

## KAVİTE GENLEŞME TEORİSİNE DAYALI KONİ UÇ DİRENCİ HESAPLAMA

### PREDICTION OF CONE TIP RESISTANCE BASED ON CAVITY EXPANSION THEORY

Emirhan SANCAK<sup>1</sup>, Ahmet Talha GEZGİN<sup>2</sup>, Özer ÇİNİCİOĞLU<sup>3</sup>

#### ÖZET

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında sürekli gelişen teknolojisi ile Konik Penetrasyon Deneyi 'nin (CPT) kullanımı geçtiğimiz yıllarda artmaya devam etmektedir. Bu deney ile elde edilen konik uç direnci ( $q_c$ ) değerine bağlı bağıntılar sayesinde taşıma gücü kapasitesi, sıvılaşma problemleri gibi konularda devirsel ve statik parametrelerin hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu çalışmada Konik Penetrasyon Deneyi'nin mekanizmasının Kavite Genleşme Teorisi'ne olan uygunluğundan faydalanarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modelin doğrulanması, Yu ve Houlsby (1991)'nin Mohr-Coulomb zemin modeli için ortaya koydukları kapalı-yapı analitik çözümüyle yapılmıştır. Doğrulan model sonrasında Toyoura ve Ticino kumlarının Pekleşen-Zemin modeli kullanılarak tanımlanması ile farklı basınç ve sıklık değerleri için çözümlenmiştir. Buradan elde edilen limit basınç ( $p_{lim}$ ) değerleri ile farklı geçiş bağıntıları kullanılarak konik uç direnç değerlerine ulaşılmıştır. Aynı kumların literatürde çalışılmış kalibrasyon çember deneyleri ile elde edilmiş  $q_c$  değerleri ile karşılaştırılması yapılarak farklı geçiş bağıntılarının performansı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kavite genleşme teorisi, sonlu elemanlar yöntemi, koni penetrasyon deneyi.

#### ABSTRACT

The use of Cone Penetration Test (CPT) in geotechnical engineering applications has continued to increase in recent years with its continuously developing technology. This test makes it possible to calculate cyclic and static parameters such as bearing capacity and liquefaction problems by means of the equations based on the cone tip resistance ( $q_c$ ) value obtained by this test. In this study, a finite element model of the mechanism of the Cone Penetration Test was created by utilizing its compatibility with the Cavity Expansion Theory. The verification of the model was carried out with the closed-form analytical solution of Yu and Houlsby (1991) for the Mohr-Coulomb soil model. The verified model was then solved for Toyoura and Ticino sands for different values of pressure and stiffness using the Hardening-Soil model. With the limit pressure ( $p_{lim}$ ) values obtained from here, cone tip resistance values were obtained by using different transition equations. The performance of the different transition equations was observed by comparing the same sands with the  $q_c$  values obtained by calibration chamber experiments studied in the literature.

**Keywords:** Cavity expansion theory, finite element method, cone penetration test.

<sup>1</sup> Yük. İnş. Müh., emirhan.sancak@boun.edu.tr (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, [ahmettalhagezgin@uludag.edu.tr](mailto:ahmettalhagezgin@uludag.edu.tr)

<sup>3</sup> Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, [ozercinicioglu@boun.edu.tr](mailto:ozercinicioglu@boun.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) kullanımı dünyada olduğu gibi ülkemizde de gün geçtikçe artmaktadır. İlk olarak 1950'li yıllarda zemin taşıma kapasite hesabı için Delft Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda geliştirilip kullanılmaya başlanan CPT, seneler içerisinde tamamen mekanik olan aksamı yerini elektronik ve çok daha hassas ölçümler yapabilen gelişmiş yük hücreleri ve sensörler almıştır. Bu sayede zemin profili derinliği boyunca sürekli ve güvenilir veri elde etmek mümkün olmuştur. Çok sayıda farklı cins ve özellikte zemin profilinde kullanılabilir olduğu gibi, CPT ile elde edilen konik uç direnci ( $q_c$ ) değerine bağlı bağıntılar sayesinde taşıma gücü kapasitesi hesabının yanısıra sıvılaştırma problemleri gibi konularda devrimsel ve statik parametrelerin hesaplanmasında da etkin olarak kullanılabilir.

Kavite Genleşme Teorisi zemin problemlerinde ve bünye modelleri oluşturulmasında kullanılmıştır (Bishop vd., 1945; Cao vd., 2001; Carter vd., 1986; Chen ve Liu, 2019; Huang vd., 2021; Wang vd., 2022; Yu, 2000). Bir saha deneyi olarak CPT'nin verileri elde etmedeki mekanizmanın Kavite Genleşme Teorisi'ne uygunluğu, bu alanda farklı araştırmalar yapılmasına neden olmuştur (Mo vd., 2020; Suryasentana ve Lehane, 2014; Suzuki ve Lehane, 2015; Xu ve Lehane, 2008). Bu araştırmalar neticesinde konik uç direnci,  $q_c$ 'ye, bağlı olarak farklı bağıntılarla mühendislik parametreleri elde edilebilmiştir.

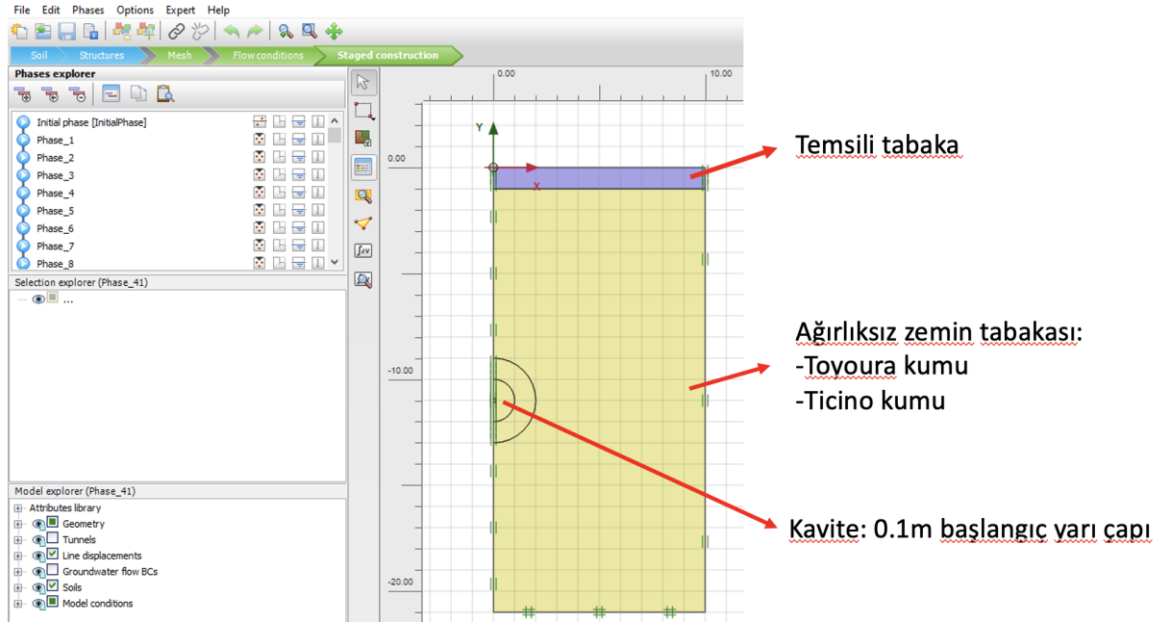
Bu çalışma kapsamında araştırmalarda yaygın olarak kullanılan Toyoura ve Ticino kumları için temel zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar zemin modeli oluşturulmuştur. Bu modellerde kavite genleşmesi uygulanarak farklı koşullarda limit basınç değerleri,  $p_{lim}$ , elde edilip buradan literatürde çalışılmış 2 farklı bağıntı sayesinde öngörülecek  $q_c$  profilleri çıkarılmıştır. Kalibrasyon çemberi deney sonuçları ile karşılaştırılarak bağıntıların performansı görülmüştür.

## 2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE KONİK UÇ DİRENÇ HESAPLANMASI

Çalışmanın bu kısmında sonlu elemanlar modeli oluşturulmasında ve analizlerinde PLAXIS 2D v2023.1.0.136 kullanılmıştır.

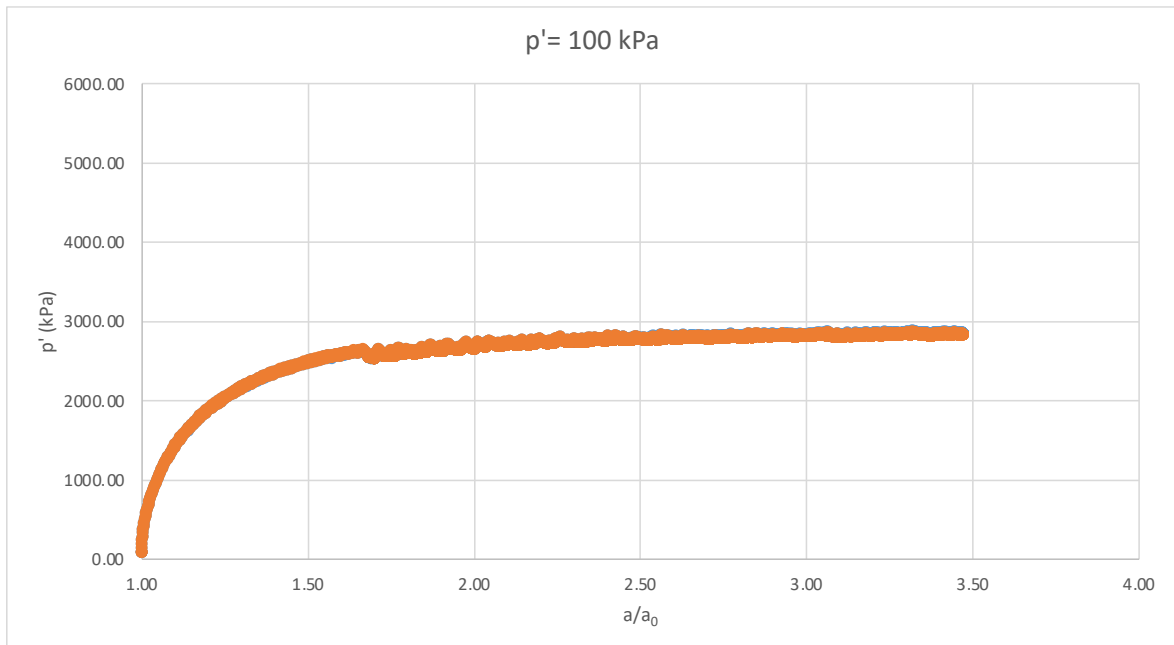
### 2.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Analizler aksisimetrik koşullar açısından yapılmıştır. Şekil 1'de gösterilen model, her biri 15 düğüm ve 12 Gauss stres noktası içeren üçgen elemanlardan oluşturuldu. Örgü (mesh) alanının yüksekliği 21 m ve yarıçapı 10 m olarak belirlendi. Modelin alt kısmında yatay ve dikey yer değiştirmeler sabitlendirilirken, sağ ve sol kenarlarda yalnızca yatay yer değiştirmeler sabitlenmiştir. Sol sınır aynı zamanda modelin eksenidir. 20 m yüksekliğindeki ağırlıksız zemin tabakası üzerine 1 m kalınlığında temsili (dummy) tabaka yerleştirilmiş, bu da zemin katmanının orta derinliğindeki boşluk etrafındaki gerilme durumunun ayarlanmasında kolaylık sağlamıştır. Örgü geometrisini değiştirerek boşluğun konumunu yeniden düzenlemek yerine, temsili tabakanın birim hacim ağırlığını değiştirmek, kavite seviyesinde istenilen basınç büyüklüklerinin belirlenmesine izin verir. İstenilen basınç değerleri, analiz edilen kumun profil derinliği boyunca maruz kalacağı gerilme durumunu temsil eder.



Şekil 1. Sonlu Elemanlar yöntemiyle laboratuvar kumlarında kavite genişleme modeli kurulması

Aksisimetrik modelin orta derinliğinde oluşturulan 0.1 m yarı çapına sahip lineer elastik tanımlanan yarım dairenin her bir fazda hacimsel olarak %3 genişmesi suretiyle gerçekleştirilen analizlerde, yarım dairenin içerisinde seçilen 10 adet düğüm noktası ve 9 adet stres noktasında ölçülen efektif basınç-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2’de tek bir zemine ait tek bir derinlik için oluşturulan modelin analiz sonucunda elde edilen eğri görülmektedir. Burada zeminde temsili oluşturulan derinlikte elde edilebilecek limit basınç,  $p_{lim}$ , değeri 2870 kPa olarak gözlemlenmektedir. Bu işlem üç eksenli deney sonuçları ve sıklıkları bilinen Toyoura ve Ticino kumlarının Pekleşen-Zemin Modeli ile tanımlanmış tabakalarında her 1 m’lik derinliği temsil eden artan derinliklerdeki zemin gerilmeleri oluşturularak tekrar edilmiştir.



Şekil 2. Kavite genişleme analizi sonucu elde edilen basınç-deplasman eğrisi

Her iki kum için elde edilen  $p_{lim}$  değerleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak  $q_c$  değerlerine ulaşılmıştır.

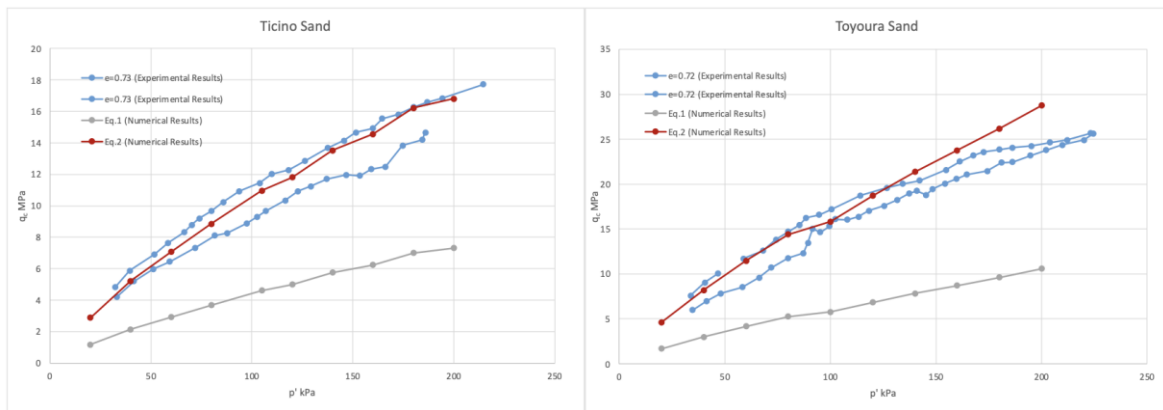
$$q_c = p_{lim} \times (1 + \tan\phi' \cdot \tan 60^\circ) \quad (1)$$

$$q_c = p_{lim} \times k_q = p_{lim} \times \left( 1.5 + \frac{5.8(I'_D)^2}{(I'_D)^2 + 0.11} \right) \quad (2)$$

Burada basınca bağlı sıklık indisi Cudmani & Osinov (2001) tarafından,  $I'_D = (e_c - e)/(e_c - e_d)$  şeklinde tanımlanmıştır.  $e_c$  ve  $e_d$  sırası ile kritik durum boşluk oranı ve maksimum yoğunluktaki boşluk oranını temsil etmektedir.

## 2.2 Öngörülen $q_c$ Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 3'teki grafiklerde Ticino ve Toyoura kumlarının Fioravante & Giretti (2015) tarafından yapılan kalibrasyon çemberi deneyleri ile elde edilen  $q_c$  değerleri ve sonlu elemanlar modeli analizleriyle elde edilmiş  $q_c$  değerleri görülmektedir. Burada her bir kum için Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 yardımıyla elde edilmiş  $q_c$  değerleri ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 3. Ticino ve Toyoura kumları için deneysel ve nümerik yollarla elde edilen  $q_c$  değerleri

Elde edilen sonuçlar Eşitlik 2 yardımıyla elde edilen  $q_c$  değerlerinin her iki kum için de deneysel elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

## 3. SONUÇLAR

Toyoure ve Ticino kumları sonlu elemanlar programı yardımıyla Pekleşen-Zemin modeli kullanılarak tanımlanması ile farklı basınç ve sıklık değerleri için kavite genleşme analizleri yapılmıştır. Buradan elde edilen limit basınç ( $p_{lim}$ ) değerleri ile iki farklı geçiş bağıntısı kullanılarak konik uç direnc değerlerine ulaşılmıştır. Aynı kumların literatürde çalışılmış kalibrasyon çember deneyleri ile elde edilmiş  $q_c$  değerleri ile karşılaştırılması yapılmış farklı geçiş bağıntılarının performansı gözlemlenmiştir. Buna göre Cudmani & Osinov (2001) tarafından öne sürülen geçiş bağıntısıyla elde edilen değerler her iki kum için deneysel sonuçlar ile yüksek uyumluluk göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- Bishop, R. F., Hill, R., ve Mott, N. F. (1945), "Theory of Indentation and Hardness Tests", *Proc Phys Soc*, 57(3), 147.
- Cao, L. F., Teh, C. I., ve Chang, M. F. (2001), "Undrained Cavity Expansion in Modified Cam Clay I: Theoretical Analysis", *Géotechnique*, 51(4), 323–334.
- Carter, J. P., Booker, J. R., ve Yeung, S. K. (1986), "Cavity Expansion in Cohesive Frictional Soils", *Geotechnique*, 36(3), 349–358.
- Chen, S. L., ve Liu, K. (2019) "Undrained Cylindrical Cavity Expansion in Anisotropic Critical State Soils", *Géotechnique*, 69(3), 189–202.
- Cudmani, R., ve Osinov, V. A. (2001), "The Cavity Expansion Problem for the Interpretation of Cone Penetration And Pressuremeter Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 622–638.

- Fioravante, V., ve Giretti, D. (2015), "Unidirectional Cyclic Resistance of Ticino and Toyoura Sands from Centrifuge Cone Penetration Tests", *Acta Geotechnica*, 11(4), 953–968.
- Huang, M., Tong, S., ve Shi, Z. (2021), "Solution For Spherical Cavity Expansion in State-Dependent Soils", *Acta Geotechnica*, 16(6), 1773–1788.
- Mo, P., Gao, X., Yang, W., ve Yu, H. (2020), "A Cavity Expansion–Based Solution for Interpretation of Cptu Data in Soils Under Partially Drained Conditions", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(7), 1053–1076.
- Suryasentana, S. K., ve Lehane, B. M. (2014), "Numerical Derivation of CPT-Based p-y Curves for Piles in Sand", *Geotechnique*, 64(3), 186–194.
- Suzuki, Y., ve Lehane, B. M. (2015), "Analysis of CPT End Resistance at Variable Penetration Rates Using the Spherical Cavity Expansion Method in Normally Consolidated Soils", *Computers and Geotechnics*, 69, 141–152.
- Wang, C., Zhou, H., Liu, H., ve Ding, X. (2022), "Analysis of Undrained Spherical Cavity Expansion in Modified Cam Clay of Finite Radial Extent", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(3), 952–963.
- Xu, X., ve Lehane, B. M. (2008), "Pile and Penetrometer End Bearing Resistance in Two-Layered Soil Profiles", *Géotechnique*, 58(3), 187–197.
- Yu, H.S. (2000), "Cavity Expansion Methods in Geomechanics", Springer Netherlands.

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$q_c$	Konik uç direnci	$p_{lim}$	Limit basınç
$I'_D$	Basınca bağlı sıklık indisi	$\varphi'$	Efektif içsel sürtünme açısı
$e$	Boşluk oranı	$e_c$	Kritik durum boşluk oranı
$e_d$	Maks. Yoğunlukta boşluk oranı		