Çelik Sıvı Depolama Tanklarının API-650 ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliğine Göre Karşılaştırmalı Sismik Analizi

Süleyman Arslan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025

Comparative Seismic Analysis of Steel Liquid Storage Tanks According to API-650 and Turkey Pipeline Systems and Liquid Storage Tanks Earthquake Regulations

Süleyman Arslan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

May 2025

Çelik Sıvı Depolama Tanklarının API-650 ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliğine Göre Karşılaştırmalı Sismik Analizi

Süleyman Arslan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Uğur Albayrak
Mayıs 2025

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Süleyman ARSLAN'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Çelik Sıvı Depolama Tanklarının API-650 ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliğine Göre Karşılaştırmalı Sismik Analizi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK

İkinci Danışman : --

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK

Üye: Doç. Dr. Mehmet CANBAZ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Haluk SARAÇOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Uğur Albayrak danışmanlığında hazırlamış olduğum "Çelik Sıvı Depolama Tanklarının API-650 ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliğine Göre Karşılaştırmalı Sismik Analizi" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 26/05/2025.

Süleyman Arslan

İmza

ÖZET

Endüstriyel sanayi tesislerinin en önemli bölümlerinden biri olan çelik sıvı depolama tankları; petrol, sıvılaştırılmış gaz, su, kimyasal maddeler ve endüstriyel atıklar gibi çeşitli sıvıların güvenli şekilde depolanmasında kullanılır. Bu tür yapılar, özellikle yanıcı ve tehlikeli madde içerdikleri için yapısal bütünlüklerini koruyamadıkları takdirde, büyük çaplı çevresel, ekonomik ve insan kaynaklı felaketlere yol açabilmektedir. Tank tasarımında, deprem gibi dinamik yükler, yapının en kritik gerilme ve deformasyonlarını oluşturarak çoğu zaman en belirleyici hasar mekanizmalarını ortaya çıkarmaktadır.Deprem etkisi altındaki sıvı depolama tankları, yalnızca kendi ağırlıkları ve içlerindeki sıvının hidrostatik basıncı altında değil; aynı zamanda sismik hareketler sonucu gelişen darbesel ve devinimsel etkilerle karmaşık bir dinamik davranış sergiler. Olası bir deprem sırasında oluşan bu dinamik yüklerin etkimesiyle; sıvı çalkalanması, taban yükselmesi, tank duvarının burkulması ve ankraj hasarları gibi göçme durumları geçmişte sıkça gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, deprem yükleri altında, sıvı-tank etkileşimlerini dikkate alan tasarım, güvenli bir sıvı depolama tankı tasarımında kilit role sahiptir.

Bu çalışmada, farklı sıvı türlerinin depolandığı düşey silindirik çelik tankların sismik davranışları, iki farklı yönetmelik olan API-650 ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY) kapsamında karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, eşit sıvı hacmine sahip, çap ve yükseklik oranları farklılık gösteren toplam 11 adet tank tipi, 5 farklı zemin sınıfı, 3 farklı aktif faya olan mesafe, 3 farklı sıvı içeriği ve Tank Tasarım Sınıfı değişkenleri ile oluşturulan toplam 142 farklı model analiz edilmiştir.-Çalışmanın sonuç bölümünde, API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerine göre tasarım deprem yüklerinin hesaplanması esas alınarak; devrilme momenti, taban kesme kuvveti ve çalkalanma dalga yüksekliği gibi sismik performans parametreleri farklı tank tasarım sınıfları için karşılaştırılmıştır. Bu tez, farklı yönetmeliklerin hesaplama yaklaşımlarının yanı sıra, tank geometrileri ve zemin türlerinin yapısal güvenlik üzerindeki etkilerini de detaylı şekilde inceleyerek, optimum ve güvenli tank tasarımı için çok boyutlu bir perspektif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sıvı Depolama Tankları, API-650, Çelik Tank, Deprem, TBHSSDTDY, Deprem Yükleri Altında Tank Tasarımı

SUMMARY

Steel liquid storage tanks are the structures which are widely used in various industrial facilities for the safe containment of fluids such as petroleum, gas, water, chemicals, and industrial waste. These structures, particularly in facilities storing flammable or hazardous substances, can lead to severe environmental, economic, and human-related disasters if structural integrity is compromised. In tank design, dynamic loads such as earthquakes often induce the most critical stress and deformation demands, making them one of the primary causes of structural failure. Liquid storage tanks under seismic effects exhibit complex dynamic behavior, not only under their own weight and the hydrostatic pressure of the contained liquid, but also due to impulsive and convective effects caused by seismic motion. In past earthquakes, such dynamic loading has frequently led to failures such as sloshing of the liquid, uplift of the tank base, buckling of the tank wall, and damage to anchorage systems. In this context, design approaches that account for fluid–structure interaction under seismic loading play a vital role in ensuring the safety of storage tanks.

In this study, the seismic behavior of vertical cylindrical steel tanks storing different types of liquids is comparatively analyzed according to two different standards: API-650 and the Turkish Earthquake Code for Pipeline Systems and Liquid Storage Tanks (TBHSSDTDY). In this study, a total of 142 models were developed and analyzed by systematically varying tank geometry (11 types with equal liquid volumes and different diameter-to-height ratios), soil classification (5 categories), distance to active faults (3 levels), liquid content (3 variables) and Seismic Use Group (2 variables). The conclusion presents a comparative assessment of seismic performance parameters, including overturning moment, base shear force, and sloshing wave height, for various tank design classes. This thesis provides a detailed presentation of the calculation approaches prescribed by different regulations for the design of steel liquid storage tanks, as well as an in-depth examination of how varying tank geometries and soil types affect structural safety. The primary objective of the study is to offer a multidimensional perspective aimed at achieving optimal and safe storage tank design.

Keywords: Liquid Storage Tanks, API650, Steel Tank, Earthquake, TBHSSDTDY, Tank Design With Earthquake Loads

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, değerli görüş ve önerileriyle çalışmama önemli katkılar sunan ve her aşamada desteğini esirgemeyen kıymetli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca her daim yanımda olan, koşulsuz sevgileri, fedakârlıkları ve bitmek bilmeyen destekleriyle bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan sevgili aileme en içten şükranlarımı sunarım. Onların emekleri ve bana olan inançları, bu çalışmanın arkasındaki en değerli güç olmuştur. Ayrıca, her zaman yanımda olduklarını hissettiren ve manevi desteğini esirgemeyen tüm sevdiklerime gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xvi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xviii**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **8**
3. MATERYAL YÖNTEM **18**
3.1. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'ne (TBHSSDTDY) Göre Tasarım İlkeleri ve Deprem Yüklerinin Belirlenmesi Yaklaşımı 18
3.1.1. Deprem Yer Hareketi Spektrumları 19
3.1.2. Deprem Tasarım Sınıfı, Performans Düzey ve Hedefleri 26
3.1.3. Deprem Yüklerinin Belirlenmesine İlişkin Kurallar ve Tasarım Kuvvetlerinin Belirlenmesi 28
3.2. API-650 Standardına Göre Tasarım İlkeleri ve Deprem Yüklerinin Belirlenmesi Yaklaşımı 35
3.2.1. Deprem Yer Hareketi Spektrumları 36
3.2.2. Deprem Tasarım Sınıfı 39
3.2.3. Deprem Yüklerinin Belirlenmesine İlişkin Kurallar Deprem Yüklerinin Belirlenmesine İlişkin Kurallar ve Tasarım Kuvvetlerinin Belirlenmesi ... 40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA **50**
4.1. TBHSSDTDY Kapsamında M06-ZA-L_f30-P Modeli İçin Örnek Çözüm 55
4.2. API-650 Kapsamında M06-ZA-L_f30-P Modeli İçin Örnek Çözüm 65
4.3. TBHSSDTDY ile API-650 Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması 72

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.3.1. Farklı Tank Geometrilerine Göre T_i Darbesel ve T_c Devinimsel Periyotların Karşılaştırması 73
4.3.2. Farklı Tank Geometrilerine Göre Darbesel m_i ve Devinimsel m_c Titreşim Modlarına Ait Etkin Kütlelerin Karşılaştırması 76
4.3.3. Farklı Tank Geometrisine ve Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Bağlı Olarak Devrilme Momentlerinin ve Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırması 80
4.3.4. Farklı Tank Geometrisi ve Tank Tasarım Sınıfı I ve Deprem Kullanım Sınıfı I Bağlı Olarak Devrilme Momentlerinin ve Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırması 100
4.3.5. Farklı Fay Mesafeleri (Lf) İçin, Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Devrilme Momentleri ve Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması 119
4.3.6. Farklı Fay Mesafeleri (Lf) ve Zemin Sınıfları İçin Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Devrilme Momentleri ile Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması 124
4.3.7. Farklı Sıvı Yoğunlukları (ρ) İçin, Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Devrilme Momentlerinin Karşılaştırılması ... 129
4.3.8. Farklı Tank Geometrilerine Göre Çalkalanma Dalga Yüksekliklerinin Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Karşılaştırması 132
4.3.9. Farklı Aktif Faya Olan Mesafe (L_f) ve Zemin Sınıfları İçin Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Çalkalanma Dalga Yüksekliklerinin Karşılaştırılması 138
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 141
KAYNAKLAR DİZİNİ 145

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil **Sayfa**

1.1. İnşaat aşamasında olan (a) düşey silindirik tank ve (b) küresel tank yapıları 1
1.2. Kocaeli Depremi (17 Ağustos 1999) sonrası hasar gören tanklar (Girgin, S. 2011)..... 2
1.3. Kocaeli Depremi (17 Ağustos 1999) sonrası hasar gören tanklar. Tüm tanklar kolonlar üzerinde taşınmaktadır. (Scawthorn, C., ve Johnson, G. S. 2000)..... 2
1.4. Microsoft Excel hesaplama aracı veri giriş sayfası-1 6
1.5. Microsoft Excel hesaplama aracı veri giriş sayfası-2 7
3.1. Eşdeğer yığılı kütleli modelleme yaklaşımı. (TBHSSDTDY-2021)..... 29
3.2. Tank tavanına dalga çarpma etkisinin hesabı (TBHSSDTDY-2021) 33
3.3. Ci Katsayısı (API-650) 42
4.1. Tank geometrisi 56
4.2. $\eta\xi$ %2 ve %0.5 için sönüm oranı katsayısı..... 59
4.3. Yatay elastik tasarım spektral ivmeleri, $SaeT,\xi$ 60
4.4. Düşey elastik tasarım spektral ivmeleri, $SaeDTv,\xi$ 61
4.5. Tank taban devrilme momenti MOT hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri..... 63
4.6. Tank taban devrilme momenti MOT' hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri..... 64
4.7. Tank taban devrilme momenti Mrw hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri..... 70
4.8. Tank taban devrilme momenti Ms hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri..... 70
4.9. Geometrisi farklı tank modelleri için Ti değerlerinin TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması 74
4.10. Farklı tank modelleri için Tc değerlerinin TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması..... 75
4.11. Farklı tank modelleri için darbesel titreşim modu etkili kütlesi TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması 78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.12. Farklı tank modelleri için devinimsel titreşim modu etkili kütlesi TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması 78
4.13. ZA zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 84
4.14. ZB zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 84
4.15. ZC zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 85
4.16. ZD zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 85
4.17. ZE zemin sınıfları MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 86
4.18. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (MOT) ve API-650 (MRW) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 87
4.19. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (MOT') ve API-650 (Ms) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 88
4.20. ZA zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 91
4.21. ZB zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 92
4.22. ZC zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 92
4.23. ZD zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 93
4.24. ZE zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.25. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (Vd) ve API-650 (V) yaklaşımlarına göre toplam kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 94
4.26. Yatay elastik tasarım spektral ivmesi eğrisinin karakteristik bölgeleri 96
4.27. M06-ZA~ZE-Lf30-P Modellerindeki 0 ile 1 sn. arasındaki yatay elastik tasarım spektral ivmeleri $SaeTi, \xi i$ değeri (TTS-II) 97
4.28. ZA zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 104
4.29. ZB zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 104
4.30. ZC zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 105
4.31. ZD zemin sınıfı MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 105
4.32. ZE zemin sınıfları MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 106
4.33. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (MOT) ve API-650 (MRW) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 107
4.34. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (MOT') ve API-650 (Ms) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 108
4.35. ZA zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 112
4.36. ZB zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 112
4.37. ZC zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.38. ZD zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) Toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 113
4.39. ZE zemin sınıfı Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 114
4.40. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (Vd) ve API-650 (V) yaklaşımlarına göre toplam kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I) 115
4.41. M06-ZA~ZE-Lf30-P Modellerindeki 0 ile 1 sn. arasındaki yatay elastik tasarım spektral ivmeleri $SaeTi, \xi i$ değeri (TTS-I) 117
4.42. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için MOT (TBHSSDTDY) değerleri 121
4.43. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için MOT' (TBHSSDTDY) değerleri 122
4.44 Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için Vd (TBHSSDTDY) toplam kesme kuvveti değerleri 122
4.45. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) değerleri 127
4.46. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için MOT' (TBHSSDTDY), Ms (API-650) değerleri 127
4.47. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri 128
4.48. Sıvı yoğunluğu (ρ) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650) değerleri 129
4.49. Sıvı yoğunluğu (ρ) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için MOT' (TBHSSDTDY), Ms (API-650) değerleri 130
4.50. Sıvı yoğunluğu (ρ) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için toplam kesme kuvveti değerleri 130

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.51. ZA zemin sınıfı $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 135
4.52. ZB zemin sınıfı $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 135
4.53. ZC zemin sınıfı $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 136
4.54. ZD zemin sınıfı $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 136
4.55. ZE zemin sınıfı $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II) 137
4.56. Farklı aktif faya olan mesafe ve zemin sınıflarına göre $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) karşılaştırılması 140

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı, Fs (TBDY-2018) 21
3.2. 1 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı, $F1$ (TBDY-2018) 22
3.3. Sönüm oranı katsayısı, ηξ denklemi parametreleri (TBHSSDTDY 2021) 23
3.4. Deprem Tasarım Sınıfları (TBHSSDTDY 2021) 26
3.5. Performans hedefleri (TBHSSDTDY 2021) 28
3.6. Darbesel ve devinimsel titreşim modlarıyla ilgili kuvvetlerin hesabında kullanılacak parametre değerleri (TS EN 1998-4) (TBHSSDTDY-2021) 30
3.7. Düşey deprem hareketi bileşeniyle ilgili olan (düşey yöndeki) solunum titreşim mod hesabında kullanılacak Cv değerleri (TBHSSDTDY-2021) 31
3.8. Zemin sınıfının fonksiyonu olarak Fa Değeri (API-650) 37
3.9. Zemin sınıfının fonksiyonu olarak Fv Değeri (API-650) 38
3.10. Tank özellikleri (API-650) 40
3.11. İzin verilen gerilme tasarımı için tepki modifikasyon katsayıları 43
3.12. Önem faktörü (I) ve Sismik Kullanım Grubu sınıflandırması 43
3.13. Ankraj oranı kriterleri 48
3.14. Gerekli minimum çalkalanma dalgası yüksekliği (API-650) 49
4.1. Model tank geometrileri ve tasarım parametreleri 52
4.2. M06-ZA-Lf30-P Tank özellikleri 55
4.3. Saha özellikleri 55
4.4. Saha için deprem tehlike haritası ivme, hız değerleri ve performans hedefleri 56
4.5. Geometrisi farklı tank modelleri için Ti darbesel (impulsive) ve Tc devinimsel (convective) sonuçları 74
4.6. Geometrisi farklı tank modelleri için mi darbesel titreşim modu etkili kütlesi ve mc devinimsel titreşim modu etkili kütlesi sonuçları 77
4.7. Farklı zemin sınıflarına göre MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650), MOT' (TBHSSDTDY) ve Ms (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) 81
4.8. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti Vd (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları (TTS-II) (DKS- II) 89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

4.9. $Ss' = 0.772$ değeri için kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı, FS (TBDY-2018) 98
4.10. $Ss = 0.702$ değeri için zemin sınıfının fonksiyonu olarak Fa değeri (API-650) 98
4.11. Darbesel ve devinimsel titreşim modları için sönüm oranlarının yönetmeliklere göre karşılaştırılması 99
4.12. Farklı zemin sınıflarına göre MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650), MOT' (TBHSSDTDY) ve Ms (API-650) sonuçları (TTS-I) (DKS- I) 101
4.13. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti Vd (TBHSSDTDY), V (API-650) (TTS-I) (DKS- I) sonuçları 109
4.14. $Ss' = 0.246$ değeri için kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı, FS (TBDY-2018) 118
4.15. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650), MOT' (TBHSSDTDY) ve Ms (API-650) sonuçları 120
4.16. Farklı faya olan mesafe (Lf) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için toplam kesme kuvveti Vd (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları 121
4.17. Farklı faya olan mesafe (Lf) ve farklı zemin sınıfı değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için MOT (TBHSSDTDY), MRW (API-650), MOT' (TBHSSDTDY) ve Ms (API-650) sonuçları 125
4.18. Farklı faya olan mesafe (Lf) ve farklı zemin sınıfı değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için toplam kesme kuvveti Vd (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları 126
4.19. Farklı zemin sınıflarına göre $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) 132
4.20. Farklı aktif faya olan mesafe ve zemin sınıflarına göre $dmax$ (TBHSSDTDY), δS (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) 139

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
API-650	American Petroleum Institute Standard 650
DKS	Deprem Kullanım Sınıfı
MKSEAHY	Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TBHSSDTDY	Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği
TTS	Tank Tasarım Sınıfı
DKS	Deprem Kullanım Sınıfı

Kısaltmalar	**Açıklama**
A_c	Devinimsel tasarım tepki spektrumu ivme parametresi (API-650)
A_c	Toplam deprem etkisinin devinimsel titreşim modu bileşeni (TBHSSDTDY)
A_f	Dalga yüksekliği hesaplaması için ivme katsayısı
A_{Ed}	Toplam deprem etkisi
A_i	Darbesel tasarım tepki spektrumu ivme katsayısı (API-650)
A_i	Toplam deprem etkisinin solunum titreşim modu bileşeni (TBHSSDTDY)
A_v	Düşey deprem ivme parametresi (API-650)
A_v	Toplam deprem etkisinin darbesel titreşim modu bileşeni (TBHSSDTDY)
a_i	Darbesel titreşim modu kütle hesap katsayısı
a_s	Sabitlenme elemanı sünekliğine bağlı katsayı
a_η, b_η , c_η, d_η, e_η	Sönüm oranı katsayısı denklemi parametreleri
C_c	Devinimsel titreşim modu periyod hesaplama katsayısı
C_i	Darbesel titreşim modu periyod hesaplama katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
C_v	Tank solunum titreşim modu periyod hesaplama katsayısı
D	Tankı çapı
d_{max}	Sıvı çalkalanma yüksekliği
D_{HD}	Tankı zemine sabitleyen elemanların merkezlerinden geçen çemberin çapı
DD-1	Spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen ortalama tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu deprem yer hareketi
DD-2	Spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen ortalama tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu deprem yer hareketi
DD-3	Spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen ortalama tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu deprem yer hareketi
E	Tank duvar malzemesi elastisite modülü
f_d	En büyük yer değiştirme denklemi katsayısı
F_s, F_a	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
F_1, F_v	1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
F_p	Normal çalışma basıncının tasarım basıncına oranı, minimum 0.4
F_y	Çelik karakteristik akma gerilmesi.
G	Tasarım özgül ağırlığı
G_e	Düşey deprem etkileri dahil etkin özgül ağırlık $G\ x\ (1 - 0.4A_v)$
H	Tank içerisindeki suyun durgun durumdaki yüzeyinin tank tabanından yüksekliği
H_w	Tank duvarı yüksekliği
h_c, X_s	Tank tabanının hemen üzerindeki seviyedeki devrilme momenti hesabına katılan devinimsel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
$h_c{}'$, X_{is}	Tank tabanının hemen altındaki devrilme momenti hesabına katılan devinimsel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği
h_i, X_i	Tank tabanının hemen üzerindeki seviyedeki devrilme momenti hesabına katılan darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği
$h_i{}'$, X_{cs}	Tank tabanının altındaki devrilme momenti hesabına katılan darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği
h_r, X_r	Tank çatısının ağırlık merkezinin tabandan yüksekliği
$h_r{}'$	Sıvı basıncı eşdeğer yüksekliği
h_w	Tank duvarlarının ağırlık merkezinin tabandan yüksekliği
J	Ankraj Oranı
K	Spektral ivmeyi %5'ten %0.5'e dönüştürmek için katsayı (1.5)
L_f	En yakın aktif fay düzlemine olan mesafe [km]
L_S	Kendinden ankrajlı tasarımda, devrilme momentine karşı dayanım sağlayan kuvvetin iletilmesi amacıyla kullanılan (taban levhası veya kalınlaştırılmış halkasal levha biçimindeki) halkasal bölgenin, cidarın iç yüzeyinden itibaren ölçülen genişliği
m_c, W_c	Devinimsel titreşim modu etkili kütlesi
m_i, W_i	Darbesel titreşim modu etkili kütlesi
m_r, W_r	Tavanının kütlesi
m_w, W_s	Duvarların kütlesi
M_{OT}, M_{rw}	Tank tabanının hemen üzerindeki seviye için devrilme momenti
$M_{OT}{}'$, M_s	Tank tabanının altındaki seviye için devrilme momenti
N_c	Tank içindeki sıvının devinimsel bileşeninin deprem etkisiyle tank cidarına oluşan çevresel gerilme değeri
N_i	Tank içindeki sıvının darbesel bileşeninin deprem etkisiyle tank cidarına oluşan çevresel (hoop) gerilme değeri

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
P	Birim çevresel uzunluk için bağlantı elemanına etkiyen deprem yükü
p_b	Çatıya etkiyen sıvı kaldırma kuvveti basıncı
p_r	Tank çatısına sıvının dalgalanması nedeniyle etkiyen hidrodinamik basınç
p_v	Duvara etkiyen hidrodinamik basıncın düşey titreşim modu bileşeni
PGD	En büyük zemin yer değiştirmesi
PGV	En büyük zemin hızı
Q	MCER'den tasarım seviyesi spektral ivmelerine ölçekleme faktörü (ASCE 7 için 2/3)
R	Tank yarıçapı
R_{wc}	Devinimsel mod için tepki modifikasyon katsayısı
R_{wi}	Darbesel mod için tepki modifikasyon katsayısı
S_0	M_{CER}, %5 sönümlü, sıfır saniye periyodunda spektral tepki ivme parametresi
S_1	Deprem tehlikesi haritası T = 1.0 s spektral ivme değeri [g]
S_1'	En büyük doğrultu ve yakın fay etkisi dikkate alınmış zemin etkilerinden bağımsız T = 1.0 s spektral ivme değeri [g]
$S_{ae}(T)$, S_a	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu [g]
$S_{aeD}(T)$	Düşey elastik tasarım ivme spektrumu [g]
S_{D1}	Yatay ve düşey elastik tasarım spektrum hesabında kullanılacak T = 1.0 s spektral ivme değeri [g]
S_{DS}	Yatay ve düşey elastik tasarım spektrum hesabında kullanılacak kısa periyod spektral ivme değeri [g]
S_p	ASCE metotları ile ele alınmayan sahalar için tasarım tepe yer ivmesi parametresi.
S_S	Deprem tehlikesi haritası kısa periyod spektral ivme değeri [g]
S_S'	En büyük doğrultu ve yakın fay etkisi dikkate alınmış zemin etkilerinden bağımsız kısa periyod spektral ivme değeri [g]
SA_{VS}	Düşey ivme spektrumunun kısa periyoduna karşılık gelen değeri

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

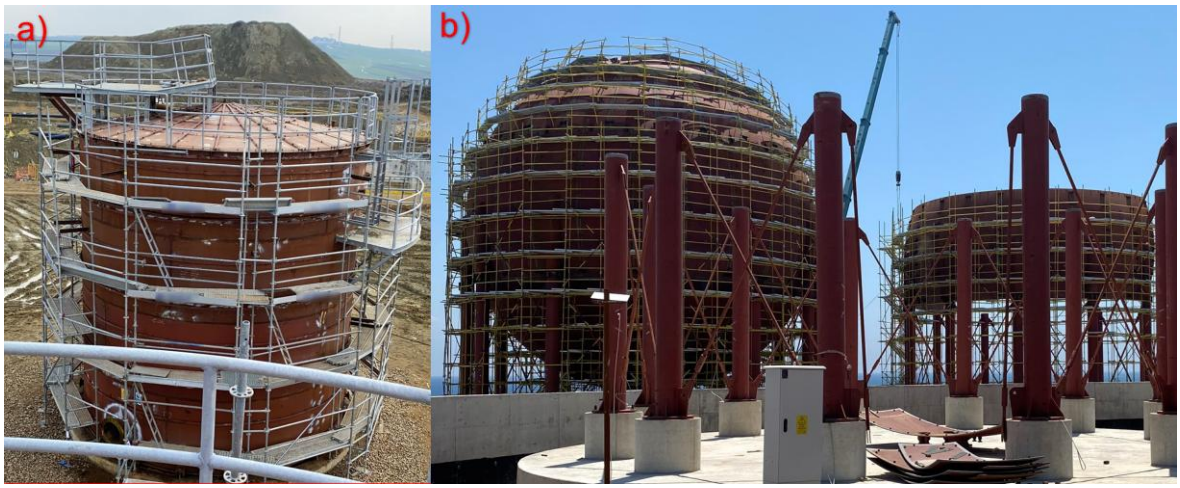
Kısaltmalar	**Açıklama**
SA_{V1}	Düşey ivme spektrumunun T = 1.0 s periyoduna karşılık gelen değeri
T	Doğal titreşim periyodu [s]
t	Taban plakası kalınlığı
t_w, t_u	Tank duvarı kalınlığı
T_A, T_B, T_0, T_S	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodları [s]
T_c	Devinimsel titreşim modu periyodu
T_i	Darbesel titreşim modu periyodu
T_L	Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]
T_{SV}	Düşey ivme spektrumu köşe periyodu
V	Tavandan duvarlara aktarılan toplam kesme kuvveti
V_c	Tankın ve içindekilerin etkin ağırlığından kaynaklanan devinimsel bileşenine bağlı tasarım taban kesme yükü
V_d	Duvarların alt seviyesine etkiyen toplam kesme kuvveti
V_i	Tankın ve içindekilerin etkin ağırlığından kaynaklanan darbesel bileşenine bağlı tasarım taban kesme yükü
V_{s30}	Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı [m/s]
w_a	Dairesel bölgede yükselmeye karşı koyan kuvvet
w_{int}	Birim çevresel uzunluk başına tasarım basıncına bağlı olarak hesaplanan tasarım kaldırma yükü
w_{rs}	Çatı dengelenmiş tasarım kar yükünün %10'u dahil olmak üzere gövdeye etkiyen çatı yükü
w_t	Birim çevresel uzunluk için tank duvarı ağırlığı
W_c	Devinimsel titreşim modu etkili ağırlığı
W_{eff}	Sismik davranışa katkıda bulunan etkin ağırlık
W_f	Tank tabanının ağırlığı
W_i	Darbesel titreşim modu etkili ağırlığı
W_r	Çatının ağırlığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
W_s	Tank gövdesi ve ek parçalarının toplam ağırlığı
W_p	Depo içeriğinin toplam ağırlığı
Y	Değeri sıvı yüzeyinden analiz noktasına olan mesafedir (pozitif aşağı).
γ_l	Sıvı yoğunluğu
$\phi_{1,YF}$	Yakın fay katsayısı
ρ, G	Depolanan sıvının kütle yoğunluğu
ρ_w	Duvar malzemesi kütle yoğunluğu
σ_T	Duvardaki toplam birleşik çevresel (hoop) gerilme
σ_h	Duvardaki hidrostatik çevresel (hoop) gerilimi
σ_s	Depolanan sıvının darbesel ve devinimsel kuvvetleri nedeniyle duvardaki çevresel (hoop) gerilimi
ξ	Sönüm oranı
ξ_i	Darbesel titreşim modu sönüm oranı
η_ξ	Sönüm oranı katsayısı
$()_c$	Darbesel titreşim modunu belirten alt indis
$()_i$	Devinimsel titreşim modunu belirten alt indis
$()_r$	Referans durumu belirten alt indis

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Sıvı depolama tankları, endüstriyel ve sanayi tesislerinde; başta petrol ve türevleri, kimyasal maddeler, sıvılaştırılmış doğalgaz, su temini ve yangın söndürme sistemleri olmak üzere çeşitli sıvıların depolanmasında kullanılan önemli yapılardır. Sıvı depolama tankları, yapı ve işlevsel özelliklerine göre çeşitli tiplere ayrılmaktadır. Tanklar, genellikle düşey veya yatay olarak konumlandırılmış silindirik (Şekil 1.1-a) ve küresel (Şekil 1.1-b) formlarda üretilmekle birlikte, bazı özel uygulamalarda dikdörtgen kesitli, eliptik gibi farklı geometrik şekillerde de yapılmaktadır. Sıvı depolama tankları içerisinde en yaygın olarak karşılaşılan tip sabit tavanlı tanklardır. Sabit tavanlı tanklar, genellikle içerdiği sıvıyı dış etkenlerden korumak ve buharlaşmayı minimuma indirmek amacıyla tercih edilir. Bu tip tanklar konik kubbe veya düz çatı formunda tasarlanırlar. Sıvı depolama tankları içinde bir diğer tip ise yüzer tavanlı tanklardır. Bu tip tanklarda, çatı yapısı sıvı yüzeyine paralel hareket edecek şekilde tasarlanır. Özellikle buharlaşma miktarı yüksek ve uçucu sıvıların depolanmasında kullanılırlar. Buhar kaybını ve çevresel etkileri azaltma açısından önemli avantaj sağlarlar. Yüzer tavanlı tanklar, açık ve kapalı tip olmak üzere ikiye ayrılır: Açık tipte yalnızca sıvı üzerinde yüzen bir çatı bulunurken, kapalı tipte ise hem yüzen hem de sabit bir tavan bulunur. Basınçlı küresel tanklar da basınca dayanıklı olarak üretilen ve sıvılaştırılmış ürünlerde (LPG vb.) tercih edilen tank tiplerindendir. Depolanan sıvının fiziksel ve kimyasal özellikleri, güvenlik düzeyi ve çevresel koşullar birlikte değerlendirilerek, ihtiyaçlara en uygun tank türü seçilmektedir.



Şekil 1.1. İnşaat aşamasında olan (a) düşey silindirik tank ve (b) küresel tank yapıları

Sıvı depolama tanklarının tasarımı ve güvenliği gerek normal işletme koşullarında gerekse deprem gibi olağanüstü yük koşullarında, kritik bir öneme sahiptir. Deprem tehlikesi yüksek bölgelerde yer alan sıvı depolama tanklarının deprem etkisi altındaki davranışının doğru şekilde öngörülmesi hem çevresel felaketlerin hem de ekonomik kayıpların önüne geçilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Deprem etkisiyle oluşacak yapısal hasarlar, tanklarda depolanan sıvının özelliklerine bağlı olarak ciddi çevresel zararlara (Bkz. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3) neden olabilmektedir. Stratejik yakıtlar ve yangın söndürme suyu gibi acil durumlarda ihtiyaç duyulan içeriklerin depolandığı tankların, deprem sonrasında işlevselliğini koruması hayati öneme sahiptir. Bu nedenle tankların deprem davranışları hakkında araştırmalar ve yönetmelikler hazırlanması gerekliliği doğmuştur.



Şekil 1.2. Kocaeli Depremi (17 Ağustos 1999) sonrası hasar gören tanklar (Girgin, S. 2011)



Şekil 1.3. Kocaeli Depremi (17 Ağustos 1999) sonrası hasar gören tanklar. Tüm tanklar kolonlar üzerinde taşınmaktadır. (Scawthorn, C., ve Johnson, G. S. 2000)

Sıvı depolama tanklarının deprem analizi; tank geometrisi, zemin koşulları ve depolanan sıvının dinamik etkileri gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak karmaşık bir mühendislik problemidir. Bu nedenle, farklı ülkelerde ve bölgelerde, deprem etkilerine karşı sıvı depolama tanklarının tasarımını düzenleyen çeşitli yönetmelikler geliştirilmiştir. Bu kapsamda, uluslararası alanda yaygın olarak kullanılan API-650 standardı ile Türkiye'de yürürlükte olan Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY), çelik sıvı depolama tanklarının deprem yükleri altında tasarımına ilişkin farklı yaklaşım ve gereklilikler ortaya koymaktadır.

Her ne kadar Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY) 2021 yılında yürürlüğe girmiş olsa da ülkemizde çelik sıvı depolama tanklarının tasarım ve uygulama süreçlerinde ağırlıklı olarak American Petroleum Institute tarafından yayımlanan API-650 standardı esas alınmaktadır. Uzun yıllardır uluslararası alanda kabul gören API-650 standardı, hem mühendislik uygulamalarında bir referans niteliğinde olup hem de tasarım, imalat ve montaj süreçlerinde sektörün temel dayanağını oluşturmaktadır. TBHSSDTDY'nin yürürlüğe girmesiyle birlikte deprem güvenliğine ilişkin ulusal standartlar belirlenmiş olsa da sektördeki uygulamaların büyük çoğunluğunun halen API-650 standartlarına göre gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu durum, uygulayıcıların ve tasarımcıların API 650'nin getirdiği kriterlere aşinalığı ve uluslararası projelerdeki uyumluluk gereksinimleriyle de yakından ilişkilidir.

Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY), bazı hesaplamalarında ve genel prensiplerinde Eurocode 8 Bölüm 4 (Silos, Tanks and Pipelines) standardını referans almıştır. Bununla birlikte, yönetmeliğin ana hesap yöntemleri, deprem yüklerinin belirlenmesi ve spektral ivme değerlerinin tanımlanması gibi temel konular, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile uyumlu olarak hazırlanmıştır. Sadece sismik yer değiştirme, tankların titreşim modları ve etkin kütle gibi belirli teknik detaylarda Eurocode 8 Bölüm 4 (EN 1998-4) den doğrudan veya dolaylı olarak yararlanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, çelik silindirik sıvı depolama tanklarının deprem tasarımına yönelik olarak API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerinde yer alan tasarım kuvvetleri ve hesaplama yaklaşımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, farklı tank

geometrileri ve zemin sınıfları dikkate alınarak, her iki yönetmeliğin deprem tasarım kuvveti hesap yaklaşımları, devrilme momenti ve taban kesme kuvveti gibi temel parametreler üzerinden incelenmiş; elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sayede, Türkiye'de yürürlükte olan yönetmelik ile uluslararası standartlar arasındaki benzerlikler ve farklılıklar ortaya konularak, mevcut uygulamalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, sıvı depolama tanklarının önemi, tipleri, deprem etkileri altındaki davranışları ve yönetmeliklerle ilgili genel bilgiler sunulmuştur.

İkinci bölümde, sıvı depolama tanklarının deprem davranışına yönelik literatürde yapılan öncü çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiş; ayrıca, ulusal ve uluslararası standartlarda yer alan hesap yaklaşımları ve tasarım prensipleri detaylandırılmıştır. Bu bölümde ayrıca, tankların deprem güvenliği ile ilgili güncel yaklaşımlar ve farklı yönetmeliklerin öngördüğü yöntemler karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde, API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerine göre sıvı depolama tanklarında deprem etkisi altında ortaya çıkan tasarım kuvvetlerinin hesaplanma yöntemleri detaylı biçimde incelenmiş ve her iki yönetmeliğin hesap yaklaşımları karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde, oluşturulan farklı geometrik özelliklere, zemin sınıflarına, fay mesafelerine ve sıvı türlerine sahip tank modellerine ait analiz sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır. Bu tez kapsamında, farklı tank geometrileri, zemin sınıfları, fay mesafeleri ve sıvı türleri dikkate alınarak yapılan tüm hesaplamalar, Microsoft Excel ortamında oluşturulan kapsamlı bir hesaplama aracı ile yapılmıştır. Hazırlanan Excel dosyasında (Bkz. Şekil 1.4 ve Şekil 1.5), her iki yönetmeliğe (API-650 ve TBHSSDTDY) ilişkin ilgili formüller, tasarım parametreleri ve kontrol adımları sistematik olarak tanımlanmıştır. Böylece, her bir parametre için hızlı, doğru ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.

Bu kapsamda, TBHSSDTDY ve API-650 yönetmeliklerine göre yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen devrilme momenti, taban kesme kuvveti ve diğer önemli tasarım parametreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her iki yönetmeliğin

öngördüğü sismik tasarım yaklaşımlarının; farklı tank geometrileri, zemin koşulları, aktif fay mesafeleri ve sıvı yoğunlukları üzerindeki etkileri, grafikler ve tablolar yardımıyla ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, hem yönetmelikler arası yaklaşım farklılıklarının ortaya konulmasına hem de belirli tasarım parametrelerinin mühendislik açısından sonuçlarının yorumlanmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca, farklı tasarım senaryoları altında tankların deprem performansına ilişkin kapsamlı bir değerlendirme yapılarak, uygulamaya yönelik öneriler sunulmuştur.

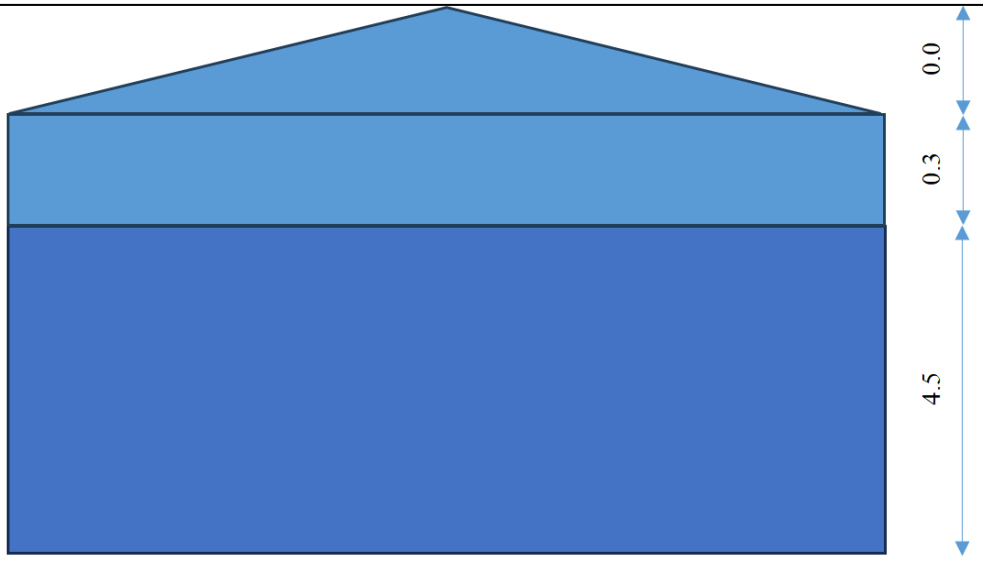
Bu çalışma kapsamında hazırlanan Excel veri giriş sayfası Şekil 1.4 ve Şekil 1.5 de sunulmuştur.

Sıvı Depolama Tankı Deprem Hesabı

Tablo 1. Tank Temel Özellikleri / *Table 1. Tank Basic Properties*

Parametre / *Parameter*	Değer / *Value*	Birim / *Unit*
Geometri / Geometry		
Sıvı Yüksekliği / *Liquid Height,* H	4.5	[m]
Tank Çapı / *Tank Diameter,* D	30	[m]
Sıvı Hacmi / *Liquid Volume*	3181	[m³]
Duvar Yüksekliği / *Steel Wall Height* H_w	4.8	[m]
Çatı Tepe Noktası Yüksekliği / Roof Peak Height	4.8	[m]
Duvar Eşdeğer Kalınlığı / *Steel Wall Equivalent Thickness,* t_w [TBHSSDTDY] / t_u [API-650]	17.0	[mm]
Taban Plakası Kalınlığı / Steel Annular Plate Thickness, t_{ap}	17.0	[mm]
Tank Tavan Kalınlığı / *Tank Steel Roof Thickness,* t_r	0.0	[mm]
Sabitleme Bağlantı Mesafesi / *Fixing Connection Distance*	100	[mm]
Hesap Özellikleri / *Calculation Characteristics*		
Tank Tasarım Sınıfı [TBHSSDTDY]	II	[-]
Sismik Kullanım Sınıfı [API-650]	II	[-]
Malzeme Özellikleri , *Metarial Properties*		
Duvar Elastisite Modülü, E	200	[GPA]
Duvar Kütle Yoğunluğu / *Wall Density of Mass,* ρ_w	7.85	[t/m³]
Sıvı Kütle Yoğunluğu / *Liquid Density of Mass,* ρ	0.8	[t/m³]
Sabitleme elemanı süneklik kapasitesine göre belirlenen katsayıdır (Sünek α_s=0 ve gevrek α_s=1)	0	

Şekil 1.4. Microsoft Excel hesaplama aracı veri giriş sayfası-1



Tank Geometrisi: Genel Görünüm
Tank Geometry: General View

Tablo 2. Saha Özellikleri / *Table 2. Site Information*

Zemin Ortalama Kayma Dalgası Hızı / *Ground Average Shear Wave Velocity*	1600	[m/s]
Yerel Zemin Sınıfı / *Local Soil Class*	ZA	-
En Yakın Faya Olan Mesafe L_f / *Distance to the Nearest Fault*	30	[km]

Hesap Spektral İvmeleri

Tablo 3. Saha için deprem tehlikesi haritası ivme, hız değerleri ve performans hedefleri

Tehlikesi Düzeyi	S_s[g]	S_1[g]	PGA[g]	PGV[g]	Performans Hedefi
DD-1 (2475 yıl)	1.579	0.41	0.646	41.134	
DD-2 (475 yıl)	0.702	0.186	0.298	17.928	Kontrollü Hasar
DD-3 (72 yıl)	0.224	0.071	0.098	6.376	Kesintisiz Kullanım

Şekil 1.5. Microsoft Excel hesaplama aracı veri giriş sayfası-2

Beşinci bölümde, önceki bölümde elde edilen bulgular ışığında, API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerinin farklı geometrik ve yapısal özelliklere sahip tanklar üzerindeki sismik tasarım yaklaşımları kapsamlı olarak değerlendirilmiş ve genel sonuçlar ortaya konmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tankların içerdiği sıvıların yaratacağı dinamik etkinin incelenmesi amaçlı öncü çalışmalar Jacobsen (1949), Graham ve Rodriguez (1952) ve Housner (1957) tarafından yapılan araştırmalardır. Sıvı depolama tankları ile ilgili bu araştırmalarda tank içerisindeki sıvının, tank cidarı üzerine uyguladığı dinamik etkiler incelemiştir.

Jacobsen, L. S. (1949) çalışması; sıvı depolama tanklarının sismik davranışı üzerine yapılan en eski araştırmaların başında gelmekte olup bu alandaki araştırmalara günümüze kadar öncülük etmiştir. Bu çalışmada, deprem sırasında sıvının ve tankın etkileşimi incelenmiş ve sıvının serbest yüzey dalgalanmalarının (çalkalanma) yapıya etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, sıvı-tank etkileşimi incelenmiş deprem sırasında sıvının hareketi ve tank duvarlarına uyguladığı kuvvetler ele alınmıştır. Sıvının yüzeyinde oluşan dalgalanmaları (çalkalanma) etkisi ile tankın deprem durumunda nasıl davranacağına dair önemli yaklaşımlarda bulunulmuştur. Başlıca API-650 ve günümüzdeki diğer ulusal yönetmeliklerde yer alan darbesel (tank ile hareket eden) ve devinimsel (bağımsız dalgalanan) sıvı bileşenleri kavramlarının gelişmesin de önemli katkı sağlamıştır.

Graham ve Rodriguez (1952) çalışmasında uçaklarda bulunan sıvı yakıt depolama tanklarının uçağın hareket halindeki davranışı üzerinedir. Bu çalışmada yakıtın basit harmonik hareketlere dinamik davranışı dikdörtgen bir tank üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, dikdörtgen bir tank içindeki yakıtın, ötelenme, yunuslama (pitching) ve yalpalama (yawing) gibi basit harmonik hareketlere verdiği tepki araştırılmıştır. Dinamik analizlerde yakıt hareketlerini yay-kütle sistemleriyle temsil etmek çoğu durumda mümkün olup bu sistemler, tankın açısal hareketlerini de doğru şekilde yansıtmaktadır. Birden fazla tank hareketi aynı anda dikkate alındığında, bu eşdeğer sistemler karmaşık hale gelmekte amaca yönelik olmamaktadır. Dinamik analizlerinde Laplace dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tür bir yaklaşım sıvı davranışını önemli ölçüde basitleştirdiğinden, daha fazla araştırılması önerilmiştir.

Housner (1957), depreme maruz kalan rijit, dikdörtgen ve silindirik tanklardaki sıvı tepkisini hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir model geliştirmiştir. Bu modelde, sıvının hidrodinamik basıncı; tankla birlikte ivmelenen sıvının oluşturduğu darbesel (impulsive) basınç ve tank içinde dalgalanan sıvının neden olduğu devinimsel (convective) basınç olarak iki bileşene ayrılmıştır. Housner (1957), darbesel, devinimsel kütlelerin yanı sıra, bu kütlelerin tank tabanına göre yüksekliklerini hesaplamak için temel formüller sunmuştur. Çalışmada, bu iki bileşenin etkilerini matematiksel olarak modellemiş ve basınç dağılımlarının kabın geometrisi ve ivmelenmesine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu formüller, birçok sonraki çalışmanın temelini oluşturmuştur. Niigata (1964) ve Alaska (1977) depremleri sonrası yapılan çalışmalar, Housner (1957)'in modelinin önemli bir temel oluşturduğunu ancak sıvı-yapı etkileşiminin daha karmaşık olduğunu göstermiştir.

Niigata (1964) ve Alaska (1977) depremlerini takiben, sıvı depolama tanklarında çok çeşitli hasar türleri ve yapısal göçme tipleri gözlemlenmiştir. Bu depremlerden sonra sıvı depolama tankları deprem etkisinin incelenmesi açısından önemli çalışmalardan biri de Haroun ve Housner (1981) çalışmasıdır. Bu çalışmada silindirik sıvı depolama tanklarının deprem davranışını tanımlamak için basit ve davranış açısından oldukça yakınsayan bir yöntem sunulmuştur. Tank duvarının deformasyonunu dikkate alan hesap modeli, sıvı-kabuk etkileşimi üzerine yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarına dayanmaktadır. Modelin parametreleri, etkin kütleler, kütle merkezleri ve titreşim periyotlarının hesaplanmasını kolaylaştıran çizelgelerle gösterilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliği, detaylı sayısal örneklerle açıklanmış ve tepki spektrumu kullanılarak maksimum deprem etkileri üzerinde çalışılmıştır. Sonuçlar, yöntemi doğrulamak için yapılan kesin çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Veletsos (1974), sıvı dolu tanklarda meydana gelen hidrodinamik kuvvetlerin değerlendirilmesine yönelik basit bir analiz yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada dairesel kesitli, sıvı dolu silindirik tanklarda, depremin yatay bileşeni nedeniyle oluşan dinamik kuvvetleri hesaplamak için basit bir yöntem sunulmuştur. Bu Yöntem, tank esnekliğinin etkilerini dikkate alarak yalnızca darbesel (impulsive) etkileri incelemiştir. Çalışmada, sistemin etkin kütleleri, hidrodinamik kuvvetlerin büyüklükleri ve dağılımları ile bu kuvvetlerin neden olduğu taban kesme kuvveti ve momenti çeşitli titreşim modları için değerlendirilmiş ve tasarım uygulamaları için özetlenmiştir. Sünek tanklarda deprem

etkilerin daha rijit tanklara göre çok daha fazla olabileceği belirlenmiştir. Çalışma, Housner'in (1957) rijit tanklar için geliştirdiği deprem analiz yönteminin ötesine geçerek tank sünekliğinin etkilerini de dikkate alan bir yöntem sunmuştur. Çalışmada belirtildiği üzere sadece darbesel (impulsive) etkiler göz önüne alınmış, çalkalanma durumu ile ilişkili devinimsel (convective) etkiler çalışma kapsamı dışındadır. Devinimsel etkilerin daha uzun periyotlarda belirleyici olması nedeniyle, bu etkilerin tank sünekliğinden önemli ölçüde etkilenmeyeceğinden ve rijit tanklar için geçerli yöntemlerle hesaplanabileceği sonucu elde edilmiştir.

Niwa ve Clough (1982) çalışması, 1980 Livermore depreminde hasar gören silindirik sıvı depolama tanklarının davranışını laboratuvar ortamında inceleyerek, özellikle uplift (temelden kalkma) serbestliğine sahip tankların deprem sırasında burkulma riski altında olduğunu göstermiştir. 9.5 ft. çapında ve 20 ft. yüksekliğindeki test tankına 0.95 g'ye kadar sarsma ivmeleri uygulanmış ve gerçek depremde gözlemlenen burkulma modları başarıyla yeniden üretilmiştir. Gözlemler, tank cidarında oluşan eksenel basınç gerilmelerinin API 650 gibi tipik tasarım standartlarının öngördüğü değerlerden çok daha yüksek olduğunu ortaya koymuş; bu da özellikle temelden kalkma serbestliğine sahip tanklarda, geleneksel elastik analizlerin yetersiz kaldığını ve burkulma davranışının dikkate alınmadığını göstermiştir. Sonuç olarak, API 650 tasarımlarında zemin-tank etkileşimi, lokal stabilite ve nonlinear analizlerin göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.

Peek ve Jennings (1988) ankrajsız tankların basitleştirilmiş analizi çalışmasında; tanklarının sismik davranışında, tank duvarında meydana gelen yerel kalkma (uplift) davranışı, en kritik ve belirleyici etkenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ankrajsız tanklarda, devrilme momentlerine karşı dengeleyici unsur, taban levhasında yükselen bölgedeki sıvı ağırlığının oluşturduğu kuvvettir. Yapılan çalışmalarda, rijit olmayan taban-dış duvar birleşimlerinde yüksek çevresel basınç gerilmelerinin oluştuğu, bu gerilmelerin ise yerel burkulma ve stabilite sorunlarına yol açabildiği gösterilmiştir. Elde edilen maksimum düşey basınç gerilmeleri ile deneysel veriler uyumlu olduğu; ancak mevcut tasarım standartlarında önerilen hesap yöntemlerinin bazı durumlarda bu gerilmeleri olduğundan fazla veya daha az öngördüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak, ankrajsız tankların sismik tasarımında, taban kalkması, yerel burkulma ve duvarın akma sınırlarının daha güvenilir ve gerçekçi yöntemlerle dikkate alınmasının gerekliliği vurgulanmaktadır.

Standartlarda sadeleştirilmiş analiz yöntemlerinin yer alması ve bu yöntemlerin deneysel verilerle doğrulanması gereği ortaya konmaktadır.

Veletsos ve Tang (1990) çalışması, sıvı içeren, düşey silindirik tankların yatay deprem hareketi altındaki davranışına zemin-yapı etkileşiminin etkilerini kapsamlı biçimde incelemektedir. Analizlerde hem sıvının darbesel (impulsive) hem de devinimsel (convective) etkileri değerlendirilmiş; tankın yatay hareketleriyle temel rijitliğinin ve zemin özelliklerinin etkileşimi detaylı olarak ele alınmıştır. Katı tabanlı ve rijit tank modelleri için bilinen mekanik modeller, tank ve zemin rijitliği ile temel dönmesi gibi etkileri de kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Geniş bir tank geometri ve zemin rijitliği aralığında harmonik ve sismik yüklemeler altında kritik yanıtlar analiz edilmiş ve sonuçlar mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek pratik şekilde sunulmuştur. Çalışmada ayrıca, temel parametrelerin etkilerinin el hesaplarıyla kolayca değerlendirilebileceği yaklaşık bir yöntem de önerilmiş, bu yöntemde zemin-yapı etkileşimi, tank-sıvı sisteminin doğal frekansı ve sönüm oranında yapılan düzeltmelerle hesaba katılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, yapı-zemin etkileşimi tank darbesel bileşenlerinde önemli azalmalar sağlarken, devinimsel bileşenler üzerinde ihmal edilebilir düzeyde bir etkiye sahiptir.

Malhotra (1995) çalışmasında, deprem etkisi altında ankrajsız sıvı depolama tanklarının taban plakalarında meydana gelen kaldırma (uplift) davranışının analizine yönelik yaklaşık bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, taban plakası yarı sonsuz kiriş olarak modellenmekte ve temeldeki doğrusal olmayan temas bölgeleri, membran etkisi ve plastik şekil değiştirmeler dikkate alınmaktadır. Parametrik çalışmalar, temel rijitliğinin azalmasıyla birlikte, daha esnek temele oturan tanklarda, rijit temele sahip tanklara göre taban plakasında oluşan kalkma, taban plakasındaki dönme, temel içerisine gömülme (penetrasyon) ve tank cidarında ortaya çıkan çevresel (hoop) basınç gerilmelerinin belirgin şekilde arttığını; buna karşın eksenel basınç gerilmelerinin azaldığını göstermiştir. Taban plakası ve temel arasındaki radyal ayrılma ile cidarda oluşan kayma kuvvetinin, temel rijitliğindeki değişimlerden önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür. Bu çalışma, literatürde, tanklarda meydana gelen deprem kaynaklı kaldırma etkilerinin hızlı ve pratik şekilde analiz edilmesi için etkili ve güvenilir bir yöntem sunmaktadır.

Malhotra vd., (2000) tarafından geliştirilen çalışmada, silindirik sıvı depolama tanklarının deprem etkisi altındaki davranışlarının analizi için pratik ve basitleştirilmiş bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yaklaşımda, sıvı ve tank etkileşimi impulsive ve convective olmak üzere iki temel titreşim modunda ele alınmış, her bir mod için eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemler oluşturularak deprem yüklerinin tank duvarı üzerindeki etkileri analitik olarak değerlendirilmiştir. Yöntem, tank geometrisi ve sıvı özellikleri göz önüne alınarak parametrik formüller aracılığıyla mühendislerin karmaşık sayısal analizlere ihtiyaç duymadan hızlı ve güvenilir sonuçlar elde etmesini sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemin mevcut uluslararası sismik tasarım yönetmeliği Eurocode 8 Bölüm 4 (EN 1998-4) ile uyumlu olduğu ve mühendislik uygulamalarında etkin biçimde kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Livaoğlu ve Doğangün (2006) tarafından yapılan çalışmada, yükseltilmiş betonarme tankların sismik tasarımında kullanılan farklı modelleme yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Darbesel (impulsive) titreşim modu, yükseltilmiş tankların sismik davranışında belirleyici rol oynamaktadır. Devinimsel (convective) modlara ait periyotlar ise zemin-yapı etkileşiminden büyük ölçüde etkilenmemektedir. Zemin sınıfı D ve E gibi zemin koşullarında, taban kesme kuvveti ve devrilme momenti değerleri üç katına kadar artabilmektedir. Dolayısıyla, saha araştırması yapılmaksızın rijit veya kaya zemin kabulüyle yapılan tasarımlar, deprem etkilerinin yanlış değerlendirilmesine ve güvenli olmayan sonuçlara yol açabilmektedir. Sıvı-kütle etkileşiminin dikkate alındığı sonlu eleman modellerinde ise, özellikle zayıf zeminlerde önemli farklar ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, tek serbestlik dereceli modellerin, taban kesme kuvveti ve devrilme momentinin tahmininde yetersiz kaldığı ve daha gelişmiş modelleme yaklaşımlarının tercih edilmesi gerektiği sonucu elde edilmiştir.

Cho (2007) yaptığı çalışmada; sıvı ile yapı arasındaki etkileşim ve serbest yüzeydeki çalkalanma etkileri zamana bağlı olarak modellenmiş, yapısal elemanlar için sonlu elemanlar, sıvı için ise sınır elemanlar kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemle elde edilen bulgularının literatürde yayımlanan sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir. Özellikle, radyal deplasmanlar, devrilme momenti ve taban kesme kuvveti açısından yöntem başarılı bulunmuştur. Ayrıca, çalkalanma yüksekliği (sloshing) analizlerinde Haroun'un yalnızca bir mod içeren yaklaşımına göre çok daha

yüksek değerler elde edilmiş, doğru bir değerlendirme için yeterli sayıda çalkalanma modu dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Ozdemir vd., (2010), ankrajlı ve ankrajsız çelik sıvı depolama tanklarının deprem etkisi altındaki davranışının değerlendirilmesi için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı, doğrusal olmayan bir sıvı-yapı etkileşim algoritması kullanılmıştır. Modellemede, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yöntemiyle sıvı-tank etkileşimi dikkate alınmış, tank tabanının zeminle teması ve sürtünme etkileri ise gelişmiş algoritmalarıyla modellenmiştir. Deneysel olarak incelenmiş tank modelleri ile yapılan doğrulama çalışmasında; dalga yüksekliği, taban kalkması ve tank cidarı gerilmeleri gibi parametrelerin sayısal analizlerle yüksek uyum gösterdiği belirlenmiştir. Mevcut sismik tasarım yönetmeliklerinin (API-650 ve Eurocode 8) öngörüleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve standart hükümlerinin, özellikle taban kalkması ve serbest yüzey dalga yüksekliği gibi kritik sonuçlarda deneysel verilere kıyasla sapmalar gösterebildiği ortaya konmuştur. Çalışma bulgularına göre, mevcut yönetmeliklerin serbest yüzey yer değiştirmesini fazla tahmin ettiği ve bu sayede tank çatısı ile ilgili hasarların ve sıvı taşmasının önlenmesi için daha güvenli bir yaklaşım sunduğu görülmüştür. Ancak, sayısal analizler dalga yüksekliği ve formunda deneysel sonuçlarla tam uyum sağlamıştır. Ayrıca, impulsive ve convective (çalkalanma) davranışların hâkim olduğu kısa ve uzun periyot bölgelerinde kullanılan yer hareketinin spektrumunun yönetmelik spektrumuyla uyumlu olması gerektiği belirtilmiştir. Bağlantı koşullarına (ankrajlı/ankrajsız) göre taban kalkmasının etkisi ile oluşan devrilme momentlerinin de farklılık gösterdiği, ankrajsız tanklarda taban kalkmasının basınç değerini artırdığı gözlenmiştir. Eurocode 8 Bölüm 4 (EN 1998-4) kapsamındaki bazı grafiklerin mevcut tank boyutlarını ve davranışlarını kapsamakta yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Çalışma sonunda, sonlu elemanlar yönteminin hem ankrajlı hem de ankrajsız tankların sismik analizinde güvenilir bir araç olduğu ve yönetmeliklerin ötesinde, gerçekçi mühendislik değerlendirmeleri için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Spritzer vd., (2017) çalışmasında, yatay deprem kuvvetlerine maruz kalan silindirik sıvı depolama tanklarının malzeme özelliklerinin ve de geometri deformasyonlarının doğrusal olmayan özellikleri de dahil edilerek, sonlu eleman (FEM) modelleri yöntemiyle sayısal bir çalışma yapılmıştır. Zemin-yapı etkileşimleri, sert bir zemini temsilen elastik yay kullanılarak sonlu eleman modellerine yansıtılmıştır. Hidrodinamik etkiden dolayı oluşan

dairesel gerilmelerde, fil ayağı burkulması (Elephant foot buckling) ve yukarı kalkma, 0,4 ile 2,0 arasında yükseklik/ yarıçap oranlarına veya en-boy oranlarına sahip tanklar için ölçülmüştür. Sonlu elemanlar modelleri, API-650 Ek E hükümleriyle karşılaştırılmış ve ankraj oranı, J'ye özel bir dikkat gösterilmiştir. Sonuçlar, sonlu elemanlar modellerinin daha karmaşık olmasına rağmen, toplam gerilmelerin API-650'deki teorik ve ampirik denklemlerle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. API-650'nin hesapladığı taban kalkma miktarları ile sonlu eleman (FEM) sonuçları genel olarak birbirine yakın çıkmasına rağmen, tank geometrisi ve kabuk rijitliği hesaba katılmadığı için bazı farklılıklar tespit edilmiştir. Taban kalkması yaşayan ancak stabil olan tankların davranışı beklenmedik şekilde değişkenlik göstermiştir, J = 0.785 - 1.54 aralığında daha fazla geometrinin araştırılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Çalışma, API650'nin mühendislik uygulamalarında güvenilir ve pratik bir yöntem sunduğunu ancak belirli koşullarda bazı ek parametrelerin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Türkiye'de geçerli olan deprem yönetmeliklerine yönelik Erkmen (2022) yaptığı çalışmada Türkiye'nin yüksek depremselliğe sahip Kocaeli bölgesinde bulunan sıvı pentan depolama tanklarının deprem yükleri altında davranışını, 12 farklı yer hareketi kaydı kullanılarak gerçekleştirilen 3D doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleriyle, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ve API-650 standartlarına göre incelemektedir. Mevcut tanklar, betonarme temel üzerinde serbest kayma yapacak şekilde tasarlanmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan (nonlinear) zaman tanım alanı analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, tank-temel etkileşimi, tank tabanının kalkması ve temel üzerinde kayma gibi dinamik etkileri içermektedir. Zaman tanım alanı analizleri sonucunda, seçilen 12 yer hareketinden 5'inde tankların devrilme nedeniyle yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Güçlendirme çözümü olarak, sahada kaynak gerektirmeyen ve kolay monte edilebilen iki parçalı prefabrik çelik kelepçe (split sleeve) kullanımı önerilmiştir. Güçlendirme sonrasında tankların deprem yükleri altında performansı önemli ölçüde iyileşmiş ve devrilme riski ortadan kalkmıştır. Sıvı depolama tanklarının betonarme temellerine ankraj yapılmasına yönelik pratik bir güçlendirme önerisi sunulmaktadır.

Erkmen (2024) çalışmasında Türkiye'de mevcut sıvı depolama tanklarının deprem performansı hakkında bilgiler sunmaktadır. İncelenen tanklardan biri zemine doğrudan temele oturan bir tank olup 44 yıl, diğeri incelenen tank ise betonarme temele mekanik olarak

ankrajlı olup 50 yıldır hizmet vermektedir. Tankların deprem performansı, her bir tank sahasına ölçeklendirilmiş 11 farklı yer hareketi kullanılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri yapılmıştır. Çalışmada, sıvı içeriği API-650 standardına göre modele dahil edilmiştir. Tankların taban kalkması, temel üzerinde kayma, gövde ve taban plakası hasarı ile ankraj gereksinimleri belirlenmiştir. Sonuçlara göre, ankrajsız tankın taban kalkması ve kayma miktarı izin verilen sınırları aşarken, mekanik olarak ankrajlı tankın genel deprem performansı kabul edilebilir düzeydedir ancak ankrajlarda deprem sonrası hasar olma olasılığı bulunmaktadır. Tanklar için 11 farklı yer hareketi kullanılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre; ankrajsız tank, 92 cm'ye kadar kayma yaparak stabilite açısından büyük bir göçme riski taşımaktadır. Tankın devrilme momenti, tasarımda öngörülen değerin %80'i olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, mekanik ankrajlı tankın daha iyi deprem performansı gösterdiği, ancak ankraj sisteminin deprem sonrası değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Saka vd., (2024) yaptıkları çalışmada, 2023 yılı Pazarcık/Kahramanmaraş (7.7 Mw) ve Elbistan/Kahramanmaraş'ta (7.6 Mw) oluşan iki büyük deprem nedeniyle sıvı depolama tanklarının deprem performansını ele almış ve orta derecede hasar görmüş, bir tankın incelenmesini içermektedir. Tipik hasar türleri arasında çalkalanmadan kaynaklanan üst tank duvarı deformasyonları, tabanın kayması ve kalkması ile tank-boru bağlantılarında meydana gelen yırtılmalar bulunmaktadır. Kaymaya yatkın tankların hasara karşı daha az etkilendiği gözlemlenmiştir. Temele doğrudan ankrajı bulunmayan bir tankın kayma ve kalkma tepkileri arasındaki etkileşim, farklı sürtünme katsayıları dikkate alınarak incelenmiştir. Sonuçlar, kayma etkisinin tank duvarı gerilmelerini önemli ölçüde azaltabileceğini ortaya koymuştur.

Munoz vd., (2024) çalışmasında, yaygın olarak kullanılan ankrajsız çelik depolama tankları, özellikle büyük depremler ile çeşitli göçme ve hasar mekanizmalarına karşı hassas yapılardır. Literatürde, farklı narinlik oranlarına (slenderness ratio) sahip dört çelik tank üzerinde gerçekleştirilen pushover tabanlı sismik performans değerlendirmelerinde, tank duvarındaki eksenel basınç gerilmesi ile geometrik kusurların fil ayağı burkulması (elephant-foot buckling) üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Özellikle, alt çevre bölgesinde uygulanan geometrik kusurlar, fil ayağı burkulması üzerindeki maksimum etkiyi değerlendirmek amacıyla modele dahil edilmiştir. Analiz sonuçlarında; narinlik oranı

ve geometrik kusurların artmasıyla birlikte, tank duvarında gelişen eksenel basınç gerilmesinin belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle yüksek narinliğe sahip (dar ve yüksek) tanklarda, taban levhasının deprem sırasında temelden ayrılması (uplift) mekanizmasıyla birleşerek fil ayağı burkulmasını neden olmaktadır. Düşük narinlik oranına sahip (geniş ve kısa) tanklarda ise, hidrodinamik basınç kaynaklı çevresel (hoop) gerilmelerin çelik malzemenin akma sınırına ulaşmasında daha belirleyici olduğu saptanmıştır. Pushover analizlerinin özellikle taban kalkmasının etkili olduğu narin tanklarda eksenel basınç gerilmelerini ve dolayısıyla fil ayağı burkulması için gerekli sismik gereksinimin olduğundan düşük belirleyebilmektedir. Basitleştirilmiş hesap yöntemlerinin yalnızca geniş ve rijit tanklar için uygun olabileceği; buna karşılık narin ve esnek tankların doğrusal olmayan deprem davranışının ve fil ayağı burkulması riskinin güvenilir biçimde değerlendirilmesi için gelişmiş sayısal analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Chiappelloni vd., (2025) çalışmasında ince cidarlı sıvı depolama tanklarının sismik kapasite değerlendirmesi kapsamında, hidrodinamik yüklerin uygun şekilde modellenmesinin gerekliliğine dikkat çekmektedir. Literatürde, tankın şekil değiştirme kapasitesinin olması nedeniyle oluşan hidrodinamik basınç katkısının analitik olarak hesaplanamayacağı belirtilmiştir. Bu çalışmada önerilen yaklaşımda, akustik-yapısal modal analiz yöntemi kullanılarak, bu katkının hesaplanmasında gereken deformasyon ve titreşim periyodu elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen analizler, cidar kalınlığı değişkenliği ve daha karmaşık geometrik detayların modal analize dahil edilmesine olanak sağlamıştır. Çalışmada, mevcut bir tankın modellenip analiz edilmesi sonucunda, deprem sonrası gözlemlenen gerçek hasar türleriyle uyumlu bulgular elde edilmiştir. Güncel standartlarda da önerildiği üzere, doğrusal olmayan statik analizlerin (pushover) kullanımı ile hem analiz süresi önemli ölçüde azaltılmakta hem de yapı davranışına ilişkin kapasite eğrisi elde edilerek, doğrusal olmayan davranışlar pratik şekilde modellenebilmektedir. Böylece, sistemin rijitliği ve göçme sonrası davranışı temsil edilebilmekte ve basitleştirilmiş modeller yardımıyla sismik performansın güvenilir şekilde değerlendirilmesi mümkün olmaktadır.

Chatterji vd., (2025) yapmış oldukları çalışmalarda sıvı-tank etkileşimini dikkate alarak tasarım yapmak karmaşık olduğundan, taban kesme ve devrilme momentlerini hesaplamak için basitleştirilmiş hesaplama yaklaşımları geliştirilmiştir, ancak basınç

dağılımları hesaplanmamıştır. Bu çalışma, mevcut standartlarda yer alan sıvı depolama tanklarının rijit ve sünek tanklar olarak sınıflandırılmasını zayıf ve eksik yönlerini ortaya koymuş ve bu tür tankların deprem yükleri ile analizi için birleşik kuvvet tabanlı bir tasarım yaklaşımı önermiştir. Bu makalede tankın rijitliğinden bağımsız olarak mesnet tepkilerini ve basınç dağılımlarını belirleyen yeni bir hesaplama yöntemi sunulmaktadır. Çalışma Eurocode 8 Bölüm 4 (EN 1998-4) temel alarak farklı tank geometrileri için hesaplama yöntemi önermektedir. Parametrik çalışma, tank duvarında oluşacak olan hidrodinamik kuvvet bileşenlerin tanımlarını inceleyerek, farklı zaman dilimlerinde çeşitli süperpozisyon kuralları uygulanırken farklı tank geometrileri için toplam taban kesme ve devrilme momentlerinin hesaplanmasında uyumsuzluklar olduğunu ortaya koymuştur.

3. MATERYAL YÖNTEM

Bu başlık altında, American Petroleum Institute Standard 650 — Welded Tanks for Oil Storage - Annex E (API-650) ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY) kapsamında, deprem etkileri altında tanklara etkiyen tasarım deprem kuvvetlerinin hesaplanma yöntemleri açıklanacak ve her iki yönetmeliğin yaklaşımı ele alınacaktır.

3.1. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'ne (TBHSSDTDY) Göre Tasarım İlkeleri ve Deprem Yüklerinin Belirlenmesi Yaklaşımı

Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliğinde (TBHSSDTDY); çelik ve betonarme sıvı depolama tanklarının deprem etkileri altında tasarımı, tank deprem performanslarının değerlendirilmesi ve gerekirse güçlendirilmesine ilişkin esasları tanımlamaktadır. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği, 07/03/2021 tarihli ve 31416 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak kanun hükmünde bir düzenleme olarak yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmelik, yalnızca yeni tasarımlarda değil, mevcut yapıların performans değerlendirmesi ve güçlendirme çalışmalarında da esas alınmaktadır.

TBHSSDTDY'de, -40°C ile +200°C aralığında sıcaklığa sahip sıvıların depolandığı, atmosferik (basınçsız) sıvı depolama tanklarının deprem yükü etkileri altında hesap yöntemleri verilmiştir. Radyoaktif maddeler, sıvılaştırılmış gazlar ve hasarlı tankların deprem güvenliği gibi bazı özel durumlar kapsam dışı bırakılmıştır. Tank taşıyıcı sistemine bağlı yapısal olmayan ekipmanların ve sıcaklık farklarından kaynaklanan gerilmelerin değerlendirilmesi de yönetmeliğe dahil edilmemiştir.

Yönetmelik kapsamında; radyoaktif maddeler ve sıvılaştırılmış gazların depolandığı tanklar, hasarlı tankların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi, yapısal olmayan ekipmanların tank ve zeminle etkileşimi ile oluşabilecek etkiler ve tank duvarı içi ve dışı

oluşabilecek sıcaklık farklarından kaynaklanan etkiler, depolanan sıvının tutuşması sonucu tank taşıyıcısında oluşacak etkiler kapsam dışında tutulmuştur.

TBHSSDTDY kapsamında, üç farklı deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmış olup bunlar DD-1, DD-2 ve DD-3 deprem yer hareketleridir. Sırasıyla 2475, 475 ve 72 yıllık tekrarlanma periyotlarına sahip olup, 50 yılda aşılma olasılıkları %2, %10 ve %50'dir.

3.1.1. Deprem Yer Hareketi Spektrumları

Deprem etkisi altındaki sıvı depolama tanklarının tasarımında dikkate alınması gereken yer hareketi parametreleri, zemin özellikleri, faya yakınlık durumu ve saha özelinde yapılacak tehlike analizleri gibi hususlar, Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (2021) kapsamında ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda; harita spektral ivme değerlerinin belirlenmesi, zemin büyütme etkilerinin dikkate alınması, spektrum parametrelerinin dönüştürülmesi, sönüm oranlarına göre düzeltme katsayılarının uygulanması ve düşey/yatay elastik tasarım spektrumlarının oluşturulması gibi konulara ilişkin hesaplama esasları yönetmelik doğrultusunda bu bölümde özetlenerek sunulmuştur.

Kritik öneme sahip sahalarda sahaya özgü bir deprem tehlike çalışmasının yapılması ve bu doğrultuda ilgili deprem yer hareketi spektrumlarının belirlenmesi zorunludur.

- Deprem tehlikesi taşıyan, aktif faylara 25 km veya kısa mesafede konumlanan sahalar.
- Deprem etkilerine karşı özel yapısal sistem (deprem yalıtımı veya enerji sönümleme sistemi) kullanılan tankların bulunduğu sahalar.
- Tank tasarım mühendisinin ve tankın işletme güvenliğinden sorumlu kurumların talebi üzerine ilgili tank için yönetmelikte tanımlanan asgari güvenlik düzeyinin üzerinde bir güvenlik düzeyi seçilerek veya başka özel koşulların dikkate alınarak tasarlanmasının talep edildiği tanklar.
- Tankın ZF zemin sınıfında bulunduğu durumlarda, yer hareketlerinin saha özelinde belirlenmesi zorunludur.

Saha özelinde oluşturulan deprem yer hareketi spektrumları, ilgili saha ve deprem düzeyi için tanımlanan tasarım spektral ivme değerlerinin %90'ından daha düşük olmamalıdır.

Harita spektral ivme değerleri için Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları https://tdth.afad.gov.tr/ (TBDY-2018) adresli internet sitesinden ulaşılmaktadır. S_S ve S_1 değerleri deprem tehlikesi haritalarından yapı koordinatına göre alınmaktadır. S_S ve S_1 sırasıyla kısa periyot ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme değerleridir; %5 sönüm oranı ve V_{S30} = 760 m/s referans zemin koşulu esas alınarak tanımlanmaktadır. S_S ve S_1, değerleri için en büyük doğrultu ektisi ve faya yakınlık etkileri katsayıları ile büyütülerek yerel zemin etkilerinden bağımsız S_S' ve S_1' değerlerine dönüştürülür.

$$S_S' = \gamma_S \, S_S \tag{3.1}$$

$$S_1' = \gamma_1 \, \varphi_{1,YF} S_1 \tag{3.2}$$

γ_S ve γ_1, S_S ve S_1 için en büyük doğrultudaki etkisini dikkate alan katsayılardır. Katsayılar, γ_S = 1.1 ve γ_1 = 1.3 olup sabit değerdedirler. $\varphi_{1,YF}$ ise S_1 için faya yakınlık katsayısıdır.

Faya yakınlık katsayısı $\varphi_{1,YF}$, aktif faya 25 km veya daha yakın uzaklıkta bulunan sıvı tankları için diri faya yakınlık etkisi katsayısı tanımlanmaktadır. Aktif fay, MTA Türkiye Diri Fay Haritası veya saha özel tehlike analizine göre tanımlanmaktadır. L_F değeri en yakın aktif fay düzlemine olan km cinsinden mesafe olup aşağıdaki denklemde tanımlanmıştır.

$$\phi_{1,YF} = \begin{cases} 1.2 & L_F \leq 15 \text{ km} \\ 1.2 - 0.02(L_F - 15) & 15 \text{ km} < L_F \leq 25 \text{ km} \\ 1.0 & 25 \text{ km} < L_F \end{cases} \tag{3.3}$$

Faya yakınlık faktörü yaklaşımı; Türkiye'de geçerli olan özel yapılara (tünel, karayolu, demiryolu, köprüler vb.) ait deprem yönetmeliklerinde faya yakınlık katsayısı adı altında yer almaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde ise böyle bir katsayı tanımı bulunmamaktadır. Geçerli şartnameler incelendiğinde, Yeni Zelanda NZS 2009 Depolama Tanklarının Sismik Tasarımı yönetmeliğinde de faya yakınlık faktörünü dikkate

alınmaktadır. İlgili yönetmelik bu bağlamda tasarımcıları, AS/NZS 1170 şartnamesine yönlendirmektedir. İlgili şartnamede yakınlık faktörü, *N (T, D) o*larak tanımlanmış en yakın ana faya 20 km'den daha az mesafede ise dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. *N (T, D)* faya yakınlık katsayısı, TBHSSDTDY den farklı bir yaklaşım ile tankın periyodu *T* ile değişen bir fonksiyondur. (AS/NZS 1170)

S_{DS} ve S_{D1} sırasıyla yatay ve düşey elastik tasarım spektrum hesabında kullanılacak kısa periyod ve T = 1.0 s için spektral ivme değerleridir. Tasarım Spektral İvmelerini elde edebilmek için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) tanımlanan yerel zemin sınıflarına göre yerel zemin etki katsayıları belirlenmektedir. Tasarım spektral ivmeleri S_{DS} ve S_{D1} Denklem (3.4) ve (3.5) ile hesaplanmaktadır. Katsayılar F_s, F_1 (TBDY-2018) Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 (TBDY-2018)'de verilmiştir.

$$S_{DS} = F_S S_S' \tag{3.4}$$

$$S_{D1} = F_1 S_1' \tag{3.5}$$

Çizelge 3.1. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı, F_s (TBDY-2018)

Yerel Zemin Sınıfı	$\boldsymbol{S_s' \leq 0.25g}$	$\boldsymbol{S_s' = 0.50g}$	$\boldsymbol{S_s' = 0.75g}$	$\boldsymbol{S_s' = 1.0g}$	$\boldsymbol{S_s' = 1.25g}$	$\boldsymbol{S_s' \geq 1.50g}$
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	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirtildiği şekilde sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Çizelge 3.2. 1 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı, F_1 (TBDY-2018)

Yerel Zemin Sınıfı	$\boldsymbol{S_1' \leq 0.10g}$	$\boldsymbol{S_1' = 0.20g}$	$\boldsymbol{S_1' = 0.30g}$	$\boldsymbol{S_1' = 0.40g}$	$\boldsymbol{S_1' = 0.50g}$	$\boldsymbol{S_1' \geq 0.60g}$
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	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirtildiği şekilde sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Farklı sönüm oranları için ve herhangi bir T periyodunda yatay elastik tasarım spektrumu, $S_{ae}(T,\xi)$ için aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenir.

$$S_{ae}(T,\xi) = \left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_A}\right) n_\xi \, S_{DS} \qquad 0 \leq T \leq T_A \tag{3.6}$$

$$S_{ae}(T,\xi) = \eta_\xi S_{DS} \qquad T_A \leq T \leq T_B \tag{3.7}$$

$$S_{ae}(T,\xi) = \eta_\xi \frac{S_{D1}}{T} \qquad T_B \leq T \leq T_L \tag{3.8}$$

$$S_{ae}(T,\xi) = \eta_\xi \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \qquad T_L \leq T \tag{3.9}$$

T_A, T_B yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodları ve T_L yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu şu şekilde tanımlanır. (TBDY-2018)

$$T_A = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{3.10}$$

$$T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{3.11}$$

$$T_L = 6\ [s] \tag{3.12}$$

Sönüm oranı, ξ değerinin %5'ten farklı olması halinde spektral ivme seviyesi, sönüm oranı katsayısı, η_ξ kullanılarak aşağıdaki denklemler göre belirlenir.

%0.5 sönüm değeri için;

$$\eta_\xi \begin{cases} = 0.925 + 7.5 \cdot T & T \leq 0.11\ s \\ = 1.76 - 0.06 \cdot T & 0.11\ s < T \leq 28\ s \\ = 1 & T > 28\ s \end{cases} \tag{3.13}$$

%1 ila %50 arasında sönüm değerleri için;

$$\eta_\xi \begin{cases} = 1 + \dfrac{(a_\eta - 1) \cdot T}{0.15} & T < 0.15\ s \\ = \dfrac{b_\eta \cdot T}{(c_\eta + T)} & 0.15\ s \leq T < 0.5\ s \\ = d_\eta + e_\eta (T - 0.5) & 0.5\ s \leq T \leq 10\ s \end{cases} \tag{3.14}$$

Sönüm oranı η_ξ'nin belirlendiği Denklem (3.14)'deki a_η, b_η, c_η, $d_\eta$ve e_η sönüm oranı katsayıları aşağıdaki çizelgeden elde edilmektedir.

Çizelge 3.3. Sönüm oranı katsayısı, η_ξ denklemi parametreleri (TBHSSDTDY 2021)

Sönüm oranı, ξ	a_η	b_η	c_η	d_η	e_η
%1	1.49	1.538	0.005	1.52	-0.0392
%3	1.15	1.185	0.005	1.17	-0.0119
%7	0.91	0.883	-0.005	0.89	0.0051
%10	0.82	0.761	-0.011	0.78	0.0107
%20	0.66	0.549	-0.025	0.58	0.0171
%30	0.58	0.445	-0.034	0.48	0.0192
%50	0.48	0.334	-0.046	0.37	0.0202

Farklı sönüm oranları için ve herhangi bir T periyodunda düşey elastik tasarım spektrumu, $S_{aeD}(T, \xi)$, için aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenir.

$$S_{aeD}(T, \xi) = \left(0.6\, SA_{VS} \frac{T}{0.05} + 0.4\, SA_{VS}\right) \eta_\xi \qquad 0 < T \leq 0.05 \tag{3.15}$$

$$S_{aeD}(T, \xi) = SA_{VS} \eta_\xi \qquad 0.05 < T \leq T_{SV} \tag{3.16}$$

$$S_{aeD}(T,\xi) = SA_{VS}\left(\frac{T_{SV}}{T}\right)^{n}\eta_{\xi} \qquad T_{SV} < T \qquad (3.17)$$

Denklemlerde bulunan SA_{VS} kısa periyod düşey spektrum değeridir. Sönüm oranı %5'ten farklıysa, spektral ivme seviyesi η_{ξ} kullanılarak denklemlerde belirlendiği şekilde hesaplanmaktadır. T_{SV} düşey ivme spektrumu köşe periyodu ve *n* katsayısı aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$T_{SV} = maks\ \{0.13; (0.7 - 0.67C_L)\} \qquad (3.18)$$

$$n = \frac{\ln(1 - C_L)}{\ln(T_{SV})} \qquad (3.19)$$

$$C_L = 1 - \frac{SA_{V1}}{SA_{VS}} \qquad (3.20)$$

Denklem (3.22)'de yer alan SA_{V1}, T = 1.0 s periyodu için düşey ivme spektrumu ordinatıdır. SA_{VS} ile zemin etkilerinden bağımsız yatay spektral ivme değerleri S_S' ve S_1' kullanılarak aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$SA_{VS} = a_{VS}(S_S')^{b_{VS}}\ ;\ a_{VS} = 5.07\ (V_{s30})^{-0.306};$$
$$b_{VS} = 1.03 + 0.066\left(\frac{\min(V_{s30}, 760)}{1000}\right) \qquad (3.21)$$

$$SA_{V1} = a_{V1}(S_1')^{0.91}\ ;\ a_{V1} = 9.90\ (V_{s30})^{-0.467} \qquad (3.22)$$

Tankın devrilme güvenliğinin kontrol edilmesi için en büyük yer hızı (PGV), sahaya özel deprem tehlike çalışması yapılmadığı durumlarda, S_{DS} ve S_{D1} spektral ivmelerine bağlı olarak aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$PGV\ [\mathrm{m}/s] = 0.75\ (S_{DS}S_{D1})^{0.55} \qquad (3.23)$$

Tanka bağlanacak boru ve pompa sistemlerinin bağlantı detaylarının kontrolünde en büyük zemin yer değiştirmesi, en büyük zemin yer değiştirmesi (PGD) dikkate alınmaktadır. Sahaya özel deprem tehlike çalışması yapılmadığı durumlarda hesap PGD değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmakta denklemde bulunan f_d katsayısı değeri Denklem (3.25)'e göre hesaplanmaktadır.

$$PGD\ [\mathrm{m}] = 0.25\ f_d S'_1 \left(\frac{V_{s30}}{760}\right)^{-0.4} \tag{3.24}$$

$$f_d \begin{cases} = 2 & \text{eğer } S'_1 < 0.1 \\ = 1 + 10 \cdot S'_1 & \text{eğer } S'_1 \geq 0.1 \end{cases} \tag{3.25}$$

3.1.2.Deprem Tasarım Sınıfı, Performans Düzey ve Hedefleri

Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (2021) kapsamında, sıvı depolama tanklarının deprem performans düzeylerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere, tankların kullanım amacı, depolanan sıvının tehlike sınıfı ve deprem sonrası işlevsellik durumu esas alınarak üç farklı tasarım sınıfı tanımlanmıştır. İlgili sınıflandırma, performansa dayalı tasarım anlayışı doğrultusunda kontrol edilmesi gereken hasar sınır durumları ile değerlendirilmekte ve farklı deprem yer hareketi düzeyleri için öngörülen performans hedefleri doğrultusunda yönetmelikte detaylandırılmaktadır. Bu bölümde, söz konusu sınıflandırma esasları ile performans hedeflerine ilişkin yönetmelik hükümleri özetlenerek sunulmuştur.

Bu sınıflandırma ve buna bağlı performans hedefleri ile tanımlanan deprem yer hareketi düzeylerine göre yapı güvenliğinin sağlanmasına yönelik olarak belirlenmiş ve Çizelge 3.4 ile Çizelge 3.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Deprem Tasarım Sınıfları (TBHSSDTDY 2021)

Tank Tasarım Sınıfı	**Tanım**
I	1000 m³ ve daha küçük kapasiteli ve MKSEAHY'de belirtilen esaslara göre zararlı olarak sınıflandırılan maddelerin dışında kalan sıvıların depolandığı ve deprem sonrası işlevselliği kritik olmayan tanklar.
II	1000 m³'ten daha büyük kapasiteli ve MKSEAHY'de belirtilen esaslara göre zararlı olarak sınıflandırılan maddelerin dışında kalan sıvıların depolandığı ve deprem sonrası işlevsellikleri kritik olmayan tanklar.
III	Deprem sonrası işlevsellikleri kritik olan ve MKSEAHY'de'de belirtilen esaslara göre zararlı olarak sınıflandırılan maddelerin depolandığı tanklar.

Bu sınıflar yukarıdaki çizelge de özetlenmiş olup tankların TBHSSDTDY göre deprem tasarımını sınıflandırmak için yönetmelikteki temel kriterler şunlardır;

- Depolanan sıvının miktarı, özellikleri ve oluşturabileceği tehlikeler.
- Deprem sonrasında kullanım durumu ve işlevselliği.
- Çevresel koşullar

Sıvı tanklarının deprem performansının kontrolünde, kontrollü hasar sınır durumu ve kesintisiz kullanım hasar sınır durumu olmak üzere iki performans kriteri bulunmaktadır.

Kontrollü hasar sınır durumu, çelik sıvı depolama tanklarının taşıyıcı sisteminde yapısal göçmenin gerçekleşmesinden hemen önceki durumu tanımlamaktadır. Bu durum, gevrek hasar oluşumuna yol açan davranış modu dışında kalan bir hasar seviyesini ifade etmektedir. Kontrollü hasar performans hedefinde, tankın depoladığı sıvının güvenli bir şekilde tank dışına tahliye edilebilmesi, belirli koşullar sağlandığında tankın kısıtlı bir işlevsellik düzeyinde yeniden kullanılabilir hale gelmesi sağlanabilir. Kontrollü hasar sınır durumu performans hedefinin sağlanması amacıyla aşağıdaki unsurlar detaylı bir şekilde değerlendirilir ve kontrol edilir.

- Yapısal stabilitesi, yani tankın devrilmeye veya kaymaya karşı direncinin analizi,
- Tank duvarlarının burkulma etkilerine karşı dayanım kapasitesi,
- Tank tabanı ile boru bağlantı noktalarının dayanımı
- Temel sisteminin deprem kuvvetleri altında dayanımı

İkinci performans tanımı ise kesintisiz kullanım sınır durumu olup, çelik sıvı depolama tanklarının deprem sonrası işlevselliğini ve sürdürebilirliğini esas alan hasar sınır durumunu ifade etmektedir. Bu durum, tank sisteminin tamamen kullanılabilir olduğu ve herhangi bir sızıntının oluşmadığı durumu ya da belirli kontrol ve onarım işlemleri sonrasında önceden belirlenmiş bir kullanılabilirlik seviyesine ulaşıldığı hasar seviyesini kapsamaktadır. Kesintisiz kullanım durumu performans hedefinin sağlanması amacıyla aşağıdaki sıralanan unsurlar detaylı bir şekilde değerlendirilir ve kontrol edilir.

- Tankın sıvı geçirmezlik özelliğinin korunması,
- Sıvının üst yüzeyi ile çatı arasında çalkalanma payı için bırakılan mesafenin uygunluğu.

- Tanka bağlı hidrolik sistemler ile zemin bağlantılarının deformasyonlara karşı dayanım kapasitesi. Yönetmelik kapsamında performansa dayalı tasarımı yapılan sıvı tanklarının Tank Tasarım Sınıflarına göre Çizelge 3.5'de sunulan performans gerekliliklerini sağlaması hedeflenir.

Çizelge 3.5. Performans hedefleri (TBHSSDTDY 2021)

Tank Tasarım Sınıfı	**Deprem Yer Hareketi Düzeyi**		
	DD-1	**DD-2**	**DD-3**
I	-	-	Kontrollü Hasar
II	-	Kontrollü Hasar	Kesintisiz Kullanım
III	Kontrollü Hasar	Kesintisiz Kullanım	-

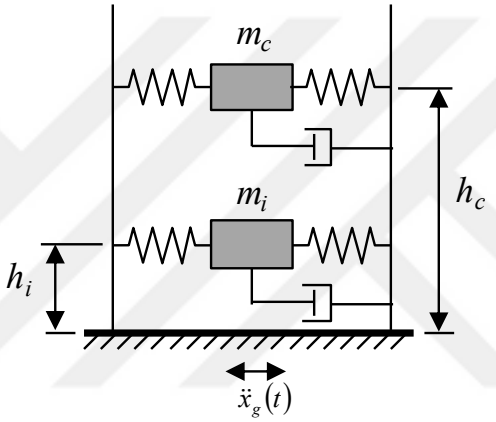
3.1.3. Deprem Yüklerinin Belirlenmesine İlişkin Kurallar ve Tasarım Kuvvetlerinin Belirlenmesi

Deprem sırasında sahada oluşan yer hareketleri nedeniyle tank ve içerisindeki sıvı kütlesinde eylemsizlik kuvvetleri oluşmaktadır. Deprem hareketinin başlamasıyla birlikte tank, sıvı, temel ve zemin sisteminin karşılıklı etkileşimi söz konusu olur. Bu kapsamda, deprem etkileri altında dikkate alınması gereken yükler ve analiz esasları, Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (2021) esas alınarak özetlenmiş ve bu bölümde sunulmuştur.

Sıvı depolama tanklarına deprem etkisi altında etki eden kuvvetler; depolanan sıvının hidrostatik basıncı, tank kabuğu ve çatısına uygulanan eylemsizlik kuvvetleri ile tank yapısının sıvı ile etkileşiminden doğan hidrodinamik kuvvetlerden oluşur. Sıvı depolama tanklarının deprem davranışının belirlenmesinde, tank içerisinde depolanan sıvı için darbesel ve devinimsel titreşim modu göz önüne alınmaktadır. Deprem etkisi altında iki titreşim moduna göre tank taşıyıcı sisteminde meydana gelen kuvvetlerin sonucu oluşan hidrodinamik basınçları hesaplanmaktadır. Deprem etkisi altındaki sıvı depolama

tanklarında; yatay yüklerin, devrilme momentlerinin, ankraj elemanlarının ve sıvının hidrodinamik etkilerinin belirlenmesine yönelik hesaplama yöntemleri, yönetmelik kapsamında ilgili hesap prosedürleri ile açıklanmaktadır.

TBHSSDTDY tank içerisindeki sıvının deprem etkilerine tepkisini, eşdeğer yığılı kütle modeli (Bkz. Şekil 3.1) aracılığıyla değerlendirir. Bu modelde, sıvının toplam kütlesi dinamik davranışa göre iki ayrı bileşene ayrılır. Bütünüyle sıvıyla dolu ve herhangi bir çalkalanmaya sebebiyet verecek açıklığa sahip olmayan tanklarda depolanan sıvının toplam kütlesi darbesel bileşeni oluşur ve devinimsel sıvı kütlesi dikkate alınmaz.



Şekil 3.1. Eşdeğer yığılı kütleli modelleme yaklaşımı. (TBHSSDTDY-2021)

Darbesel kütle bileşeni m_i ve devinimsel kütle bileşeni m_c aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenir. Denklem de bulunan α_i ise Çizelge 3-6 'ya göre belirlenmektedir.

$$m_i = \alpha_i \pi R^2 H \rho \tag{3.26}$$

$$m_c = (1 - \alpha_i) \pi R^2 H \rho \tag{3.27}$$

Eşdeğer darbesel ve devinimsel kütlelerin tank tabanından yükseklikleri h_i ve h_c yükseklikleri tank tabanının hemen üstündeki seviye için tank tabanın altındaki düzlem için devrilme momenti için ise $h_i{}'$ ve $h_c{}'$ yükseklikleri ile hesaplanmaktadır.

Düşey silindirik sıvı depolama tankları için darbesel hidrodinamik bileşenin titreşim periyodu T_i, devinimsel hidrodinamik bileşenin titreşim periyodu, T_c ve düşey yöndeki titreşim periyodu T_v aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$T_i = C_i H \sqrt{\frac{\rho R}{t_w E}} \tag{3.28}$$

$$T_c = C_c \sqrt{R} \tag{3.29}$$

$$T_v = 2\pi \frac{H}{C_v} \sqrt{\frac{\rho_w}{E}} \tag{3.30}$$

Denklemde, C_i (darbesel periyod katsayısı) ve C_c (devinimsel periyod katsayısı) Çizelge 3-6' ya göre belirlenmektedir. C_v (solunum titreşim modu katsayısı) aşağıdaki denklem ile hesaplanmakta olup $(\,)_r$ ile tanımlanan terimler referans değerlere karşılık gelir.

$$C_v = (C_v)_r \sqrt{\frac{t_w/R}{(t_w/R)_r} \frac{(\rho/\rho_w)_r}{\rho/\rho_w}} \tag{3.31}$$

Darbesel titreşim modu için çelik tanklar ve ön germeli betonarme tanklarda sönüm oranı %2 ve betonarme tanklarda %5 olarak tanımlanmaktadır. Devinimsel titreşim modu için ise sönüm oranı %0.5'dir.

Çizelge 3.6. Darbesel ve devinimsel titreşim modlarıyla ilgili kuvvetlerin hesabında kullanılacak parametre değerleri (TS EN 1998-4) (TBHSSDTDY-2021)

H/R	α_i	C_i	C_c	h_i/H	h_c/H	h_i'/H	h_c'/H
[−]	[−]	[−]	$[s/\sqrt{m}]$	[−]	[−]	[−]	[−]
0.3	0.176	9.28	2.09	0.400	0.521	2.640	3.414
0.5	0.300	7.74	1.74	0.400	0.543	1.460	1.517
0.7	0.414	6.97	1.60	0.401	0.571	1.009	1.011
1.0	0.548	6.36	1.52	0.419	0.616	0.721	0.785
1.5	0.686	6.06	1.48	0.439	0.690	0.555	0.734
2.0	0.763	6.21	1.48	0.448	0.751	0.500	0.764
2.5	0.810	6.56	1.48	0.452	0.794	0.480	0.796
3.0	0.842	7.03	1.48	0.453	0.825	0.472	0.825

Çizelge 3.7. Düşey deprem hareketi bileşeniyle ilgili olan (düşey yöndeki) solunum titreşim mod hesabında kullanılacak C_v değerleri (TBHSSDTDY-2021)

	$\mathbf{t_w/R}$				
	≤ 0.0005	**0.001**	**0.002**	**0.003**	**≥ 0.005**
H/R	C_v				
0.3	0.043	0.061	0.088	0.108	0.140
0.4	0.048	0.068	0.097	0.120	0.155
0.5	0.052	0.078	0.105	0.129	0.168
0.6	0.055	0.078	0.112	0.137	0.178
0.7	0.058	0.082	0.117	0.143	0.186
0.8	0.060	0.085	0.121	0.148	0.192
0.9	0.061	0.087	0.124	0.152	0.197
1.0	0.063	0.089	0.126	0.155	0.201
1.2	0.064	0.092	0.130	0.160	0.207
1.4	0.066	0.093	0.133	0.163	0.211
1.6	0.067	0.095	0.134	0.165	0.214
1.8	0.067	0.096	0.136	0.167	0.216
2.0	0.068	0.096	0.137	0.168	0.217
2.2	0.068	0.097	0.137	0.168	0.218
2.4	0.068	0.097	0.138	0.169	0.219
2.6	0.069	0.097	0.138	0.169	0.219
2.8	0.069	0.098	0.138	0.170	0.220
3.0	0.069	0.098	0.139	0.170	0.220

Tank çatısından tank duvarına iletilen toplam kesme kuvveti V, aşağıda verilen denklem doğrultusunda hesaplanır.

$$V = m_r \, S_{ae}(T_i, \xi_i) \, \text{g} \tag{3.32}$$

Tank duvarının en alt seviyesinde (tabanın hemen üzerinde yer alan hizada) duvara etkiyen toplam taban kesme kuvveti, V_d Denklem (3.33) ile hesaplanır.

Tank taban düzleminin hemen üzerinde, tank duvarında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti V_d ve hesap devrilme momenti M_{OT} aşağıda belirtilen denklemlere göre belirlenir.

$$V_d = (m_i + m_w + m_r) \, S_{ae}(T_i, \xi_i) \, \text{g} + m_c \, S_{ae}(T_c, \xi_c) \, \text{g} \tag{3.33}$$

$$M_{OT} = m_c h_c S_{ae}(T_c, \xi_c)\ \mathrm{g} + (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) S_{ae}(T_i, \xi_i)\ \mathrm{g} \quad (3.34)$$

Tank taban düzleminin hemen altında, tank duvarında meydana gelen toplam hesap devrilme momenti, $M_{OT}{}'$ aşağıda belirtilen denkleme göre belirlenir.

$$M_{OT}{}' = m_c h_c' S_{ae}(T_c, \xi_c)\ \mathrm{g} + (m_i h_i' + m_w h_w + m_r h_r) S_{ae}(T_i, \xi_i)\ \mathrm{g} \quad (3.35)$$

Tankların sabitlemesinde kullanılacak bağlantı elemanlarının (ankraj) hesabı devrilme momenti, M_{OT} esas alınarak belirlenir. Sabitleme elemanlarının gevrek veya sünek olması tasarımı değiştiren bir etken olup, sünek elemanlarda akma sonrası yüklerin yeniden dağılımının gerçekleşmesi ve sünek elemanların akma sonrasında yükleri farklı bölgelere aktarabilmesi ve tekrarlayan yükler altında enerji sönümleme kapasitelerinin bulunmasıdır. Birim çevre uzunluğu başına bağlantı elemanında oluşan deprem kuvveti, P aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir.

$$P = (0.4 \cdot \alpha_s + 0.65)\frac{M_{OT}}{D_{HD}^2} - w_t \quad (3.36)$$

Denklemde bulunan α_s katsayısı sünek elemanlar için $\alpha_s = 0$, gevrek elemanlar için ise $\alpha_s = 1$'dir.

Deprem etkisi altındaki sıvı depolama tanklarında, sıvının dalgalanma hareketi temel titreşim moduna bağlı olarak meydana gelir. Bu dalgalanmanın tankın deprem anında davranışına etkilerini değerlendirmek için hesaplanan dalga yüksekliği, sıvının en yüksek dalga noktası ile hareketsiz andaki sıvı yüzeyi arasındaki mesafedir. Silindirik tanklarda çalkalanma dalgası yüksekliği, d_{max} aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$d_{max} = 0.84\ R\ S_{ae}(T_c, \xi_c) \quad (3.37)$$

Hesaplanan d_{max} yüksekliği, sabit çatılı tankın çalkalanma payı yüksekliğinden büyükse, dalgalar çatıya çarparak hidrodinamik basınç oluşturur. Çalkanma payı hesaplanan dalga yüksekliğinden daha az olan tanklarda bu basınç dikkate alınmalıdır. Dalgaların çatıda oluşturduğu hidrodinamik basıncın, p_r hesabında aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$p_r = p_b + p_v \quad (3.38)$$

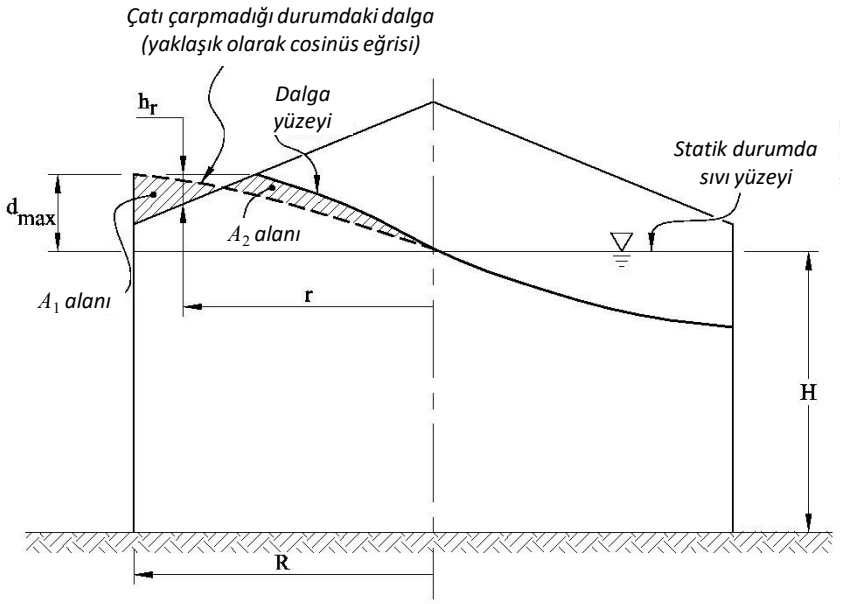
Burada, p_b kaldırma gücü ve p_v ise akış hızıyla bağlantılı hidrodinamik basınç bileşenleridir. p_b aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$p_b = \gamma_l \, h_r' \tag{3.39}$$

Dalganın tank çatısına çarpmadığı kuramsal durum için dalga yüksekliği, d_{max} hesaplanacak ve *A* noktası belirlenecektir. Şekil 3.2'de gösterilen d_{max} yüksekliğinde dalga yüzeyi ile tankın çatısı profili arasında kalan A_1 alanı üçgen olarak idealleştirilir. Şekil 3.2'de gösterildiği üzere A_1 üçgeni ile aynı alana sahip A_2 üçgeni, çatının altında ancak dalga yüzeyinin üstünde kalan bölümde oluşturulur. Bu üçgenin çatı üzerindeki üst noktası *B* noktası olarak belirlenip *A* ve *B* noktaları arasında düz çizgi, h_r yüksekliğinin belirlenesinde kullanılır. Tavanda dalganın etkilediği alanda bulunan tüm noktalar için, A-B çizgisi ile çatının ilgili noktalarındaki yükseklik farkı, eşdeğer sıvı yüksekliği, h_r'ye eşit olarak alınır. İlgili noktalara etkiyen sıvı kaldırma basıncı, p_b Denklem (3.39) ile hesaplanır.

Tank tavanına çarpan dalganın oluşturduğu hidrodinamik basınç bileşeni olan p_v dalganın akış hızıyla ilişkili olup bu basınç, aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$p_v = 5.0 \left(\frac{2\pi}{T_c} d_{max}\right)^2 \frac{\gamma_l}{2\,\mathrm{g}} \tag{3.40}$$



Şekil 3.2. Tank tavanına dalga çarpma etkisinin hesabı (TBHSSDTDY-2021)

Deprem etkisi altında oluşan gerilme ve şekil değişikliklerinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki yük kombinasyonları dikkate alınır.

$$E_d = \begin{cases} G + P + Q \pm A_{Ed} \\ G + P \pm A_{Ed} \end{cases} \tag{3.41}$$

Yukarıdaki denklemde, G, P, Q yükleri ile ifade edilen yükler sırasıyla zati yük, öngerme etkisi ve hareketli yük etkisidir. $A_{E\,d}$ deprem etkisi aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$A_{E\,d} = \sqrt{A_i^2 + A_c^2 + A_v^2} \tag{3.42}$$

Denklemde ifade edildiği üzere A_i, A_c ve A_v ile ifade edilen yükler sırasıyla darbesel devinimsel ve düşey deprem etkileridir.

3.2. API-650 Standardına Göre Tasarım İlkeleri ve Deprem Yüklerinin Belirlenmesi Yaklaşımı

American Petroleum Institute tarafından yayınlanan bu standart, kaynaklı sıvı depolama tankları için dünyaca kabul görmüş bir standart olup birçok ülke tarafından sıvı depolama tank tasarımı için kullanmaktadır. API-650, Petrol depolama tanklarının güvenliğini, sürdürülebilirliğini ve çevresel performansını sağlamak amacıyla yayınlanmıştır. Bu standart kapsamında malzeme, tasarım, imalat, montaj ve muayene ile ilgili şartları belirlemek için çeşitli ebat ve kapasitelerde düşey silindirik, yer üstü, üstü kapalı ve açık, kaynaklı sıvı depolama tankları için tasarım kurallarını belirlemektedir. Bu standart sıvı depolama tankları atmosfer basıncına yakın iç basınçlarda ve -40 °C ile +93 °C sıcaklık aralığında çalışan depolama tanklarının tasarımına yönelik hükümler içermektedir. Depolanan sıvının sıcaklığının 93 °C'yi aşması durumunda ise, ilave tasarım gereklerinin yer aldığı Annex M bölümüne göre tasarım gereklilikleri sağlanmalıdır.

API-650 standardında deprem tasarımı Annex E Seismic Design of Storage Tanks bölümünde ele alınmıştır. Bu bölümde deprem tasarımının temel amacı, insan hayatını korumak ve tankın yıkıcı bir şekilde göçmesini engellemektir. Tasarım, izin verilen gerilme tasarımı (Allowable Stress Design) yöntemine ve belirtilen yönteme uygun yük kombinasyonlarına göre yapılır. Yönetmelikte deprem ivmesi için yapılacak olan hesaplar için ASCE/SEI 7-22'ye yönlendirerek maksimum beklenen deprem yer hareketi; 50 yılda %1 aşılma olasılığının deprem yer hareketini tanımlamaktadır. Yönetmelikte dinamik tasarım yöntemi, tank ve içeriğinin darbesel (impulsive) ve devinimsel (convective) tepki modlarını dikkate alan tepki spektrumu analizine dayanmaktadır.

Yönetmelik, tank duvarına etkiyen eşdeğer deprem kuvveti ve devrilme momenti hesaplanması, tankın devrilmeye karşı stabilitesi ve eksenel kuvvetten kaynaklanan burkulmaya karşı dayanımını belirlemek amacıyla ilgili düzenlemeleri içerir. Tasarım yöntemi, zemin seviyesinde mesnetlenen tanklar için darbesel (impulsive) modda %5 sönümlü ve devinimsel (convective) modda %0,5 sönümlü tepki spektrumlarına dayanmaktadır. Yüzer çatılı tanklar ve bir çerçeve üzerine yerleştirilmiş tanklar kapsama dahil edilmemiştir.

3.2.1. Deprem Yer Hareketi Spektrumları

API-650 standardı kapsamında, sıvı depolama tanklarının deprem etkisi altında tasarımında esas alınacak yer hareketi spektrumlarının belirlenmesine yönelik hesaplamalar, doğrudan ASCE 7 standardına atıf yapılarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda, haritalanmış spektral ivme parametrelerinin belirlenmesi, zemin sınıfına bağlı büyütme katsayılarının uygulanması, MCE_R (Dikkate Alınan Maksimum Deprem) tanımına dayalı spektrum oluşturulması ve saha özelinde yer hareketi spektrumlarının dikkate alınması gibi esaslar API-650 ve ASCE 7 hükümleri doğrultusunda şekillendirilmektedir. Bu bölümde söz konusu hükümler özetlenerek sunulmuştur.

ASCE 7'de tasarım spektrumu için kullanılacak değerler, MCE_R olarak tanımlanan ve her 2500 yılda bir tekrarlanması beklenen deprem hareketi spektrumunun 2/3'ü ile çarpılmış halidir. Saha özgü spektral yanıt tasarım yöntemi, ASCE 7'nin hükümlerine dayanmaktadır. API-650'de Saha özgü yer hareketleri kullanılarak yapılan tasarım, aşağıdaki durumlardan herhangi birinin geçerli olduğu durumlarda dikkate alınır.

- Tank, bilinen aktif bir fayın 10 km içinde yer alan sahalar.
- Deprem yalıtımı veya enerji sönümleme sistemlerinin kullanıldığı tankların bulunduğu sahalar.
- Tank tasarım mühendisinin ve tankın işletme güvenliğinden sorumlu kurumların talebi üzerine ilgili tank için yönetmelikte tanımlanan asgari güvenlik düzeyinin üzerinde bir güvenlik düzeyi seçilerek veya başka özel koşulların dikkate alınarak tasarlanmasının talep edildiği tanklar.
- Tankın F tipi zemin sınıfında bulunduğu durumlarda, yer hareketlerinin saha özelinde belirlenmesi zorunludur.

ASCE 7, risk ayarlı maksimum dikkate alınan deprem yer hareketi, 50 yıllık bir süre içerisinde %1 çökme olasılığına ulaşması beklenen bir deprem olayına bağlı yer hareketi olarak tanımlar. Bu kapsamda tanımlanan terimler S_S, kısa periyotlar (0.2 saniye) için, %5 sönüm oranına sahip haritalanmış dikkate alınan maksimum deprem (MCE_R) spektral ivme parametresi, S_1 1 saniye periyot için, %5 sönüm oranına sahip haritalanmış MCE_R spektral

ivme parametresi, S_0 sıfır saniye periyot için (en büyük yer ivmesi - PGA) %5 sönüm oranına sahip MCE_R spektral ivme parametresidir.

Aksi belirtilmedikçe veya saha özelinde farklı bir değer belirlenmedikçe, haritalanmış yöntemler kullanılarak S_0 değeri için $0.4S_S$ olarak kabul edilir. Katsayılar F_s, F_v katsayı değerleri Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9'de verilmiştir. Yerel zemin sınıfı etkileri dikkate alınan spektral ivme katsayıları S_{MS} ve S_{M1} aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$S_{MS} = F_a S_S \tag{3.43}$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \tag{3.44}$$

Tasarım spektral ivmeleri S_{DS} ve S_{D1} aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \tag{3.45}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \tag{3.46}$$

Çizelge 3.8. Zemin sınıfının fonksiyonu olarak F_a Değeri (API-650)

Zemin Sınıfı	**Kısa Periyotlar için MCER Spektral Tepki İvmeleri**				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75g$	$S_s = 1.0g$	$S_s \geq 1.25g$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	Sahaya özel zemin davranış analizi gereklidir.				

Çizelge 3.9. Zemin sınıfının fonksiyonu olarak F_v Değeri (API-650)

Zemin Sınıfı	**Kısa Periyotlar için MCER Spektral Tepki İvmeleri**				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.50$	$S_1 = 0.75g$	$S_1 = 1.0g$	$S_1 \geq 1.25g$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	Sahaya özel zemin davranış analizi gereklidir.				

Darbesel titreşim modu için sönüm oranı %5 tanımlanmaktadır. Devinimsel titreşim modu için ise sönüm oranı %0.5'dir.

Herhangi bir T periyodunda yatay elastik tasarım spektrumu, S_a için aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenir. (ASCE/SEI 7-22)

$$S_a = S_{DS}\left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_0}\right) \qquad 0 \leq T \leq T_0 \tag{3.47}$$

$$S_a = S_{DS} \qquad T_0 \leq T \leq T_S \tag{3.48}$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \qquad T_S \leq T \leq T_L \tag{3.49}$$

$$S_a = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \qquad T_L \leq T \tag{3.50}$$

ASCE 7'de T_L, bölgesel bir parametre olup T_0 ve T_S yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodlarıdır ve aşağıdaki denklemler ile tanımlanmaktadır. (ASCE/SEI 7-22)

$$T_0 = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{3.51}$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{3.52}$$

API-650 Annex E'de düşey deprem ivmesi, sabit bir çarpan aracılığıyla tanımlanmakta olup Denklem (3.53) ile hesaplanmaktadır.

$$A_v = 0.7 \cdot 0.47 \cdot S_{DS} \tag{3.53}$$

Bu yaklaşım, ASCE 7'de tanımlanan kısa periyot tasarım ivmesi esas alınarak belirlenmiştir.

API-650 standardında tanımlanan düşey deprem ivmesi, ASCE 7 standardındakinden farklı bir yaklaşımla belirlenmektedir. API-650'de düşey ivme etkisi, kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısının %47'si olarak tanımlanırken ($A_v = 0.47 \cdot S_{DS}$), ASCE 7 standardında bu oran %20 ($E_v = 0.2 \cdot S_{DS} \cdot D$) olarak ifade edilmektedir. ASCE 7 standardında D ölü yük olarak tanımlanmaktadır.

3.2.2. Deprem Tasarım Sınıfı

API-650 standardı kapsamında sıvı depolama tanklarının sismik tasarımında, tankın kullanım amacı ve olası hasarın kamu üzerindeki etkileri dikkate alınarak, deprem kullanım sınıfı (Seismic Use Group) adı verilen bir sınıflandırma sistemi uygulanmaktadır. Bu sınıflandırma, tankların deprem sonrası işlevsellik durumunu ve çevresel risklerini esas alarak deprem kullanım sınıfı üç grupta tanımlanmaktadır.

Sınıflandırma, tasarım ivme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan önem katsayısı (Importance Factor, I) üzerinde doğrudan etkili olup, bu sayede farklı kullanım alanlarına göre tank tasarımının güvenlik seviyesinin artırılması hedeflenmektedir.

Bu bölümde, Deprem Kullanım Sınıfı (DKS) kavramı ve ilgili önem katsayısı parametreleri özetlenerek sunulmakta olup farklı kullanım senaryolarına karşılık gelen sınıflandırma Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Tank özellikleri (API-650)

Deprem Kullanım Sınıfı III	DKS III tankları, deprem sonrası toparlanma için gerekli olan ve halkın yaşamı ve sağlığı için elzem olan tesislere gerekli hizmeti sağlayan tanklar veya halkın maruz kalmasını önlemek için yeterli kontrole sahip olmayan önemli miktarlarda tehlikeli madde içeren tanklardır.
Deprem Kullanım Sınıfı II	DKS II tankları, önemli bir kamu tehlikesi oluşturabilecek malzeme depolayan ve halkın maruz kalmasını önlemek için ikincil kontrolleri bulunmayan veya büyük tesislere doğrudan hizmet veren tanklardır.
Deprem Kullanım Sınıfı I	DKS I tankları, Deprem Kullanım Sınıfı III veya Deprem Kullanım Sınıfı II' ye atanmamış olanlardır.

API-650'ye göre deprem tasarımını sınıflandırmak için standarttaki temel kriterler şunlardır;

- Depolanan sıvının miktarı, özellikleri ve oluşturabileceği tehlikeler.
- Deprem sonrasında kullanım durumu ve işlevselliği.
- Çevresel koşullar

3.2.3. Deprem Yüklerinin Belirlenmesine İlişkin Kurallar Deprem Yüklerinin Belirlenmesine İlişkin Kurallar ve Tasarım Kuvvetlerinin Belirlenmesi

Deprem sırasında sahada oluşan yer hareketleri, tank, içerisinde depolanan sıvı, temel ve zemin arasında karşılıklı bir etkileşim ve bununla birlikte sistemde önemli eylemsizlik kuvvetleri meydana gelmektedir. Deprem etkisinin başlamasıyla birlikte, tank taşıyıcı sisteminde oluşacak gerilmeler ve şekil değiştirmelerin doğru şekilde belirlenebilmesi amacıyla analiz modellerinde dikkate alınması gereken yükler, ilgili yönetmelikte ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

Sıvı depolama tanklarına deprem etkisi altında etki eden yükler; depolanan sıvının oluşturduğu hidrostatik basınç, tank kabuğu ve çatısında oluşan eylemsizlik kuvvetleri ile sıvı-tank etkileşiminden kaynaklanan hidrodinamik kuvvetler olmak üzere üç ana bileşen

altında toplanmaktadır. Tank içerisindeki sıvının deprem yükleri altındaki davranışının modellenmesinde, darbesel (impulsive) ve devinimsel (convective) titreşim modları dikkate alınmakta, her iki mod için oluşan hidrodinamik basınçlar ayrı ayrı hesaplanmaktadır. API-650, tank içerisindeki sıvının deprem etkilerine incelerken eşdeğer yığılı kütle modeli (Bkz. Şekil 3.1) aracılığıyla temsil değerlendirmektedir. Depolanan sıvı kütlesini dinamik özelliklerine bağlı olarak darbesel ve devinimsel bileşenler olarak iki ayrı şekilde incelenmektedir. Deprem etkisi altındaki tank yapılarında; yatay yüklerin, devrilme momentlerinin, ankraj elemanlarının ve sıvının hidrodinamik etkilerinin belirlenmesine yönelik hesaplama yöntemleri, yönetmelik kapsamında ilgili hesap adımlarıyla birlikte açıklanmaktadır.

Darbesel ağırlık bileşeni W_i aşağıdaki Denklem (3.54) kullanılarak belirlenir. W_i değeri hesabında tank D/H oranı 1.333'ten küçük olduğunda, etkili darbesel ağırlık, denklemi (3.55)'e göre belirlenir. Devinimsel ağırlık bileşeni W_c aşağıdaki Denklem (3.56) kullanılarak belirlenir.

$$W_i = \frac{\tanh\left(0.866\frac{D}{H}\right)}{0.866\frac{D}{H}} W_p \tag{3.54}$$

$$W_i = \left[1.0 - 0.218\frac{D}{H}\right] W_p \tag{3.55}$$

$$W_c = 0.230\frac{D}{H}\tanh\left(3.67\frac{H}{D}\right) W_p \tag{3.56}$$

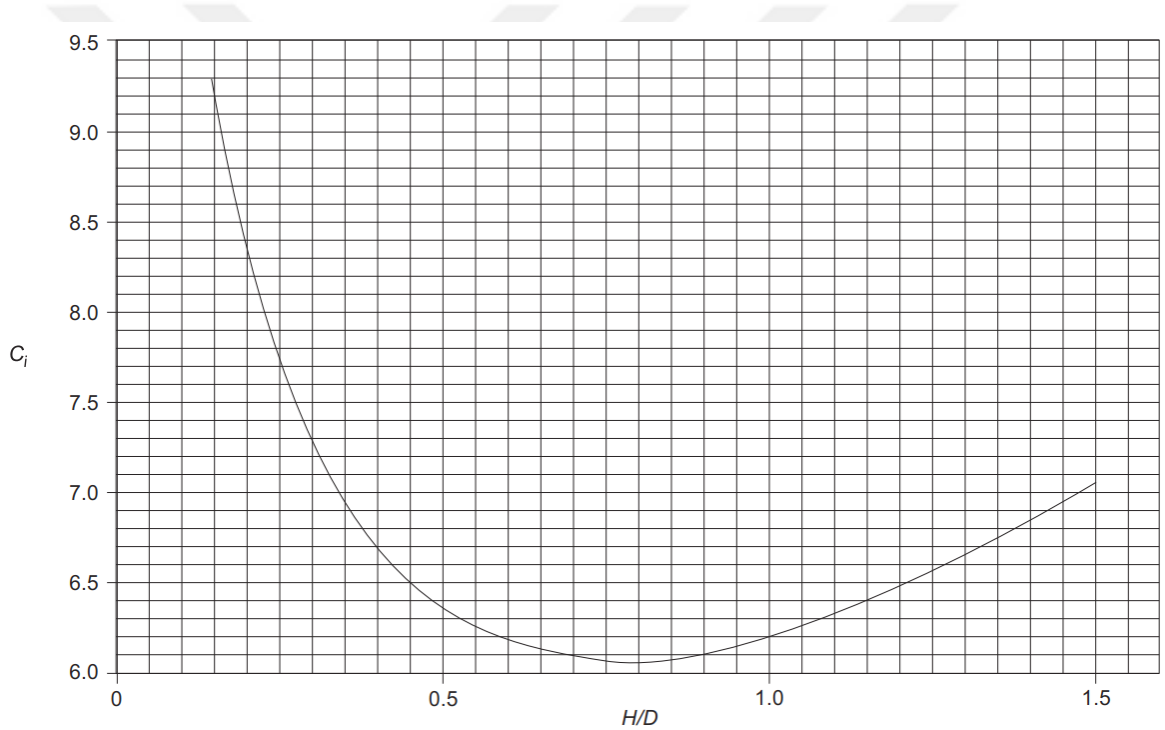
Düşey silindirik sıvı depolama tankları için darbesel hidrodinamik bileşenin titreşim periyodu T_i, devinimsel hidrodinamik bileşenin titreşim periyodu, T_c aşağıdaki denklemler ile hesaplanır. Darbesel hidrodinamik bileşenin titreşim periyodu T_i denkleminde bulunan C_i katsayısı tankın H/D oranına bağlı olarak Şekil 3.3'den grafiksel olarak belirlenir. API-650 standardında sunulan tasarım yöntemleri, tankın darbesel titreşim periyodu T_i dikkate almamaktadır. Tank sistemine ait darbesel periyot değeri yaklaşık olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}}\right)\frac{C_i H}{\sqrt{\frac{t_u}{D}}}\left(\sqrt{\frac{\rho}{E}}\right) \tag{3.57}$$

$$T_c = 1.8\, K_s\sqrt{D} \tag{3.58}$$

Denklem (3.58)'deki K_s katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir.

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}} \tag{3.59}$$



Şekil 3.3. C_i Katsayısı (API-650)

Darbesel (impulsive) tasarım tepki spektrumu ivme katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır. $A_i \geq 0.007$ ve $S_1 \geq 0.6$ koşullarını sağlıyorsa A_i değeri Denklem (3.65) göre belirlenir.

$$A_i = S_{DS}\left(\frac{I}{R_{wi}}\right) = 2.5QF_aS_0\left(\frac{I}{R_{wi}}\right) \tag{3.60}$$

$$A_i \geq 0.5S_1\left(\frac{I}{R_{wi}}\right) = 0.625S_p\left(\frac{I}{R_{wi}}\right) \tag{3.61}$$

Devinimsel (convective) tasarım tepki spektrumu ivme katsayısı aşağıdaki denklemler; $T_C \leq T_L$ durumunda Denklem (3.62) kullanılarak, $T_C > T_L$ durumunda ise Denklem (3.63) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$A_c = KS_{D1}\left(\frac{1}{T_c}\right)\left(\frac{I}{R_{wc}}\right) = 2.5KQF_aS_0\left(\frac{T_s}{T_c}\right)\left(\frac{I}{R_{wc}}\right) \leq A_i \tag{3.62}$$

$$A_c = KS_{D1}\left(\frac{T_L}{T_c^2}\right)\left(\frac{I}{R_{wc}}\right) = 2.5KQF_aS_0\left(\frac{T_sT_L}{T_c^2}\right)\left(\frac{I}{R_{wc}}\right) \leq A_i \tag{3.63}$$

Eşdeğer yatay sismik tasarım kuvveti, aşağıda verilen genel formülasyon kapsamında hesaplanmaktadır.

$$F = AW_{\text{eff}} \tag{3.64}$$

Zemin üstü sıvı depolama tankları için R_{wi} ve R_{wc} azaltma faktörleri için Çizelge 3.11' de gösterilen değerler kullanılmakta, önem katsayısı (I), sismik kullanım grubuna göre tanımlanmakta olup, ilgili katsayı değeri Çizelge 3.12'ye göre belirlenmektedir.

Çizelge 3.11. İzin verilen gerilme tasarımı için tepki modifikasyon katsayıları

Ankraj sistemi	$\boldsymbol{R_{wi}}$ **(Darbesel)**	$\boldsymbol{R_{wc}}$ **(Devinimsel)**
Kendinden Ankrajlı (Ankrajsız)	3.5	2
Mekanik ankrajlı	4	2

Çizelge 3.12. Önem faktörü (*I*) ve Sismik Kullanım Grubu sınıflandırması

Sismik Kullanım Grubu Sınıflandırması	**I**
I	1.0
II	1.25
III	1.5

Sıvı depolayan zemin üstü, düz tabanlı tanklar, eşdeğer yanal kuvvetler ve yanal kuvvet dağılımlarının belirlenmesinde etkin kütle ve dinamik sıvı basınçları dikkate alınarak hesaplanan deprem kuvvetlerine göre tasarlanır. Eşdeğer yanal kuvvet taban kesme kuvveti aşağıdaki denklemlerde tanımlandığı şekilde belirlenir. API-650 standardına göre deprem taban kesmesi, ilgili düzenlemeler doğrudan cebirsel toplamı zorunlu kılmadığı sürece,

darbesel (impulsive) ve devinimsel (convektif) bileşenlerin karelerinin toplamının karekökü alınarak belirlenmektedir.

$$V = \sqrt{{V_i}^2 + {V_c}^2} \tag{3.65}$$

Tank duvarında meydana gelen toplam darbesel (impulsive) etki sonucu taban kesme kuvveti V_i aşağıda belirtilen denkleme göre belirlenir.

$$V_i = A_i\left(W_s + W_r + W_f + W_i\right) \tag{3.66}$$

Tank duvarında meydana gelen toplam devinimsel (convective) etki sonucu taban kesme kuvveti V_c aşağıda belirtilen denkleme göre belirlenir.

$$V_c = A_c W_c \tag{3.67}$$

Tank tabanının hemen üzerindeki seviyedeki devrilme momenti hesabına katılan darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıda belirtilen denklemlere göre belirlenir.

$$X_i = 0.375H \tag{3.68}$$

X_i değeri hesabında tank D/H oranı 1.333'ten küçük olduğunda, darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği, denklemi (3.69)'a göre belirlenir.

$$X_i = \left[0.5\ - 0.094\frac{D}{H}\right]H \tag{3.69}$$

Tank tabanının hemen üzerindeki seviyedeki devrilme momenti hesabına katılan devinimsel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıda belirtilen denkleme göre belirlenir.

$$X_c = \left[1.0\ - \frac{cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H}{D}sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right]H \tag{3.70}$$

Tank tabanının hemen altındaki devrilme momenti hesabına katılan darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıda belirtilen denkleme göre belirlenir.

$$X_{is} = 0.375\left[1.0 + 1.333\left(\frac{0.866\frac{D}{H}}{tanh\left(0.866\frac{D}{H}\right)} - 1\right)\right]H \tag{3.71}$$

D/H oranı 1.333'ten küçük olduğunda, darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği, denklem (3.72)'e göre belirlenir.

$$X_{is} = \left[0.500 + 0.060\frac{D}{H}\right]H \tag{3.72}$$

Tank tabanının hemen altındaki devrilme momenti hesabına katılan devinimsel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıda belirtilen denklem (3.73)' göre belirlenir.

$$X_{cs} = \left[1 - \frac{cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1.937}{\frac{3.67H}{D}sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right]H \tag{3.73}$$

Düşey ivme etkileri hem yukarıya hem de aşağıya doğru yönlerde etkili kabul edilir ve yatay ivme etkileriyle birlikte karelerin karekökü toplamı yöntemiyle birleştirilerek tasarım kuvvetleri elde edilir. Düşey ivme etkileri, hidrodinamik çevresel gerilmeler için aşağıdaki denklemlerde belirlendiği şekilde birleştirilmelidir. Düşey ivme etkileri, verilen denklem (3.80) dışında, tank duvarındaki yükler, tasarım kuvvetleri ve devrilmeye karşı dayanımın belirlenmesinde birlikte dikkate alınması gerekli değildir. Düşey deprem ivmesi parametresi, saha için özel bir parametre değeri belirlenmedikçe $0.47S_{DS}$ olarak alınır. Tank sahibi / idare tarafından doğrudan düşey yer hareketi ivmesi değeri de belirlenebilir. Bu durumda, belirlenen değer 0.7 ile çarpılarak düşey ivme parametresi A_v elde edilir. Toplam düşey deprem kuvveti ise aşağıdaki denkleme göre belirlenir.

$$F_v = \pm A_v W_{eff} \tag{3.74}$$

Tank içindeki sıvının darbesel (impulsive) bileşeninin deprem etkisiyle tank cidarına oluşan çevresel gerilme değeri N_i aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$N_i = 8.48 A_i G D H \left[\frac{Y}{H} - 0.5\left(\frac{Y}{H}\right)^2\right] tanh\left(0.866\frac{D}{H}\right) \tag{3.75}$$

Tank D/H oranı 1.333'ten küçük ve $Y < 0.75D$ olduğunda, N_i değeri Denklem (3.78)'e göre belirlenir. Y değeri sıvı yüzeyinden analiz noktasına olan mesafedir (pozitif yön aşağı).

$$N_i = 5.22 A_i G D^2 \left[\frac{Y}{0.75D} - 0.5\left(\frac{Y}{0.75D}\right)^2\right] \tag{3.76}$$

Tank D/H oranı 1.333'ten küçük ve $Y \geq 0.75D$ olduğunda, N_i değeri Denklem (3.77)'ye göre belirlenir.

$$N_i = 2.6 A_i G D \tag{3.77}$$

Tank içindeki sıvının devinimsel (convective) bileşeninin deprem etkisiyle tank cidarına oluşan çevresel gerilme değeri N_c aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$N_c = \frac{0.98 A_c G D^2 cosh\left[\frac{3.68(H-Y)}{D}\right]}{cosh\left[\frac{3.68H}{D}\right]} \tag{3.78}$$

Düşey ivmenin dikkate alınmadığı durumlarda ($A_v = 0$), tank duvarındaki toplam birleştirilmiş çevresel gerilime değeri, Denklem (3.79) ile belirlenir.

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{{N_i}^2 + {N_c}^2}}{t} \tag{3.79}$$

Düşey ivmenin dikkate alındığı durumlarda tank duvarındaki toplam birleştirilmiş çevresel gerilime değeri, aşağıdaki Denklem (3.80) ile belirlenir.

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{{N_i}^2 + {N_c}^2 + (A_v N_h/2.5)^2}}{t} \tag{3.80}$$

Tank taban düzleminin hemen üzerinde, tank duvarında meydana gelen hesap devrilme momenti, M_{rw} aşağıda belirtilen denklemlere göre belirlenir. Tank taban düzleminin hemen altında, tank duvarında meydana gelen toplam hesap devrilme momenti, M_s aşağıda belirtilen denkleme göre belirlenir.

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \tag{3.81}$$

$$M_s = \sqrt{[A_i(W_i X_{is} + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_{cs})]^2} \tag{3.82}$$

Kendi kendine ankrajlı tanklarda, devrilme momentine karşı koymak amacıyla tank içindeki sıvının bir kısmı dikkate alınır. Temelden kalkarak devrilmeye karşı koyan taban levhası (tank duvarın altındaki halkasal plaka) bölgesinin oluşturduğu yükselmeye karşı koyan kuvvet w_a Denklem (3.83)'e göre belirlenir.

$$w_a = 99 t_a \sqrt{F_y H G_e} \leq 201.1 H D G_e \tag{3.83}$$

Denklem (3.83)'de w_a için kalınlaştırılmış bir alt taban levhası kullanılsın veya kullanılmasın geçerlidir. Eğer w_a değeri, $201.1HDG_e$ limitini aşarsa, bu durumda L değeri 0.035D olarak alınır ve w_a değeri $201.1HDG_e$ değerine eşitlenir. Bununla birlikte, Denklem (3.84)'de hesaplanan L değerinden daha küçük bir değer olan L_S kullanılabilir. Eğer bu azaltılmış L_S değeri seçilirse, buna karşılık gelen azaltılmış bir w_a değeri de kullanılır. Bu yeni w_a değeri aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$w_a = 5742 H G_e L_S \tag{3.84}$$

Tankların sabitlemesinde kullanılacak bağlantı elemanlarının (ankraj) gerekliliği devrilme momenti, M_{rw} esas alınarak aşağıdaki denklem ile belirlenir. Hesaplanan J değeri Çizelge 3.13'de verilen şartlara göre ankraj gerekliliği belirlenir.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2\left[w_t(1 - 0.4A_v) + w_a - F_p w_{int}\right]} \tag{3.85}$$

Tankın duvarı ve çatısının ağırlığının, tank duvar tabanına (kabuk altına) düşen birim çevresel uzunluk başına dağıtılmış w_t yükü aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$w_t = \left[\frac{W_S}{\pi D} + w_{rs}\right] \tag{3.86}$$

Çizelge 3.13. Ankraj oranı kriterleri

Ankraj Oranı	**Kriter**
$\boldsymbol{J \leq 0.785}$	Tasarım deprem devrilme momenti altında hesaplanan kalkış yoktur. Tank kendinden sabitlenmiştir.
$\mathbf{0.785 < J \leq 1.54}$	Tank kalkar, ancak tank kabuğu sağlandığında tasarım yükü için stabildir fakat basınç gereksinimleri karşılanmalıdır. Tank kendinden sabitlenmiştir.
$\mathbf{J > 1.54}$	Tasarım yükleri altında tank kendinden sabitlenmiş değildir. $L < 0.035D$ kontrol edilmezse taban levhası değiştirilmeli veya mekanik ankraj eklenmelidir.

Deprem etkisi altındaki sıvı depolama tanklarında, sıvının dalgalanma hareketi temel titreşim moduna bağlı olarak meydana gelir. Sismik Kullanım Grubu I tankları için çalkalanma yüksekliğine göre tasarım yapılıp yapılmaması tankın işletme güvenliğinden sorumlu kurumların sorumluluğuna bırakılmıştır. Sismik Kullanım Grubu II ve Sismik Kullanım Grubu III tankları için çalkalanma yüksekliğinin dikkate alınması gereklidir. Bu dalgalanmanın tankın deprem anında davranışına etkilerini değerlendirmek için hesaplanan dalga yüksekliği, sıvının en yüksek dalga noktası ile hareketsiz andaki sıvı yüzeyi arasındaki mesafedir. Silindirik tanklarda çalkalanma dalgası yüksekliği, δ_S denklem (3.87) kullanılarak hesaplanır.

$$\delta_S = 0.42 D A_f \tag{3.87}$$

Sismik Kullanım Grubu I ve Sismik Kullanım Grubu II tankları için A_f yükü aşağıdaki denklem ile belirlenir.

Devinimsel titreşim modu periyodu $T_c \leq 4$ olduğu durumda;

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{1}{T_C}\right) = 2.5KQF_aS_0\left(\frac{T_S}{T_C}\right) \quad (3.88)$$

Devinimsel titreşim modu periyodu $T_c > 4$ olduğu durumda;

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{4}{T_C^2}\right) = 2.5KQF_aS_0\left(\frac{4T_S}{T_C^2}\right) \quad (3.89)$$

Sismik Kullanım Grubu I ve Sismik Kullanım Grubu III tankları için A_f yükü aşağıdaki denklem ile belirlenir.

Devinimsel titreşim modu periyodu $T_c \leq T_L$ olduğu durumda;

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{1}{T_C}\right) = 2.5KQF_aS_0\left(\frac{T_S}{T_C}\right) \quad (3.90)$$

Devinimsel titreşim modu periyodu $T_c > T_L$ olduğu durumda;

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{T_L}{T_C^2}\right) = 2.5KQF_aS_0\left(\frac{T_ST_L}{T_C^2}\right) \quad (3.91)$$

Çizelge 3.14. Gerekli minimum çalkalanma dalgası yüksekliği (API-650)

SDS	**SUG I**	**SUG II**	**SUG III**
$S_{DS} < 0.33$g	(a)	(a)	δ_S (c)
$S_{DS} \geq 0.33$g	(a)	$0.7\delta_S$ (b)	δ_S (c)

a. Ekonomik gerekçelerle, çalkalanma dalgası yüksekliğinin 0.7 δ_s düzeyinde belirlenmesi önerilmektedir; ancak bu bir zorunluluk değildir.
b. Çalkalanma dalgası yüksekliği, 0.7 δ_s seviyesinde sağlanmalıdır. Ancak aşağıda belirtilen koşullardan herhangi biri sağlanıyorsa bu gereklilik aranmaz.
1. Ürün sızıntısını kontrol etmek üzere ikincil bir sızdırmazlık sistemi mevcuttur.
2. Çatı ve tank cidarı, sıvı dalgalanmasını (sloshing) kontrol altına alacak şekilde tasarlanmıştır.
c. Hesaplanan dalga yüksekliğine 0.7 δ_s eşit serbest yükseklik zorunludur, aşağıdaki durumlardan biri yerine getirilmediği sürece:
1. Ürün sızıntısını kontrol etmek üzere ikincil bir sızdırmazlık sistemi mevcuttur.
2. Çatı ve tank cidarı, sıvı dalgalanmasını (sloshing) kontrol altına alacak şekilde tasarlanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, sıvı depolama tanklarının Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY) ile American Petroleum Institute Standard 650 (API-650) hükümleri doğrultusunda karşılaştırmalı hesaplamaları sunulacaktır. Çalışma kapsamında, API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerinde tanımlı H/D oranlarının sınır değerleri dikkate alınarak, bu aralığı kapsayacak şekilde 11 farklı tank geometrisi oluşturulmuştur. H/D oranı 0.15 ile 1.5 arasında değişen bu modeller, hem kısa-geniş hem de yüksek-dar tank davranışlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Tüm geometrilerde yapılan karşılaştırmanın tutarlılığını sağlamak amacıyla, depolanan sıvı hacmi her bir model için yaklaşık 3080 m³ olarak sabitlenmiştir. Böylece, farklı H/D oranlarına sahip ve depolanan sıvı hacmi aynı olan modeller incelenerek, geometrik oranın sismik davranış üzerindeki etkileri karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir. Böylece, farklı H/D oranlarına sahip ve depolanan sıvı hacmi aynı olan modeller analiz edilerek, geometrik oranların yapısal davranış üzerindeki etkileri ortaya konmuş; bu sayede benzer tasarımlarda başlangıç boyutlarının belirlenmesinde tasarımcılara yol gösterecek mühendislik verileri sunulmuştur.

Her iki yönetmelikte tanımlanan zemin sınıflarına ait ortalama kayma dalgası hızı aralıkları dikkate alınarak, her bir zemin sınıfını temsil edecek şekilde ortalama kayma dalgası hızları ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE sırasıyla 1600 m/s, 950 m/s, 500 m/s, 250 m/s ve 150 m/s olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu değerler esas alınmıştır. Her iki yönetmelikte de ZF (TBHSSDTDY) ve F tipi (API-650) zemin sınıfları için sahaya özel analiz yapılması gerekliliği nedeniyle bu zemin türleri örnekleme kapsamı dışında bırakılmıştır. TBHSSDTDY'de aktif fay hattına olan uzaklık, tasarım üzerinde etkili bir parametre olarak tanımlanmış ve bu bağlamda üç farklı katsayı belirlenmiştir. Bu katsayıların tank tasarımlarına etkisini incelemek amacıyla, aktif fay hattına olan uzaklık 10 km, 20 km ve 30 km olarak alınarak örneklemeler gerçekleştirilmiştir. Sıvı yoğunluğunun tank tasarım parametreleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, hesaplamalarda üç farklı sıvı türü dikkate alınmıştır. Genel kullanıma yönelik olarak en sık karşılaşılan petrol ve suya ek olarak, yoğunluğu daha yüksek olan sülfürik asit de dahil edilerek, farklı yoğunlukların tasarım üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma

kapsamında, sıvıların tasarım hesaplarında kullanılmak üzere karakteristik kütle yoğunlukları; su için 1000 kg/m³, ham petrol için 800 kg/m³ ve sülfürik asit için 1840 kg/m³ olarak esas alınmıştır. Bu değerler, ilgili sıvıların depolama koşullarındaki yaklaşık özgül ağırlıklarını temsil etmekte olup, tasarım yüklerinin belirlenmesinde referans parametre olarak kullanılmıştır. Çalışmada oluşturulan tank modelleri, farklı geometriler, zemin sınıfları, aktif faya olan mesafeler ve depolanan sıvı türleri dikkate alınarak sistematik bir şekilde adlandırılmıştır.

Model isimleri, sırasıyla geometri numarasını (M01–M11), zemin sınıfını (ZA–ZE), faya olan uzaklığı (L_f10, L_f20, L_f30) ve depolanan sıvı türünü (P: Petrol, W: Su, S: Sülfürik asit) temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Örneğin, M01-ZA-L_f30-P model adı, birinci geometriye sahip, ZA zemin sınıfında yer alan, aktif faya 30 km uzaklıkta konumlanan ve içerisinde petrol depolanan bir tankı ifade etmektedir. Her iki yönetmelik kapsamında, hesaplamalar öncelikle Tank Tasarım Sınıfı II ve ardından Tank Tasarım Sınıfı I esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, sıvı davranışına yönelik sonuçları etkilememesi amacıyla tank çatı ağırlıkları hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Model tank geometrileri ve tasarım parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Tasarım kuvvetlerinin belirlenmesine yönelik olarak, örnek model olarak seçilen M06-ZA-L_f30-P tankına ait detaylı hesaplamalar, bu bölümün alt başlıklarında her iki yönetmelik kapsamında ayrı ayrı sunulacaktır. Örnek model; tank boyutları ve analiz parametreleri itibarıyla hem geometrik açıdan tipik bir örnek olmakta hem de çalışmadaki genel eğilimleri yansıtmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, farklı geometrik ve yapısal özelliklere sahip toplam 142 adet düşey silindirik çelik tank örneği yönetmeliklerce tanımlı yöntemler kullanılarak, ilgili yönetmeliklerin tasarım kriterleri doğrultusunda karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Deprem parametreleri için detaylı örnek çözümlerinde kullanılan Çizelge 4.4'deki değerler kullanılmıştır.

Bu kapsamlı değerlendirme ile, farklı geometrik oranlara, zemin koşullarına, fay uzaklıklarına ve sıvı özelliklerine sahip tank modelleri üzerinden, her iki yönetmeliğin öngördüğü sismik tasarım yaklaşımlarının sonuçlar üzerindeki etkileri sistematik biçimde

sunulmuştur. Çalışmanın temel amacı, TBHSSDTDY ve API-650 yönetmeliklerinin aynı geometri ve yükleme koşulları altında hesaplanan tasarım kuvvetlerinin büyüklüğü ve dağılımı üzerindeki farklılık ve benzerlikleri ortaya koymak, böylece farklı tasarım metodolojisine sahip yönetmeliklerin mühendislik sonuçları üzerindeki etkilerini somut verilerle karşılaştırmaktır. Elde edilen bulgular, yönetmeliklerin uyumuyla birlikte, farklı tasarım koşullarında ortaya çıkan sonuçların karşılaştırmalı olarak incelenmesine imkân tanımıştır.

Çizelge 4.1. Model tank geometrileri ve tasarım parametreleri

No	**Model İsmi**	**Sıvı Kütle Yoğunluğu ρ**	**Zemin sınıfı**	**Ortalama Kayma Dalgası Hızı**	**Faya Olan Uzaklık**	**D**	**H**	**H_w**
		[t/m³]	**[m/s]**	**[m/s]**	**[km]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**
1	M01-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	30.00	4.50	4.80
2	M02-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	26.00	6.00	6.50
3	M03-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	23.40	7.40	7.90
4	M04-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	21.40	8.85	9.35
5	M05-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	19.90	10.25	10.85
6	M06-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	18.60	11.70	12.20
7	M07-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	17.60	13.05	13.55
8	M08-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	16.70	14.50	15.00
9	M09-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	15.90	16.00	16.50
10	M10-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	15.10	17.75	18.25
11	M11-ZA-L_f30-P	0.8	ZA	1600	30	13.90	20.90	21.40
12	M01-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	30.00	4.50	4.80
13	M02-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	26.00	6.00	6.50
14	M03-ZB-Lf30-P	0.8	ZB	950	30	23.40	7.40	7.90
15	M04-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	21.40	8.85	9.35
16	M05-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	19.90	10.25	10.85
17	M06-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	18.60	11.70	12.20
18	M07-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	17.60	13.05	13.55
19	M08-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	16.70	14.50	15.00
20	M09-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	15.90	16.00	16.50

Çizelge 4.1. Model tank geometrileri ve tasarım parametreleri

No	Model İsmi	Sıvı Kütle Yoğunluğu ρ	Zemin sınıfı	Ortalama Kayma Dalgası Hızı	Faya Olan Uzaklık	D	H	H_w
		[t/m³]	[m/s]	[m/s]	[km]	[m]	[m]	[m]
21	M10-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	15.10	17.75	18.25
22	M11-ZB-L_f30-P	0.8	ZB	950	30	13.90	20.90	21.40
23	M01-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	30.00	4.50	5.10
24	M02-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	26.00	6.00	6.80
25	M03-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	23.40	7.40	8.30
26	M04-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	21.40	8.85	9.85
27	M05-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	19.90	10.25	11.25
28	M06-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	18.60	11.70	12.70
29	M07-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	17.60	13.05	14.05
30	M08-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	16.70	14.50	15.40
31	M09-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	15.90	16.00	16.90
32	M10-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	15.10	17.75	18.65
33	M11-ZC-L_f30-P	0.8	ZC	500	30	13.90	20.90	21.80
34	M01-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	30.00	4.50	5.30
35	M02-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	26.00	6.00	7.10
36	M03-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	23.40	7.40	8.70
37	M04-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	21.40	8.85	10.25
38	M05-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	19.90	10.25	11.65
39	M06-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	18.60	11.70	13.00
40	M07-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	17.60	13.05	14.35
41	M08-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	16.70	14.50	15.80
42	M09-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	15.90	16.00	17.30
43	M10-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	15.10	17.75	19.05
44	M11-ZD-L_f30-P	0.8	ZD	250	30	13.90	20.90	22.10
45	M01-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	30.00	4.50	5.60
46	M02-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	26.00	6.00	7.60
47	M03-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	23.40	7.40	9.30
48	M04-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	21.40	8.85	10.85

Çizelge 4.1. Model tank geometrileri ve tasarım parametreleri

No	Model İsmi	Sıvı Kütle Yoğunluğu ρ	Zemin sınıfı	Ortalama Kayma Dalgası Hızı	Faya Olan Uzaklık	D	H	H_w
		[t/m³]	[m/s]	[m/s]	[km]	[m]	[m]	[m]
49	M05-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	19.90	10.25	12.25
50	M06-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	18.60	11.70	13.60
51	M07-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	17.60	13.05	14.95
52	M08-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	16.70	14.50	16.40
53	M09-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	15.90	16.00	17.90
54	M10-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	15.10	17.75	19.55
55	M11-ZE-L_f30-P	0.8	ZE	150	30	13.90	20.90	22.70
56	M01-ZB-L_f10-P	0.8	ZB	950	10	30.00	4.50	4.90
57	M01-ZB-L_f20-P	0.8	ZB	950	20	30.00	4.50	4.90
58	M06-ZB-L_f10-P	0.8	ZB	950	10	18.60	11.70	12.30
59	M06-ZB-L_f20-P	0.8	ZB	950	20	18.60	11.70	12.30
60	M11-ZB-L_f10-P	0.8	ZB	950	10	13.90	20.90	21.50
61	M11-ZB-L_f20-P	0.8	ZB	950	20	13.90	20.90	21.50
62	M06-ZA-L_f10-P	0.8	ZA	1600	10	18.60	11.70	12.30
63	M06-ZC-L_f10-P	0.8	ZC	500	10	18.60	11.70	12.90
64	M06-ZD-L_f10-P	0.8	ZD	250	10	18.60	11.70	13.20
65	M06-ZE-L_f10-P	0.8	ZE	150	10	18.60	11.70	13.90
66	M06-ZA-L_f20-P	0.8	ZA	1600	20	18.60	11.70	12.30
67	M06-ZC-L_f20-P	0.8	ZC	500	20	18.60	11.70	12.80
68	M06-ZD-L_f20-P	0.8	ZD	250	20	18.60	11.70	13.20
69	M06-ZE-L_f20-P	0.8	ZE	150	20	18.60	11.70	13.90
70	M06-ZB-L_f30-W	1	ZB	950	30	18.60	11.70	12.70
71	M06-ZB-L_f30-S	1.84	ZB	950	30	18.60	11.70	12.70

4.1. TBHSSDTDY Kapsamında M06-ZA-L_f30-P Modeli İçin Örnek Çözüm

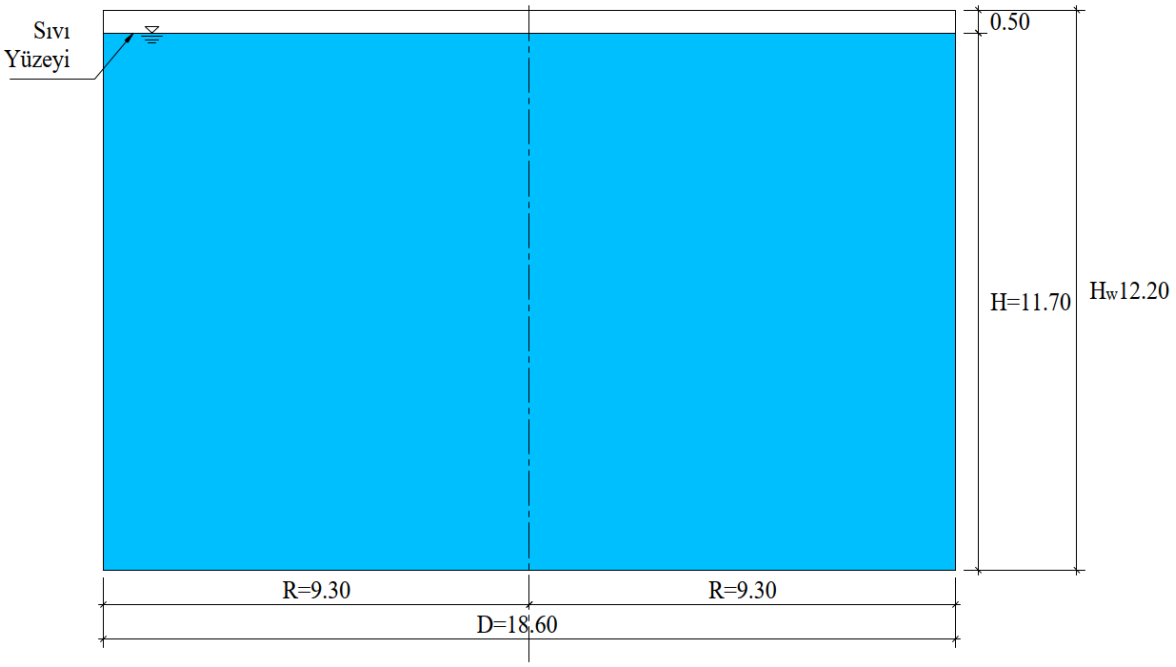
Bu bölümde, örnek model olarak seçilen M06-ZA-L_f30-P tankı için Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği hükümleri doğrultusunda yapılan tasarım hesapları adım adım sunulmaktadır. M06-ZA-L_f30-P sıvı depolama tankının tasarım için kabul edilen tanka ait geometrik değerler ve tankın yapılacağı saha deprem parametreleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.2. M06-ZA-Lf30-P Tank özellikleri

Sıvı Yüksekliği, H	11.70	[m]
Tank Çapı, D	18.60	[m]
Sıvı Hacmi	3179.1	[m³]
Tank Duvar Yüksekliği	12.200	[m]
Duvar Kalınlığı, t_w, t_u	28	[mm]
Ankraj Bağlantı Mesafesi	100	[mm]
Tank Tasarım Sınıfı	II	[-]
Duvar elastisite modülü, E	200	[GPA]
Duvar kütle yoğunluğu, ρw	7850	[kg/m³]
Sıvı kütle yoğunluğu, ρ	800	[kg/m³]

Çizelge 4.3. Saha özellikleri

Zemin Ortalama Kayma Dalgası Hızı	1600	[m/s]
Yerel Zemin Sınıfı	ZA	-
En Yakın Faya olan Mesafe L_f	30	[km]



Şekil 4.1. Tank geometrisi

Sıvı depolama tankının yer aldığı sahaya ait deprem tehlikesi haritasında kısa periyod S_S ve 1 saniye periyod S_1 için spektral ivme değerleri Türkiye Deprem Tehlikesi haritasından elde edilmiş Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Saha için deprem tehlike haritası ivme, hız değerleri ve performans hedefleri

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	**S_S [g]**	**S_1 [g]**	**PGA [g]**	**PGV [m/s]**	**Performans Hedefi**
DD-1 (2475 yıl)	1.579	0.41	0.646	41.134	-
DD-2 (475 yıl)	0.702	0.186	0.298	17.928	Kontrollü Hasar
DD-3 (72 yıl)	0.224	0.071	0.098	6.376	Kesintisiz Kullanım

Harita spektral ivme değerleri S_S ve S_1, yerel zemin etkisi, en büyük doğrultu etkisi ve yakın fay etkisi dikkate alınarak aşağıdaki şekilde zemin etkilerinden bağımsız S_s've S_1' spektral ivmelerine dönüştürülmüştür.

$$S_S' = 1.1 \cdot 0.702 = 0.772 \tag{3.1}$$

Yukardaki denklemde hesaplanan $\gamma_s$ve $\gamma_1$değerleri sırasıyla S_S ve S_1 için en büyük doğrultu etkisini dikkate alan katsayılardır. γ_s ve $\gamma_1$katsayıları sırasıyla 1.1 ve 1.3 değerlerini

almaktadır. Denklem (3.2)'de kullanılan $\varphi_{1,YF}$ çarpanı, S_1 için faya yakınlık katsayısıdır ve Denklem (3.3) ile tanımlanmaktadır.

$$\varphi_{1,YF} = 1.0 \tag{3.3}$$

$$S_1' = 1.3 \cdot 1 \cdot 0.186 = 0.242 \tag{3.2}$$

Kısa periyod spektral ivmesi için yerel zemin etki katsayısı F_S, Çizelge 3.1'de sunulan ve "ZA" zemin sınıfına karşılık gelen değerler kullanılarak belirlenmiştir. İlgili çizelgede "ZA" sınıfı ve $S_S' = 0.772$ [g] için F_S değeri için Çizelge 3.1'de 0.9 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, kısa periyod tasarım spektral ivmesi, S_{DS} şu şekilde hesaplanmıştır.

$$S_{DS} = 0.9 \cdot 0.772 = 0.618 \tag{3.4}$$

Bir saniye periyoda karşılık gelen spektral ivme için yerel zemin etki katsayısı, F_1 değeri Çizelge 3.2'de sunulan değerler göz önüne alınarak 0.8 olarak belirlenmiştir. Hesap spektral ivmesi, S_{D1} şu şekilde hesaplanmıştır.

$$S_{D1} = 0.8 \cdot 0.242 = 0.194 \tag{3.5}$$

Yatay elastik tasarım spektrumunun hesaplanması için öncelikle ilgili köşe periyodları, T_A, T_B ve T_L aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$T_A = 0.2 \cdot \frac{0.194}{0.618} = 0.0628 \text{ [s]} \tag{3.10}$$

$$T_B = \frac{0.194}{0.618} = 0.314 \text{ [s]} \tag{3.11}$$

$$T_L = 6 \text{ [s]} \tag{3.12}$$

Tankın darbesel ve devinimsel hidrodinamik modlarının hesabında kullanılan H/R değeri şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\frac{H}{R} = \frac{11.70}{9.30} = 1.26$$

Darbesel hidrodinamik titreşim modu periyodu, T_i aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır. Darbesel periyod hesaplama katsayısının, C_i ve C_c hesaplanması için Çizelge 3.6'da sunulan değerler arasında H/R = 1.26 oranı göz önüne alınarak enterpolasyon yapılmıştır. Enterpolasyon sonucunda C_i = 6.204 ve C_c = 1.499 değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak, darbesel titreşim modu için periyod, T_i, T_c ve T_v değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$T_i = 6.204 \cdot 11.7 \sqrt{\frac{(800) \cdot (9.30)}{(0.028) \cdot (200 \times 10^9)}} = 0.084\ [s] \tag{3.28}$$

$$T_c = 1.499\sqrt{9.30} = 4.572\ [s] \tag{3.29}$$

Düşey yöndeki titreşim modu hesaplama katsayısının, C_v belirlenmesinde Çizelge 3.7'de sunulan referans kütle yoğunluğu oranı değerleri için listelenen katsayılar kullanılmıştır. Tank için geçerli olan yoğunluk oranı, ρ/ρ_w ve duvar kalınlığı-yarı çap oranları, t_w/R şu şekilde belirlenmiştir.

$$t_w/R = 0.028 / 9.3 = 0.003$$

$$\rho/\rho_w = 0.80 / 7.85 = 0.102$$

$$C_v = (0.161)\sqrt{\frac{(0.003)}{(0.003)}\frac{(0.127)}{(0.102)}} = 0.180 \tag{3.31}$$

Yukarıdaki denklemde sunulan $(C_v)_r$ değerinin belirlenmesi için H/R = 1.26 için Çizelge 3.7'de t_w/R = 0.003 sütununda sunulan ilgili değerler arasında enterpolasyon yapılmıştır. Düşey titreşim modu için periyod aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$T_v = 2\pi \frac{11.70}{0.180}\sqrt{\frac{7850}{200 \cdot 10^8}} = 0.258\ [s] \tag{3.30}$$

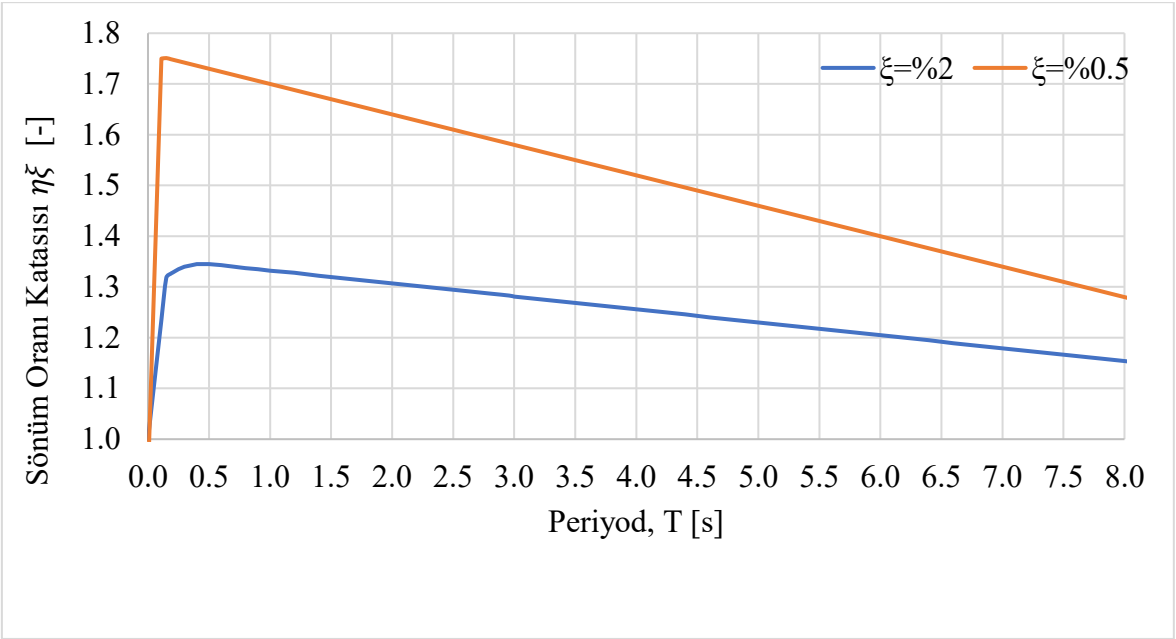
Sönüm oranları darbesel, ξ_c ve devinimsel, ξ_i modları için sırasıyla %0.5 ve %2 değerlerine eşit olarak göz önüne alınmıştır. Darbesel titreşim modu sönüm katsayısının, $\eta_\xi(T_i, \xi_i)$ belirlenmesi için ξ_1=%1 ve ξ_2=%3 sönüm oranları için elde edilen katsayı değerleri arasında aşağıdaki şekilde enterpolasyon yapılmıştır.

$$\eta_\xi(0.084\text{s}, \%1) = 1.274 \qquad \eta_\xi(0.084\text{s}, \%3) = 1.084 \qquad (3.14)$$

$$\eta_\xi(T_i, \xi_i) = \eta_\xi(0.084\text{s}, \%2) = 1.179 \qquad (3.14)$$

$$\eta_\xi(T_c, \xi_c) = \eta_\xi(4.572s, \%0.5) = 1.486 \qquad (3.13)$$

$$\eta_\xi(T_v, \xi_c) = \eta_\xi(0.258s, \%2) = 1.336 \qquad (3.14)$$



Şekil 4.2. η_ξ %2 ve %0.5 için sönüm oranı katsayısı

Yukarıdaki şekilde, sıfırdan sekiz saniyeye kadar olan periyot aralığında darbesel ve devinimsel modlara karşılık gelen sönüm oranlarına göre elde edilen η_ξ katsayıları verilmiştir. Bu kapsamda, darbesel titreşim moduna ilişkin yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T_i, \xi_i)$ aşağıda hesaplanmıştır.

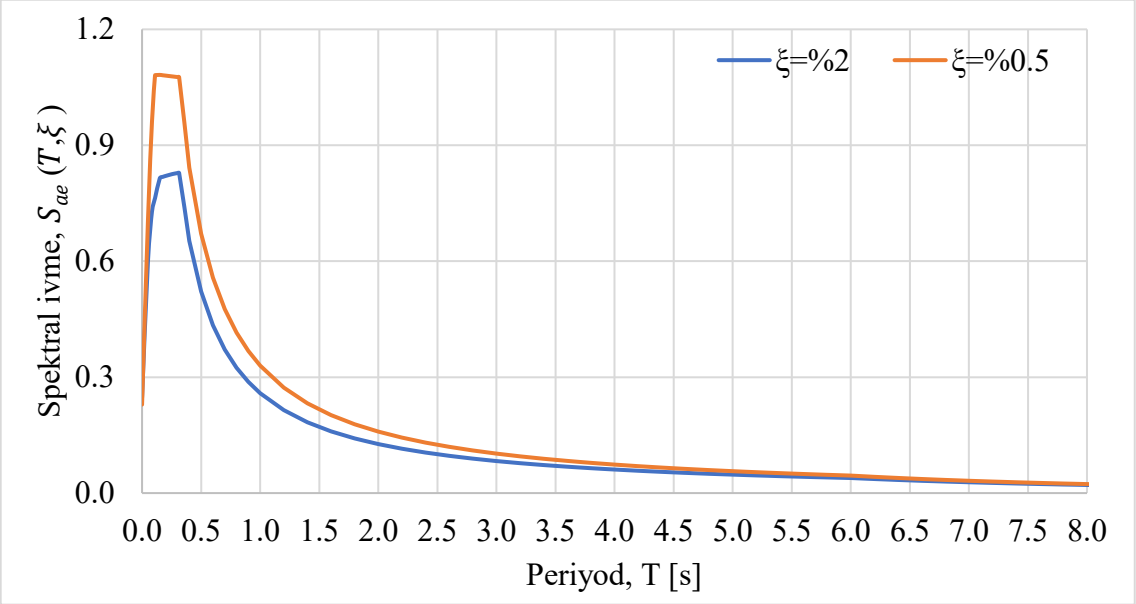
$$S_{ae}(T, \xi) = \eta_\xi S_{DS} \qquad T_A \leq T \leq T_B \qquad (3.7)$$

$$S_{ae}(T_i, \xi_i) = 1.179 \cdot 0.618 = 0.729 \text{ [g]} \qquad 0.0628 \leq 0.084 \leq 0.314$$

Devinimsel titreşim moduna ait yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T_c, \xi_c)$ aşağıda hesaplanmıştır.

$$S_{ae}(T,\xi) = \eta_{\xi}\frac{S_{D1}}{T} \qquad T_B \leq T \leq T_L \qquad (3.8)$$

$$S_{ae}(T_c,\xi_c) = 1.486 \cdot \frac{0.194}{4.572} = 0.063\ [\text{g}] \qquad 0.314 \leq 4.572 \leq 6 \qquad (3.9)$$



Şekil 4.3. Yatay elastik tasarım spektral ivmeleri, $S_{ae}(T,\xi)$

Yukarıdaki şekilde, sıfırdan sekiz saniyeye kadar olan periyot aralığına ait yatay elastik tasarım spektral ivmesi değerleri gösterilmektedir. Düşey titreşim moduna karşılık gelen elastik spektral ivme $S_{aeD}(T_v,\xi_i)$ değerinin hesaplanmasında kullanılan kısa periyotlu düşey spektral ivme SA_{VS}, Denklem (3.21) esas alınarak hesaplanmıştır.

$$a_{VS} = 5.07 \cdot (1600)^{-0.306} = 0.530 \qquad (3.21)$$

$$b_{VS} = 1.03 + 0.066 \cdot \left(\frac{760}{1000}\right) = 1.08 \qquad (3.21)$$

$$SA_{VS} = 0.530 \cdot (0.772)^{1.08} = 0.401\ [\text{g}] \qquad (3.21)$$

Bir saniye periyoda karşılık gelen düşey spektral ivme değeri SA_{V1} denklem

$$a_{V1} = 9.90 \cdot (1600)^{-0.467} = 0.316 \qquad (3.32)$$

$$SA_{V1} = 0.316 \cdot (0.242)^{0.91} = 0.087\ [\text{g}] \qquad (3.32)$$

$S_{aeD}(T_v, \xi)$ düşey elastik spektral ivme değerlerinin hesaplanmasında kullanılan, n, C_L ve T_{SV} değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$C_L = 1 - \frac{0.087}{0.401} = 0.783 \tag{3.20}$$

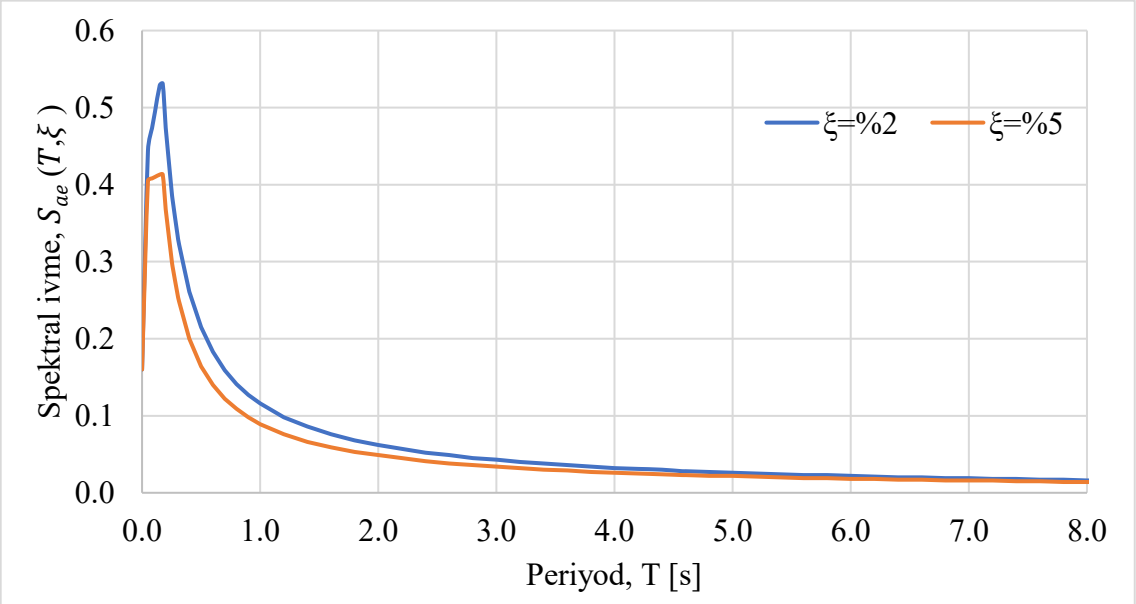
$$T_{SV} = maks\ \{0.13; (0.7 - 0.67 \cdot 0.783)\} = 0.175 \tag{3.18}$$

$$n = \frac{\ln(1 - 0.783)}{\ln(0.175)} = 0.877 \tag{3.19}$$

$S_{aeD}(T_v, \xi_i)$ ile ifade edilen düşey hidrodinamik modun spektral ivmesi, aşağıda hesaplanmıştır.

$$S_{aeD}(T_v, \xi_i) = 0.401 \cdot \left(\frac{0.175}{0.258}\right)^{0.877} \cdot 1.336 = 0.381\ [\text{g}] \qquad 0.175 < 0.258 \tag{3.17}$$

Elde edilen düşey ivme spektrumu, $S_{aeD}(T_v, \xi_i)$ aşağıdaki şekilde sunulmaktadır.



Şekil 4.4. Düşey elastik tasarım spektral ivmeleri, $S_{aeD}(T_v, \xi)$

Devrilme stabilitesi kontrolü kapsamında kullanılan saha en büyük yer hızı, PGV, aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

$$PGV\ [\text{m}/s] = 0.75 \cdot (0.618 \cdot 0.194)^{0.55} = 0.234\ [\text{m}/s] \tag{3.23}$$

Tasarımda göz önüne alınan f_d parametresi ve en büyük zemin yer değiştirmesi, PGD aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_d = 1 + 10 \cdot 0.242 = 3.42 \tag{3.25}$$

$$PGD\ [\text{m}] = 0.25 \cdot 3.42 \cdot 0.242 \cdot \left(\frac{1600}{760}\right)^{-0.4} = 0.15\ [\text{m}] \tag{3.24}$$

Tank içerisindeki sıvının darbesel (impulsive) titreşim moduna ait eşdeğer kütle m_i ve devinimsel (convective) titreşim moduna ait eşdeğer kütle m_c, aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.6'daki verilere dayalı olarak yapılan enterpolasyon sonucunda, yukarıdaki denklemde kullanılan α_i katsayısı H/R=1.26 oranı için 0.620 olarak belirlenmiştir.

$$m_i = 0.620 \cdot \pi \cdot 9.30^2 \cdot 11.70 \cdot 0.80 = 1576.214\ [\text{t}] \tag{3.26}$$

$$m_c = (1 - 0.620) \cdot \pi \cdot 9.30^2 \cdot 11.70 \cdot 0.80 = 967.051\ [\text{t}] \tag{3.27}$$

Tank duvarlarının kütlesi, m_w ise aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m_w = 2 \cdot \pi \cdot 9.30 \cdot 12.20 \cdot 0.028 \cdot 7.85 = 156.693\ [\text{t}]$$

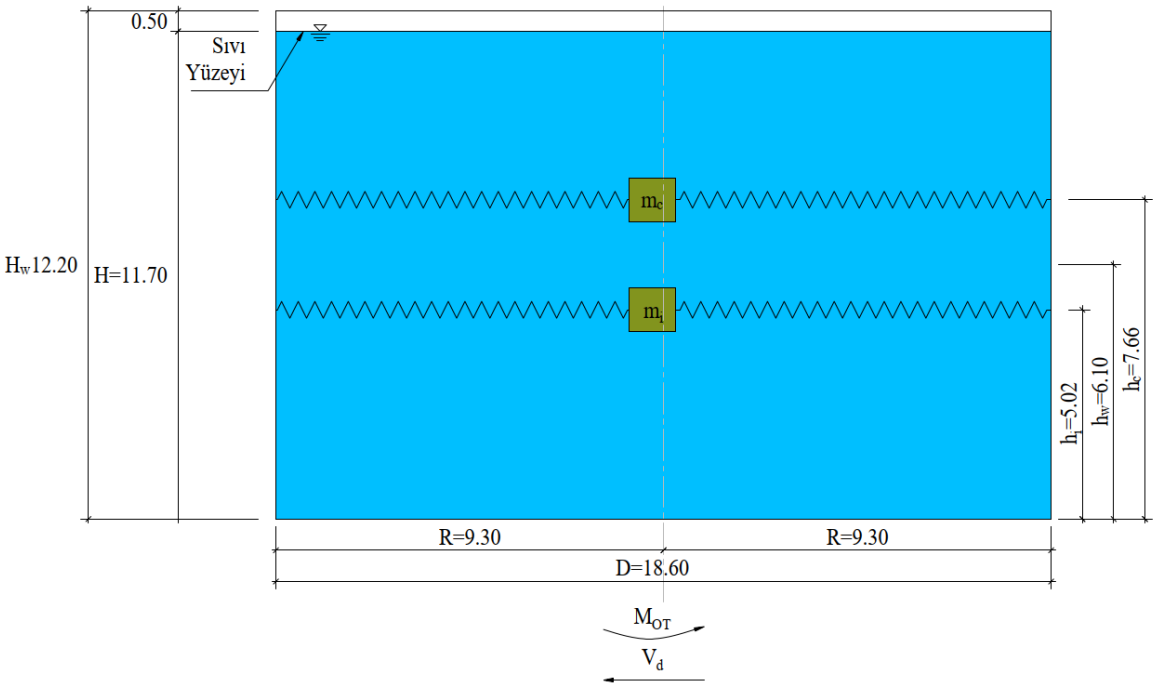
Tank duvarının alt seviyesinde, yani taban hemen üzerinde tank duvarına etkiyen toplam taban kesme kuvveti, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_d = (1576 + 157) \cdot 0.729 \cdot 9.81 + 967 \cdot 0.063 \cdot 9.81 = 12991\ [\text{kN}] \tag{3.33}$$

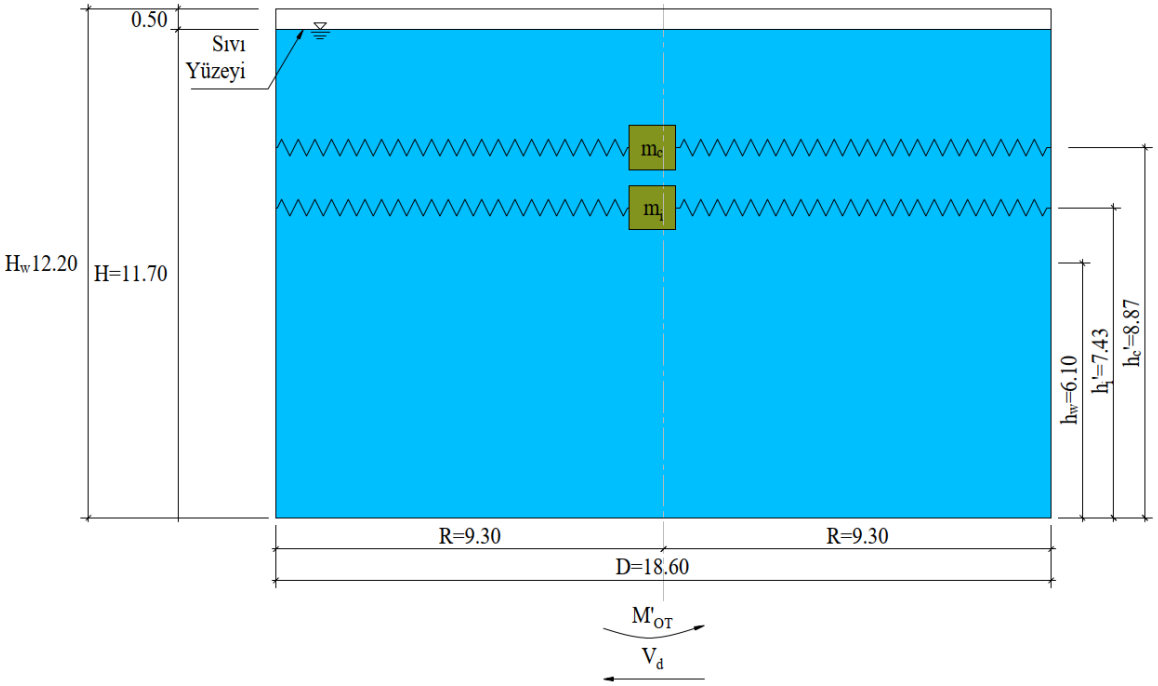
Taban hidrodinamik basınç etkisi dahil edilmeden hesaplanan; tank taban plakasının hemen üzerindeki seviyede oluşan tank devrilme momenti, M_{OT} ve tank taban plakasının hemen altındaki seviyede oluşan tank devrilme momenti, M_{OT}', Denklem (3.34) ve Denklem (3.35) kullanılarak hesaplanmıştır. Devrilme momentinin hesabı için dikkate alınan eşdeğer yığılı kütle yükseklikleri h_c ve h_i Çizelge 3.6'da yer alan değerler esas alınarak belirlenmiştir. Bu tablodaki değerler kullanılarak H/R = 1.26 için h_c/H=0.654, h_c'/H=0.758, h_i/H = 0.429 ve h_i'/H = 0.635 değerleri elde edilmiştir. Tank için hesaplanan eşdeğer kütlelerin konumları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 'da gösterilmiştir.

$$M_{OT} = 967 \cdot 7.66 \cdot 0.063 \cdot 9.81 + (1576 \cdot 5.02 + 157 \cdot 6.1) \cdot 0.729 \cdot 9.81 = 68000.6 \text{ [kN. m]} \quad (3.34)$$

$$M_{OT}' = 967 \cdot 8.87 \cdot 0.063 \cdot 9.81 + (1576 \cdot 7.43 + 157 \cdot 6.1) \cdot 0.729 \cdot 9.81 = 95889.9 \text{ [kN. m]} \quad (3.35)$$



Şekil 4.5. Tank taban devrilme momenti M_{OT} hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri



Şekil 4.6. Tank taban devrilme momenti $M_{OT}{}'$ hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri

Denklem (3.36)'da belirli bir taban bağlantı elemanına etkiyen kuvvet P ve birim çevresel uzunluk başına düşen tank duvarı ağırlığı w_t aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Tank, tabana sünek bağlantı elemanlarıyla ($\alpha_s = 0$) sabitlenecek şekilde tasarlanmıştır.

$$w_t = \frac{157 \cdot 9.81}{2 \cdot \pi \cdot 9.30} = 26.31 \text{ [kN/m]}$$

$$P = (0.4 \cdot 0 + 0.65)\frac{68000.6}{18.80^2} - 26.31 = 98.75 \text{ [kN/m]} \quad (3.36)$$

Çalkalanma dalgası yüksekliği olası taşma etkisi ve kesintisiz kullanım sınır durumu kontrolü bağlamında aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d_{max} = 0.84 \cdot 9.30 \cdot 0.063 = 0.50 \text{ [m]} \quad (3.37)$$

4.2. API-650 Kapsamında M06-ZA-Lf30-P Modeli İçin Örnek Çözüm

Bu bölümde, örnek model olarak seçilen M06-ZA-Lf30-P tankı için API-650 standardı hükümleri doğrultusunda yapılan tasarım hesapları adım adım sunulmaktadır. M06-ZA-Lf30-P sıvı depolama tankının tasarım için kabul edilen tanka ait geometrik değerler ve tankın yapılacağı saha deprem parametreleri Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1'de verilmiştir.

Bu örnek modelde, TBHSSDTDY kapsamında yer alan DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 olan) deprem düzeyi esas alınarak yürütülen tank tasarımı analizine eşdeğer bir karşılaştırma sağlamak amacıyla, API-650 standardı kapsamında yapılan hesaplamalarda da aynı tehlike düzeyine karşılık gelen spektral ivme değerleri kullanılmıştır. ASCE 7 standardına göre, tasarım spektrumu M_{CER} (Maximum Considered Earthquake Risk, yani DD-1) düzeyine karşılık gelen spektral ivme değerlerinin 2/3'ü alınarak elde edilmektedir. Ancak bu çalışmada, iki yönetmelik kapsamında gerçekleştirilen analizlerin doğrudan karşılaştırılabilirliğini sağlayabilmek için API-650 hesabında da doğrudan Türkiye Deprem Tehlike Haritası (https://tdth.afad.gov.tr) üzerinden elde edilen DD-2 düzeyi spektral ivme değerleri esas alınmıştır.

Kısa periyod spektral ivmesi için yerel zemin etki katsayısı F_S,

'de sunulan ve "A" zemin sınıfına karşılık gelen değerler kullanılarak belirlenmiştir. İlgili çizelgede "A" sınıfı ve $S_S = 0.772$ [g] için F_S değeri

'de 0.8 olarak belirlenmiştir. Kısa periyod tasarım spektral ivmesi, S_{DS} şu şekilde hesaplanmıştır.

$$S_{DS} = 0.8 \cdot 0.702 = 0.562 \tag{3.45}$$

Bir saniye periyoda karşılık gelen spektral ivme için yerel zemin etki katsayısıF_1, $S_1 = 0.186$ değeri için Çizelge 3.2'de 0.8 olarak belirlenmiştir. Hesap spektral ivmesi, S_{D1} şu şekilde hesaplanmıştır.

$$S_{D1} = 0.80 \cdot 0.186 = 0.149 \tag{3.46}$$

Yatay elastik tasarım spektrumunun hesaplanması için öncelikle ilgili köşe periyodları, T_0 ve T_S aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. API-650 standardında ASCE 7'den farklı olarak $T_L = 4\ [s]$ olarak belirlenmektedir.

$$T_0 = 0.2 \cdot \frac{0.149}{0.562} = 0.053 \tag{3.51}$$

$$T_S = \frac{0.149}{0.562} = 0.265 \tag{3.52}$$

Tankın darbesel ve devinimsel hidrodinamik modlarının hesabında kullanılan D/H değeri şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\frac{D}{H} = \frac{18.60}{11.70} = 1.59$$

Darbesel hidrodinamik titreşim modu periyodu, T_i aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır. Darbesel periyod hesaplama katsayısının, C_i hesaplanması için Şekil 3.3'de sunulan grafikte D/H = 1.59 oranına karşılık gelen C_i değeri 6.15 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, darbesel titreşim modu için periyod, T_i ve T_c değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}}\right) \cdot \frac{6.15 \cdot 11.70}{\sqrt{\frac{0.028}{18.60}}} \left(\sqrt{\frac{800}{200 \times 10^6}}\right) = 0.083\ [\text{s}] \tag{3.57}$$

$$T_c = 1.8 \cdot 0.584 \cdot \sqrt{18.60} = 4.534 \tag{3.58}$$

K_s katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir.

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{tanh\left(\frac{3.68 \cdot 11.70}{18.60}\right)}} = 0.584 \tag{3.59}$$

Darbesel ağırlık bileşeni W_i aşağıdaki Denklem (3.54) kullanılarak belirlenir. W_i değeri hesabında tank D/H oranı 1.333'ten küçük olduğunda, etkili darbesel ağırlık, denklemi (3.55)'e göre hesaplanmıştır. Devinimsel ağırlık bileşeni W_c aşağıdaki Denklem (3.56) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_p = \pi \cdot 9.30^2 \cdot 11.70 \cdot 0.80 \cdot 9.81 = 24949.430 \text{ [kN]}$$

$$W_i = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{18.60}{11.70}\right)}{0.866 \frac{18.60}{11.70}} \cdot 24949.430 = 15951.592 \text{ [kN]} \quad (3.54)$$

$$W_c = 0.230 \cdot \frac{18.60}{11.70} \cdot \tanh\left(3.67 \frac{11.70}{18.60}\right) \cdot 24949.430 = 8944.012 \text{ [kN]} \quad (3.56)$$

Darbesel (impulsive) tasarım tepki spektrumu ivme katsayısı aşağıdaki Denklem (3.60) ile hesaplanmaktadır.

$$A_i = 0.562 \cdot \left(\frac{1.25}{4}\right) = 0.176 \quad (3.60)$$

Devinimsel (convective) tasarım tepki spektrumu ivme katsayısı aşağıdaki denklemler; $4.534 \geq 4$ olduğundan Denklem (3.62) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A_c = 1.5 \cdot 0.149 \cdot \left(\frac{4}{4.534^2}\right) \cdot \left(\frac{1.25}{2}\right) = 0.027 \leq 0.176 \quad (3.63)$$

API-650 Annex E'de düşey deprem ivmesi, sabit bir çarpan aracılığıyla tanımlanmakta olup Denklem (3.53) ile hesaplanmıştır.

$$A_v = 0.7 \cdot 0.47 \cdot 0.562 = 0.185 \quad (3.53)$$

Tank duvarında meydana gelen toplam darbesel (impulsive) etki sonucu taban kesme kuvveti V_i aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_f = 2 \cdot \pi \cdot 9.3^2 \cdot 0.028 \cdot 7.85 \cdot 9.81 = 585.885 \text{ [kN]}$$

$$W_s = 2 \cdot \pi \cdot (9.3) \cdot 12.2 \cdot 0.028 \cdot 7.85 \cdot 9.81 = 1537.161 \text{ [kN]}$$

$$V_i = 0.176 \cdot (1537.161 + 585.885 + 15951.592) = 3181.136 \text{ [kN]} \quad (3.66)$$

Tank duvarında meydana gelen toplam devinimsel (convective) etki sonucu taban kesme kuvveti V_c aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_c = 0.027 \cdot 8944.012 = 241.488 \text{ [kN]} \tag{3.67}$$

Deprem taban kesmesi, darbesel (impulsive) ve devinimsel (convektif) bileşenlerin karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplanmıştır.

$$V = \sqrt{3181.136^2 + 241.488^{\,2}} = 3190.289 \text{ [kN]} \tag{3.65}$$

Tank tabanının hemen üzerindeki seviyedeki devrilme momenti hesabına katılan darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_i = 0.375 \cdot 11.70 = 4.39 \text{ [m]} \tag{3.68}$$

Tank tabanının hemen üzerindeki seviyedeki devrilme momenti hesabına katılan devinimsel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_c = \left[1.0 \; - \frac{cosh\left(\frac{3.67 \cdot 11.70}{18.60}\right) - 1}{\frac{3.67 \cdot 11.70}{18.60} sinh\left(\frac{3.67 \cdot 11.70}{18.60}\right)}\right] 11.70 = 7.55 \text{ [m]} \tag{3.70}$$

Tank tabanının hemen altındaki devrilme momenti hesabına katılan darbesel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_{is} = 0.375 \cdot \left[1.0 \; + 1.333 \left(\frac{0.866 \cdot \frac{18.60}{11.70}}{tanh\left(0.866 \cdot \frac{18.60}{11.70}\right)} - 1 \right)\right] \cdot 11.70 = 7.69 \text{ [m]} \tag{3.71}$$

Tank tabanının hemen altındaki devrilme momenti hesabına katılan devinimsel titreşim modu eşdeğer eylemsizlik kuvvetinin tank tabanından yüksekliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_{cs} = \left[1 - \frac{cosh\left(\frac{3.67 \cdot 11.70}{18.60}\right) - 1.937}{\frac{3.67 \cdot 11.70}{18.60} sinh\left(\frac{3.67 \cdot 11.70}{18.60}\right)}\right] \cdot 11.70 = 8.50 \text{ [m]} \quad (3.73)$$

Toplam düşey deprem kuvveti ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

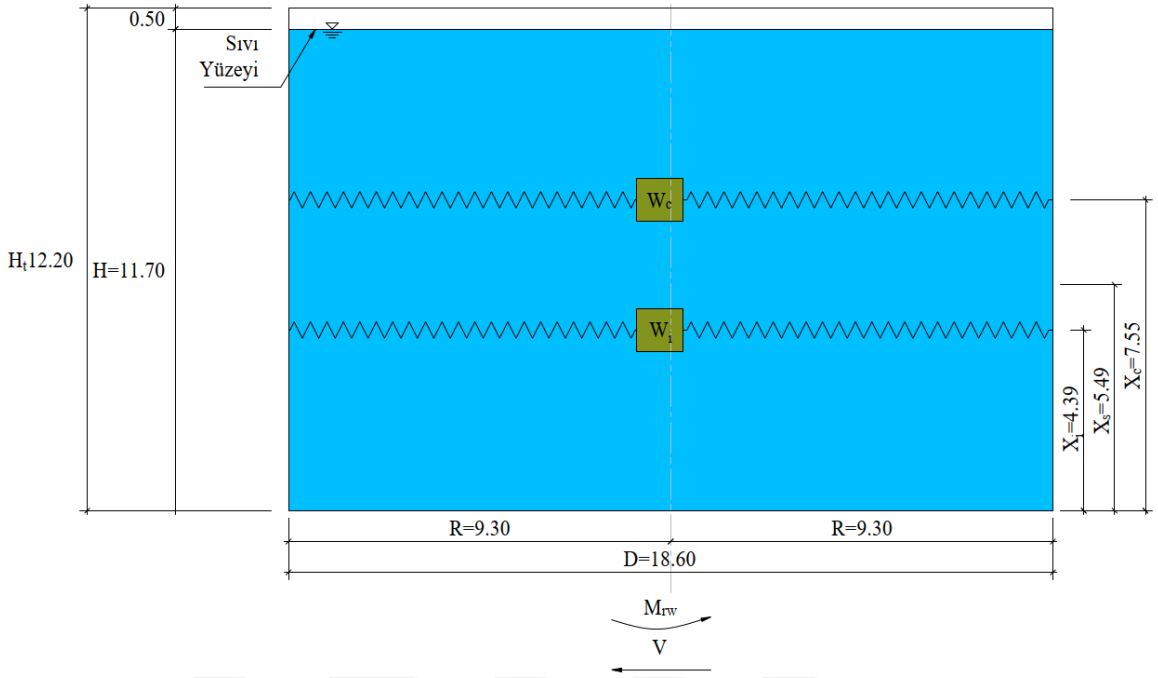
$$W_{eff} = W_s + W_c + W_i = 1537 + 8944 + 15952 = 26433 \text{ [kN]}$$

$$F_v = \pm 0.185 \cdot 26433 = 4884.775 \text{ [kN]} \quad (3.74)$$

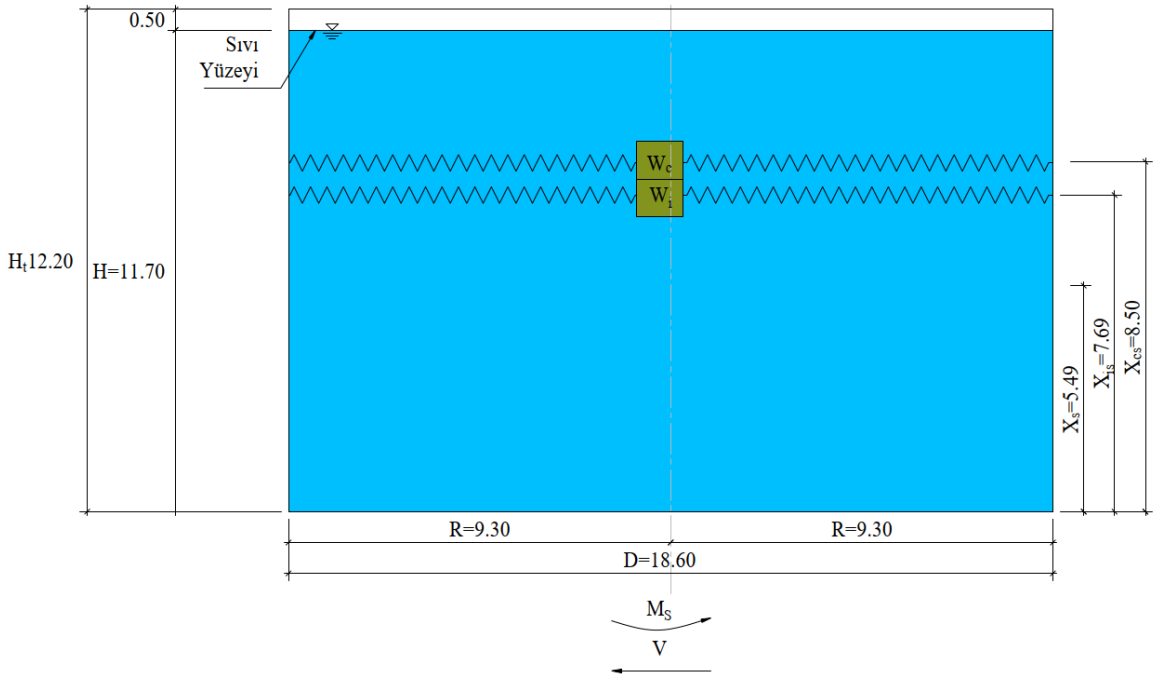
Taban hidrodinamik basınç etkisi dahil edilmeden hesaplanan; tank taban plakasının hemen üzerindeki seviyede oluşan tank devrilme momenti, M_{rw} ve tank taban plakasının hemen altındaki seviyede oluşan tank devrilme momenti, M_s aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Devrilme momentinin hesabı için dikkate alınan eşdeğer yığılı kütle yükseklikleri X_c ve X_i ilgili denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Tank için hesaplanan eşdeğer kütlelerin konumları Şekil 4.7 ve Şekil 4.6 Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

$$M_{rw} = \sqrt{[0.176 \cdot (15952 \cdot 4.39 + 1537 \cdot 5.49)]^2 + [0.027 \cdot (8944 \cdot 7.55)]^2} = 13924.3 \text{ [kN. m]} \quad (3.81)$$

$$M_s = \sqrt{[0.176 \cdot (15952 \cdot 7.69 + 1537 \cdot 5.49)]^2 + [0.027 \cdot (8944 \cdot 8.50)]^2} = 55013.9 \text{ [kN. m]} \quad (3.82)$$



Şekil 4.7. Tank taban devrilme momenti M_{rw} hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri



Şekil 4.8. Tank taban devrilme momenti M_s hesabında kullanılan kütle merkezi yükseklikleri

Tank tabanındaki dairesel bölgede yükselmeye karşı koyan kuvvet w_a aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$G_e = 0.80 \cdot (1 - 0.4 \cdot 0.185) \cdot 9.81 = 7.27 \ [\text{kN/m}^3]$$

$$w_a = 99 \cdot 0.028\sqrt{355 \cdot 10^3 \cdot 11.70 \cdot 7.27} \leq 201.1 \cdot 11.70 \cdot 18.60 \cdot 7.27 \tag{3.83}$$

$$w_a = 15232 \leq 318159 \ [\text{kN/m}]$$

Tankın duvarı ve çatısının ağırlığının, tank duvar tabanına (kabuk altına) düşen birim çevresel uzunluk başına dağıtılmış w_t yükü aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$w_t = \left[\frac{1537.161}{\pi \cdot 18.60} + 0\right] = 26.306 \ [\text{kN/m}] \tag{3.86}$$

Birim çevresel uzunluk başına tasarım basıncına bağlı olarak hesaplanan tasarım kaldırma yükü aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$w_{int} = F_v/(\pi \cdot D) = 4884.775/(\pi \cdot 18.60) = 83.595 \ [\text{kN/m}]$$

Tankların sabitlemesinde kullanılacak bağlantı elemanlarının (ankraj) gerekliliği devrilme momenti, M_{rw} esas alınarak aşağıdaki denklem ile belirlenir. Hesaplanan J değeri Çizelge 3.13'de verilen şartlara göre ankraj gerekliliği aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$J = \frac{13924.3}{18.60^2 \cdot [26.306 \cdot (1 - 0.4 \cdot 0.185) + 15232 - 0.4 \cdot 83.595]} = 0.003 \tag{3.85}$$

$J \leq 0.785$ olduğundan Çizelge 3.13'e göre tasarım deprem devrilme momenti altında hesaplanan kalkış yoktur. Tank kendinden sabitlenmiştir. Çalkalanma dalgası yüksekliği aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\delta_S = 0.42 \cdot 18.60 \cdot 0.055 = 0.430 \ [\text{m}] \tag{3.87}$$

Tankları Sismik Kullanım Grubu II olduğu için A_f yükü aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Devinimsel titreşim modu periyodu $4.53 > 4$ olduğu durumda;

$$A_f = 1.5 \cdot 0.149 \cdot 1.25 \cdot \left(\frac{4}{4.53^2}\right) = 0.055 \tag{3.89}$$

4.3. TBHSSDTDY ile API-650 Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, farklı tank geometrilerinin, tank tasarım ve deprem kullanım sınıflarının, faya olan mesafelerin, zemin sınıflarının ve sıvı yoğunluklarının, sıvı depolama tanklarının sismik tasarım parametreleri üzerindeki etkileri her iki yönetmelik kapsamında ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Bu kapsamda; farklı tank geometrilerinde darbesel ve devinimsel titreşim periyotları ve etkin kütlelerin karşılaştırılması, farklı tank geometrilerine ve tasarım/deprem kullanım sınıflarına ve faya olan uzaklıklara göre devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerleri ve farklı tank geometrilerine göre çalkalanma dalga yükseklikleri sunulmuştur.

Bölüm kapsamında elde edilen bulgular hem yönetmelikler arası yaklaşım farklılıklarının hem de çeşitli parametrelerin mühendislik tasarımındaki öneminin ortaya konulmasına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Karşılaştırmalı analizlerde kullanılmak üzere, farklı geometrik oranlara sahip 11 adet düşey silindirik tank modeli tanımlanmıştır. Bu modeller, TBHSSDTDY ve API-650 yönetmeliklerinde belirtilen H/D oranı sınırları gözetilerek oluşturulmuş ve 0.15 ila 1.5 aralığını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Geometrik etkinin incelenebilmesi için tüm modellerde yaklaşık 3080 m^3 sabit sıvı hacmi esas alınmıştır. Her iki yönetmeliğe göre tanımlı beş farklı zemin sınıfı için ortalama kayma dalgası hızları kullanılarak zemin etkisi modellenmiş; sahaya özel değerlendirme gerektiren sınıflar kapsam dışı bırakılmıştır. Bunun yanı sıra, TBHSSDTDY'de yer alan aktif fay hattı mesafesine bağlı parametreler 10 km, 20 km ve 30 km uzaklıklar üzerinden modellenmiş; farklı sıvı yoğunluklarının yapısal etkilerini değerlendirmek amacıyla üç sıvı türü (su, ham petrol, sülfürik asit) dikkate alınmıştır.

4.3.1. Farklı Tank Geometrilerine Göre T_i Darbesel ve T_c Devinimsel Periyotların Karşılaştırması

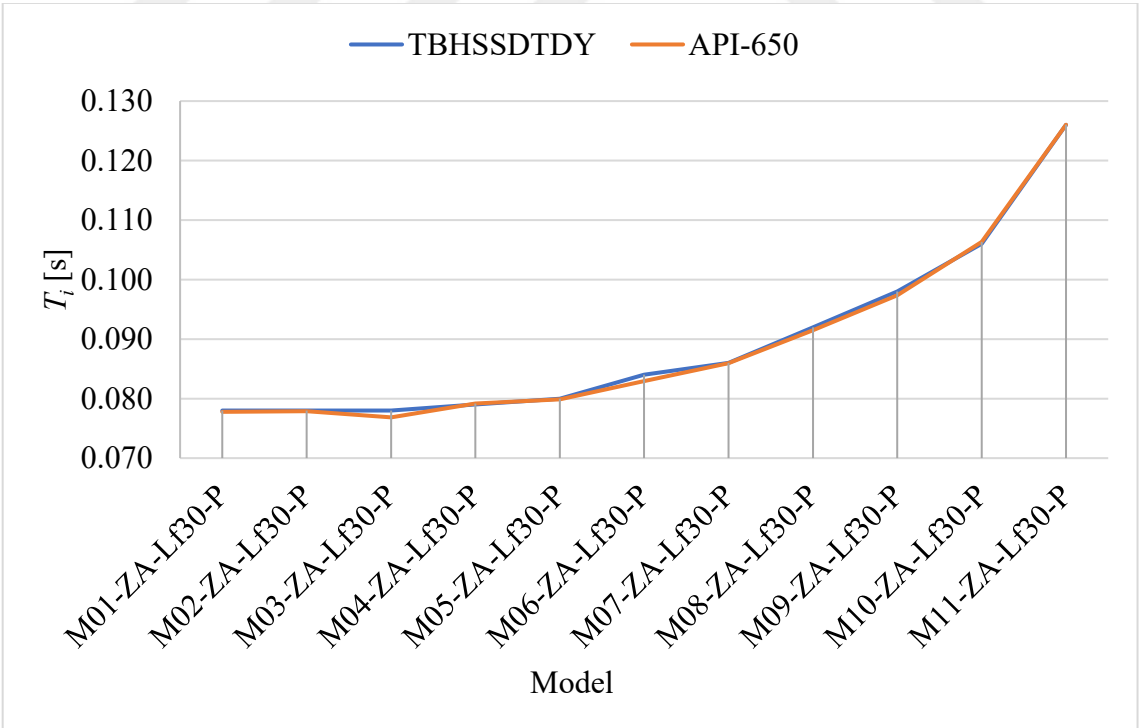
Bu bölümde, içerdikleri sıvı olarak petrol ürünün depolanması amacıyla kullanılan, düşey silindirik geometriye sahip toplam 11 adet tank modeli değerlendirmeye alınmıştır. Her bir model, farklı çap ve yükseklik oranlarını temsil edecek şekilde oluşturulmuş olup, geometrik parametrelerin değişiminin tank sistemlerinin dinamik titreşim karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tüm analizlerde zemin sınıfı, ZA ve A tipi zemin sınıfı olarak sabitlenmiş ve tankların bilinen aktif faya olan mesafesi de tüm modeller için sabit L_f = 30 m olarak tanımlanmıştır. Her iki yönetmelik de titreşim periyotlarına etkiyen unsurlar depolanan sıvının yoğunluğu, tank duvarının elastisite modülü ve kalınlığı, tank çapı ve sıvı yüksekliğidir.

Çalışmada, titreşim periyotlarının, farklı geometrik parametreler açısından değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda; her bir modelin darbesel (impulsive) ve devinimsel (convective) modlara karşılık gelen doğal titreşim periyotları ayrı ayrı hesaplanmış ve bu periyotlar, çap/yükseklik oranlarındaki değişimlere bağlı olarak karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen darbesel titreşim periyodu T_i ile devinimsel titreşim periyodu T_c değerleri, çizelge (Bkz. Çizelge 4.5) ve grafiksel (Bkz. Şekil 4.7) olarak sunularak, farklı geometrilere sahip tankların dinamik davranışlarındaki periyot farklılıklarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

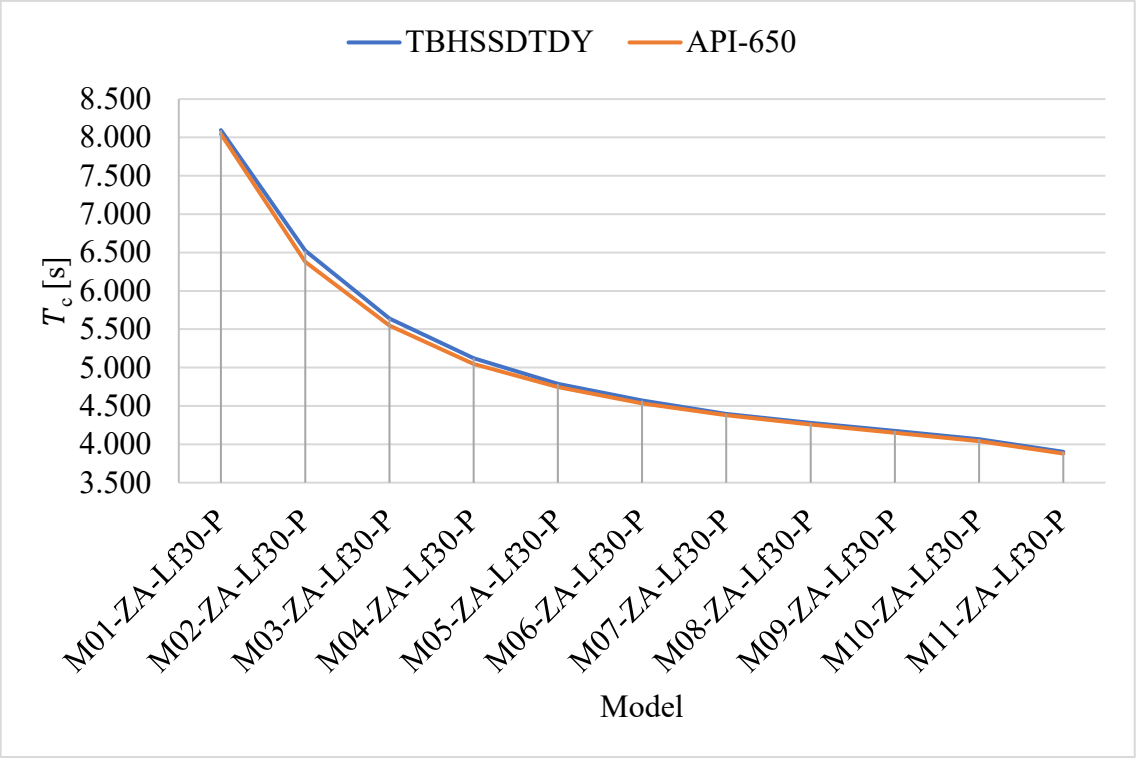
Darbesel (impulsive) periyot değeri T_i, her iki yönetmelikte de çap (veya yarıçapı), sıvı yüksekliği ve kütle yoğunluğu, tank duvarının et kalınlığı ve elastisite modülü gibi fiziksel parametrelerin yanı sıra, yönetmeliklerde tablo ve grafikler aracılığıyla tanımlanan darbesel titreşim modu periyot katsayısının bir fonksiyonu olarak belirlenmektedir. Bu bağlamda, yönetmelikler arasında farklılık gösteren temel unsurlar; periyot hesaplamasında kullanılan katsayılar (C_i) ve formüllerde yer alan çarpanlardır.

Çizelge 4.5. Geometrisi farklı tank modelleri için T_i darbesel (impulsive) ve T_c devinimsel (convective) sonuçları

Model İsmi	H/D	TBHSSDTDY T_i [s]	API-650 T_i [s]	TBHSSDTDY T_c [s]	API-650 T_c [s]
M01-ZA-L_f30-P	0.15	0.078	0.078	8.095	8.045
M02-ZA-L_f30-P	0.23	0.078	0.078	6.526	6.379
M03-ZA-L_f30-P	0.32	0.078	0.077	5.640	5.547
M04-ZA-L_f30-P	0.41	0.079	0.079	5.120	5.046
M05-ZA-L_f30-P	0.52	0.080	0.080	4.787	4.746
M06-ZA-L_f30-P	0.63	0.084	0.083	4.572	4.534
M07-ZA-L_f30-P	0.74	0.086	0.086	4.395	4.380
M08-ZA-L_f30-P	0.87	0.092	0.092	4.277	4.259
M09-ZA-L_f30-P	1.01	0.098	0.097	4.173	4.149
M10-ZA-L_f30-P	1.18	0.106	0.106	4.067	4.043
M11-ZA-L_f30-P	1.5	0.126	0.126	3.902	3.879



Şekil 4.9. Geometrisi farklı tank modelleri için T_i değerlerinin TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması



Şekil 4.10. Farklı tank modelleri için T_c değerlerinin TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması

Hesaplamalar sonucunda Çizelge 4.5 ve Şekil 4.9 bağlamında her bir tank için T_i değeri incelendiğinde, her iki yönetmeliğe göre hesaplanan T_i değerleri arasındaki maksimum fark %1.29 olmuş ortalama sapma değeri ise %0.32 olduğu görülmüştür. Her iki yönetmeliğin darbesel periyot değerleri bakımından büyük ölçüde uyumlu ve oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Devinimsel (convective) periyot değeri T_c, her iki yönetmelikte de çap (veya yarıçapı), sıvı yüksekliği fiziksel parametrelerin yanı sıra, TBHSSDTDY yönetmeliğinde tablo aracılığıyla tanımlanan devinimsel titreşim modu periyot katsayısı (C_c), API-650 de ise ampirik bir formül ile ifade edilen K_s'nin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Bu bağlamda, yönetmelikler arasında temel fark, periyot hesaplamasında kullanılan katsayılar (C_c ve K_s) ile formüllerde yer alan çarpanlardır. Hesaplamalar sonucunda Çizelge 4.5 ve Şekil 4.10 bağlamında her bir tank için T_c değeri incelendiğinde, her iki yönetmeliğe göre hesaplanan T_c değerleri arasındaki maksimum fark %2.28 olmuş ortalama sapma değeri ise %0.93 olduğu görülmüştür. Her iki yönetmeliğin darbesel periyot değerleri bakımından

büyük ölçüde uyumlu ve oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Darbesel (T_i) ve devinimsel (T_c) periyot değerleri incelendiğinde; sıvı yüksekliği (H) en büyük, tank çapı (D) ise en küçük olan M11 modelinde T_i değeri, buna karşılık sıvı yüksekliği (H) en küçük, tank çapı (D) ise en büyük M01 modelinde T_c değeri en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Her iki yönetmelik kapsamında farklı geometrik özelliklere sahip 11 model üzerinden yapılan analizler sonucunda, sıvı yüksekliğinin artması ve çapın azalmasıyla yani H/D oranının yükselmesi durumunda, impulsive (darbesel) titreşim periyodu T_i değerinin arttığı, buna karşılık devinimsel (convective) titreşim periyodu T_c değerinin ise azaldığı görülmüştür. Bu sonuç, H/D oranındaki artışla birlikte tankın darbesel (impulsive) modda daha sünek bir davranış sergilemesinden kaynaklanırken, devinimsel moda ait sıvı kütlesinin azalması nedeniyle çalkalanma periyodunun da azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla, tank geometrisindeki değişimlerin, etkili sıvı kütlesinin titreşim modlarına katkısı üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir.

4.3.2. Farklı Tank Geometrilerine Göre Darbesel m_i ve Devinimsel m_c Titreşim Modlarına Ait Etkin Kütlelerin Karşılaştırması

Bu bölümde, içerdikleri sıvı olarak petrol ürünün depolanması amacıyla kullanılan, farklı geometrik özelliklere sahip 11 adet düşey silindirik tank modeli değerlendirmeye alınmıştır. Her bir model, farklı çap ve yükseklik oranlarını temsil edecek şekilde oluşturulmuş olup, geometrik parametrelerin değişiminin etkin kütlelerin üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tüm analizlerde zemin sınıfı, ZA ve A tipi zemin sınıfı olarak sabitlenmiş ve tankların bilinen aktif faya olan mesafesi de tüm modeller için sabit L_f = 30 m olarak tanımlanmıştır. Her iki yönetmelik de etkin kütleleri etkiyen unsurlar depolanan sıvının yoğunluğu, tank çapı ve sıvı yüksekliği ve etkin kütle hesap katsayısıdır. Etkin kütle hesaplamasında kullanılan katsayı, TBHSSDTDY kapsamında tankın yüksekliğinin çapına oranı (H/R) esas alınarak Çizelge 3.6 ile belirlenmektedir. API-650 standardında ise etkin kütle değeri, tank çapı (D) ve sıvı yüksekliği (H) gibi temel geometrik parametreleri içeren ampirik bir formülasyon aracılığıyla belirlenmektedir.

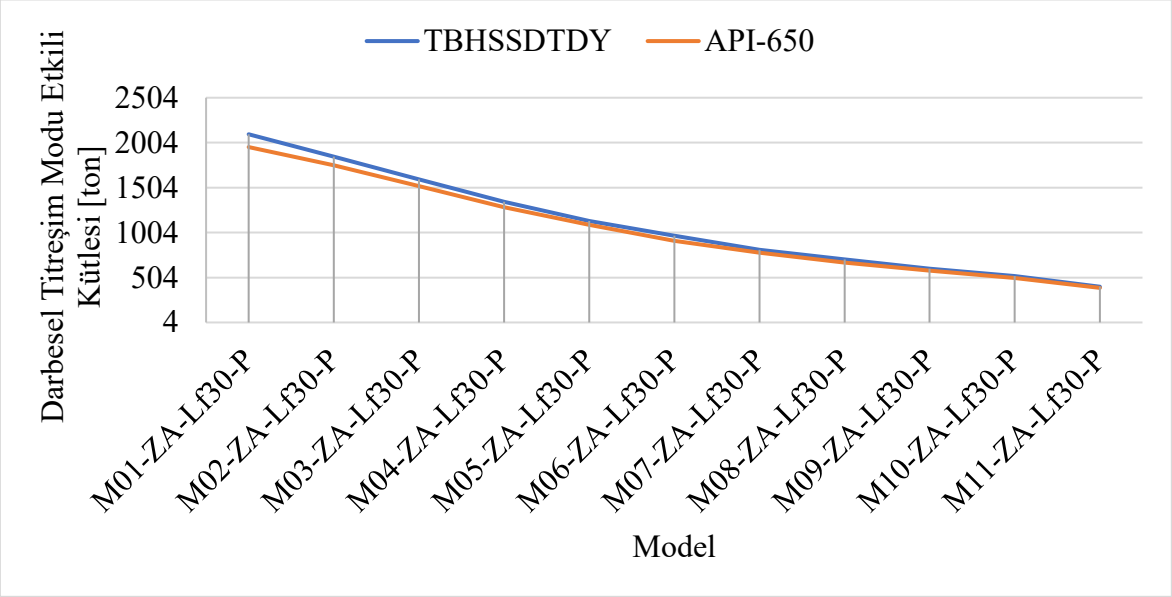
Çalışma kapsamında, tank çapı ve sıvı yüksekliği gibi temel geometrik parametrelerdeki değişimlerin, sistemin darbesel (impulsive) ve devinimsel (convective) titreşim modlarına karşılık gelen etkin kütle değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Her bir model için, darbesel moda karşılık gelen etkin kütle m_i ve W_i ile devinimsel moda karşılık gelen etkin kütle m_c ve W_c ayrı ayrı hesaplanmış, bu değerler tank geometrisindeki farklılıklar doğrultusunda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen etkin kütle değerleri hem çizelge (Bkz. Çizelge 4.6) hem de grafiksel (Bkz. Şekil 4.11, Şekil 4.12) olarak sunularak, farklı geometrilere sahip tank sistemlerinin dinamik davranışlarına etki eden etkili kütle değerlerindeki farklılıkların değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.6. Geometrisi farklı tank modelleri için m_i darbesel titreşim modu etkili kütlesi ve m_c devinimsel titreşim modu etkili kütlesi sonuçları

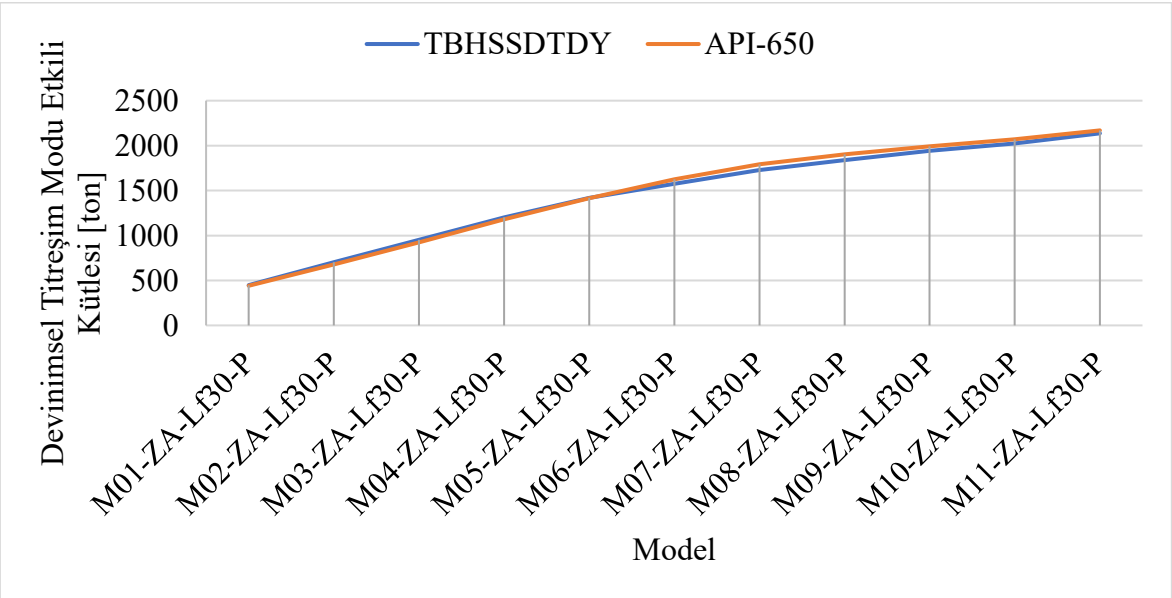
Model İsmi	**TBHSSDTDY m_i**	**API-650 W_i**	**TBHSSDTDY m_c**	**API-650 W_c**
	[ton]	**[ton]**	**[ton]**	**[ton]**
M01-ZA-L_f30-P	447.87	440.76	2096.8	1954.4
M02-ZA-L_f30-P	701.34	678.36	1847.1	1751.2
M03-ZA-L_f30-P	952.43	921.95	1593.5	1520.6
M04-ZA-L_f30-P	1202.14	1179.72	1344.4	1286.4
M05-ZA-L_f30-P	1418.74	1415.33	1131.7	1088.1
M06-ZA-L_f30-P	1576.21	1626.05	967.1	911.7
M07-ZA-L_f30-P	1728.35	1791.09	811.5	781.1
M08-ZA-L_f30-P	1836.94	1902.91	703.9	670.8
M09-ZA-L_f30-P	1941.57	1990.93	600.0	580.2
M10-ZA-L_f30-P	2023.91	2071.32	519.0	497.4
M11-ZA-L_f30-P	2136.33	2169.35	400.9	388.1

Farklı tank modelleri için darbesel titreşim modu etkili kütlesi değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Farklı tank modelleri için darbesel titreşim modu etkili kütlesi TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması

Farklı tank modelleri için devinimsel titreşim modu etkili kütlesi değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Farklı tank modelleri için devinimsel titreşim modu etkili kütlesi TBHSSDTDY ve API-650 yaklaşımlarına göre karşılaştırılması

Devinimsel titreşim moduna karşılık gelen etkili kütle (m_i) ve darbesel titreşim moduna karşılık gelen etkili kütle (m_c), her iki yönetmelikte de sıvı tankının çapı (veya yarıçapı), sıvı yüksekliği gibi fiziksel parametreler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDTDY) devinimsel titreşim modu etkili kütlesi katsayısı (a_i) tablo aracılığıyla tanımlanırken, API-650 yönetmeliğinde bu oran, toplam sıvı kütlesine göre ampirik bir formül ile belirlenmiştir.

Bu bağlamda, her iki yönetmelik arasındaki temel fark, etkili kütle hesaplamasında kullanılan katsayıların ve çarpanların farklılık göstermesidir. TBHSSDTDY yönetmeliğinde bu katsayılar tablo aracılığıyla belirlenirken, API-650 yönetmeliğinde ise ampirik formüller ve belirli çarpanlar kullanılarak hesaplama yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler, Çizelge 4.6, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'da sunulmuştur. Bu verilere göre, her iki yönetmelik de devinimsel ve darbesel titreşim modları açısından birbirine oldukça yakın sonuçlar elde etmiştir.

İncelenen 11 farklı modelde, devinimsel titreşim moduna karşılık gelen etkili kütle değeri (m_i) için maksimum %3.57'lük bir fark gözlemlenirken, darbesel titreşim moduna karşılık gelen etkili kütle değeri (m_c) için ise en fazla %7.03'luk bir fark tespit edilmiştir. Bu bulgular, her iki yönetmeliğin etkili kütle hesaplamaları açısından büyük ölçüde uyumlu olduğunu ve teorik anlamda benzer sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Her iki yönetmeliğe göre yapılan 11 farklı geometrideki model sonuçları incelendiğinde, sıvı yükseklik artıp, çap azaldıkça yani H/D arttıkça her iki yönetmelikte de m_i ve W_i değeri artmakta, m_c ve W_c değeri azalmaktadır. Bu durum, H/D oranındaki artışın, tank içerisindeki sıvının çalkalanma (devinimsel) etkisini azaltırken, tank cidarına aktarılan darbesel etkiyi artırmasından kaynaklanmaktadır.

4.3.3. Farklı Tank Geometrisine ve Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Bağlı Olarak Devrilme Momentlerinin ve Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırması

Sıvı depolama tanklarının deprem yüklerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere, tankların kullanım amacı, depolanan sıvının tehlike sınıfı ve deprem sonrası işlevsellik durumu esas alınarak üç farklı tasarım sınıfı tanımlanmıştır. İlgili sınıflandırma TBHSSDTDY'de performansa dayalı tasarım anlayışı doğrultusunda kontrol edilmesi gereken hasar sınır durumları ile değerlendirilmekte ve farklı deprem yer hareketi düzeyleri için öngörülen performans hedefleri doğrultusunda yönetmelikte detaylandırılmaktadır.

Bu bölümde, petrol depolama amacıyla kullanılan tank tasarım sınıfı (TTS) ve deprem kullanım sınıfı (DKS) her iki yönetmelik için II kapsamında, farklı geometrik özelliklere sahip 11 adet düşey silindirik tank modeli için 5 farklı zemin sınıfı (ZA–ZE) ele alınmıştır. Modellerin tamamında aktif faya olan uzaklık L_f = 30 m olarak sabitlenmiştir. TBHSSDTDY kapsamında, Tank Tasarım Sınıfı-II için tasarım kontrollü hasar sınır durumu esas alınarak (Bkz. Çizelge 3.5) DD-2 deprem düzeyine göre gerçekleştirilmektedir. Buna karşılık, API-650 standardında tank tasarım sınıflarına bağlı olarak deprem düzeyi ayrımı yapılmamaktadır.

Çalışma kapsamında, tankın tabanındaki düzlemlerin farklı konumlarına bağlı olarak, farklı zemin sınıfı ve farklı geometrilerdeki tankların devrilme momentlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Tank tabanının hemen üzerindeki düzlemdeki devrilme momenti, TBHSSDTDY yönetmeliği kapsamında M_{OT} ve API-650 yönetmeliğinde M_{RW} terimleri ile gösterilirken, tank tabanının altındaki düzlemdeki devrilme momenti ise TBHSSDTDY yönetmeliğinde M'_{OT} ve API-650 yönetmeliğinde M_s terimleri ile tanımlanmaktadır. Tank duvarlarının alt seviyesine etkiyen toplam kesme kuvveti, TBHSSDTDY yönetmeliği kapsamında V_d ve API-650 yönetmeliğinde V ile terimleri ile tanımlanmaktadır.

TBHSSDTDY ve API-650 standartlarında devrilme momenti hesabı, darbesel W_i ve devinimsel W_c sıvı kütle bileşenlerinin etkili yüksekliklerde oluşturduğu momentlerin birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. API-650'de darbesel ve devinimsel bileşenlerden kaynaklanan momentler karelerinin toplamının karekökü yöntemiyle, TBHSSDTDY'de ise moment bileşenlerinin doğrudan toplanmasıyla elde edilmektedir. Her iki yönetmelik için devrime momentinin farklı düzlemlerdeki değerleri Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

Her iki yönetmelik kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) değerleri, farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı zemin sınıflarına göre M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT}	**API-650** M_{RW}	**TBHSSDTDY** M'_{OT}	**API-650** M_s
		[kN.m]	**[kN.m]**	**[kN.m]**	**[kN.m]**
ZEMİN SINIFI ZA V_{s30}=1600	M01-ZA-L_f30-P	7833.8	1561.2	45924.6	23230.3
	M02-ZA-L_f30-P	15987.0	3149.7	60044.3	30465.4
	M03-ZA-L_f30-P	25921.0	5149.9	67671.1	36786.6
	M04-ZA-L_f30-P	38537.7	7751.9	76451.1	43100.0
	M05-ZA-L_f30-P	53000.6	10691.4	84127.7	49151.2
	M06-ZA-L_f30-P	68000.6	13924.3	95889.9	55013.9
	M07-ZA-L_f30-P	84288.7	17105.1	104606.9	60640.4
	M08-ZA-L_f30-P	101069.0	20999.1	117668.4	69979.3
	M09-ZA-L_f30-P	119878.7	25190.9	131628.0	79921.4
	M10-ZA-L_f30-P	141618.5	30123.8	151136.5	91447.3
	M11-ZA-L_f30-P	183690.7	38951.0	190098.6	111816.4

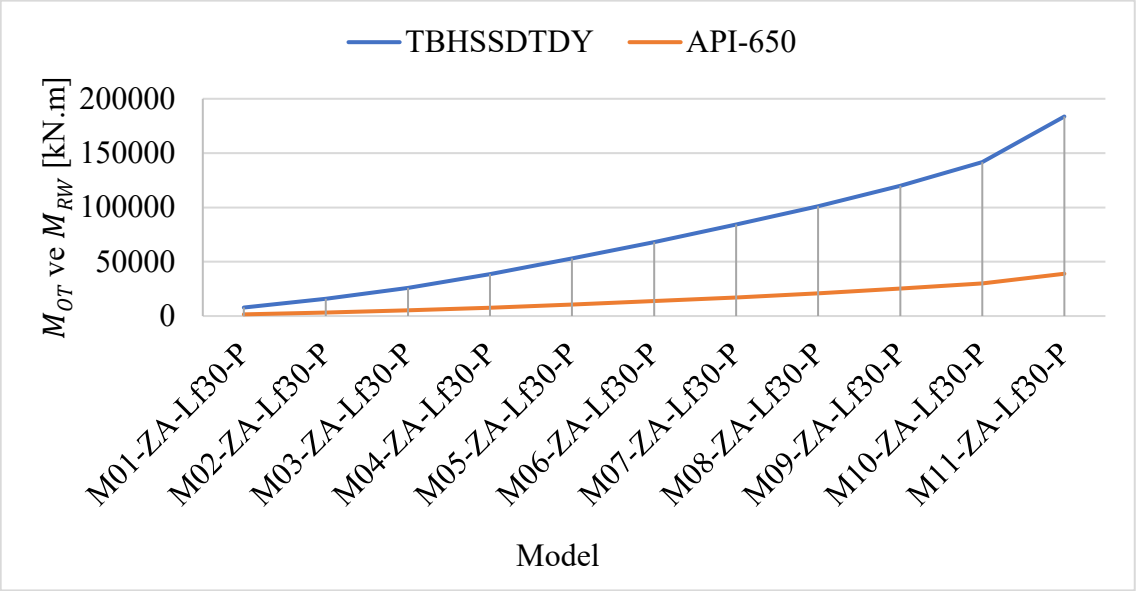
Çizelge 4.7. Farklı zemin sınıflarına göre M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) (Devam)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT} **[kN.m]**	**API-650** M_{RW} **[kN.m]**	**TBHSSDTDY** M'_{OT} **[kN.m]**	**API-650** M_s **[kN.m]**
ZEMIN SINIFI ZB V_{s30}=950	M01-ZB-L_f30-P	8673.5	1940.4	50750.2	25947.7
	M02-ZB-L_f30-P	17712.3	3913.8	66587.1	34004.0
	M03-ZB-L_f30-P	28759.8	6416.0	75277.8	41058.2
	M04-ZB-L_f30-P	42868.6	9641.4	85250.4	48089.9
	M05-ZB-L_f30-P	59062.4	13302.4	93922.3	54839.3
	M06-ZB-L_f30-P	75830.5	17329.9	107073.7	61379.2
	M07-ZB-L_f30-P	94181.3	21283.6	116983.6	67653.4
	M08-ZB-L_f30-P	113025.4	26125.7	131664.0	78069.0
	M09-ZB-L_f30-P	134186.3	31352.5	147388.2	89162.3
	M10-ZB-L_f30-P	158550.6	37487.1	169244.4	102017.8
	M11-ZB-L_f30-P	206008.0	48468.3	213216.9	124737.1
ZEMIN SINIFI ZC V_{s30}=500	M01-ZC-L_f30-P	12267.1	2293.1	71212.7	27883.0
	M02-ZC-L_f30-P	25013.2	4606.0	92999.7	36367.0
	M03-ZC-L_f30-P	40309.4	7506.4	103965.6	43854.4
	M04-ZC-L_f30-P	59817.8	11202.5	117408.8	51359.7
	M05-ZC-L_f30-P	81519.3	15297.5	128530.0	58471.5
	M06-ZC-L_f30-P	104434.5	19858.4	146482.5	65494.0
	M07-ZC-L_f30-P	128967.0	24311.0	159517.1	72182.4
	M08-ZC-L_f30-P	154060.0	29701.2	178990.1	83158.5
	M09-ZC-L_f30-P	182531.7	35574.8	200178.5	94948.8
	M10-ZC-L_f30-P	215043.9	42468.3	229309.6	108610.2
	M11-ZC-L_f30-P	278503.9	54813.1	288107.6	132752.1

Çizelge 4.7. Farklı zemin sınıflarına göre M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) (Devam)

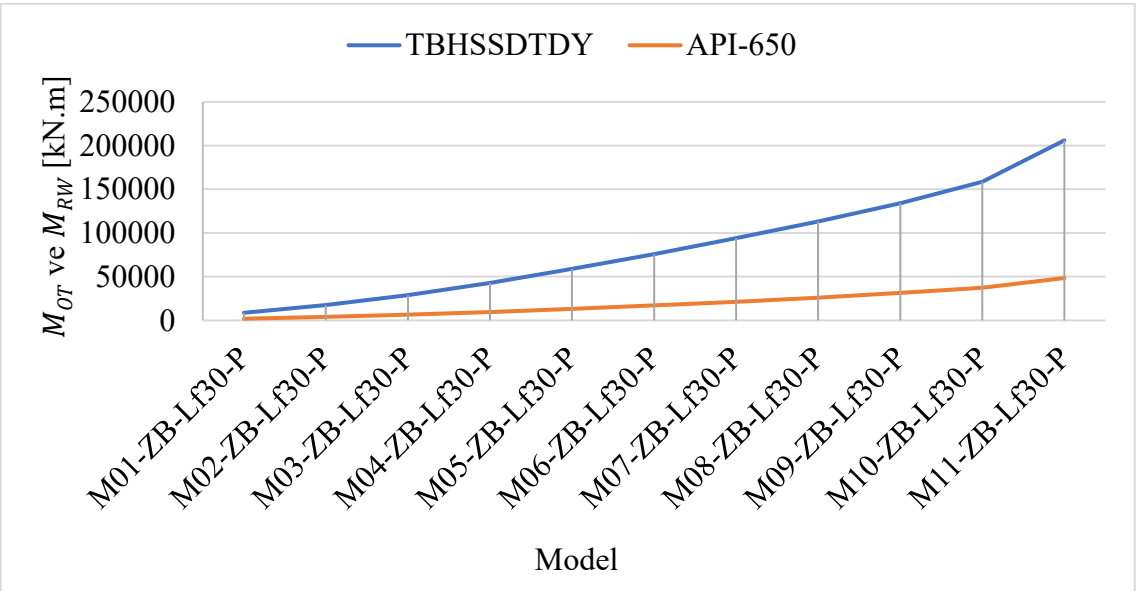
	Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT}	**API-650** M_{RW}	**TBHSSDTDY** M'_{OT}	**API-650** M_s
		[kN.m]	**[kN.m]**	**[kN.m]**	**[kN.m]**
ZEMIN SINIFI ZD V_{s30}=250	M01-ZD-L_f30-P	11382.0	2669.4	66468.1	29854.8
	M02-ZD-L_f30-P	23135.2	5337.4	84913.0	38658.5
	M03-ZD-L_f30-P	36886.2	8626.5	92915.2	46511.0
	M04-ZD-L_f30-P	53707.0	12777.2	103244.9	54402.6
	M05-ZD-L_f30-P	72514.3	17315.4	112570.3	61885.8
	M06-ZD-L_f30-P	93712.1	22325.2	130087.7	69214.4
	M07-ZD-L_f30-P	116063.1	27254.6	142636.8	76270.0
	M08-ZD-L_f30-P	142759.1	33258.7	165158.1	87915.3
	M09-ZD-L_f30-P	173793.7	39752.3	190145.2	100345.1
	M10-ZD-L_f30-P	212990.5	47384.7	226796.9	114750.6
	M11-ZD-L_f30-P	281587.6	60972.5	291125.9	140066.5
ZEMIN SINIFI ZE V_{s30}=150	M01-ZE-L_f30-P	12258.9	3067.8	71874.6	31652.3
	M02-ZE-L_f30-P	24947.4	6123.7	90105.7	40418.7
	M03-ZE-L_f30-P	39355.5	9761.5	96505.0	48344.5
	M04-ZE-L_f30-P	55926.6	14202.0	104904.7	56349.9
	M05-ZE-L_f30-P	73962.0	18979.3	112682.4	63989.1
	M06-ZE-L_f30-P	94077.6	24227.7	128765.9	71501.3
	M07-ZE-L_f30-P	114893.5	29360.2	139914.5	78744.7
	M08-ZE-L_f30-P	139314.1	35616.1	160180.6	90667.7
	M09-ZE-L_f30-P	167460.1	42381.6	182538.5	103412.8
	M10-ZE-L_f30-P	202225.7	50275.3	214826.1	118064.7
	M11-ZE-L_f30-P	281567.1	64493.8	290811.2	144130.5

ZA zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.13'de sunulmuştur.



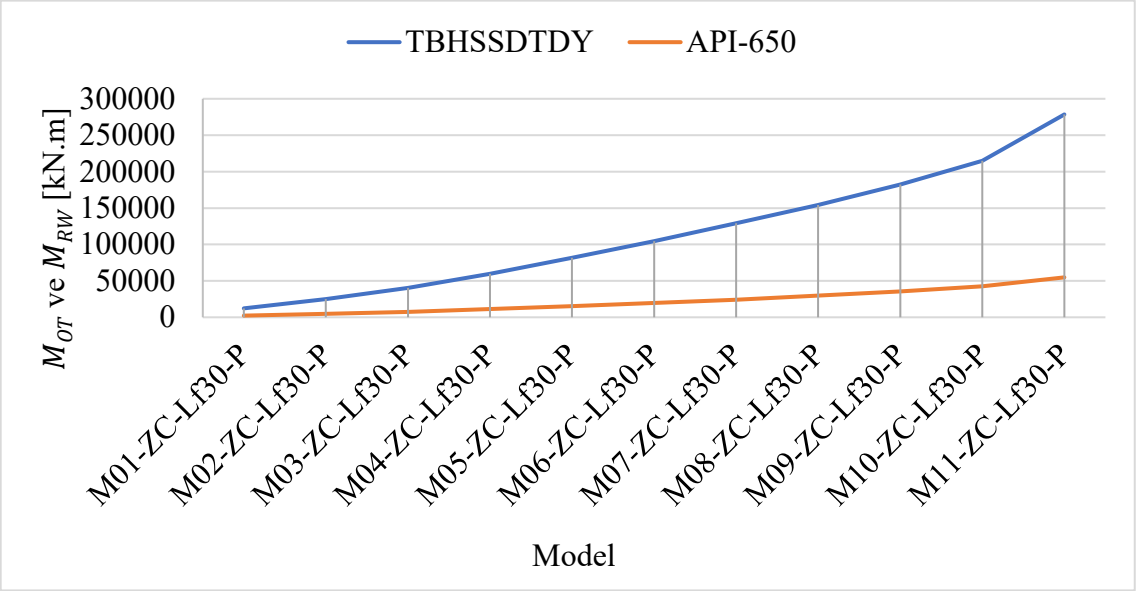
Şekil 4.13. ZA zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZB zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.14'de sunulmuştur.



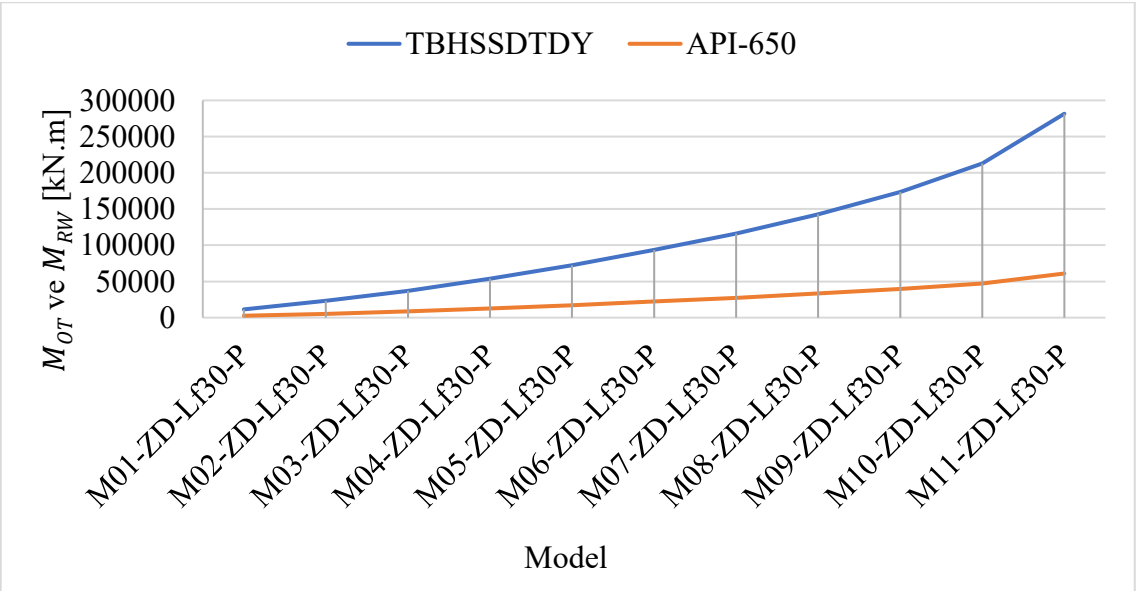
Şekil 4.14. ZB zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZC zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.15'de sunulmuştur.



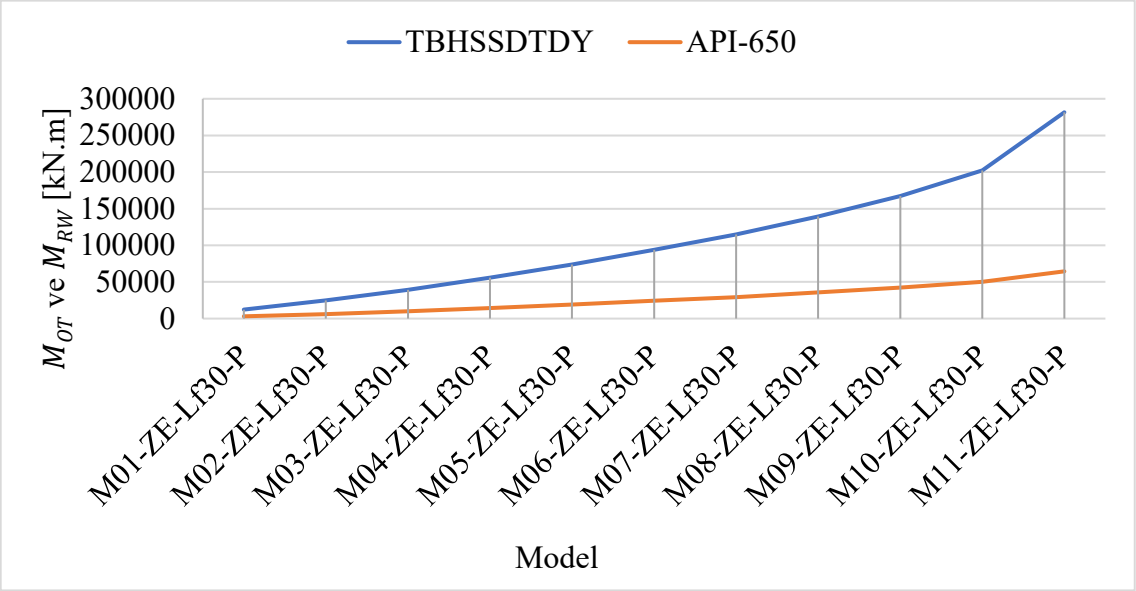
Şekil 4.15. ZC zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZD zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.16'da sunulmuştur.



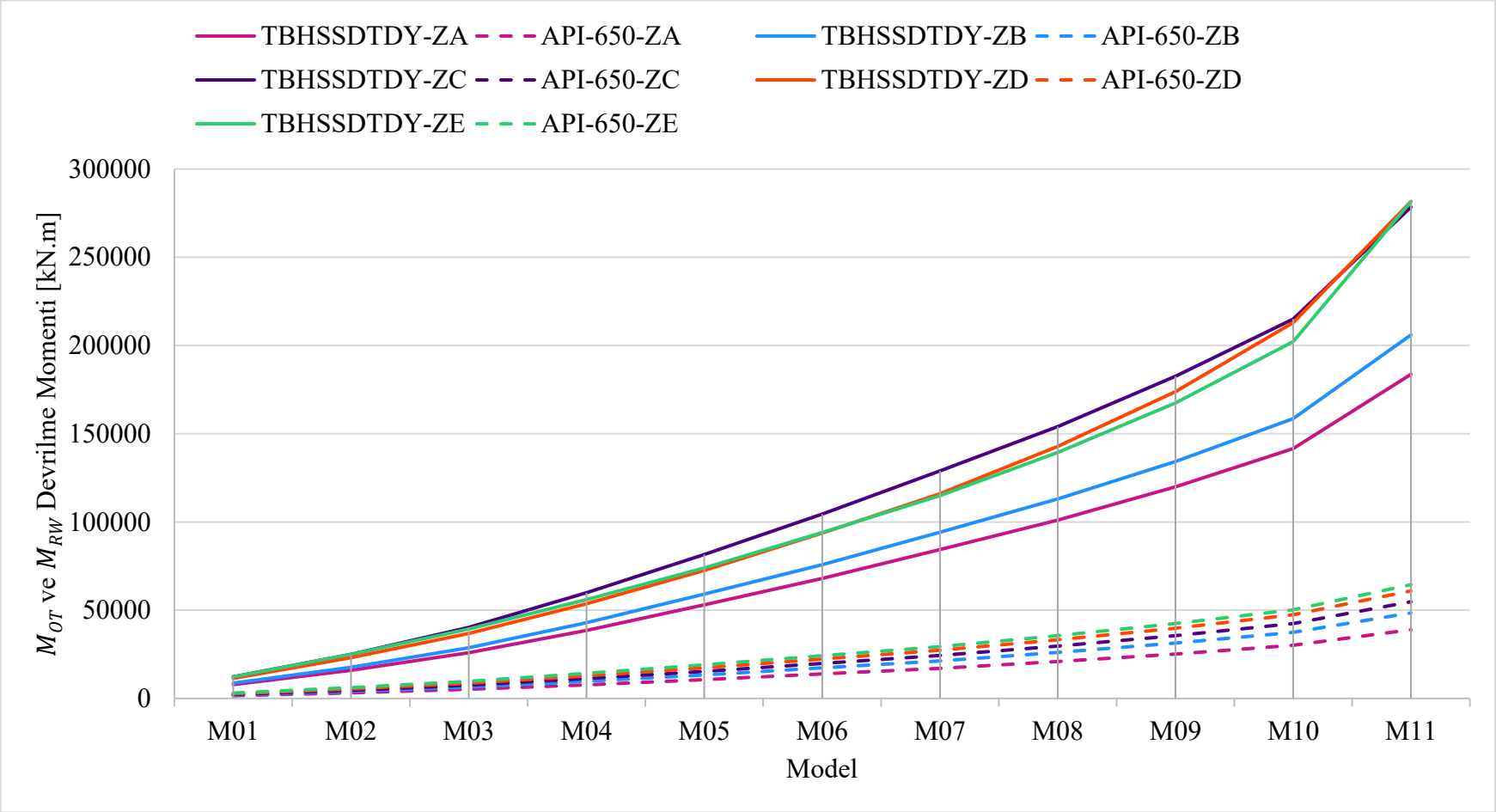
Şekil 4.16. ZD zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZE zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.17'de sunulmuştur.



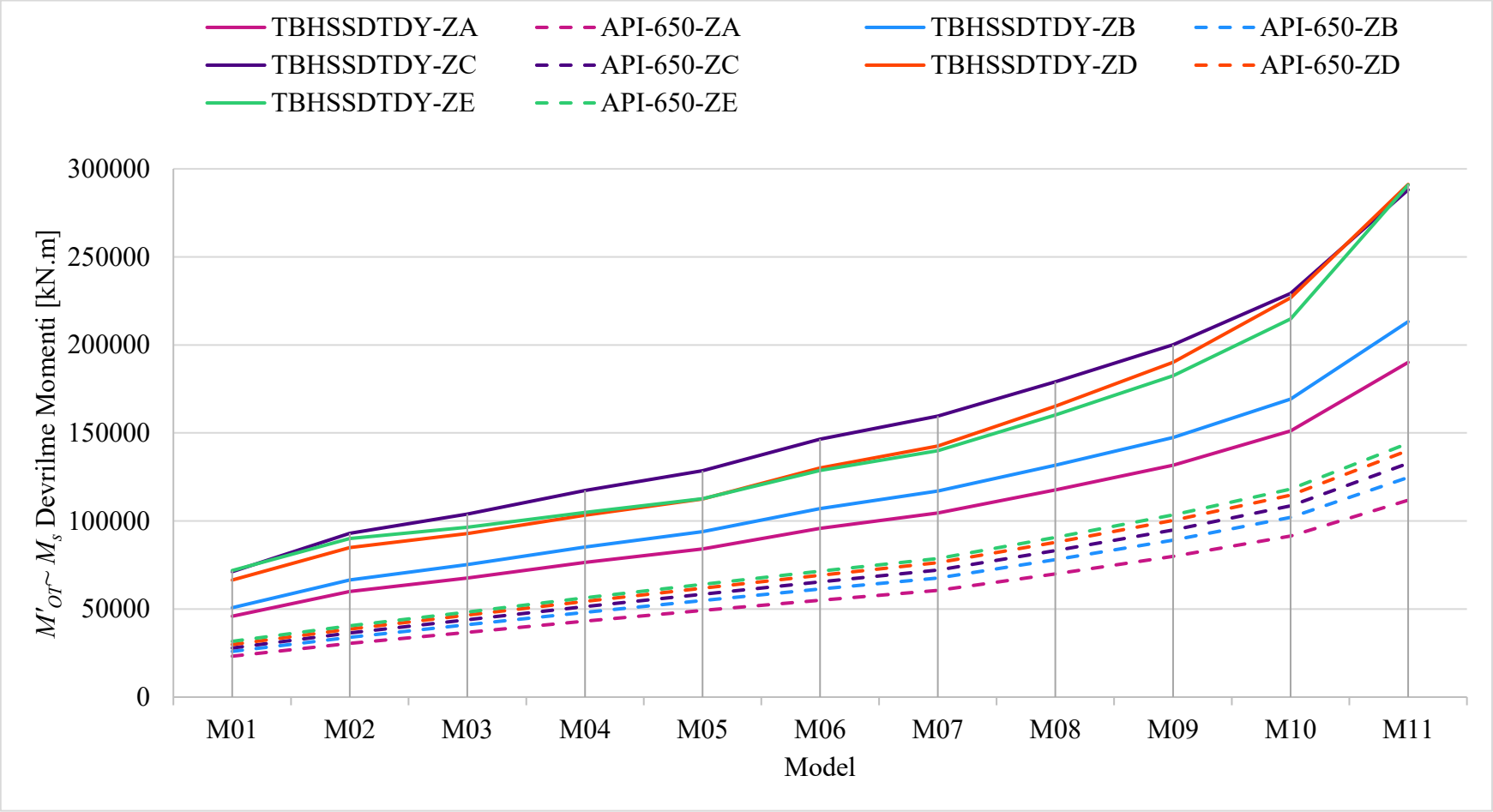
Şekil 4.17. ZE zemin sınıfları M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

Tüm zemin sınıfları için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.18'da sunulmuştur.



Şekil 4.18. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (M_{OT}) ve API-650 (M_{RW}) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

Tüm zemin sınıfları için oluşturulan tank modellerine ait M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.19'da sunulmuştur.



Şekil 4.19. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (M'_{OT}) ve API-650 (M_s) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

Her iki yönetmelik kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen toplam kesme kuvveti değerleri, farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları (TTS-II) (DKS- II)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
		[kN]	**[kN]**
ZEMIN SINIFI ZA V_{s30}=1600	M01-ZA-L_f30-P	4068.0	1042.5
	M02-ZA-L_f30-P	6221.0	1478.8
	M03-ZA-L_f30-P	8212.0	1912.2
	M04-ZA-L_f30-P	10079.0	2374.6
	M05-ZA-L_f30-P	11726.0	2805.0
	M06-ZA-L_f30-P	12991.0	3190.3
	M07-ZA-L_f30-P	14204.0	3503.0
	M08-ZA-L_f30-P	15195.0	3713.8
	M09-ZA-L_f30-P	16205.0	3899.2
	M10-ZA-L_f30-P	17185.0	4075.3
	M11-ZA-L_f30-P	18873.0	4307.1
ZEMIN SINIFI ZB V_{s30}=950	M01-ZB-L_f30-P	4517.0	1296.5
	M02-ZB-L_f30-P	6913.0	1838.9
	M03-ZB-L_f30-P	9141.0	2380.6
	M04-ZB-L_f30-P	11245.0	2954.2
	M05-ZB-L_f30-P	13101.0	3490.2
	M06-ZB-L_f30-P	14521.0	3970.0
	M07-ZB-L_f30-P	15904.0	4358.8
	M08-ZB-L_f30-P	17026.0	4620.9
	M09-ZB-L_f30-P	18171.0	4852.1
	M10-ZB-L_f30-P	19271.0	5071.1
	M11-ZB-L_f30-P	21195.0	5359.5

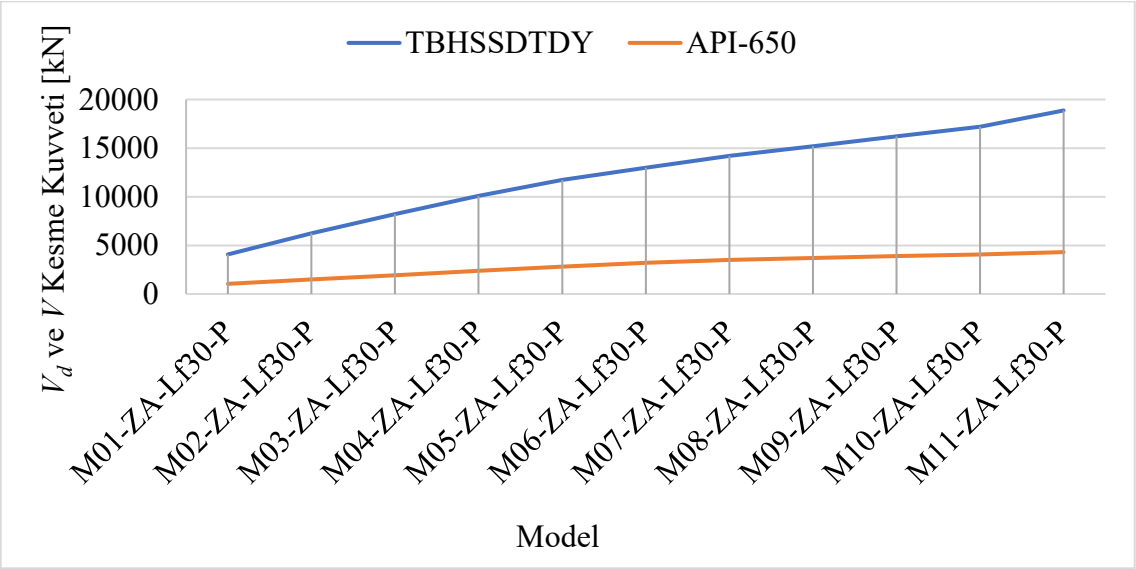
Çizelge 4.8. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları (TTS-II) (DKS- II) (Devam)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
		[kN]	**[kN]**
ZEMIN SINIFI ZC Vs30=500	M01-ZC-L_f30-P	6274.0	1486.7
	M02-ZC-L_f30-P	9600.0	2108.4
	M03-ZC-L_f30-P	12599.0	2721.4
	M04-ZC-L_f30-P	15443.0	3364.3
	M05-ZC-L_f30-P	17857.0	3955.8
	M06-ZC-L_f30-P	19752.0	4491.9
	M07-ZC-L_f30-P	21537.0	4925.1
	M08-ZC-L_f30-P	22988.0	5212.9
	M09-ZC-L_f30-P	24506.0	5470.6
	M10-ZC-L_f30-P	25929.0	5714.8
	M11-ZC-L_f30-P	28457.0	6036.7
ZEMIN SINIFI ZD Vs30=250	M01-ZD-L_f30-P	5681.0	1681.3
	M02-ZD-L_f30-P	8642.0	2382.0
	M03-ZD-L_f30-P	11203.0	3060.9
	M04-ZD-L_f30-P	13515.0	3768.3
	M05-ZD-L_f30-P	15531.0	4413.9
	M06-ZD-L_f30-P	17393.0	4996.5
	M07-ZD-L_f30-P	19065.0	5471.4
	M08-ZD-L_f30-P	20982.0	5789.8
	M09-ZD-L_f30-P	23033.0	6072.2
	M10-ZD-L_f30-P	25403.0	6340.3
	M11-ZD-L_f30-P	28540.0	6690.1

Çizelge 4.8. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları (TTS-II) (DKS- II) (Devam)

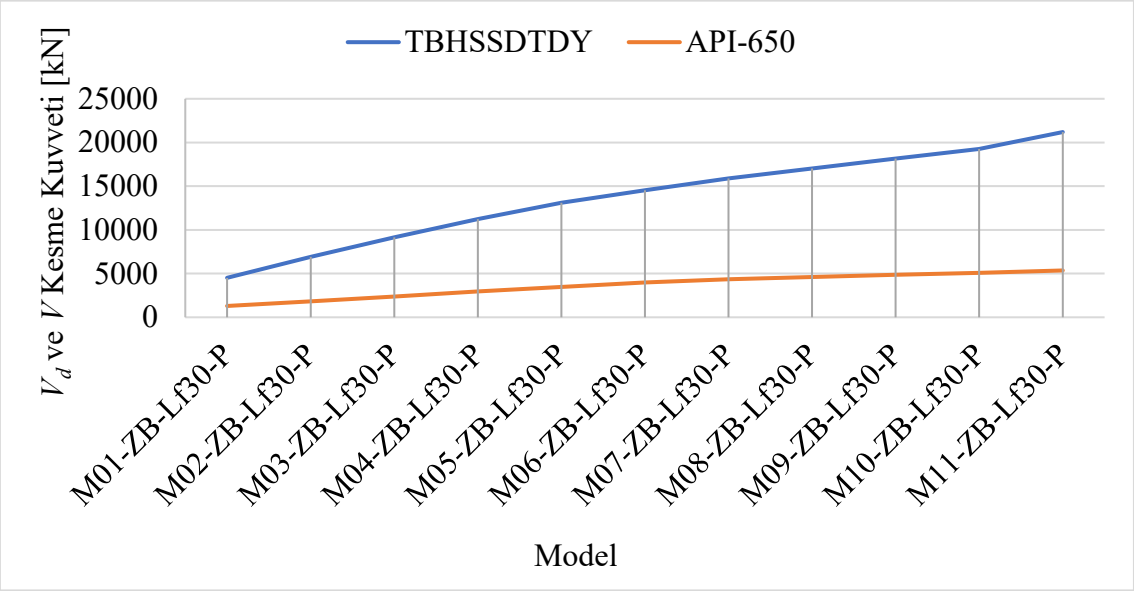
	Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d **[kN]**	**API-650** V **[kN]**
ZEMIN SINIFI ZE Vs30=150	M01-ZC-Lf30-P	5959.0	1837.6
	M02-ZC-Lf30-P	9035.0	2606.2
	M03-ZC-Lf30-P	11566.0	3320.6
	M04-ZC-Lf30-P	13651.0	4044.2
	M05-ZC-Lf30-P	15409.0	4699.1
	M06-ZC-Lf30-P	17008.0	5291.4
	M07-ZC-Lf30-P	18424.0	5774.6
	M08-ZC-Lf30-P	20024.0	6098.5
	M09-ZC-Lf30-P	21741.0	6386.8
	M10-ZC-Lf30-P	23685.0	6657.6
	M11-ZC-Lf30-P	28136.0	7019.3

ZA zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.20'de sunulmuştur.



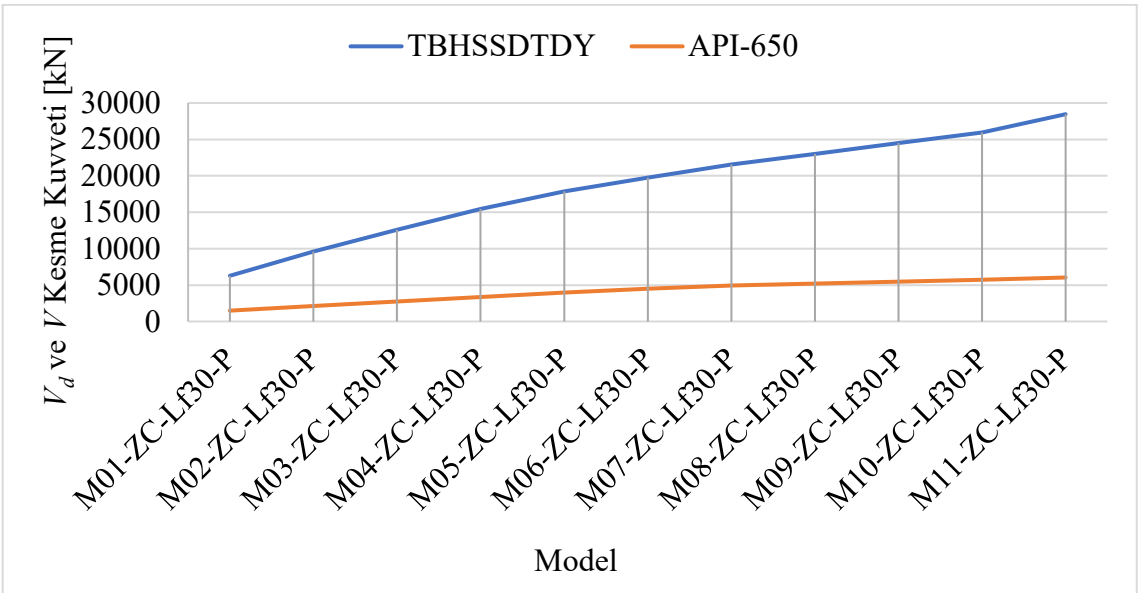
Şekil 4.20. ZA zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZB zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.21'de sunulmuştur.



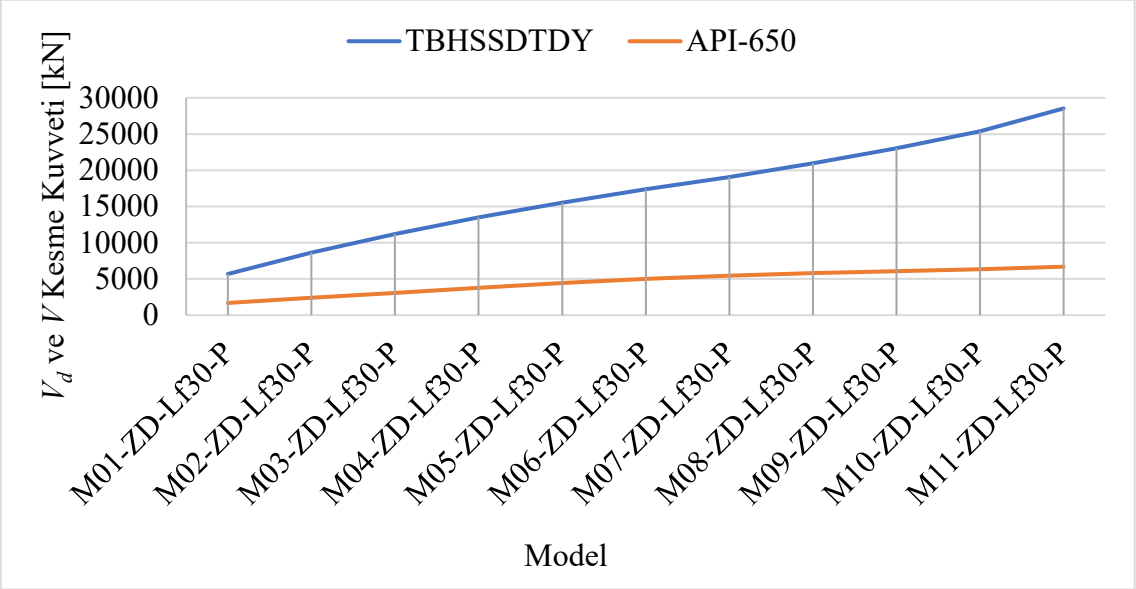
Şekil 4.21. ZB zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZC zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.22'de sunulmuştur.



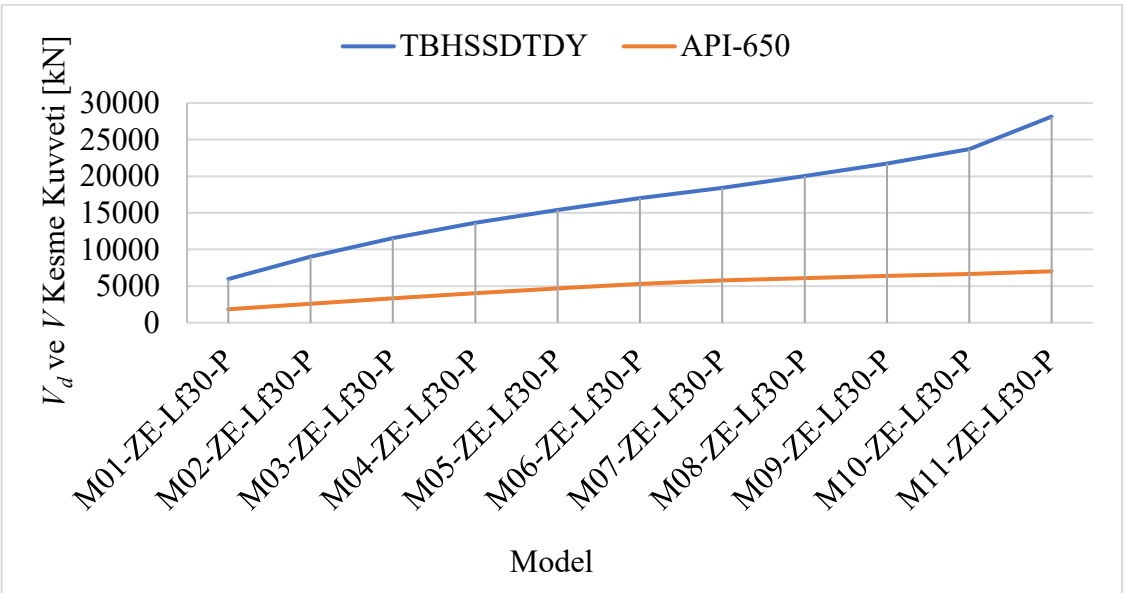
Şekil 4.22. ZC zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZD zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.23'de sunulmuştur.



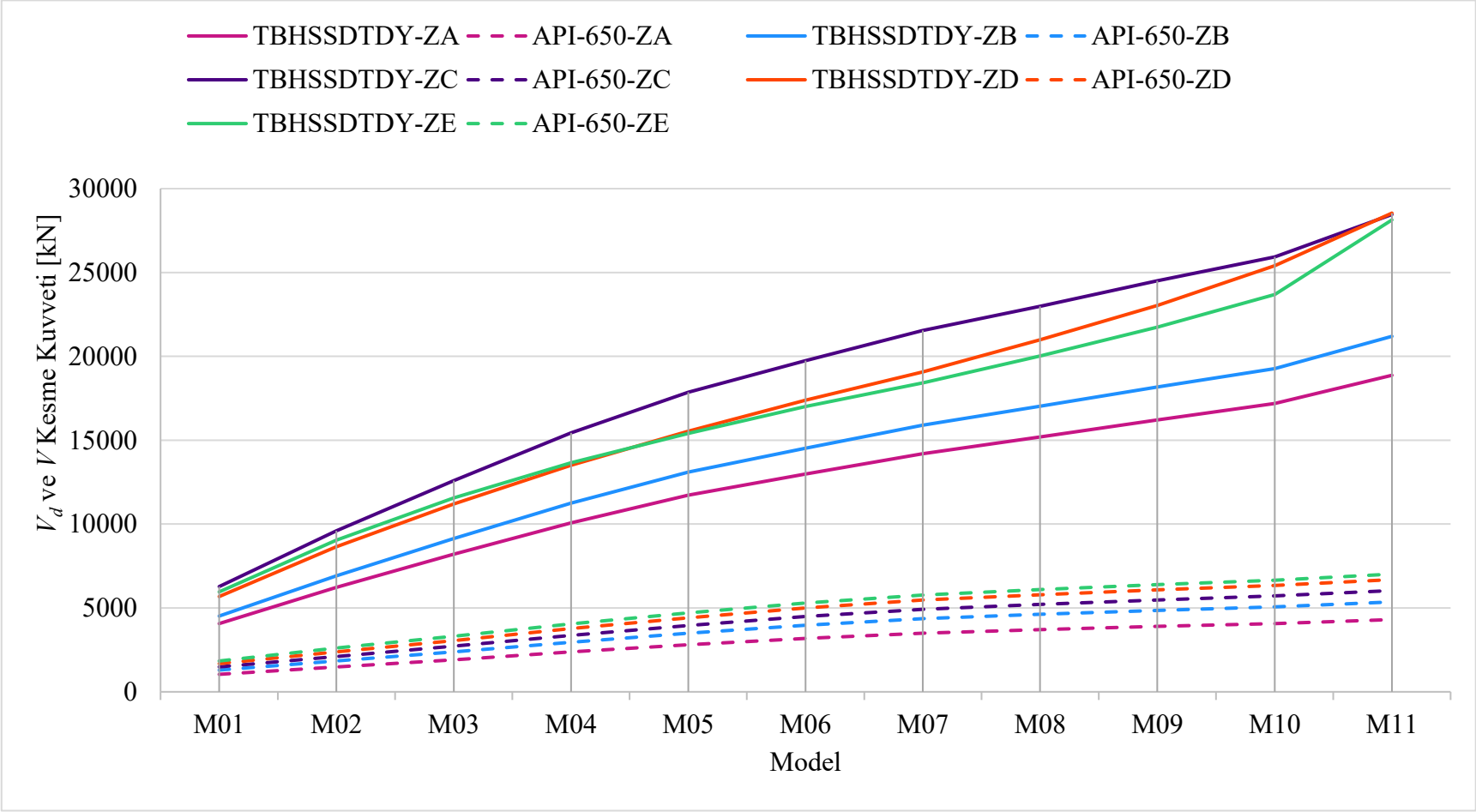
Şekil 4.23. ZD zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZE zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.24'de sunulmuştur.



Şekil 4.24. ZE zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

Tüm zemin sınıfları için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.25'de sunulmuştur.



Şekil 4.25. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (V_d) ve API-650 (V) yaklaşımlarına göre toplam kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

Farklı zemin sınıfları (ZA~ZE) ve geometrik özelliklere sahip tank modelleri (M01~M11) için, TBHSSDTDY (M_{OT}) ile API-650 (M_{RW}) yönetmeliklerine göre hesaplanan devrilme momenti değerleri ve toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.18 ve Şekil 4.25'de sunulmuştur. Her iki yönetmelikte de tank sıvı yüksekliği artıp tank çapı azaldıkça, devrilme momenti değerlerinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte tüm zemin sınıflarında, TBHSSDTDY'e göre elde edilen moment değerleri ve toplam kesme kuvveti, API-650'ye göre anlamlı derecede daha yüksek çıkmıştır.

API-650 standardında yer alan Çizelge 3.11'de tanımlanan R_{wi} ve R_{wc} azaltma faktörleri, deprem etkileri altında hesaplanan tasarım ivme değerlerinin azalmasına neden olmakta ve bu durum, API-650'nin TBHSSDTDY ile kıyaslandığında tasarım sonuçları arasındaki farkın artmasında başlıca etkenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. TBHSSDTDY'de benzer nitelikte bir azaltma faktörü yer almamakta, bunun yerine, tankların bulundukları tasarım sınıflarına göre farklı deprem düzeylerine karşılık gelen performans hedefleri Çizelge 3.5 kapsamında tanımlanan şekilde doğrudan dikkate alınmaktadır. API-650 Çizelge 3.12'de deprem kullanım sınıfına (DKS) ve önemine göre tanımlanmış bir önem katsayısı (Importance Factor) yer almaktadır. Bu katsayı, tanka etkiyen tasarım ivmelerini doğrudan artıran bir parametredir. TBHSSDTDY'de ise doğrudan bir önem katsayısı bulunmamakta, bunun yerine, tankların kullanım amacı ve önem düzeyine bağlı olarak farklı deprem düzeylerine karşılık gelen performans hedefleri tanımlanmıştır.

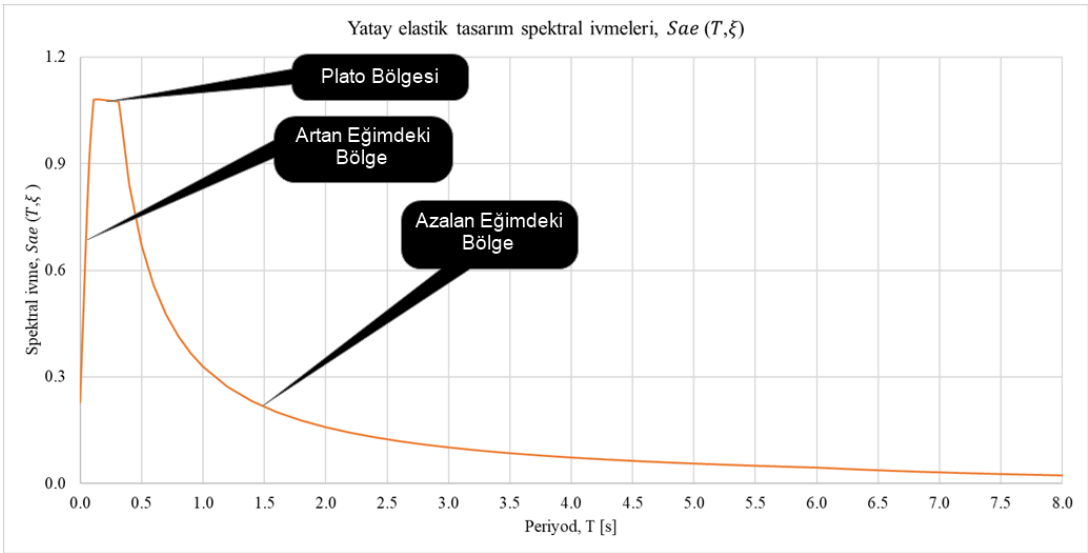
Zemin sınıfının etkisi değerlendirildiğinde, TBHSSDTDY'ye göre hesaplanan devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerlerinin, zemin sınıfı ZA'dan ZE'ye doğru ilerledikçe belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ancak ZC zemin sınıfında, elde edilen moment değerleri ve toplam kesme kuvveti değerlerinin, ZD ve ZE zemin sınıflarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, zemin ivme büyütme katsayısının, yerel zemin etki katsayıları olan F_s ve F_1 üzerinden hesaplamalara yansıttığı etkiden kaynaklanmaktadır.

Bu katsayılar yardımıyla hesaplanan S_{DS} Denklem (3.4) ve S_{D1} Denklem (3.5) değerleri, karakteristik periyotlar olan T_A Denklem (3.10) ve T_B Denklem (3.11) ile birlikte kullanılarak, tanklara özgü doğal periyot T_i değeriyle karşılaştırılmakta ve buna bağlı olarak spektral ivme $S_{ae}(T,\xi)$ Denklem (3.6) (3.7), (3.8) ve (3.9) ile belirlenmektedir.

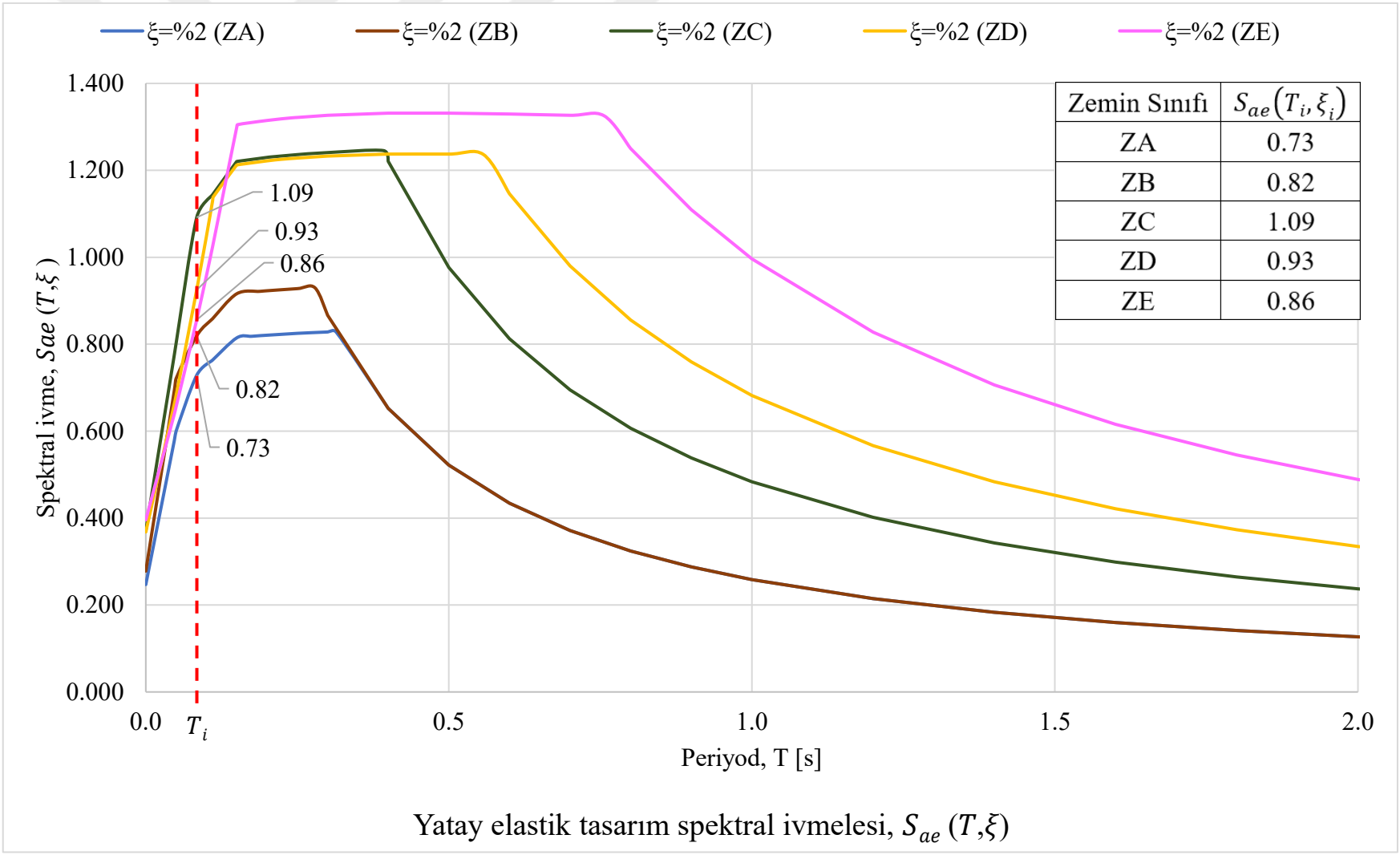
ZA ve ZB zemin sınıflarına ait tüm modellerde, $T_A < T_i < T_B$ eşitsizliği sağlanmakta olup, bu durumda devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti hesabında, spektrumun plato bölgesine karşılık gelen $S_{ae}(T, \xi)$ ivme değeri dikkate alınmaktadır. ZC zemin sınıfında ise yalnızca ilk üç modelde $T_i < T_A$ koşulu sağlanırken, geri kalan sekiz modelde $T_A < T_i < T_B$ durumu söz konusudur. Bu nedenle, bu modellerde spektrumun plato bölgesinde tanımlı olan $S_{ae}(T, \xi)$ değeri, Denklem (3.7)'de kullanılmaktadır.

ZD ve ZE zemin sınıflarına ait tüm modellerde ise $T_i < T_A$ durumu geçerlidir ve bu nedenle spektral ivme, doğrudan spektrumun doğrusal artan bölgesindeki (Bkz. Şekil 4.26) Denklem (3.6) değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, zemin sınıfı daha zayıf dinamik özellikler gösterdikçe tanka etkiyen tasarım kuvvetlerinin artması beklenirken, ZC zemin sınıfında, ZE ve ZD sınıflarına kıyasla daha büyük tasarım kuvvetleri elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak, S_{DS} değerinin Çizelge 4.9'da özetlendiği üzere ZC zemin sınıfının ZD ve ZE zemin sınıfına oranla daha büyük F_S katsayısı değeri almasıdır. Model M06 için tüm zemin sınıflarına ait yatay elastik tasarım spektral ivme grafiği Şekil 4.27 verilmiştir. Zemin sınıflarına göre $S_{ae}(T_i, \xi_i)$ değeri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da özetlenmiştir.

Yatay elastik tasarım spektral ivmesi eğrisinin karakteristik bölgeleri (Şekil 4.26); artış eğilimli bölge, plato bölgesi ve azalan eğimli bölge olmak üzere 3 farklı bölge olarak grafikte tanımlanmıştır. Bu bölgeler tasarım ivmelerinin periyotlara göre değişimini göstermektedir.



Şekil 4.26. Yatay elastik tasarım spektral ivmesi eğrisinin karakteristik bölgeleri



Şekil 4.27. M06-ZA~ZE-Lf30-P Modellerindeki 0 ile 1 sn. arasındaki yatay elastik tasarım spektral ivmeleri $S_{ae}(T_i,\xi_i)$ değeri (TTS-II)

TBDY-2018'de tüm zemin sınıfı için tasarımda kullanılan S_s' değeri için Çizelge 4.9'da özetlendiği üzere, ZA'dan ZC'ye kadar olan zemin sınıfları için artarken, ZC'den ZE'ye kadar olan zemin sınıfları için ise azalmaktadır. Bu durum Çizelge 4.10 da özetlendiği üzere API-650 de geçerli değildir. API-650 de zemin sınıfı katsayıları ZA'dan ZE'ye gidildikçe artmaktadır.

Çizelge 4.9. $S_s' = 0.772$ değeri için kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı, F_S (TBDY-2018)

Yerel Zemin Sınıfı	$S_s' = 0.75g$	$S_s' = 0.772$	$S_s' = 1.0g$
ZA	0.8	*0.8*	0.8
ZB	0.9	*0.9*	0.9
ZC	1.2	*1.2*	1.2
ZD	1.2	*1.19*	1.1
ZE	1.3	*1.28*	1.1

Çizelge 4.10. $S_s = 0.702$ değeri için zemin sınıfının fonksiyonu olarak F_a değeri (API-650)

Zemin Sınıfı	Kısa Periyotlarda MCER Spektral Tepki İvmeleri		
	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.702g$	$S_s = 0.75g$
A	0.8	*0.8*	0.8
B	1.0	*1*	1.0
C	1.2	*1.12*	1.1
D	1.4	*1.24*	1.2
E	1.7	*1.30*	1.2

İlgili F_S ve F_a değerlerinin farklı olmasına ek olarak TBHSSDTDY yönetmeliğinde API-650'den farklı olarak en büyük doğrultu etkisi katsayısı ile S_S ve S_1 değeri sırasıyla 1.1 ve 1.3 kat olarak artırılmaktadır. Bu katsayıların yanı sıra iki yönetmelik arasındaki en önemli fark Çizelge 4.11'de özetlendiği üzere; API-650 standardında, darbesel (impulsive)

titreşim modu sönüm oranı %5, devinimsel (convective) titreşim modu sönüm oranı %0.5 alınırken; TBHSSDTDY'de ise darbesel (impulsive) titreşim modu sönüm oranı %2, devinimsel (convective) titreşim modu sönüm oranı ise %0.5 alınmaktadır.

Çizelge 4.11. Darbesel ve devinimsel titreşim modları için sönüm oranlarının yönetmeliklere göre karşılaştırılması

Yönetmelik	**Darbesel sönüm oranı**	**Devinimsel sönüm oranı**
API-650	%5 (0.05)	%0.5 (0.005)
TBHSSDTDY	%2 (0.02)	%0.5 (0.005)

Çizelge 4.11'den görüleceği üzere, darbesel titreşim modu için kullanılan sönüm oranları her iki yönetmelikte farklılık göstermekte olup, bu fark tasarım aşamasında elde edilen devrilme momenti değerleri üzerinde önemli ölçüde etkili olmaktadır. Hesaplamalarda elde edilen tank tabanının altındaki düzlem için devrilme momenti M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) değerlerinin Şekil 4.19'da görüldüğü üzere tabanının hemen üzerindeki düzlem devrilme momenti M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) değerleri gibi benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Hesap sonuçlarına göre, TBHSSDTDY kapsamında elde edilen moment değerleri; M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) değerleri arasındaki oran, en büyük 5.4 kat (M02-ZC-L_f30-P), en küçük ise 3.9 kat (M06-ZE-L_f30-P) olup ortalama 4.6 kat daha büyük değerler elde edilmiştir. M'_{OT} (TBHSSDTDY), M_s (API-650) değerleri arasındaki oran en büyük 2.6 kat (M02-ZC-L_f30-P), en küçük ise 1.6 kat (M09-ZA-L_f30-P) olup ortalama 1.9 kat daha büyük değerler elde edilmiştir.

Hesap sonuçlarına göre, TBHSSDTDY kapsamında elde edilen kesme değerleri; TBHSSDTDY (V_d), API-650 (V) değerleri arasındaki oran en büyük 4.7 kat (M11-ZC-L_f30-P), en küçük ise 3.5 kat (M01-ZB-L_f30-P) olup ortalama 4.9 kat daha büyük değerler elde edilmiştir.

4.3.4.Farklı Tank Geometrisi ve Tank Tasarım Sınıfı I ve Deprem Kullanım Sınıfı I Bağlı Olarak Devrilme Momentlerinin ve Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırması

Sıvı depolama tanklarının deprem yüklerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere, tankların kullanım amacı, depolanan sıvının tehlike sınıfı ve deprem sonrası işlevsellik durumu esas alınarak üç farklı tasarım sınıfı tanımlanmıştır. İlgili sınıflandırma TBHSSDTDY'de performansa dayalı tasarım anlayışı doğrultusunda kontrol edilmesi gereken hasar sınır durumları ile değerlendirilmekte ve farklı deprem yer hareketi düzeyleri için öngörülen performans hedefleri doğrultusunda yönetmelikte detaylandırılmaktadır.

Bu bölümde, Tank Tasarım Sınıfı (TTS) I ve Deprem Kullanım Sınıfı (DKS) I kapsamında; petrol depolanan, farklı geometrik özelliklere sahip 11 adet düşey silindirik tank modeli için 5 farklı zemin sınıfı (ZA–ZE) ele alınmıştır. Modellerin tamamında aktif faya olan uzaklık L_f = 30 m olarak sabitlenmiştir. TBHSSDTDY kapsamında, Tank Tasarım Sınıfı-I için tasarım kontrollü hasar sınır durumu esas alınarak (Bkz. Çizelge 3.5) DD-3 deprem düzeyine göre gerçekleştirilmektedir. Buna karşılık, API-650 standardında tank tasarım sınıflarına bağlı olarak deprem düzeyi ayrımı yapılmamaktadır.

Çalışma kapsamında, farklı zemin sınıfı ve geometrilerdeki tankların devrilme momentleri ve toplam kesme kuvvetlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Tank tabanının hemen üzerindeki düzlemdeki devrilme momenti, TBHSSDTDY yönetmeliği kapsamında M_{OT} ve API-650 yönetmeliğinde M_{RW} terimleri ile hesaplanırken, tank tabanının altındaki düzlemdeki devrilme momenti ise TBHSSDTDY yönetmeliğinde M'_{OT} ve API-650 yönetmeliğinde M_s terimleri ile hesaplanmıştır. Tank duvarlarının alt seviyesine etkiyen toplam kesme kuvveti, TBHSSDTDY yönetmeliği kapsamında V_d ve API-650 yönetmeliğinde V ile terimleri ile hesaplanmıştır.

TBHSSDTDY ve API-650 standartlarında devrilme momenti hesabı, darbesel W_i ve devinimsel W_c sıvı kütle bileşenlerinin etkili yüksekliklerde oluşturduğu momentlerin birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu iki yönetmeliğin moment bileşenlerini birleştirme

yöntemleri birbirinden farklıdır. API-650'de darbesel ve devinimsel bileşenlerden kaynaklanan momentler karelerinin toplamının karekökü yöntemiyle, TBHSSDTDY'de ise moment bileşenlerinin doğrudan toplanmasıyla elde edilmektedir.

Her iki yönetmelik kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) değerleri, farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.12'te verilmiştir.

Çizelge 4.12. Farklı zemin sınıflarına göre M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları (TTS-I) (DKS- I)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT}	**API-650** M_{RW}	**TBHSSDTDY** M'_{OT}	**API-650** M_s
		[kN.m]	**[kN.m]**	**[kN.m]**	**[kN.m]**
ZEMİN SINIFI ZA V_{s30}=1600	M01-ZA-L_f30-P	2579.0	1248.4	15175.4	20758.6
	M02-ZA-L_f30-P	5228.5	2520.5	19607.3	27248.4
	M03-ZA-L_f30-P	8487.4	4133.4	22050.1	32918.4
	M04-ZA-L_f30-P	12516.5	6214.8	24725.0	38569.5
	M05-ZA-L_f30-P	17182.7	8565.0	27184.8	43985.4
	M06-ZA-L_f30-P	21927.9	11158.6	30848.8	49235.0
	M07-ZA-L_f30-P	27114.7	13701.7	33602.4	54270.0
	M08-ZA-L_f30-P	32543.5	16824.3	37849.9	62630.1
	M09-ZA-L_f30-P	38526.9	20183.5	42275.8	71529.8
	M10-ZA-L_f30-P	45567.1	24132.1	48608.4	81845.5
	M11-ZA-L_f30-P	58897.9	31205.7	60941.3	100078.4

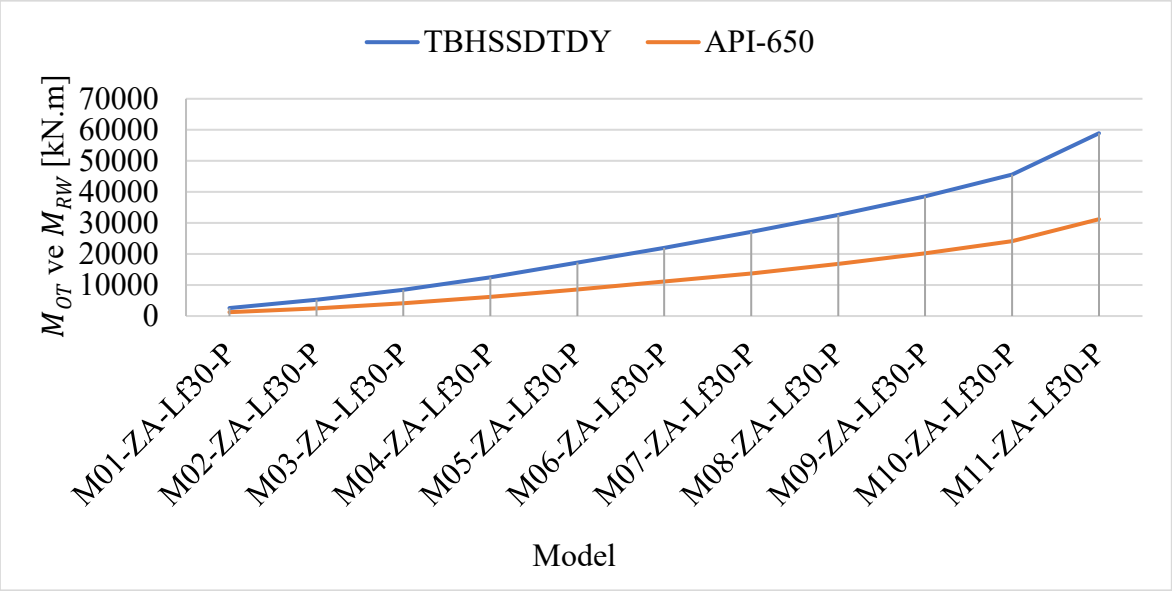
Çizelge 4.12. Farklı zemin sınıflarına göre M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları (TTS-I) (DKS- I) (Devam)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT}	**API-650** M_{RW}	**TBHSSDTDY** M'_{OT}	**API-650** M_s
		[kN.m]	**[kN.m]**	**[kN.m]**	**[kN.m]**
ZEMIN SINIFI ZB V_{s30}=950	M01-ZB-L_f30-P	2840.3	1561.2	16676.7	23230.3
	M02-ZB-L_f30-P	5765.2	3149.7	21642.8	30465.4
	M03-ZB-L_f30-P	9370.6	5149.9	24416.6	36786.6
	M04-ZB-L_f30-P	13863.9	7751.9	27462.6	43100.0
	M05-ZB-L_f30-P	19068.6	10691.4	30232.0	49151.2
	M06-ZB-L_f30-P	24450.8	13924.3	34452.5	55013.9
	M07-ZB-L_f30-P	30267.3	17105.1	37546.6	60640.4
	M08-ZB-L_f30-P	36312.4	20999.1	42261.5	69979.3
	M09-ZB-L_f30-P	42988.4	25190.9	47190.3	79921.4
	M10-ZB-L_f30-P	50790.8	30123.8	54194.8	91447.3
	M11-ZB-L_f30-P	65729.7	38951.0	68018.3	111816.4
ZEMIN SINIFI ZC V_{s30}=500	M01-ZC-L_f30-P	4118.7	1845.5	23992.9	24890.6
	M02-ZC-L_f30-P	8416.4	3684.4	31245.4	32476.7
	M03-ZC-L_f30-P	13515.6	6006.8	34702.0	39195.2
	M04-ZC-L_f30-P	19985.1	8960.0	39076.2	45920.5
	M05-ZC-L_f30-P	27276.2	12243.7	42893.7	52292.7
	M06-ZC-L_f30-P	35837.8	15896.9	50179.7	58580.8
	M07-ZC-L_f30-P	44781.8	19461.0	55339.8	64567.3
	M08-ZC-L_f30-P	53596.0	23784.6	62227.4	74394.5
	M09-ZC-L_f30-P	63406.5	28486.5	69509.6	84946.0
	M10-ZC-L_f30-P	74579.4	34011.8	79508.6	97174.7
	M11-ZC-L_f30-P	96566.5	43895.9	99884.9	118781.1

Çizelge 4.12. Farklı zemin sınıflarına göre M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları (TTS-I) (DKS- I) (Devam)

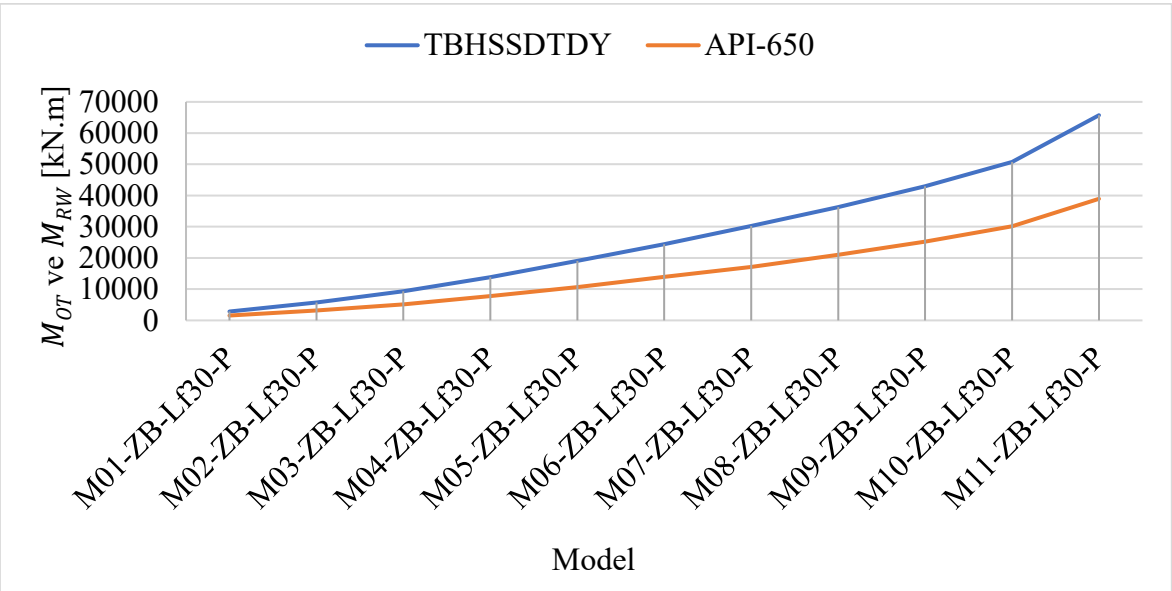
	Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT}	**API-650** M_{RW}	**TBHSSDTDY** M'_{OT}	**API-650** M_s
		[kN.m]	**[kN.m]**	**[kN.m]**	**[kN.m]**
ZEMIN SINIFI ZD V_{s30}=250	M01-ZD-L_f30-P	4876.6	2134.6	28491.8	26501.9
	M02-ZD-L_f30-P	9917.6	4264.8	36394.1	34418.5
	M03-ZD-L_f30-P	15803.9	6880.3	39784.8	41456.9
	M04-ZD-L_f30-P	22999.1	10201.0	44183.8	48528.4
	M05-ZD-L_f30-P	30960.8	13813.5	48049.9	55220.0
	M06-ZD-L_f30-P	40010.2	17817.2	55519.1	61774.6
	M07-ZD-L_f30-P	49520.2	21752.3	60848.7	68080.1
	M08-ZD-L_f30-P	60981.2	26541.3	70538.9	78485.3
	M09-ZD-L_f30-P	74111.3	31721.0	81077.6	89590.0
	M10-ZD-L_f30-P	90797.6	37809.3	96680.8	102459.4
	M11-ZD-L_f30-P	120667.0	48642.3	124753.7	125073.8
ZEMIN SINIFI ZE V_{s30}=150	M01-ZE-L_f30-P	7304.1	2450.7	42473.8	27951.8
	M02-ZE-L_f30-P	14847.0	4911.3	53716.6	35968.7
	M03-ZE-L_f30-P	23540.7	7824.1	58230.1	43135.7
	M04-ZE-L_f30-P	33889.7	11399.6	64139.4	50354.4
	M05-ZE-L_f30-P	45172.5	15244.4	69334.2	57225.1
	M06-ZE-L_f30-P	57827.6	19438.5	79609.1	63959.3
	M07-ZE-L_f30-P	71103.3	23571.7	86921.0	70460.9
	M08-ZE-L_f30-P	86902.2	28586.6	100174.6	81148.3
	M09-ZE-L_f30-P	104995.1	34009.4	114624.6	92570.7
	M10-ZE-L_f30-P	127638.1	40353.6	135729.3	105706.9
	M11-ZE-L_f30-P	179615.1	51776.3	185598.0	129076.3

ZA zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.28'de sunulmuştur.



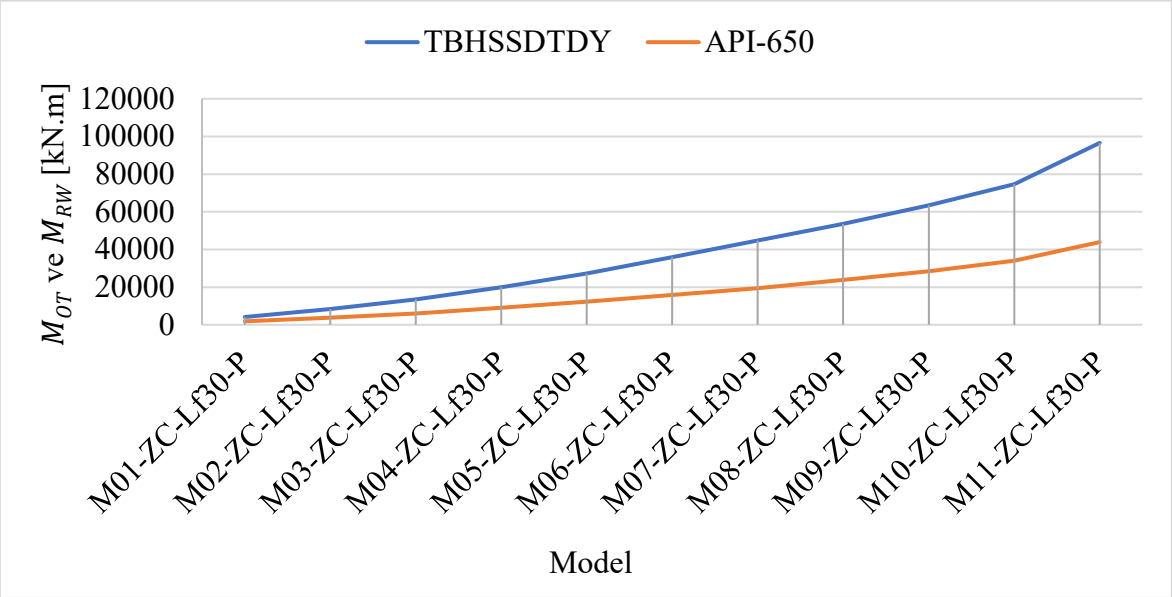
Şekil 4.28. ZA zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZB zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.29'de sunulmuştur.



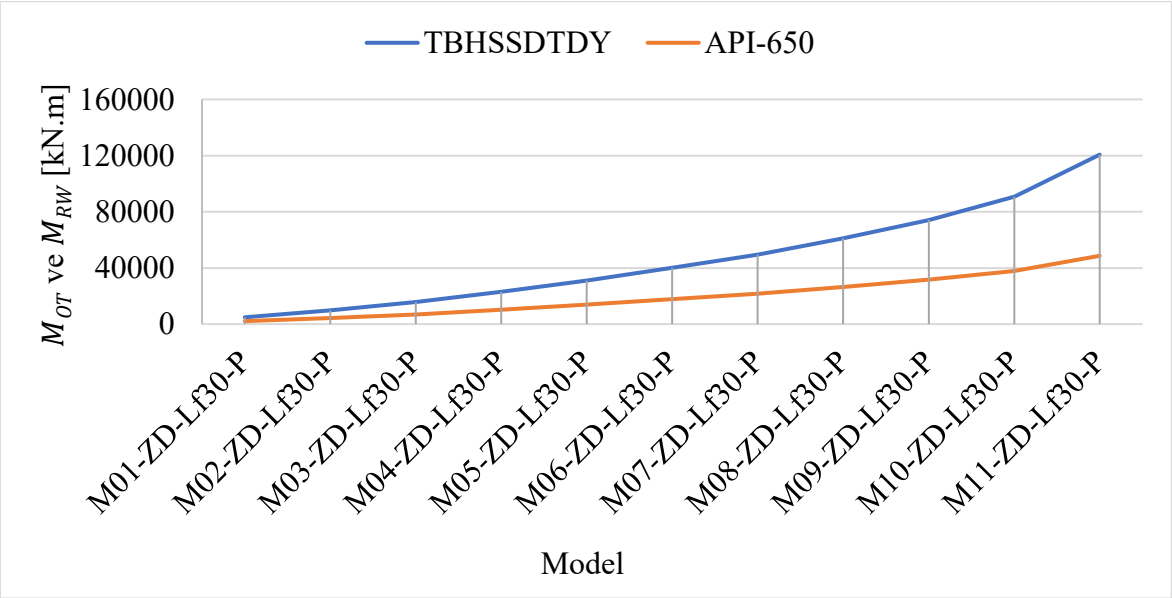
Şekil 4.29. ZB zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZC zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.30'de sunulmuştur.



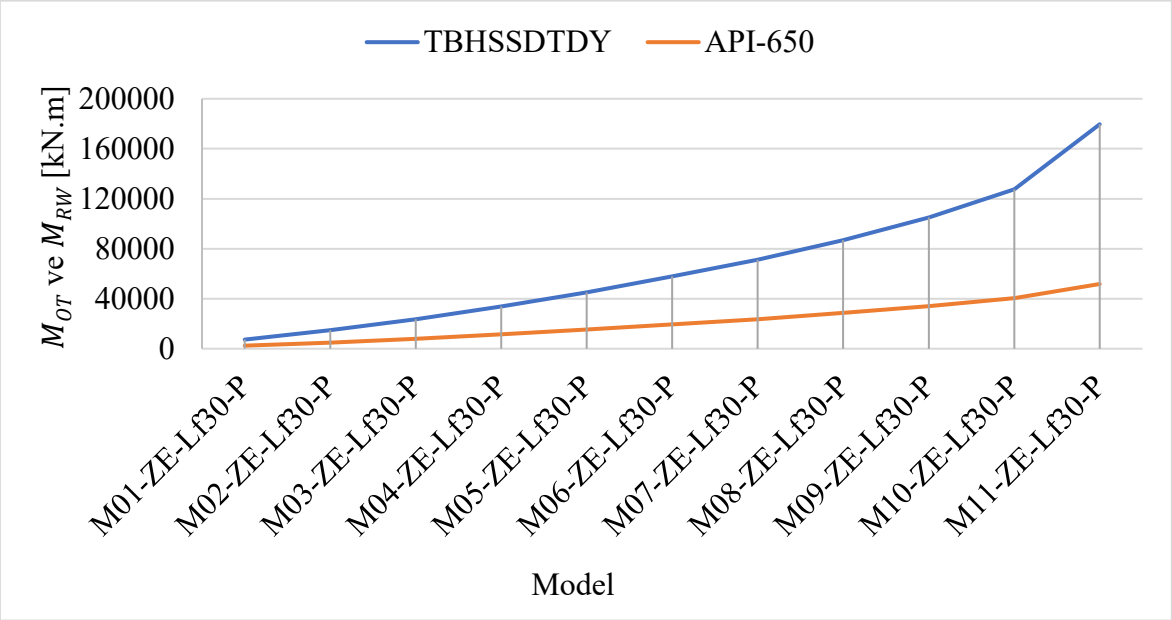
Şekil 4.30. ZC zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZD zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.31'de sunulmuştur.



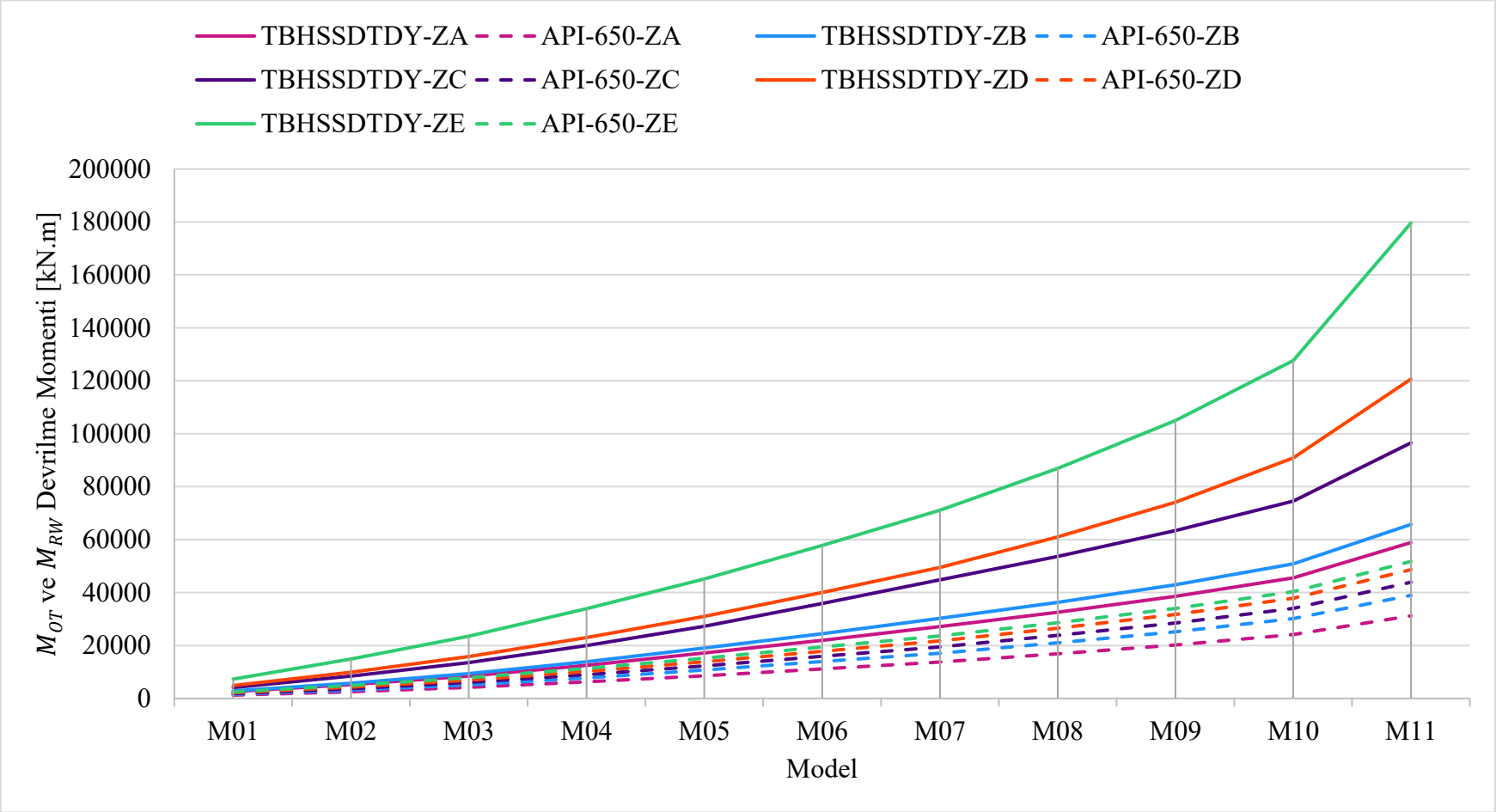
Şekil 4.31. ZD zemin sınıfı M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZE zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.32'de sunulmuştur.



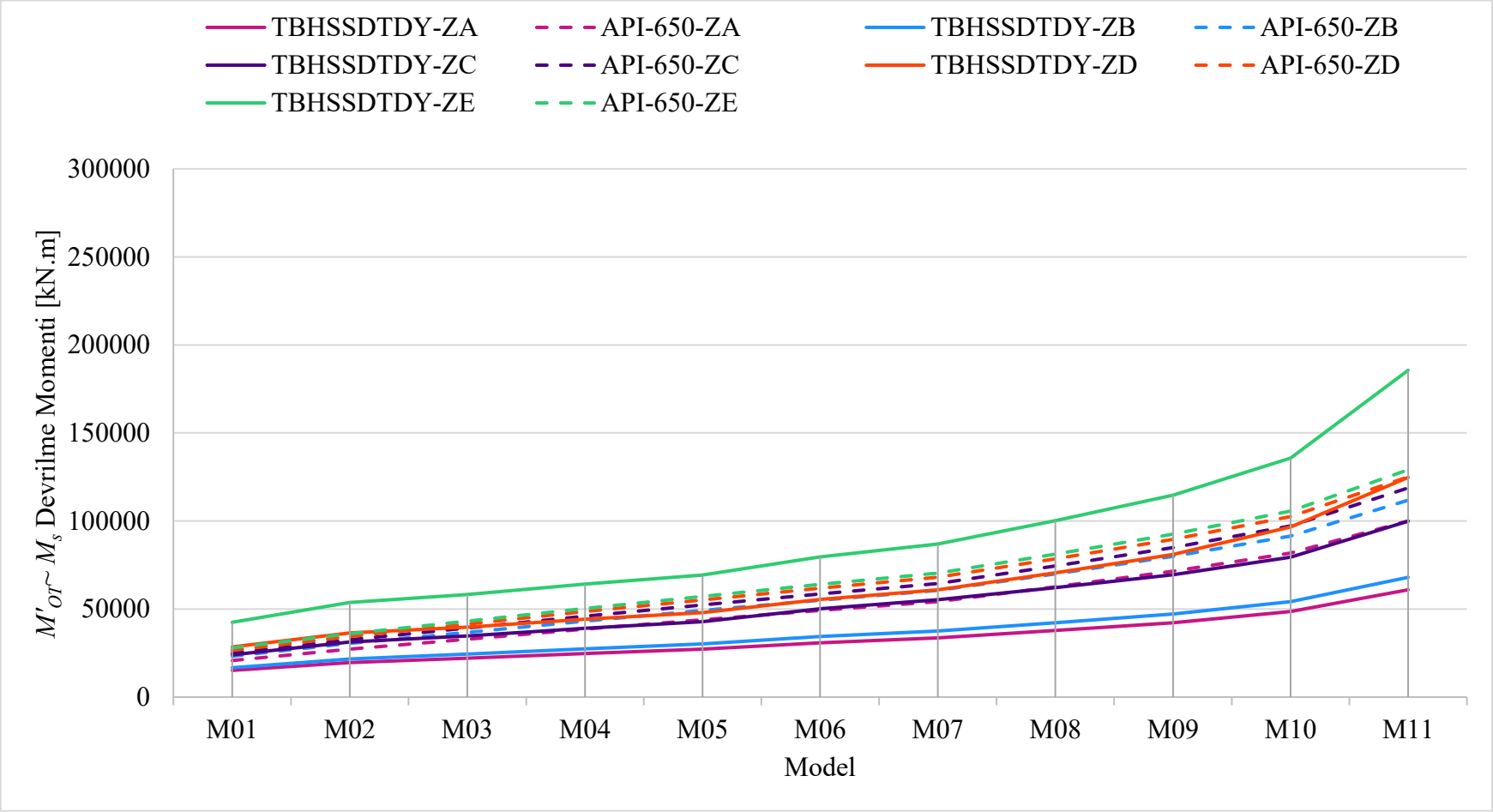
Şekil 4.32. ZE zemin sınıfları M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

Tüm zemin sınıfları için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.33'da sunulmuştur.



Şekil 4.33. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (M_{OT}) ve API-650 (M_{RW}) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

Tüm zemin sınıfları için oluşturulan tank modellerine ait M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.34'da sunulmuştur.



Şekil 4.34. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (M'_{OT}) ve API-650 (M_s) yaklaşımlarına göre devrilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

Her iki yönetmelik kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen toplam kesme kuvveti değerleri, farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) (TTS-I) (DKS- I) sonuçları

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
		[kN]	**[kN]**
ZEMIN SINIFI ZA V_{s30}=1600	M01-ZA-L_f30-P	1332.0	834.5
	M02-ZA-L_f30-P	2024.0	1184.1
	M03-ZA-L_f30-P	2672.0	1533.1
	M04-ZA-L_f30-P	3257.0	1903.0
	M05-ZA-L_f30-P	3784.0	2247.2
	M06-ZA-L_f30-P	4172.0	2556.1
	M07-ZA-L_f30-P	4553.0	2806.3
	M08-ZA-L_f30-P	4876.0	2975.3
	M09-ZA-L_f30-P	5191.0	3123.9
	M10-ZA-L_f30-P	5512.0	3264.8
	M11-ZA-L_f30-P	6037.0	3450.6
ZEMIN SINIFI ZB V_{s30}=950	M01-ZB-L_f30-P	1471.0	1042.5
	M02-ZB-L_f30-P	2240.0	1478.8
	M03-ZB-L_f30-P	2961.0	1912.2
	M04-ZB-L_f30-P	3619.0	2374.6
	M05-ZB-L_f30-P	4212.0	2805.0
	M06-ZB-L_f30-P	4665.0	3190.3
	M07-ZB-L_f30-P	5095.0	3503.0
	M08-ZB-L_f30-P	5453.0	3713.8
	M09-ZB-L_f30-P	5804.0	3899.2
	M10-ZB-L_f30-P	6155.0	4075.3
	M11-ZB-L_f30-P	6748.0	4307.1

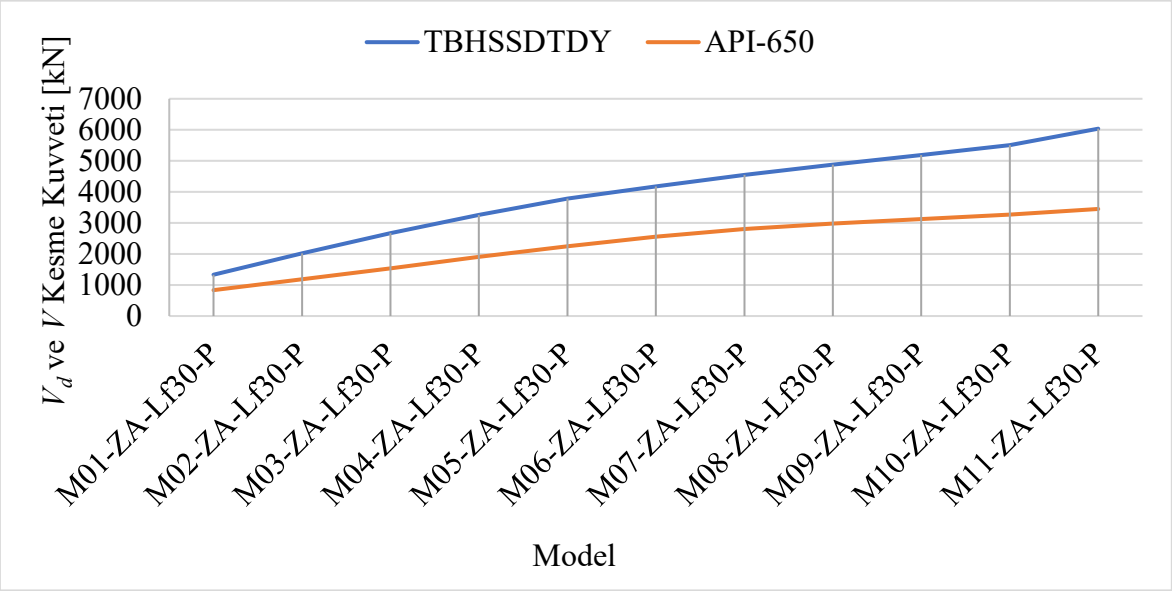
Çizelge 4.13. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) (TTS-I) (DKS- I) sonuçları (Devam)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
		[kN]	**[kN]**
ZEMIN SINIFI ZC Vs30=500	M01-ZC-Lf30-P	2097.0	1193.2
	M02-ZC-Lf30-P	3212.0	1687.5
	M03-ZC-Lf30-P	4200.0	2178.6
	M04-ZC-Lf30-P	5135.0	2692.8
	M05-ZC-Lf30-P	5953.0	3167.2
	M06-ZC-Lf30-P	6757.0	3596.7
	M07-ZC-Lf30-P	7462.0	3943.6
	M08-ZC-Lf30-P	7979.0	4174.5
	M09-ZC-Lf30-P	8496.0	4380.8
	M10-ZC-Lf30-P	8977.0	4576.6
	M11-ZC-Lf30-P	9852.0	4834.3
ZEMIN SINIFI ZD Vs30=250	M01-ZD-Lf30-P	2433.0	1342.8
	M02-ZD-Lf30-P	3702.0	1901.8
	M03-ZD-Lf30-P	4796.0	2441.6
	M04-ZD-Lf30-P	5783.0	3007.3
	M05-ZD-Lf30-P	6629.0	3521.3
	M06-ZD-Lf30-P	7421.0	3986.7
	M07-ZD-Lf30-P	8131.0	4365.6
	M08-ZD-Lf30-P	8958.0	4619.5
	M09-ZD-Lf30-P	9818.0	4844.7
	M10-ZD-Lf30-P	10827.0	5058.5
	M11-ZD-Lf30-P	12229.0	5337.3

Çizelge 4.13. Farklı zemin sınıflarına göre toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) (TTS-I) (DKS- I) sonuçları (Devam)

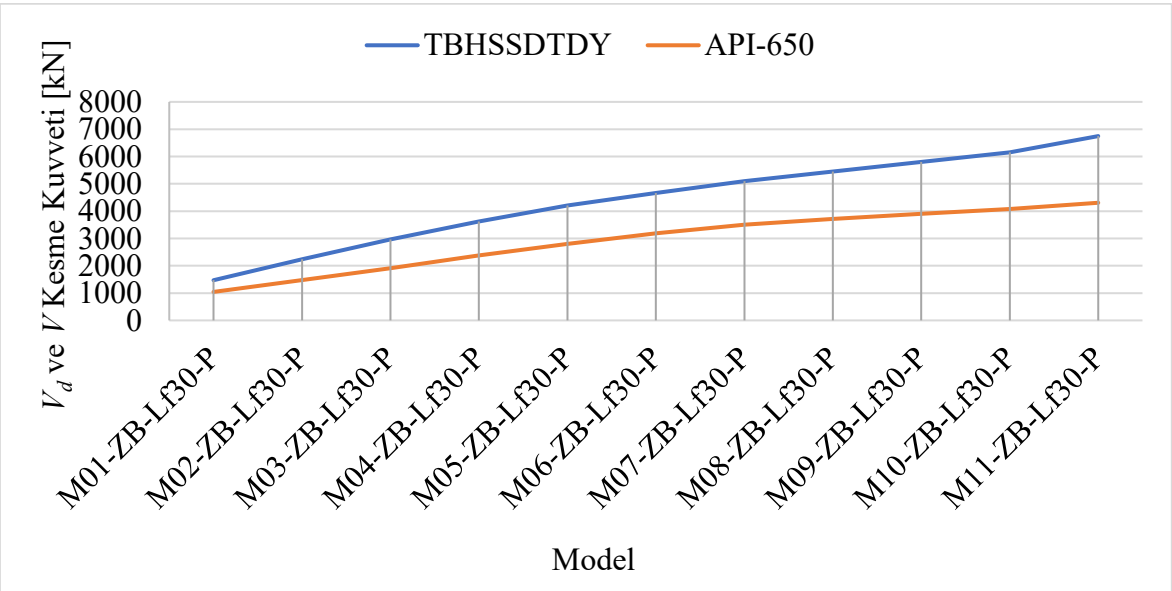
	Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
		[kN]	**[kN]**
ZEMIN SINIFI ZE Vs30=150	M01-ZC-L_f30-P	3580.0	1471.4
	M02-ZC-L_f30-P	5431.0	2091.2
	M03-ZC-L_f30-P	6998.0	2663.6
	M04-ZC-L_f30-P	8363.0	3246.5
	M05-ZC-L_f30-P	9510.0	3773.3
	M06-ZC-L_f30-P	10564.0	4247.1
	M07-ZC-L_f30-P	11513.0	4636.0
	M08-ZC-L_f30-P	12602.0	4895.6
	M09-ZC-L_f30-P	13743.0	5126.7
	M10-ZC-L_f30-P	15062.0	5344.5
	M11-ZC-L_f30-P	18058.0	5635.2

ZA zemin sınıfı için sahip tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.35'de sunulmuştur.



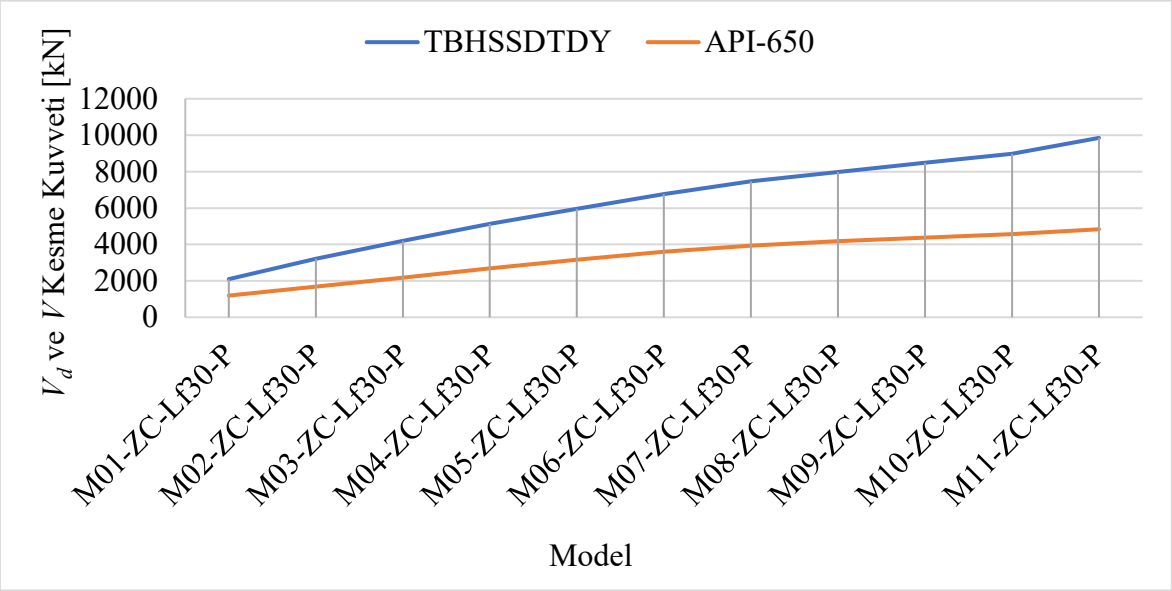
Şekil 4.35. ZA zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZB zemin sınıfı için sahip tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.36'de sunulmuştur.



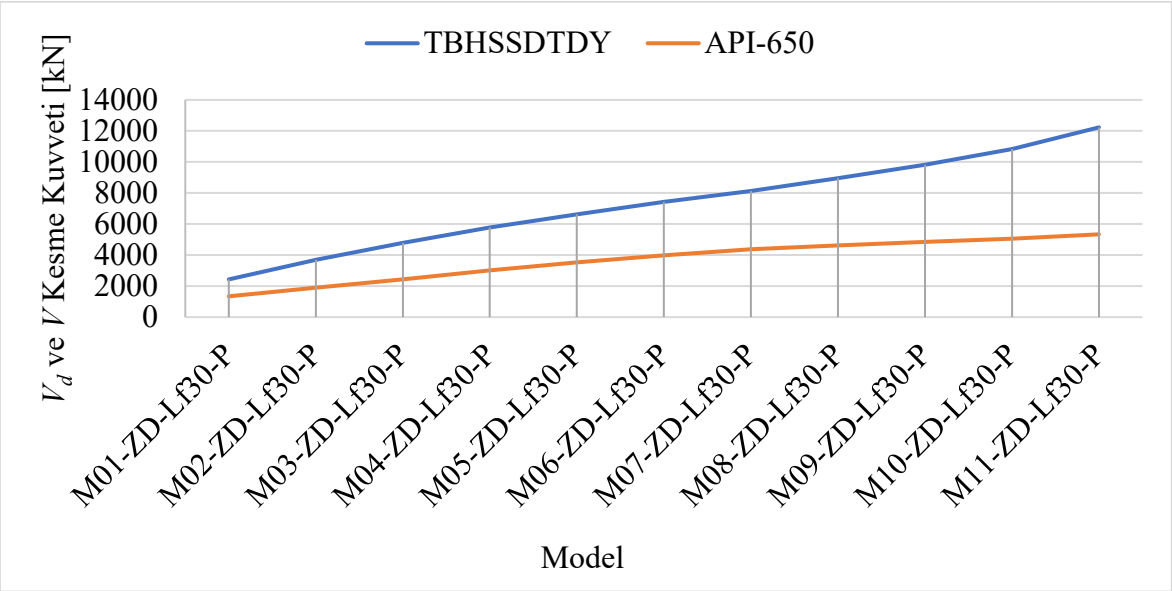
Şekil 4.36. ZB zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZC zemin sınıfı için sahip tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.37'de sunulmuştur.



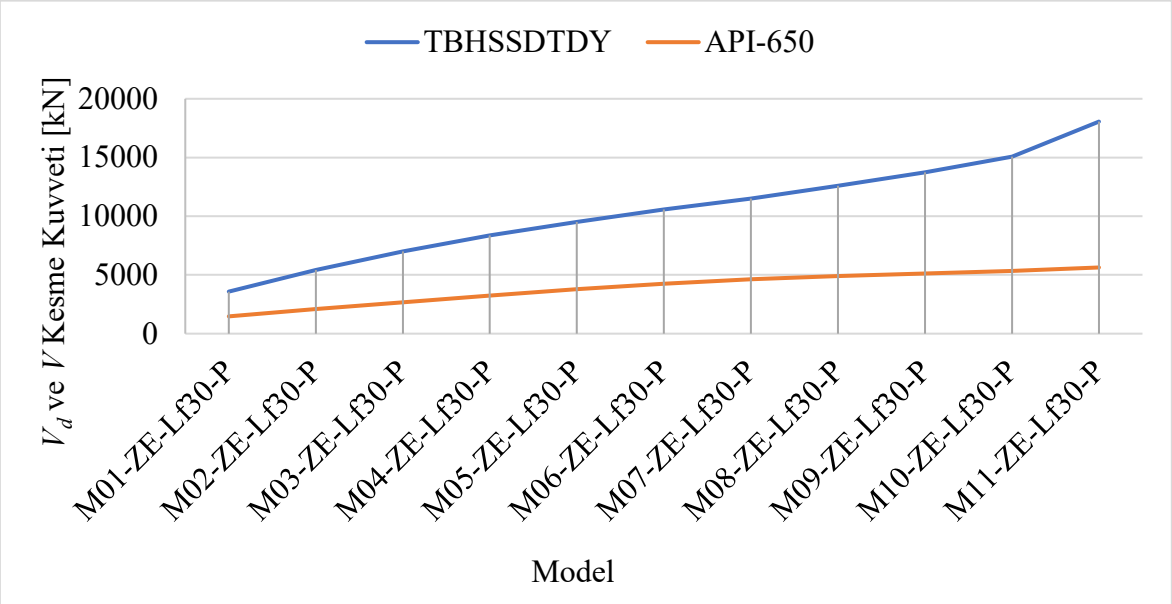
Şekil 4.37. ZC zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZD zemin sınıfı için sahip tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.38'de sunulmuştur.



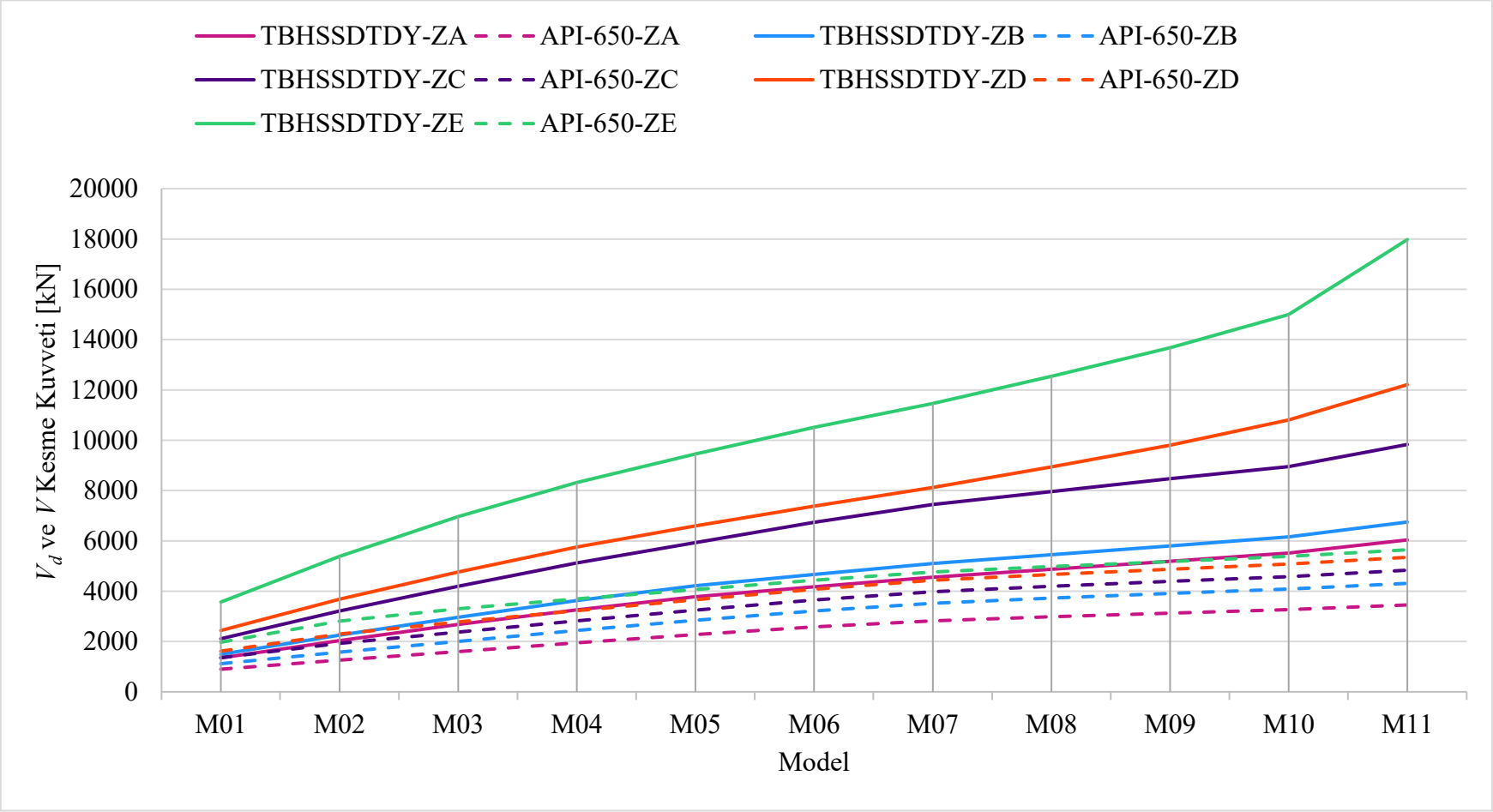
Şekil 4.38. ZD zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

ZE zemin sınıfı için sahip tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.39'de sunulmuştur.



Şekil 4.39. ZE zemin sınıfı V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

Tüm zemin sınıfları için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.40'da sunulmuştur.



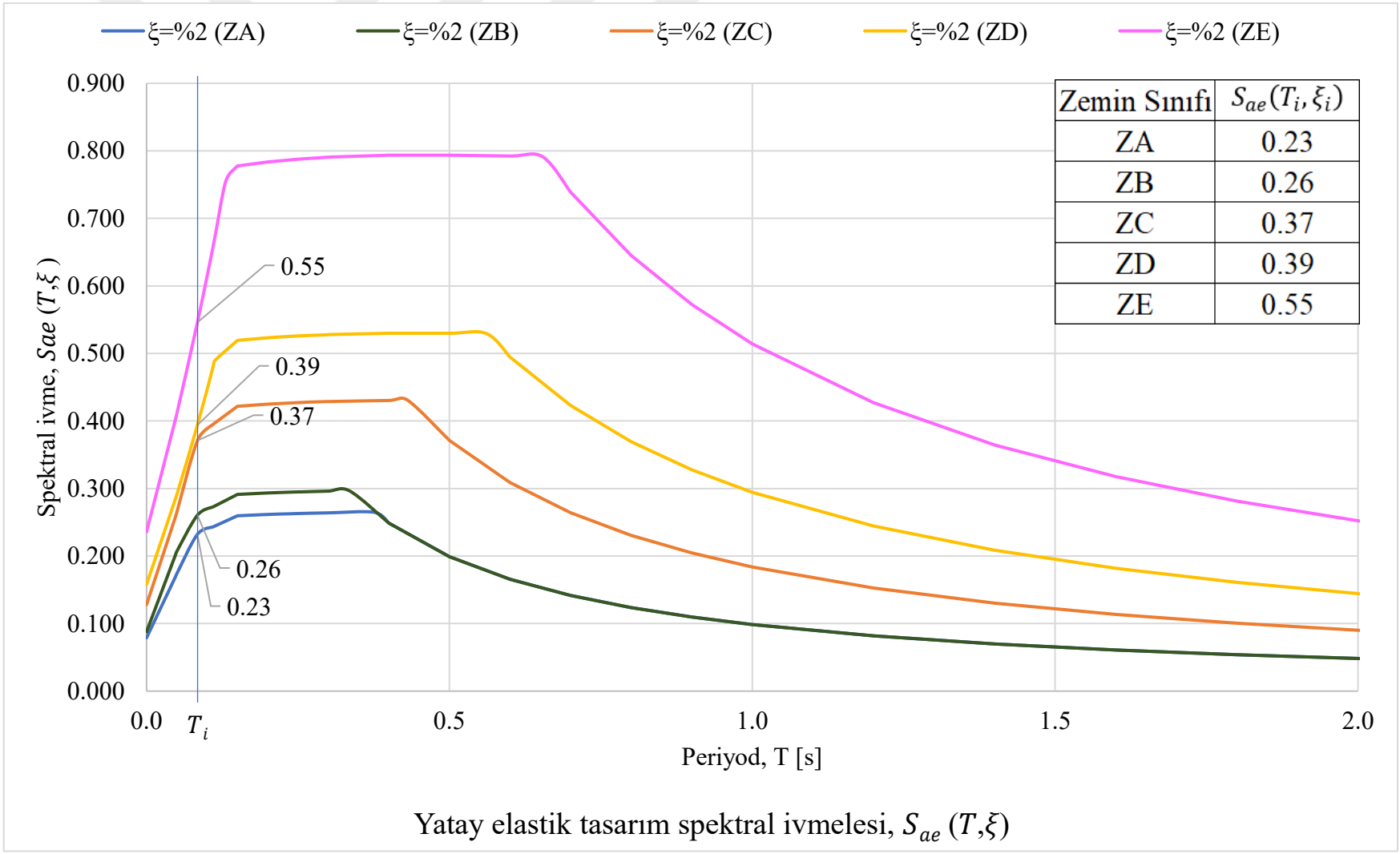
Şekil 4.40. Farklı zemin sınıfları ve farklı geometrideki tank modellerinin TBHSSDTDY (V_d) ve API-650 (V) yaklaşımlarına göre toplam kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması (TTS-I) (DKS- I)

Şekil 4.47 ve Şekil 4.25'de, farklı zemin sınıfları (ZA–ZE) ve geometrik özelliklere sahip tank modelleri (M01–M11) için, TBHSSDTDY (M_{OT}) ile API-650 (M_{RW}) standardına göre hesaplanan devrilme momenti değerleri ve toplam kesme kuvveti değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her iki yönetmelikte model numarası arttıkça, yani tankın yüksekliği büyüdükçe devrilme momenti değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Bölüm 4.3.3'deki sonuçlara benzer şekilde, TBHSSDTDY kapsamında elde edilen moment ve toplam kesme kuvveti değerleri, tüm zemin sınıflarında API-650'ye kıyasla daha yüksek çıkmıştır.

Bölüm 4.3.3'deki TTS-II (TBHSSDTDY) ve DKS-II (API-650) için elde edilen devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerleri dikkate alındığında, her iki yönetmeliğe göre TTS-I (TBHSSDTDY) ve DKS-I (API-650) sınıfları için hesaplanan sonuçlar arasındaki fark görece azalmıştır. Bunun temel nedeni, TBHSSDTDY'de Tank Tasarım Sınıfı-I için tasarımın DD-3 deprem düzeyine göre, API-650 standardında ise Deprem Kullanım Sınıfı-I için tasarımın DD-2 deprem düzeyine göre gerçekleştirilmesidir. API-650'de TBHSSDTDY'den farklı olarak Deprem Kullanım Sınıfı-I'e göre tasarım yapıldığında Çizelge 3.12'de tankların kullanım amacına ve önemine göre tanımlanmış önem katsayısı (Importance Factor) değeri Tank Tasarım Sınıfı- II'ye kıyasla daha düşük olmaktadır.

Zemin sınıfının etkisi değerlendirildiğinde, TBHSSDTDY'ye göre hesaplanan devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerlerinin, zemin sınıfı ZA'dan ZE'ye doğru ilerledikçe belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bölüm 4.3.3'te Tank Tasarım Sınıfı-II kapsamında elde edilen sonuçlar da bu eğilimi doğrulamakta; özellikle ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarında artışın daha belirgin hale geldiği görülmektedir.

Model M06 ya tüm zemin sınıflarına ait yatay elastik tasarım spektral ivmelerinin grafiği Şekil 4.41'da verilmiştir. Zemin sınıflarına göre elde edilen $S_{ae}(T_i, \xi_i)$ değerleri Çizelge 4.14'de özetlenmiştir.



Şekil 4.41. M06-ZA~ZE-Lf30-P Modellerindeki 0 ile 1 sn. arasındaki yatay elastik tasarım spektral ivmeleri $S_{ae}(T_i, \xi_i)$ değeri (TTS-I)

Bölüm 4.3.3'te Tank Tasarım Sınıfı-II kapsamında elde edilen ZC zemin sınıfının ZE ve ZD zemin sınıfına oranla daha elverişsiz sonuçlar verirken Tank Tasarım Sınıfı-I kapsamında elde edilen sonuçlarda bu durum görülmemiştir. Bunun başlıca nedeni TBHSSDTDY'de Tank Tasarım Sınıfı- II olduğunda DD3 deprem düzeyine göre tasarım parametresi S_s' değerinin 0.246 değerine düşmesi ve bunun sonucunda zemin ivme büyütme katsayısının; F_s ve F_1 üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu katsayılar ile hesaplanan S_{DS} Denklem (3.4) ve S_{D1} Denklem (3.5) değerleri, karakteristik periyotlar olan T_A Denklem (3.10) ve T_B Denklem (3.11) ile birlikte kullanılarak, tanklara özgü doğal periyot T_i değeriyle karşılaştırılmakta ve buna bağlı olarak spektral ivme $S_{ae}(T,\xi)$, Denklem (3.6) (3.7), (3.8) ve (3.9)'a göre belirlenmektedir.

TBDY-2018'de tüm zemin sınıfı için hesaplanan S_s' değerleri Çizelge 4.14'da özetlendiği üzere, ZA'dan ZE'ye kadar olan zemin sınıfları için artan bir katsayıyla belirlenmiştir. API-650 DD-2 deprem düzeyine göre tasarım yapıldığından yerel zemin sınıfı değerleri değişmemiş, Çizelge 4.10'daki değerler aynı kalmıştır.

Çizelge 4.14. $S_s' = 0.246$ değeri için kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı, F_S (TBDY-2018)

Yerel Zemin Sınıfı	$S_s' = 0.246$	$S_s' \leq 0.25$
ZA	0.8	*0.8*
ZB	0.9	*0.9*
ZC	1.3	*1.3*
ZD	1.6	*1.6*
ZE	2.4	*2.4*

Hesap sonuçlarına göre, TBHSSDTDY kapsamında elde edilen moment değerleri; M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) değerleri arasındaki oran en büyük 3.5 kat (M11-ZE-L_f30-P), en küçük ise 1.7 kat (M11-ZB-L_f30-P) olup ortalama 2.3 kat daha büyük değerler elde edilmiştir. M_{OT}' (TBHSSDTDY), M_s (API-650) değerleri arasındaki oran en büyük 1.5 kat, en küçük ise 0.6 kat olup ortalama 0.9 kat değerler elde edilmiştir. Tank tabanının altındaki düzlemdeki devrilme momenti API-650 standardına göre hesaplanan M_s

değerleri, TBHSSDTDY göre hesaplanan M'_{OT} değerine göre ZE zemin sınıfı hariç daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, ZE zemin sınıfı için toplam kesme kuvveti bakımından API-650 standardına kıyasla TBHSSDTDY yönetmeliğinin daha yüksek sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu durumun, analiz edilen tüm zemin sınıfları arasında sadece ZE sınıfında ortaya çıkması ise dikkat çekicidir. Bu durum, zemin sınıfına bağlı olarak yönetmeliklerin farklı deprem büyütme katsayılarına sahip olması ve moment birleşim yöntemlerindeki (doğrudan toplama ve karelerinin karekökü) farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

5 farklı zemin sınıfı dikkate alınarak yapılan 11 farklı geometrideki toplam 55 model sonuçları incelendiğinde; sıvı yüksekliği artıp, çap azaldıkça yani H/D arttıkça her iki yönetmelikte de devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerinin arttığı görülmektedir.

Hesap sonuçlarına göre, TBHSSDTDY kapsamında elde edilen kesme değerleri; TBHSSDTDY (V_d), API-650 (V) değerleri arasındaki oran en büyük 3.2 kat (M11-ZE-L_f30-P), en küçük ise 1.4 kat (M01-ZB-L_f30-P) olup ortalama 1.9 kat daha büyük değerler elde edilmiştir.

4.3.5. Farklı Fay Mesafeleri (Lf) İçin, Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Devrilme Momentleri ve Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, petrol depolama amacıyla kullanılan ve aynı geometrik özelliklere sahip 3 farklı düşey silindirik tank modeli için 3 farklı faya olan mesafe değeri ele alınmıştır. Model seçiminde üç farklı geometri dikkate alınmış, kısa-geniş (M01) veya yüksek-dar (M11) gibi uç geometriler ve ortalama geometriyi (M06) temsil eden model olmak üzere toplam üç farklı model kullanılmıştır. Böylece, farklı geometrik özelliklerinde faya olan uzaklık değişkeninde devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Modellerde aktif faya olan mesafe L_f, sırasıyla 10 km, 20 km ve 30 km olarak zemin sınıfı ise ZB olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında, tankın tabanındaki düzlemlerin farklı konumlarına bağlı olarak, faya olan uzaklık değerinin tankların devrilme momentlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Her model geometrisi grubu (M01, M06 ve M11) için çalkalanma yüksekliği eşit alınmış böylelikle duvar yükseklik farkından oluşacak tasarım kuvvetleri sonuçlarındaki değer değişimi dikkate alınmamıştır.

Her iki yönetmelik için devrime momentinin farklı düzlemlerdeki değerleri Çizelge 4.15'de sunulmuştur.

Çizelge 4.15. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları

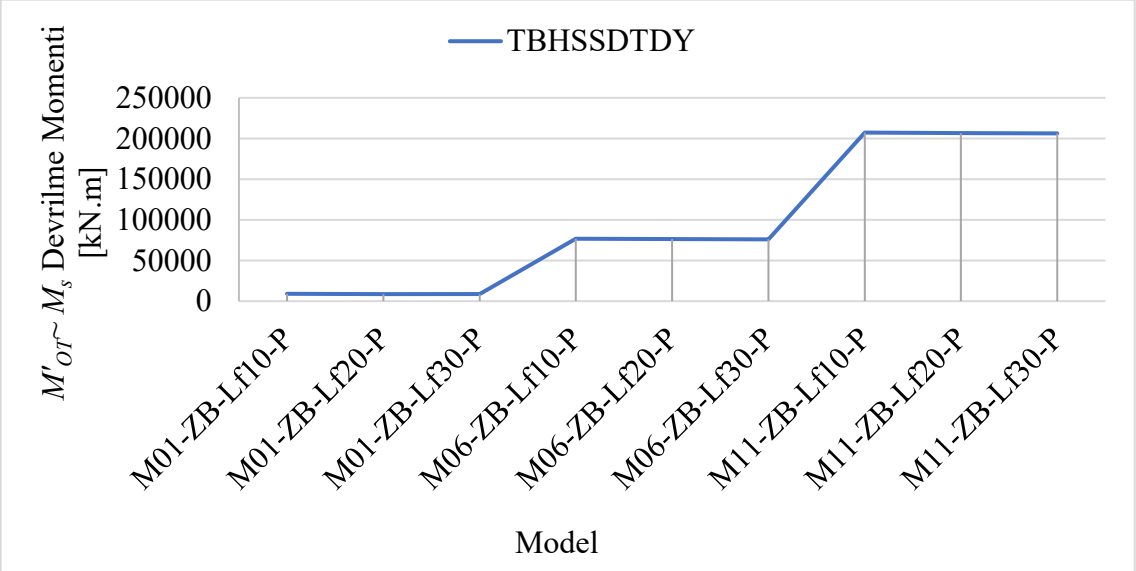
Model İsmi	**TBHSSDTDY** M_{OT}	**API-650** M_{RW}	**TBHSSDTDY** M'_{OT}	**API-650** M_s
	[kN.m]	**[kN.m]**	**[kN.m]**	**[kN.m]**
M01-ZB-L_f10-P	8914.6	1951.9	52062.5	25972.7
M01-ZB-L_f20-P	8818.3	1951.9	51430.6	25972.7
M01-ZB-L_f30-P	8722.1	1951.9	50798.7	25972.7
M06-ZB-L_f10-P	76828.9	17360.0	108209.9	61444.2
M06-ZB-L_f20-P	76392.9	17360.0	107705.0	61444.2
M06-ZB-L_f30-P	75956.9	17360.0	107200.1	61444.2
M11-ZB-L_f10-P	207266.6	48522.2	214475.6	124852.5
M11-ZB-L_f20-P	206724.2	48522.2	213933.2	124852.5
M11-ZB-L_f30-P	206249.7	48522.2	213458.6	124852.5

Her iki yönetmelik kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen toplam kesme kuvveti değerleri, farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.16'de verilmiştir.

Çizelge 4.16. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları

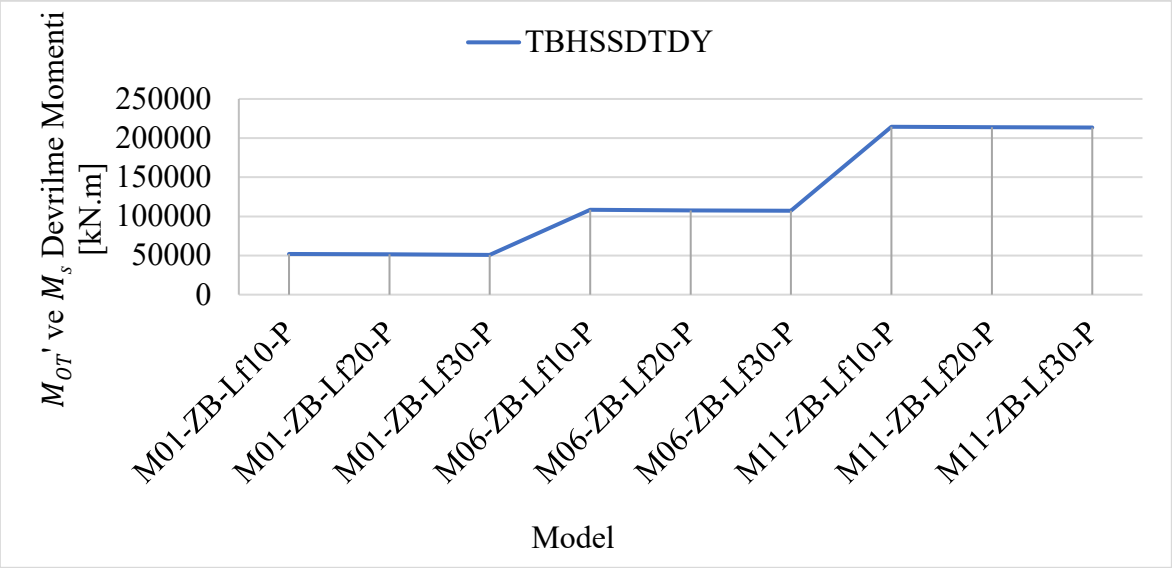
Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
	[kN]	**[kN]**
M01-ZB-L_f10-P	4609.0	1299.2
M01-ZB-L_f20-P	4568.0	1299.2
M01-ZB-L_f30-P	4527.0	1299.2
M06-ZB-L_f10-P	14645.0	3972.8
M06-ZB-L_f20-P	14588.0	3972.8
M06-ZB-L_f30-P	14531.0	3972.8
M11-ZB-L_f10-P	21265.0	5362.3
M11-ZB-L_f20-P	21234.0	5362.3
M11-ZB-L_f30-P	21207.0	5362.3

Farklı faya olan mesafe değerleri için oluşturulan tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.42'de sunulmuştur.



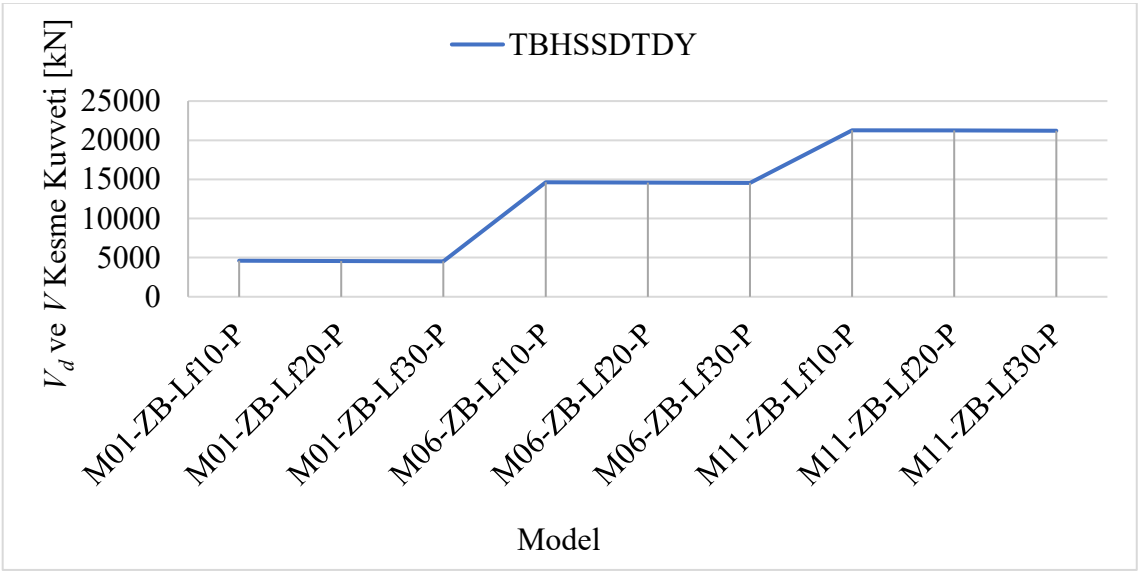
Şekil 4.42. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için M_{OT} (TBHSSDTDY) değerleri

Farklı faya olan mesafe değerleri için oluşturulan tank modellerine ait M'_{OT} (TBHSSDTDY) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.43'de sunulmuştur.



Şekil 4.43. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için M'_{OT} (TBHSSDTDY) değerleri

Farklı faya olan mesafe değerleri için oluşturulan tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.44'de sunulmuştur.



Şekil 4.44 Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için V_d (TBHSSDTDY) toplam kesme kuvveti değerleri

M01, M06 ve M11 modeli sonuçları incelendiğinde; TBHSSDTDY'de faya yakınlık katsayısı ($\varphi_{1,YF}$), S_1' (Denklem 3.2) değerini ve S_{D1} (Denklem 3.5) değerini etkileyen bir parametredir. S_1' ve S_{D1} değerler sonucu bulunan T_A ve T_B değeri sonucu tank darbesel ve devinimsel periyot değerine göre Denklem (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9) sonucu elde edilen yatay elastik tasarım ivme spektrumu $S_{ae}(T,\xi)$ belirlenmektedir. Yatay ivme spektrumun $S_{ae}(T,\xi)$ değerinin hesaplanmasında kullanılan S_{D1} büyüklüğü ilgili spektrumun azalan eğim bölgesine yani Denklem (3.8) ve (3.9) spektrumun azalan eğimindeki (Bkz. Şekil 4.26) bölgeye düşmektedir.

M01 modeli için, faya olan mesafenin 10 km olması durumunda elde edilen devrilme momenti değeri; 20 km ve 30 km mesafedeki modellere göre sırasıyla %2.2 ve %1.1 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, aktif fay hattına olan mesafenin azaldıkça tasarım momenti üzerinde belirgin bir artışa neden olduğunu göstermektedir.

M01 modeli için, faya olan mesafenin 10 km olması durumunda elde edilen toplam kesme kuvveti değeri; 20 km ve 30 km mesafedeki modellere göre sırasıyla %1.8 ve %0.9 oranında daha yüksek toplam kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir.

M06 modeli için, faya olan mesafenin 10 km olması durumunda elde edilen devrilme momenti değeri; 20 km ve 30 km mesafedeki modellere göre sırasıyla %1.1 ve %0.6 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, aktif fay hattına olan mesafenin azaldıkça tasarım momenti üzerinde belirgin bir artışa neden olduğunu göstermektedir. M06 modeli için, faya olan mesafenin 10 km olması durumunda elde edilen toplam kesme kuvveti değeri; 20 km ve 30 km mesafedeki modellere göre sırasıyla %0.5 ve %0.2 oranında daha yüksek toplam kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir.

M11 modeli için, faya olan mesafenin 10 km olması durumunda elde edilen devrilme momenti değeri; 20 km ve 30 km mesafedeki modellere göre sırasıyla %0.3 ve %0.1 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, aktif fay hattına olan mesafenin azaldıkça tasarım momenti üzerinde belirgin bir artışa neden olduğunu göstermektedir. M11 modeli için, faya olan mesafenin 10 km olması durumunda elde edilen toplam kesme kuvveti değeri; 20 km ve 30 km mesafedeki modellere göre sırasıyla %0.3 ve %0.1 oranında daha yüksek toplam kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir.

Bu değerler sonucunda H/D oranı arttıkça, faya olan mesafe katsayısının devrilme momenti ve toplam kesme kuvvetine etkisinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre tasarım aşamasında aktif faya olan mesafe değerinin sonuçları anlamlı derecede etkilemediği görülmüştür.

4.3.6. Farklı Fay Mesafeleri (Lf) ve Zemin Sınıfları İçin Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Devrilme Momentleri ile Toplam Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, petrol depolama amacıyla kullanılan ve aynı geometrik özelliklere sahip 1 adet düşey silindirik tank modeli (M06) için 5 farklı zemin sınıfı ve 3 farklı faya olan mesafe değeri ele alınmıştır. Modellerde aktif faya olan mesafe L_f, sırasıyla 10 km, 20 km ve 30 km olarak, zemin sınıfları ise ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE olarak değişmektedir. Çalışma kapsamında, tankın tabanındaki düzlemlerin farklı konumlarına bağlı olarak, farklı zemin sınıfı ve geometrilerdeki tankların devrilme momentlerinin ve toplam kesme kuvvet değerlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Çizelge 4.17. Farklı faya olan mesafe (L_f) ve farklı zemin sınıfı değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650), M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) sonuçları

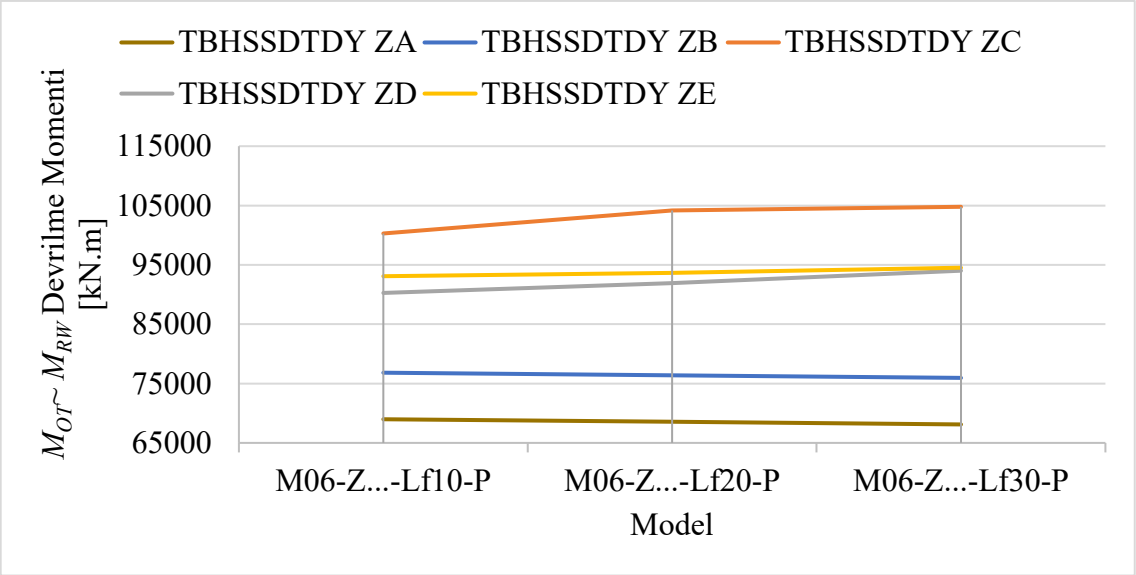
Model İsmi	**TBHSSDTDY**	**API-650**	**TBHSSDTDY**	**API-650**
	M_{OT} **[kN.m]**	M_{RW} **[kN.m]**	M'_{OT} **[kN.m]**	M_s **[kN.m]**
M06-ZA-Lf10-P	68985.1	14260.3	97012.2	50368.4
M06-ZA-Lf20-P	76828.9	17742.8	108209.9	56226.4
M06-ZA-Lf30-P	100290.7	20888.6	139994.1	60368.5
M06-ZB-Lf10-P	90268.3	24059.9	124609.0	64170.1
M06-ZB-Lf20-P	93089.6	27554.7	126697.5	67267.3
M06-ZB-Lf30-P	68549.1	14260.3	96507.4	50368.4
M06-ZC-Lf10-P	76392.9	17742.8	107705.0	56226.4
M06-ZC-Lf20-P	104161.0	20888.6	145713.2	60368.5
M06-ZC-Lf30-P	91949.7	24059.9	127207.6	64170.1
M06-ZD-Lf10-P	93654.3	27554.7	127720.6	67267.3
M06-ZD-Lf20-P	68113.1	14260.3	96002.5	50368.4
M06-ZD-Lf30-P	75956.9	17742.8	107200.1	56226.4
M06-ZE-Lf10-P	104786.8	20888.6	146834.7	60368.5
M06-ZE-Lf20-P	94017.4	24059.9	130393.1	64170.1
M06-ZE-Lf30-P	94522.6	27554.7	129210.8	67267.3

Her iki yönetmelik kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen toplam kesme kuvveti değerleri, farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Farklı faya olan mesafe (L_f) ve farklı zemin sınıfı değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için toplam kesme kuvveti V_d (TBHSSDTDY), V (API-650), sonuçları

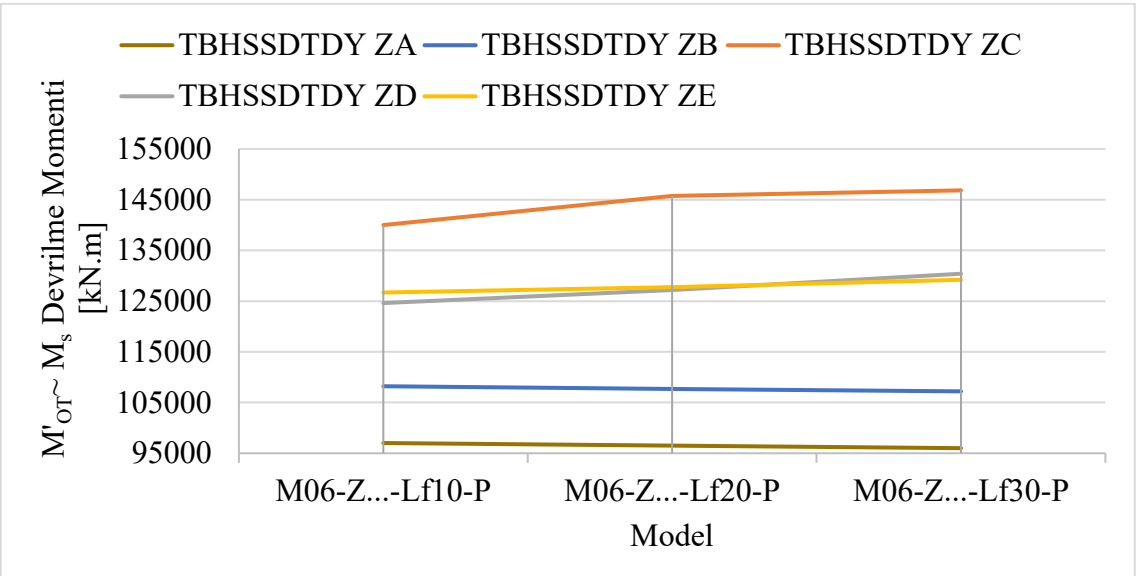
Model İsmi	**TBHSSDTDY** V_d	**API-650** V
	[kN]	**[kN]**
M06-ZA-L_f10-P	13114.0	3216.6
M06-ZA-L_f20-P	13057.0	3216.6
M06-ZA-L_f30-P	13000.0	3216.6
M06-ZB-L_f10-P	14645.0	4002.3
M06-ZB-L_f20-P	14588.0	4002.3
M06-ZB-L_f30-P	14531.0	4002.3
M06-ZC-L_f10-P	18802.0	4573.9
M06-ZC-L_f20-P	19603.0	4573.9
M06-ZC-L_f30-P	19780.0	4573.9
M06-ZD-Lf10-P	16582.0	5136.5
M06-ZD-Lf20-P	16957.0	5136.5
M06-ZD-Lf30-P	17416.0	5136.5
M06-ZE-Lf10-P	16650.0	5570.3
M06-ZE-Lf20-P	16812.0	5570.3
M06-ZE-Lf30-P	17040.0	5570.3

Farklı faya olan mesafe değerlerine sahip tank modellerine ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.45'de sunulmuştur.



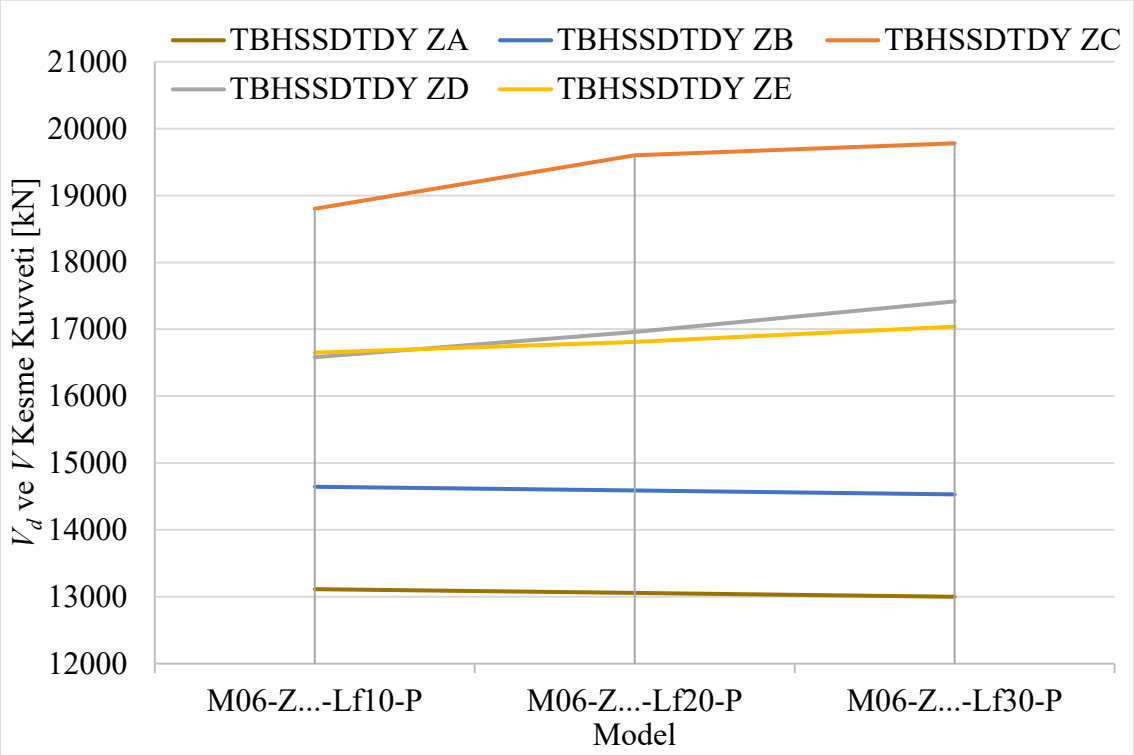
Şekil 4.45. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) değerleri

Farklı faya olan mesafe değerlerine sahip tank modellerine ait M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.46'de sunulmuştur.



Şekil 4.46. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için M'_{OT} (TBHSSDTDY), M_s (API-650) değerleri

Farklı faya olan mesafe değerlerine sahip tank modellerine ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.47'de sunulmuştur.



Şekil 4.47. Farklı faya olan mesafe (L_f) değerlerine bağlı olarak M06 tank modelleri için V_d (TBHSSDTDY), V (API-650) toplam kesme kuvveti değerleri

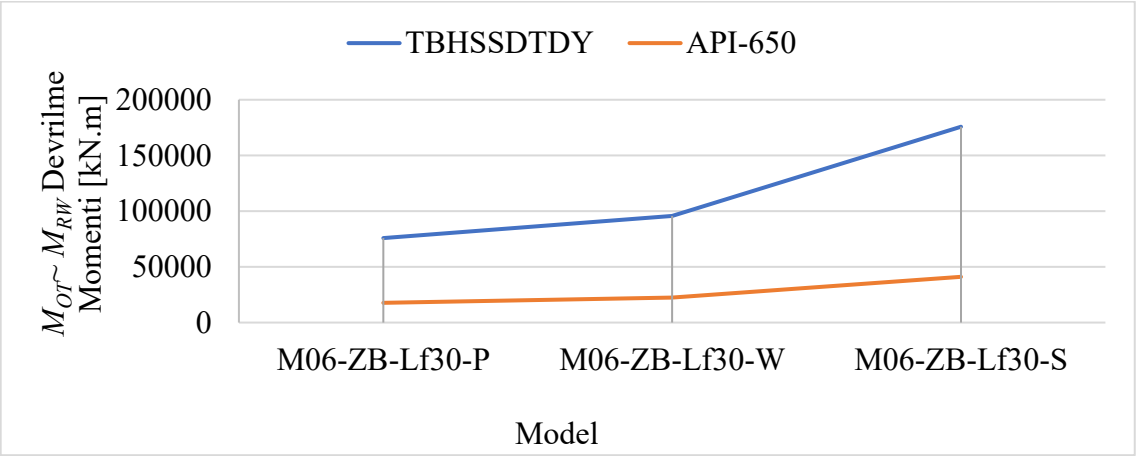
M06 modeli özelinde sonuçlar incelendiğinde; ZC zemin sınıfı için faya yakınlık katsayısı değiştikçe, hesaplanan moment ve kesme kuvveti değerlerinin anlamlı derecede değiştiği görülmüştür. TBHSSDTDY'de faya yakınlık katsayısı ($\varphi_{1,YF}$), S_1' Denklem (3.2) değerini etkileyen ve S_{D1} Denklem (3.5) değerini etkileyen bir parametredir. T_A, T_B değerinin belirlenmesinde de S_{D1} değeri kullanılmaktadır. Yatay elastik tasarım ivme spektrumu $S_{ae}(T,\xi)$; T_A, T_B, T_c ve T_i periyotlarının bir fonksiyonu olarak belirlenmektedir. (Bkz. Denklem (3.10) ve (3.11)) Bunun sonucunda incelenen modellerde faya yakınlık katsayısı ($\varphi_{1,YF}$) arttıkça ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarında tasarım devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerleri azalmaktadır. ZA ve ZB zemin sınıflarında ise faya yakınlık katsayısı ($\varphi_{1,YF}$) arttıkça tasarım devrilme momenti artmaktadır.

4.3.7. Farklı Sıvı Yoğunlukları (ρ) İçin, Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Devrilme Momentlerinin Karşılaştırılması

Genel kullanıma yönelik olarak en sık karşılaşılan petrol ve suya ek olarak, yoğunluğu daha yüksek olan sülfürik asit de dahil edilerek, farklı yoğunlukların tasarım üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, sıvıların tasarım hesaplarında kullanılmak üzere karakteristik kütle yoğunlukları sırasıyla su için 1000 kg/m³, ham petrol için 800 kg/m³ ve sülfürik asit için 1840 kg/m³ olarak esas alınmıştır. Sıvı türleri, hesaplamalarda sırasıyla P (Petrol), W (Water – Su) ve S (Sulfuric Acid – Sülfürik Asit) şeklinde sembollerle ifade edilmiştir.

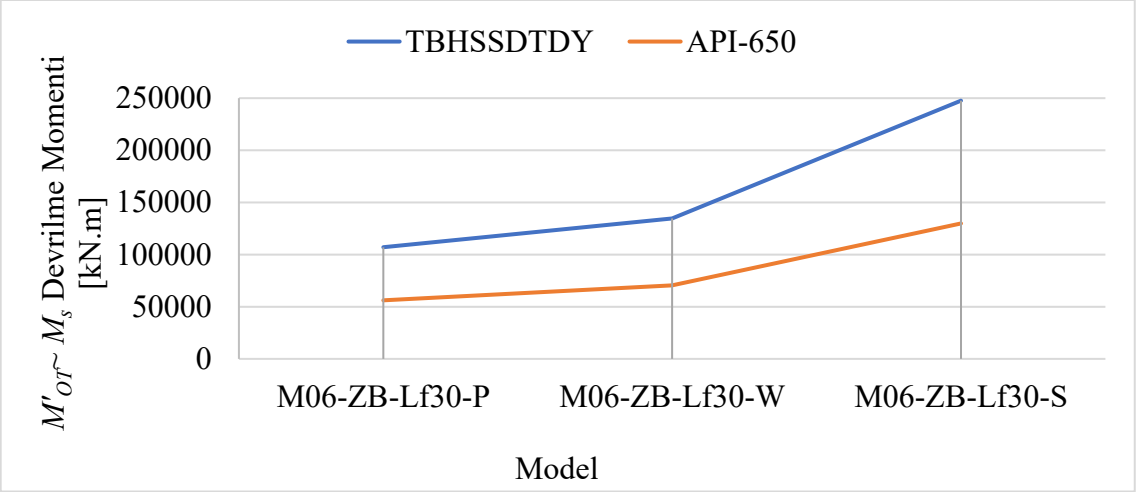
Bu bölümde, sıvı yoğunluğunun tank tasarım parametreleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üç farklı sıvı türü dikkate alınmış zemin sınıfı değeri ZB olarak sabit ve faya olan mesafe 30 km olarak sabit tutularak M06 tank modeli kullanılmıştır. Yaygın uygulamalarda karşılaşılan su ve ham petrolün yanı sıra, daha yüksek yoğunluğa sahip olan sülfürik asit de değerlendirmeye alınarak, farklı yoğunluk değerlerinin devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

Sıvı Yoğunluğu (ρ) Değerlerine Bağlı Olarak M06 tank modeline ait M_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_{RW} (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.48'de sunulmuştur.



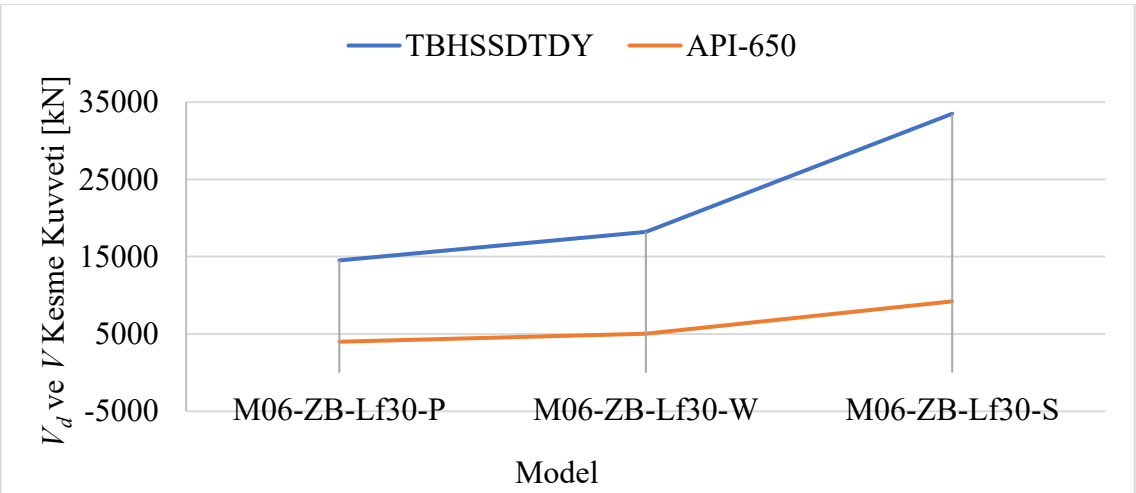
Şekil 4.48. Sıvı yoğunluğu (ρ) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için M_{OT} (TBHSSDTDY), M_{RW} (API-650) değerleri

Sıvı Yoğunluğu (ρ) Değerlerine Bağlı Olarak M06 tank modeline ait M'_{OT} (TBHSSDTDY) ve M_s (API-650) devrilme momenti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.49'da sunulmuştur.



Şekil 4.49. Sıvı yoğunluğu (ρ) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için M'_{OT} (TBHSSDTDY), M_s (API-650) değerleri

Sıvı Yoğunluğu (ρ) Değerlerine Bağlı Olarak M06 tank modeline ait V_d (TBHSSDTDY) ve V (API-650) toplam kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.50'de sunulmuştur.



Şekil 4.50. Sıvı yoğunluğu (ρ) değerlerine bağlı olarak M06 tank modeli için toplam kesme kuvveti değerleri

Sonuç olarak sıvı yoğunluğundaki değişimin, tasarım devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Farklı yoğunluklara sahip sıvılar için gerçekleştirilen karşılaştırmalı değerlendirmelerde, yoğunluğu yüksek olan sıvıların (sülfürik asit) içeren tankın, devrilme moment ve toplam kesme kuvveti değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sıvı yoğunluğu ile tasarım devrilme momenti arasındaki ilişkinin doğrusal bir eğilim gösterdiğini ve daha yoğun sıvıların depolanacağı tankların devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti için daha yüksek yapısal dayanım gerektirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de görüldüğü üzere, sıvı yoğunluğunun artmasıyla birlikte tasarım devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Her iki standart kapsamında da petrol (P), su (W) ve sülfürik asit (S) sıvıları sırasıyla değerlendirildiğinde, yoğunluğu en düşük olan petrolde en küçük devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerleri hesaplanırken, yoğunluğu en yüksek olan sülfürik asitte en yüksek devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Sıvı yoğunluğu ile devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerleri arasında doğrudan bir ilişki olduğu ve bu etkinin yönetmelikler kapsamında paralellik gösterdiği görülmüştür.

4.3.8.Farklı Tank Geometrilerine Göre Çalkalanma Dalga Yüksekliklerinin Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Karşılaştırması

Bu bölümde, her iki yönetmelik içinde, tank tasarım sınıfı (TTS) ve deprem kullanım sınıfı (DKS) II kapsamında olan, petrol depolanan farklı geometrik özelliklere sahip 11 adet tank modeli için 5 farklı zemin sınıfı (ZA–ZE) değerlendirmeye alınmıştır. Her bir model, farklı çap ve yükseklik oranlarını temsil edecek şekilde oluşturulmuş olup, geometrik özellikler ve zemin sınıfı değişiminin, çalkalanma dalga yüksekliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Modellerin tamamında aktif faya olan mesafe L_f = 30 km olarak sabitlenmiştir. Her iki yönetmelikte de çalkalanma dalga yüksekliğini etkiyen başlıca unsur devinimsel (convective) mod sonucu oluşan yatay ivmedir. Çalışma kapsamında, her bir model için çalkalanma dalga yüksekliği hesaplanmış çap/yükseklik oranlarındaki değişimlere bağlı olarak karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen çalkalanma dalgası yüksekliği değerleri (Bkz. Çizelge 4.19) ve grafiksel (Bkz. Şekil 4.51 ~ Şekil 4.55) olarak sunularak, farklı geometrilere sahip tankların çalkalanma dalgası yüksekliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.19. Farklı zemin sınıflarına göre d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY d_{max}**	**API-650 δ_S**
		[m]	**[m]**
ZEMIN SINIFI ZA V_{s30}=1600	M01-ZA-L_f30-P	0.29	0.17
	M02-ZA-L_f30-P	0.41	0.22
	M03-ZA-L_f30-P	0.49	0.26
	M04-ZA-L_f30-P	0.50	0.28
	M05-ZA-L_f30-P	0.51	0.30
	M06-ZA-L_f30-P	0.50	0.31
	M07-ZA-L_f30-P	0.49	0.31
	M08-ZA-L_f30-P	0.48	0.31
	M09-ZA-L_f30-P	0.47	0.31
	M10-ZA-L_f30-P	0.46	0.31
	M11-ZA-L_f30-P	0.45	0.31

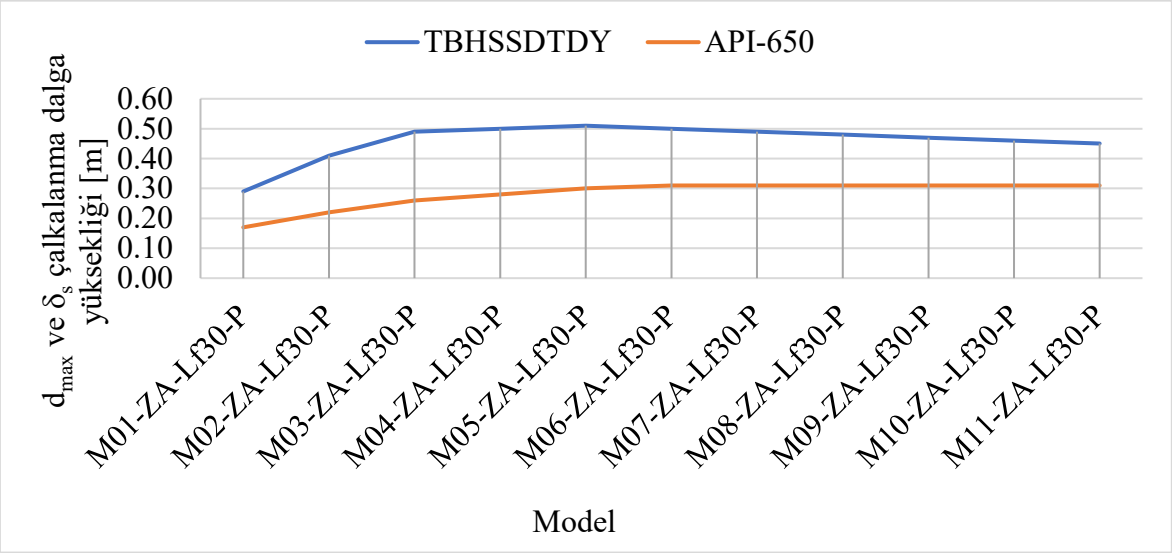
Çizelge 4.19. Farklı zemin sınıflarına göre d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) (Devam)

	Model İsmi	**TBHSSDTDY d_{max}**	**API-650 δ_S**
		[m]	**[m]**
ZEMIN SINIFI ZB V_{s30}=950	M01-ZB-L_f30-P	0.29	0.20
	M02-ZB-L_f30-P	0.41	0.28
	M03-ZB-L_f30-P	0.49	0.33
	M04-ZB-L_f30-P	0.50	0.35
	M05-ZB-L_f30-P	0.51	0.37
	M06-ZB-L_f30-P	0.50	0.38
	M07-ZB-L_f30-P	0.49	0.38
	M08-ZB-L_f30-P	0.48	0.39
	M09-ZB-L_f30-P	0.47	0.39
	M10-ZB-L_f30-P	0.46	0.39
	M11-ZB-L_f30-P	0.45	0.38
ZEMIN SINIFI ZC V_{s30}=500	M01-ZC-L_f30-P	0.53	0.33
	M02-ZC-L_f30-P	0.77	0.46
	M03-ZC-L_f30-P	0.90	0.54
	M04-ZC-L_f30-P	0.93	0.60
	M05-ZC-L_f30-P	0.94	0.63
	M06-ZC-L_f30-P	0.93	0.64
	M07-ZC-L_f30-P	0.92	0.65
	M08-ZC-L_f30-P	0.90	0.65
	M09-ZC-L_f30-P	0.88	0.66
	M10-ZC-L_f30-P	0.86	0.65
	M11-ZC-L_f30-P	0.83	0.63

Çizelge 4.19. Farklı zemin sınıflarına göre d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) (Devam)

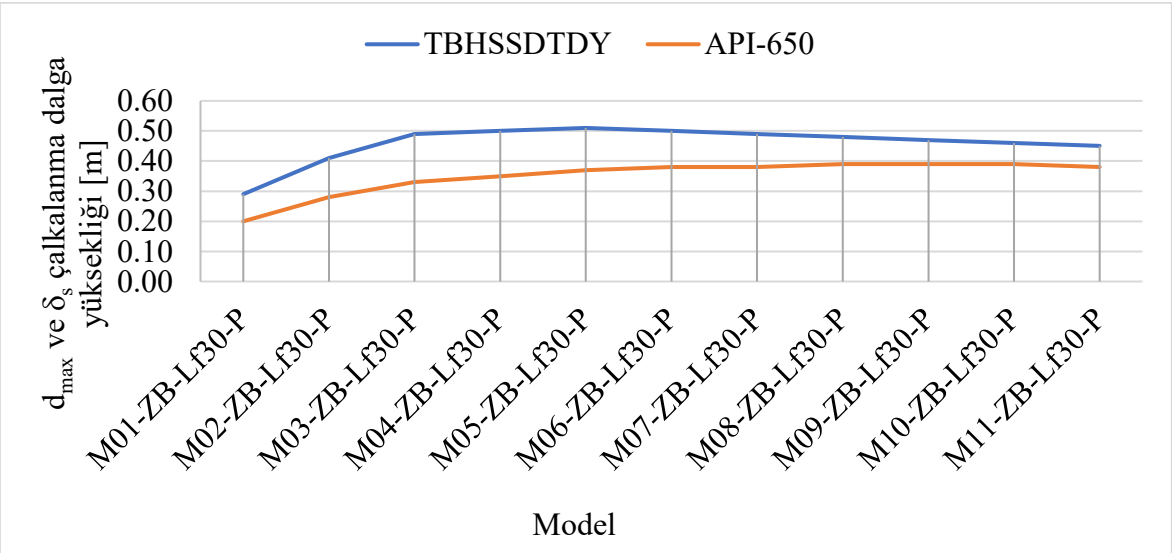
	Model İsmi	**TBHSSDTDY** $\mathbf{d_{max}}$ **[m]**	**API-650** $\boldsymbol{\delta s}$ **[m]**
ZEMIN SINIFI ZD V_{s30}=250	M01-ZD-L_f30-P	0.76	0.47
	M02-ZD-L_f30-P	1.09	0.64
	M03-ZD-L_f30-P	1.27	0.76
	M04-ZD-L_f30-P	1.31	0.84
	M05-ZD-L_f30-P	1.33	0.88
	M06-ZD-L_f30-P	1.30	0.90
	M07-ZD-L_f30-P	1.29	0.91
	M08-ZD-L_f30-P	1.27	0.91
	M09-ZD-L_f30-P	1.24	0.92
	M10-ZD-L_f30-P	1.22	0.92
	M11-ZD-L_f30-P	1.17	0.89
ZEMIN SINIFI ZE V_{s30}=150	M01-ZE-L_f30-P	1.10	0.68
	M02-ZE-L_f30-P	1.58	0.93
	M03-ZE-L_f30-P	1.86	1.10
	M04-ZE-L_f30-P	1.91	1.22
	M05-ZE-L_f30-P	1.93	1.28
	M06-ZE-L_f30-P	1.90	1.31
	M07-ZE-L_f30-P	1.89	1.33
	M08-ZE-L_f30-P	1.85	1.33
	M09-ZE-L_f30-P	1.81	1.33
	M10-ZE-L_f30-P	1.77	1.33
	M11-ZE-L_f30-P	1.72	1.29

ZA zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait d_{max} (TBHSSDTDY) ve δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliğinin karşılaştırması Şekil 4.51'de sunulmuştur.



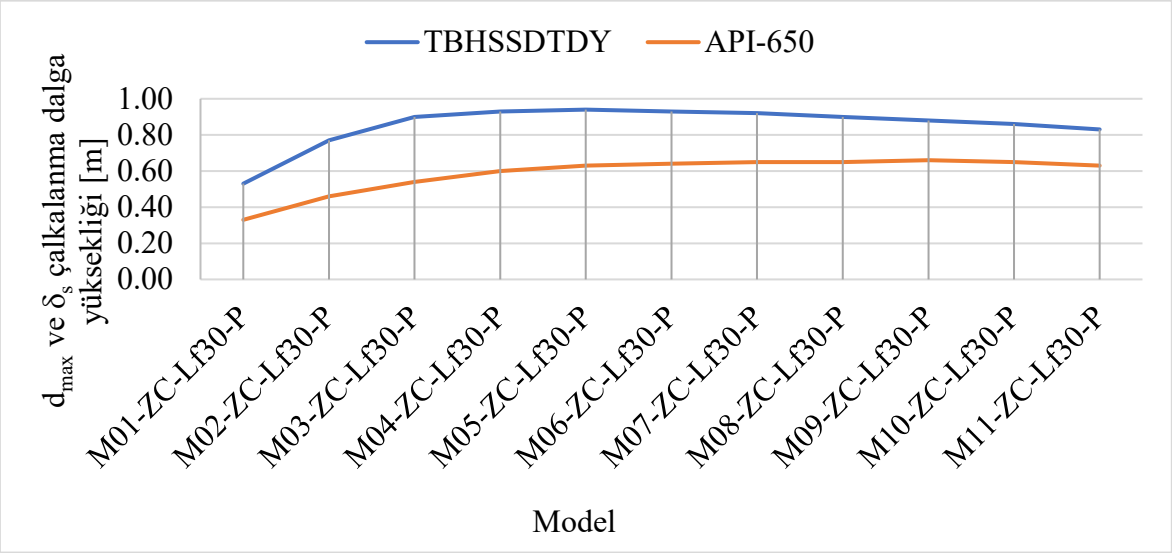
Şekil 4.51. ZA zemin sınıfı d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZB zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait d_{max} (TBHSSDTDY) ve δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliğinin karşılaştırması Şekil 4.52'de sunulmuştur.



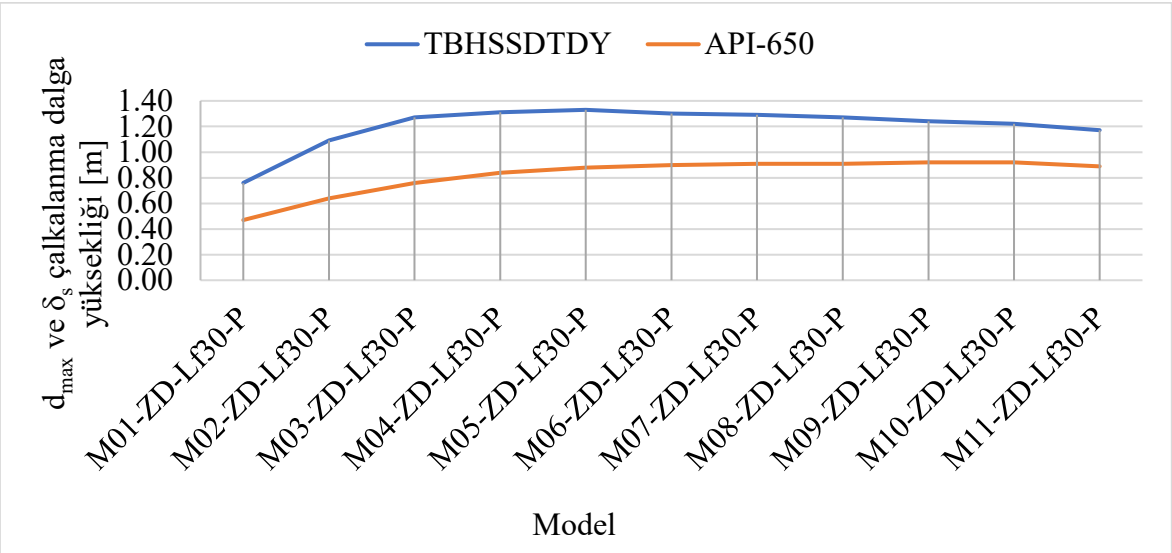
Şekil 4.52. ZB zemin sınıfı d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZC zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait d_{max} (TBHSSDTDY) ve δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliğinin karşılaştırması Şekil 4.53'de sunulmuştur.



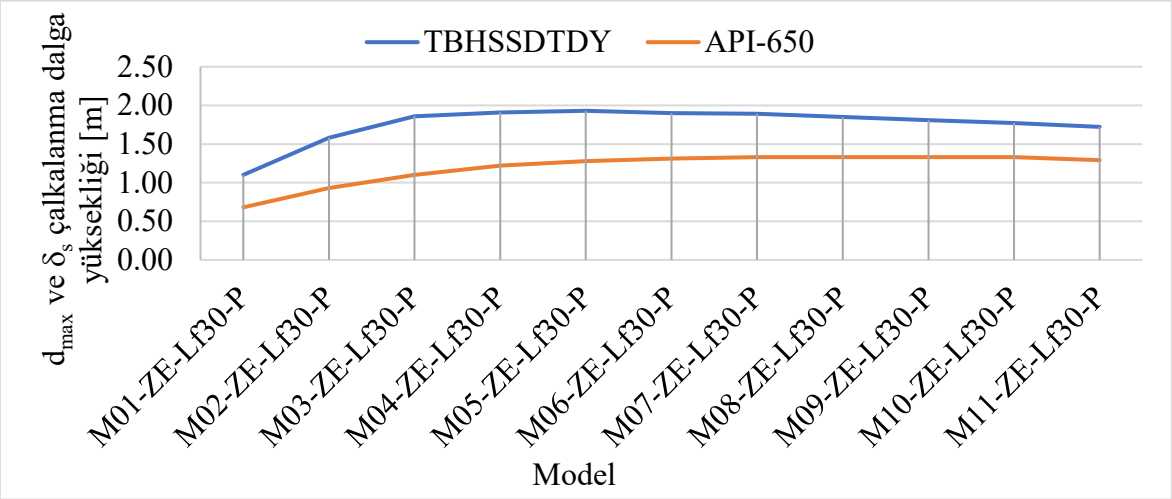
Şekil 4.53. ZC zemin sınıfı d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZD zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait d_{max} (TBHSSDTDY) ve δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliğinin karşılaştırması Şekil 4.54'de sunulmuştur.



Şekil 4.54. ZD zemin sınıfı d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

ZE zemin sınıfı için oluşturulan tank modellerine ait d_{max} (TBHSSDTDY) ve δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliğinin karşılaştırması Şekil 4.55'de sunulmuştur.



Şekil 4.55. ZE zemin sınıfı d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) çalkalanma dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (TTS-II) (DKS- II)

Farklı zemin sınıfları (ZA~ZE) ve geometrik özelliklere sahip tank modelleri (M01~M11) için, TBHSSDTDY (d_{max}) ile API-650 (δ_S) yönetmeliklerine göre hesaplanan çalkalanma dalga yüksekliği değerleri her zemin sınıfına göre ayrı ayrı karşılaştırmalı olarak Şekil 4.51 ~ Şekil 4.55'de sunulmuştur. Tank sıvı yüksekliği artıp, tank çapı azaldıkça yani H/D oranı arttıkça her iki yönetmelikte de çalkalanma dalga yüksekliği M01'den M05 modeline kadar artarken, M06'dan M11 modeline kadar ise azaldığı görülmüştür. Çalkalanma dalgası yüksekliği her iki yönetmelikte de çap ve devinimsel (convective) tasarım ivme değeri ile doğru orantılıdır. Bu değerlerden devinimsel tasarım ivme değeri M01'den M05'e kadar artmaktayken, M05'ten M11'e gidildikçe azalmaktadır. Bu iki değerin çarpımları sonucu (her iki yönetmelikte çeşitli katsayılar ile azaltılmıştır) elde edilen çalkalanma dalgası yüksekliği M05 modelinde maksimum değere ulaşmaktadır. M05 modelinin H/D oranı 0.52'dir. Çalkalanma dalga yüksekliğinin maksimum değerinin, kısa-geniş (M01) veya yüksek-dar (M11) gibi uç geometrilerde görülmesi beklenirken, analiz sonuçlarına göre bu maksimum değer, söz konusu modellerin ortasında yer alan M05 modelinde ortaya çıkmıştır. Bu durum, dalga yüksekliği üzerindeki geometrik parametrelerin doğrusal olmayan etkilerine işaret etmektedir. Çalkalanma dalga yüksekliği değeri, beklendiği üzere, yatay tasarım ivmesine doğrudan etki eden zemin sınıfı katsayılarının artmasıyla birlikte, ZA'dan ZE'ye doğru gidildikçe artış göstermektedir.

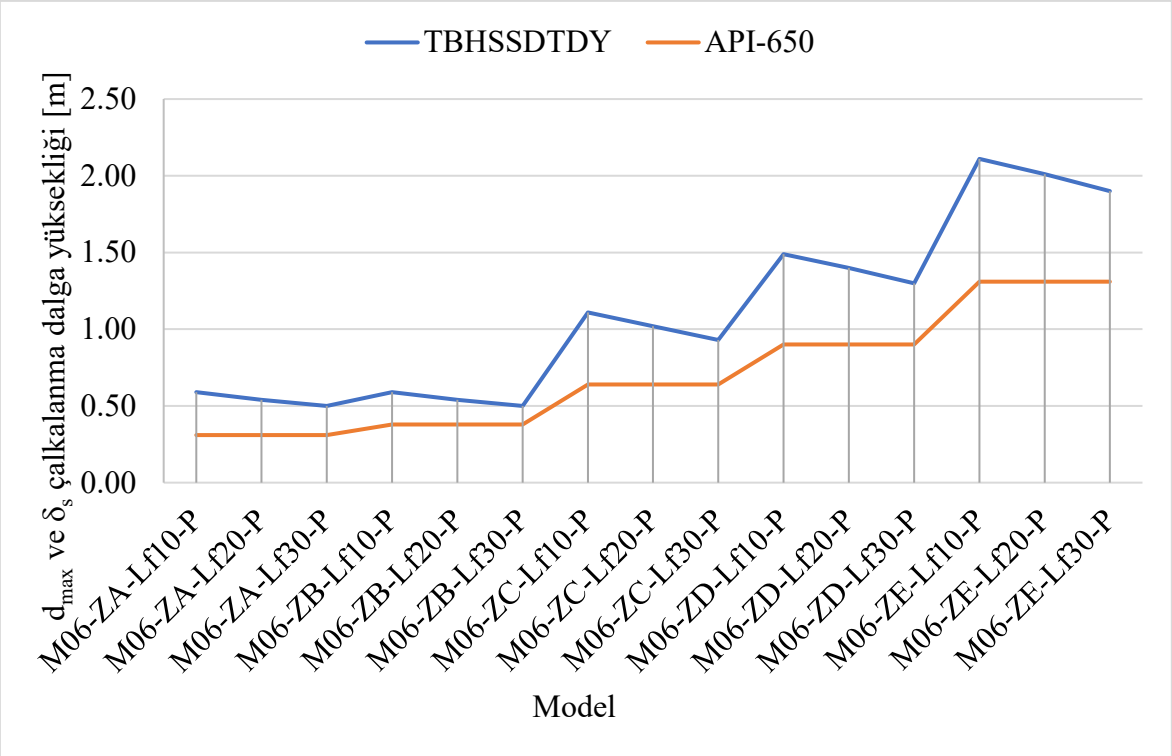
4.3.9. Farklı Aktif Faya Olan Mesafe (L_f) ve Zemin Sınıfları İçin Tank Tasarım Sınıfı II ve Deprem Kullanım Sınıfı II'ye Göre Çalkalanma Dalga Yüksekliklerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, her iki yönetmelik içinde, petrol depolanan, 1 adet tank modeli (M06) için 3 farklı faya olan mesafe değeri ve 5 farklı zemin sınıfı ele alınmıştır. Modellerde aktif faya olan mesafe L_f, sırasıyla 10 km, 20 km ve 30 km olarak, zemin sınıfları ise ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE alınmıştır. Çalışma kapsamında, farklı zemin sınıfı ve farklı faya olan mesafe değerlerinin, tankların çalkalanma dalga yüksekliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tank çalkalanma yükseklikleri, TBHSSDTDY yönetmeliği kapsamında d_{max} ve API-650 yönetmeliğinde δ_S terimleri ile hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında, her bir modelin çalkalanma dalgası yüksekliği hesaplanmış ve bu değerlerin zemin sınıfı ve faya olan mesafeye bağlı olarak değişimleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen çalkalanma dalgası yüksekliği Çizelge 4.20 ve grafiksel olarak Şekil 4.56'da sunularak, farklı geometrilere sahip tankların dinamik davranışlarındaki çalkalanma dalgası yüksekliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.20. Farklı aktif faya olan mesafe ve zemin sınıflarına göre d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II)

Model İsmi	**TBHSSDTDY** d_{max} **[m]**	**API-650** δ_S **[m]**
M06-ZA-L_f10-P	0.59	0.31
M06-ZA-L_f20-P	0.54	0.31
M06-ZA-L_f30-P	0.50	0.31
M06-ZB-L_f10-P	0.59	0.38
M06-ZB-L_f20-P	0.54	0.38
M06-ZB-L_f30-P	0.50	0.38
M06-ZC-L_f10-P	1.11	0.64
M06-ZC-L_f20-P	1.02	0.64
M06-ZC-L_f30-P	0.93	0.64
M06-ZD-L_f10-P	1.49	0.90
M06-ZD-L_f20-P	1.40	0.90
M06-ZD-L_f30-P	1.30	0.90
M06-ZE-L_f10-P	2.11	1.31
M06-ZE-L_f20-P	2.01	1.31
M06-ZE-L_f30-P	1.90	1.31



Şekil 4.56. Farklı aktif faya olan mesafe ve zemin sınıflarına göre d_{max} (TBHSSDTDY), δ_S (API-650) sonuçları (TTS-II), (DKS- II) karşılaştırılması

Çalkalanma dalgası yüksekliği değerleri, TBHSSDTDY kapsamında hem zemin sınıfı hem de aktif faya olan mesafe parametrelerinden etkilenmektedir. Analizler, zemin sınıfı daha zayıf dinamik özellikler gösterdikçe (ZA'dan ZE'ye doğru), her iki yönetmelikte de çalkalanma dalga yüksekliğinde belirgin bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle ZE zemin sınıfında, TBHSSDTDY yönetmeliği API-650'ye kıyasla daha yüksek çalkalanma yüksekliği değerleri öngörmüştür. Fay hattına olan mesafenin artması (L_f=10 km'den 30 km'ye) ise, TBHSSDTDY'de çalkalanma dalga yüksekliğinde kısmi bir azalma eğilimi yaratmış, fakat bu etki zemin sınıfı değişiminin etkisine kıyasla daha sınırlı kalmıştır.

Genel olarak, TBHSSDTDY yönetmeliği, API-650'ye kıyasla daha yüksek çalkalanma dalga yüksekliği değerleri öngörmektedir. Yönetmelikler arasındaki farklar özellikle zemin sınıfı ZE'de ve fay olan mesafenin daha yakın mesafelerde daha belirgin hale gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, TBHSSDTDY'nin çalkalanma dalgası etkilerini API-650'ye göre daha yüksek değerlendirerek daha muhafazakâr (güvenli tarafta) bir tasarım yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; American Petroleum Institute Standard 650 — Welded Tanks for Oil Storage - Annex E (API-650) ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği (TBHSSDTDY) kapsamında, deprem etkisi altındaki tanklara uygulanan tasarım deprem kuvvetlerinin hesaplanma yöntemleri açıklanmış ve iki yönetmeliğin yaklaşımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu doğrultuda, depolanan sıvı hacmi aynı olmak üzere farklı yükseklik/çap oranlarına sahip toplam 142 model, her iki yönetmeliğe göre incelenerek geometrik oranların yapısal davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, benzer sıvı depolama tankı tasarımları yapacak tasarımcılara, tank başlangıç boyutlarının belirlenmesinde yol göstermektir.

Tankların kullanım ve özellikleri açısından farklılık gösteren tasarımlarda kullanılmak üzere API-650 ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliğinde üç farklı sınıf tanımlanmıştır. TBHSSDTDY'de, farklı deprem düzeylerine göre tasarım yapılmakta iken, API-650 yönetmeliğinde ise yalnızca DD-2 deprem düzeyi esas alınmaktadır. API-650'de deprem düzeyi değişmemekte, bunun yerine tasarımda kullanılan ivme değerleri, yapının önem katsayısı ile çarpılarak hesaplanmaktadır. Söz konusu uygulama, deprem tasarımında API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerini esaslı biçimde birbirinden ayıran temel bir fark olarak öne çıkmaktadır.

TBHSSDTDY (2021) yönetmeliği, deprem tasarımına yönelik performans hedeflerini net biçimde tanımlamakta; tankın önem düzeyi ve maruz kalacağı deprem tehlikesine bağlı olarak, yapının "kontrollü hasar" ya da "kesintisiz kullanım" gibi belirli performans seviyelerine ulaşması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, deprem güvenliğinin tanımlı performans seviyelerine göre tank özelinde değerlendirilebilmesine olanak tanımaktadır. API-650 standardı (Annex E), performansa dayalı tasarım ilkelerini içermemekte; esas olarak eşdeğer yatay kuvvet yaklaşımına ve buna bağlı olarak tankın gerilme ve stabilite koşullarına odaklanmaktadır. Bu durum, API-650'nin tasarım yaklaşımında performans hedeflerinin yer almaması, farklı deprem düzeylerine göre yapı

davranışının değerlendirilmesine olanak tanımamakta, bu yönüyle dayanıma dayalı bir yaklaşım benimsediğini ortaya koymaktadır.

Her iki yönetmelikte, sahaya özgü deprem yer hareketi spektrumlarının kullanımı farklı kriterlerle tanımlanmıştır. API-650 kapsamında, bilinen bir fay hattına 10 km'den daha yakın mesafelerde sahaya özel deprem spektrumlarının kullanımı zorunlu tutulurken; TBHSSDTDY yönetmeliğinde bu mesafe 25 km olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında sayısal örnekler ile farklı geometrik özelliklere ve zemin sınıflarına sahip düşey silindirik çelik sıvı depolama tankları için TBHSSDTDY ve API-650 yönetmeliklerine göre yapılan sismik hesaplamalar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, darbesel ve devinimsel titreşim modlarına ait periyotlar, etkin kütleler, tasarım devrilme momenti, toplam kesme kuvveti ve çalkalanma dalga yüksekliği parametreleri esas alınarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir.

Her iki yönetmelikte de darbesel ve devinimsel periyot değerleri benzer fiziksel parametreler üzerinden hesaplanmakta, kullanılan katsayı ve formüller farklılık göstermektedir. Buna rağmen T_i ve T_c periyotları arasında ortalama %1'in altında sapmalar elde edilmiş, yönetmeliklerin bu parametreler açısından büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. API-650 standardında sunulan tasarım yöntemlerinde tankın darbesel titreşim periyodu T_i hesaplamalarda kullanılmamaktadır.

Etkin kütle hesaplamalarında, TBHSSDTDY tablo tabanlı yaklaşımı kullanırken, API-650 ampirik ifadelerle işlem yapmaktadır. m_i ve m_c değerleri karşılaştırıldığında maksimum fark sırasıyla %3.57 ve %7.03 olarak bulunmuş, hesap sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

TBHSSDTDY göre elde edilen devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti değerleri, API-650 standardına kıyasla özellikle TTS-II ve DKS-II tasarımlarında anlamlı derecede daha yüksek çıkmıştır. Bu durum özellikle spektral ivme parametrelerinin, zemin büyütme katsayıları ve tank deprem sönüm oranlarının farklı tanımlanmasından kaynaklanmaktadır. Zemin sınıfının etkisi her iki yönetmelik için değerlendirildiğinde, zemin koşulları kötüleştikçe (ZA'dan ZE'ye) hem devrilme momenti hem de toplam kesme

kuvvetinde artış gözlemlenmiştir. ZC zemin sınıfında TBHSSDTDY'de belirli aralıktaki S_{DS} değerinde, dinamik özellikleri daha zayıf olan ZD ve ZE zemin sınıflarından daha elverişsiz sonuçlar elde edilmiştir. Söz konusu farklılığın ortaya çıkmasında, API-650 ve TBHSSDTDY yönetmeliklerinde kullanılan yerel zemin katsayılarının birbirinden farklı tanımlanmış olması etkili olmuştur.

Farklı tank tasarım sınıfı (TTS-I, TTS-II) ve deprem kullanım sınıfına (DKS-I, DKS- II) sahip modeller üzerinden yapılan değerlendirmelerde, yönetmeliklerin sunduğu hesap yaklaşımları, parametre katsayıları ve performans hedeflerine göre önemli farklılıklar gözlemlenmiştir.

TBHSSDTDY'de tasarım deprem düzeyleri doğrudan hedeflenen performans seviyeleriyle ilişkilendirilip farklı deprem düzeylerinde tasarım yöntemiyle, API-650 standardı ise tasarım ivmelerini azaltma (Response Modification Factors) ve önem katsayıları yoluyla dolaylı olarak düzenlemektedir. Her iki yönetmelikte elde edilen farklı sonuçlar, deprem etkilerine karşı öngörülen güvenlik seviyeleri ve tasarım prensiplerinde benimsenen yapısal felsefe farklılıklarının bir sonucudur.

Yapılan hesaplamalarda, faya yakınlık katsayısının $\varphi_{1,YF}$, H/D oranı daha küçük olan tank modellerinde (M01, M02) devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti üzerinde H/D oranı daha büyük (M10, M11) modellerinde daha belirgin bir etki oluşturduğu görülmüştür. H/D oranı arttıkça, bu etkinin azaldığı tespit edilmiştir. Sonuçlar, aktif faya yakın ve depremselliği yüksek bölgelerde, özellikle daha düşük H/D orana sahip tanklarda faya olan mesafe katsayısının üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya konulmuştur.

Yapılan hesaplamalar, sıvı yoğunluğundaki artışın, tankların devrilme momenti ve toplam kesme kuvveti üzerinde doğrudan ve doğrusal bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Farklı yoğunluktaki sıvılar için yapılan karşılaştırmalarda, yoğunluğu yüksek olan sıvılar depolandığında hem devrilme momenti hem de toplam kesme kuvveti değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu bulgu, sıvı yoğunluğu arttıkça tanklarda daha yüksek yapısal dayanım gereksinimi oluştuğunu ve söz konusu ilişkinin her iki yönetmelikte de tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Farklı zemin sınıfları ve tank geometrileri için yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, çalkalanma dalga yüksekliği değerinin hem TBHSSDTDY hem de API-650 yönetmeliklerinde, tankın H/D oranı belirli bir seviyeye kadar arttıkça yükseldiği, bu noktadan sonra ise azaldığı tespit edilmiştir. Maksimum çalkalanma dalga yüksekliği, beklenilenin aksine, uç geometrilerde (kısa-geniş veya yüksek-dar) değil, ortalama H/D oranına sahip modelde (M05 modeli, H/D = 0.52) meydana gelmiştir. Ayrıca, zemin sınıfı katsayılarının artışına bağlı olarak, daha zayıf zemin koşullarında çalkalanma dalga yüksekliğinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çalkalanma dalgası yüksekliğinin yalnızca H/D oranı ile değil, zemin koşulları ve dinamik parametrelerin doğrusal olmayan bileşenleriyle ilişkilendiğini ortaya koymaktadır.

TBHSSDTDY yönetmeliğinin yürürlüğe girmesiyle ulusal deprem güvenliği standartları belirlenmiş olsa da sektörde uygulamaların büyük bir kısmının halen API-650 standartları doğrultusunda gerçekleştirildiği bilinmektedir. Bu tez çalışması, söz konusu iki yönetmeliğin farklı prensipler ve yaklaşımlar üzerine kurulduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, tank tasarımlarında ulusal koşullara daha uygun olduğu için TBHSSDTDY yönetmeliğinin tercih edilmesi gerekmektedir. TBHSSDTDY yönetmeliğinde esas olarak atmosferik tanklar için hükümler yer almakla birlikte, küresel tanklara ilişkin düzenlemelere de yer verilmiştir. TBHSSDTDY yönetmeliğinde yer alan küresel tanklara ilişkin hükümler (basınç koşulu), mevcut endüstriyel uygulamalarla tam örtüşmemektedir. Bu nedenle, özellikle sıvılaştırılmış gazların depolanmasında kullanılan küresel tanklar için, sıcaklık etkileri ve basınç koşullarının tasarım sürecinde dikkate alınmasını sağlayacak özel düzenlemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

American Petroleum Institute. (2020). *API Standard 650: Welded tanks for oil storage* (13th ed.). API Publishing.

American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22).* American Society of Civil Engineers.

Chatterji, S., Butenweg, C., & Klinkel, S. (2025). Unified force-based design approach for the seismic analysis and design of liquid storage tanks. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-44. https://doi.org/10.1007/s10518-025-02135-8

Chiappelloni, L., Serraino, F., Belardi, V., Trupiano, S., Gaetani, L., & Vivio, F. (2025). Evaluation of seismic effects on atmospheric pressure liquid storage tanks. *Engineering Proceedings, 85*(1), 54. https://doi.org/10.3390/engproc2025085054

Cho, K. H., & Cho, S. Y. (2007). Seismic response of cylindrical steel tanks considering fluid-structure interaction. *Steel Structures, 7*(2), 147–152.

Erkmen, B. (2024). Seismic performance assessment of an existing anchored and a self-anchored liquid storage tank in high seismic regions. *Bulletin of Earthquake Engineering, 22*(8), 4197–4217. https://doi.org/10.1007/s10518-024-01932-x

Erkmen, B. (2022). Seismic performance evaluation and retrofit of liquid storage tanks: Case study. *Sakarya University Journal of Science, 26*(2), 347–356. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.997699

European Committee for Standardization. (2006). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines (EN 1998-4:2006).* CEN.

Girgin, S. (2011). The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: Aftermath and lessons learned. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 11*(4), 1129–1140. https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011

Graham, E. W., & Rodriguez, A. M. (1952). *The characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics.* https://doi.org/10.1115/1.4010515

Haroun, M. A., & Housner, G. W. (1981). Seismic design of liquid storage tanks. *Journal of the Technical Councils of ASCE, 107*(1), 191–207. https://doi.org/10.1061/JTCAD9.0000080

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

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

Livaoğlu, R., & Doğangün, A. (2006). Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction. *Journal of Fluids and Structures, 22*(3), 421–439. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.12.004

Malhotra, P. K. (1995). Base uplifting analysis of flexibly supported liquid-storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 24*(12), 1591–1607. https://doi.org/10.1002/eqe.4290241204

Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks. *Structural Engineering International, 10*(3), 197–201. https://doi.org/10.2749/101686600780481509

Munoz, L. E. V., Može, P., & Dolšek, M. (2024). Pushover-based seismic performance assessment of unanchored steel storage tanks with different slenderness ratios. *Engineering Structures, 305*, 117742. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117742

Niwa, A., & Clough, R. W. (1982). Buckling of cylindrical liquid-storage tanks under earthquake loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 10*(1), 107–122. https://doi.org/10.1002/eqe.4290100108

Ozdemir, Z., Souli, M., & Fahjan, Y. M. (2010). Application of nonlinear fluid–structure interaction methods to seismic analysis of anchored and unanchored tanks. *Engineering Structures, 32*(2), 409–423. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.10.004

Peek, R., & Jennings, P. C. (1988). Simplified analysis of unanchored tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 16*(7), 1073–1085.

Saka, A. C., Kaya, E. S., & Uckan, E. (2024). Seismic performance of cylindrical liquid storage tanks in the 2023 Kahramanmaras earthquakes: A case study of a self-supported oil storage tank. *Journal of Earthquake Engineering*, Advance online publication, 1–12. https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2390083

Scawthorn, C., & Johnson, G. S. (2000). Preliminary report: Kocaeli (Izmit) earthquake of 17 August 1999. *Engineering Structures, 22*(7), 727–745. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00106-6

Spritzer, J. M., & Guzey, S. (2017). Nonlinear numerical evaluation of large open-top aboveground steel welded liquid storage tanks excited by seismic loads. *Thin-Walled Structures, 119*, 662–676. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.017

Standards New Zealand. (2004). *AS/NZS 1170: Structural design actions*. Standards New Zealand.

Standards New Zealand. (2009). *Seismic design of storage tanks (NZS 2009)*. Standards New Zealand.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2013). *Maddelerin ve karışımların sınıflandırılması, etiketlenmesi ve ambalajlanması hakkında yönetmelik*. Resmî Gazete, 28848 (Mükerrer). https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=19108&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)*. Resmî Gazete, 30364 (Mükerrer). https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-1.pdf

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2021). *Türkiye boru hattı sistemleri ve sıvı depolama tankları deprem yönetmeliği (TBHSSDTDY 2021) (Resmî Gazete: 7 Mart 2021, Sayı: 31416)*. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/03/20210307-1-1.pdf

Veletsos, A. S. (1974, June). Seismic effects in flexible liquid storage tanks. In *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 1, pp. 630–639). Bulletin of the Seismological Society of America.

Veletsos, A. S., & Tang, Y. (1990). Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 19*(4), 473–496.