

ZEMİNLERİN MEKANİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Mustafa Laman, Abdulazim Yıldız, Murat Örnek ve Ahmet Demir
E-Posta: mlaman@cukurova.edu.tr

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Adana

ÖZET

Zemin-yapı etkileşimi problemlerinde, zeminin cinsi, rijitliği ve deformasyon özellikleri çok önemlidir. Araştırmacılar genellikle, üst yapı davranışı üzerinde yoğunlaştıkları için zemin davranışı basite indirgenip, zemin lineer elastik malzeme kabul edilmekte ve sadece elastisite modülü ve Poisson oranı gibi birkaç parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçekte zemin davranışı lineer elastik olmadığı gibi çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada kum zeminler üzerine oturan dairesel temellerin taşıma kapasiteleri laboratuvar ortamında küçük ölçekli model deneylerle ve sayısal analiz yöntemleriyle araştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS V.8.2 (Finite Element Code for Soil and Rock Analyses) bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılan sayısal analizlerde Lineer Elastik, Mohr Coulomb ve Pekleşme Zemin modelleri kullanılmıştır. Sayısal analiz sonuçları model deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta deneysel verilerle Pekleşme Zemin modeli kullanılarak elde edilen sayısal verilerin birbirleri ile daha uyumlu olduğu gözlenmiş, kum zeminler üzerine oturan dairesel temellerin taşıma kapasitesinin hesabında Pekleşme Zemin modeli parametrelerinin kullanılmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Ayrıca, Pekleşme Zemin modelinde kullanılan çeşitli parametrelerin (içsel sürtünme açısı, rijitlik modülleri) zemin davranışına etkisi ile ilgili parametrik çalışmalar da yapılmış, sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır.

ABSTRACT

In soil-structure interaction problems, soil type, soil rigidity and soil deformation characteristics are important. Researchers commonly focused on structure behavior therefore soil behavior is simplified assuming soil as a linear elastic material and need a few parameters such as modulus of elasticity and Poisson's ratio. In reality, soil behavior is not linear elastic, just the opposite, soil has a very complex structure. In this study, the bearing capacity of circular foundation rested on sandy soils was investigated by small scale model tests in laboratory and numerical analyses. Numerical analyses were performed with a finite

element method based computer software program PLAXIS V.8.2 (Finite Element Code for Soil and Rock Analyses) and Linear Elastic, Mohr Coulomb and Hardening Soil models were applied in these numerical analyses. The results of numerical analyses and model test were compared. Eventually, it was observed that results from Hardening Soil model had good agreement with model test results and it was proposed that in sandy soil rested circular foundation's bearing capacity calculation using Hardening Soil model parameters was most suitable. Additionally, a parametric study concerning with the effect of some Hardening Soil model parameters (friction angle, oedometer and triaxial rigidity modulus) on soil behavior was conducted and the results were discussed.

1. GİRİŞ

Zemin-yapı etkileşimi problemleri inşaat mühendisliğinin en önemli araştırma alanlarından birisidir. Yüzeysel ve derin temeller, istinat yapıları, dolgular, tüneller, destekli derin kazılar, donatılı zeminler, zemin-yapı etkileşimi kapsamına giren konulardır. Gerek geoteknik mühendisliği ve gerekse yapı mühendisliği ortak çalışma alanına giren bu uygulamaların analizinde, artık sadece göçme yüklerinin hesaplanması değil, uygulanan yükler altında deformasyon davranışının tanımlanması veya deformasyona bağlı olarak yük ve mukavemet hesaplarının yapılması öncelikli hale gelmektedir.

Zeminler, çeşitli minerallerden oluşan ana kayaların dış etkiler altında ayrışması, bozulması ve ortaya çıkan parçacıkların taşınarak değişik çevre koşulları altında çökmesi, sıkışması ve çimentolaşması sonucu meydana gelmektedir [1]. Diğer mühendislik malzemelerinde olduğu gibi, zeminlerin davranışını incelerken mekanik biliminin kavramlarından ve yöntemlerinden yararlanır. Ancak, zeminlerin sürekli bir katı ortam değil, danelerden oluştuğu ve bu daneler arasında hava ve/veya su bulunduğu göz önüne alınmalıdır. Ayrıca, zemin-su etkileşimi ve zeminde su hareketi dikkate alınarak hidrolik biliminin kavram ve yöntemlerinden de faydalanılır. Dolayısıyla zeminlerin katı, sıvı, gaz gibi üç değişik fazda bileşenlerden meydana gelmeleri nedeniyle diğer inşaat mühendisliği malzemelerine göre davranışının daha karmaşık olduğu bilinmektedir. Genel olarak zeminler heterojen, süreksiz ve anizotropik malzemeler olup yük altında elasto-plastik davranış gösterirler [2]. Ayrıca zemin davranışı yüklenme ve drenaj koşullarına, jeolojik tarihçesine ve zamana bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir [3]. Dolayısıyla, zeminlerin mühendislik davranışlarını tanımlayan modellerde bu sayılan özelliklerin dikkate alınması gerekir. Geoteknik mühendisliğinde, farklı zemin tipi davranışlarının (sıkı, orta-sıkı kum, sert kil, yumuşak kil gibi) gerçeğe daha yakın bir şekilde modellenebilmesi için çeşitli zemin modelleri (Modifiye Cam Kili [4], Hiperbolik Zemin Modeli [5], Pekişme Zemin Modeli [6] vb.) geliştirilmiştir. Bu modellerde genellikle zeminin elasto-plastik davranışı dikkate alınmakta olup gerekli zemin parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi ve analizler sırasında arazi koşullarının dikkate alınması son derece önem arz etmektedir.

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak geoteknik mühendisliğinde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. Genellikle sayısal analizlerde sonlu elemanlar yönteminin çok yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir [7]. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemlerinden en etkin ve sistematik olanıdır. Yöntemin sistematikliği ve her türlü yapıya aynı işlemlerle uygulanması en önemli avantajlarındanır. İşlem hacminin büyümesi dezavantaj olarak görünse de bu olumsuzluk bilgisayar yardımı ile aşılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) [8], geoteknik mühendisliğindeki deformasyon ve stabilite problemlerinin sonlu

elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir bilgisayar programıdır. İlk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır. Program daha sonra, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Program karmaşık bir yapı arz eden geoteknik uygulamaların analizi için önemli özelliklerle donatılmıştır. Programda Lineer Elastik modelin dışında, zeminlerin lineer olmayan gerilme-deformasyon davranışını dikkate alan ve farklı zemin tipleri geliştirilmiş zemin modelleri bulunmaktadır. Bunlar; Mohr Coulomb Modeli, Pekleşme Zemin Modeli, Modifiye Cam Kili Modeli ve Yumuşak Zemin Krip Modeli [9] olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, kum zemin üzerine oturan dairesel rijit bir plaka üzerinde yapılan model deneyler, PLAXIS V8.2 ile analiz edilmiştir. Analizlerde Lineer Elastik, Mohr Coulomb ve Pekleşme Zemin modelleri kullanılarak elde edilen yük oturma eğrileri ile model deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Pekleşme Zemin modeli ile ilgili parametrik çalışmalar yapılarak modelde yer alan bazı parametrelerin zemin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. ZEMİN MODELLERİ

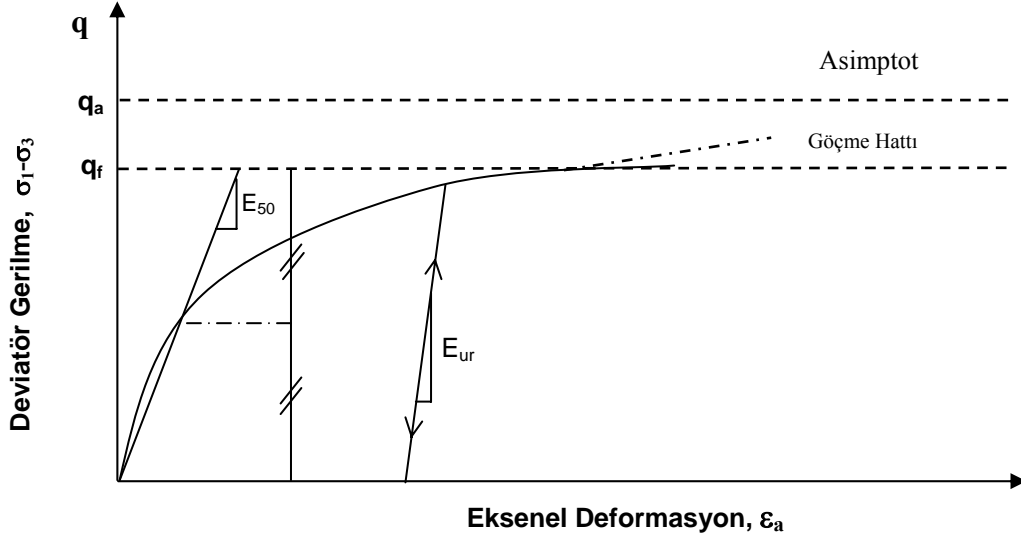
Lineer-elastik zemin modelinde, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu ve zeminin ise izotropik lineer elastik bir malzeme olduğu kabul edilir. PLAXIS bilgisayar programında zemin ile ilgili Young modülü (E) ve Poisson oranı (ν) değerleri giriş parametreleri olarak kullanılır. Mohr Coulomb (MC) modelinde ise, zemin davranışı elasto-tam plastik kabul edilmektedir. Bu model için 5 parametreye ihtiyaç vardır. Bunlar; Young modülü (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (c), sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ)'dir. Ayrıca modelde, doğru bir K_0 seçilerek zemindeki başlangıç yatay gerilme durumu oluşturulabilir. Zemin rijitliği için kullanılan E parametresi, tüm zemin tabakaları için sabittir. Fakat programda istenirse, E parametresi derinlik boyunca artırılabilir. Mohr Coulomb modelinde gerilme seviyesi kohezyon (c), sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) ile sınırlandırılmıştır.

Pekleşme Zemin Modeli, farklı tipteki zemin davranışını (orta-sıkı, sıkı kumlar ile aşırı konsolide sert killer) modellemekte kullanılan ve Mohr Coulomb modeline göre çok daha gelişmiş bir zemin modelidir. Mohr Coulomb modelinde olduğu gibi gerilme seviyesi kohezyon (c), sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) ile sınırlandırılmıştır. Modelde zeminin deformasyon davranışı üç farklı rijitlik modülü kullanılarak modellenmektedir. Pekleşme Zemin Modeli, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanır. Bu ilişki ilk olarak Kondner [10] tarafından formüle edilmiştir. Daha sonra Duncan ve Chang [11] tarafından geliştirilerek Hiperbolik Zemin Modeli olarak adlandırılmıştır. PZ modelinde hiperbolik modelde olduğu gibi gerilme bağımlı rijitlik modülü esas alınmaktadır. Pekleşme Zemin Modeli ile Hiperbolik Zemin Modeli arasında benzer özellikler olmasına karşın aralarında önemli farklar da vardır. Bunlar; Pekleşme Zemin Modelinin elastisite teorisinden çok plastisite teorisini kullanması, zemin dilatasyonunu da kapsaması ve bir akma başlığı içermesidir.

Modelin bazı temel karakteristik özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Gerilme bağımlı rijitlik (giriş parametresi m),

- Deviatorik yükleme nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (giriş parametresi E_{50}^{ref}),
- Sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (giriş parametresi E_{oed}^{ref}),
- Elastik boşaltma/yeniden yükleme (giriş parametresi E_{ur}^{ref} , ν_{ur}),
- Mohr-Coulomb modeline göre göçme (c , ϕ ve ψ parametreleri)



Şekil 1. Standart Üç Eksenli Basınç Deneyinde Gözlenen Gerilme-Deformasyon İlişkisi

Pekleşme Zemin Modeli formülasyonundaki temel düşünce, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen düşey deformasyon (ϵ_1) ve deviatorik gerilme (q) arasındaki hiperbolik ilişkidir (Şekil 1). Modelde bu hiperbolik denklem;

$$-\epsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad q < q_f \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki q_a , kayma mukavemetinin asimptot kaldığı değerdir. E_{50} parametresi ise ilk yükleme sırasındaki gerilmeye bağlı rijitlik modülüdür. E_{50} için aşağıdaki bağıntı tanımlanmıştır:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma_3'}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (2)$$

Buradaki E_{50}^{ref} , p^{ref} çevre basıncına karşılık gelen referans rijitlik modülüdür. Rijitlik modülü, üç eksenli basınç deneyindeki çevre basıncı olan küçük asal gerilme, σ_3' değerine bağlıdır. Basınç olması nedeniyle σ_3' değerinin işareti negatiftir. Modelde gerilme seviyesi ise üs değeri m ile kontrol edilmektedir. Göçme anındaki deviatorik gerilme q_f ve deviatorik gerilmenin asimptot kaldığı q_a değeri modelde aşağıdaki bağıntılarla tanımlanmaktadır:

$$q_f = \left(c \cot \phi - \sigma_3' \right) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (4)$$

q_f değeri, c ve ϕ değerleri kullanılarak Mohr-Coulomb göçme kriterinden hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, $q=q_f$ olduğunda Mohr-Coulomb modeline göre göçme meydana gelir ve tam plastik akma oluşur. q_f ve q_a arasındaki oran ise göçme oranı (R_f) olarak tanımlanmıştır. R_f değerinin her zaman için 1'den küçük olduğu açıkça görülmektedir.

Modelde, boşaltma-yeniden yükleme rijitlik modülü için ise, aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır:

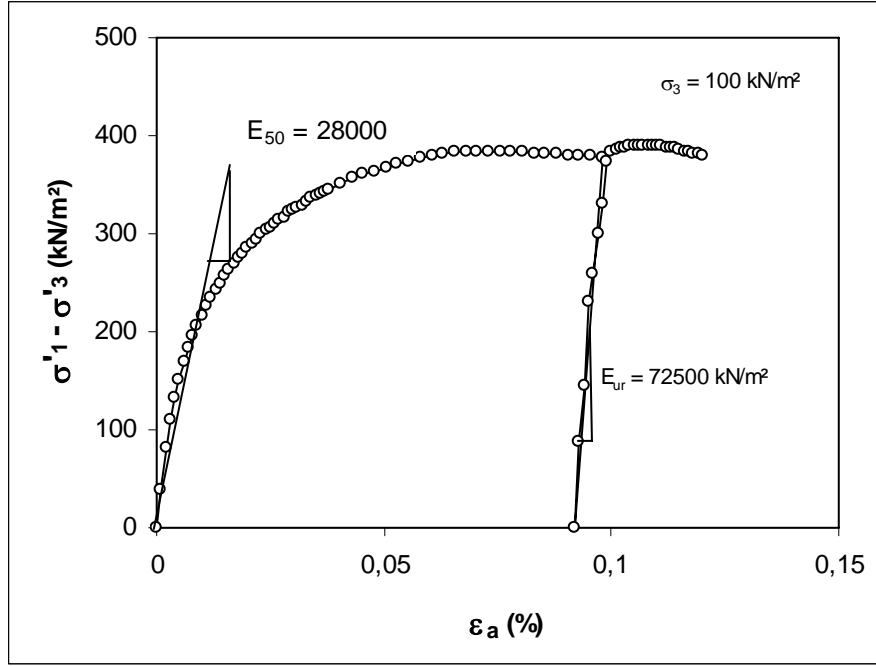
$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma_3'}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (5)$$

E_{ur}^{ref} , p^{ref} çevre basıncındaki boşaltma-yeniden yükleme için referans Young modülüdür.

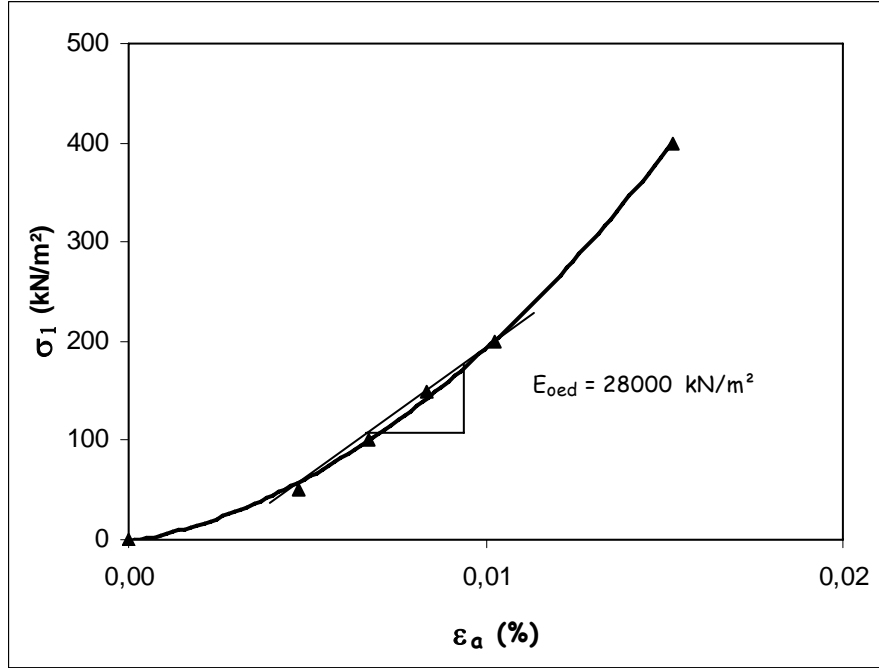
3. LABORATUVAR MODEL DENEYLERİ

Model deneyler, Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında kum zeminler üzerinde yapılmıştır [12]. Model deneyler, 700mm x 700mm x 700mm boyutlarındaki kare kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan daire kesitli model temelin çapı 85 mm'dir.

Sayısal analizlerde kullanılan zemin parametrelerini tayin etmek için laboratuvarında endeks ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Pekleşme Zemin Modelinde kullanılan parametrelerin elde edilebilmesi için yapılan üç eksenli ve konsolidasyon deneylerine ait grafikler Şekil 2'de verilmektedir.



(a) Üç Eksenli Basınç Deneyi



(b) Konsolidasyon Deneyi

Şekil 2. Pekleşme Zemin Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi

4. SAYISAL ANALİZLER

PLAXIS bilgisayar programında sayısal model oluşturulurken deney kasası 2 boyutlu ve aksel simetrik koşullarda, dairesel temel plakası ise, rijit ve pürüzlü olarak modellenmiştir. Kasa boyutlarının, sınır etkisi oluşturmayacak şekilde yeterince büyük olduğu ve sonuçlar üzerinde etkisi olmadığı önceden yapılan analizlerle gösterilmiştir. Analizlerde zemin ortamı

için 15 düğümlü üçgen elemanlar kullanılmış ve sonuçlar üzerinde sonlu elemanlar ağ etkisi araştırılarak ortalama 528 zemin elemanından oluşan sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan zemin ve temele ait parametreler Tablo 1, 2, 3 ve 4'te verilmiştir.

Tablo 1. Sayısal analizlerde kullanılan Lineer Elastik Model parametreleri

Lineer Elastik Model			
Doğal birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	17.1
Doygun birim hacim ağırlığı	γ_d	kN/m ³	18
Üç eksenli yükleme rijitliği	E_{ref}	kN/m ²	28000
Poisson Oranı	ν	-	0.20

Tablo 2. Sayısal analizlerde kullanılan Mohr Coulomb Modeli parametreleri

Mohr Coulomb Modeli			
Doğal birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	17.1
Doygun birim hacim ağırlığı	γ_d	kN/m ³	18
Üç eksenli yükleme rijitliği	E_{ref}	kN/m ²	28000
Poisson Oranı	ν	-	0.20
Kohezyon	c	kN/m ²	0.35
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	41
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	11
Toprak basıncı katsayısı	K_0	-	0

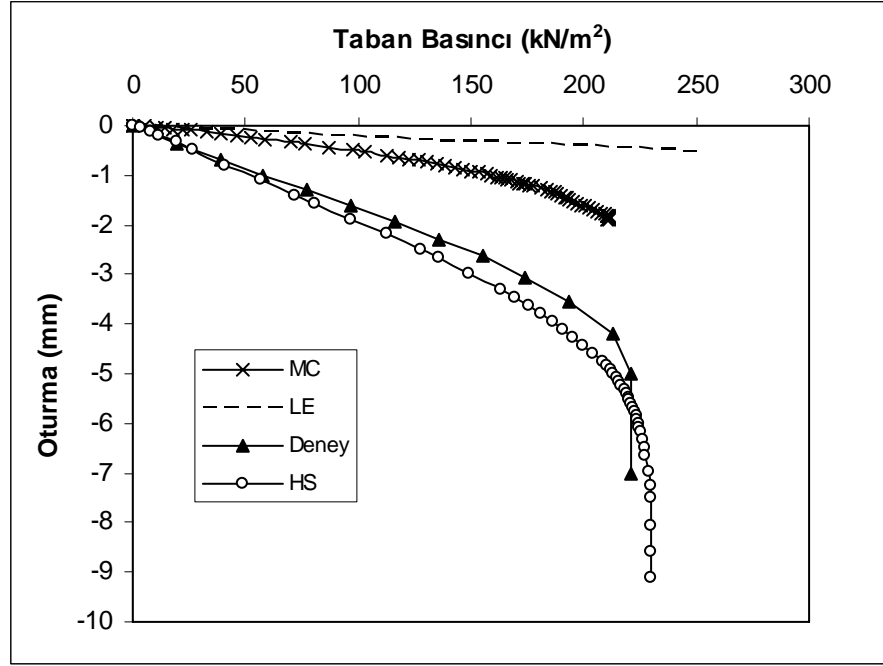
Tablo 3. Sayısal analizlerde kullanılan Pekleşme Zemin Modeli parametreleri

Pekleşme Zemin Modeli			
Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Doğal birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	17.1
Doygun birim hacim ağırlığı	γ_d	kN/m ³	18
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{ref}=E_{50}$	kN/m ²	28000
Odometre yükleme rijitliği	E_{oed}	kN/m ²	28000
Üç eksenli boşaltma-tekrar yükleme rijitliği	E_{ur}	kN/m ²	72500
Kohezyon	c	kN/m ²	0.35
İçsel sürtünme açısı	ϕ	(°)	41
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	11
Toprak basıncı katsayısı	K_0	-	0.344

Tablo 4. Sayısal analizlerde temel için kullanılan parametreler

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Eksenel Rijitlik	EA	kN/m	5×10^6
Eğilme Rijitliği	EI	kNm ² /m	8500
Malzeme Türü	-	-	Elastik

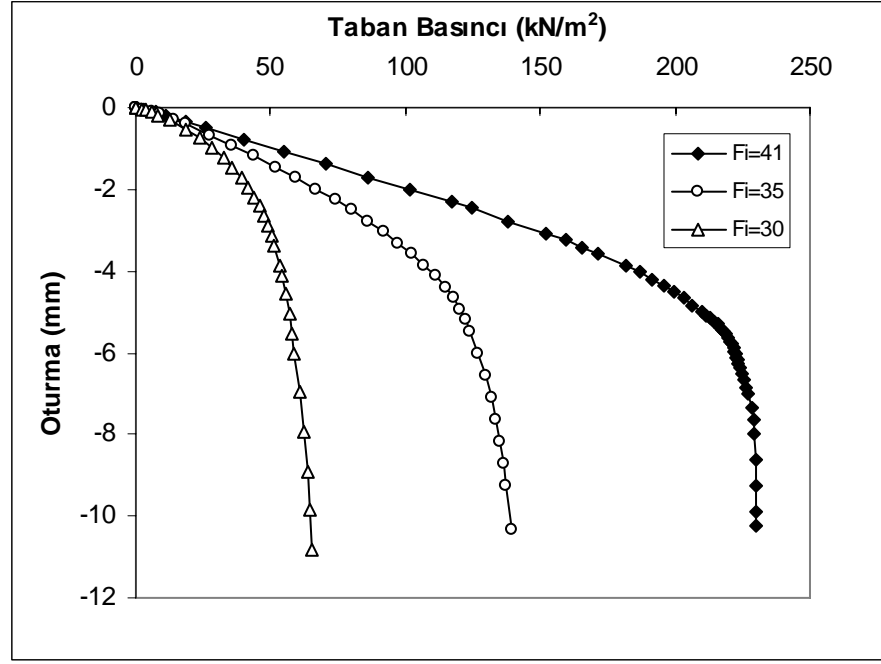
Sayısal analizlerde kum zemin davranışı için üç farklı model (Lineer Elastik, Mohr Coulomb ve Pekleşme Zemin modelleri) kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen yük-oturma eğrileri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Dairesel Temelerde Farklı Modellerde ve Denedeyde Elde Edilen Yük Oturma Eğrileri

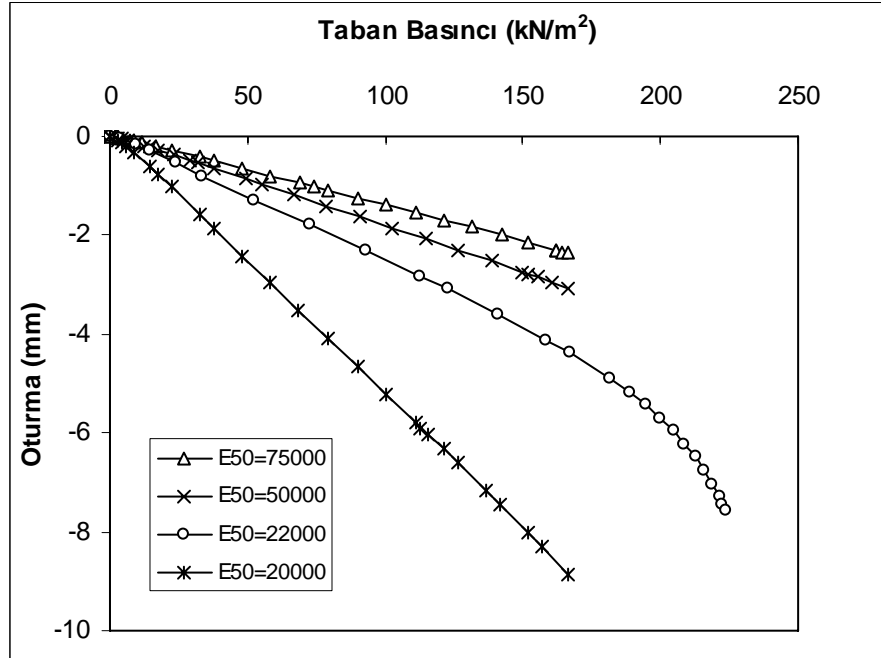
Model deneyden kum zeminin nihai taşıma kapasitesi 213kN/m^2 ve göçme anındaki oturma oranı (s/D) ise, %4.90 olarak bulunmuştur. Sayısal analizlerde, Pekleşme zemin ve Mohr Coulomb modelleri ile kum zeminin nihai taşıma kapasitesi 210kN/m^2 , göçme anındaki oturma oranları (s/D) ise sırasıyla %4.82 ve %2.22 olarak hesaplanmıştır. Her iki modelden hesaplanan nihai taşıma kapasitesi değerleri birbirine eşit iken oturma oranlarının farklı olduğu görülmektedir. PZ modeli ile hesaplanan oturma değerlerinin deneyden elde edilen oturma değerlerine yakın olduğu, MC modeli ile hesaplanan oturma değerlerinin ise çok daha küçük olduğu görülmektedir. Lineer Elastik model ise, kum zeminin göçme davranışını modelleyememektedir. Oturma değerleri karşılaştırıldığında LE model değerlerinin gerek deney sonuçlarına göre gerekse de diğer model sonuçlarına göre çok düşük değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlardan Pekleşme Zemin modeli ile hesaplanan yük-oturma eğrisinin deney eğrisi ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Kum zemin üzerine oturan dairesel temelin sayısal analizinde Pekleşme Zemin modeli kullanıldığında içsel sürtünme açısı ve E_{50} , E_{oed} ve E_{ur} rijitlik modüllerinin kum zemin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İlk olarak analizlerde içsel sürtünme açısı 30° , 35° ve 41° olarak seçilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir.

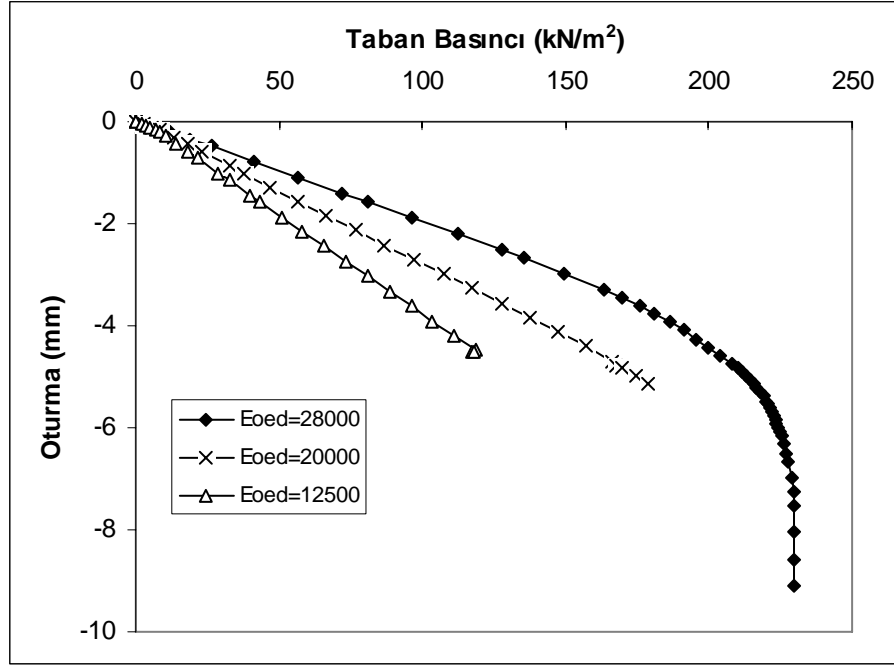


Şekil 4. Dairesel Temelerde İçsel Sürtünme Açısının Zemin Davranışına Etkisi

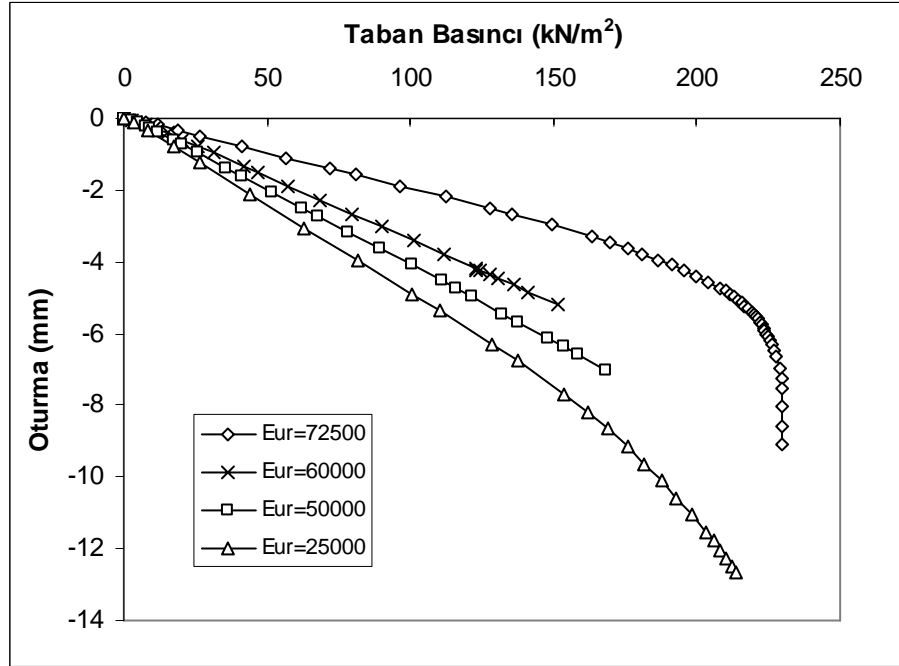
Bu sonuçlardan kum zemin davranışı üzerinde içsel sürtünme açısının önemli bir etkiye sahip olduğu ve özellikle kum zeminin nihai taşıma kapasitesinin içsel sürtünme açısından önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Farklı E_{50} , E_{oed} ve E_{ur} rijitlik modülleri kullanılarak sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 5, 6, ve 7'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden E_{50} , E_{oed} ve E_{ur} değerlerinin zemin oturma davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.



Şekil 5. E_{50} 'nin Zemin Davranışına Etkisi



Şekil 6. E_{ur} 'nin Zemin Davranışına Etkisi



Şekil 7. E_{oed} 'nin Zemin Davranışına Etkisi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kum zemin üzerine oturan dairesel bir temelin taşıma kapasitesi ve oturma davranışı deneysel ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS bilgisayar programı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kum zemin davranışı üç farklı zemin modeli (Lineer Elastik, Mohr Coulomb ve Pekleşme Zemin

modelleri) ile modellenmiştir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Pekleşme Zemin Modeli ile deney sonuçları oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Lineer elastik ve Mohr Coulomb modelleri ile deplasmanlar deneysel değerlerden çok daha küçük hesaplanmış ve bu modellerin yük-oturma davranışını yeterince doğru modellemediği görülmüştür. Mohr Coulomb modeli, göçme yükünü deneysel göçme yüküne yakın hesaplarırken lineer elastik modelde ise, deney kumunun göçme yükü hesaplanamamaktadır. Sonuç olarak zemin – yapı etkileşimi problemlerinde lineer elastik model yerine zemin davranışının gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi için pekleşme zemin modeli gibi gelişmiş yapısal zemin modellerinin kullanılması sonuçların daha güvenilir olmasını sağlayacaktır.
- Pekleşme zemin modelinde kum zeminin nihai taşıma kapasitesi içsel sürtünme açısından önemli ölçüde etkilenmektedir. İçsel sürtünme açısı arttıkça kum zeminin nihai taşıma kapasitesi artmaktadır. Pekleşme zemin modelinde kum zeminin oturma davranışı rijitlik modülleri tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle sayısal analizlerde pekleşme zemin model parametrelerinin laboratuvar veya arazi deneyleri yardımıyla doğru bir şekilde elde edilmesi sonuçların güvenilirliği açısından gereklidir.

KAYNAKLAR

- [1] Özaydın, K., “Zemin Mekaniği” Birsen Yayınevi, İstanbul, 1997.
- [2] Moor D., “Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics” Cambridge University Press, 1990.
- [3] Atkinson, J., “An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations” McGraw Hill Book Comp., 1993.
- [4] Roscoe K.H. and Burland J.B. “On the generalized stress-strain behaviour of ‘wet’ clay.” Engineering Plasticity 1968, Cambridge University Press: 553-609.
- [5] Duncan, M. and Chang, C.Y., “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils” Journal of Soil Mechanics and Foundations, 96, SM5, 1629-1653, 1970
- [6] Schanz, T., Vermeer, P. A. and Bonnier, P. G., “The Hardening Soil Model: Formulation and Verification” Beyond 2000 in Computational Geotechnics, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 281–296, 1999.
- [7] Potts D.M. and Zdravkovic L., “Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Application” Thomas Telford Publishing, 2001.
- [8] Brinkgreve R. B. J. “Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis, 2d Version 8.2”, 2002.
- [9] Vermeer P.A., Stolle, D.F.E. and Bonnier, P.G., “From the Classical Theory of Secondary Compression to Modern Creep Analysis” Proc. 9th Int. Conf. Comp. Math. And Advanced Geomechanics, Wuhan, Chine, Vol. 4, pp. 2469-2478.
- [10] Kondner, R.L., “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils” Journal of Soil Mechanics and Foundations, 89, SM1, 115-143, 1963
- [11] Duncan, M. and Chang, C.Y., “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils” Journal of Soil Mechanics and Foundations, 96, SM5, 1629-1653, 1970
- [12] Yıldız, A., “Donatılı Kum Zeminlere Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi” Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2002

