

SIVILAŞABİLİR ZEMİNLERDE GÖMÜLÜ BORULARIN YÜKSELME DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ

NUMERICAL ANALYSIS OF UPLIFT BEHAVIOR OF PIPES BURIED IN LIQUEFIABLE SOILS

Münire DÜLGER¹, Havvanur KILIÇ²

ÖZET

Depremlere bağlı olarak gelişen sıvılaşma dolayısı ile, kohezyonsuz ve suya doymun kumlu ve siltli zeminlerde geçici ve tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı artımı sonucu mukavemet kaybı oluşur. Bu çalışmada, sıvılaşabilir bir zeminde gömülü beton bir borunun deprem sırasındaki davranışını incelemek amacıyla yapılmış olan santrifüj deneyi sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal analizlerde, PLAXIS 2D’de kullanıcı tanımlı olarak eklenebilen PM4Sand modeli kullanılmış ve sıvılaşma modeli kapsamında kullanılan parametreler ile parametrelerin boru yükselme davranışına etkileri incelenmiştir. 1.1D derinlikteki beton bir boru için, 0.22g deprem ivmesindeki deneysel ölçümler ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, rölatif sıklığı Dr %30, %45 ve %55 olan kum için, farklı gömülme derinlikleri dikkate alınarak analizler tekrarlanmış ve kumun sıklığı ve boru gömülme derinliği arttıkça borunun yer değiştirmesinin azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Sıvılaşma, PM4SAND, Gömülü Boruların Dinamik Davranışı, Gömülü Boru Yükselmesi

ABSTRACT

Strength loss occurs due to increased pore water pressure under transient and repetitive loads in cohesionless and water-saturated sandy and silty soils due to liquefaction under the effect of earthquakes. In this study, a centrifuge test has been numerically modelled to investigate the behavior of a pipe buried in liquefiable soil during an earthquake. PM4Sand, which can be added as a user-defined model in PLAXIS 2D, has been used in the numerical analyses, and the parameters used in the liquefaction model, as well as the effects of the parameters on the uplift behavior of the pipe, have been investigated. For a concrete pipe at a depth of 1.1D, experimental measurements at an earthquake acceleration of 0.22g have been compared to the numerical analysis results. In addition, the analyses were repeated for sand with relative density Dr of 30%, 45% and 55%, taking into account different burial depths, and it was determined that the displacement of the pipe decreased as the relative density of the sand and the pipe burial depth increased.

Keywords: Liquefaction, PM4SAND, Dynamic Behavior of Buried Pipes, Uplift of Buried Pipe

¹ Yük.İnş. Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi /dulgermd@gmail.com {Münire Dülger}

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, kilic@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Boruların deprem sonucu aldığı hasarlar kritik öneme sahip olup bu konudaki deneysel ve nümerik analiz çalışmaları dünya çapında ve ülkemizde devam etmektedir. Boru hasarlarının deprem sonrasında normalleşme sürecindeki etkileri değerlendirildiğinde ana hat borularında oluşabilecek hasarların bu süreci olumsuz etkilediği anlaşılmakta ve tasarım süreçlerinde alınabilecek tedbirlerle hasarların önlenmesi mümkün olabilmektedir.

İnşaat mühendisliği yapılarının gerçekçi ve ekonomik olarak tasarımı ancak detaylı deneysel çalışmalar ve geoteknik modellemeler yardımıyla gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, gömülü bir borunun, sıvılaştırılabilir zeminde artan su basınçlarından dolayı yükselme davranışı ve hasar etkilerini ortaya koymak amacıyla yapılan bir santrifüj deneyinin, Plaxis PM4SAND modeli ile sayısal analizi yapılmıştır.

2. PM4SAND BÜNYE MODELİ

Geoteknik deprem mühendisliği uygulamaları için geliştirilen bünye modellerinin, sahada geniş bir yelpazede yer alan çeşitli koşulları yeterli yaklaşıklıkta modelleyebilmesi istenir. PM4Sand modeli gerilme oranı kontrollü, kritik durum esaslı, sınırlayıcı yüzey plastisite modeli ana çerçevesini takip eder. Bu analizlerde, sıvılaştırılabilir zemin ve sıvılaştırılabilir zemin nedeniyle meydana gelen oturmalar tahmin edilebilmektedir (Tolozza P.V.,2018), (Quevedo V.H.P., 2019).

Zeminde kritik durum, sabit gerilmeler ve sabit bir boşluk oranında deformasyonların devam ettiği durum olarak adlandırılır (Schofield vd. 1968). PM4Sand modelinde kritik durum çizgisi ampirik olarak, kritik durum rölatif sıklık değeri ile mevcut durum rölatif sıklık değeri arasındaki fark dikkate alınarak rölatif durum parametre indeksi, ξ_R ile ifade edilir (Boulanger, 2003). Boulanger (2003) ampirik kritik durum çizgisini tanımlarken hacimsel genişleme sırasındaki dilatasyon bağıntısı Bolton (1986) 'un dilatasyon ilişkisini kullanır. Mevcut model, Dafalias-Manzari modelinde yer alan Lode açısına bağımlılığını (örneğin, sürtünme açısı sıkışma veya genişleme için aynıdır) kaldırarak yüzeyleri basitleştirir, öyle ki sınırlayıcı (M^b) ve genişleme (M^d) oranları daha basit ifadelerle kritik durum çizgisi (M) ile ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla düzlem şekil değiştirme durumundaki sınır ve dilatasyon yüzeyi Lode açısı olmadan düzenlenmiştir (Boulanger ve Ziotopoulou, 2023). PM4Sand modelinde, üç birincil parametre model davranışını tanımlamak için kullanılır, diğer değerler ise default değerler olarak dikkate alınır. Bu nedenle, başlangıçta default değerler değiştirilmez (Vilhar vd. 2018). Model formülasyonunda tüm aşamalarda birincil değişkenler, modelin dilatasyon ve gerilme birim deformasyon yanıtlarını kontrol eder. Başlangıç rölatif sıklık değeri, zeminin sıkışma veya genişleme davranışına maruz kalacağı, zemin malzemesinin nasıl genişlemeye geçiş yapacağı dilatasyon yüzeyi ile temsil edilmiştir.

Zemin malzemesi için rölatif sıklık, e_{max} ve e_{min} boşluk oranlarından yararlanılarak hesaplanır. Laboratuvar deneyi yoksa başlangıç rölatif sıklık CPT ve SPT deney sonuçlarından izleyen (Idriss ve Boulanger, 2008) ilişkiler kullanılarak ve $C_d = 46$ alınarak,

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{C_d}} \quad [1]$$

denklemlerle bulunabilir. Rölatif sıklık belirgin rölatif sıklık olarak tanımlanabilir ve kalibrasyon nedeniyle değiştirilebilir (Vilhar vd., 2018). Kayma modülü faktörü küçük birim deformasyonlarda (G_{max}) kayma modülünü kontrol eder (Boulanger ve Ziotopoulou, 2023). G_0 değeri deviatörük ve hacimsel artışlarla sınırlanır ve karşılaştırmalı olarak tahmin edilip seçilmeli (ölçülmüş bir kayma dalgası hızı $G_{max} = \rho V_s^2$) ve ayrıca G_0 ve V_{s1} ve SPT $(N_1)_{60}$ değerleri arasında modifiye edilmiş ilişkiler temel alınarak hesaplanabilir.

$$G_0 = 167 \sqrt{(N_1)_{60} + 2.5} \quad [2]$$

Sıkışma oranı parametresi h_{po} , birincil değişkene bağlı olarak meydana gelen sıkışma sırasında plastik birim deformasyonları düzenler. Model kalibrasyonu sırasında penetrasyon dayanımı veya çevrimsel laboratuvar deneylerine göre (sıvılaştırılabilir zemin dayanımı) çevrimsel gerilme oranı hedefi elde edilerek ayarlanabilir. Bu, PLAXIS içindeki deney modülünde laboratuvar testleri (CDSS) çevrimsel direkt kesme deneyleri ile belirlenebilir. h_{po}

sıkışma oranı parametresinin spesifik çevrimsel dayanım oranlarının model yanıtları karşılaştırılarak seçilmesi gerekir (Idriss ve Boulanger, 2008). 1 Atm jeolojik gerilme ve $M=7.5$ olan bir deprem için çevrimsel dayanım oranları CRR'nin SPT'ye dayalı tahmini DSS yüklemesinde %3 kayma birim deformasyonunda 15 üniform pik tekil yüklemeye çevriminin neden olduğu CRR değerine yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilerek belirlenebilir (Boulanger ve Ziotopoulou, 2023).

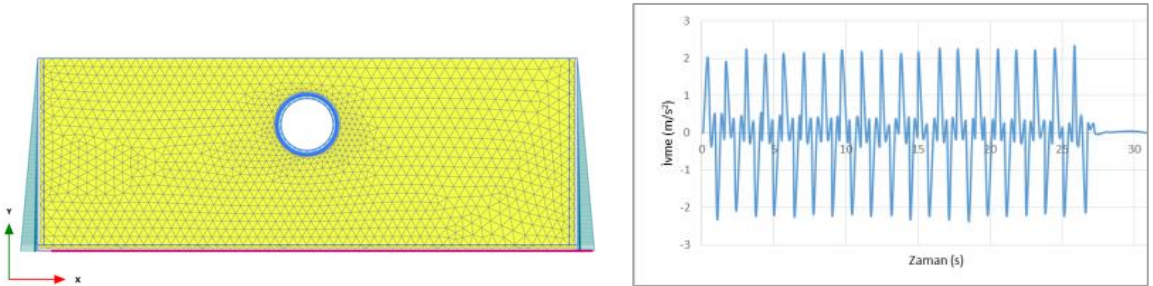
3. SAYISAL MODEL VE ANALİZLER

Sıvılaştırılabilir zeminlerde gömülü boruların yükselme davranışının incelenmesi kapsamında Plaxis PM4Sand model dikkate alınarak, Chain vd. (2014) tarafından yapılan sentrifüj deneyi modellenmiş ve deney sonuçları ile sayısal analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sentrifüj deneyinde 66.7g ivme kullanılmış olup prototip ölçekte 1.1D yani 5.5 m derinlikteki 5m çaplı bir boruya karşılık gelmektedir. Sentrifüj deneyi, Chain vd. (2014) tarafından FLAC 2D kullanılarak sonlu farklar yöntemi ile modellenmiştir. Bu analizlerde sıvılaştırma durumunu modelleyebilen Wang bünye modeli (Wang vd., 1990) kullanılmıştır. Ayrıca bu sentrifüj modeli (Sudevan 2020) tarafından da FLAC3D Finn-Byrne formülasyonu kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir.

Bu çalışmada, 1.1D derinlikteki tek boru için 0.22g deprem ivmesi kullanılarak model parametreleri ve boru parametreleri ($G_s=0.3$) deney modelindeki gibi seçilmiştir. Modelde boru et kalınlığı 0.35m'dir. Sayısal modelin sonlu elemanlar ağı ve deprem girdi hareketi Şekil 1'de gösterilmiştir. Sonlu eleman ağında 15 düğüm noktalı 3084 üçgen eleman kullanılmıştır. Oluşturulan modeldeki ortalama eleman boyutu ise 0.71 m ve analizde deprem verisi 0.005 sn eşit aralıklarla 30 sn olarak uygulanmıştır. Deneysel modelin tabanında kaya bulunmadığından, tabanda sınır koşulları sabit taban (none) seçilmiş ve yan sınırlarda ise bağıli serbestlik dereceleri sınır koşulları (tied degrees of freedom) olarak kullanılmıştır. Deprem datası uygulanırken drift correction seçilmiştir. Analiz parametreleri belirlenirken %45 sıklıkta kum için kalibrasyon çalışmasında $0.9D_R$, $0.8D_R$ ve $0.85D_R$ için (1) ve (2) eşitlikleri dikkate alınarak parametreler belirlenmiş ve sayısal analizler yapılmıştır. $0.9D_R$ için PM4Sand bünye modeli ve boru için kullanılan parametreler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. PM4Sand zemin modelinde kum zemin için sönüm %2 alınmış ve Hedef 1 ve Hedef 2'ye karşılık gelen $\alpha_R=0.1761$ ve $\beta_R=0.001906$ değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. PM4Sand, sıvılaştırma davranışı için son derece başarılı bir model olmasına rağmen, başlangıç gerilme koşullarının elde edilmesinde yetersizdir. Bu nedenle başlangıç gerilme koşulları Hardening Small-Strain (HSS) bünye denklemleri ile belirlenmiştir.

Analiz sonucunda elde edilen boşluk suyu basınç artışları model deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boru kenarı ve tabanında uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Boru üstünde ise FLAC (Chain 2014) nümerik analiz sonuçlarına benzer davranış elde edilmiştir (Şekil 2). Boşluk suyu basıncı oranları ise Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de görüldüğü gibi, boru çevresindeki dalgalanmalardan dolayı, model deneydekilerle (Chain, 2014) benzer olarak, uzak alanda ölçülmüştür. Boru yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6'da sunulmuştur.

Sayısal analizlerde, D_r %30, %45 ve %55 sıklıklardaki kumun PM4Sand modeline göre malzeme parametreleri belirlenerek, 2 m çaplı ve 0.2 m et kalınlığında beton bir borunun farklı H/D gömülme derinliklerindeki yer değiştirmeleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



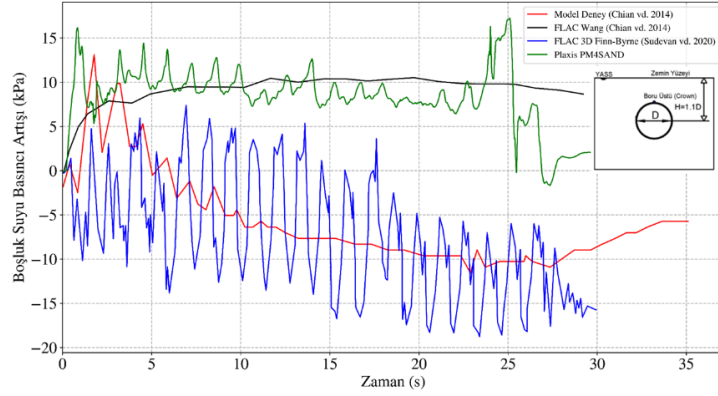
Şekil 1. a) Plaxis analiz modeli b) Analizde kullanılan deprem kaydı

Tablo 1. Parametrik çalışmada sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

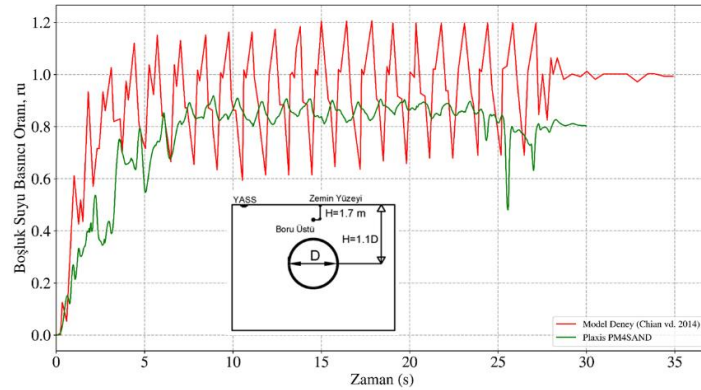
PM4Sand				HSS Model			
Dr	%30	%45	%55	Dr	%30	%45	%55
0.9 DR	0.27	0.405	0.50	γ_{unsat} (kN/m ³)	14.5	14,50	14.5
G_0	391.6	529.3	635.92	γ_{sat} (kN/m ³)	18.6	18,6	18.6
h_{po}	0.2495	0.32	0.865	c (kPa)	0.1	0.1	0.1
e_{max}	1.01	1.01	1.01	$\phi(o)$	30	30	30
e_{min}	0.55	0.55	0.55	E_{50}^{ref} (kPa)	3000	9000	11000
p_A	101.3	101.3	101.3	E_{oed}^{ref} (kPa)	3000	9000	11000
n^b	0.5	0.5	0.5	E_{ur}^{ref} (kPa)	9000	27000	33000
n^d	0.1	0.1	0.1	m	0.5	0.5	0.5
ϕ_{cv}	33	33	33	p_{ref} (kPa)	100	100	100
ν	0.3	0.3	0.3	G_0	60000	60000	60000
Q	10	10	10	$\gamma_{0.7}$	0.0007	0,0007	0.0007
R	1.5	1.5		Rf	0.9	0.9	0.9

Tablo 2. Sayısal analizlerde kullanılan boru malzeme parametreleri

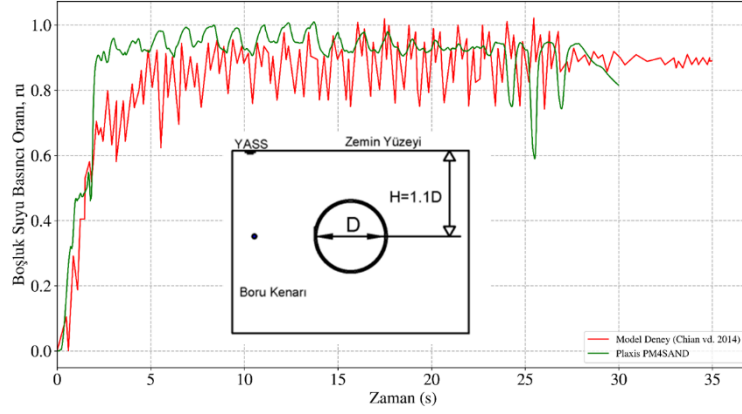
Boru Malzemesi	Beton Boru
Malzeme Model	Linear Elastik
Drenaj Durumu	Geçirimsiz
γ_{unsat} (kN/m ³)	3
E (kN/m ²)	30 x10 ⁶
ν (-)	0.25



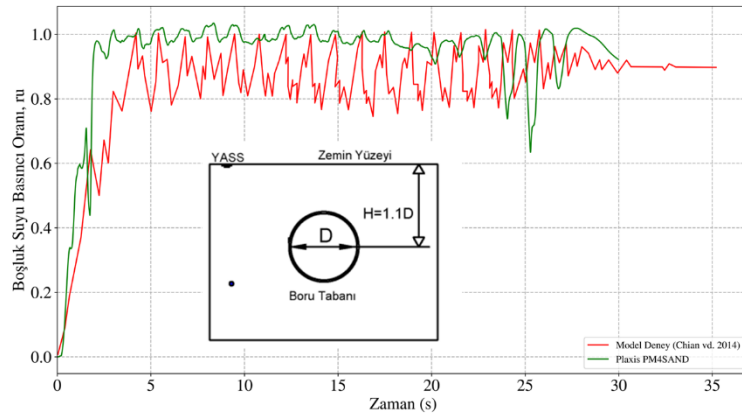
Şekil 2. Boru üzeri (3 m derinlikte) oluşan boşluksuyu basıncı artışının deney sonuçlarıyla karşılaştırılması



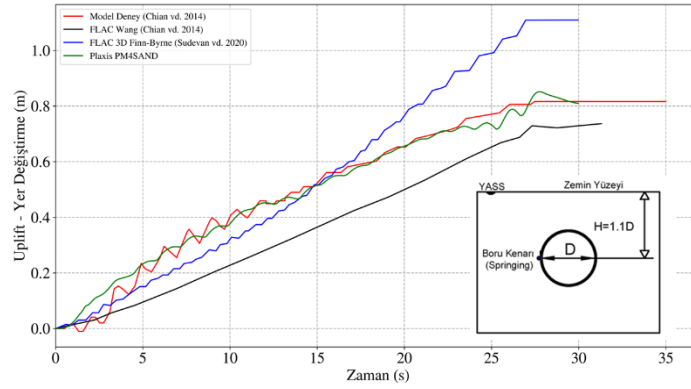
Şekil 3. Uzak alanda 1.7 m derinlikte oluşan ru değerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması



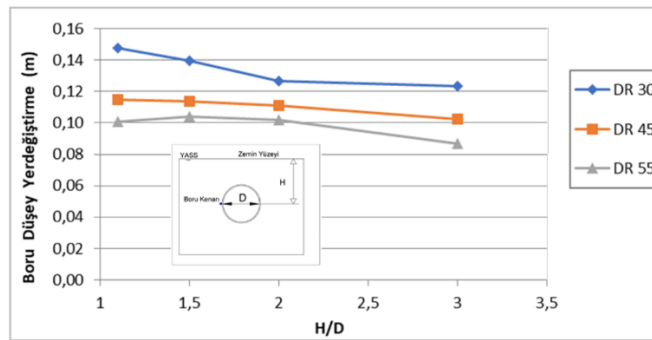
Şekil 4. Boru yanında, uzak alanda 5.5 m derinlikte oluşan ru değerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması



Şekil 5. Uzak alanda 7.5 m derinlikte ru değerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması



Şekil 6. Boru kenarında oluşan boru yer değiştirmelerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması



Şekil 7. Boru yer değiştirmesine, boru gömülme derinliği ve sıklığın etkileri

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde, PM4SAND ile sıvılaştırılabilir bir kumun deprem etkisindeki davranışının gerçekçi olarak modellenmesi için malzeme parametreleri kalibre edilmiş ve 0.9 Dr ile hesaplanan boru deplasmanlarının ölçümlerle daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Boru çevresindeki boşluksuyu basınç artışı karşılaştırılmış boru tacında deney sonuçlarından Chain 2014'teki nümerik analizdeki gibi ters yönde basınç artışları hesaplanmıştır. Boru kenar ve tabanında ölçüm sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Boru çevresindeki boşluksuyu basınç artışı ölçümlerinde boru yapısından dolayı sıçramalar olduğu gözlemlenmiştir. Borudan uzaklaştıkça sıvılaşma oranının daha doğru hesaplandığı görülmüştür. Analizlerde boşluksuyu basıncı (sıvılaşma) oranı değerinin $ru = 1$ değerine ulaştığı ve sıvılaşma davranışının etkilerinin boru üzerinde ve çevresinde olduğu tespit edilmiştir. Model deney ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında PM4SAND model ile sıvılaşma davranışının gerçekçi bir şekilde modellenebileceği görülmüştür. Kum zeminin rölatif sıklığı ve borunun gömülme derinliğine göre H/D oranı arttıkça boru yer değiştirmelerinin azaldığı görülmüştür. Sıvılaşmada, boru gömülme derinliği ve rölatif sıklık artışının olumlu etkileri görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Bolton M. D. (1986), "The strength and dilatancy of sands", Cambridge University Engineering Department.
- Boulanger, R. W. (2003), "Relating K_α to relative state parameter index." J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 129(8), 770–73.
- Chian S.C., Tokimatsu K., and Santana Madabhushi P. G. (2014), "Soil Liquefaction-Induced Uplift of Underground Structures Physical and Numerical Modeling", J.Geotech. Geoenviron. Eng. 04014057-1.
- Boulanger, R. W. (2010), "A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-10-01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 77 pp.
- Boulanger, R. and Ziotopoulou, K. (Revised last version June 2023), "PM4Sand (Version 3.3): A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications". Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, USA, Scientific Report, Report No. UCD/CGM-23/01.
- Dafalias Y. F., and Manzari M. T. (2004), "Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 130(6), 622-634.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008), "Soil liquefaction during earthquakes", Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2010), "SPT-based liquefaction triggering procedures." Report UCD/CGM-10/02, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 259 pp.
- Wang Z.L., Dafalias Y. F., and Shen C.K. (1990), "Bounding surface hypoplasticity model for sand." J. Eng. Mech., 10.1061/(ASCE)0733- 9399(1990)116:5(983), 983–1001.
- Manzari, M. T. and Dafalias, Y. F.(1997), "A critical state two-surface plasticity model for sands" Géotechnique, 47(2): 255-272.
- Quevedo V.H.P. (2019), "Seismic liquefaction analysis of a critical facility with PM4Sand in Plaxis" MSc Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands,
- Schofield, A. And Wroth, P. (1968), "Critical State Soil Mechanics", Lectures in Eng. at Cambridge University.
- Subaşı O., ve İyisan R. (2022), "Investigation of liquefaction induced settlements with PM4Sand constitutive model ", Pamukkale Üniv Müh Bilim Dergisi, 28(3), 378-388, 2022
- Sudevan P.B., Boominathan, A. and Banerjee S. (2020), "Numerical Study of Liquefaction-Induced Uplift of Underground Structure", ASCE Int. J. Geomech., 20(2): 06019020.
- Tolozza P.V. (2018), "Liquefaction Modelling using the PM4Sand Constitutive Model in PLAXIS 2D", to obtain the degree of Master of Science at the Delft University of Technology, 27th. November
- Vilhar G., Brinkgreve R.B.J., and Zampich L. (2018), "Plaxis The PM4SAND model 2018", Delf University of Technology & Plaxis bv. The Netherlands