Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GÖMÜLÜ BORULARIN ALTINDAKİ SIVILAŞABİLİR TABAKA DERİNLİĞİNİN BORUNUN SİSMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

EFFECT OF UNDERLYING LIQUEFIBLE LAYER DEPTH ON SEISMIC BEHAVIOR OF BURIED PIPELINES

Burak KILIÇ[1], Makbule ILGAÇ[2], Pelin ÖZENER[3]

ÖZET

Sismik yüklemenin tetiklediği karmaşık zemin-boru etkileşimi, özellikle sıvılaşabilir zemin üzerindeki sıvılaşmayan (kabuk) tabakası içerisinde yer alan gömülü boru hatları için literatürde sınırlı sayıda çalışmaya konu olmuştur; ancak 1999 Kocaeli, 2004 Niigata-ken Chuetsu ve 2011 Christchurch gibi depremler bu etkileşimin önemini açıkça ortaya koymuştur. Bu çalışmanın temel amacı, sıvılaşabilir zemin derinliğinin gömülü boru hatlarının sismik performansı ve deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemektir. Bu doğrultuda, literatürde yer alan borulu bir santrifüj deneyi PLAXIS 2D ile modellenerek sayısal model doğrulanmıştır. Doğrulanan model kullanılarak, farklı sıvılaşabilir tabaka derinlikleri ve sismik ivme seviyelerinde analizler gerçekleştirilmiş ve sıvılaşabilir tabaka ile boru arasındaki mesafenin boru deplasmanları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, bu mesafenin yatay deformasyon davranışını kontrol eden önemli tasarım parametrelerinden biri olabileceğini, düşey deformasyonun ise büyük ölçüde sismik ivme ve sıvılaşma sonrası konsolidasyona bağlı olduğunu göstermiştir. Bulgular, sıvılaşabilir zemin derinliğinin tabakalı zeminlerde gömülü boru hatlarının sismik güvenliğinin değerlendirilmesinde önemli bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Gömülü boru hatları, Zemin sıvılaşması, Sıvılaşabilir zemin derinliği, Kabuk tabakası*

ABSTRACT

The complex soil-pipe interaction induced by seismic loading, specifically concerning buried pipelines situated within a non-liquefiable surface (crust) layer overlying liquefiable soil, has received limited attention in the literature; however, the 1999 Kocaeli, 2004 Niigata-ken Chuetsu, and 2011 Christchurch earthquakes demonstrated the importance of this interaction. The primary objective of this study is to numerically investigate the effects of the depth of the liquefiable soil layer on the seismic performance and deformation behavior of buried pipelines. In this context, a centrifuge test involving a buried pipe from the literature was modeled using PLAXIS 2D, and the numerical was validated. Based on the validated model, analyses were performed considering different liquefiable layer depths and seismic acceleration levels, and the effects of the distance between the liquefiable layer and the pipeline on pipe displacements were investigated. The results indicate that the distance between the pipeline and the liquefiable layer may be one of the key design parameters governing horizontal deformation behavior, while vertical deformation is largely influenced by seismic acceleration and post-liquefaction consolidation. The findings demonstrate that the depth of liquefiable soil is an important design parameter for evaluating the seismic safety of buried pipelines in stratified soils.
Keywords: *Buried pipelines, Soil liquefaction, Liquefiable soil depth, Crust layer*

[1] Doktora Öğrenicisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, burak.kilic@std.yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Öğr., Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, makbule.ilgac@yildiz.edu.tr
[3] Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, tohumcu@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Çeşitli akışkanların ve gazların güvenli iletimini sağlayan gömülü boru hatları kritik altyapı sistemleri arasında yer almaktadır. Bu sistemlerin deprem performansı, özellikle sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde büyük önem taşımaktadır. Geçmiş depremlerden elde edilen veriler, sıvılaşmaya bağlı kalıcı zemin deformasyonlarının gömülü boru hatlarında önemli hasarlara yol açtığını göstermektedir. Boru hattı hasarlarının büyük bölümü geçmiş depremlerde sıvılaşan zeminlerde meydana gelmiş (Hamada ve O'Rourke, 1992); benzer şekilde 2011 Tohoku ve Christchurch depremlerinde su ve kanalizasyon şebekelerinde yaygın hasarlar gözlenmiştir (Yasuda vd., 2013; O'Rourke vd., 2014; Baris vd., 2021). Türkiye'deki çalışmalar da benzer şekilde sıvılaşmanın gömülü borular üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymaktadır (Çetin vd., 2009; Uckan vd., 2025; Toprak vd., 2025).

Literatürde gömülü boru hatlarının deprem davranışını inceleyen çalışmalar iki temel grupta değerlendirilebilir. İlk grupta, boru ve zemin özelliklerinden yararlanılarak boru hatlarının hasar görebilirliği istatistiksel ve veri tabanlı yöntemlerle tahmin edilmektedir (örneğin: Toprak vd., 2019; Zohra vd., 2012; Liu vd., 2020; Zhang vd., 2020; Haghighi vd., 2024). İkinci grupta ise, sonlu eleman yöntemine dayalı sayısal modeller kullanılarak sıvılaşabilir zeminlerde gömülü boruların sismik davranışı araştırılmakta; deprem ivmesi, gömülme derinliği, boru çapı ve zemin yoğunluğu gibi parametrelerin etkileri değerlendirilmektedir (örneğin: Chian vd., 2014; Sharafi ve Parsafar, 2016; Seth vd., 2022; Sudevan vd., 2020; Papadimitriou vd., 2024; Dülger ve Kılıç, 2024).

Mevcut tasarım standartlarında gömülü boru hatlarının sıvılaşma altındaki davranışına ilişkin hükümler sınırlı olup, son yıllarda yayımlanan çalışmalar daha güvenilir sismik tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır (Rubeiz, 2009; Melissianos, 2022). Literatürdeki mevcut çalışmalar çoğunlukla doğrudan sıvılaşan zemin içerisindeki boru davranışına odaklanmıştır. Buna karşın, borunun sıvılaşmayan tabaka içerisinde ve altında sıvılaşabilir bir tabakanın bulunduğu zemin koşullarında, sıvılaşabilir tabakanın derinliğinin veya boru ile sıvılaşabilir tabaka arasındaki mesafenin boru davranışına etkisi sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır. Özellikle bu mesafenin borunun yatay ve düşey deplasmanları üzerindeki etkisi ile sıvılaşma sonrası konsolidasyonun boru deformasyonunu nasıl etkilediği yeterince ortaya konulmamıştır.

Bu çalışmada, sıvılaşmayan bir üst tabaka içerisinde gömülü borunun sıvılaşabilir tabaka derinliğine bağlı olarak sismik performansı ve deformasyon davranışı sayısal olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, literatürde yer alan bir santrifüj deneyi PLAXIS 2D kullanılarak modellenmiş ve sayısal model deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Doğrulanan model kullanılarak farklı sıvılaşabilir tabaka derinlikleri ve deprem ivmesi seviyeleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiş; sıvılaşabilir tabakanın boruya olan uzaklığının yatay ve düşey deplasmanlar ile zemin-boru etkileşimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların, tabakalı zeminlerde inşa edilen gömülü boru hatlarının deprem tasarımına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

2. SAYISAL ANALİZLER

Bu çalışmada, sıvılaşmayan bir kabuk tabakası içerisinde gömülü bir borunun, alttaki sıvılaşabilir zemin tabakasına olan mesafesinin davranış üzerindeki etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Analizler PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiş,

dinamik analizlerde kullanılan PM4Sand bünye modeli ise literatürde rapor edilen santrifüj deneyi (Sun, 2001; Ling vd., 2003) ile doğrulanmıştır.

Sıvılaşabilir kumların dinamik davranışını modellemek amacıyla PM4Sand bünye modeli kullanılmıştır. Gelişmiş çevrimsel laboratuvar verilerinin bulunmadığı durumlarda model geliştiricileri tarafından önerildiği üzere ikincil parametreler varsayılan değerlerde bırakılmış, model kalibrasyonu ise rölatif sıkılık (D_R), küçük şekil değiştirme kayma modülü katsayısı (G_0) ve büzülme oranı parametresi (h_{po}) üzerine gerçekleştirilmiştir (Boulanger ve Ziotopoulou, 2023; Bentley Systems, 2025).

Kayma dalgası hızı verilerinin bulunmadığı durumlarda G_0, Boulanger ve Ziotopoulou (2023) tarafından önerilen Denklem 1 kullanılarak standart penetrasyon direncinden ($(N_1)_{60}$) hesaplanmıştır. Rölatif sıkılık (D_R) ile standart penetrasyon direnci arasındaki ilişki ise Idriss ve Boulanger (2010) tarafından önerilen Denklem 2 ile belirlenmiştir.

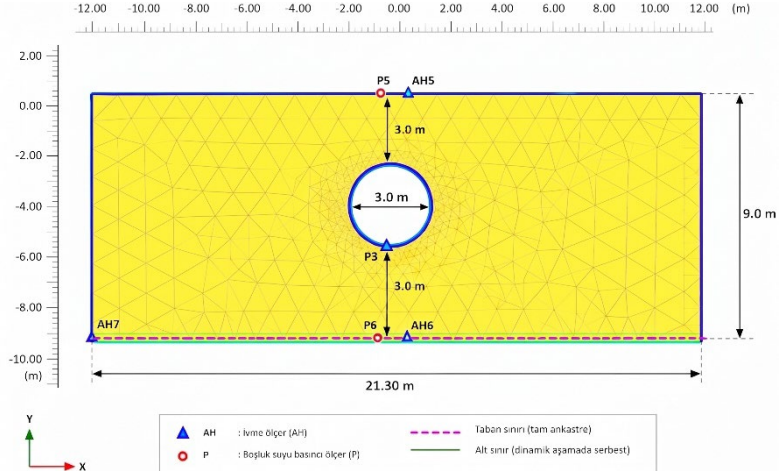
$$G_0 = 167\sqrt{(N_1)_{60} + 2{,}5} \tag{1}$$

$$(N_1)_{60} = 46(D_R)^2 \tag{2}$$

Büzülme oranı parametresi (h_{po}), çevrimsel yükleme altında plastik hacimsel büzülmeyi ve buna bağlı aşırı boşluk suyu basıncı gelişimini kontrol eden temel parametredir. Bu nedenle h_{po}, hedef çevrimsel direnç oranını (CRR) sağlayacak şekilde PLAXIS zemin testi (soil test) modülündeki drenajsız çevrimsel basit kesme (CDSS) analizi kullanılarak, 15 eşdeğer yükleme çevriminde %3 tek yönlü kayma birim şekil değiştirmesi kriterine göre kalibre edilmiştir (Boulanger ve Ziotopolou, 2023).

2.1. Santrifüj Deneyi ve Sayısal Doğrulama

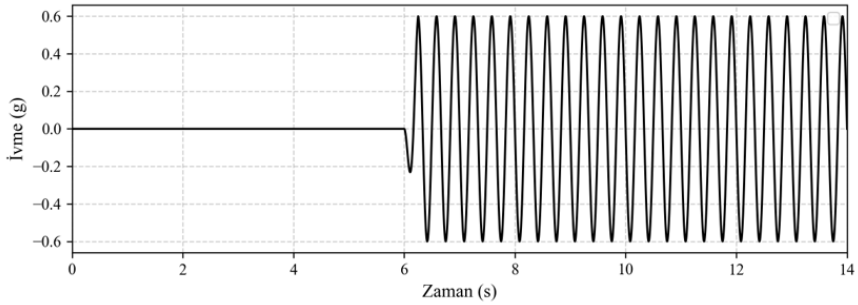
Sayısal modelde kullanılan PM4Sand bünye modelinin kalibrasyonu ve doğrulanması amacıyla Sun (2001) ile Ling vd. (2003) tarafından gerçekleştirilen 30 g santrifüj deneyi esas alınmıştır. Doğrulama analizinde, herhangi bir zemin iyileştirilmesi uygulanmayan PLM1 (Pipe Liquefaction Model 1) kullanılmıştır. Deney geometrisi ve dinamik özellikleri prototip ölçeğine dönüştürülerek Şekil 1'de gösterilen sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır. Model, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinde bulunduğu $D_R \approx$ %40 rölatif sıkılığa sahip 9 m kalınlığındaki doygun gevşek Nevada kumundan ve zemin yüzeyinden 3 m derinliğe gömülü 3 m çapındaki borudan oluşmaktadır.



Şekil 1. Sayısal doğrulamada kullanılan sonlu elemanlar modeli

Boru-zemin etkileşimini gerçekçi biçimde temsil etmek amacıyla arayüz (interface) elemanları tanımlanmış ve literatüre uygun olarak R_{inter} 0,30 olarak seçilmiştir (Saeedzadeh ve Hataf, 2011). Statik analizlerde yanal sınırlar sabit (normally fixed), taban tam ankastre (fully fixed); dinamik analizlerde ise yanal sınırlar bağlı serbestlik derecesi (tied degress of freedom), alt sınır ise serbest (none) olarak tanımlanmıştır.

Doğrulama analizlerinde kullanılan 3 Hz frekanslı ve 0.6 g genliğindeki sinüzoidal giriş hareketi Şekil 2'de gösterilmiştir. Hareket model tabanına yatay doğrultuda tanımlı deplasman (prescribed displacement) olarak uygulanmış, yüksek frekanslı sayısal salınımları azaltmak için %5 Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Analizler; başlangıç gerilmelerinin oluşturulduğu K_0, plastik denge ve dinamik yükleme olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Statik aşamalarda küçük şekil değiştirme rijitliğine sahip pekleşen zemin modeli (HSSmall), dinamik aşamada ise drenajsız PM4Sand bünye modeli kullanılmış olup zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



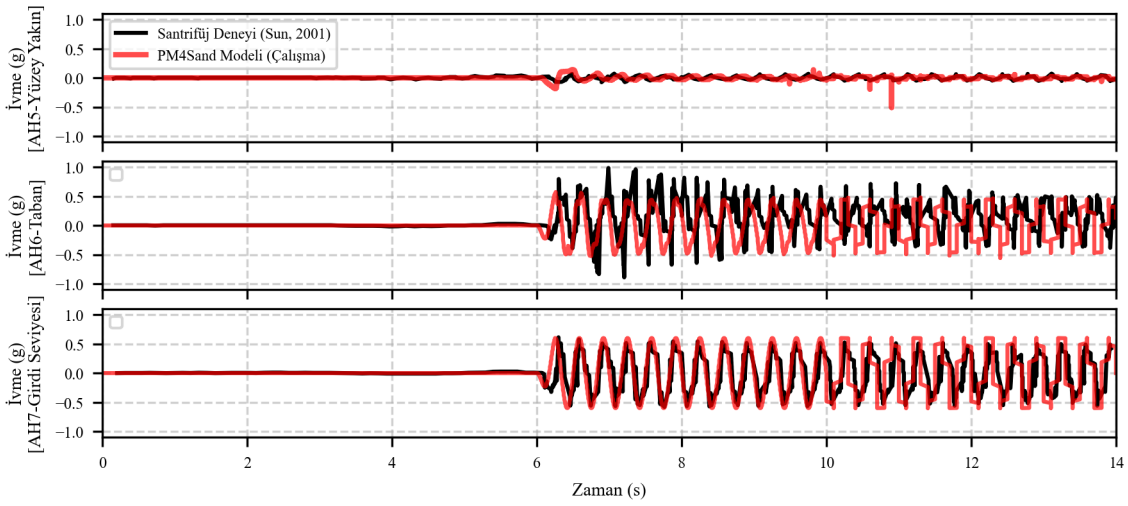
Şekil 2. Doğrulama analizinde kullanılan sinüzoidal giriş hareketi

Tablo 1. Doğrulama analizinde kullanılan HSSmall ve PM4Sand zemin parametreleri

HSSmall Parametreleri	Gevşek Nevada Kumu	PM4Sand Parametreleri	Gevşek Nevada Kumu
E_{50}^{ref} (kPa)	11933	$(N_1)_{60}$	7,36
E_{oed}^{ref} (kPa)	11933	D_R	0,40
E_{ur}^{ref} (kPa)	35800	G_0	524,39
G_0^{ref} (kPa)	73500	h_{po}	0,50
$\gamma_{0,7}$	0,00015	p_A	101,30
γ_{unsat} (kN/m^3)	17,3	e_{max}	0,887
γ_{sat} (kN/m^3)	19,21	e_{min}	0,511
φ (°)	32,50	n^b	0,50
Ψ (°)	1,90	n^d	0,10
R_f	0,90	φ_{cv}	33
m	0,50	ν	0,30
e_0	0,736	Q	10,00
$k_{x,y}$ (m/s)	2,2x10^{-6}	R	1,50

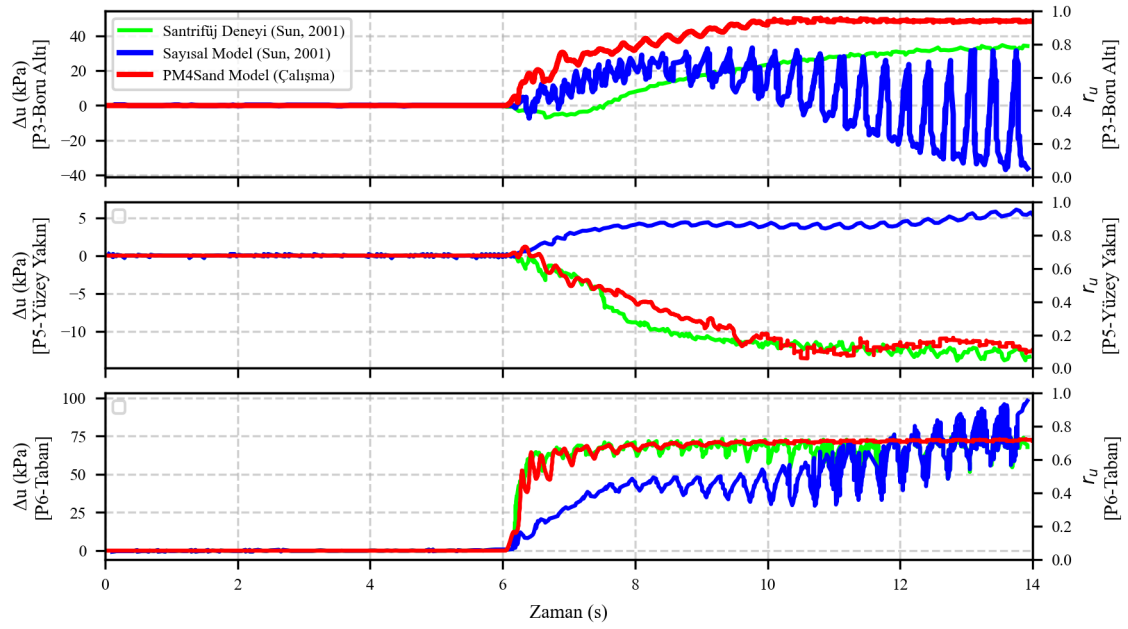
Farklı derinliklerde elde edilen ivme-zaman geçmişlerinin karşılaştırılması Şekil 3'de sunulmuştur. Santrifüj deneyinde tabandan uygulanan 0.6 g genliğindeki giriş hareketi (AH7), sıvılaşmanın tetiklenmesiyle birlikte zemin içerisinde önemli ölçüde sönümlenmiş ve yüzeye yakın AH5 sensöründe ivme sıfır seviyelerine düşmüştür. Sayısal model bu davranışı başarılı şekilde yakalamıştır. Boru çevresinde ise sarsıntının ilk saniyelerinde ölçülen 0.15 g- 0.20 g aralığındaki ilk ivme pikleri deneysel sonuçlarla uyumlu olarak tahmin edilmiştir. Tam sıvılaşma sonrasında orta derinliklerde ivme sönümü deneysel modele

kıyasla bir miktar daha erken gerçekleşmiş olsa da, dalga yayılımı genel olarak yüksek uyum göstermiştir.



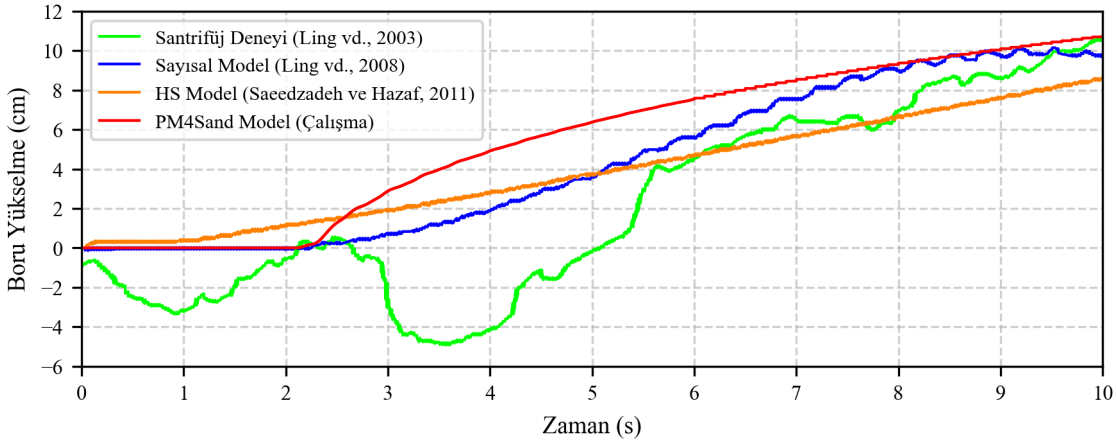
Şekil 3. Deneysel ve sayısal ivme-zaman geçmişlerinin karşılaştırılması

Farklı derinliklerde oluşan aşırı boşluk suyu basıncı (Δu) ve boşluk suyu basıncı oranı (r_u) değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre derin zemin bölgesinde (P6) aşırı boşluk suyu basıncı 70 kPa değerine ulaşmış ve $r_u \geq 0{,}8$-1,0 ile tam sıvılaşmayı başarıyla temsil edilmiştir. Borunun hemen altındaki P3 noktasında yaklaşık 50 kPa boşluk suyu basıncı oluşmuş ve deneysel gözlemlerle uyumlu şekilde borunun yükselmesine neden olan kaldırma kuvveti doğru olarak yakalanmıştır. Yüzeye yakın P5 noktasında ise borunun yükselmesi sonucu meydana gelen hacimsel genişlemeye bağlı olarak -12 kPa negatif boşluk suyu basıncı hesaplanmış ve bu davranış deneysel ölçümlerle uyum göstermiştir. Deprem sonrasında deneysel modelde boşluk suyu basınçları zamanla azalırken, sayısal analiz tam drenajsız koşullarda gerçekleştirildiğinden Δu sabit kalmıştır.



Şekil 4. Deneysel ve sayısal boşluk suyu basıncı değişimlerinin karşılaştırılması

Sıvılaşmanın tetiklenmesiyle birlikte zeminin kayma dayanımını ve rijitliğini kaybetmesinin ardından artan boşluk suyu basıncının oluşturduğu kaldırma kuvveti (buoyancy) boruyu yüzeye doğru itmiştir. Şekil 5'te gösterilen boru yükselme (uplift) karşılaştırması incelendiğinde; geliştirilen sayısal model, sarsıntı sonundaki nihai yükselme miktarını 11 cm olarak hesaplamış ve diğer modellere kıyasla santrifüj deneyindeki ölçümle uyum sağlamıştır.



Şekil 5. Deneysel ve sayısal boru yükselmesinin karşılaştırılması

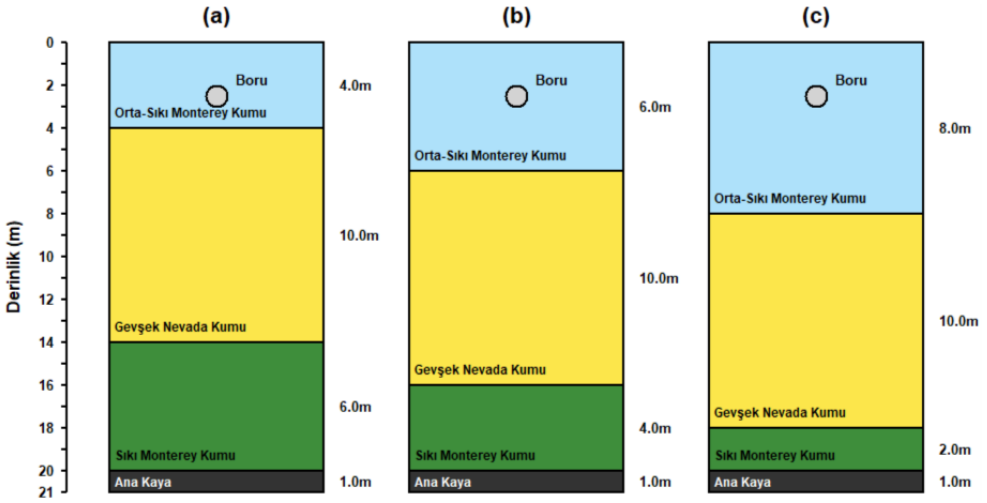
İvme yayılımı, aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi ve boru yükselmesinin deneysel sonuçlarla yüksek düzeyde uyum göstermesi, PM4Sand bünye modelinin sıvılaşma mekanizmasını ve büyük deformasyon altındaki zemin-boru etkileşimini güvenilir şekilde temsil edebildiğini doğrulamaktadır.

2.2. Gömülü Boru Referans Model Analizleri

Santrifüj deneyi ile doğrulanan PM4Sand modeli esas alınarak, gömülü borunun sismik davranışını incelemek amacıyla gerçek saha koşullarını temsil eden 40 m genişliğinde ve 20 m derinliğinde referans sayısal model oluşturulmuştur. Analizlerde, sıvılaşmayan bir kabuk tabakası içerisinde bulunan gömülü boru için boru ile sıvılaşabilir tabaka arasındaki mesafenin (D_{liq}) ve farklı deprem ivmesi seviyelerinin (0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g) borunun yatay ve düşey deplasmanları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda D_{liq} 1m, 3m ve 5m olmak üzere üç farklı zemin profili oluşturulmuş olup model geometrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Zemin profili; üstte orta-sıkı Monterey kumu (D_R= %60), orta tabakada gevşek Nevada kumu (D_R= %40), altta ise sıkı Monterey kumu (D_R=%90) ve ana kayadan oluşmaktadır. Kullanılan zemin parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Statik analizlerde tüm zemin tabakaları HSSmall zemin modeli ile temsil edilmiş, dinamik aşamada ise yalnızca sıvılaşabilir Nevada kumu tabakası PM4Sand bünye modeline dönüştürülmüştür. Gömülü boru, literatürde ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan API 5L X42 çeliğini temsil edecek şekilde 1,0 m dış çapa, 9,52 mm et kalınlığına ve 2,5 m gömülme derinliğine sahip elastik plaka (plate) elemanı olarak modellenmiştir.

Statik analizlerde yanal sınırlar sabit (normally fixed), taban ise ankstre (fully fixed) olarak tanımlanmıştır. Dinamik analizlerde yanal sınırlarda serbest alan (free-field), tabanda ise sonsuz ortam davranışını temsil etmek amacıyla uyumlu taban (compliant base) sınır koşulu uygulanmıştır. Küçük şekil değiştirme sönümünü temsil etmek ve yüksek frekanslı sayısal gürültüyü bastırmak amacıyla zemin tabakalarına %0,5-2 arasında Rayleigh sönümü

atanmıştır. Analizler; K_0 başlangıç gerilmelerinin oluşturulması, plastik denge, dinamik yükleme ve deprem sonrası konsolidasyon olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir.



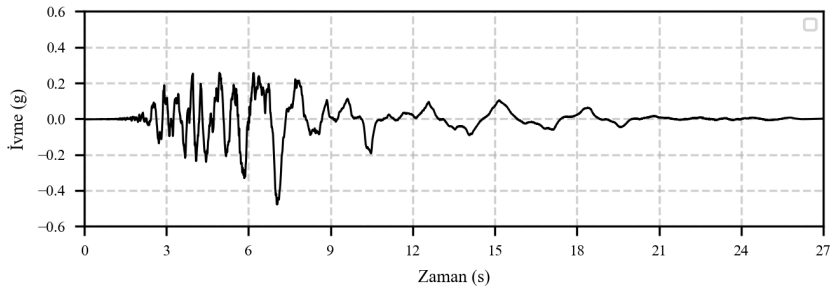
Şekil 6. Farklı D_{liq} değerleri için oluşturulan zemin profilleri

Tablo 2. Parametrik analizlerde kullanılan zemin parametreleri

HSSmall Parametreleri	Orta-Sıkı Monterey Kumu	Gevşek Nevada Kumu	Sıkı Monterey Kumu	PM4Sand Parametreleri	Gevşek Nevada Kumu
E_{50}^{ref} (kPa)	26000	16000	42000	$(N_1)_{60}$	7,36
E_{oed}^{ref} (kPa)	26000	16000	42000	D_R	0,40
E_{ur}^{ref} (kPa)	78000	48000	126000	G_0	524,39
G_0^{ref} (kPa)	113000	85000	146000	h_{po}	0,71
$\gamma_{0,7}$	0,00015	0,00015	0,00015	p_A	101,30
γ_{unsat} (kN/m^3)	16,0	16,0	17,0	e_{max}	0,78
γ_{sat} (kN/m^3)	20,0	19,0	20,0	e_{min}	0,51
φ (°)	33	33	33	n^b	0,50
p_{ref} (kPa)	100	100	100	n^d	0,10
R_f	0,90	0,90	0,90	φ_{cv}	33
m	0,50	0,50	0,50	ν	0,30
e_0	0,66	0,67	0,57	Q	10,00
$k_{x,y}$ (m/s)	3,5x10^{-6}	6,6x10^{-5}	5,3x10^{-4}	R	1,50

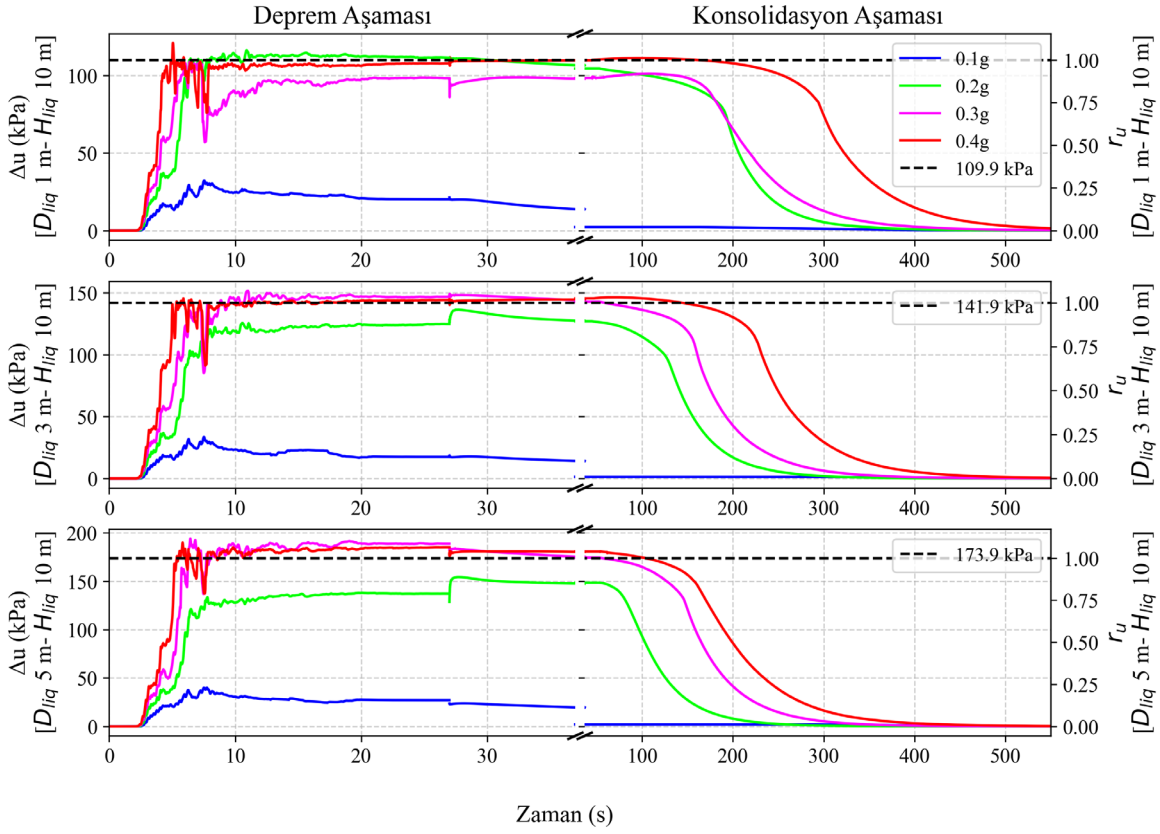
Gömülü boru hattının deformasyon davranışını değerlendirmek amacıyla, sıvılaşabilir tabakanın orta derinliğindeki aşırı boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile boru ekseni boyunca oluşan yatay (u_x) ve düşey (u_y) deplasmanlar; üç farklı D_{liq} (1 m, 3 m, 5 m) için daha önce gömülü boru hasarı bildirilen ve Şekil 7'de gösterilen 2011 Christchurch Depremi'ne ait Christchurch Cathedral College (CCC) istasyonunda kaydedilen yatay ivme kaydının taban çizgisi düzeltmesi (baseline correction) yapılmış dört farklı deprem ivmesi seviyesi (0.1g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g) için incelenmiştir.

Aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Analizler incelendiğinde, tüm modellerde sarsıntının başlamasına takiben (3-5 sn) boşluk suyu basıncının hızla arttığı görülmektedir. İvme seviyesi 0.1 g için en yüksek r_u değeri 0.25- 0.35 aralığında kalmış ve sıvılaşma meydana gelmemiştir. Buna karşılık 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g analizlerinde aşırı boşluk suyu basıncı hızla artarak $r_u \geq 0.8$- 1.0 seviyesine ulaşmış ve sıvılaşma gerçekleşmiştir.



Şekil 7. Analizlerde kullanılan 2011 Christchurch deprem ivme kaydı

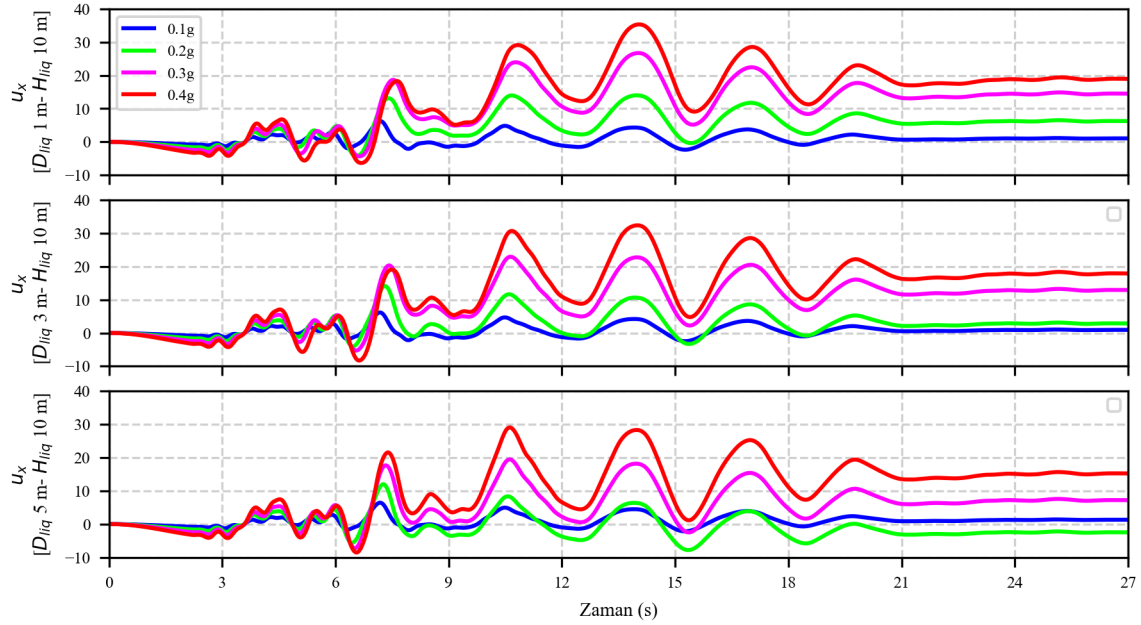
Konsolidasyon aşamasında ise deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basınçları zamanla sönümlendiği görülmektedir. Düşük ivme seviyelerinde boşluk suyu basıncı daha kısa sürede dağılırken, 0.4 g ivme seviyesinde sıfıra yaklaşması 500 sn'ye kadar devam etmiştir. Ayrıca, D_{liq} değerinin artmasıyla boşluk suyu basıncı dağılma süresi de uzamıştır.



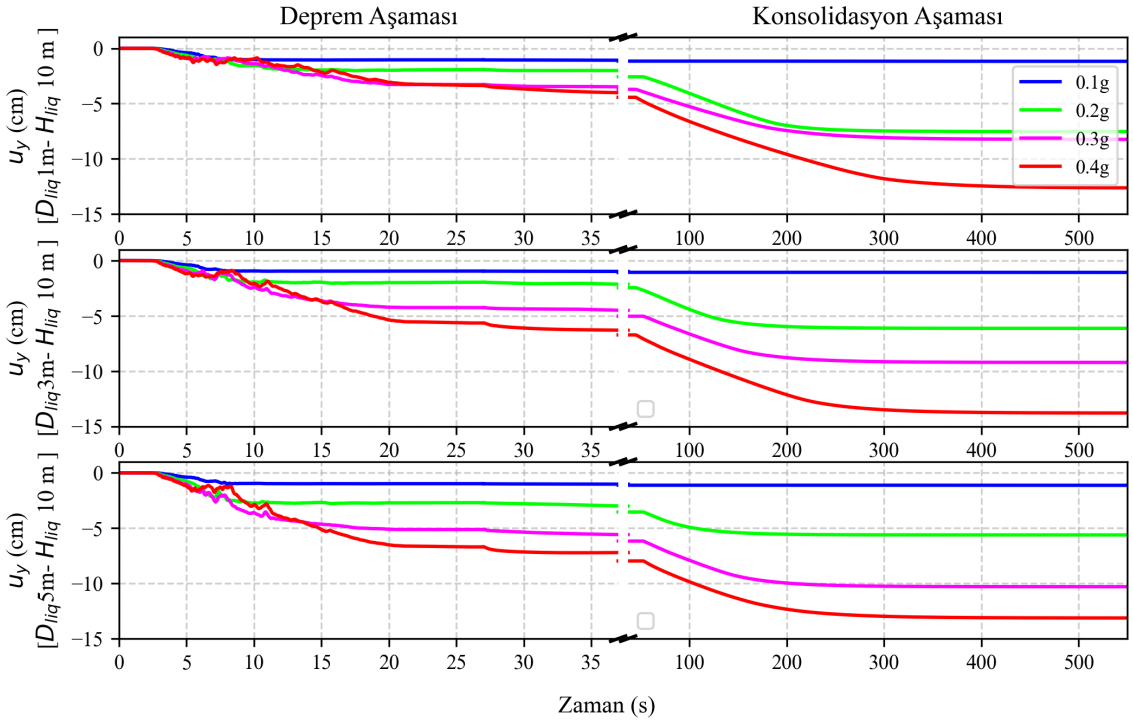
Şekil 8. Deprem ve konsolidasyon aşamalarında Δu ve r_u değişimi

Sıvılaşma ve sonrasındaki konsolidasyon aşamasında borunun kinematik davranışı, yatay (u_x) ve düşey (u_y) yer değiştirmeler üzerinden sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Maksimum yatay deplasman D_{liq} mesafesinin 1 m olduğu durumda 0.4 g ivme seviyesinde ~35 cm, düşük ivme seviyesinde (0.1 g) ise yaklaşık 6 cm olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, deprem ivmesinin artmasıyla yatay deplasmanların arttığını, D_{liq} mesafesinin 1 m'den 5 m'ye artırılmasıyla ise 0.4g seviyesindeki maksimum yatay deplasmanın ~35 cm'den ~29 cm'ye azaldığını göstermektedir. Düşey deplasman (u_y) sonuçları incelendiğinde ise, sarsıntı sırasında oturmaların sınırlı kaldığı, en büyük deformasyonların konsolidasyon aşamasında meydana geldiği görülmektedir. En büyük nihai boru oturması 0.4 g ivme

seviyesinde 14,80 cm ile D_{liq} 3 m olduğunda gerçekleşmiştir. Düşük ivme seviyesinde (0.1g) bu değer 1 cm'de kalmıştır. Oturmalar ivme artışıyla belirgin bir şekilde artsa da, D_{liq} mesafesinin 1 m'den 5 m'ye artırılması 0.4g'deki nihai oturmayı yalnızca ~13- 14 cm aralığında değiştirerek yatay deplasmanlara kıyasla oldukça sınırlı bir etki göstermiştir.



Şekil 9. Gömülü boru zamana bağlı yatay deplasman (u_x) değişimi



Şekil 10. Gömülü boru zamana bağlı düşey deplasman (u_y) değişimi

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sıvılaşmayan tabaka içerisinde gömülü bulunan çelik boruların sismik davranışı; boru ile alttaki sıvılaşabilir tabaka arasındaki mesafenin (D_{liq}) ve deprem ivmesi genliğinin etkileri dikkate alınarak PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile incelenmiştir. Gelişmiş zemin bünye modeli PM4Sand, literatürdeki bir santrifüj deneyi (Sun, 2001; Ling vd., 2003) ile doğrulanmış; modelin ivme sönümlenmesini, aşırı boşluk suyu basıncı gelişimini ve 11 cm'lik nihai boru yükselmesini deneysel verilerle yüksek uyum içinde tahmin ettiği kanıtlanmıştır. Doğrulanan bu model üzerinden farklı D_{liq} (1 m, 3 m ve 5 m) ve ivme (0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g) değerleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

Parametrik analiz sonuçlarına göre, 0.1 g deprem ivmesinde maksimum aşırı boşluk suyu basıncı oranı (r_u) 0.30 seviyesinde kalırken; 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g ivme seviyelerinde $r_u \geq 0,8$-1,0 değerine ulaşarak tabakada tam sıvılaşma meydana gelmiştir. Ayrıca, D_{liq} mesafesinin 1 m'den 5 m'ye çıkmasıyla, zemin profilinde üretilen maksimum aşırı boşluk suyu basıncı 110 kPa'dan 174 kPa'a yükselmiş ve konsolidasyon aşamasındaki basınç sönümlenme süresi belirgin şekilde uzamıştır.

Sismik ivme genliğinin artması, borunun yatay ve düşey yer değiştirmelerini önemli ölçüde büyütmüştür. İvme seviyesinin 0.1 g olduğu durumda yatay deplasman 6 cm, düşey yer değiştirme ise 1 cm oturma seviyelerinde kalırken; 0.4 g ivme seviyesinde maksimum yatay deplasman 35 cm'ye, nihai maksimum düşey yer değiştirme ise 14,80 cm oturma ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, D_{liq} mesafesinin 1 m'den 5 m'ye artırılması, 0.4 g ivme seviyesindeki maksimum yatay deplasmanı yaklaşık 35 cm'den 29 cm'ye düşürmüş; buna karşılık nihai oturma değerleri ~13-14 cm aralığında kalarak boru ile sıvılaşabilir tabaka arasındaki mesafenin düşey deformasyon üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermiştir.

Elde edilen bulgular, boru ile sıvılaşabilir tabaka arasındaki mesafenin, özellikle borunun yatay deformasyon davranışını kontrol eden önemli tasarım parametrelerinden biri olabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, nihai düşey oturmaların büyük ölçüde deprem ivmesi ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon davranışı tarafından kontrol edildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada doğrulanan sayısal modelleme yaklaşımının, gelecekte gömülü boru hatları için analitik sismik kırılganlık eğrilerinin ve tahmin modellerinin geliştirilmesine; böylece performansa dayalı tasarım ve sismik risk değerlendirmesi çalışmalarına güvenilir bir temel oluşturması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Baris, A., Spacagna, R. L., Paolella, L., Koseki, J. ve Modoni, G. (2021). "Liquefaction fragility of sewer pipes derived from the case study of Urayasu (Japan)". Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 3963–3986.

Bentley Systems. (2025). PLAXIS 2D 2025.1 Reference Manual. Bentley Systems, Exton, PA.

Boulanger, R. W. ve Ziotopoulou, K. (2023). PM4Sand (Version 3.3): A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications. Report No. UCD/CGM-23/01, University of California at Davis.

Chian, S. C., Tokimatsu, K. ve Madabhushi, S. P. G. (2014). "Soil Liquefaction-Induced Uplift of Underground Structures: Physical and Numerical Modeling". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(10).

Çetin, K. Ö., Yargıcı, V. ve Yunatcı, A. A. (2009). "Assessment of buried pipeline performance during the 1999 Duzce earthquake, Turkey". Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets, ASCE, Reston, 261–270.

Dülger, M. ve Kılıç, H. (2024). "Investigation of Earthquake-Induced Pipe Damage in Liquefiable Soils". Applied Sciences, 14(11), 4599.

Haghighi, M., Delnavaz, A., Rashvand, P. ve Delnavaz, M. (2024). "Assessment through Machine Learning of Groundwater Vulnerability after Seismic Damage to Fuel Pipeline". Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 15(3), 04024025.

Hamada, M. ve O'Rourke, T. D. (Editörler). (1992). Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes. Volume 1: Japanese Case Studies. Technical Report NCEER-92-0001. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.

Idriss, I. M. ve Boulanger, R. W. (2010). SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures. Report No. UCD/CGM-10/02, University of California at Davis.

Itasca Consulting Group. (2019). FLAC2D. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc.

Ling, H. I., Mohri, Y., Kawabata, T., Liu, H., Burke, C. ve Sun, L. (2003). "Centrifugal modeling of seismic behavior of large-diameter pipe in liquefiable soil". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(12), 1092–1101.

Ling, H. I., Sun, L., Liu, H., Mohri, Y. ve Kawabata, T. (2008). "Finite element analysis of pipe buried in saturated soil deposit subject to earthquake loading". Journal of Earthquake and Tsunami, 2(1), 1–17.

Liu, C., Li, Y., Yin, H., Zhang, J. ve Wang, W. (2020). "A stochastic interpolation-based fractal model for vulnerability diagnosis of water supply networks against seismic hazards". Sustainability, 12(7), 2693.

Melissianos, V. E. (2022). "Onshore Buried Steel Fuel Pipelines at Fault Crossings: A Review of Critical Analysis and Design Aspects". Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 13(4), 03122002.

O'Rourke, T. D., Jeon, S. C., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., van Ballegooy, S. ve Bouziou, D. (2014). "Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ". Earthquake Spectra, 30(1), 183–204.

Papadimitriou, A. G., Limnaiou, T. G., Delavinia, D. M. ve Tsiapas, Y. Z. (2024). "Load-displacement response of buried pipes in liquefied soil". Computers and Geotechnics, 173, 106471.

Rubeiz, C. G. (2009). "Performance of Pipes during Earthquakes". Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets, ASCE, San Diego, 584–593.

Saeedzadeh, R. ve Hataf, N. (2011). "Uplift response of buried pipelines in saturated sand deposit under earthquake loading". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(10), 1378–1384.

Seth, D., Manna, B., Shahu, J. T., Fazeres-Ferradosa, T., Figueiredo, R., Romão, X., Rosa-Santos, P. ve Taveira-Pinto, F. (2022). "Numerical Modelling of the Effects of Liquefaction on the Upheaval Buckling of Offshore Pipelines Using the PM4Sand Model". Energies, 15, 5561.

Sharafi, H. ve Parsafar, P. (2016). "Seismic simulation of liquefaction-induced uplift behavior of buried pipelines in shallow ground". Arabian Journal of Geosciences, 9(3).

Sudevan, PB., Boominathan, A. ve Banerjee, S. (2020). "Numerical Study of Liquefaction-Induced Uplift of Underground Structure". International Journal of Geomechanics, 20(2), 06019020.

Sun, L. (2001). Centrifuge modeling and finite element analysis of pipeline buried in liquefiable soil. Doktora Tezi, Columbia University, New York, NY.

Toprak, S., Nacaroglu, E., van Ballegooy, S., Koc, A. C., Jacka, M., Manav, Y., Torvelainen, E. ve O'Rourke, T. D. (2019). "Segmented pipeline damage predictions using liquefaction vulnerability parameters". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 125, 105758.

Toprak, S., Wham, B. P., Nacaroglu, E., Ceylan, M. ve Dal, O. (2025). "Performance of water systems during the February 6th Kahramanmaras earthquakes". Earthquake Spectra, 41(1), 322–353.

Uckan, E., Aksel, M., Atas, O., Toprak, S. ve Kaya, E. S. (2025). "The performance of transmission pipelines on February 6th, 2023 Kahramanmaras earthquake: a series of case studies". Bulletin of Earthquake Engineering, 23, 1203–1222.

Yasuda, S., Towhata, I., Ishii, I., Sato, S. ve Uchimura, T. (2013). "Liquefaction-induced damage to structures during the 2011 Great East Japan Earthquake". Journal of JSCE, 1, 181–193.

Zhang, W., Shokrabadi, M., Bozorgnia, Y. ve Taciroglu, E. (2020). "A methodology for fragility analysis of buried water pipes considering coupled horizontal and vertical ground motions". Computers and Geotechnics, 126, 103709.

Zohra, H. F., Mahmoud, B. ve Luc, D. (2012). "Vulnerability assessment of water supply network". Energy Procedia, 18, 772–783.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
Δu	Aşırı boşluk suyu basıncı	**PGA**	Pik yer ivmesi
D_R	Rölatif sıkılık	**CRR**	Çevrimsel direnç oranı
D_{liq}	Boru ile sıvılaşabilir tabaka arasındaki mesafe	**CDSS**	Drenajsız çevrimsel basit kesme deneyi
g	Yer çekimi ivmesi	G_0	Küçük şekil değiştirme kayma modülü katsayısı
Hz	Hertz	h_{po}	Büzülme oranı parametresi
s	saniye	**pA**	Atmosfer basıncı
r_u	Aşırı boşluk suyu basıncı	R_{inter}	Arayüz dayanım azaltma katsayısı
u_x	Yatay deplasman	φ	İçsel sürtünme açısı
u_y	Düşey deplasman	φ_{cv}	Kritik durum sürtünme açısı
$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş standart penetrasyon darbe sayısı	ν	Poisson oranı
E_{50}^{ref}	Referans sekant rijitlik modülü	k_x, k_y	Hidrolik iletkenlik
E_{ur}^{ref}	Referans boşaltma/yeniden yükleme modülü	$\gamma_{0.7}$	Referans kayma birim şekil değiştirmesi
E_{oed}^{ref}	Referans ödometre modülü	R_f	Göçme oranı
G_0^{ref}	Referans küçük şekil değiştirme modülü	p_{ref}	Referans gerilme
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık	**m**	Gerilmeye bağlı rijitlik üssü
γ_{unsat}	Doğal birim hacim ağırlık	e_0	Başlangıç boşluk oranı
Q	Birincil pekleşme parametresi	**R**	İkincil pekleşme parametresi