

Zeminlerin yanal şişme basıncının belirlenmesi

Hüsnü Korhan ÖZALP*, Ahmet SAĞLAMER

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Şişen zeminler, ıslandıkları zaman hacimlerini arttıran zeminler olarak tanımlanırlar. Şişen zemin tabakaları üzerine veya içerisine inşa edilen yapılarda, zemin tabakalarının su muhtevastındaki değişime bağlı olarak gelişen şişme davranışı etkisinde büyük problemler ile karşılaşıldığı bilinmektedir. Şişme basıncına yönelik araştırmalarda genel olarak düşey yönde etkiyen şişme basıncı araştırılmıştır. Oysaki şişen zeminler, hacimlerini düşey ve yatay yönde şişerek genişletirler. Yanal şişme basıncının belirlenmesinin kaçınılmaz hale gelmesi, üç eksenli şişme basıncı deneylerinin gelişimini beraberinde getirmiştir. Bu çalışmanın çıkış noktası, şişme basıncının zemin içerisinde derinlikle değişimi ve zemini destekleyen yapısal kaplama rijitliği ile değişiminin araştırılması olmuştur. Bu amaçla, daha önce yapılan bazı araştırmalarda kullanılan ince cidarlı ödometre üzerinde modifikasyonlar yapılmış, bu çalışma için, şişme basıncı ölçen, inceltilmiş ödometre halkasına sahip düzzenek yeniden üretilmiştir. Ödometre halkasının etrafına eklenen basınç hücresi sayesinde, numunenin yanal şişmesi engellenerek, sabit hacimde şişme basıncı deneyleri yapılabilmektedir. Buna ilave olarak, inceltilmiş çelik halkaya yerleştirilen üç adet deformasyon ölçer (strain gauge) çeyrek köprü devresi ile bağlanmış ve her biri bağımsız bir indikatör olarak görev yapabilir hale getirilmiş ve numunenin yatay eksenindeki anizotropik şişme davranışı incelenebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yanal şişme basıncı, ince cidarlı ödometre halkası.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hüsnü Korhan ÖZALP. hkozalp@gmail.com; Tel: +90 (533) 744 79 51.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Yanal şişme basıncının belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 23.03.2011 tarihinde dergiye ulaşmış, 23.05.2011 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 29.02.2012 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Özalp, H.K., Sağlamer, A., (2011) 'Zeminlerin yanal şişme basıncının belirlenmesi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 4, 163-173" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Determination of lateral swelling pressure

Extended abstract

Expansive soils can be defined as soils that under some conditions are capable of increasing its volume when inundated. It is well known that structures placed over or in expansive soils face problems due to soil heave upon the change of the soil moisture.

The primary aspect of research on swelling has always been to predict the swelling behavior of the expansive soils in the vertical direction. Nevertheless, expansive soils change their volumes in lateral direction as well as in the vertical direction.

By restraining the lateral volume change tendency of soils with the construction of a retaining wall or a tunnel lining, the restraining element is being employed with responding the large swell pressures. This additional lateral pressure caused by swelling is being missed in most of the cases during the lateral earth pressure calculations. To predict lateral swelling pressure in a sensitive way has forced the establishment of triaxial swelling pressure tests.

Adequate and correct prediction of lateral swelling pressure is important in that the lateral restraint elements like a retaining wall or tunnel facing can be designed to withstand the earth pressures to act on them in the reality.

One of the well known methods for measuring the lateral swelling pressure is the use of a thin wall oedometer which was first introduced by Komornik & Zeitlen, (1965) and then also developed by several investigators.

The objective of this study was to investigate the rate of lateral swelling pressures expected to act on retaining systems of deep excavations and tunnels in expansive soils. The variation of swelling pressures dependent on depth and the rigidity of the facing element were investigated.

The Lateral Swell Pressure Ring has been redesigned for this study. The ring height has been increased and a pressure cell has been added to the device. Different than the similar device of Ofer (1981), the cell pressure restraining the specimen in lateral direction was hydraulic pressure rather than air pressure. The pressure cell, surrounding the thin

walled ring gave the ability to predict the lateral swelling pressures under zero lateral strain conditions. Moreover, three strain gauges have been mounted on the ring, each configured as a quarter bridge, to monitor the non-homogenous behavior of the specimen in the horizontal plane.

Several swelling tests have been performed on compacted samples that have been prepared in the laboratory, under similar conditions and using the same clayey soil. The subject of this study was to present a method on the determination of lateral swelling pressure, and the variation of the swelling pressure due to the variation of the initial moisture content is not a matter of subject in this study. For this reason, the initial water content of the samples has been kept constant in the tests.

Various test types have been utilized in order to obtain comprehensive lateral swelling pressures. The results are compared with swell pressures obtained in these tests in vertical direction as well as with the triaxial swelling pressure test results of previous studies.

First, a series of tests have been made in accordance with the methodology of the previous studies using the thin walled lateral swelling pressure ring. So, by comparing the results obtained from these tests with the results of the tests of other researchers, the reliability of the test set up has been validated. Then, the contribution of the pressure cell, added to the recently designed testing device has been investigated.

Swelling pressure tests under cell pressure have resulted with slight higher swelling pressures as expected. The test results have also revealed that a strain induced automatic cell pressure triggering is necessary for greater accuracy for lateral swelling pressure prediction under zero lateral strain conditions.

For the case that automatic cell pressure triggering is not present, as in this study, the adjustment of a testing technique like "The Method of Equilibrium (Fourie, 1989)", will avoid side effects of possible failures due to strain based pressure relief.

Keywords: *Lateral Swelling Pressure, thin walled oedometer.*

Giriş

Şişen zeminler, ıslandıkları zaman hacimlerini arttıran zeminler olarak tanımlanırlar.

Şişme basıncına yönelik araştırmalarda genel olarak şişme potansiyeline sahip zemin tabaklarından düşey yönde etkiyen şişme basıncı araştırılmıştır. Oysaki şişen zeminler, hacimlerini düşey ve yatay yönde şişerek genişletirler.

En çok bilinen yanal şişme basıncı ölçme yöntemlerinden bir tanesi, ilk olarak Komormik ve Zeitlen (1965) tarafından geliştirilen ince cidarlı ödometre halkası kullanılarak yapılan üç eksenli şişme basıncı deneyleridir.

Bu çalışmanın çıkış noktası, derin temel kazılarının yapılabilmesi için inşa edilen iksa sistemlerine veya tünellere etkiyen şişme basıncının araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında, şişme basıncının derinlikle değişimi ve kaplama rijitliği ile değişimi araştırılmıştır.

Bu çalışma için, şişme basıncı ölçen, inceltilmiş ödometre halkasına sahip cihaz geliştirilmiş ve yeniden üretilmiştir. Ofer (1981) tarafından geliştirilen cihazdan farklı olarak basınç hücresinde hava basıncı yerine hidrolik basınç kullanılmıştır. Ödometre halkasının etrafına eklenen basınç hücresi sayesinde, numunenin yanal şişmesi engellenerek, sabit hacimde şişme basıncının ölçülmesi mümkün hale gelmiştir. Buna ilave olarak, inceltilmiş çelik halkaya yerleştirilen üç adet strain gauge (deformasyon ölçer) çeyrek köprü devresi ile bağlanmış ve her bir strain gauge bağımsız ölçü alabilir duruma getirilmiştir.

Geliştirilen ekipman ile kompakte edilmiş kil numuneleri üzerinde çok sayıda deney yapılmış ve birden fazla test yöntemi izlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan testlerden elde edilen sonuçlar, hem kendi içinde hem de önceki çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

İlk olarak, önceki çalışmalarda izlenen yöntem takip edilmiş ve yapılan testlerden elde edilen şişme basıncı dağılımları, diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlar ile birlikte ele alınarak, ge-

liştirilen ve bu çalışma için üretilen aletin güvenilirliği doğrulanmıştır. Çalışmanın devamında, yapılan şişme basıncı deneyleri ile inceltilmiş ödometre ringine eklenen basınç hücresinin katkısı incelenmiştir.

Çeşitli yöntemler izlenerek yapılan şişme basıncı deneylerinin sonucunda, hücre basıncını otomatik olarak tetikleyen bir ekipmanın gerçek anlamda sabit hacimli şişme basıncı deneyi yapmak için kaçınılmaz bir zorunluluk olduğu görülmüştür. Otomatik tetiklemeyle sahip bir test cihazı olmadığı, bu çalışma kapsamında kullanılana benzer ekipmanlarla yapılan şişme basıncı deneylerinde, numunenin yanal şişme basıncını belirlemek üzere, Fourie (1989) tarafından tavsiye edilen “Denge Yöntemi” ile şişme basıncı deneyleri yapılmasının, genleşmeye bağlı ferahlama etkisinden dolayı yapılacak ölçüm hatalarının önlenmesi açısından faydalı olacağı görülmüştür.

Üç eksenli şişme basıncı hücresi

Bu çalışma kapsamında yapılan yanal şişme basıncı deneyleri için, ilk olarak Komormik ve Zeitlin (1965) tarafından imal edilen, sonrasında Ofer (1981), Ertekin (1991), Wattasantichoren ve arkadaşları (2007) tarafından çeşitli eklentiler yapılarak geliştirilen, inceltilmiş cidara sahip bir halkadan oluşan deney hücresinden yararlanılmıştır. Bu çalışma için Ertekin (1991) tarafından imal edilen deney aleti (Şekil 1) model alınarak yeni bir deney aleti geliştirilmiş ve üretilmiştir.

Şekil 1’de gösterilen ve bu çalışmada örnek alınan deney aletinin üretim şeması Şekil 2’de gösterilmiştir. 63.5 mm çapında ve 78mm yüksekliğindeki ödometre halkasının et kalınlığı ise 0.35mm’dir. Hücre çerçevesine monte edilmiş üç adet deformasyon ölçer (strain gauge), Wheatstone köprüsü ile bir veri toplayıcısına bağlanmaktadır. İnce cidarlı ödometre halkası, içerisine yerleştirilen kil numunenin yanal yönde şişmesine izin vermekte ve deformasyon ölçerler aracılığı ile numuneden inceltilmiş cidarlı halkaya aktarılan şişme basıncı belirlenebilmektedir.

Ertekin (1991) tarafından yanal şişme basınçlarının belirlenmesinde kullanılan düzenek, Komor-

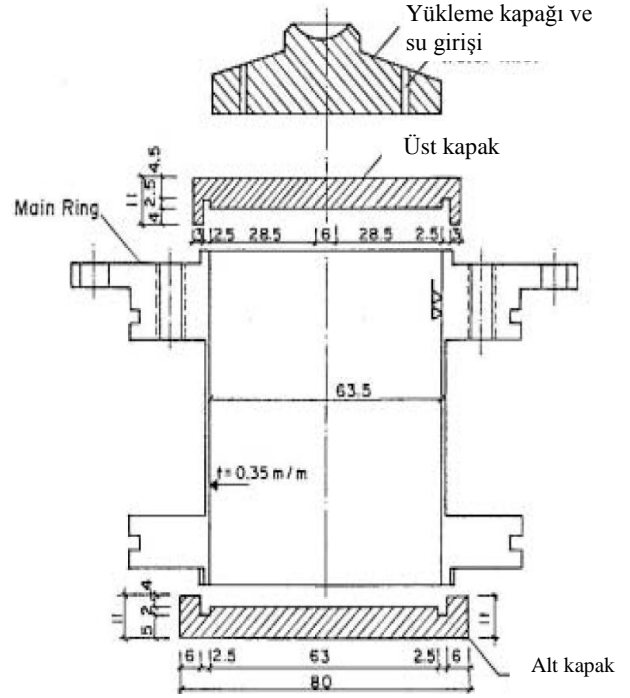
mik ve Zeitlin (1965) tarafından geliştirilen düzenek ile büyük oranda benzeşmektedir.



Şekil 1. Ertekin (1991) tarafından üretilen ve örnek olarak yararlanılan ince cidarlı hücre

Bu çalışma için esas alınan bu düzenekte, yanal şişme basıncı, hücrenin yanal yöndeki deformasyonu ve deformasyondan hareketle belirlenmektedir. Ancak, Ofer (1981), küçük deplasmanların bile şişme basıncının büyük oranda sönümlenmesine yol açabileceğini düşünerek, inceltmiş ödometre halkasının dışına bir basınç hücresi eklemiş ve hücre aracılığı ile ödometre halkasının dış cidarından karşı yönde uyguladığı hava basıncı ile yanal yöndeki deformasyonu engellemeyi amaçlamıştır. Böylece, deformasyon meydana gelememekte ve şişme basıncı sönümlenmemektedir.

Ofer (1981)'in ince cidarlı ödometre halkasına katkısı göz önünde bulundurularak bu çalışma için yeniden tasarlanan ve üretilen deney aletine bir ters basınç hücresi eklenmiştir. Ancak, hava basıncı yerine hidrolik basınç kullanılmıştır. Ayrıca, inceltmiş cidarlı hücrenin rijitliğini düşürerek hassasiyetini arttırabilmek için hücre yüksekliği arttırılmış, hücrenin bağlı olduğu alt ve üst plakların kalınlığı azaltılmıştır. Bu çalışma için üretilen hücre Şekil 3'de görülmektedir. Hücre yüksekliğinin arttırılması, deformasyon ölçerlerin yer aldığı seviyede hücrenin daha elastik davranmasına olanak vermiştir.



Şekil 2. Ertekin (1991) tarafından üretilen deney aletinin kesiti (Sapaz, 2004)

İnce cidarlı ödometre halkasının içerisine yerleştirildiği ve ödometre halkasını çevreleyen basınç hücresi Şekil 4'de, hücre içerisine yerleştirilmiş hali Şekil 5'de görülmektedir.

Deney düzeneği üzerinde yapılan bir başka değişiklik ise, 4 adet Wheatstone Köprüsü ile bağlı deformasyon ölçer ağı yerine üç adet çeyrek köprü ile bağlı deformasyon ölçer kullanılması olmuştur. Böylelikle her bir deformasyon ölçer bağımsız bir indikatör haline getirilmiştir. Ters basınç hücresine verilen basınç, Şekil 4 ve Şekil 5'de görülen vananın üzerine yerleştirilen bir basınç transdüser'i aracılığı ile ölçülmektedir. Şekil 6'da deney sırasında, düzeneğinin kurulmuş halini gösteren bir fotoğraf görülmektedir. Numuneye etkiyen düşey gerilme, numuneye oturan poröz taşın üzerine yerleştirilen yük hücresi ile elektronik olarak takip edilmiştir. Numunenin düşey yönde yaptığı deplasman ise manüel bir mikrometreden okunarak kayıt altına alınmıştır.

Düzenek üzerinde yer alan deformasyon ölçerler, yük hücresi ve basınç transdüserinden alınan okumalar dört kanallı bir veri toplayıcısı aracılığı ile bir masaüstü bilgisayarında depolanmıştır.



Şekil 3. Yeniden üretilen ve geliştirilen ince cidarlı yanal şişme basıncı hücresi



Şekil 4. Karşı basınç hücresi



Şekil 5. Ödometre halkasının ters basınç hücre sine yerleşmiş ve hücrenin izole edilmiş hali

Malzeme

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, Çatalca'da bulunan, İstanbul Trakya Serbest Bölgesi

sahasından alınan kil numunesi kullanılmıştır. Çatalca kili volkanik orjinlidir. (Sağlam, 1991).



Şekil 6. Deney sırasında çekilen ve kurulu düzeneği gösteren bir fotoğraf

Kullanılan killi zemin numunesinin fiziksel özellikleri İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında, mineralojik özellikleri ise TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde yapılan deneylerle belirlenmiştir.

Kahverengi – gri renkli kil tabakasının likit limit değeri $w_L = \%70$, plastisite indisi $I_p = \%35$ olarak belirlenmiştir. Numunenin $\%100$ 'ü No. 200 elekten geçmiş, diğer bir deyişle silt+ kil dane boyutundadır. Hidrometre deneyi ile bulunan kil içeriği ise $C = \%32$ 'dir.

TÜBİTAK laboratuvarlarında yapılan X –Ray Defraksiyon testi sonuçları uyarınca, kullanılan kil numunesinin mineralojik kompozisyonu Tablo 1'de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan kil numunesinin şişme potansiyeli esas olarak içerdiği $\%4.5$ oranındaki montmorillonit mineralinden kaynaklanmaktadır.

Deney numunesinin hazırlanması

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerde örselenmiş kil numunesi öğütüldükten sonra, Proktor kalıbında, standart Proktor enerjisinde sıkıştırılmıştır. Tüm deney numunelerinin kompaksiyonu sırasında, ASTM D 698 tarafından belirlenen kriterlere uyulmuştur.

Tablo 1. Çatalca kilinin öminerolojik kompozisyonu

Mineral	Oran (%)
Kalsit	56.2
Kuvars	32.0
Montmorillonit	4.5
Feldspat	3.9
Kaolin	2.2
İllit	1.1

Proktor kabında kilin kompakte edilmesi ile elde edilen silindirik numuneden (Şekil 7), şişme basıncı deneyi için kullanılan halkanın ebatlarında özel olarak üretilen çelik tüp ile alınan numune (Şekil 8), bir plastik piston yardımıyla deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerde, numunenin deney düzeneğine aktarılmasını takiben, 1 kPa mertebesinde olan ve denge basıncı olarak tanımlanabilecek düşey gerilme numuneye uygulanmış ve numunenin bu basınç altında bir dengeye ulaşması için bir süre beklenmiştir. Sonrasında deformasyon ölçerler sıfırlanarak numune suya doyurulmuş ve şişme deneyine başlanmıştır.

Başlangıç su muhtevasının şişme basıncını doğrudan etkilediği bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında şişme basıncının su muhtevasına göre değişimi incelenmemiştir. Bu sebeple, hazırlanan tüm numunelerin başlangıç su muhtevasının sabit tutulması amaçlanmıştır. Kompakte edilerek hazırlanan tüm deney numunelerinin başlangıç su muhtevası ortalama $w = \%19$ 'dur.

Deneysel çalışma sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan şişme basıncı deneylerinde, tek eksenli şişme basıncı deneyleri için uyulması gereken kriterleri tarifleyen ASTM D4546-03 esas alınmıştır.

Bu çalışma için üretilen düzeneğe, inceltilmiş cidarlı şişme basıncı halkasını saran bir karşı basınç hücresi eklenmiştir. Karşı basınç hücresi sayesinde, şişme potansiyeli yüksek kil zemin tabakaları ile doğrudan temas halinde olan bir iksa sisteminin veya tünel kaplamasının etkisine benzer şekilde, numunenin yatay deformasyon yapması sınırlandırılarak, şişme basıncının sönümlenmesi önlenmektedir. Karşı basınç altında, yanal yönde de-

formasyonun artma eğiliminin son bulup sabit kaldığı hücre basıncı değeri “yanal şişme basıncı” olarak kabul edilmiştir.



Şekil 7. Kompakte edilmiş silindirik kil numune

Hücre basıncı altında yapılan yanal şişme basıncı deneylerine karşın, karşı basınç hücresinin olmadığı deney düzeneklerinde, yanal şişme basıncı, inceltilmiş cidarlı halka üzerinde meydana gelen deformasyona, deformasyon ölçerlerin basınç altında elde edilmiş kalibrasyon eğrisinde karşılık gelen basınç değeri yanal şişme basıncı olarak alınmaktadır. Diğer bir deyişle, karşı basınç hücresi ile gerçek anlamda sabit hacimli şişme basıncı deneyi yapılabilmektedir.

Tariflenen yanal şişme basıncı ölçüm yöntemleri arasındaki fark Şekil 9'da şematik olarak gösterilmiştir.

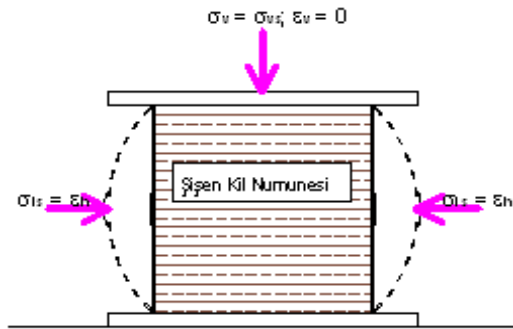


Şekil 8. Numune alıcı tüp ile kompakte edilmiş silindirden numune alınması sırasında çekilen bir fotoğraf

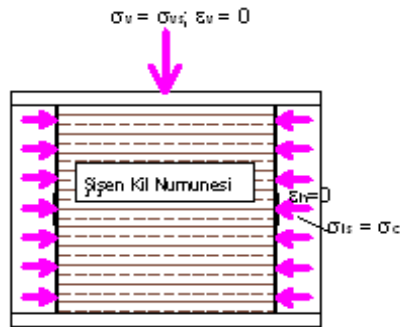
Düşey şişme basıncı ise, her iki deney düzeneğinde de, mikrometre ile takip edilen düşey deformasyonu, deney başlangıcındaki değerinde tutan düşey gerilme değerine eşit kabul edilmiştir. Numunenin suya doyurularak deneye başlanmasını takiben, düşey deformasyonun artma eğilimine bağlı olarak uygulanan düşey gerilme artırılmaktadır. Düşey şişme basıncına eşdeğer düşey gerilme değerine ulaşıldığı anda ise sistem dengeye ulaşmakta ve düşey deplasmanı gösteren mikrometre sabitlenmektedir.

Bu çalışma için geliştirilen düzenek ile karşı basınç hücresi kullanılarak ve karşı basınç hücresinde bir basınç verilmeden meydana gelen yanal deformasyonlar ölçülerek şişme basıncı deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yanal yönde numunenin serbest olarak şişmesine izin verilen (inceltilmiş cidarlı ödometre halkasının deforme olduğu) deneylerin sonuçları Tablo 2’de özetlenmiştir.



Düşey gerinimi sınırlandırılmış, yanal yönde serbest şişme basıncı deneyi



Sabit Hacimli Şişme Basıncı Deneyi

Şekil 9. Karşı basınç hücresi ile ve karşı basınç hücresi olmadan yapılan üç eksenli şişme basıncı deneyleri arasındaki gerilme – deformasyon farkları

Tablo 2. Yanal yönde serbest şişme basıncı deney sonuçları

Test Tarihi:	Düşey Şişme Basıncı (kPa)	Yanal Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Basıncı Oranı $\sigma_r = \sigma_{sL}/\sigma_{sv}$
02.06.2009	80	90 70	1.00
28.08.2009	70	120 120	1.71
02.09.2009	80	110 90	1.25
05.09.2009	80	115 115	1.44
16.10.2009	120	150 150	1.25
09.09.2009	105	130 140	1.29
13.09.2009	70	110 110	1.57
16.09.2009	110	180 220	1.82

Meydana gelen yatay deformasyonların, basınç hücresinden uygulanan hidrolik basınç ile deney süresince sıfırlandığı, sabit hacimli şişme basıncı deneylerine ait deney sonuçları ise Tablo 3’de verilmiştir.

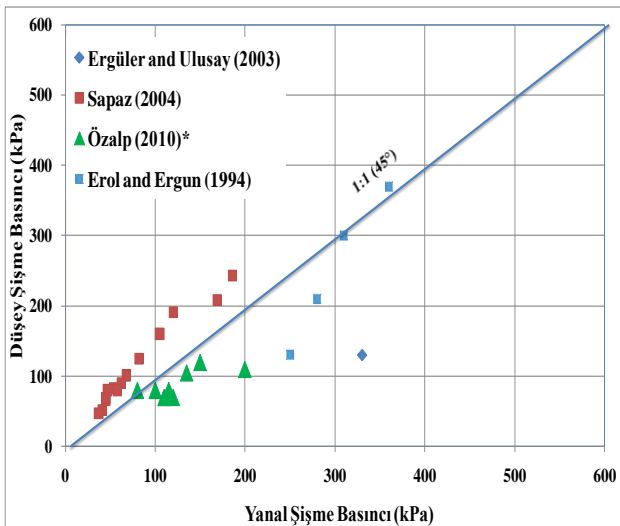
Tablo 2 ve Tablo 3’deki deney sonuçları, kullanılan kil numunesinin yanal ve düşey yöndeki şişme basıncı değerlerinin 70kPa ila 150kPa arasında değiştiğini göstermektedir. Her iki yöntemle yapılan deneylerde elde edilen şişme basıncı oranları 0.8 ila 2.3 arasında değişse de, ortalama şişme basıncı oranının 1.0 ila 1.5 arasında yoğunlaştığı görülmüştür.

Tablo 3. Sabit hacimli şişme basıncı deney sonuçları

Test Tarihi:	Düşey Şişme Basıncı (kPa)	Yanal Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Basıncı Oranı $\sigma_r = \sigma_{sL}/\sigma_{sv}$
01.07.2009	60	140	2.33
07.07.2009	65	105	1.62
09.07.2009	70	120	1.71
13.08.2009	95	95	1.00
17.08.2009	85	60	0.71
25.09.2009	120	80	0.67
02.10.2009	75	90	1.20
08.10.2009	80	85	1.06
20.08.2009	100	135	1.35
26.08.2009	65	150	2.31

Daha önce de ifade edildiği üzere, karşı basınç hücresinin olmadığı, inceltilmiş ödometre halkası ile daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından deneyler yapılmıştır. Bu çalışma için geliştirilen ve üretilen deney aletinin güvenilir olduğunu ve inceltilmiş cidarlı halkanın hassasiyetinin yeterliliğini araştırmak amacıyla, karşı basınç hücresi kullanılmadan yapılan (Tablo 2) deneylerden elde edilen şişme basıncı dağılımları, önceki araştırmacıların elde etmiş olduğu şişme basıncı dağılımları ile karşılaştırılmıştır. Erol ve Ergun (1994), Ergüler ve Ulusay (2003), Sapaz (2004) inceltilmiş cidarlı hücre ile üç eksenli şişme basıncı deneyleri yapmış araştırmacılardan bazılarıdır. Anılan araştırmacıların deney sonuçları ile bu çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen düşey ve yatay şişme basıncı dağılımları Şekil 10'da karşılaştırılmıştır.

Şekil 10'dan de görülebileceği üzere, bu çalışmada elde edilmiş düşey ve yanal şişme basıncı dağılımı, diğer çalışmalardan elde edilen dağılım ile uyum içindedir. Ayrıca, yanal şişme basıncı konusunda araştırma yapmış olan birçok araştırmacının ifade etmiş olduğu gibi, şişme potansiyeline sahip killerin düşey ve yanal şişme basınçlarının birbirine yakınsadığı gerçeğini ortaya koymaktadır.

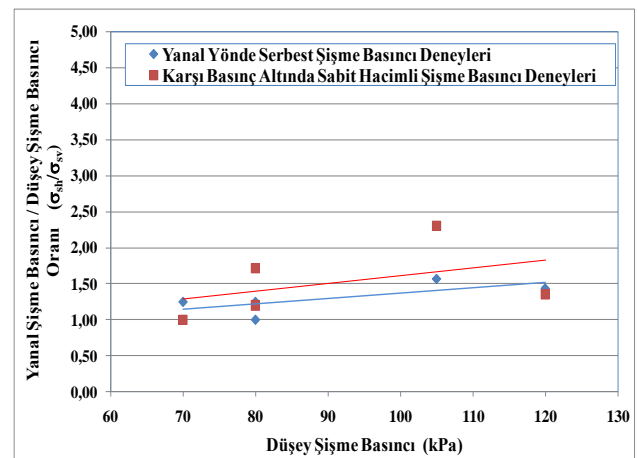


Şekil 10. Karşı basınç hücresi kullanılmadan yapılan deneylerden elde edilen şişme basıncı dağılımının, aynı yöntemle yapılmış olan eski çalışmalardan elde edilmiş şişme basıncı dağılımı ile karşılaştırılması

Şekil 10'da verilen karşılaştırmalı grafik ile bir anlamda geliştirilen deney aletinin güvenilirliği teyit edilmiştir.

Karşı basınç hücresinin deney sonuçları üzerindeki etkisinin ne oranda olduğunu belirleyebilmek amacıyla yanal şişme basıncının düşey şişme basıncına oranı ile düşey şişme basınçlarının dağılımını Şekil 11'deki grafiğe aktarılmıştır. Aynı grafik üzerinde, elde edilmiş olan deney sonuçlarının doğrusal eğilim çizgileri verilmiştir. Eğilim çizgileri karşılaştırıldığında, karşı basınç hücresinden verilen yanal basınç altında yapılan deneylerden elde edilen yanal şişme basınçlarının, yanal yönde numunenin serbest olarak şiştiği deney sonuçlarına göre bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak iki deney yöntemi arasındaki fark beklenildiği kadar yüksek çıkmamıştır.

Eklenen karşı basınç hücresi ile verilen hücre basıncı, inceltilmiş cidarlı halkanın rijitliğini arttırmaktadır. Daha rijit bir halka ile sınırlandırılmış numuneden etkileyen şişme basıncının çok daha yüksek olması gerekmektedir. Buna karşın, tek eksenli şişme basıncı deneylerinde, ASTM D 4546-03'de tariflenen serbest şişme basıncı deneyinden elde edilen şişme basıncı değerleri, sabit hacimli şişme basıncı deneyleri ile karşılaştırıldığında, daima daha yüksek olmuştur. Bu çalışma kapsamında klasik ödometre ile her iki yöntem takip edilerek yapılan deneyler sonucunda, serbest şişme deneyinde numunenin şişme basıncı 200kPa, sabit hacimli şişme basıncı deneyinde 136kPa olarak kaydedilmiştir.



Şekil 11. Şişme basıncı oranlarının, düşey şişme basınçlarına göre dağılımı

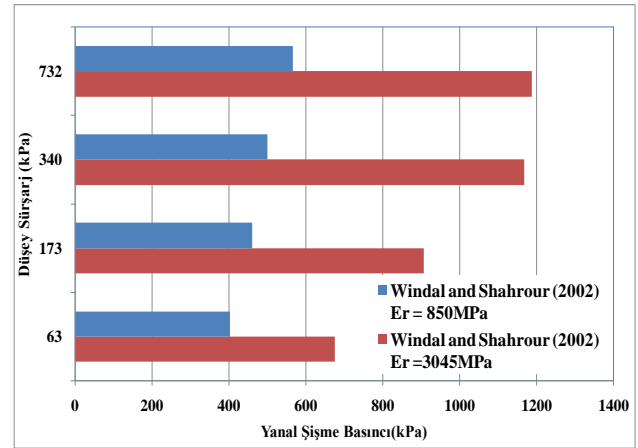
Üç eksenli ile tek eksenli deney yöntemleri arasındaki fiziksel şartlar farklıdır. Klasik ödometre halkasında yapılan serbest şişme basıncı deneylerinde, numune düşey yönde hacmini genişletebilmektedir. Deneyin devamında, numune üzerindeki gerilme yükseltilecek, numune deney başındaki hacmine gelinceye kadar oturması beklenmektedir. Numunenin deney başındaki hacmine ulaşmasını sağlayan düşey gerilme değeri şişme basıncı olarak değerlendirilmektedir.

Üç eksenli şişme basıncı deneylerinde, numune yanal yönde serbest olarak şişmeye bırakıldığında dahi, inceltilmiş cidarlı da olsa bir çelik halka numunenin hacmini genişletme isteğini engellemekte ve tek eksenli olarak klasik ödometre ile yapılan şişme basıncı deneylerindeki etki meydana gelmemektedir.

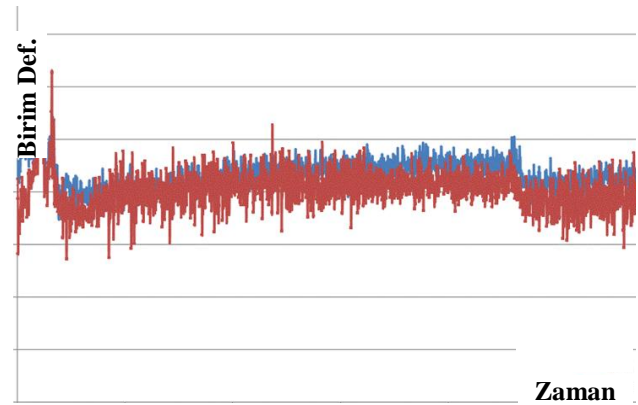
Özetlenecek olursa, bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonunda, tek eksenli şişme basıncı deneylerinde beklenenin tersine, sabit hacimli şişme basıncı deneylerinden, yanal yöndeki serbest şişme basıncı deneylerin göre daha yüksek şişme basıncı deneyleri elde edilmesi beklenmiştir. Bu anlamda kaydedilen deney sonuçları arasındaki fark beklenenden düşüktür. Örnek vermek gerekirse, Windal ve Shahrour (2002) yaptıkları bir çalışmada, ödometre halkasının rijitliklerini değiştirerek, mobilize olan yanal şişme basıncı değerlerini araştırmışlardır. Kullandıkları halkalardan bir tanesinin elastisite modülü $E_r = 850\text{MPa}$ iken diğerinin ki $E_r = 3045\text{MPa}$ 'dır. İki halkanın elastisite modülünün oranı $3045/850 = 3,6$ 'dır. Şekil 12'de, her iki halka için aynı koşullarda hazırlanmış numuneler ile yapılan deneylerden elde edilen yanal şişme basıncı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görülebileceği üzere, halka rijitliğinde 3.5 katlık bir artış, yanal şişme basıncının 1.5 – 2.0 kat artmasına sebep olmaktadır.

Bu noktada deney sırasında izlenen yöntemi açıklamak yararlı olacaktır. Daha önce ifade edildiği üzere, inceltilmiş cidarlı ödometre halkasını çevreleyen basınç hücresindeki basınç kademeli olarak yükseltilecek, numunenin yanal yönde şişmesi engellenmekte ve numunenin hacmi deney başındaki hacminde tutulmaktadır. Ancak bu işlem, geliştirilen ekipmanın, deformasyona bağlı otoma-

tik basınç tetikleyicisi olmadığından, manüel olarak yapılmaktadır. Diğer bir deyişle, önce numune şişerek yanal yönde deformasyon meydana getirmekte, sonra el marifetiyle, regülatördeki basınç, deformasyonlar tekrar sıfırlanıncaya kadar yavaş yavaş arttırılmaktadır. Sabit hacimli şişme basıncı deneyi sırasında kaydedilmiş örnek bir yanal deformasyon zaman ($\epsilon - t$) grafiği Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 12. Windal ve Shahrour (2002) tarafından çeşitli rijitlikteki halkalar için yapılan üç eksenli şişme basıncı deneylerinin sonuçları



Şekil 13. Sabit hacimli şişme basıncı deneyine ait yanal deformasyon – zaman kaydı

Şekil 14'ten görülebileceği üzere, yanal eksenindeki deformasyon değerindeki her artışta, hücre basıncı yükseltilecek, meydana gelen deformasyon, deney başındaki değerine getirilmiştir. Windal ve Shahrour (2001) ve Ofer (1981) gibi birçok araştırmacı, şişme basıncının numunenin ferahlamasına bağlı olarak kolayca sönmülenebileceğini ifade etmişlerdir.

Hücre basıncının otomatik olarak tetiklenmemesi, karşı basınç hücresinin deney sonuçları üzerinde beklenen etkisinin ortaya çıkmasını engellemiştir. Bu sebeple, mevcut deney aleti ile yapılan üç eksenli şişme basıncı deneylerinde, deney sırasında manüel olarak müdahale edilmesine gerek duyulmayacak ve deney sırasında meydana gelebilecek olası hataları ortadan kaldıracak bir yöntem araştırılmıştır.

Fourie, 1989'da Bishop ve Wesley (1975)'in geliştirdiği ve Bishop ve Henkel (1962) deformasyon kemerine sahip hidrolik üç eksenli deney aletini kullanarak üç eksenli şişme basıncı deneyleri yapmıştır. Fourie (1989) bu deney aletine, Sridharan ve arkadaşlarının, 1986'daki bir çalışmasında ele aldığı, boşluk oranlarının dengesi yönteminden hareketle "Method of Equilibrium – Denge Yöntemi"ni uyarlamıştır.

Denge yönteme göre, yanıl şişme basıncı bir set deney yapılarak belirlenmektedir. Her bir deneyde farklı bir hücre basıncı altında meydana gelen deformasyon değeri ölçülmektedir. Sonrasında ise, hücre basıncı – deformasyon değeri dağılımı bir grafiğe aktarılarak, deneylerden elde noktaları kesen bir doğru çizilir. Bu doğrunun sıfır yatay deformasyon, diğer deyişle sıfır yanıl deformasyona karşılık gelen basınç değerini kestiği nokta, yanıl şişme basıncını temsil etmektedir.

Bishop ve Wesley (1975) tarafından modifiye edilen, hidrolik üç eksenli deney aleti ile bu çalışma için geliştirilen, basınç hücresine sahip, inceltmiş cidarlı ödometre halkasının çalışma prensipleri temelde aynıdır. Buna dayanarak Fourie (1989) yöntemi, bu çalışma kapsamında geliştirilen deney aletine uyarlanmıştır.

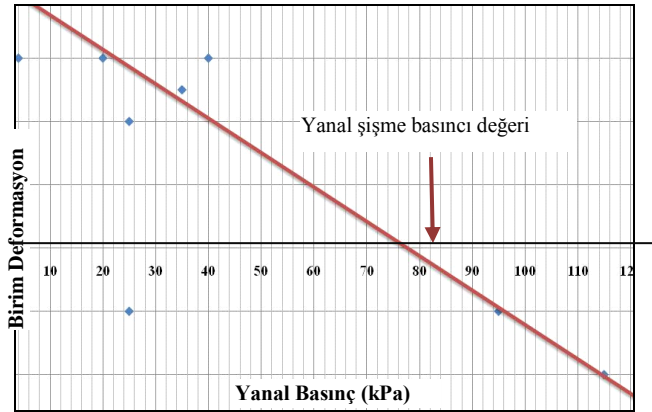
Fourie yöntemi kullanılarak, 112kPa sabit düşey sürşarj altında, toplam 8 deneyden oluşan 1 seri deney yapılmıştır. Deney öncesinde hazırlanan her bir numune, deney sırasında uygulanacak sabit sürşarj değeri olan 112 kPa altında konsolide edilmiş ve sonrasında deney aletine aktarılmıştır. Böylelikle deney sırasında düşey yönde herhangi bir oturma meydana gelmesi ve oturmaya bağlı kayma gerilmelerinin numunenin yanıl yöndeki davranışını etkilemesi önlenmiştir.

Fourie (1989) yöntemi ile yapılan deneylerden elde edilen hücre basıncı - yanıl deformasyon dağılımı grafiği ve bu grafikten elde edilen yanıl şişme basıncı değeri Şekil 14'te gösterilmiştir. 112kPa sürşarj değeri için yaklaşık 80kPa yanıl şişme basıncı mobilize olmuştur.

Fourie (1989) tarafından üç eksenli şişme basıncı deneyleri için adapte edilen bu yöntem takip edilerek yapılan şişme basıncı deneylerinin, hücre basıncını deformasyona bağlı olarak otomatik tetikleme özelliği olmayan bu deney aletinde, deney sırasında manüel müdahaleye ihtiyaç duyulmaması sebebiyle en doğru sonuçları vermektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmaya konu olan "Yanıl Şişme Basıncının Belirlenmesi" isimli doktora tezinde, şişme basıncının üç eksenli olarak tespit edilmesine imkân veren ve ilk olarak Komormik ve Zeitlin (1965) tarafından geliştirilen bir deney aleti üzerinde modifikasyonlar yapılarak tekrar üretilmiştir. Üretilen deney aleti için, Ertekin (1991) tarafından üretilen benzer bir alet örnek alınmıştır. Yeniden üretilen ekipman üzerinde yapılan modifikasyonlar aşağıdaki gibidir:



Şekil 14. Denge yöntemi ile yapılan şişme basıncı deneylerinin sonuçları ve bu deneylerden elde yanıl şişme basıncı

- İnceltmiş cidarlı halkanın yüksekliği, halka rijitliğini düşürmek amacıyla yükseltilmiştir.
- Yanıl yöndeki deformasyonları ölçen deformasyon ölçerler çeyrek köprü bağlantısı ile bağımsız indikatörler haline getirilmiştir.

- İnceltilmiş cidarlı halkanın etrafına karşı basınç hücresi eklenerek, üç eksenli deney aletine benzer şekilde, sabit hacimli şişme basıncı deneyleri yapılabilir hale gelmiştir.
- Otomatik hücre tetikleyicisi olmayan bu deney aleti ile hücre basıncı altında yapılacak şişme basıncı deneylerinin Fourie (1989) tarafından geliştirilen “Denge Yöntemi” ile yapılması tavsiye edilmektedir.

Çalışmaya konu olan deney aleti ile yapılan şişme basıncı deneylerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Geliştirilen deney aleti ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve deneylerin sonuçları doğrulanmıştır.
- Sabit hacimli şişme basıncı deneyleri ile karşı basınç hücresi kullanılmadan yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında, sabit hacimli yanal şişme basıncı deneylerinden elde edilen değerlerin bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür.
- İki deney yönteminin sonuçları arasındaki fark, beklentileri karşılamamıştır. Bunun sebebi araştırılmış ve yatay deformasyonları deney başındaki değerinde tutan kademeli hücre basıncı artışlarının, yatay deformasyon oluşumunu takiben manüel olarak yapılması olduğu anlaşılmıştır.
- Manüel müdahale olmaması amacıyla, deney aletine, yatay deformasyona bağlı otomatik hücre basıncı tetikleyicisi eklenmesi gerekmektedir.
- Deney sırasında müdahale olmaksızın yanal şişme basıncının tespit edilmesi için bir yöntem araştırılmış ve Fourie (1989) tarafından geliştirilen “Denge Yöntemi” bu düzenek üzerinde denenmiştir. Fourie (1989) tarafından geliştirilen ve çeşitli hücre basınçları altında elde edilen yatay deformasyonların dağılımı için çizilen doğrunun sıfır deformasyon değerine karşılık gelen ekseninde kestiği şişme basıncı değerini yanal şişme basıncı kabul eden bu yöntem ile 80kPa yanal şişme basıncı değeri elde edilmiştir.

Kaynaklar

- Bishop, A.W., Henke, D.J., (1962). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd Edition, Edward Arnold, London, UK.
- Bishop, A.W., Wesley, L.D., (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing, *Geotechnique*, **25**, 4, 657 – 670.
- Ergüler, Z. A. Ulusay R., (2003). A simple test and predictive models for assessing swelling potential of Ankara Clay, *Engineering Geology*, **67**, 331-352.
- Erol, O., Ergun, U, (1994). Lateral Swell Pressures in Expansive Soils, Proceedings, XIII ICSMFE, New Delhi, INDIA.
- Ertekin, Y., (1991). Measurement of Lateral Swell Pressure with Thin Wall Oedometer Technique, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE.
- Fourie, A. B., (1989). Laboratory evaluation of lateral swelling pressure, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115, 10, October 1989, 1481-1486.
- Komormik, A., & Zeitlen, J. G., (1965). An apparatus for measuring the lateral soil pressure in the laboratory, *Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, CANADA, 107-114.
- Ofer, Z., (1981). Instruments for laboratory and in situ measurement of the lateral swelling pressure of expansive clays, *Proceedings of the Fourth International Conference on Expansive Soils*, Denver Colorado, USA, 45–53.
- Sağlamer, A., (1991). İstanbul Trakya Serbest Bölgesi Geoteknik Raporu, İTÜ Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi, İstanbul, TÜRKİYE.
- Sapaz, B., (2004). Lateral versus vertical swell pressures in expansive soils, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE.
- Winald, T. ve Sharour, I., (2002). Study of the swelling behavior of a compacted soil using flexible oedometer, *Mechanics Research Communications*, 29, 5, September-October, 375-382.