

# MADEN TETKİK VE ARAMA DERGİSİ

Türkçe Baskı

2014

149

## İÇİNDEKİLER

Tuzgözü Havzası Kuvaterner Tortularının Fasiyes Özellikleri ve Denetim Mekanizmaları .....Alper GÜRBÜZ ve Nizamettin KAZANCI	1
Tuz Gölü Fay Zonunun Neotektonik Dönem Özellikleri, Depremselliği, Geometrisi ve Segment Yapısı .....Akın KÜRÇER ve Yaşar Ergun GÖKTEN	19
Karaburun (İzmir) Çevresinin Neojen Stratigrafisi ve Paleocoğrafik Evrimi .....Fikret GÖKTAŞ	71
Malatya Oligo-Miyosen Havzasının Bentik Foraminifer Faunası (Doğu Toroslar, Doğu Türkiye) .....Fatma GEDİK	95
Qushchi (KB İran, Batı Azerbaycan) Amfibolitlerinin Tektonomagmatik Özellikleri ve Protolit Tipi .....Mohssen MOAZZEN	141
Bozkır Formasyonunda Gliberit-Halit Birlikteliği (Pliyosen, Çankırı-Çorum Havzası, Orta Anadolu, Türkiye) .....İlhan SÖNMEZ	155
Basit Zemin İndeks Özelliklerini Kullanarak Şişme Basıncının Hesaplanması .....Kamil KAYABALI ve Özgür YALDIZ	179
Gömülü Jeolojik Sınırların Görüntülenmesine İki Örnek: Obruk Yapısı ve Seyithacı Fayı, Karapınar, Konya .....Ertan TOKER, Yahya ÇİFTÇİ, Aytekin AYVA ve Akın KÜRÇER	193
Türkiye Jeotermal Potansiyelinin Isı Akısı Hesaplamasıyla Değerlendirilmesi .....Uğur AKIN, Emin Uğur ULUGERGERLİ ve Semih KUTLU	205
Mineral Gelişimi ve Biyokimya Hakkında Kısa Not .....José Mario AMİGO	215
Güney Marmara Bölgesindeki Büyük Vadilerin Olası Deşilme Zamanları (N. Kazancı, Ö. Emre, K. Erturaç, S.A.G. Leroy, S. Öncel, Ö. İleri, Ö. Toprak; MTA Dergisi 148, 1-17) Makalesine Eleştiri ve Düzeltme .....Nizamettin KAZANCI	223
Katkı Belirtme.....	225
Maden Tetkik ve Arama Dergisi Yayın Kuralları.....	227



# Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>

MADEN TETKİK VE ARAMA DERGİSİ	
İÇİNDEKİLER	
Basit Zemin İndeks Özelliklerini Kullanarak Şişme Basıncının Hesaplanması	179
Yazarlar	
Kamil KAYABALI* ve Özgür YALDIZ <sup>a</sup>	
* Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tandoğan, Ankara 06100	

## BASİT ZEMİN İNDEKS ÖZELLİKLERİNİ KULLANARAK ŞİŞME BASINCININ HESAPLANMASI

### ESTIMATION OF SWELLING PRESSURE USING SIMPLE SOIL INDICES

Kamil KAYABALI\* ve Özgür YALDIZ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tandoğan, Ankara 06100

#### ÖZ

Anahtar sözcükler:  
Şişen soils, şişme basıncı, serbest şişme, Atterberg limitleri, su içeriği, kuru yoğunluk

Kurak ve yarı kurak bölgelerde şişen zeminlerin hafif yapılarda neden olduğu hasarın boyutu toplamda büyük doğal afetlerin neden olduğu hasar kadar olabilmektedir. Şişen zeminlerin şişme basıncı dahil olmak üzere birçok özelliği değişik çalışmalara konu olmuştur. Şişme basıncı bugüne kadar hemen hemen istisnasız biçimde geleneksel ödometre deneyi ile tayin edilmiştir. Zeminlerin şişme basıncını dolaylı olarak ölçen bu yöntem çoğu zaman spekülatif sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada 124 zemin numunesi üzerinde sabit hacimli şişme ve serbest şişme deney yöntemleri kullanılarak 1000 adet deney yapılmıştır. Her bir zemin numunesi üzerinde statik kompaksiyon deneyleri yapılarak, farklı su içeriği ve farklı kuru yoğunluklarda özdeş örnekler türetilmiştir. Zemin numunelerine ait Atterberg limitleri, ilksel su içerikleri ve kuru yoğunlukları regresyon analizine tabi tutulmuştur. Sonuçta elde edilen ampirik ilişki ile şişme basıncı makul bir doğruluk düzeyinde hesaplanabilmektedir. Sabit hacimli şişme deneyi ile serbest şişme deneyinden elde edilen sonuçlar arasındaki korelasyon daha anlamlı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmadan elde edilen ampirik ilişki ile daha önce yayınlanmış iki ampirik ilişkinin karşılaştırması yapıldığı zaman, önceden yayınlanmış ilişkilerin şişme basıncını olduğundan çok küçük hesapladıkları görülmüş ve bunun nedeninin şişme basıncını belirlemede dolaylı yöntemlerden kullanılması olduğu belirtilmiştir.

#### ABSTRACT

Keywords:  
Expansive soils, swell pressure, free swell, Atterberg limits, water content, dry density

In arid to semiarid regions, damage from expansive soils to light structures in the long term may be as costly as damage by major natural hazards. Swell characteristics, including swell pressure, of expansive soils have been the subject of numerous studies. Studies examining this property employ almost exclusively the conventional oedometer apparatus, which indirectly measures swell pressure. The results of such studies are often speculative. This investigation covers 1000 swell tests on 124 soil samples, using constant swell and free swell tests. Identical specimens at different initial water contents and dry densities were constituted through static compaction for each soil sample. Atterberg limits were incorporated into regression analyses along with the water content and dry density data. The resulting empirical relationship reasonably predicts the swell pressure. The correlation between the data from constant volume and free swell tests was even more conclusive. Comparing the empirical form obtained from this investigation and the previously published two equations reveals that the other relationships dramatically underestimated the swell pressure, which was attributed to the use of indirect methods.

\* Başvurulacak yazar: Kamil KAYABALI, [kayabali@ankara.edu.tr](mailto:kayabali@ankara.edu.tr)

## 1. Giriş

Şişen zeminler ıslandıklarında ve kuruduklarında büyük hacim değişimleri gösterebilirler. Kaldırım, drenaj kanalı ve alt yapı hatları gibi hafif yapılar, altlarındaki genişleyen zemin kabardığında hasara karşı duyarlı olurlar. Hatta bu kabarmadan kaynaklı büyük kaldırma kuvvetleri, üzerlerinde bulunan yapı temelini zemine uyguladığı basıncı yendiğinde, binanın yapısal unsurlarına bile zarar verebilir. Dünyanın birçok bölgesinde şişen zemin bulunmaktadır. Öyle ki bazı ülkelerde sadece kabarmadan kaynaklanan hasar bedeli, herhangi diğer bir temel probleminden çok daha yüksek olup yıllık milyarlarca dolara ulaşmaktadır (Nelson ve Miller, 1992; Siemens ve Blatz, 2009).

Şişme potansiyeli kil mineral bileşimi, mevcut kil dışı materyal miktarı, yoğunluk, kil taneciklerinin boyutu ve düzeni, boşluk oranı, çimentolanma, kil tabakasının boyutu ve kalınlığı, makro yapı ve yüzeyden itibaren derinlik gibi birçok faktör tarafından belirlenir. Tüm bu faktörlerin içinde kil mineral bileşimi en önemli faktör olarak değerlendirilmektedir (Komornik ve David, 1969).

Şişen zeminlerin şişme basıncı çok sayıda araştırmaya konu olmuş ve bu sorunun çözümü için çok sayıda yöntem önerilmiştir. Şişme basıncını kantitatif olarak değerlendirmeye yönelik olarak kullanılan en yaygın teknik, tek eksenli oturma deneyidir. Şişme basıncının belirlenmesi araştırmalarında şişme davranışı, su muhtevası, kıvam limitleri, kuru yoğunluk ve kil içeriği gibi belirgin fiziksel özellikler ile ilişkilidir (bu konuda kaynak için birkaç örnek: Komornik ve David, 1969; Nayak ve Christiensen, 1971; Vijayvergiya ve Ghazzaly, 1973; Attom ve Barakat, 2000; Rao vd., 2004).

Basma vd. (1995), kısıtlanmış şişme deneyi ve çifte ödometre deneyi olmak üzere iki adet deney tanımlamıştır. Araştırmacılar dört yöntem kullanarak bir dizi şişme deneyi gerçekleştirmiş olup en yaygın olarak kullanılan “sıfır şişme” ve “şişme konsolidasyonu” deneyleri bunlardan ikisidir. Araştırmacılar, şişmeyi tanımlamak için en uygun olanın “kısıtlanmış şişme deneyi” olduğunu belirtmiştir.

Shuai (1996), şişen zeminlerde şişme basıncını ölçmek için kullanılan deney yöntemleri hakkında çok kapsamlı bir çalışma ortaya koymuştur. Yazar, bu konuda geçerli olan yöntemleri iki ayrı grup altında

toplamıştır: sabit yüklemeli ödometre deneyi ve sabit hacimli ödometre deneyi. Araştırmacıya göre birinci grupta serbest şişme deneyi, ikili ödometre deneyi ve yüklemeli şişme ödometre deneyi, doğrudan model yöntemi ve Çin yöntemi yer alırken, sabit hacim ödometre deneyi, Sullivan ve McClelland yöntemi ile gerilme kontrollü deneyler ikinci grupta yer alırlar. Bu iki grup arasında Shuai, değer belirleme sırasında örnekleme düzensizliğindeki sınırlamayı dikkate almadığından ve hacim değişimi içermemesi nedeniyle sabit hacimli yöntemi önermektedir.

Kayabalı ve Demir (2011), 12 adet statik olarak sıkıştırılmış yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde bir dizi şişme deneyi uygulamak üzere basit ve sağlam bir şişme basıncı ölçüm aleti tasarlamışlardır. Bu alet ile Basma vd. (1995) tarafından dolaylı testler olarak adlandırılan dört yöntem ile bu araştırmacıların kendi tasarımları olan ve doğrudan yöntem olarak tanımladıkları sabit hacimli deney uygulanabilmektedir. Kayabalı ve Demir (2011), dolaylı şişme deneyi uygulama sonuçlarını doğrudan yöntem sonuçları ile karşılaştırmışlar ve aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

- 1) Kısıtlanmış şişme deneyinde şişme basıncı değerleri olduğundan düşük çıkmıştır;
- 2) Şişme-konsolidasyon ve sıfır şişme deneylerinde şişme basıncı değerleri olduğundan çok daha yüksek çıkmıştır;
- 3) Çifte ödometre deney sonuçları doğrudan yöntem ile ilgileşim göstermemektedir ve,
- 4) Doğrudan yöntemin şişme basıncı ile serbest şişme deneyi arasındaki ilgileşim oldukça yüksek olup bu konu daha zengin veri tabanı üzerinde araştırılmaya devam edilmelidir. Araştırmacılar ayrıca doğrudan yöntem sonuçlarının gerçek şişme basıncının biraz altında kalabileceğini, bunun da ölçüm ünitesinin yükleme hücresinin mükemmel rijit olmayışından kaynaklanabileceğini tartışmışlardır.

Birçok araştırmacı şişme basıncının basit zemin parametreleri kullanılarak kestirilebileceğini öne sürmektedir. Bununla birlikte, hemen hemen bütün çalışmalarda şişme basıncı saptama yöntemi, tek eksenli konsolidometrenin değişik versiyonlarından ibarettir. Kayabalı ve Demir (2011) bu dolaylı yöntemlerin bazılarının herhangi bir zemin örneği için birden fazla, aynı özellikli zemin örneği gerektirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, bu yöntemlerin şişme basıncını olduğundan ya düşük ya da çok yüksek gösterdiğini de eklemiştir.

Bu çalışmanın amacı, sabit hacimli şişme yöntemini kullanarak şişme basıncını özellikle su muhtevası, kuru yoğunluk ve kıvam limitleri gibi basit zemin indisleri ile ilişkilendirmektir. Ayrıca, çok daha geniş bir veri tabanı kullanılarak serbest şişme ile şişme basıncı arasında ampirik bir ilişki de geliştirmektedir.

## 2. Materyal

Bu çalışmada Ankara'nın değişik bölgelerinden yığın olarak toplanmış, farklı plastisite değeri sunan 124 adet zemin örneği kullanılmıştır. Bu örnekler önce etüvde kurutulmuş, daha sonra 40 numaralı elekten geçirilecek şekilde öğütülmüştür (bazı örneklerin ise, daha büyük bir projede kullanılmak üzere hem 40 numaralı hem de 200 numaralı elek altı boyutları ayrı zeminler gibi değerlendirilmiştir). Bu örneklerin plastisite özellikleri ve USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi; ASTM, 2000) sınıfları çizelge 1'de sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan en önemli aygıt, yükleme hücresi ve sayısal ekran ile donatılmış deney düzeneği (Şekil 1).

## 3. Yöntem

Her bir zemin örneği, 124 adet örnekten statik kompaksiyon yoluyla elde edilmiştir. Şişme basıncı deneyi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama sadece dört adet örnek içermektedir (Çizelge 1'de 210 ila 204 arasındaki örnekler) ve bunlar üzerinde geniş kapsamlı şişme basıncı deneyi yürütülmüştür. Bu bölümde, iki grup örnek dikkate alınmıştır. Birinci grup örnekler, su muhtevası %25 dolayına ulaşmaya kadar nemlendirilmiş olup, 50,5 mm çaplı silindirik bir kap içinde statik olarak sıkıştırılmış ve uygulanan yük 1 kN, 2 kN, 3 kN, 4 kN, 5 kN, 6 kN, 7 kN, 8 kN, 9 kN, ve 10 kN oluncaya kadar arttırılmıştır. Bu yolla kuru yoğunluk birbirinden farklı on adet zemin örneği hazırlanmıştır. Her yükleme seviyesi için her bir zeminden üçer adet zemin örneği oluşturulmuştur. Statik olarak kompakte edilmiş olan zemin örnekleri 20 mm yükseklik ve 50 mm çaplı konsolidasyon halkalarına alınmış ve halka üzerinde kalan tümsek dikkatlice kazınarak düzleştirilmiştir. Üç adet zemin örneği, şekil 1'de gösterildiği şekilde sabit hacimli şişme basıncı ölçüm cihazına yerleştirilmiştir. Statik olarak



Şekil 1- Sabit hacimli şişme deney düzeneği.

İnce Taneli Zeminlerin Şişme Basıncı

Çizelge 1- Çalışmada kullanılan zeminlerin plastisite özellikleri ve USCS sınıfları

No.	LL	PL	USCS	No.	LL	PL	USCS	No.	LL	PL	USCS
1	66.3	29.3	CH	43	57.9	37.0	MH	85	62.2	27.8	CH
2	57.1	24.4	CH	44	55.3	25.0	CH	86	46.4	28.1	ML
3	62.0	30.0	CH	45	54.0	29.8	MH	87	78.4	29.1	CH
4	54.5	25.6	CH	46	49.8	26.1	CL	88	61.4	35.9	MH
5	69.8	32.9	CH	47	57.4	28.5	CH	89	62.8	29.9	CH
6	71.4	31.8	CH	48	54.6	30.1	MH	90	54.4	31.3	MH
7	79.0	33.9	CH	49	59.5	30.3	CH	91	70.2	43.8	MH
8	57.8	29.6	CH	50	55.9	24.2	CH	92	68.0	30.8	CH
9	73.9	33.3	CH	51	75.5	35.6	MH	93	64.1	36.6	MH
10	75.0	33.1	CH	52	66.7	31.6	CH	94	61.9	32.0	MH
11	49.3	29.8	ML	53	70.8	35.8	MH	95	65.1	30.7	CH
12	57.4	24.3	CH	54	63.7	31.5	CH	96	52.6	32.3	MH
13	69.2	26.6	CH	55	78.6	36.5	MH	97	60.7	30.5	CH
14	71.0	40.3	MH	56	78.1	38.6	MH	98	60.2	33.2	MH
15	66.3	39.1	MH	57	90.3	35.2	CH	99	62.2	35.3	MH
16	60.6	41.3	MH	58	71.1	35.7	MH	100	61.7	30.3	CH
17	57.0	29.9	CH	59	77.6	35.3	CH	101	52.6	33.9	MH
18	53.7	33.4	MH	60	83.9	35.0	CH	102	53.0	32.7	MH
19	52.6	30.5	MH	61	59.4	39.0	MH	103	56.7	32.5	MH
20	53.1	25.0	CH	62	81.0	26.5	CH	104	58.0	25.6	CH
21	50.3	24.8	CH	63	87.2	34.0	CH	105	54.7	30.4	MH
22	61.0	29.9	CH	64	84.5	41.4	MH	106	55.2	31.2	MH
23	56.3	28.8	CH	65	72.2	40.2	MH	107	57.0	29.9	CH
24	42.9	26.2	ML	66	64.3	40.5	MH	108	53.0	30.0	MH
25	65.2	27.2	CH	67	65.0	35.0	MH	109	56.3	31.0	MH
26	48.5	28.6	ML	68	55.1	36.3	MH	110	55.4	30.8	MH
27	74.4	29.6	CH	69	58.9	30.8	MH	111	66.2	39.6	MH
28	57.4	25.3	CH	70	64.3	27.3	CH	112	59.5	36.3	MH
29	65.2	33.8	MH	71	61.5	30.1	CH	113	65.1	30.8	CH
30	53.3	25.4	CH	72	64.9	30.2	CH	114	67.6	30.2	CH
31	54.6	30.9	MH	73	71.4	31.2	CH	115	63.8	31.8	CH
32	58.5	24.2	CH	74	55.6	33.7	MH	116	61.6	32.6	MH
33	69.0	29.2	CH	75	67.8	27.6	CH	117	67.7	31.4	CH
34	54.6	21.9	CH	76	53.8	33.3	MH	118	60.5	30.4	CH
35	57.4	29.2	CH	77	75.9	32.0	CH	119	64.6	32.9	MH
36	47.8	25.5	CL	78	65.0	30.5	CH	120	63.4	30.7	CH
37	77.1	26.5	CH	79	67.9	40.0	MH	201	90.3	35.2	CH
38	68.2	31.2	CH	80	55.9	27.8	CH	202	72.2	40.2	MH
39	62.7	24.0	CH	81	61.5	34.0	MH	203	88.0	29.7	CH
40	47.7	25.0	CL	82	70.2	29.4	CH	204	66.4	35.5	MH
41	67.3	37.1	MH	83	71.8	30.2	CH				
42	68.6	27.3	CH	84	51.9	25.2	CH				

kompakte edilmiş örnekler yavaş oturma yüklemesi uygulanmıştır. Bunun nedeni, su drenajı başlamadan önce dijital yükleme hücresi ile oturma hücresine takılmış kollar arasında bir boşluk oluşmasını önlemek ve oturma yükünü (genellikle 10 ile 20 N dolayındadır) kaydedebilmektir.

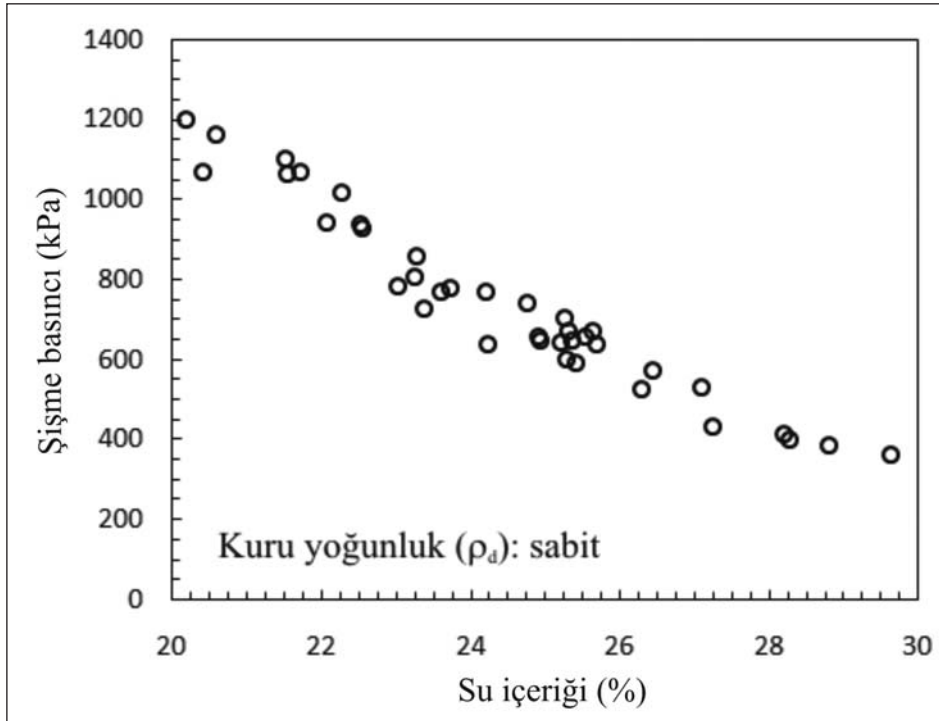
Diğer grup ise su muhtevası %20 ile %30 arasında %1 artacak şekilde hazırlanmış ve statik kompaksiyon uygulanmış örneklerden oluşmaktadır. Bu örnekler, yükleme hücresinde 10 kN güç değeri okununcaya kadar sıkıştırılmış olup bu değer rastgele seçilmiştir. Birinci grupta olduğu gibi bu grupta da dört zemin örneğinin her biri için üçer örnek hazırlanmıştır. Bu örnekler için de benzer işlem sırası uygulanarak statik olarak sıkıştırılmış örnekler sabit hacimli şişme basıncı ölçüm cihazına (aynı nitelikli üç örnek aynı anda) yerleştirilmiştir. Aynı şekilde, su tahliyesinden önce yavaş oturma yüklemesi yapılmış, şişme basıncı değeri 24 saat sonra deney düzeneğinin dijital göstergesinden okunarak kaydedilmiştir. Başlangıçtaki yükleme değeri işlem sonundaki değerden çıkarılmış, kalan değer deney örneğinin yüzey alanına bölünerek şişme basıncı değeri elde edilmiştir.

Deneyin ikinci aşamasında 120 örneğin şişme basıncı ve serbest şişme değerleri ölçülmüştür. Her

bir zemin örneğine ait yeterli miktarda kuru örnek alınmış ve yavaş yavaş karıştırılarak su muhtevası %25'i geçinceye kadar nemlendirilmiş (böylece gevşek örneğin su muhtevası yaklaşık %25 olmuştur) ve statik kompaksiyona tabi tutulmuştur. Her bir karışım güç göstergesi 10 kN'u gösterinceye dek yüklenmiştir. Statik olarak sıkıştırılmış örneklerin kazınması ve deney düzeneğine aktarılması işlemleri birinci aşamada olduğu gibidir. Bununla birlikte, bu kez 120 örneğin her birinden altışar adet örnek hazırlanmıştır. Bunlardan üçü sabit hacim koşullarındaki şişme basıncı deneyinde kullanılmış, diğer üçü ise serbest şişme deneyi için tutulmuştur. Serbest şişme deneyi için tek eksenli oturma deney hücreleri kullanılmıştır. İçinde örnek bulunan oturma halkası oturma hücresine yerleştirilmiştir. Su kaçışından önce 7 kPa'lık yükleme basıncı uygulanmıştır. Gün sonunda kadranlı göstergeden serbest şişme miktarı okunmuş, bu değer örneğin başlangıçtaki yükseklik değerine bölünerek şişme yüzdesi bulunmuştur.

#### 4. Deneyle, Sonuçlar ve Tartışma

Literatürde doğal su içeriği ve kuru yoğunluk ile şişme arasındaki ilişkiyi konu alan çok sayıda araştırma bulunabilir. Örneğin, şekil 2'de şişme basıncı ile su muhtevası arasındaki ilişki



Şekil 2- Şişme basıncı ile doğal su muhtevası arasındaki ilişki (Kayabalı ve Demir, 2011'den).

gösterilmiştir (Kayabalı ve Demir, 2011'den). Bu ilişki, yapay olarak hazırlanmış 40 adet örnek üzerinde yürütülen deneylere dayandırılmış olup, şekil incelendiğinde doğal su muhtevası ile şişme basıncı arasında ilişkinin doğrusal olduğu anlaşılmaktadır. Doğal su muhtevası arttıkça şişme basıncı düşmektedir.

Kuru yoğunluk ile şişme basıncı arasındaki ilişki ise doğru orantılı olup, kuru yoğunluk arttıkça şişme basıncı da artmaktadır. Bu durumun önemini altını çizmek ve göstermek amacıyla 201 ile 204 arasındaki örnekler üzerinde bir dizi şişme deneyi gerçekleştirilmiş ve sonuçları şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. Her bir zemin örneği üzerinde on adet deney gerçekleştirilmiş olup kuru yoğunluk ile şişme basıncı arasındaki ilişki ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu deneyler, yapay olarak %25'e kadar nemlendirilen zeminler üzerinde uygulanmıştır. Ancak, kuru zeminin nemlendirilmesi sırasındaki karıştırma işlemleri gibi numune hazırlık sürecinde buharlaşmalar olabileceği ve bu oranın tam olarak %25 düzeyinde kalmayabileceği de unutulmamalıdır. Aynı şekilde, doğal su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisini doğrulamak üzere aynı zemin örnekleri üzerinde on adet deney daha yapılmıştır. Ancak bu kez söz konusu örnekler sabit kuru yoğunluğa sahip olacak şekilde hazırlanmışlardır. Bunun nedeni, kuru yoğunluğu istenen düzeyde tutmanın güç oluşudur ve kompaksiyonun, kuru yoğunluk için kontrol unsuru olduğu kabul edilmiştir. Bu görüntüden hareketle, bu amaçla kullanılacak tüm örnekler 10 kN düzeyine kadar sıkıştırılmıştır. Şekil 3, kuru yoğunluk arttıkça şişme basıncının da arttığını göstermektedir. Şekil 3'teki grafiklerden birinde şişme basıncı ile doğal su muhtevası arasındaki ilişki, başlangıçtaki değerlendirmemizin aksi yönde davranmış olup doğal su muhtevası arttıkça şişme basıncı doğrusal olarak düşmüştür (202 numaralı zemin örneği). Bu durum, belirli bir seviyenin altındaki su muhtevası değerinde, bu özel zemin örneğinin statik kompaksiyon testi sonucunda, diğer örneklerdeki normal şişme basıncı/doğal kuru yoğunluk ilişkisi gösteren deneylerdekine göre çok daha düşük bir kuru yoğunluk değerinin ortaya çıkmış olabileceği şeklinde açıklanabilir.

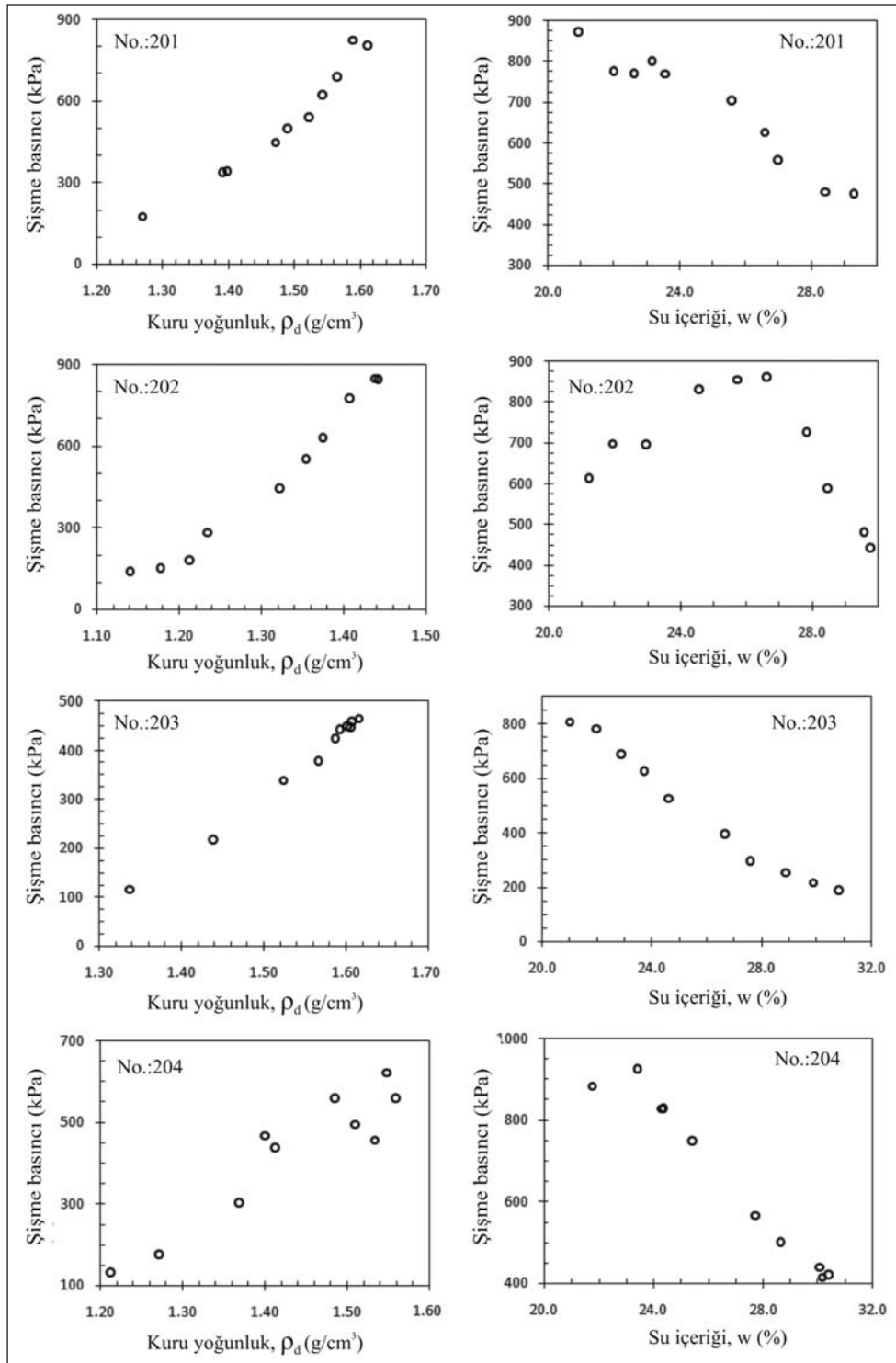
Doğal su muhtevası şişme basıncı üzerindeki en önemli parametre olduğuna göre, deneylerin hangi doğal su muhtevası düzeyinde yürütülmesi gerekir? Plastik limitin uygun bir parametre olduğu göz önüne alınarak bir dizi şişme basıncı deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçları şekil 4'te gösterilmekte olup, bu sonuçlar çizelge 1'deki ilk 120

örnek içinden seçilen 40 örneğe aittir. Şekil 4, iki gerçeği ortaya çıkarmıştır. Birincisi, şişme basıncı ile plastik limit arasında önemli bir ilişki bulunmamaktadır. İkincisi, şişme basınçlarının görece düşük olması, plastik limit ile ilişkili su muhtevasının şişme basıncı deneyinde dikkate alınabilecek kadar yüksek değerlerde olduğunu göstermektedir. Yüz yirmi örneğin plastik limit değerlerinin önemli bir bölümünün 25'in üzerinde olduğu göz önüne alınarak, şişme basıncı deneylerinde doğal su muhtevası kritik değeri olarak %25 alınmıştır. Böyle bir tek değer alınması aynı zamanda deney sonuçlarının karşılaştırılmasını da kolaylaştıracaktır.

Su muhtevası, kuru yoğunluk, kıvam limitleri gibi kolayca saptanabilen zemin indisleri ile şişme basıncı arasında ampirik bir ilişki tanımlayabilmek için, şekil 1'deki cihaz kullanılarak, kıvam limitleri çok iyi bir şekilde tanımlanmış 120 adet zemin örneği üzerinde bir dizi şişme basıncı deneyi gerçekleştirilmiştir. Her zemin örneği üzerinde üç adet şişme basıncı deneyi yürütülmüştür. Bu deneylerde, %25 su muhtevası olan ve nihai sıkıştırma yükü 10 kN olan üç ayrı örnek hazırlanarak üç ayrı sabit hacim aparatına yerleştirilmiştir. Yüz yirmi zemin örneğine ait ortalama şişme basıncı değerleri çizelge 2'de verilmiştir. Bu çizelgedeki değerler, yukarıda tanımlanan üç deneyin ortalama değeridir.

Doğal su muhtevası, kuru yoğunluk, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi arasında DATAFIT paket yazılımı (2008) kullanılarak çok sayıda regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi sırasında bu parametrelerin yerleri değiştirilerek korelasyon için en uygun sabit elde edilmeye çalışılmıştır. Bu regresyon analizlerinde altı yüz değer kullanılmıştır. Bunlardan 360'ı, 120 zemin örneğini temsil etmekte olup, bu 120 örneğin her biri üç adet örnekten oluşmaktadır. Geriye kalan 240 deney çizelge 1'deki 201-204 arasındaki dört örnek üzerinde yürütülmüş olup, her birinden 60 deney verisi üretilmiştir [her bir örnek için üç adet tekrarlama yapılmak üzere şişme basıncı/su muhtevası (toplam 30 deney sonucu) ve şişme basıncı/kuru yoğunluk (toplam 30 deney sonucu) ilişkileri için 10'ar deney yürütülmüştür]. En iyi ilişki doğal su muhtevası, kuru yoğunluk, likit limit ve plastik limit parametreleri arasında gözlenmiştir. Şişme basıncını hesaplamak için bu dört parametreyi bir bağintıda göstermek gerekirse:

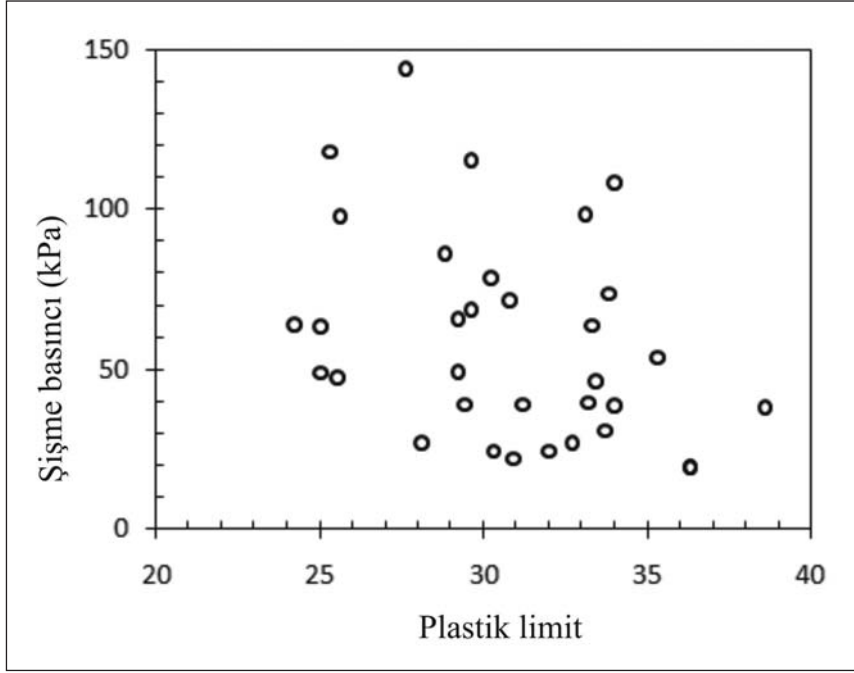
$$SP = -30,8w_i + 1025p_d + 6,35LL + 42,4PL - 2208 \quad (1)$$



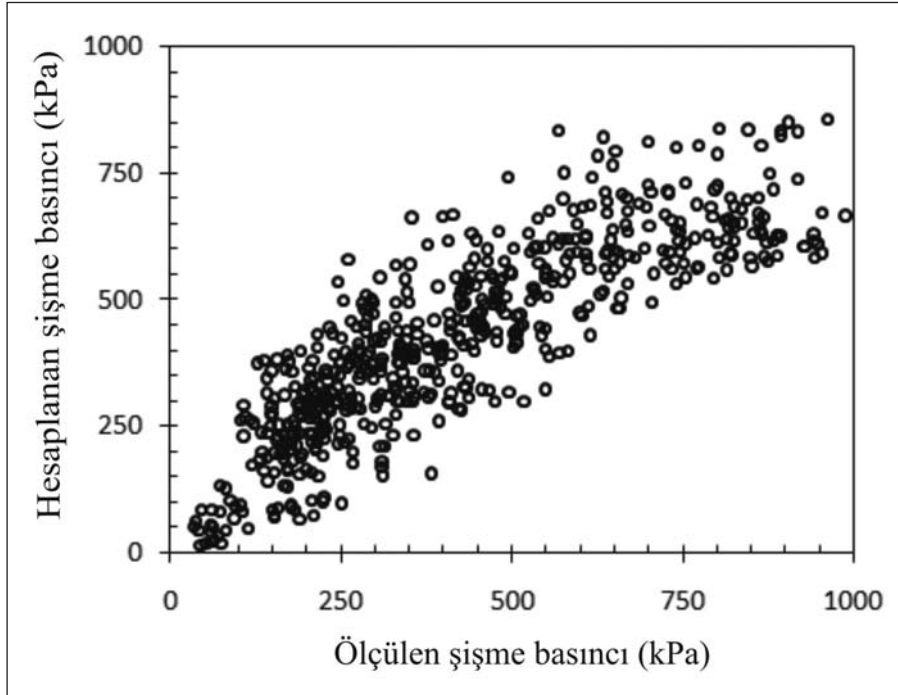
Şekil 3- 201 ile 204 numaraları arasındaki zemin örneklerinin şişme basıncı/kuru yoğunluk (sol sütun) ve şişme basıncı/doğal su muhtevası (sağ sütun) grafikleri.

Burada  $SP=kPa$  olarak şişme basıncını göstermektedir. Bu eşitliğin regresyon sabiti ( $R^2$ ) = 0,724'tür. Şekil 5, 600 deney sonucunda bulunan şişme basıncı değerleri ile Eşitlik-1 kullanılarak üretilmiş şişme basıncı değerlerini karşılaştır-

maktadır. Yeni kurulan ampirik ilişkinin 600 kPa üzerindeki değerler için öngörülerin hafifçe altında kalsa da, bunun altındaki değerlerde ince taneli zeminlerin büyük çoğunluğunu kapsayacak şekilde, anlamlı bir eşik değer ürettiği görülmüştür.



Şekil 4- Seçilen 40 numunenin şişme basıncı ile plastik limit ilişkisi.



Şekil 5- Altı yüz çift verinin hesaplanmış şişme basıncı ile ölçülmüş şişme basıncı ilişkisi.

Çizelge 2- 120 zemin örneğine ait ilksel su kapsamı ( $w_i$ ), kuru yoğunluk ( $\rho_d$ ), şişme basıncı (SP) ve serbest şişme (FS) değerleri. Çizelgedeki her değer, her bir zemine ait üç adet örneğin ortalama değerini temsil etmektedir.

No.	$w_i$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	SP (kPa)	FS (%)	No.	$w_i$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	SP (kPa)	FS (%)	No.	$w_i$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	SP (kPa)	FS (%)
1	25.2	1.61	351	9.1	41	26.3	1.47	507	12.8	81	24.9	1.57	405	6.3
2	25.4	1.61	184	5.5	42	26.3	1.57	246	8.1	82	24.8	1.59	341	8.9
3	25.5	1.59	344	8.4	43	26.4	1.53	290	6.4	83	24.9	1.60	477	9.6
4	25.4	1.60	160	4.2	44	26.1	1.57	46	2.6	84	25.8	1.60	83	3.1
5	24.8	1.59	673	13.3	45	26.1	1.55	170	5.2	85	25.9	1.59	326	9.6
6	25.2	1.60	551	10.8	46	25.4	1.58	60	2.7	86	26.0	1.58	227	7.5
7	25.3	1.60	682	15.4	47	25.7	1.59	125	5.5	87	25.8	1.61	335	11.1
8	25.5	1.59	261	7.8	48	26.1	1.59	162	5.4	88	25.5	1.49	256	7.4
9	25.7	1.60	569	12.3	49	25.4	1.59	200	6.8	89	25.7	1.60	230	7.9
10	25.3	1.62	497	10.8	50	25.7	1.56	76	2.9	90	25.6	1.56	206	6.0
11	25.5	1.55	245	7.3	51	25.3	1.59	604	13.8	91	27.1	1.41	676	14.8
12	25.4	1.61	74	4.3	52	25.3	1.60	332	8.8	92	25.7	1.59	330	9.3
13	26.0	1.58	158	7.3	53	24.6	1.58	598	9.8	93	25.0	1.56	448	8.3
14	26.3	1.45	853	19.1	54	25.2	1.60	325	6.8	94	25.7	1.59	175	6.8
15	26.1	1.47	711	15.8	55	26.2	1.56	744	15.6	95	25.6	1.58	383	7.1
16	25.7	1.42	626	15.2	56	25.9	1.57	607	11.9	96	25.6	1.59	204	5.8
17	25.6	1.60	155	6.0	57	25.7	1.54	931	22.6	97	25.6	1.59	221	5.8
18	25.7	1.52	316	6.6	58	27.3	1.54	405	9.2	98	25.6	1.58	313	7.9
19	25.5	1.55	224	3.6	59	26.6	1.59	529	12.6	99	25.6	1.57	425	7.9
20	25.6	1.60	258	4.0	60	27.1	1.58	635	13.4	100	26.0	1.59	196	7.9
21	25.6	1.55	58	2.5	61	25.0	1.58	389	8.5	101	25.8	1.55	232	5.6
22	26.4	1.58	317	9.2	62	26.7	1.59	219	10.0	102	26.2	1.55	168	4.6
23	25.8	1.59	295	9.3	63	27.2	1.56	454	12.0	103	26.0	1.57	264	7.6
24	25.4	1.56	47	1.8	64	25.3	1.39	841	20.4	104	24.7	1.58	160	5.8
25	25.0	1.62	218	8.1	65	26.6	1.44	849	18.1	105	26.1	1.58	171	5.9
26	25.4	1.56	80	2.5	66	25.5	1.45	799	18.9	106	26.1	1.57	215	7.0
27	25.4	1.63	249	9.1	67	25.8	1.62	293	7.6	107	26.2	1.59	165	5.6
28	25.7	1.60	133	5.1	68	25.5	1.48	411	9.1	108	25.8	1.58	154	5.3
29	26.1	1.58	319	10.0	69	25.1	1.58	520	10.0	109	25.6	1.57	227	5.9
30	25.7	1.62	51	3.3	70	25.2	1.55	454	9.4	110	25.7	1.59	205	6.2
31	25.6	1.56	116	4.7	71	25.6	1.57	220	7.2	111	26.2	1.49	613	12.8
32	25.9	1.61	39	2.3	72	26.0	1.60	359	9.1	112	26.0	1.56	291	7.6
33	25.9	1.60	243	9.4	73	26.0	1.59	407	10.8	113	26.2	1.57	314	8.2
34	25.8	1.62	64	4.0	74	25.4	1.58	285	6.0	114	25.8	1.58	298	9.6
35	25.6	1.60	220	8.5	75	28.3	1.53	205	7.4	115	25.2	1.60	306	8.6
36	25.8	1.61	64	3.1	76	25.6	1.57	246	5.6	116	25.4	1.59	294	7.6
37	25.8	1.61	314	6.5	77	25.6	1.63	249	7.7	117	25.7	1.60	275	8.3
38	25.6	1.58	137	4.9	78	25.4	1.60	244	7.9	118	24.9	1.60	212	6.2
39	25.6	1.60	131	5.6	79	25.3	1.60	544	9.6	119	25.4	1.60	318	8.8
40	25.2	1.59	52	2.3	80	25.1	1.61	176	6.1	120	25.1	1.61	275	8.7

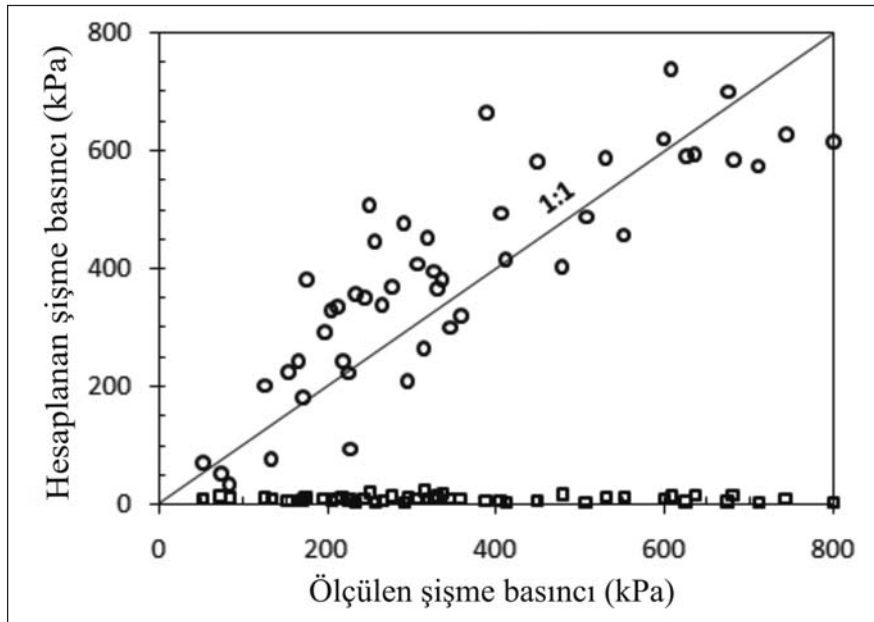
Sadece doğal su muhtevası ve kuru yoğunluk parametreleri korelasyona tabi tutulduğunda zayıf bir regresyon katsayısı (0,08) vermiştir. Bu durum, doğal su muhtevası ve kuru yoğunluk parametreleri şişme basıncını etkileyen önemli unsurlar olmakla birlikte, şişme basıncını hesaplamada plastisite verileri göz önüne alınmaksızın bunların tek başına kullanılamayacaklarını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yazarlar böyle bir şekli metne koymamışlardır. Şekil 3'te şişme basıncı su muhtevası ve kuru yoğunluk ile makul düzeyde iyi ilişki sunarken, plastisite özelliklerini içermeyen bir regresyon analizinin şişme basıncını tahmin etmede evrensel düzeyde kabul gören bir ampirik ilişki tanımlayamacağı da vurgulanmalıdır.

Bu araştırmadan önce yayınlanan çalışmalarda, önceki dönemde yürütülmüş ve şişen zeminlerin şişme özellikleri ile ampirik ilişkilerine odaklanmış çok sayıda inceleme bulunmaktadır. Bunlardan çok azı (Komornik ve David, 1969; Vijayvergiya ve Ghazzaly, 1973; Erzin ve Erol, 2004) ilişkiler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bir karşılaştırma yapmak için Komornik ve David (1969) ile Erzin ve Erol (2004)'ün çalışmaları ele alınmıştır. Erzin ve Erol (2004), şişme basıncı (SP, kgf/cm<sup>2</sup>) ile doğal su muhtevası (yüzde olarak  $w_i$ ), kuru yoğunluk (g/cm<sup>3</sup> olarak  $\rho_d$ ) ve plastisite indisi (PI) arasındaki ilişkiyi aşağıdaki bağıntı ile tanımlamıştır:

$$\log(SP) = -4,812 + 0,01405PI + 2,394\rho_d - 0,0163 w_i \quad (2)$$

Şekil 6, araştırmada ölçülen şişme basınçları ile Eşitlik-1 ve Eşitlik-2 kullanılarak tahmin edilen şişme basınçlarını karşılaştırmaktadır. Erzin ve Erol (2004) tarafından önerilen ampirik ilişki kullanılarak elde edilmiş değerlere bakıldığında şişme basıncı düzeylerinin şaşılacak derecede düşük kaldığı görülmüştür. Erzin ve Erol (2004)'ün tanımladıkları ilişki kendi çalışmalarındaki veri seti üzerinde makul ve kabul edilebilir bir uygunluk düzeyindeyken, bu çalışmadaki veriler kullanıldığında dramatik olarak çok düşük şişme basıncı değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu çelişkinin olası nedeni, bu araştırmacıların veri setinin kısıtlı olması ve ağırlıklı olarak yüksek plastisite indisi değerleri içermesi olabilir. Eşitlik-2 kullanılarak elde edilen değerler, Eşitlik-1 kullanılarak elde edilen değerlerden 50 kat daha düşük kalmıştır. Söz konusu çalışmada kullanılan zemin örneklerinin plastisite indisleri 17 ile 58 arasında değişmektedir. Bu durumda, bu araştırmada önerilen ampirik ilişki için belki de, kısmen daha geniş bir plastisite indisi aralığında olmak üzere benzer bir veri setinin kullanılması gerektiği, bunun için ise ek araştırmalara gerek olduğu belirtilebilir.

Komornik ve David (1969), şişme basıncı (SP, kgf/cm<sup>2</sup>) ile doğal su muhtevası (yüzde olarak  $w_i$ ), kuru yoğunluk (g/cm<sup>3</sup> olarak  $\rho_d$ ) ve likit limit (LL) arasındaki ilişkiyi aşağıdaki bağıntı ile tanımlamıştır:

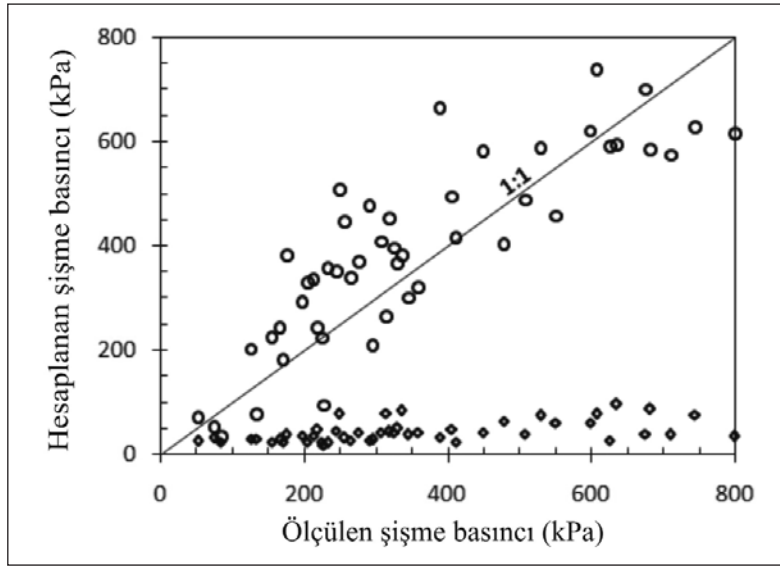


Şekil 6- Bu çalışmada önerilen bağıntı kullanılarak belirlenen şişme basıncı ve ölçülmüş şişme basıncı değerleri ile (daireler) Erzin ve Erol (2004) tarafından önerilen bağıntı kullanılarak belirlenen şişme basıncı değerlerinin (kareler) karşılaştırılması.

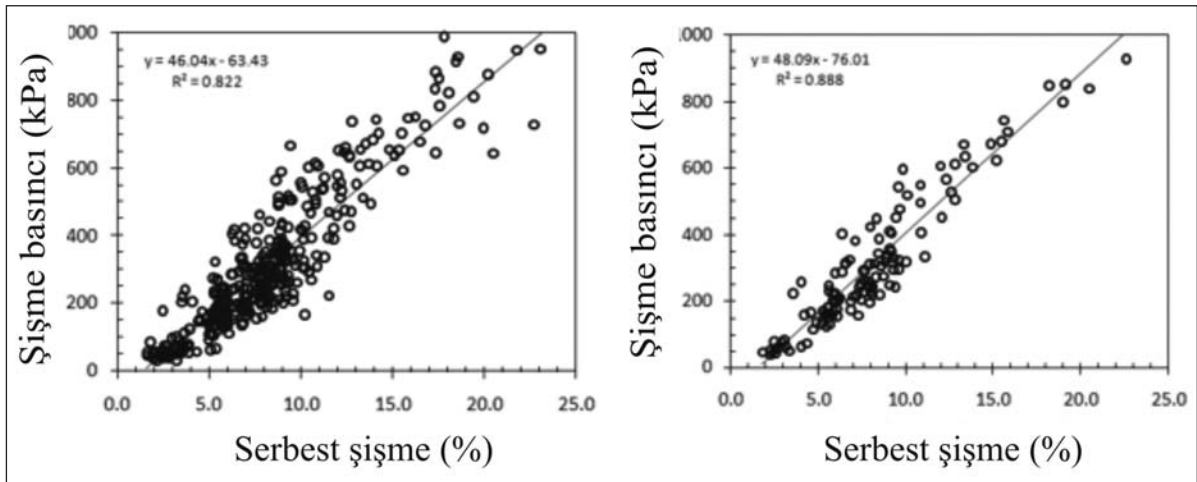
$$\log(SP) = -2,1 + 0,021LL + 0,00067p_d - 0,027 w_i \quad (3)$$

Şekil 7, bu çalışmada ölçülen şişme basınçları ile Eşitlik-1 ve Eşitlik-3 kullanılarak tahmin edilen şişme basınçlarını karşılaştırmaktadır. Komornik ve David (1969) tarafından önerilen bağıntı kullanıldığında Erzin ve Erol (2004) tarafından önerilen eşitliğe göre şişme basıncı değerleri bir miktar daha yüksek çıkmakla birlikte, tahmin değerlerindeki düşüklük halen dramatik düzeydedir. Komornik ve David (1969)'in eşitliği kullanılarak elde edilen tahmin değerleri, Eşitlik-1 kullanılarak elde edilen değerlerden yaklaşık 10 kat daha düşük düzeydedir.

Şişme basıncı değerleri aynı zamanda serbest şişme değerleri ile korelasyonu açısından değerlendirilmiştir. Serbest şişme deneyinde, deney için üç adet örnek hazırlanmıştır. Bu örnekler, klasik tek eksenli konsolidasyon deney aparatına (ya da ödometreye) yerleştirilmiştir. Yirmi dört saat sonunda numunenin şişme miktarı (boyundaki değişim,  $\Delta L$ ) ölçülerek kaydedilmiştir. Serbest şişme değeri (yüzde olarak), şişme değerinin numunenin orijinal boyuna (L) bölünmesi ile elde edilmiştir. Her bir zemin örneğine ait üç adet deneyin ortalama değerleri çizelge 2'de verilmiştir. Şekil 8 ise, sabit hacimli şişme basıncı deneyi ve serbest şişme



Şekil 7- Bu çalışmada önerilen bağıntı kullanılarak belirlenen şişme basıncı ve ölçülmüş şişme basıncı değerleri ile (daireler) Komornik ve David (1969) tarafından önerilen bağıntı kullanılarak belirlenen şişme basıncı değerlerinin (kareler) karşılaştırılması.



Şekil 8- 360 adet veri çiftinde sabit hacimli ve serbest şişme deneyi şişme basıncı (sol) ile 120 zemin örneğine ait ortalama şişme basıncı ve ortalama serbest şişme değerinin (sağ) birbirleri ile karşılaştırılması.

deneyinden elde edilen şişme basınçlarını içeren iki adet karşılaştırmadan oluşmaktadır. Birincisinde, 360 adet şişme basıncı değeri ile 120 adet örnekten elde edilmiş 360 serbest şişme deneyi sonucu karşılaştırılmıştır. Bu korelasyonda regresyon sabiti 0,822 olarak alınmış olup aradaki ilişki aşağıdaki bağıntıdaki gibidir:

$$SP = 46,04FS - 63,43 \quad (4)$$

İkinci olarak, ortalama şişme basıncı ile, 120 zemin örneğinin her birine ait üç adet serbest şişme deneyi ortalamaları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile birlikte korelasyon kalitesi bir öncekine göre biraz daha düzelmiştir ( $R^2= 0,888$ ). Bu korelasyonun ampirik ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$SP = 48,09FS - 76,01 \quad (5)$$

Hem sabit hacimli şişme basıncı deneyi hem de serbest şişme deneyi 24 saat süre ile uygulanmıştır. Bu sürenin seçilmesi tümüyle uygun olması nedeniyledir. Bu noktada, bu sürenin numunenin tümüyle şişmesi için yeterli bir süre olup olmadığı sorusu akla gelebilir. Böyle bir eleştiriye hazırlıklı olmak adına bir dizi ilave deney yürütülmüştür. Şişme basıncı deneyi ve serbest şişme deneyi uygulanmış olan ve en düşük, ortaç ve en yüksek şişme basıncına sahip olan üç adet örnek alınarak şişme miktarları gözlenmiştir. Şekil 9'da, şişme davranışının zamana karşı durumu gösterilmiştir. Buna göre, tamamen olmasa da, hemen hemen tüm şişme olayı 24 saatlik periyod içinde gerçekleşmektedir. Bu durumda, bu süre tüm şişme deneyleri için uygun olarak kabul edilerek uygulanmıştır.

## 5. Sonuçlar

Sabit hacim ve serbest şişme deneylerini kapsayan 1000 deneyi de içine alan kapsamlı araştırmaların sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Doğal su muhtevası ve kuru yoğunluk parametreleri şişme basıncını önemli derecede etkilemekle birlikte, bunlar yalnız başına kullanıldıklarında şişme basıncını doğru bir şekilde ölçmek olanaklı değildir.

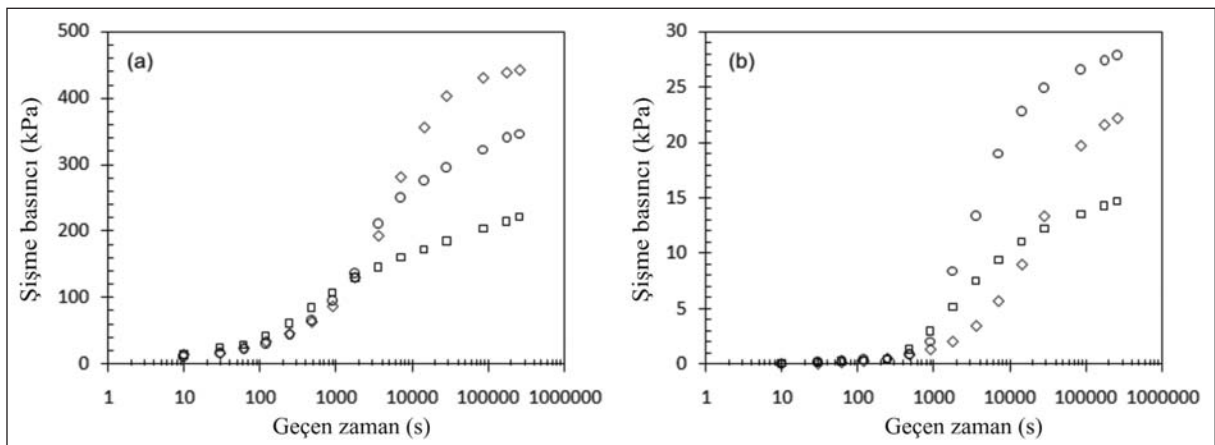
2. Regresyon analizlerinde doğal su muhtevası, kuru yoğunluk ve kıvam limitlerinin birlikte kullanılması sonucunda görece oldukça uygun bir regresyon sabiti elde edilmiştir ( $R^2= 0,724$ ). Plastisite indisi 60'a kadar olan zeminlerin şişme basınçlarını kestirmek üzere aşağıdaki bağıntı önerilmiştir:

$$SP = -30,8w_i + 1025\rho_d + 6,35LL + 42,4PL - 2208$$

3. Sabit hacimli şişme ve serbest şişme deneylerine ait çok geniş bir veri tabanının birbirleri ile karşılaştırılması sonucunda aşağıdaki şekilde ifade edilen son derece iyi bir ilişki ortaya çıkmıştır ( $R^2=0,888$ ):

$$SP = 48,1FS - 76$$

4. Doğal su muhtevası, kuru yoğunluk ve kıvam limitleri her örselenmemiş numuneden elde edilebilen temel zemin indeksleridir. Şişme basıncı herhangi ilave bir deneye gerek duymadan bu parametreler kullanılarak ampirik olarak hesaplanabilir. Örselenmiş numuneler kuru yoğunluk belirlemeye izin vermez. Kuru yoğunluk değeri için uygun bir



Şekil 9- Seçilen üç adet zemin örneği üzerinde uygulanan şişme basıncı (a) ile serbest şişme (b) değerlerinin zamana göre davranışları.

değer atandığında, örselenmiş örneklerden elde edilen indis değerleri kullanılarak şişme potansiyeli konusunda bir fikir üretilebilir.

5. Serbest şişme deneyi, hemen hemen her laboratuvarında yürütülebilecek basit bir deneydir. Basit zemin indisleri kullanılarak ölçülen şişme basıncının doğruluğu değerlendirilebilir.

6. Bu çalışmada, şişme basıncını belirlemek için kullanılan ampirik ilişkilerde plastisite indisi 20 ile 60 arasında değişmektedir. Bununla birlikte, bu ilişkiler daha yüksek plastisite indisi değerleri için çok daha ihtiyatlı olarak kullanılmalıdır. Daha yüksek plastisite indisleri için ilave araştırmaların yapılması gerekir.

7. Bu araştırmada elde edilen sonuçlar ile öncel iki çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında, temel zemin indislerini kullanan öncel çalışmalarda önerilen her iki bağıntının da şişme basıncı tahmininde, bu çalışmada üretilen ampirik bağıntıya göre 50 kat daha düşük değerler sunduğu belirlenmiştir. Bu dramatik çelişkinin bir çok nedeni olabilir. Bunlardan biri, ödometre yönteminin kullanılması olabilir. Kayabalı ve Demir (2011), ödometre yöntemi kullanılarak elde edilen şişme basıncı değerlerinin oldukça tartışmalı olduklarını göstermişlerdir. Başka nedenler arasında veri tabanının kısıtlı oluşu, zemin plastisitesinin özel bir aralıkta kalması ve bunun gibi nedenler olabilir.

### Katkı Belirtme

Bu çalışma, Ankara Üniversitesi Araştırma Fonu'nun 09B4343005 No'lu projesi ile desteklenmiştir.

Geliş Tarihi: 17.12.2013

Kabul Tarihi: 08.05.2014

Yayınlanma Tarihi: Aralık 2014

### Değinilen Belgeler

- American Society for Testing Materials, 2000. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System): ASTM D2487-00, West Conshohocken, PA.
- Attom M. F., Barakat, S., 2000. Investigation of three methods for evaluating swelling pressure of soils. *Environmental and Engineering Geoscience* 6, 3, 293-299.
- Basma, A. A., Al-hamoud, A. S., Malkawi, A. H., 1995. Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Science* 9, 355-368.
- DATAFIT, 2008. Datafit Version 9.0.59, Oakdale Engineering, RC 101, 23 Tomey Road, Oakdale, PA, 15071 USA.
- Erzin, Y., Erol, O., 2004. Correlations for quick prediction of swell pressures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 0476, 6 pp.
- Kayabalı K., Demir, S., 2011, Measurement of swelling pressure: direct method versus indirect methods. *Canadian Geotechnical Journal* 48, 354-364.
- Komornik, J., David, A., 1969. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE* 95, 1, 209-225.
- Nayak, N. V., Christiensen, R. W., 1971. Swelling characteristics of compacted expansive soils. *Clays and Clay Minerals* 19, 4, 251-261.
- Nelson, D. J., Miller, D. J., 1992, Expansive soils, problems and practice in foundation and pavement engineering, Wiley, New York, 259 pp.
- Rao, A. S., Phanikumar, B. R., Sharma, R. S., 2004. Prediction of swelling characteristics of remolded and compacted expansive soils using free swell index. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37, 217-226.
- Shuai, F., 1996. Simulation of swelling pressure measurements on expansive soils. PhD thesis, University of Saskatchewan, Canada, 315 pp.
- Siemens, G., Blatz, J. A., 2009, Evaluation of the influence of boundary confinement on the behaviour of unsaturated swelling clsy soils. *Canadian Geotechnical Journal* 46, 339-356.
- Vijayvergiya, V. N., Ghazzaly, O. I., 1973. Prediction of swelling potential for natural clays. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel, 1, 227-236.

