

## Farklı simektit içeriğine sahip yapay örneklerin eksenel şişme gerilmeleri ve eksenel serbest şişme birim deformasyonları

M. E. Bilir & Y. V. Müftüoğlu

*Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye*

**ÖZET:** Şişme gerilmesi ve şişme birim deformasyonu, tek ve üç eksenli şişme deneyleri sonucunda şişme davranışını nicel olarak tanımlayan verilerdir. Şişme olgusu yeterince bilinmediğinden, bu iki temel verinin belirlenmesine çoğu zaman ihtiyaç duyulmaz. Ancak, şişen mineraller su ile temas etmeye başlayınca tasarım aşamasında gerekli önlemler alınmadığından maliyeti yüksek problemlerle bir süreç başlamaktadır. Bu çalışmada, yüksek şişme özelliği olan simektit türü kil minerali üzerinde deneyler yapılmış ve su içeriğindeki % 10 - 12'lik bir artışın maksimum eksenel şişme gerilmesine ulaşmak için yeterli olduğu görülmüştür. Bu nedenle, herhangi bir mühendislik yapısı oluşturulurken yapılacak jeoteknik etüdler arasında şişme olgusunun da araştırılması kesinlikle bulunmalıdır.

**ABSTRACT:** Swelling stress and swelling strain derived from uniaxial and triaxial swelling tests are the data to define swelling behavior quantitatively. Since the swelling phenomena is not known well, determination of these two basic data is not usually required. Yet, when swelling minerals are exposed to water, a costly phase begins since the necessary measures are not taken at the design stage. In this work, tests are carried out on simectite type clay mineral which has a high potential for swelling, and it was observed that in order to reach maximum axial swelling stress, a 10 - 12 % of increase in the water content is sufficient. Therefore the geotechnical studies to be carried out during the execution of any type of engineering structures must definitely include investigation of swelling phenomena.

### I GİRİŞ

Şişen zemin ve kayalar, tüm dünyada problemlerle birimler olarak görülmesine rağmen şişme davranışının tanınmaması nedeniyle şişme verilerinin saptandığı deneylere yeterli önem verilmemiştir. Bunun en önemli sonucu tek eksenli deney alet ve yöntemleri ile ilgili standartların öneri şeklinde olması, üç eksenli alet ve yöntemleri ile ilgili henüz bir standart geliştirilememiş olmasıdır. Özellikle şişme gerilmesi - şişme birim deformasyonu davranışının belirlenmesi için gerekli sürenin uzun olması da veri elde etmeyi zorlaştıran bir etkidir.

Şişen zemin ve kayaların su içeriğinde yeterli miktarda artış olduğunda şişme birim deformasyonları oluşmaktadır. Şişme birim de formasyonlarının oluşması engellenirse şişme gerilmeleri meydana gelmektedir.

Şişme birim deformasyonu ve şişme gerilmesinin büyüklüğü; şişen minerallerin yüzdesi ve tipi, su

içeriği ve yanal basınca bağlı olarak değişmektedir. Yanal basıncın etkisini belirleyebilmek için deneylerin üç eksenli olarak yapılması gerekir.

Bu çalışmanın amacı, şişme gerilmesi ve şişme birim deformasyonları ile şişen malzeme yüzdesi ve su içeriği arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasıdır.

### 2 DÜZENEKLER

Şişme olgusu ile ilgilenen araştırmacılar amaçlarına göre farklı tasarımlarda şişme deney düzenekleri geliştirmişlerdir (Bilir & Müftüoğlu, 2002). Bu düzeneklerden bazıları lek bir veriyi belirleyebilen bazıları da her iki veriyi de ölçebilecek şekilde tasarlanmıştır. Yine bazıları da mekanik ölçerler bulunurken bazıları da elektronik ölçerler, veri toplama kartı ve bilgisayar gibi elektronik donanımlar kullanılmıştır. Yerdeğiştirme kontrolünün yapıldığı düzenekler her iki verinin

belirlenmesine olanak sağlamakta ve elektronik donanımlar kullanılması halinde de deneylerin amacına uygun olarak yürütülmesi ve sık aralıklarla veri alınması gibi üstünlükleri nedeniyle şişme deneylerini oldukça kolaylaştırmaktadır.

Mekanik ölçerlerin kullanıldığı bu deneylerde şişme gerilmesinin ölçülmesinde odometre, şişme yerdeğiştirmelerinin ölçülmesinde ise şişme birim deformasyon ölçer düzeneği kullanılmıştır.

Odometre aleti; yük halkası, komparatör, yük uygulama kolu ve redüktör, yükleme kolu ve şişme hücresinden oluşmaktadır (Şek. 1).

2 kN kapasitesi olan yük halkası, 0.002 mm hassasiyette bir komparatöre sahiptir. Ölçülen hareket miktarı kalibrasyon eğrisi ile yüke çevrilmektedir.

Şişme hareketinin ölçüldüğü komparatör, 0.002 mm hassasiyette olup 30 mm hareket mesafesine sahiptir.

Yük uygulama kolu ve redüktör ömeğe yük uygulamak için kullanılır. Örnek üzerine yük uygulamak için yük uygulama kolu saat ibresinin tersi yönünde, yükü kaldırmak için saat ibresi yönünde çevrilir.

9.82 : 1 oranlı yükleme kolunun bir ucunda yük halkası diğer ucunda örnek bulunur. Yük halkasından uygulanan yük ömeğe 9.82 oranında etkir.

Şişme hücresi ise; su kabı, 50 mm çaplı çelik halka, alt poroz taş, üzerinde üst poroz taş bulunan yükleme başlığı ile yanaJ başlıktan meydana gelmiştir (Şek. 2). Su kabının tabanına alt poroz taş

ve üzerine süzgeç kağıdı konulur. Bunun üzerine içinde örnek bulunan çelik halka yerleştirilir. Örneğin üzerine tekrar süzgeç kağıdı konulduktan sonra önce yanal başlık sonra da örnek üzerine gelecek şekilde yükleme başlığı yerleştirilerek şişme ölçer hücresi deneye hazır hale getirilir.

Şişme birim deformasyon ölçer düzeneği ise komparatör, bronz halka, poroz taşlar, yükleme başlığı, kenetleme çubuğu ve somunu ile su kabından oluşmaktadır (Şek. 3).

Eksenel şişme yerdeğiştirmelerinin ölçümünde kullanılan komparatör 0.01 mm hassasiyette ve 50 mm kapasitedir.

Örneğin içine konulduğu bronz halka 54 mm çapındadır. Radyal yöndeki şişme kısıtlandığından halka içindeki Örnek eksenel yönde şişmeye çalışır.

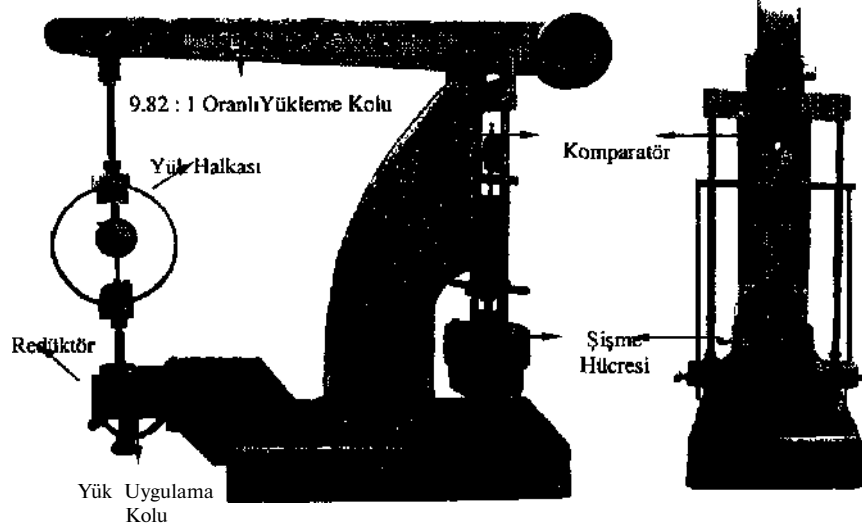
Ömeğe su girişini sağlayan poroz taşlardan biri örneğin altında diğeri örneğin üstüne yerleştirilen yükleme başlığının içindedir.

Çelik halkanın sabit kalmasını sağlamak amacıyla kenetleme çubuğu ve somunu kullanılır.

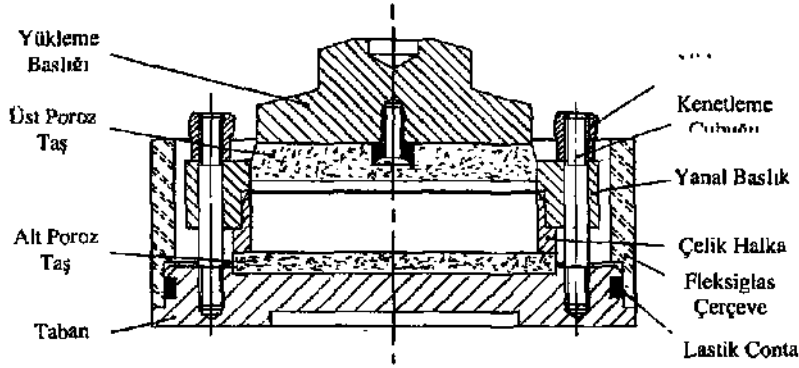
Su kabının kenarları fleksiglasdan, tabanı alüminyumdan yapılmıştır. Kenetleme çubukları tabana tutturulur.

### 3 ÖRNEK HAZIRLAMA

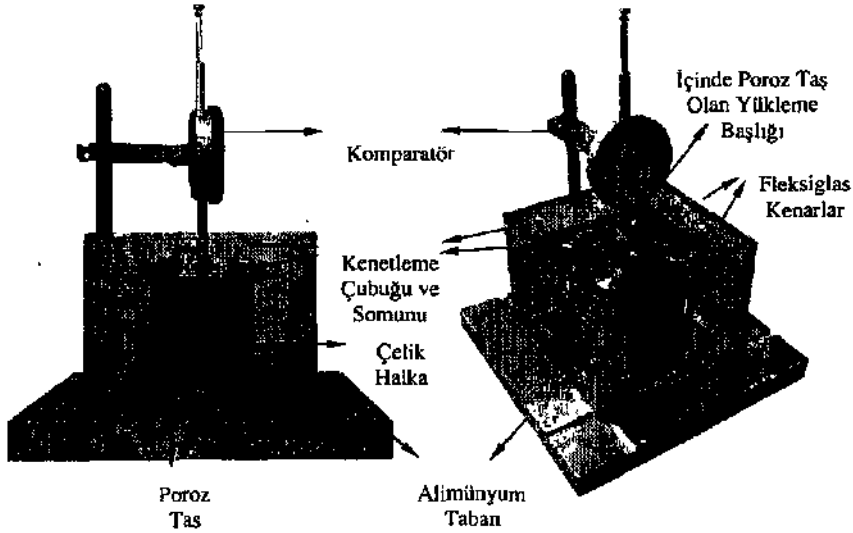
Yapay örneklerle deneylerin gerçekleştirilmesinin en büyük üstünlüğü örnek içindeki simetit miktarının kontrol edilerek farklı şişen malzeme oranlarında örnekler hazırlanabilmesidir.



Şekil I. Odometre.



Şekil 2. Şişme hücresi.



Şekil 3. Şişme birim deformasyon ölçer.

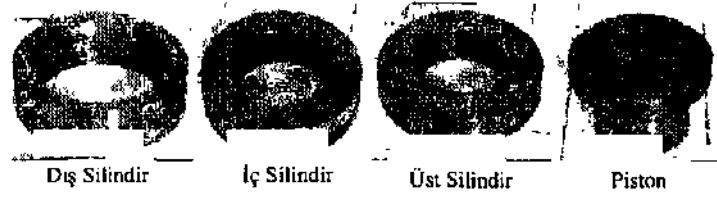
Yapay örnekler, bentonit ile ince taneli kum (0.149 mikron elek altı - 0.074 mikron elek üstü) karışımından oluşmaktadır.

Bentonitin mineralojik bileşimini ortaya çıkarmak için yapılan X-ışın kırınım (XRD) çözümlemesi sonucunda tüm numunede % 94 kil, % 1 kuvars, % 4 feldspat ve % 1 kalsit olduğu belirlenmiştir.

Kil mineralinin tipini belirlemek için yapılan detay kil (normal, etilen glikollü ve fırınlanmış) analizinde % 100 simseküt grubu kil mineralinin olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla bentonitin içindeki % 6'lık kısmın şişmeye bir katkısının olmadığı belirlenmiştir.

Toz karışımından bir karot örneği oluşturabilmek için karışımın sıkıştırılması gerekmektedir. Bunun için. Yeşil (1991) tarafından geliştirilen özel bir aparat kullanılmıştır. Çelikten yapılmış olan örnek hazırlama aparatı; dört parçadan oluşan iç silindir, iç silindiri tutan dış silindir, pistonu kılavuzluk eden üst silindir ve bir pistondan oluşur (Şek. 4).

Yapay silindirik bir örnek hazırlayabilmek için iç silindirin parçaları, dış silindir içine yerleştirilir. Üst silindir ise iç silindirin üzerine gelecek şekilde konulur. Karışım, silindirlerin ortasında oluşan boşluğa dökülür ve malzemenin üzerine yerleştirilen pistonu hidrolik pres vasıtasıyla yük uygulanarak 102 halindeki karışım sıkıştırılır.



Şekil 4. Örnek hazırlama aparatının parçaları (Yeşil, 1991).

Pistonun üzerindeki çizgi üst silindire temas ettiğinde sıkıştırma işlemi tamamlanır. Örneği aparatından çıkarmak için sırasıyla piston, üst silindir ve dış silindir sökülür. En sona, içinde preslenmiş örnek bulunan iç silindir kalır. Parçalar birbirinden kolayca ayrıldığında örnek ortaya çıkar.

ISRM (1979)'a göre çap, kalınlığın 2.5 katından az olmamalıdır. ISRM (1989) ise çapın 5ü - 100 mm arasında, kalınlığın da 20 - 30 mm arasında daha uygun olduğunu önermektedir. Buna göre tüm örnekler 20 mm yükseklikte ve 2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta hazırlanmıştır. Odomelrc deneylerindeki örneklerin çapı 50 mm ve çap/yükseklik oranı 2.5, aksenal serbest şişme birim deformasyonu deneylerinde kullanılan örneklerin çapı 54 mm ve çap/yükseklik oranı 2.7'dir. Tüm örneklerin yukarıda verilen yoğunluk ve çap/yükseklik oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılması tasarlanmasına rağmen pratikte bu oldukça zordur. Dolayısıyla bu değerlere mümkün olduğunca yaklaşılmaya çalışılmıştır.

Her iki deneyde de kullanılan örneklerde benlonit ağırlıkça % 10, % 20, % 30 ve % 40 oranındadır. Dolayısıyla şişme özelliği olan simektit grubu kil minerallerinin oranı ağırlıkça % 9.4, % 18.8, % 28.2 ve % 37.6'dır.

#### 4 DENEY YÖNTEMİ

Eksenal şişme gerilmesinin belirlenmesi amacıyla sabit hacim deney yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin esası, su ile temas eden ve radyal olarak kısıtlanmış örneğin şişmesine engel olarak yani sabit bir hacimde tutarak maksimum aksenal şişme gerilmesine ulaşılmasıdır (ISRM, 1989).

Eksenal şişme gerilmesinin belirlenmesinde aşağıdaki işlemler dizisi uygulanır;

- Yukarıdaki anlatıldığı gibi hazırlanan şişme ölçer hücresi odometreye yerleştirilir.
- Yük halkası ve komparatör sıfırlanır ve örneğin üzerine ön yük uygulanır. Gösterge lerdck i değerler kaydedilir.
- Hücreye sal' su konularak deneye başlanır.

- Şişme yerdeğiştirmesi 0 ile 10 mikron arasında kontra] edilmeye çalışılır. Diğer bir deyişle örnek üzerindeki aksenal yöndeki yerdeğiştirmesinin 10 mikrona kadar çıkmasına izin verilir, Yerdeğiştirmesinin 10 mikronu aştığı durumlarda örnek üzerindeki yük yüklemeye kolu vasıtası ile artırılır ve şişme yerdeğiştirmesinin 10 mikronun altına düşmesi sağlanır. Bu işlem şişme yerdeğiştirmesinin 10 mikronun altında sabit bir değerde kalmama kadar yani şişme duruncaya kadar devam eder.

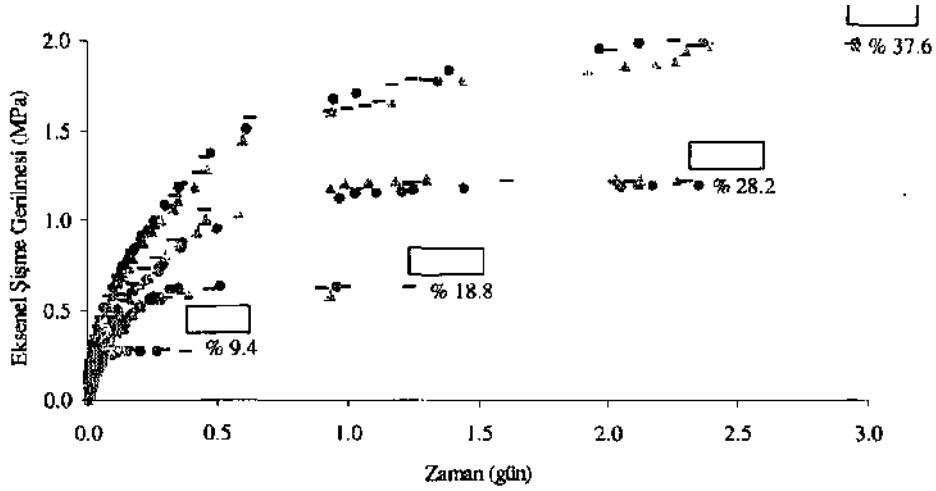
- Başlangıçta çok sık olmak üzere belirli zaman aralıklarında şişme miktarı, şişme yükü ve zaman kaydedilir.

- Elde edilen maksimum şişme yükü kesit alanına bölünerek maksimum şişme gerilmesi belirlenir.
- Deney sonunda örneğin su içeriği belirlenir.

% 9.4, % 18.8, % 28.2 ve % 37.6 simektit grubu kil minerali içeren, 50 mm çaplı, çap/yükseklik oranı 2.5 olan 2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yapay örneklerin aksenal şişme gerilmesi ve zaman İlişkisi Şekil 5'de gösterilmektedir.

Eksenal serbest şişme birim deformasyonu deneyinin amacı, radyal yönde kısıtlanmış olan örneğin su ile temasa geçmesiyle düşey yöndeki serbest şişme birim deformasyonunun ölçülmesidir. Örnekteki radyal birim deformasyonlar ölçülememiştir. Çünkü, yapay örneğin su ile doğrudan teması örneğin hızlı bir şekilde dağılmasına neden olmuştur. Deneyin yapılmasında aşağıdaki işlemler dizisi uygulanır;

- Su kabının tabanına üzerinde filtre kağıdı olan poroz taş yerleştirilir.
- Örnek çelik halka içine yerleştirilerek filtre kağıdının üzerine oturtulur. Filtre kağıdının kullanılmasının amacı, kil tanelerinin poroz taşın gözeneklerini kapatmasını engellemektir.
- Örneğin üzerine de sırasıyla filtre kağıdı ve içinde poroz taş bulunan başlık konulur.
- 4 adet kenetleme çubuğu su kabının tabanına monte edilir. Kenetleme çubuklarına geçen somunlar vasıtasıyla çelik halka sıkıştırılarak sabitlenir. Aksi takdirde örnek çelik halkayı kaldırarak hatalı sonuçların ölçülmesine neden olmaktadır.



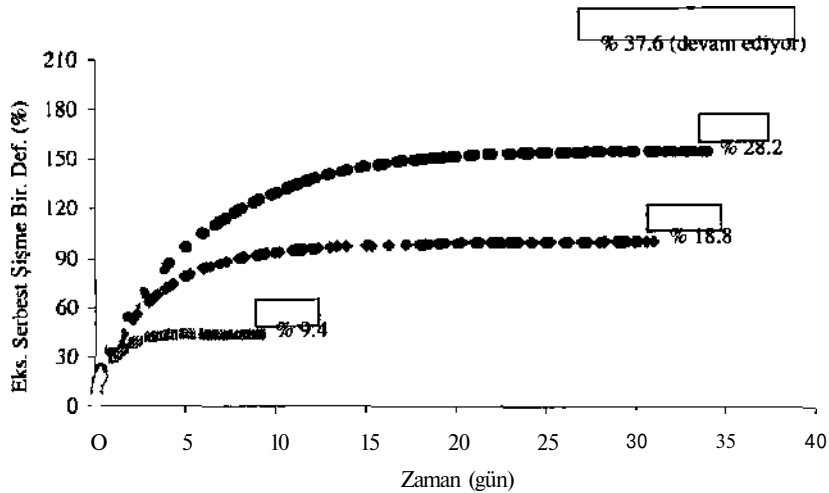
Şekil 5. Simektit içeriğine bağlı olarak eksenel şişme gerilmesinin zamanla değişimi.

Komparatör, örneğin üzerine gelecek şekilde sabitlenir ve sıfırlanır.

Deney kabı numunenin yüzeyi tamamen kapanıncaya kadar saf su ile doldurulur ve eksenel serbest şişme yerdeğıştirmeleri zamanın fonksiyonu olarak maksimuma ulaşıncaya veya sabit bir seviyeye kadar kaydedilir.

Ölçülen yerdeğıştirmeler, örneğin ilk kalınlığına bölünerek eksenel serbest şişme birim deformasyonları bulunur.

% 9.4, % 18.8, % 28.2 ve % 37.6 simektit grubu kil minerali İçeren, 54 mm çaplı, çap/yükseklik oranı 2.7 olan 2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki yapay örneklerin eksenel serbest şişme birim deformasyonu ve zaman ilişkisi Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Simektit içeriğine bağlı olarak eksenel serbest şişme birim deformatiyonunun zamanla değişimi.

Ayrıca örneklerin su içeriği, likit limit ve plastik indeks ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de limit gibi indeks özellikleri de belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen şişme verilen ile örneklerin verilmektedir.

Çizelge 1 Simektit içeriğine göre şişme deney verilen ile yapay örneklerin indeks ve fiziksel özellikleri.

Simektit İçeriği (%)		9 4			18 8			28 2			37 6		
İndeks özellikleri	LL	54 9			100 7			157 4			210 3		
	PL	31 5			32 6			33 3			34 9		
	PI	23 4			68 1			124 1			175 4		
Mak. Eksenel Şişme Gerilmesi (MPa)		0 267	0 270	0 274	0 624	0 578	0 624	1 213	1 188	1 216	1 966	1 987	1 976
Su içeriği, w (%)	w <sub>lik</sub>	1 77	1 66	1 73	1 76	1 89	1 89	2 87	3 70	3 50	3 94	3 95	3 88
	w <sub>serb</sub>	13 57	13 52	13 39	13 80	13 42	13 65	13 98	14 09	14 09	14 33	14 13	14 68
	Δw	11 80	11 86	11 66	12 04	11 53	11 76	11 11	10 39	10 59	10 39	10 18	10 80
Yoğunluk, d (gr/cm <sup>3</sup> )		2 00	2 00	1 99	2 00	1 99	1 99	2 00	2 00	2 01	2 01	2 01	2 00
Çap, R (cm)		5 0											
Yükseklik, h (cm)		2 00	2 00	2 00	2 00	2 00	2 01	2 00	2 00	1 99	1 99	1 99	2 00
Çap/Yükseklik, (R/h)		2 50	2 50	2 50	2 50	2 50	2 49	2 50	2 50	2 51	2 51	2 51	2 50
Mak. Eks. Serbest Şişme Birim Def. (%)		44 05			100 24			154 97			200 36		
Su içeriği, w (%)	w <sub>lik</sub>	1 95			2 74			3 76			4 23		
	w <sub>serb</sub>	39 45			69 82			103 17					
	Δw	37 50			67 08			99 41					
Yoğunluk, d (gr/cm <sup>3</sup> )		2 00			2 00			1 99			2 02		
Çap, R (cm)		5 4											
Yükseklik, h (cm)		2 00			2 00			2 01			1 98		
Çap/Yükseklik, (R/h)		2 70			2 70			2 69			2 73		

LL Likit Limit, PL\* PlaMik Limit, PI Plastisite İndisi

## 5 VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şişme deneylerinde yapay örneklerin kullanılması benzer örneklerin hazırlanmasına olanak vermiş böylece şişme davranışına etki eden belirsizliklerin en aza indirilmesi sağlanmıştır.

Her bir simektit içeriğinde odometre deneyi için 3'er adet, eksenel serbest şişme birim deformasyonu deneyi için 1'er adet deney gerçekleştirilmiştir. % 37.6 simektit içeriğindeki örneğin eksenel serbest şişme birim deformasyonu henüz tamamlanmamakla birlikte deneyin sonuna yaklaşmıştır. Eksenel serbest şişme birim deformasyonu deneyi, aynı simektit içerikleri için 2 kez daha tekrarlanacaktır. Buradaki sıkıntı deney düzeneği sayısının 2 olmasından kaynaklanmaktadır. Uzun süren şişme deneylerinde düzenek sayısı en az 3 olmalıdır.

Maksimum eksenel şişme gerilmesi (O<sub>s</sub>) ve simektit içeriği arasında (I) eşitliğiyle verilen ilişki bulunmuştur (Şek. 7)

$$O_s = 0.01 * S_i^{1.437} \quad R^2 = 0.98 \quad (D)$$

Buna göre simektit içeriğindeki artış, maksimum eksenel şişme gerilmesini arttırmaktadır. Simektit içeriği artmasına rağmen, maksimum eksenel şişme gerilmesine ulaşıldığı andaki su içeriği değişiminde net bir artış görülmemektedir. Bu değer, ortalama % U.18'dir.

Maksimum eksenel serbest şişme birim deformasyonu (&) ve simektit içeriği arasında aşağıdaki eşitlikle verilen ilişki bulunmuştur (Şek. 8).

$$e_s = 5.64 * S_i - 7.19 \quad R^2 = 0.99 \quad (2)$$

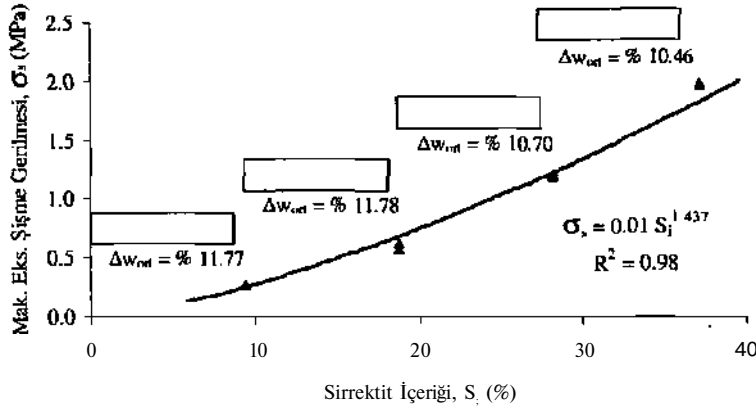
Buna göre simektit içeriği arttıkça, maksimum eksenel serbest şişme birim deformasyonu ve su içeriği değişimi artmaktadır.

% 37.6 simektit içeriğinde, maksimum eksenel şişme gerilmesi ortalama olarak 1.98 MPa, maksimum eksenel serbest şişme birim deformasyonu % 200 bulunmuştur. Graham et.al. (1986), farklı bentonit ve kum karışımına sahip yapay örneklerin eksenel şişme gerilmesinin 0.6 - 3.0 MPa arasında değiştiğini belirtmektedir. Bu değerler önlem alınmadığı takdirde şişen

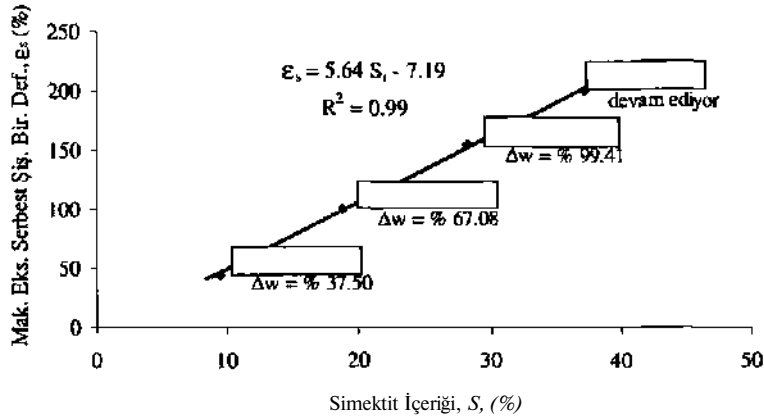
>rtamlarda oluşturulacak mühendislik yapılarında ciddi problemler oluşuracağına bir göstergesidir.

Odometre deneylerinde maksimum aksel şişme gerilmesine ulaşma süresi simektit içeriğine bağlı olarak 0.15 - 2.5 gün arasındadır. Aksel serbest şişme birim deformasyonunun belirlendiği deneylerde maksimum ulaşma süresi ise 3.5 - 35 gün arasında değişmektedir. Simektit içeriğinde % 37.6'dan sonraki

artış bu süreyi daha da arttıracaktır. Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi şişme eğrilerindeki veri boşlukları deneylerin aralıksız devam etmesi ve gece saatlerinde veri kaydedilememesi nedeniyle oluşmuştur. Şişme deneylerinde kullanılacak ölçerlerin elektronik olması ve örnek üzerine yükün otomatik olarak uygulanması deneylerin yürütülmesini ve veri kaydını oldukça kolaylaştıracaktır.



Şekil 7. Simektit içeriği ile maksimum aksel şişme gerilmesi arasındaki ilişki.



Şekil 8. Simektit içeriği ile maksimum aksel serbest şişme birim deformasyonu arasındaki ilişki.

## 6 SONUÇLAR

Farklı simektit içeriğinde hazırlanmış yapılar Örneklerin şişme verileri ve su içeriği değişiminin incelendiği bu çalışmada, elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Simektit içeriği arttıkça maksimum aksel şişme gerilmesi ve maksimum aksel şişme birim deformasyonu artmaktadır.
- Odometre deneyindeki tüm örnekler, ortalama % 11.18'lik su içeriği değişimiyle maksimum aksel şişme gerilmesine ulaşmaktadır. Simektit içeriğindeki artış, maksimum aksel serbest

şişme birim deformasyonuna ulaşmak için gerekli su miktarını arttırmaktadır.

- Maksimum eksene! şişme gerilmesi, maksimum aksenal şişme birim deformasyonuna göre daha kısa sürede belirlenebilmektedir.
- Şişen mineraller içeren ortamlarda oluşturulacak mühendislik yapılarının tasarımı için şişme verilerinin mutlaka belirlenmesi gereklidir.
- Şişme gerilmelerinin belirlendiği deneylerde ölçerlerin ve yük uygulama mekanizmasının mekanik olması, deneylerin hassas bir şekilde yürütülmesini ve veri kaydını zorlaştıran bir etkidir.
- Şişme deneylerinin uzun süreli deneyler olması nedeniyle kullanılacak düzenek sayısının fazla olması, araştırmaların daha çabuk sonuçlanmasında çok etkili olacaktır.

## 7 KAYNAKLAR

- Bilir, M. E., Müftüoğlu, Y. V., 2002. Şişme deney düzenekleri, 6. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Konya, s. 155-162
- Graham, J., Gray, M. N., Sun, B.C., Dixon, D. A., 1986, Strength and volume change characteristics of a sand - bentonite buffer. *Proc. 21st Int. Con. On Radioactive Waste Management*, Winnipeg, Man., pp. 188 - 194.
- ISRM, 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability indeks properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.*, Vol: 16, No: 2, pp. 141 - 156..
- ISRM, 1989. Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr.*, Vol: 26, No: 5, pp. 415 -426.
- Yeşil, M. M.. 1991, *Determination of Three Dimensional Swelling Characteristics of Clay Bearing Rocks*, A Doctor of Philosophy Thesis in Mining Engineering. METU, Ankara, 109 p.