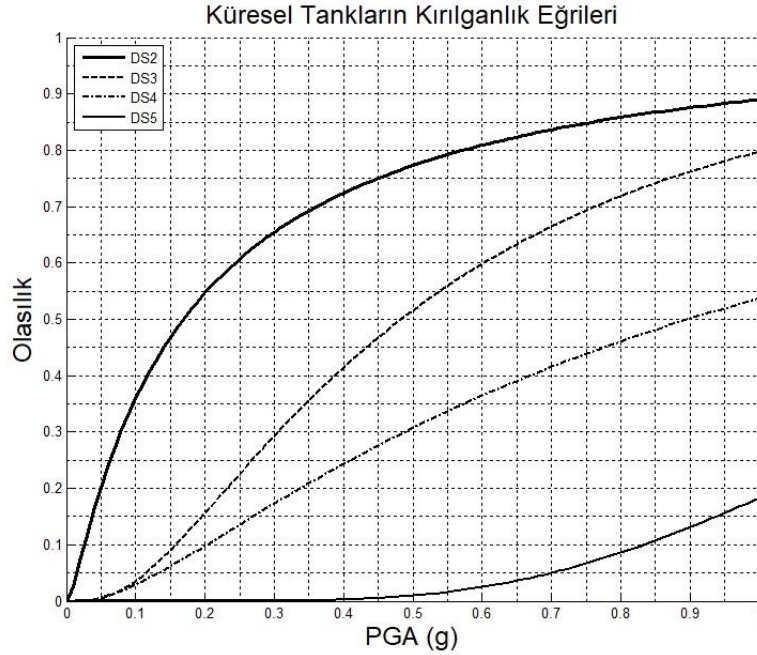
Şekil 11'de görüldüğü gibi destek sağlanması amacıyla kolonlar arasına yerleştirilen çapraz elemanlar taban plakalarından kırılmıştır. Ampirik ve sayısal çalışmalarla elde edilen hasar verileri ile oluşturulan kırılma eğrilerinin yatay eksenini en yüksek yer ivmesidir. Lojistik regresyon yöntemi kullanılarak gözlenme sıklığı değerlerine uygun olacak şekilde kırılma eğrileri elde edilmiştir. Gözlenme sıklığı değerleri hasar matrisi kullanılarak elde edilmiştir. PGA değerleri burada 0.2g aralıklara bölünmüştür. Örneğin 0.2g-0.4g aralığında 6 adet tankta  $DS \geq 2$  durumu gözlemlenmiştir. Bu aralıkta toplam tank sayısı 13 olarak elde edilmiştir.  $DS_2$  gözlenme sıklığı değeri  $6/13 = 0.46$  olarak hesaplanmıştır ve bu değer Şekil 13'te görülmektedir. Diğer noktalar da bu şekilde hesaplanmıştır (O'Rourke ve So 2000).



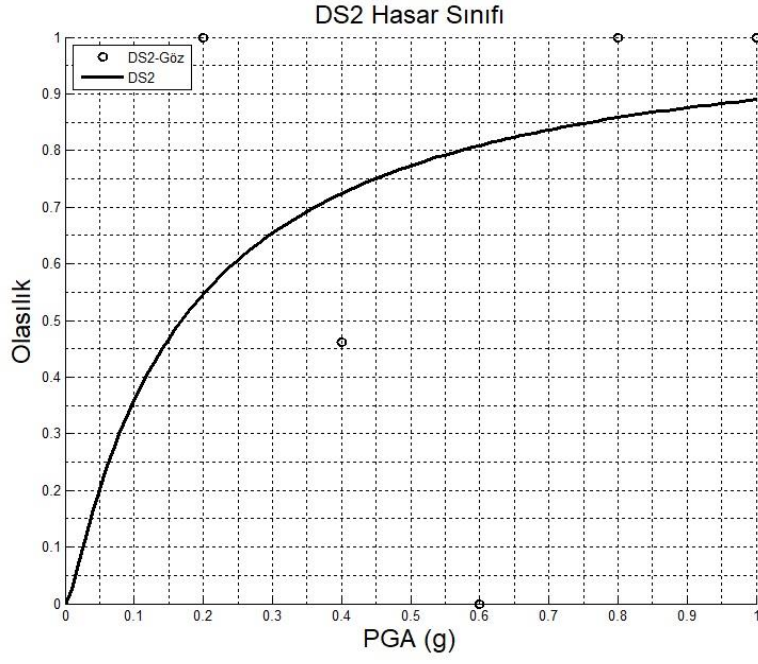
Şekil 11: Örnek tank hasar mekanizması

Elde edilen tüm sayısal ve gözlemsel veriler kullanılarak gerçekleştirilen kırılma analizlerinden çıkarılan kırılma eğrileri Şekil 12'de gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 13, 14, 15 ve 16 her hasar durumu için kırılma eğrileri ile gözlenme sıklığı değerleri arasındaki ilişkileri göstermektedir.

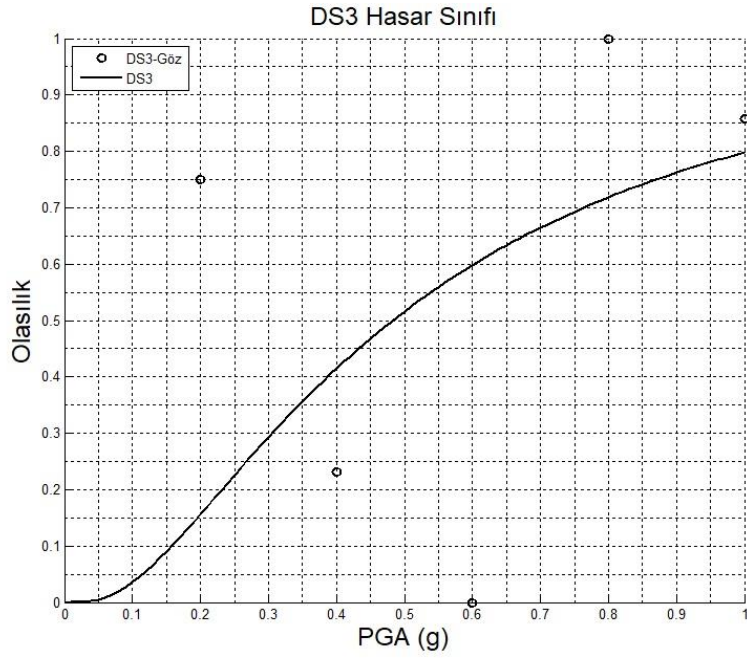
Atmosferik silindirik tanklar için geçmiş depremlerden elde edilmiş gözlemlere dayalı hasar verileriyle türetilen kırılma eğrileri ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu durumun aksine küresel basınçlı tanklar için literatürde kırılma eğrileriyle ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu açıdan çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler ve sonucunda elde edilen kırılma eğrilerinin basınçlı tankların deprem riskleri açısından araştırmacılara fikirler sunabileceği görülmüştür. Şekil 13'ten Şekil 16'ya kadar sunulan grafiklere bakıldığında gözlemsel hasar verilerinin ve sayısal çalışmalar sonucu elde edilen verilerin birleştirilmesiyle türetilen kırılma eğrilerinden, basınçlı küresel tankların deprem risklerinin tutarlı şekilde ortaya çıkarıldığı anlaşılmıştır. Grafiklerde verilen gözlenme sıklığı değerlerinde sayısal analiz sayısının artırılmasıyla değişiklikler görülebilir ve bu değişiklikler kırılma eğrilerine de yansırabilir. Bu sebeple özellikle basınçlı tanklar için gözlemsel hasar verilerinin atmosferik silindirik tanklara göre göreceli olarak yetersiz olduğu düşünülürse sayısal çalışmaların nitelik ve sayısının artırılmasının çalışmaları olumlu yönde etkileyeceği düşünülmektedir.



Şekil 12: Küresel basınçlı tanklar için kırılma eğrileri

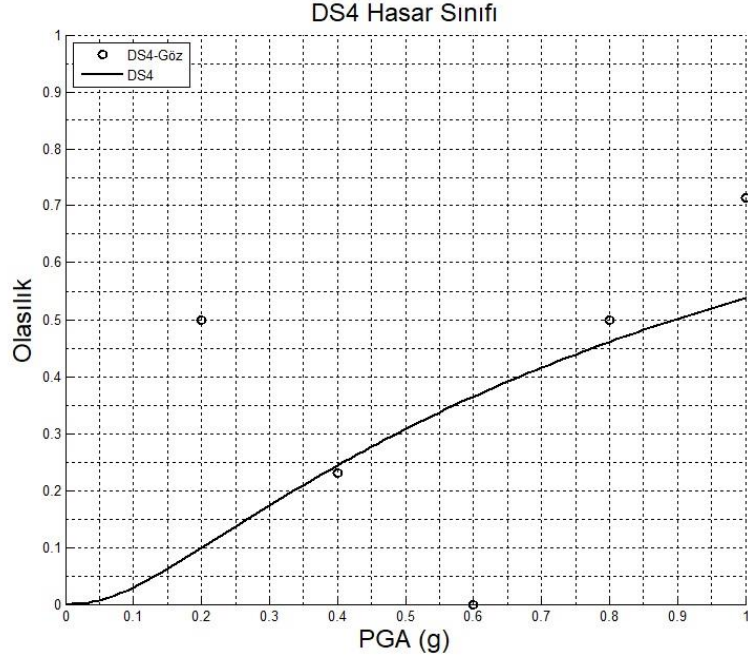


Şekil 13: DS2 durumu için gözlenme sıklığı değerleri ve kırılma eğrisinin kıyaslanması

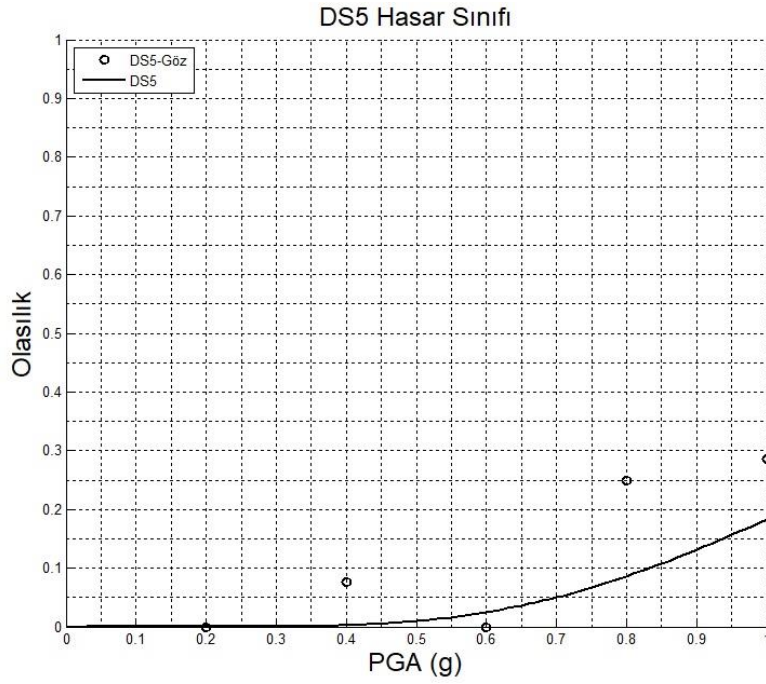


Şekil 14: DS3 durumu için gözlenme sıklığı değerleri ve kırılma eğrisinin kıyaslanması





Şekil 15: DS4 durumu için gözlenme sıklığı değerleri ve kırılma eğrisinin kıyaslanması



Şekil 16: DS5 durumu için gözlenme sıklığı değerleri ve kırılma eğrisinin kıyaslanması

Yatay eksendeki PGA değerlerinin 0.2g aralıklara bölünmüş olduğu grafiklerdeki gözlenme sıklığı değerlerinden görülebilmektedir. Her hasar sınıfı için, söz konusu hasar durumunun meydana gelmesi ile bağlantılı olarak bu aralıklarda gözlenme sıklığı değerleri elde edilmiştir. Bu veriler ve eğriler hem sayısal çalışmalardan hem de belirtildiği gibi geçmiş deprem hasar verilerinden elde edilmiştir. Literatürde küresel ve yatay silindirik basınçlı kaplar için çok fazla hasar verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle daha fazla nümerik çalışma ile kırılma analizleri için daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

## 5. SONUÇLAR

Çalışmada küresel ve yatay silindirik basınçlı kapların işlevi ve öneminden bahsedilmiştir. Olası sıvı sızıntıları ile patlama ve yangın gibi kazalar ve domino etkileri nedeniyle bu yapıların güvenliğinin sağlanması çok önemlidir. Deprem, bu tür kazaları tetikleyebilecek en büyük doğal tehditlerden biridir. Bu nedenle bu kapların deprem performanslarının gerçekçi şekilde incelenmesi ve kırılma analizlerinin kapsamlı şekilde yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, küresel ve yatay basınçlı tanklar için geçmiş depremlerden elde edilen hasar verileri toplanmıştır. Bu verilerin dikey atmosferik silindirik tanklara göre çok daha yetersiz olduğu görülmüştür. Asetik asit içeren küresel bir tank için kurulan sonlu eleman modeli ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmış ve elde edilen veriler yorumlanarak kırılma analizleri için kullanılmıştır. Bu analizlerden aşağıdaki yorumlar yapılabilir.

- Kolon ve tank duvarında herhangi bir hasar görülmemiştir.
- Kolonları destekleyen çelik çapraz elemanlar hasarların görüldüğü ana kısımlardır.
- Taban plakalarında yüksek gerilmeler meydana gelmiştir.
- Kırılma eğrileri için daha fazla nümerik çalışmanın gerçekleştirilmesi, risk analizlerini daha gerçekçi hale getirecektir.
- Gözlemsel verilerde PGA değerleri çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir. Sayısal çalışmada kullanılan PGA değerleri azalım ilişkileri ile elde edilmiştir. Bu nedenle hem ampirik hem de sayısal verilerin birleştirilmesi olağan bir durum olarak kabul edilmektedir.
- Gelecek çalışmalarda hem küresel hem de silindirik tanklar için sayısal çalışmaların artırılması ve kırılma eğrilerinin detaylandırılması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

BBC, 2021. Indonesia fire: Massive blaze erupts at oil refinery.  
Erişim adresi: <https://www.bbc.com/news/world-asia-56560826>.

CNNTÜRK, 2018. Jeoloji mühendislerinden korkutan tablo.  
Erişim adresi: <https://www.cnnturk.com/turkiye/jeoloji-muhendislerinden-korkutan-tablo>.

Curadelli O., 2011. Seismic Reliability of Spherical Containers Retrofitted by means of Energy Dissipation Devices, *Engineering Structures* 33 (9), 2661-2667.

D'Amico M, Buratti N., 2019. Observational Seismic Fragility Curves for Steel Cylindrical Tanks, *J. Press. Vess-T. ASME* 141 (1), 1-14.

Dawood A. O., 2019. Static and Time History Earthquake Analysis of LPG Spherical Steel Tanks in Iraq, *University of Thi\_Qar Journal for Engineering Sciences* 10 (1), 5-12.

Fiore A., Demartino C., Greco R., Rago C., Sulpizio C., Vanzi I., 2018. Seismic Performance of Spherical Liquid Storage Tanks: A Case Study, *International Journal of Advanced Structural Engineering* 10, 121-130.

Hosmer D.W., Lemeshow S., 1989. Applied Logistic Regression, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed., New York, U.S.A., 375 p.

LS-DYNA R11.0., 2017. Keyword User's Manual Volume I-II, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California.

Malhotra P.K., Rajaram S.K., Namjoshi R., Srinivasan S., Rao D.S., Gupta, A., Ballantyne D., 2002. Industrial Facilities, *Earthquake Spectra* 18 (1), 257-264.

Mitchell D., Tinawi, R., 1992. Structural Damage due to the April 22, 1991. Costa Rican Earthquake, *Canadian Journal of Civil Engineering* 19(4), 586-605.

Moschonas I., Karakostas C., Lekidis V., Papadopoulos S., 2014. Investigation of Seismic Vulnerability of Industrial Pressure Vessels, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 25-29 August 2014, Istanbul, Turkey.

Ohno T., Kobayashi, N., Oyamada, K., 2015. Seismic Resistance Capacity on Pipe Braced Supporting Frame of Spherical Tank, Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2015, 19-23 July 2015, Boston, Massachusetts, U.S.A.

O'Rourke M.J., So P., 2000. Seismic Fragility Curves for On-Grade Steel Tanks, *Earthquake Spectra* 16 (4), 801-815.

Öztürk S., Bezir F., Sarı A., 2021. Atmosferik Depolama Tankları için Ampirik Sismik Kırılma Eğrileri, 9. Türkiye Deprem Mühendisliği Konferansı (9TDMK), 2-3 Haziran 2021, Çevrimiçi Konferans.

Paolacci F., Phan H.N., Corritore D., Alessandri S., Bursi O.S., Reza M.S., 2015. Seismic Fragility Analysis of Steel Storage Tanks. 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 25-27 May 2015, Crete Island, Greece.

Phan H.N., Paolacci F., 2016. Efficient Intensity Measures for Probabilistic Seismic Response Analysis of Anchored Above-Ground Liquid Steel Storage Tanks, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2016, 17-21 July 2016, Vancouver, British Columbia, Canada.

Phan H.N., Paolacci F., Alessandri S., 2016. Fragility Analysis Methods for Steel Storage Tanks in Seismic Prone Areas, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2016, 17-21 July 2016, Vancouver, British Columbia, Canada.

Phan H.N., Paolacci F., Corritore D., Alessandri S., 2018a. Seismic Vulnerability Analysis of Storage Tanks for Oil and Gas Industry, *Pipeline Science and Technology* 2 (1), 55-65.

Phan H.N., Paolacci F., Alessandri S., 2018b. Enhanced Seismic Fragility Analysis of Unanchored Steel Storage Tanks Accounting for Uncertain Modeling Parameters, *J. Press. Vess-T.* 141 (1), 1-10.

Phan H.N., Paolacci F., Fabrizio B., Oreste S., Tondini N., 2017. Seismic Fragility Analysis of Elevated Steel Storage Tanks Supported by Reinforced Concrete Columns, *J. Loss Prevent. Proc.* 47, 57-65.

Salzano E., Iervolino I., Fabbrocino G., 2003. Seismic Risk of Atmospheric Storage Tanks in the Framework of Quantitative Risk Analysis, *J. Loss Prevent. Proc.* 16, 403-409.

Siviy M., Musil M., 2018. Design of the Spherical Liquid Storage Tanks for Earthquake Resistance, *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal Engineering* 121-126.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

The Guardian, 2021. Massive fire engulfs Indonesian oil refinery after explosion.

Erişim adresi: <https://www.theguardian.com/world/2021/mar/29/massive-fire-engulfs-indonesian-oil-refinery-after-explosion>.

Wieschollek M., Diamanti K., Pinkawa M., Hoffmeister B., Feldmann M., 2013a. Guidelines for Seismic Design and Analysis of Pressure Vessels, Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, 14-18 July 2013, Paris, France.

Wieschollek M., Kopp M., Hoffmeister B., Feldmann M., 2011. Seismic Design of Spherical Liquid Storage Tanks (Compdyn 2011), Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 26-28 May 2011, Corfu, Greece, p: 2196-2213.

Wieschollek M., Pinkawa M., Hoffmeister B., Feldmann M., 2013b. Seismic Design of Spherical Pressure Vessels, International Conference on Seismic Design of Industrial Facilities 2013, 17 September 2013, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, p: 417-428.

Yang Z., Zhang D., Guo L., Yang B., Wang G., 2014. Seismic Performance Analysis of the Large Spherical Tank, Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2014, July 20-24 2014, Anaheim, California, USA.

Zama S., Nishi H., Hatayama K., Yamada M., Yoshihara H., Ogawa Y., 2012. On Damage of Oil Storage Tanks due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0), Japan, 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012, 24-28 September 2012, Lisbon, Portugal, p:1213-1222.