

İKİ BOYUTLU DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARINA SONLU ELEMEN AĞI SIKLIĞININ ETKİSİ

EFFECT OF FINITE ELEMENT MESH DENSITY ON TWO DIMENSIONAL DYNAMIC ANALYSIS RESULTS

Ozan SUBAŞI*¹ Serdar KOLTUK² Merve AKBAŞ³ Recep İYİSAN⁴

ABSTRACT

Earthquake source characteristics, local soil conditions and superstructure performance are the most important factors affecting the damage to engineering constructions as a result of strong ground motion. Seismic waves generated during strong ground motion change both the mechanical properties of the ground layer through which they pass and their own amplitude and frequency characteristics until they reach the surface. One, two and three dimensional numerical dynamic analysis models based on different calculation methods and material models are available in the literature to approximate the deformation values that may occur in the soil layer in response to a given design ground motion. Within the scope of this study, 4 different finite element mesh densities were selected in order to determine the effect of the finite element mesh density on the two-dimensional dynamic analysis results. Cohesive and cohesionless soil profiles with similar geometrical dimensions were analysed with the help of a finite element program using a acceleration-time record. For the dynamic behaviour of soil layers, Hardening Small Strain for cohesive soils and PM4Sand constitutive equations for cohesionless soils were used. The results of the analyses are compared with the approaches in the literature for determining the average element size in the finite element mesh and the results are discussed.

Keywords: Finite element mesh density, Hardening small strain model, Numerical analysis, PM4Sand model.

ÖZET

Deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve üstyapı performansı, kuvvetli yer hareketi sonucunda mühendislik yapılarında meydana gelen hasarları etkileyen en önemli faktörlerdir. Kuvvetli yer hareketi sırasında oluşan sismik dalgalar yüzeye ulaşıncaya kadar, hem içinden geçtikleri zemin tabakasının mekanik özelliklerini değiştirmekte hem de kendi genlik ve frekans özellikleri değişmektedir. Belirli bir tasarım yer hareketine karşılık olarak zemin tabakalarında oluşabilecek deformasyon değerlerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi

*¹ Araştırma Görevlisi, Türk-Alman Üniversitesi, subasi@tau.edu.tr

² Doktor Araştırmacı, Berlin Teknik Üniversitesi, serdar_koltuk@tu-berlin.de

³ Araştırma Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, akbasm@itu.edu.tr

⁴ Profesör, İstanbul Teknik Üniversitesi, iyisan@itu.edu.tr

için literatürde farklı hesap yöntemleri ve malzeme modellerine dayanan bir, iki ve üç boyutlu sayısal dinamik analiz modelleri yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında, sonlu eleman ağı seçiminin iki boyutlu dinamik analiz sonuçlarına etkisini gözlemleyebilmek için 4 farklı sonlu eleman ağ sıklığı belirlenmiştir. Farklı ağ sıklıkları ile oluşturulan benzer geometrik ölçülere sahip kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin profilleri, tek ivme-zaman kaydı kullanılarak bir sonlu eleman programı yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Zemin tabakalarının dinamik davranışı, kohezyonlu zeminlerde Hardening Small Strain, kohezyonsuz zeminlerde ise PM4Sand bünye denklemleri modellenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, sonlu eleman ağında yer alan ortalama eleman boyutunun belirlenmesi için literatürde yer alan yaklaşımlarla kıyaslanarak sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu eleman ağı sıklığı, Hardening small strain model , Sayısal analiz, PM4Sand model.

1. GİRİŞ

Kuvvetli yer hareketi sırasında, zemin tabakalarında meydana gelen kayma birim şekil değiştirmelerinin seviyeleri, mühendislik yapılarında oluşabilecek hasarların bölgedeki dağılımı açısından son derece önemlidir. Depremler sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında oluşan deformasyonların sismik ana kayadaki tasarım hareketinin büyüklüğüne bağlı olarak doğru bir şekilde tahmin edilmesi, üst yapılarda ve zemine gömülü yapılarda kuvvetli yer hareketi sırasında oluşabilecek etkileri en aza indirecek mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Kuvvetli yer hareketi sonucunda zemin tabakalarında meydana gelebilecek deformasyon seviyelerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi için farklı malzeme modellerine ve hesap yaklaşımlarına dayanan bir, iki ve üç boyutlu sayısal dinamik analiz yöntemleri literatürde yer almaktadır [1-4]. Tek boyutlu dinamik analizlerde, dalga yayılımının ve zemin dinamik özelliklerinin sadece düşey doğrultuda değiştiği kabul edilmektedir. İki ve üç boyutlu analizlerde ise kuvvetli yer hareketinin iki ve üç boyuttaki davranışları temel alınarak modelleme yapılmaktadır. Üç boyutlu analizler, sahadaki zemin ve kuvvetli yer hareketi davranışını en gerçekçi şekilde modellemesine rağmen; analiz sürelerinin uzunluğu ve bünye denklemleri ile ilgili parametrelerin belirlenmesindeki zorlukları nedeniyle, çok tercih edilmemektedir. Bu nedenle hem zemin davranışının gerçeğe yakın modellenmesine imkan sağlayan hem de malzeme parametrelerinin daha kolay belirlendiği iki boyutlu dinamik analizler sıklıkla tercih edilmektedir. Belirli bir problem için iki boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulurken, çok küçük elemanlar kullanmak, analiz süresini uzatırken, büyük elemanların tercih edilmesi ise hatalı sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle oluşturulan geometrik zemin profilinin sonlu eleman ağı sıklığının değerlendirilmesi analizlerin doğruluğu açısından son derece önemlidir. Sayısal analizlerde oluşturulan sonlu eleman ağı sıklığı, ortalama eleman boyutu kavramı kullanılarak kontrol edilmektedir. Ortalama eleman boyutunun belirlenmesi için literatürde birçok denklem yer almaktadır [5-7].

Sonlu elemanlar yardımıyla gerçekleştirilen iki boyutlu dinamik analizlerde dalga yayılımının doğru bir şekilde modellenmesi için kullanılması gereken ortalama eleman boyutu ile ilgili yaklaşım ilk olarak Kuhlemeyer ve Lysmer (1973) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, ortalama eleman boyutunun (OEB) belirlenmesi için elastik dalga yayılımı kabulüne göre Denklem 1 önerilmiştir. Bu denklemde $V_{s,tabaka}$ zemin tabakasının kayma dalgası hızı, f_{maks} ise ivme-zaman kaydının maksimum frekans içeriğidir [5].

$$OEB \leq \frac{V_{s,tabaka}}{8f_{maks}} \quad (1)$$

Ortalama eleman boyutu ile ilgili bir diğer yaklaşım ise Greef (2015) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, Kuhlemeyer ve Lysmer (1973) tarafından önerilen denklem minimum 8 düğüm noktalı elemanların kullanılması koşuluyla, daha büyük ortalama eleman boyutu değeri ile analizlerin gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Greef (2015) tarafından önerilen ortalama eleman boyutu sınırı Denklem 2 ile ifade edilmiştir [6].

$$OEB \leq \frac{V_{s,tabaka}}{2f_{maks}} \quad (2)$$

Bir diğer ve son yaklaşım ise yine Kuhlemeyer ve Lysmer (1973)'ün önerdiği denklemi referans alarak Toloza (2018) tarafından geliştirilmiştir. Mühendislik açısından daha optimum bir ortalama eleman boyutu için sınır değer belirlenmesi amacıyla aşağıdaki denklem önerilmiştir [7].

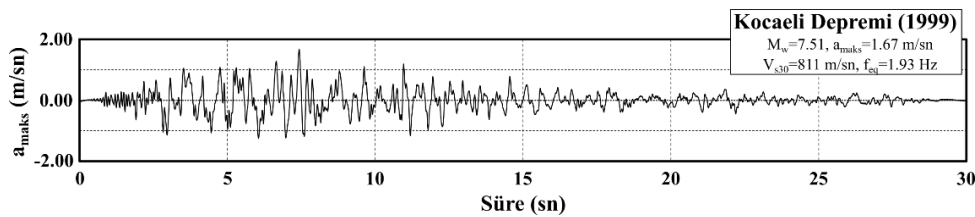
$$OEB \leq \frac{V_{s,tabaka}}{5f_{maks}} \quad (3)$$

Bu çalışmada, 6 ve 15 düğüm noktalı elemanlar yardımıyla iki farklı zemin profili oluşturulmuş ve sonlu eleman ağ sıklığının sonuçlarına etkisini incelemek amacıyla literatürde yer alan ortalama eleman boyutu sınırları göz önüne alınarak 4 farklı sonlu eleman ağ sıklığı tanımlanarak tek bir ivme zaman kaydı ile Plaxis 2D yazılımında iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kohezyonsuz zemin tabakalarının dinamik davranışı için PM4Sand, kohezyonlu zeminler için ise Hardening Small Strain bünye denklemleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarında kohezyonsuz zeminler için sıvılaşma davranışını belirlemek amacıyla kullanılan aşırı boşluk suyu basınçları ve R_u değerleri incelenmiş, kohezyonlu zeminler için ise yanıl deformasyonlar incelenmiştir. Bunlara ek olarak elde edilen analiz sonuçları, ortalama eleman boyutunun belirlenmesi için literatürde yer alan yaklaşımlarla kıyaslanarak, sonuçlar tartışılmıştır.

2. SAYISAL ANALİZLER

2.1. İvme-Zaman Kaydı

Çalışma kapsamında, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) veri tabanında yer alan, Kocaeli depremine ait anakaya mostrası üzerinde alınmış ivme-zaman kaydının yatay bileşeni kullanılarak iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan ivme-zaman kaydına “baseline” düzeltmesi yapılmış ve “Butterworth” yaklaşımı ile 0.5-15 Hz arasında “bandpass” filtreleme uygulanmıştır. Kuvvetli yer hareketi, oluşturulan sayısal modelin tabanı boyunca x ekseninde 0.5 m büyüklüğünde tanımlı deplasman olarak uygulanmış, y eksenindeki bileşeni ise “fixed” olarak seçilmiştir. Kullanılan kuvvetli yer hareketi kaydına ait ivme-zaman geçmişi ve özellikleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. İvme-zaman kaydı ve özellikleri

2.2. Zemin Bünye Modelleri

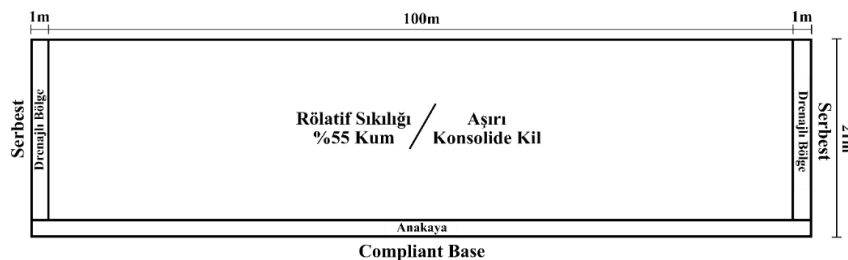
Sayısal analizlerde, kohezyonlu zeminler için Plaxis 2D sonlu eleman yazılımı el kitapçığında yer alan aşırı konsolide kil zemin parametreler, kohezyonsuz zemin için ise Boulanger ve Ziotopoulou, (2018) tarafından önerilen %55 rölatif sıklığa sahip Ottawa kum değerleri seçilmiştir. Kil zeminlerin dinamik davranışı Hardening Small Strain (HSSM), kum zeminler için ise sıvılaşma davranışının da göz önüne alındığı PM4Sand bünye denklemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, başlangıç gerilme koşullarının belirlenmesinde, PM4Sand bünye denklemleri yetersiz kaldığı için kum zeminlerde dinamik yükleme öncesindeki davranışı modellemek amacıyla HSSM parametreleri kullanılmıştır [4,8,9]. Analizlerdeki; kum ve kil zeminler için ilgili parametreler ve değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan model parametreleri [4,8,9]

Kum				Kil	
Sembol	PM4Sand	Sembol	HSSM	Sembol	HSSM
γ_k (kN/m ³)	15.90	γ_k (kN/m ³)	15.90	γ_k (kN/m ³)	19.00
γ_d (kN/m ³)	19.71	γ_d (kN/m ³)	19.71	γ_d (kN/m ³)	21.00
e	0.635	e	0.635	OCR	2
D _{R0}	0.55	E _{50ref} (MPa)	33	E _{50ref} (MPa)	9
G ₀	677	E _{oedref} (MPa)	33	E _{oedref} (MPa)	9
h _{p0}	0.4	E _{uref} (MPa)	99	E _{uref} (MPa)	27
e _{maks}	0.8	m	0.53	m	1
e _{min}	0.5	c' (MPa)	0	c' (MPa)	0.03
P _a (MPa)	0.101	ϕ' (°)	33	ϕ' (°)	26
n ^b	0.5	$\gamma_{0.7}$	0.00015	$\gamma_{0.7}$	0.0007
n ^d	0.1	G _{0ref} (MPa)	97.4	G _{0ref} (MPa)	60
ϕ_{cv} (°)	33	ν	0.3	ν	0.2
ν	0.3	P _{ref} (MPa)	0.1	P _{ref} (MPa)	0.1
Q ve R	10-1.5	R _f	0.931	R _f	0.900

2.2. Sayısal Model

Çalışma kapsamında, aşırı konsolide kil ile rölatif sıklığı %55 olan kum kullanılarak, 20 m kalınlığa sahip iki tip zemin profili oluşturulmuştur. Her iki tip zemin profilinde, yatay uzunluk 100 m olarak belirlenmiştir. Kum zemin için düşeyde her iki kenarda 1 m kalınlığında, aynı zemin malzemesinden yapılmış drenajlı tabakayla sonlandırılmıştır. Kil zeminler için ise bu drenajlı bölgeler için yine kil zeminler atanmıştır. Oluşturulan zemin profilinin tabanı, kuvvetli yer hareketi kaydını etkitebilmek için 1 m kalınlığında anakaya olarak tanımlanmıştır. Her iki tip zemin modelinde, yer altı su seviyesi yüzeyde yer almaktadır. Analizlerde kuvvetli yer hareketinin doğru bir şekilde modellenebilmesi amacıyla alt sınır koşulu “compliant base”, üst ve yatay sınır koşulları ise “serbest” seçilmiştir. Numerik analizlerde kullanılan iki boyutlu sayısal model Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Sayısal analizlerde kullanılan zemin profili ve sınır koşulları

Plaxis 2D yardımıyla gerçekleştirilen analizlerde malzeme sönümünü modelleyebilmek için Rayleigh katsayıları (α_R , β_R) kullanılmıştır [10]. Kocaeli depremi için α_R ve β_R sönüm katsayıları, kum zemin için 0.2469 ve 0.001620, kil zemin için ise 0.3190 ve 0.001224 olarak belirlenmiştir. Dinamik analizler için bir diğer önemli husus ise kritik zaman adımının (Δt) uygun bir şekilde tanımlanmasıdır [10]. Δt parametresinin uygunluğu kontrol edilerek, Kocaeli depremi için 0.005 saniye olarak seçilmiştir.

Zemin dinamik davranışını modellenmesi amacıyla sayısal analizlerde, kum zeminler için 3, kil zeminler için ise 2 aşama tanımlanmıştır. Kum zeminde başlangıçta K_0 prosedürü oluşturulmuştur. Sonraki aşamada, PM4Sand'in başlangıç gerilme koşullarını belirlemede ki yetersizliğini ortadan kaldırmak için kum zemin özelliklerine uygun HSSM kullanılarak boş bir adım tanımlanmıştır [9]. Son aşamada ise sayısal modelin tabanı boyunca ivme-zaman kaydı etkiltilerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Kil zeminler için ise başlangıçta K_0 prosedürü oluşturulmuş sonraki aşamada dinamik yük etkiltilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Kil ve kum zeminlerin modellenmesinde, 6 ve 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılarak oluşturulan sonlu eleman ağı için literatürde yer alan denklemler esas alınarak 4 farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerin sahip olduğu eleman sayıları ve diğer bilgiler Tablo 2'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kohezyonsuz zeminler için sıvılaşma davranışını gözlemek amacıyla kullanılan aşırı boşluk suyu basınçları ve R_u değerleri, kohezyonlu zeminler için ise yanal deformasyonlar incelenmiştir.

Tablo 2. Sayısal analizlerde kullanılan sonlu eleman sıklıkları

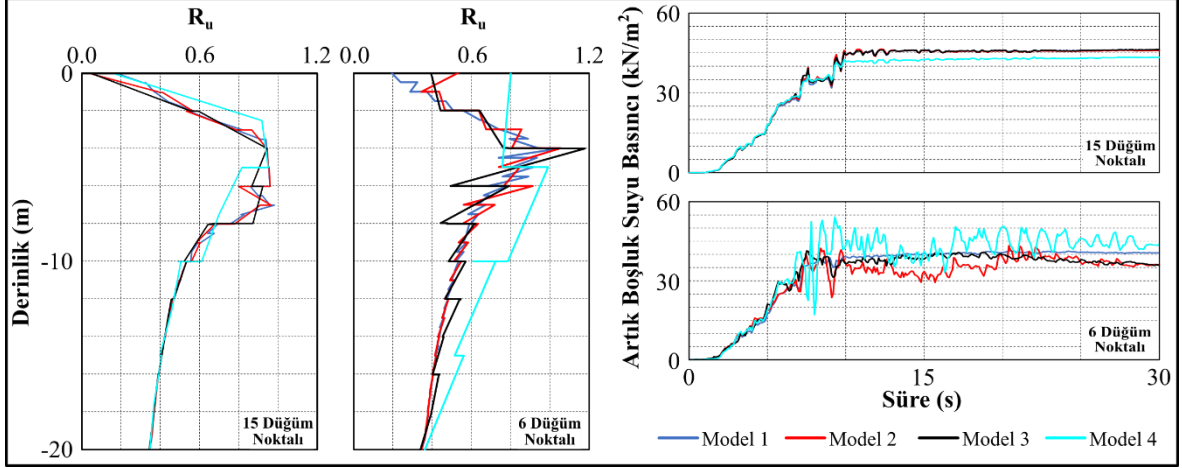
Model No	15 Düğüm Noktalı Elemanlar			6 Düğüm Noktalı Elemanlar		
	OEB (m)	# Eleman	# Düğüm Noktası	OEB (m)	# Eleman	# Düğüm Noktası
Model 1	0.70	10513	85478	0.70	10513	21715
Model 2	1.21	3416	28192	1.21	3416	7266
Model 3	2.13	1107	9386	2.13	1107	2482
Model 4	4.92	218	1972	4.92	218	552

3.SONUÇLAR

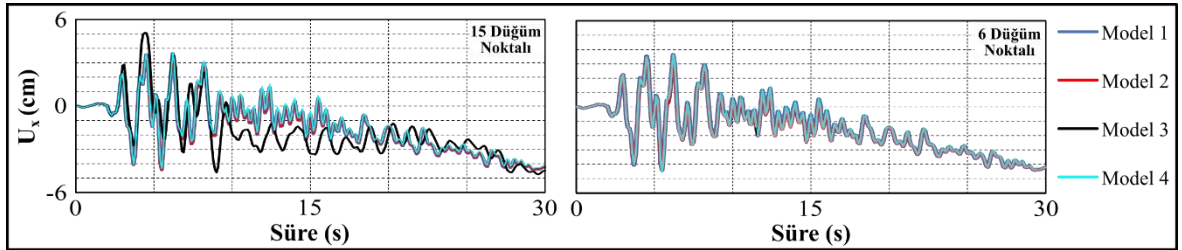
Bu çalışma kapsamında, sonlu eleman ağı sıklığının kum ve kil zeminlerin dinamik davranışına olan etkisini gözlemek amacıyla iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları kum zeminler için Şekil 3'te kil zeminler için Şekil 4'te verilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen çıktılar şunlardır:

- Kil zeminlerde yatay deformasyonlar incelendiğinde, 6 ve 15 düğüm noktalı elemanlar için tüm modellerde benzer davranış elde edilmiştir. Bununla birlikte 15 düğüm noktalı Model 3'te nihai deformasyon aynı olsa da süre boyunca elde edilen pik deformasyonlar farklılık göstermiştir.
- Kum zeminlerde R_u değerleri incelendiğinde, tüm modellerde ortalama eleman boyutu arttıkça Model 1'den daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle model 4'teki R_u değerleri daha büyük bulunmuştur.
- Artık boşluk suyu basınçlarında, tüm modellerde yaklaşık olarak benzer sonuçlar elde edilse de 6 düğüm noktalı elemanlarda Model 3 ve 4'te, 15 düğüm noktalı elemanlarda ise sadece Model 4'te farklı sonuçlar gözlenmiştir.

- Yapılan incelemeler sonucunda, hem 15 hem de 6 düğüm noktalı elemanlar için Model 2’de kullanılan Kuhlemeyer ve Lysmer (1973) tarafından önerilen denklem ile en güvenli sonuçlar elde edilmiştir.
- Yukarıdakilere ek olarak, bu çalışmanın bulguları, ivme- zaman kaydı sayısı artırılarak gerçekleştirilecek sonlu elemanlar analizleri ile desteklenerek geliştirilmelidir.



Şekil 3. Eleman Sıklığının kumlarda R_u ve artık boşluk suyu basıncına etkisi



Şekil 4. Eleman sıklığının killerde yatay deformasyonlara etkisi

KAYNAKLAR

- [1] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., (2020), "DEEPSOIL 7, User Manual", Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [2] Benz, T., Vermeer, P. A., & Schwab, R., (2009), "A Small-Strain Overlay Model", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
- [3] Beaty, M. H., & Byrne, P. M., (2011), "UBCSAND Constitutive Model Version 904aR", Itasca UDM Web Site, 69.
- [4] Boulanger, R. W., and Ziotopoulou, K., (2017), "PM4Sand (version 3.1 Revised July 2018): A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications", Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 112 pp
- [5] Kuhlemeyer, R. L. & Lysmer, J., (1973), "Finite element method accuracy for wave propagation problems", Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 99 (sm5), 421-7.
- [6] De Greef, J., (2015), "Interaction between pipelines and flood defences subject to induced earthquake loads in Groningen", (Master's thesis), Delft University of Technology, Delft.
- [7] Toloza Barría, P., (2018), "Liquefaction modelling using the PM4Sand soil constitutive model in PLAXIS 2D", (Master's thesis), Delft University of Technology, Delft.

- [8] Vilhar, G., Brinkgreve, R.B.J., Zampich, L. (2018), "The PM4Sand Model 2018", Plaxis BV, Delft, The Netherlands.
- [9] Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Engin, H.K. (2010), "Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands", In: Numerical methods in geotechnical engineering, 1st Edition, CRC Press, USA.
- [10] Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy S., Swolfs, W.M. (2019), "Plaxis 2D Manuals", Plaxis BV, Delft, The Netherlands.