

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısına Etkileri

S. Nilay KESKİN*

M. Arslan TEKİNSOY**

Soner UZUNDURUKAN***

ÖZ

Sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_0), relatif sıklık, gerilme tarihçesi, aşırı konsolidasyon oranı, plastisite indisi gibi zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, kil zeminlerde, düşey efektif gerilmenin ve aşırı konsolidasyon oranının, K_0 üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla 4 ayrı kil numunesi üzerinde ince cidarlı ödometre tekniği ile konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yükleme durumunda, çeşitli yük kademeleri için yatay gerilmenin ve K_0 ' ın değişimi gözlenmiştir. Normal ve aşırı konsolide zeminlerde sükunetteki toprak basıncı katsayısının tahmini için, bilinen ampirik ifadelerden elde edilen sonuçlarla, doğrudan ölçümler sonucunda bulunan değerler karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda; aşırı konsolidasyon oranının, özellikle boşaltma sırasındaki sükunetteki toprak basıncı katsayısını kontrol eden önemli bir faktör olduğu gösterilmiştir. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça, sükunetteki toprak basıncı katsayısı artmakta ve ön konsolidasyon basıncından sonraki düşey efektif gerilmeler için, K_0 sabit kalmaktadır.

ABSTRACT

The Effects of Over Consolidation Ratio and Effective Stresses to the Earth Pressure at Rest at Clay Soils

The coefficient of earth pressure at rest (K_0) changes depending on the relative density, stress history, overconsolidation ratio, plasticity index and similar soil properties. In this study, effect of vertical effective stress and overconsolidation ratio to the coefficient earth pressure at rest were investigated. For this purpose, consolidation tests with thin-walled oedometer technique were used on four different clay samples. Variations in the horizontal stress and coefficient of earth pressure at rest were recorded during loading stage.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 18.10.2002 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2004 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta - nilay@mmf.sdu.edu.tr

** Süleyman Demirel Üniversitesi, Tek. Eğ. Fakültesi, Isparta - tekinsoy@tef.sdu.edu.tr

*** Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta - uzers@mmf.sdu.edu.tr

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki...

Empirical equations which were given in the literature for estimation of K_0 of normally consolidated and overconsolidated soils were compared with values obtained from the tests. These results showed that, overconsolidation ratio is an important factor on K_0 for unloading stage. When overconsolidation ratio increased, the coefficient of earth pressure at rest is also increased. K_0 is almost stable for vertical effective pressures which is higher than preconsolidation pressure.

1. GİRİŞ

Birçok mühendislik yapısının tasarım ve projelendirme aşamasında, yanal toprak basınçlarının belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle istinat yapılarının ve derin temellerin boyutlandırılması için yanal toprak basınçlarının bilinmesi gerekmektedir. Sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_0), yatay yer değiştirmenin sıfır olduğu durumda, zemine tatbik edilen düşey gerilme altında meydana gelen, yatay gerilmenin, düşey gerilmeye oranı olarak Eşitlik 1 deki gibi tanımlanmaktadır [1].

$$\sigma_h = K * \sigma_v \quad (1)$$

Burada, σ_h , yanal toprak basıncını, σ_v , düşey toprak basıncını, K ise yanal toprak basıncı katsayısını gösterir. Zeminin elastik olduğu varsayımıyla, yanal asal deformasyonların sıfır olması durumunda ($\epsilon_2=\epsilon_3=0$), K_0 için aşağıdaki ifade verilebilmektedir[2].

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (2)$$

Burada, ν , poisson oranını gösterir.

Sükunetteki toprak basıncı katsayısı, laboratuvar ve arazide yapılan deneyler yardımıyla belirlenebilmektedir. Laboratuvar yöntemlerinde Bishop ringi bulunan üç eksenli basınç aleti ve strain gage gibi özel donanıma sahip ödometre deney ekipmanı kullanılmaktadır. Üç eksenli basınç düzeneğinde, yanal deformasyonların tam olarak kontrol edilememesi nedeniyle K_0 koşullarının sağlanması zordur. Ödometre düzeneğinde ise, arazi K_0 koşulları, oldukça iyi bir şekilde temsil edilebilmektedir.

Bu çalışmada, düşey gerilme altındaki kil zemin numunelerinde meydana gelen yatay gerilmeler doğrudan ölçülerek, sükunetteki toprak basıncı katsayısı belirlenmiş ve düşey gerilme ile aşırı konsolidasyon oranının, K_0 ' a etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Afyon ve Çorum illerine ait 4 adet örselenmemiş kil numunesi üzerinde, arazideki K_0 koşullarını oldukça iyi temsil eden, ince cidarlı ödometre tekniği kullanılarak, laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

2. KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Farklı zemin cinsleri için sükunetteki toprak basıncı katsayısının laboratuvar ve arazide yapılan deneyler sonucunda, belirlenebildiği birçok yöntem geliştirilmiştir. Sükunetteki toprak basıncının laboratuvar yöntemleriyle belirlenmesi, daha kolay olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Bishop ve Henkel tarafından verilen çalışmada, üç eksenli deney aletinde yapılan deneyler sonucunda sükunetteki toprak basıncı katsayısının, zemin cinsine, gerilme tarihçesine ve boşluk suyu basıncına bağlı olduğu ifade edilmiştir [3].

Hendron çalışmasında, yanal gerilmeye duyarlı metal bir ring üzerine monte edilen deformasyon ölçme aleti yardımıyla, yanal gerilmelerin ölçülebildiği bir ödometre kullanmıştır [4]. Daha sonra, bu çalışmanın verileri kullanılarak, sükunetteki toprak basıncı katsayısının, aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve plastisite indisine (I_p) bağlı olarak değişimi incelenmiştir [5].

Campanella ve Vaid, K_0 ' ın belirlenebildiği bir üç eksenli deney aleti geliştirmişler ve suya doymuş kil numuneleri için K_0 deneyleri yapmışlardır [6].

Sağlam, iri daneli zeminlerde, zeminin relatif sıkılığının (D_r), gerilme tarihçesinin, dane çapı ve şeklinin, sükunetteki toprak basıncı katsayısına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla geliştirilen özel bir ödometrede, havada kurutulmuş, dane çapları, dane şekilleri ve minerolojik bileşimleri birbirinden farklı dört cins kum üzerinde yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, normal yükleme durumunda, sükunetteki toprak basıncı katsayısının, esas olarak zeminin relatif sıkılığına bağlı olduğu belirtilmiştir. Gevşek kumlarda, yükleme süresince daha büyük yatay gerilmeler doğduğu, bu nedenle, elde edilen K_0 değerinin, sıkı kumlara nazaran daha büyük değerler aldığı vurgulanmıştır. Tekrar yüklenmiş zeminlerde, özellikle gevşek kumlarda, sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_{or}) değerinde önemli azalmalar görüldüğü, çok sıkı kenetlenmiş kumlarda ise yükleme ve tekrar yükleme aşamalarında K_0 değerinin yaklaşık olarak aynı değerleri aldığı ifade edilmiştir. Normal yükleme durumunda sükunetteki toprak basıncı katsayısını kontrol eden en önemli faktörlerden birisinin de deney başı boşluk oranı (e_0) olduğu belirtilmiştir [7].

Kil zeminler üzerinde yapılan bir diğer çalışmada, yatay gerilmeleri doğrudan ölçen bir deney düzeneğinden yararlanılmıştır. Düşey gerilme altında meydana gelen yatay gerilme ve K_0 değerlerindeki değişimler incelenmiştir. K_0 değerinin ön konsolidasyon basıncının üzerindeki düşey gerilmenin artan değerleriyle sabit kaldığı, boşaltma durumunda ise arttığı ifade edilmiştir [8].

K_0 deney tüpü ile yatay gerilmenin zamana bağlı davranışının incelendiği bir çalışmada, boşluk suyu basınçları, basınç transdüserleri yardımıyla ölçülmüştür. Yüksek su muhtevasına sahip turba zeminler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, yükleme sırasında yatay ve düşey efektif gerilmeler arasındaki ilişkinin hemen hemen lineer olduğu görülmüştür. Bu durum, tüm yükleme aşamalarında elde edilen K_0 değerlerinin sabit olmasından kaynaklanmaktadır [9].

Sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_0) değeri, gevşek kumlarda 0.60, sıkı kumlarda 0.35, normal konsolide killerde 0.50-0.60, aşırı konsolide killerde ise 1'den büyük değerler almaktadır [10].

Bedişkan'ın çalışmasında ince cıdarlı ödometre kullanılmış, K_0 ile AKO arasındaki ilişki, yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme durumları için araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara dayanarak, AKO arttıkça K_0 değerinin arttığı, K_0 ' ın yükleme durumunda boşaltma durumuna göre büyük değerler aldığını ifade edilmiştir. Ayrıca, yatay gerilmenin ve K_0 ' ın zamana bağlı değişimi incelenmiş, sabit düşey gerilme altında K_0 değerinin azaldığı belirtilmiştir [11].

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki...

Kayadelen çalışmasında, farklı endeks özelliklerine sahip kil numuneleri üzerinde, ince cidarlı ödometre tekniği kullanmıştır. Bu yöntemle ölçülen yatay basınçların, yükleme durumunda, ön konsolidasyon basıncına eşit düşey basınçtan sonra, doğrusal bir değişim gösterdiği ve buna bağlı olarak K_0 değerlerinin sabit kaldığı ifade edilmiştir [12].

Sükunetteki toprak basıncı katsayısı ve buna bağlı olarak yanıl toprak basınçları, arazide yapılan deneylerle de belirlenebilmektedir. Bu amaçla, toplam gerilme hücresi (glözt) yöntemi, presiometre yöntemi ve hidrolik kırılma yöntemi gibi arazi yöntemleri kullanılmaktadır [13].

Tavenas vd. çalışmalarında, yatay gerilmelerin ölçülebilmesi için yukarıda bahsedilen üç yöntemi kullanmışlar ve bu yöntemlerin kil zeminlerdeki geçerliliğini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda toplam gerilme hücreleri yönteminin, hem zeminde meydana gelen şekil değiştirmenin az oluşu, hem de sonuçlarının yorumlanmasının basitliği nedeniyle en kullanışlı arazi yöntemi olduğunu vurgulamışlardır. Hidrolik kırılma yönteminde zeminde meydana gelen örselenmelerden dolayı yanlış sonuçlar elde edilebileceğini, presiometre yönteminde ise sondaj çukurunun açılması sırasında oluşan gerilme boşalmasından dolayı, deney sonuçlarının şüpheli olduğunu belirtmişlerdir [14].

Beş ayrı sahada, toplam gerilme hücresi ve hidrolik kırılma yöntemleri kullanılarak, K_0 deneylerinin yapıldığı bir çalışmada, özellikle tabakalaşmış killerde toplam gerilme hücresi daha güvenilir sonuçlar vermiştir [15].

Ampirik ifadelerden yararlanılarak sükunetteki toprak basıncı katsayısının belirlenmesine, kaynaklarda sıkça rastlanılmaktadır. Normal konsolide zeminlerde, sükunetteki toprak basıncı katsayısının belirlenmesinde, aşağıdaki ifade yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (3)$$

Burada ϕ' , efektif içsel sürtünme açısını ifade etmektedir.

K_0' in belirlenmesinde kullanılan bir başka ifade Eşitlik 4' te verilmiştir [5].

$$K_0 = 0.95 - \sin \phi' \quad (4)$$

Bu eşitlik, eğimli zeminler için aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [17].

$$K_0 = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \beta'} \quad (5)$$

Burada β' , yer eğimini ifade etmektedir.

Kil zeminler için sükunetteki toprak basıncı katsayısı, plastisite indisine bağlı olarak, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7' de görüldüğü gibi verilmiştir [5].

$$K_0 = 0.4 + 0.007(I_p) \quad 0 < I_p < 40 \quad (6)$$

$$K_0 = 0.64 + 0.001(I_p) \quad 40 < I_p < 80 \quad (7)$$

Burada, I_p , zeminin plastisite indisidir.

Bir başka çalışmada, Kulhawy ve Mayne tarafından hazırlanan, 48 ayrı kil üzerinde K_0 ile aşırı konsolidasyon oranı (AKO) arasındaki ilişkinin araştırıldığı bir rapordan alınmış olan Eşitlik 8' e yer verilmiştir [18].

$$K_0 = (1 - \sin \phi') (AKO)^{\sin \phi'} \quad (8)$$

Burada, $\sin \phi'$ efektif içsel sürtünme açısını ifade etmektedir.

Alpan, normal konsolide zeminler için, aşağıdaki bağıntıyı önermiştir. Aşırı konsolide killerde ise sükunetteki toprak basıncı katsayısının, aşırı konsolidasyon oranının (AKO) bir fonksiyonu olduğunu belirtmiş, bunu Eşitlik 10 ve 11 ile göstermiştir [19].

$$K_0 = 0.15 + 0.233 \log (I_p) \quad (9)$$

$$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^n \quad (10)$$

$$n = 0.54 * 10^{-I_p / 281} \quad (11)$$

Aşırı konsolide killerde K_0 'ın belirlenebilmesi için verilen bir başka bağıntı,

$$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * \sqrt{AKO} \quad (12)$$

şeklinde [5]. Burada, $K_{0(NK)}$, normal konsolide bir zeminde, Eşitlik 6 veya 7 yardımıyla belirlenen sükunetteki toprak basıncı katsayısıdır. Buna ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak, aşırı konsolide bir zemin için sükunetteki toprak basıncı katsayısı ($K_{0(AKO)}$) belirlenebilir.

Kohezyonsuz zeminler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, sükunetteki toprak basıncı katsayısı için, Eşitlik 13 verilmiştir [7].

$$K_0 = 0.97 * (1 - 0.94 \sin \phi') \quad (13)$$

Mayne ve Kulhawy, farklı araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar sonucunda elde edilen verileri incelemişler ve boşaltma durumunda, zeminlerde, sükunetteki toprak basıncı katsayısı ($K_{0(bosaltma)}$) ile aşırı konsolidasyon oranı (AKO) arasındaki ilişkiyi, aşağıdaki eşitlikle vermişlerdir [20].

$$K_{0(bosaltma)} = K_{0(NK)} * (AKO)^{\alpha'} \quad (14)$$

Burada, α' , $\log K_{0(bosaltma)}$ ile $\log(AKO)$ arasındaki ilişkiyi gösteren doğrunun eğimidir.

$$\alpha' = \frac{\log(K_{0(bosaltma)}) - \log(K_{0(NK)})}{\log(AKO)} \quad (15)$$

Çeşitli kaynaklardan alınmış 171 adet veri üzerinde yapılan istatistiksel çalışma sonucunda α' değerinin aşağıdaki şekilde belirlenebileceği tespit edilmiştir [20].

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki...

$$\alpha' = 0.929 - 0.852 * K_{0(NK)} \quad (16)$$

Aynı araştırmacılar bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak hem kum hem de kildeki K_0 değerinin tahmini için Eşitlik 17' de verilen genel bir ampirik ifadeyi önermişlerdir [21].

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \left[\frac{AKO}{AKO_{\max}^{(1 - \sin \phi')}} + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{AKO}{AKO_{\max}} \right) \right] \quad (17)$$

Burada, AKO, mevcut aşırı konsolidasyon oranını, AKO_{\max} , maksimum aşırı konsolidasyon oranını, ϕ' , efektif içsel sürtünme açısını ifade etmektedir.

Cherubine vd. tarafından yapılan çalışmada, doğal su muhtevaları (w) %25-%29, plastisite indisi (I_p) %30-%40 arasında değişen örselenmemiş aşırı konsolide killer üzerinde, laboratuvarında yaptıkları özel ödometre deneyleri sonucunda ölçülen K_0 değerlerinin Eşitlik 16' dan hesaplanan değerlerle hemen hemen aynı sonuçları verdiği bildirilmiştir [22].

Tekinsoy tarafından bu konuda yapılan farklı çalışmalarda, sükunetteki toprak basıncı katsayısının belirlenmesinde hem normal, hem de aşırı konsolide zeminler için, teorik ve iteratif bir yöntem verilmiştir. Bu yöntemde ödometre deneyinde yanal basınçların belirlenebilmesi hedeflenmiş, bu amaçla K_0 koşulu altındaki bir zeminde kayma gerilmelerindeki değişimler ve deformasyonlar incelenmiştir. Elde edilen bulgulara dayanılarak, yanal toprak basınçlarının hesaplanabildiği genel bir hesaplama yöntemi sunulmuş, yöntemde K_0 ' ın ilk yaklaşık değeri için kullanılan eşitlik aşağıdaki şekilde verilmiştir [23, 24].

$$K_0 = 1 \pm \frac{\alpha}{(2 - \varepsilon_1)^2} \quad (18)$$

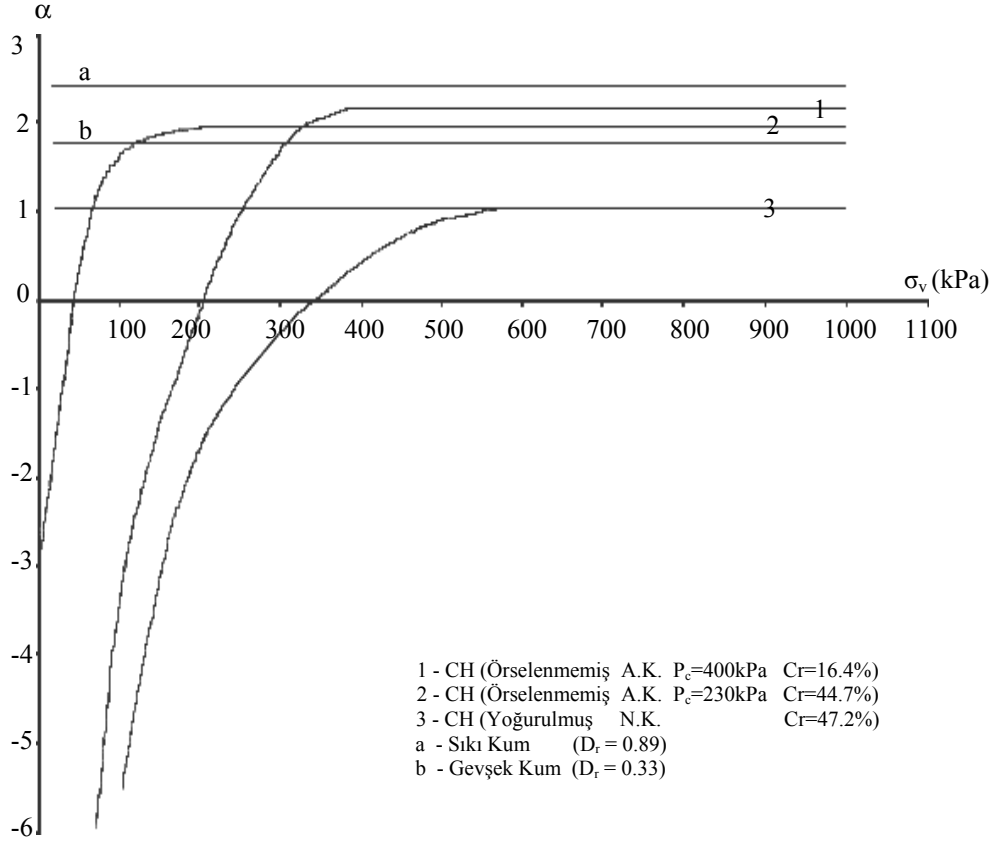
Burada, ε_1 , ödometre hücresi içindeki zeminde meydana gelen hacimsel deformasyon, α ise yükleme durumuna ve likitlik indisine (C_r) bağlı katsayıdır. Bu katsayı düşey efektif gerilme (σ_v) ile ilişkili olup, Şekil 1' de gösterilmiştir.

3. İNCELENEN ZEMİN NUMUNELERİNİN ÖZELLİKLERİ

Çalışmada kullanılan numunelerin endeks özellikleri belirlenmiş ve Çizelge 1' de verilmiştir.

4. DENEY SİSTEMİNİN TANITIMI

İnce cidarlı ödometre deney düzeneğinin ana parçası, özel imal edilmiş, standart çapta ödometre ringinden oluşmaktadır. Bu yöntemde, zemin numunesinde oluşan yatay gerilmeler, ringin gövdesine yapıştırılmış strain gage'ler vasıtasıyla, deformasyon ölçerlerden okunan, deformasyon değerlerinden belirlenmektedir.



Şekil1. α ile σ_v arasındaki ilişki [23]

İnce cidarlı ödometre ringi, 63.5 mm iç çapında, 63 mm yüksekliğinde, 0.35 mm kalınlığında, silindir şeklinde yüksek alaşımlı çelik malzemeden imal edilmiştir. Ringin üst yakası 140 mm çapında olup, üzerinde 6 delik bulunmaktadır. Bunlardan 3 tanesi 6 mm çapındadır ve strain gage'lerin bağlı olduğu kabloların geçmesini sağlamaktadır. Diğer 3 tanesi ise 7 mm çapındadır ve ödometre hücresi içerisinde yer alan vidalara aittir.

Ringin dış orta yüzeyinde, 120 ohm'luk dirence sahip, dört tane strain gage, Wheaston köprüsü oluşturacak şekilde, 90°'lik açılarla karşılıklı olarak monte edilmiştir. İnce cidarlı ringin orta yüzeyine yapıştırılmış strain gage'lerden iki tanesi, yatay düzleme paralel ve diğer ikisi bunlara dik konumda bulunmaktadır. Yatay düzleme paralel olarak yerleştirilen strain gage'ler, zemin numunesi yüklendikten sonra aktif olarak çalışmaktadır. Diğer iki strain gage, deney sırasında sıcaklıktan dolayı meydana gelebilecek deformasyonları dengelemektedir. Strain gage'lerde meydana gelen direnç değişimleri, deformasyon ölçerden okunmuştur. Ringin kalibrasyonu, deneylerden önce, üç eksenli basınç aletinde, ring içerisinde artan miktarlarda basınçlı su verilerek yapılmıştır. Bu basınç değerlerine karşılık gelen deformasyon miktarları ölçülerek, kalibrasyon faktörü (k) 1.99 olarak bulunmuştur [13].

Çizelge 1. Numunelerin endeks özellikleri ve efektif kayma parametreleri

Numunelerin Endeks Özellikleri	Numune I	Numune II	Numune III	Numune IV
Numunenin Alındığı Derinlik (H) (m)	16.00	7.00	13.00	7..50
Doğal Su İçeriği (w) (%)	30	35	21	56
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s) (gr/cm^3)	2.54	2.62	2.68	2.65
Likit Limit (w_L) (%)	51	78	60	98
Plastik Limit (w_p) (%)	24	21	28	29
Plastisite İndisi (I_p) (%)	27	57	32	69
Çakıl (%)	-	-	-	-
Kum (%)	31	16	25	9
Silt + Kil (%)	69	84	75	91
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH	CH
Efektif İçsel Sürtünme Açısı (ϕ')	28 ⁰	19 ⁰	20 ⁰	14 ⁰
Efektif Kohezyon (c') (kPa)	7	30	18	12

Deneylerde, tüplerden çıkartılan örselenmemiş zemin numuneleri ince cidarlı ödometre ringine yerleştirilerek, yükleme düzeneğine konulmuştur. Numuneler 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa düşey gerilme (σ_v) kademelerinde yüklenmiş ve daha sonra boşaltma aşamasına geçilmiştir. Her yük kademesinde oturmalar tamamlanana kadar beklenilmiş, daha sonra deformasyon ölçerler yardımıyla yatay gerilme (σ_h) değerleri belirlenmiş ve sonraki yük kademesine geçilmiştir.

5. BULGULAR

Çalışmada, deney düzeneğinin ince cidarlarına yerleştirilmiş strain gage'ler vasıtasıyla deformasyon ölçerden, yatay gerilmeler (σ_h), doğrudan ölçülerek sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_o) değerleri belirlenmiştir. Tüm numuneler için, ölçülen yatay gerilmenin (σ_h) ve sükunetteki toprak basıncı katsayısının (K_o), düşey gerilmeye (σ_v) göre değişimi ve K_o ile aşırı konsolidasyon oranı (AKO) arasındaki ilişki, yükleme-boşaltma durumları için incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, sükunetteki toprak basıncı katsayısının aşırı konsolidasyon oranına göre değişimi Çizelge 2' de verilmiştir. Farklı düşey gerilme değerleri için, ölçülen yatay gerilme değişimleri Şekil 2' de; farklı düşey gerilme değerlerindeki sükunetteki toprak basıncı katsayısının değişimi ise Şekil 3' te Numune I için verilmiştir. Yükleme sırasında, ön yük değeri aşıldıktan sonra, değişimin sabitlendiği görülmektedir.

Çizelge 2. İnce cidarlı ödometre deneyleri sonucunda elde edilen K_0 değerlerinin AKO' na bağlı değişimi

Numune I						Numune II					
Deney Başı			Deney Sonu			Deney Başı			Deney Sonu		
W (%)	E	H (mm)	w (%)	e	H (mm)	w (%)	e	H (mm)	w (%)	e	H (mm)
30	0.74	63.00	21	0.53	55.50	35	0.99	63.00	33	0.87	59.2
AKO		σ_v (kPa)	Σ_{h_0} (kPa)		K_0	AKO		σ_v (kPa)	σ_{h_0} (kPa)		K_0
2.4		50	66		1.320	4.60		50	94.62		1.892
1.2		100	51		0.510	2.30		100	104.88		1.049
NK		200	88		0.440	1.15		200	133.48		0.667
NK		400	168		0.420	NK		400	214.23		0.536
NK		800	341		0.426	NK		800	423.23		0.529
2		400	256		0.640	2		400	308.28		0.771
4		200	196		0.980	4		200	230.85		1.154
8		100	140		1.400	8		100	160.55		1.606
16		50	101		2.020	16		50	116.38		2.328
Numune III						Numune IV					
Deney Başı			Deney Sonu			Deney Başı			Deney Sonu		
W (%)	E	H (mm)	w (%)	e	H (mm)	w (%)	e	H (mm)	w (%)	e	H (mm)
21	0.62	63.00	20	0.54	60.00	56	1.33	63.00	32	0.85	49.95
AKO		σ_v (kPa)	Σ_{h_0} (kPa)		K_0	AKO		σ_v (kPa)	σ_{h_0} (kPa)		K_0
2.80		50	64.20		1.284	2.8		50	58.43		1.169
1.40		100	70.40		0.704	1.4		100	81.70		0.817
NK		200	102.40		0.512	NK		200	144.88		0.724
NK		400	201.00		0.503	NK		400	294.50		0.736
NK		800	394.00		0.493	NK		800	570.48		0.713
2		400	303.80		0.760	2		400	418.48		1.046
4		200	216.20		1.081	4		200	304.95		1.525
8		100	163.40		1.634	8		100	203.30		2.033
-		-	-		-	16		50	127.30		2.546

w – Su muhtevası (%)

e – Boşluk oranı

H – Numune yüksekliği (mm)

σ_v – Uygulanan düşey gerilme (kPa)

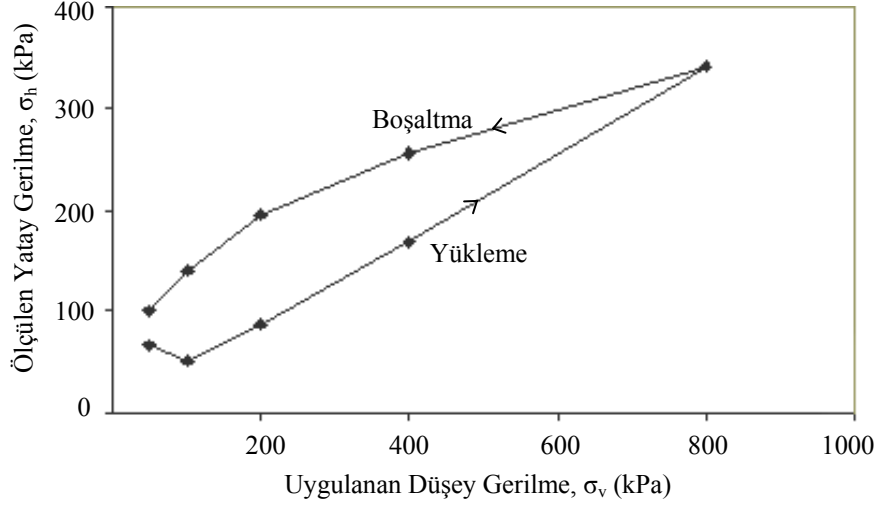
σ_{h_0} – Ölçülen yatay gerilme (kPa)

K_0 – Sükunetteki toprak basıncı katsayısı

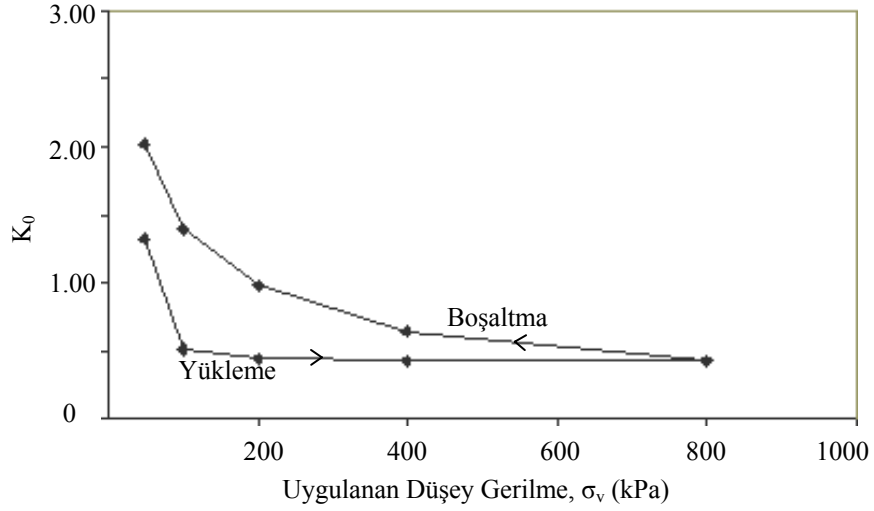
AKO – Aşırı Konsolidasyon Oranı

NK – Normal Konsolide

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki...

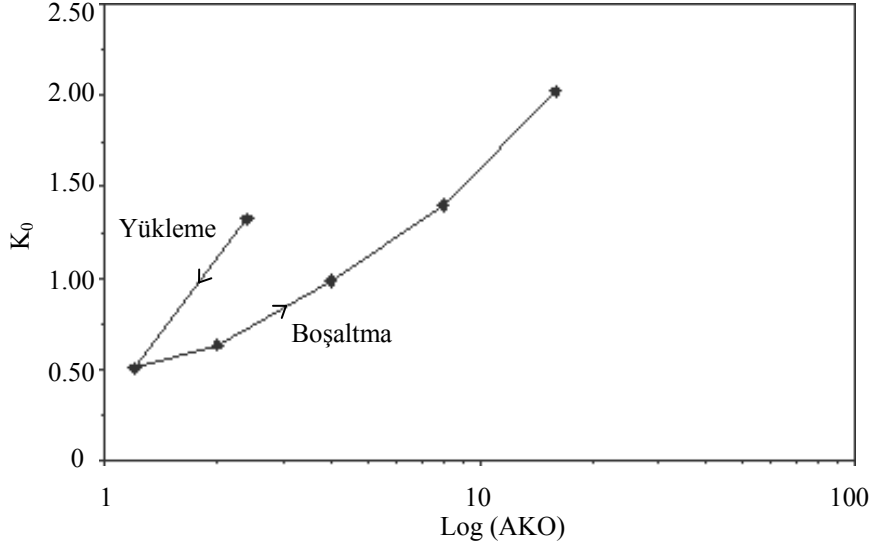


Şekil 2. Numune I için farklı düşey gerilme (σ_v) değerlerinde ölçülen yatay gerilme (σ_h) değişimi



Şekil 3. Numune I için uygulanan düşey gerilmeye (σ_v) göre sükunetteki toprak basıncı katsayısının (K_0) değişimi

Şekil 4' te ise sükunetteki toprak basıncı katsayısının, aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. Numune I için sükunetteki toprak basıncı katsayısının (K_0), aşırı konsolidasyon oranına (AKO) göre değişimi

Diğer numuneler için de benzer ilişkiler elde edilmiş, ancak burada örnek olması açısından sadece Numune I için elde edilen sonuçlar grafik olarak sunulmuştur. Normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde, sükunetteki toprak basıncı katsayısının belirlenmesi için verilen ampirik eşitliklerden elde edilen K_0 değerleri ile yapılan deneylerin sonucunda belirlenen K_0 değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, normal konsolide durum için Çizelge 3’te, aşırı konsolide durum için Çizelge 4 ve 5’te gösterilmiştir. Aşırı konsolide zeminler için sükunetteki toprak basıncı katsayısının hesaplanmasında kullanılan Eşitlik 8 ile Eşitlik 17’de aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle Çizelge 4 ve 5’te Eşitlik 8 ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 3. Normal konsolide durum için deneysel K_0 değerleri ampirik ifadelerden belirlenen K_0 değerlerinin karşılaştırılması

	Numune I	Numune II	Numune III	Numune IV
Efektif içsel sürtünme açısı, ϕ^t , (derece)	28	19	20	14
Plastisite indisi, I_p (%)	27	57	32	69
$K_0 = 1 - \sin \phi^t$ [16]	0.531	0.674	0.658	0.758
$K_0 = 0.95 - \sin \phi^t$ [5]	0.481	0.624	0.608	0.708
$K_0 = 0.4 + 0.007 * (I_p)$ [5]	0.589	0.697	0.624	0.709
$K_0 = 0.64 + 0.001 * (I_p)$ [5]				
$K_0 = 0.19 + 0.2333 * \text{Log}(I_p)$ [19]	0.524	0.600	0.541	0.619
İteratif K_0 Yaklaşımı [23, 24]	0.426	0.548	0.518	0.715
Ölçülen yatay gerilmelerden belirlenen K_0	0.429	0.533	0.502	0.724

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki...

Çizelge 4. Aşırı konsolide durum için deneylerden belirlenen K_0 değerleri ile ampirik ifadelerden belirlenen K_0 değerlerinin karşılaştırılması (Numune I ve Numune II)

		0429						
		27						
Sükunetteki top. bas. katsayısı, $K_{0(nk)}$		2.4	1.2	2	4	8	16	
Numune I	Plastisite indisi, I_p (%)							
	AKO	2.4	1.2	2	4	8	16	
	$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^{1/2}$ [5]	Yükleme	0.665	0.470	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	0.607	0.858	1.213	1.716
	$K_0 = (1 - \sin \phi') (AKO)^{\sin \phi'}$ [18]	Yükleme	0.8	0.58	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	0.735	1.018	1.408	1.95
	$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^n$ $n = 0.54 * 10^{-I_p / 281}$ [19]	Yükleme	0.627	0.464	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	0.579	0.782	1.055	1.424
	İteratif K_0 Yaklaşımı [23, 24]	Yükleme	1.317	0.511	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	-	-	-	-
Ölçülen yatay gerilmelerden belirlenen K_0	Yükleme	1.320	0.510	-	-	-	-	
	Boşaltma	-	-	0.640	0.980	1.400	2.020	
Sükunetteki top. bas. katsayısı, $K_{0(nk)}$		0.533						
Plastisite indisi, I_p (%)		57						
AKO		4.6	2.3	1.15	2	4	8	16
$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^{1/2}$ [5]	Yükleme	1.143	0.808	0.572	-	-	-	-
	Boşaltma	-	-	-	0.754	1.066	1.508	2.132
$K_0 = (1 - \sin \phi') (AKO)^{\sin \phi'}$ [18]	Yükleme	1.108	0.885	0.706	-	-	-	-
	Boşaltma	-	-	-	0.845	1.059	1.327	1.663
$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^n$ $n = 0.54 * 10^{-I_p / 281}$ [19]	Yükleme	0.893	0.707	0.559	-	-	-	-
	Boşaltma	-	-	-	0.674	0.852	1.077	1.362
İteratif K_0 Yaklaşımı [23, 24]	Yükleme	1.862	1.085	0.646	-	-	-	-
	Boşaltma	-	-	-	-	-	-	-
Ölçülen yatay gerilmelerden belirlenen K_0	Yükleme	1.892	1.049	0.667	-	-	-	-
	Boşaltma	-	-	-	0.771	1.154	1.606	2.328

Çizelge 5. Aşırı konsolide durum için deneylerden belirlenen K_0 değerleri ile ampirik ifadelerden belirlenen K_0 değerlerinin karşılaştırılması (Numune III ve Numune IV)

Numune III	Sükunetteki top. bas. katsayısı, $K_{0(nk)}$		0.502					
	Plastisite indisi, I_p (%)		32					
	AKO		2.8	1.4	2	4	8	
	$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^{1/2}$ [5]	Yükleme	0.840	0.594	-	-	-	
		Boşaltma	-	-	0.710	1.004	1.420	
	$K_0 = (1 - \sin \phi') (AKO)^{\sin \phi'}$ [18]	Yükleme	0.936	0.715	-	-	-	
		Boşaltma	-	-	0.809	1.057	1.339	
	$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^n$ $n = 0.54 * 10^{-I_p / 281}$ [19]	Yükleme	0.767	0.577	-	-	-	
		Boşaltma	-	-	0.668	0.889	1.183	
	İteratif K_0 Yaklaşımı [23, 24]	Yükleme	1.336	0.707	-	-	-	
Boşaltma		-	-	-	-	-		
Ölçülen yatay gerilmelerden belirlenen K_0	Yükleme	1.284	0.704	-	-	-		
	Boşaltma	-	-	0.760	1.081	1.634		
Numune IV	Sükunetteki top. bas. katsayısı, $K_{0(nk)}$		0.720					
	Plastisite indisi, I_p (%)		69					
	AKO		2.8	1.4	2	4	8	16
	$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^{1/2}$ [5]	Yükleme	1.205	0.582	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	1.018	1.440	2.036	2.880
	$K_0 = (1 - \sin \phi') (AKO)^{\sin \phi'}$ [18]	Yükleme	0.973	0.882	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	0.896	1.06	1.254	1.483
	$K_{0(AKO)} = K_{0(NK)} * AKO^n$ $n = 0.54 * 10^{-I_p / 281}$ [19]	Yükleme	0.987	0.798	-	-	-	-
		Boşaltma	-	-	0.891	1.102	1.363	1.686
	İteratif K_0 Yaklaşımı [23, 24]	Yükleme	1.192	0.816	-	-	-	-
Boşaltma		-	-	-	-	-	-	
Ölçülen yatay gerilmelerden belirlenen K_0	Yükleme	1.169	0.817	-	-	-	-	
	Boşaltma	-	-	1.050	1.520	2.030	2.550	

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada; ince daneli zeminlerde, düşey efektif gerilmenin (σ_v) ve aşırı konsolidasyon oranının (AKO), sükunetteki toprak basıncı katsayısına (K_o) etkisi, deneysel olarak araştırılmıştır. İnce cidarlı ödometre tekniği ile doğrudan ölçülen yatay gerilmelerden belirlenen K_o değerleri ve ampirik bağıntılardan elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, örselenmemiş kil zemin numuneleri üzerinde, ince cidarlı ödometre tekniği ile deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen bulgular değerlendirilerek, aşağıda belirtilen sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Yükleme durumunda, düşey gerilme değerleri, ön konsolidasyon basıncını aştığında; yatay gerilmeler, düşey gerilmeye göre lineer bir değişim göstermekte ve bu durum ön konsolidasyon basıncından sonraki düşey gerilmeler için, K_o değerinin sabit kalmasına neden olmaktadır.
2. Bu çalışmada kullanılan kil zemin numuneleri için ölçülen yatay gerilmelerden hesaplanan K_o değerleri, bilinen ampirik eşitliklerden hesaplanan K_o değerlerine göre, normal konsolide durumlar için genellikle daha büyük, aşırı konsolide durumlar için ise, daha küçük çıkmaktadır. Aşırı konsolide zeminlerde AKO' nun küçük değerleri için hesaplanan K_o değerleri, deney sonuçlarına daha fazla yaklaşmıştır. Yükleme durumunda deneysel değerlere en yakın sonuçların, Tekinsoy (1999) yaklaşımından elde edilebildiği gözlenmiştir.
3. Boşaltma aşamasında, yatay gerilmeler, düşey gerilmelere göre daha yavaş azalmaktadır. Bu durum K_o değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle boşaltma devresindeki sükunetteki toprak basıncı katsayısı, aşırı konsolidasyon oranından büyük ölçüde etkilenmektedir. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça, sükunetteki toprak basıncı artmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, deneylerin bir kısmının yapılmasında destek veren, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı yetkililerine teşekkür ederler.

SEMBOLLER

AKO	Aşırı konsolidasyon oranı
C_r	Likitlik indisi
D_r	Relatif sıklık
e	Boşluk oranı
H	Numune yüksekliği
I_p	Plastisite indisi
K_o	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
$K_{o(AKO)}$	Aşırı konsolide zeminlerde sükunetteki toprak basıncı katsayısı
$K_{o(NK)}$	Normal konsolide zeminlerde sükunetteki toprak basıncı katsayısı
K_{or}	Tekrar yüklenmiş zeminlerde sükunetteki toprak basıncı katsayısı
$K_{o(boşaltma)}$	Boşaltma durumunda sükunetteki toprak basıncı katsayısı
NK	Normal konsolide durum
P_c	Ön konsolidasyon basıncı

w	Doğal su muhtevası
w_L	Likit limit
w_p	Plastik limit
n, α	(AKO) üstel terimi
α	Yükleme durumuna ve likitlik indisine bağlı katsayı
β'	Yer eğimi
σ_v	Düşey gerilme
σ_h	Yatay gerilme
σ_{h0}	Ölçülen yatay gerilme
ϕ'	Efektif kayma mukavemeti açısı
ϵ_l	Ödometre hücresi içindeki zeminde meydana gelen hacimsel deformasyon

Kaynaklar

- [1] Donath, A.D., Untersuchungen Veber den Erddruck auf Stuetzwaende. Zeitschrift Fuer Bauwesen., 1891.
- [2] Lambe, W., Whitman, R.V., Soil Mechanics, John Wiley&Sons, New York, 1969.
- [3] Bishop, A.W., Henkel, D.J., The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test., Arnold Publishing Company, London, 1962.
- [4] Hendron, A.J., The Behaviour of Sand in One Dimensional Compression, Ph.D.Thesis, University of Illinois, 1963.
- [5] Brooker, E.W., Ireland, H.O., Earth Pressures at Rest Related to the Stress History. Canadian Geotechnical Journal, Vol.2, 1-15, 1965.
- [6] Campanella, R., Vaid, Y., A Simple K_0 Triaxial Cell. Canadian Geotechnical Journal, Vol.9, No.3, 249-260, 1972.
- [7] Sağlamer, A., Kohezyonsuz Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Zemin Parametreleri Cinsinden İfadesi, İTÜ, Doktora Tezi, İstanbul, 1972.
- [8] Abdelhamid, M.S., Krizek, R.J., At Rest Lateral Earth Pressure of a Consolidation Clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.102, No.GT7, 721-738, 1976.
- [9] Edil T.B., Dhowian, A.W., At-Rest Lateral Pressure of Peat Soils. Journal of Geotechnical Engineering Divison, ASCE, Vol.107, 201-220, 1981.
- [10] Craig, R.F., Soil Mechanics, Chapman & Hall, London 1994.
- [11] Bedişkan, E., Effects of Overconsolidation Ratio on Coefficient of Lateral Earth Pressure At-Rest., METU, M.S.in Civil Engineering, 1993.
- [12] Kayadelen, C., K_0 Koşullarında Yanal Zemin Basınçlarının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2001.
- [13] Basmacı, E., Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının belirlenmesi ve Bazı Zemin Özellikleri ile İlişkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2002.
- [14] Tavenas, F.A., Blanchette G., Leroueil, S. Roy, M., Larochell P., In-situ Determination of K_0 in Soft Sensitive Clays, Proceedings In-situ Measurement of Soil Properties. Vol.1, 450-476, 1975.
- [15] Massarsch, K.R., Holtz, R.D., Holm, B., Measurement of Horizontal In-Situ Stresses, Proceedings Insitu Measurement of Soil Properties, Vol.1, 266 - 286, 1975

Aşırı Konsolidasyon Oranının ve Efektif Gerilmelerin Kil Zeminlerdeki Sükunetteki...

- [16] Jacky, J., The Coefficient of Earth Pressure at Rest, Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, 355-358, 1944.
- [17] Kezdi, A., Stability of Rigid Structures, Proc.5 ECSMFE, Vol.2, 105-130, 1972.
- [18] Mitchel, J.K., Fundamentals of Soil Behavior. 2nd Ed, John Wiley&Sons, 1993.
- [19] Alpan, I., The Empirical Evaluation of the Coefficient K_0 and K_{or} , Soils and Foundations, Vol.7, No.1, 31-40, 1967.
- [20] Mayne, P.W., Kulhawy F.H., K_0 -OCR Relationship in Soil, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.108, 851-872, 1982.
- [21] Das, B.M., Principles of Foundation Engineering. 4th Ed, Brooks Cole, 1998.
- [22] Cherubine, C., Giasi, C.I., and Guadagno, F.M., The Coefficient of Earth Pressure at rest. Can. Geotech, Vol.31, 790-791, 1994
- [23] Tekinsoy, M.A., An Approximation to Lateral Earth Pressures for K_0 Condition, Journal of Engineering Sciences, Vol.5, No.1, 933-942, Pamukkale University Engineering Faculty, Denizli, 1999.
- [24] Tekinsoy, M.A., Laman, M., Elastik Zemin Problemleri, SDU Yayınları No 6, Isparta, 2000.