

PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN MAGNEZYUM KLORÜR SOLÜSYONU İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Murat TÜRKÖZ, Hasan SAVAŞ ve Hasan TOSUN

İnşaat Müh. Bölümü, Müh.Mim.Fak., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 26480, Eskişehir.

mturkoz@ogu.edu.tr, hsavas@ogu.edu.tr, htosun@ogu.edu.tr

(Geliş/Received: 02.06.2010; Kabul/Accepted: 22.12.2010)

ÖZET

Problemlı zeminler olarak tanımlanan dispersif özelliğı ve şişme potansiyeline sahip kil zeminler, bu özellikleri nedeni ile mühendislik yapılarında önemli problemlere neden olmaktadır. Zeminlerin bazı özelliklerinin iyileştirilmesinde olduğu gibi şişme potansiyelinin ve dispersibilite özelliğinin kontrol edilmesinde farklı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, magnezyum klorür solüsyonunun kil zeminlerin şişme potansiyeli ve dispersibilite karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, Afyon illinden elde edilen üç değişik zemin numunesi üzerinde tanımlama ve kompaksiyon deneyleri öncelikli olarak yapılmıştır. Numunelerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde şişme yüzdesi deneyleri, dispersibilite özelliklerinin değerlendirilmesinde de iğne deliğı deneyi, dağılma deneyi, çifte hidrometri deneyi ve kimyasal deneyler yapılmıştır. Dispersif özelliğı ve şişme potansiyeline sahip bu numunelerin magnezyum klorür solüsyonu kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Katkının etkisini değerlendirmek için standart Proctor enerjisinde ve farklı magnezyum klorür katkı oranlarında (% 0, 1, 3, 5, 7, 10) hazırlanan numuneler üzerinde şişme ve dispersibilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, problemlı kil zeminlerin iyileştirilmesinde magnezyum klorür solüsyonun kullanılabilceğı ve özellikle %7 katkı oranından sonra etkin bir iyileştirme sağlandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dispersif zemin, şişen zemin, magnezyum klorür solüsyonu, kil.

STABILIZATION OF PROBLAMATIC CLAY SOILS WITH MAGNESIUM CHLORIDE SOLUTION

ABSTRACT

Problematic clay soils having dispersibility and swell characteristics have caused major problems in many engineering structures. Different additives are used in controlling the swelling potential and dispersibility property as well as improving some of the properties of the soils. In this study, the effect of magnesium chloride solution on the characteristic of dispersibility and swelling potential of clay soils were investigated. For this purpose, identification and compaction tests were carried out on the three different soil samples obtained from Afyon province as a priority. Swell percentage tests for the determination of swelling potential, and also pinhole test, crumb test, double hydrometer test and chemical test in the evaluation of dispersibility properties were performed on these samples. These samples with swelling potential and dispersive characteristics are intended to be improved with magnesium chloride solution. Swell and dispersibility tests are performed on the specimens prepared by standard Proctor energy and with different levels of magnesium chloride admixtures (% 0, 1, 3, 5, 7, 10) to evaluate the effect of additive. As a result of this study, it is shown that the stabilization of problematic clay soils can sufficiently be provided using the magnesium chloride solution and the significant effect of the admixtures is possible after the addition of 7 percent the magnesium chloride solution.

Keywords: Dispersive soil, swelling soil, magnesium chloride solution, clay.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toprak yapılarında meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken [1], hafif yapılarında oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir [2].

Şişen zeminler, mühendislik yapıları için büyük hasara sebep olan dünya çapında bir problemdir. Önemli hasara neden olan şişen zemin probleminin başlıca sebeplerinden biri, zeminin şişme-büzülme davranışdır. Bu zeminler üzerinde inşa edilen temellerin zeminin ıslanma ve kuruma çevrimiyle ilişkili olarak yukarı ve aşağı hareketi, yapıda yorgunluğa ve çatlamaya sebep olmaktadır. Çok sayıda ülkede şişen zemin problemine bağlı olarak ortaya çıkan hasarlarla ilgili çalışmalar yapılmış ve tasarım kriterleri önerilmiştir [3-8]. Şişen zeminler üzerine inşa edilen hafif yapılarında ve kaplamalarda şişme davranışının neden olduğu hasarlar, deprem ve sel gibi doğal felaketlerin neden olduğu hasarlara oranla daha büyük olmaktadır. Bunun bir örneği olarak yalnızca Amerika Birleşik Devleti'nde şişen zeminlerin neden olduğu ekonomik kaybın yıllık 10 milyar doları aştığı belirtilmektedir [9].

Dispersif zeminlerin neden olduğu borulanma sonucunda hasar gören ve göçmeye maruz kalan çok sayıda toprak baraj olduğu ifade edilmiştir [1]. 1885–1951 yılları arasında göçen ve kayıtlara geçen 214 toprak barajın yaklaşık % 25'nin hasar ve göçme nedeni olarak borulanma gösterilmiştir [10].

Mühendislik yapılarında neden oldukları hasarlar nedeniyle, şişen ve dispersif zeminlerin farklı içerikli katkıları kullanılarak iyileştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar uzun yıllardan beri yapılmaktadır [11, 12]. Kil zeminlerin bu özelliklerinin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntem; kireç, çimento, jips, endüstriyel atıklar, kalsiyum klorür solüsyonu ve uçucu kül gibi katkıları kullanılarak yapılan kimyasal iyileştirmelerdir. Buna karşın, bu tip zeminlerin katkılarıyla iyileştirilmesine yönelik literatürde her bir zemin tipi için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır [13-15,]. Örneğin, Çokça [16] şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan kireç ve çimento katkılarına ilaveten uçucu kül katkısının etkisini araştırmıştır. %8 kireç katkısının zeminin şişme potansiyelinde yarattığı olumlu etki, yaklaşık %20 uçucu kül katkı oranında elde edilmiştir. Bhuvaneshwari vd. [17] dispersif özellik gösteren zeminlerin %5 kireç ve %2 kireç katkısına ilaveten %15 uçucu kül katkı oranlarında iyileştirilebileceğini ifade etmişlerdir. Her ne kadar birbirlerine göre göreceli olarak etkin bir şekilde kullanılsalar da bu sıvı veya katı olarak kullanılan kimyasal maddelerin yollara, yapıların metal aksamlarına ve çevreye verdikleri zararlar uzun yıllardır bilinmektedir [15]. Katkıların ifade edilen olumsuz etkileri araştırmacıları alternatif katkıları

aramaya yönetmiştir. Günümüzde bu yöntemler; verimliliği, ekonomisi ve kolay uygulanabilirliği yönünden değerlendirilmekte ve kullanılmaktadır.

Literatür araştırmaları incelendiğinde dispersif veya şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan katkıların benzer olduğu görülmektedir. Bu araştırmada ise, diğer çalışmalardan farklı olarak, iyileştirme amaçlı kullanılan solüsyon halindeki magnezyum klorür katkısının kil zeminlerin hem şişme hem de dispersibilite karakteristikleri üzerindeki etkisi birlikte değerlendirilmeye çalışılmıştır.

2. DISPERSİYON VE ŞİŞME MEKANİZMASI (MECHANISM OF DISPERSION AND SWELL)

Dispersiyon ve şişme mekanizması üzerinde etkin bir rol oynayan kil yapısı, tek bir şekilde tanımlanabilen durumla açıklanamayacak kadar karmaşıktır. Kil zemin yapısı, kil minerallerinin adsorbe ettiği değişebilir katyonlar, ortamda var olan katyonların değeri, konsantrasyonu, boyutu ve hidrasyon özelliğine ilaveten sıkıştırma su muhtevası, pH değeri ve kompaksiyon yöntemlerinden etkilenmektedir [18].

Dispersiyon, zemin tanelerinin su içinde dağılma işlemidir. İki kil partikülü birbirine yaklaştığında potansiyel çekim alanlarının çakışması gerçekleşir. Kil partikülleri oldukça yakınsa itici kuvvetler oluşur ve itici kuvvetlere Van der Waals çekim kuvvetleri tarafından karşı konulur. Eğer itici kuvvetler çekim kuvvetlerinden büyükse zemin dispersif davranış gösterir. Bu durumda bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer [19]. Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil zemin kütlelerinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur [20]. Kil mineral yüzeylerindeki değişebilir sodyum miktarı, dispersif davranışı belirleyen en önemli kimyasal faktör olarak gösterilmektedir [21].

Tosun [20] dispersif killerden inşa edilen bir dolgu içinde kaçak su olduğu zaman, gelişecek mekanizmayı iki ayrı aksiyon şeklinde özetlemiştir: (1) Eğer sızıntı hızı düşük ise, akış kanalını çevreleyen kil şişebilir ve zamanla kaçak önlenir, (2) Eğer suyun başlangıçtaki hızı yeterince yüksek ise, ayrılan kil parçacıkları uzaklara taşınır. Kilin şişme hızından daha yüksek bir hızdaki akım, akış kanalını genişletir ve sonuç olarak borulanma göçmesine neden olur [20]. Bu tip göçme mekanizmasında, dolguda kullanılan zeminin dispersibilite özelliği kadar, şişme potansiyeli de etkili olur.

Şişme, kil mineral yüzeyleri etrafında oluşan dağınık çift katman (DDL) ve serbest su arasındaki kimyasal potansiyel değişiminin sebep olduğu ozmotik basınç nedeniyle oluşur [3]. Yüzeylerinde negatif elektrik

Tablo 1. Numunelerin tanımlama deney sonuçları (Identification test results of the samples)

Numune No	<0.076 mm	<4.76 mm	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Özgül Ağırlık	Grup Sembolü
1	86,9	100	68	33	35	2,61	CH
2	71,6	100	46	24	22	2,65	CL
3	74,4	100	30	19	11	2,68	CL

yüklerine sahip kil minerallerinin boşluklardaki pozitif iyonları elektrostatik çekim kuvvetleriyle çekmesi, DDL etraflarında iyon yoğunlaşmasına neden olur. Dağınık çift katmanların örtüşümü veya üst üste binmesi sonucunda taneler arasında oluşan itici kuvvetler neticesinde şişme oluşur [22]. Kil taneleri arasındaki dağınık çift tabakaların örtüşümü taneler arasında itici kuvvetlerin, şişme basınçlarının oluşmasına neden olur ve şişme potansiyeli DDL'nin kalınlığı arttığı oranda artar. Genellikle daha kalın DDL tabakası ve nihayetinde daha büyük dispersiyon ve şişme, daha düşük katyon konsantrasyonu veya düşük değerlikli katyonların varlığında görülür [19]. Bu nedenle, büyük şişme potansiyeli bünyesinde Ca^{+2} veya Mg^{+2} iyonlarına oranla değişebilir Na^{+} katyonu içeren zeminlerde olmaktadır. Şişme davranışı zeminlerin dispersiyonunu tetikleyen bir mekanizmadır. Zeminlerde oluşan şişme sonucunda kil partikülleri arasındaki bağın zayıflamasına bağlı olarak eğer net çekim kuvvetleri tanelerin birbirinden ayrılmasına engel olacak düzeyde ise zeminde şişme, değilse dispersiyon mekanizması hakim olmaktadır.

Tablo 2. Numunelerin kompaksiyon karakteristikleri (Compaction characteristics of the samples)

Numune No	Kompaksiyon Karakteristikleri	
	$\rho_{dmaks}(Mg/m^3)^{(*)}$	$W_{opt}(\%)^{(**)}$
1	1,448	23,2
2	1,537	21,0
3	1,608	18,2

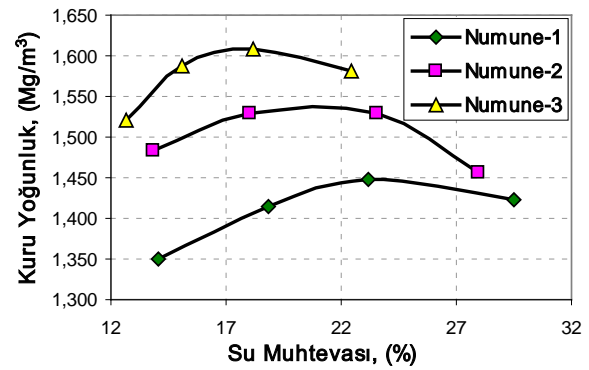
(*) En Büyük Kuru Yoğunluk (**) Optimum Su Muhtevası

3. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

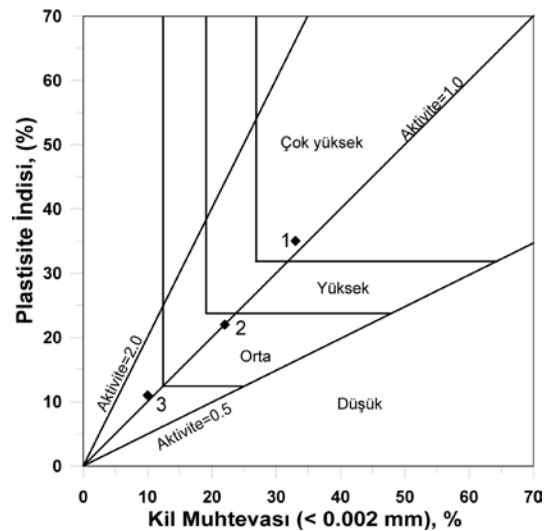
Çalışma kapsamında Afyon ilindeki kil ocaklarından alınan numuneler üzerinde ilk olarak tanımlama ve sınıflama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir numune için elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri ve özgül ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ilgili standart yöntemlere uyulmuştur [23-25]. Kompaksiyon karakteristikleri standart Proctor enerji seviyesinde elde edilmiştir. Tablo 1'de numunelere ait tanımlama deney sonuçları sunulmaktadır.

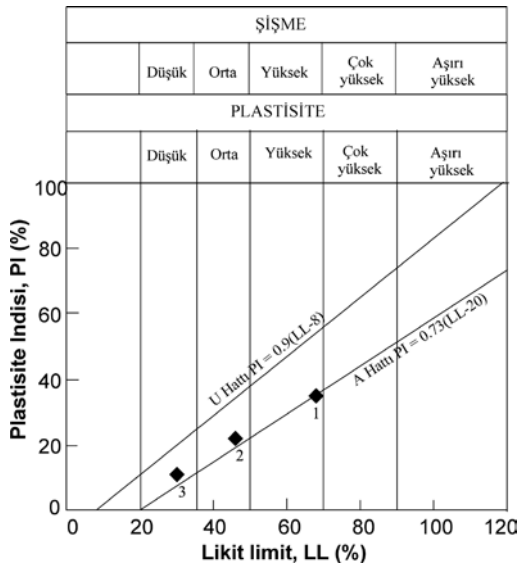
Tanımlama deney sonuçlarına bağlı olarak numuneler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne

(USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) ve düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Numunelerin likit limit değerleri % 30-68 ve plastisite indisi değerleri % 11-35 arasında değişmektedir. Standart Proctor enerji seviyesinde yapılan kompaksiyon karakteristiklerine ait deney sonuçları Tablo 2'de, kompaksiyon eğrileri Şekil 1'de verilmektedir.

**Şekil 1.** Numunelere ait kompaksiyon eğrileri (Compaction curves of the samples)

Numunelerin tanımlama deney sonuçlarından elde edilen parametreler şişme potansiyelinin tanımlanması ve sınıflanmasında kullanılmaktadır. Buna karşın, dispersif zeminlerin, tanımlama deney sonuçlarına bağlı olarak belirlenmesine ve sınıflanmasına yönelik her hangi bir standart yöntem bulunmamaktadır.

**Şekil 2.** Şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan Van der Merwe tarafından önerilen sınıflama kartı [26] (Classification chart used for determining swelling potential proposed by Van der Merwe)



Şekil 3. Numunelerin dönüştürülmüş plastisite kartındaki yerleri [27] (Samples on modified plasticity chart).

Tanımlama deney sonuçlarından elde edilen fiziksel özellikler şişme potansiyelinin öncelikli göstergesi olması açısından değerlendirildiğinde, Şekil 2 ve Şekil 3'deki ilişkiler elde edilmiştir. Van der Merwe [26] tarafından önerilen şişme potansiyelinin sınıflandırmasında kullanılan kart esasında değerlendirme yapıldığında numune 1, 2 ve 3'ün sırasıyla; çok yüksek, orta ve düşük şişme potansiyelinde sahip oldukları görülmektedir (Şekil 2).

Tablo 3. Magnezyum klorür solüsyonun özellikleri (Properties of magnesium chloride solution)

Özellik	Miktar
Renk/Görünüm	Amber/Berrak
Baume derecesi	35,50
Yoğunluk, (g/cm ³)	1,320
H ₂ O, (%)	57,00
Katı Madde, (%)	43,00
Katı Maddedeki MgCl ₂ , (%)	94,00

Numunelerin dönüştürülmüş plastisite kartındaki yerleri değerlendirildiğinde de numune 1, 2 ve 3'ün sırasıyla; yüksek, orta ve düşük şişme potansiyelinde sahip oldukları görülebilmektedir (Şekil 3).

Numunelerin şişme ve dispersiyon özelliklerine magnezyum klorür (MgCl₂) solüsyonunun etkisinin araştırıldığı bu çalışmada kullanılan magnezyum klorür solüsyonunun özellikleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Numunelerin dispersif ve şişme özellikleri belirlendikten sonra bu özelliklerin katkı ilavesi ile değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneyler, numunelerin kuru ağırlık yüzdeleri esas alınarak %0, 1, 3, 5, 7,10 MgCl₂ katkı oranlarında hazırlanan örnekler üzerinde yapılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

4.1. Dispersibilite Deneyleri (Dispersibility Tests)

Çalışma kapsamında kullanılan örneklerin dispersibilite özelliklerinin belirlenmesi amacı ile iğne deliği deneyi, dağılma deneyi, çifte hidrometri deneyi ve kimyasal deneyler ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) standart yöntemleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir [28-30]. Bu deneylerden en güvenilir olarak kabul edilen iğne deliği deneyi, kil zeminlerin dispersibilite özelliğinin değerlendirilmesi için önerilmiş fiziksel ve nicel sonuçlar sunan bir deney yöntemidir. Deneyde, standart Proctor enerji seviyesinde sıkıştırılmış 25 mm boya sahip ve 35 mm çapındaki silindirik zemin numunesi içine 1,0 mm çapında bir delik açılır. Saf su; 50, 180 ve 380 mm (Hidrolik eğimleri yaklaşık 2, 7 ve 15) yük altında bu delikten geçirilir. Suyun akım debisi ve bulanıklılık derecesi kaydedilir. Tablo 4'te iğne deliği deneyinin yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik aşamalar ve Şekil 4'te de deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi gösterilmektedir.

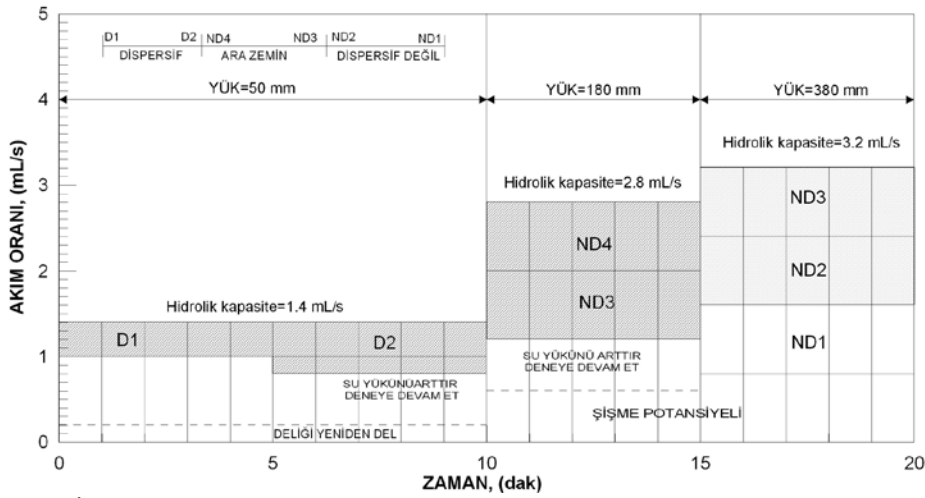
Çalışma kapsamında yapılan iğne deliği deneyleri, TÜBİTAK tarafından desteklenen bir projede kapsamında geliştirilmiş olan yeni iğne deliği deney sisteminde yapılmıştır. Bu sistemde, deney esnasındaki su yükleri ve akım debisi elektronik ekipmanlar kullanılarak kontrol edilmekte ve elde edilen bilgiler dijital ortamda depolanabilmektedir [32].

Dağılma deneyi, killi zeminlerin potansiyel erozyona uğrayabilme özelliğinin belirlenmesi amacıyla nitel sonuçlara dayalı sonuçlar vermektedir. Bazen bir dispersif zemin, bu deney sonuçlarına göre "dispersif olmayan zemin" olarak sınıflanabilmektedir. Ancak, bir zemin numunesi üzerinde yapılan dağılma deneyi sonuçları, zemini dispersif olarak belirtmişse, zemin büyük bir olasılıkla dispersiftir. Dispersif killerin arazideki davranışını belirlemek amacıyla geliştirilen dağılma deneyi, tabii su muhtevasında 15 mm kenar uzunluğunda hazırlanan küp numuneler veya eşit hacme sahip tabii su muhtevasındaki zemin parçası üzerinde yapılır. Numune 250 mL hacmindeki porselen kap içinde bulunan saf su içine yerleştirilir. Zeminin su ile reaksiyona girmesi ile kolloidal (<0,002 mm) boyutundaki parçacıklar ayrılmaya başlar ve su içinde süspansiyon haline geçer. Belli zaman aralıklarında gözlemler yapılarak sınıflama yapılır [28].

Çifte hidrometre deneyi; kil zeminlerin dispersiyonunu belirlemek amacıyla geliştirilmiş ilk yöntemlerden biridir. Günümüzde de kullanılan bu deney, standart bir yöntem haline dönüşmüştür. Tane büyüklüğü dağılımı, başlangıçta standart hidrometre

Tablo 4. İğne deliği deneyi deney yöntemi [30] (Summary of Pinhole test).

Yük (mm)	Toplam zaman aralığı (dak)	Akım debisi (mL/s)	Bulanıklık Derecesi	Deney aksiyonu	Dispersiyon sınıfı
50	5	<1,0	Koyu – temiz	50 mm'de devam et	-
50	5	1,0-1,4	Koyu – bulanık	Deneyi bitir	D1
50	10	0,2-0,8	Temiz – çok az bulanık	180 mm'ye yükselt	-
50	10	0,8-1,4	Koyu – çok az bulanık	Deneyi bitir	D2 (1,0-1,4) ND4 (0,8-1,0)
180	5	0,6-1,2	Temiz – çok az bulanık	380 mm'ye yükselt	-
180	5	1,2-2,8	Temiz – çok az bulanık	Deneyi bitir	ND3 (1,2-2,0) ND4 (2,0-2,8)
380	5	0,8-2,4	Temiz – çok az bulanık	Deneyi bitir	ND1 (0,8-1,6) ND2 (1,6-2,4)
380	5	2,4-3,2	Koyu - bulanık	Deneyi bitir	ND3

**Şekil 4.** İğne deliği deney sonuçlarının değerlendirilmesi [31] (Evaluation of Pinhole test results).

deneyi kullanılarak belirlenir. Bunun için kuvvetli bir mekanik karıştırıcı ile bir kimyasal ayrıştırıcı kullanılmalıdır.

Aynı zeminden hazırlanmış bir başka numune üzerinde de, mekanik karıştırıcı olmaksızın ve kimyasal ayrıştırıcı kullanmaksızın aynı deney yeniden yapılır ve her iki numunenin de tane dağılım eğrileri çizilerek deney tamamlanır. Deney sonuçlarına bağlı olarak “dispersiyon yüzdesi” tanımı getirilmiştir (Tablo 5). Bu yüzde; ikinci deneye ait 0,005 mm’den küçük tanelerin kuru ağırlık yüzdesinin, birinci deneyde bulunan aynı değere oranı olarak tanımlanır [29]. Çalışmada çifte hidrometre deneyleri, deney standardına bağlı kalınarak sadece katkısız numuneler üzerinde yapılmış olup, katkılı numunelerde yapılmamıştır.

Tablo 5. Dispersiyon yüzdesine bağlı nitel sınıflama (Qualitative classification on the basis of dispersion percent).

Dispersiyon Yüzdesi	Dispersiyon Derecesi
< 30	Dispersif değil
30 – 50	Geçiş zemini (orta)
> 50	Dispersif

4.2. Şişme Deneyleri (Swell Tests)

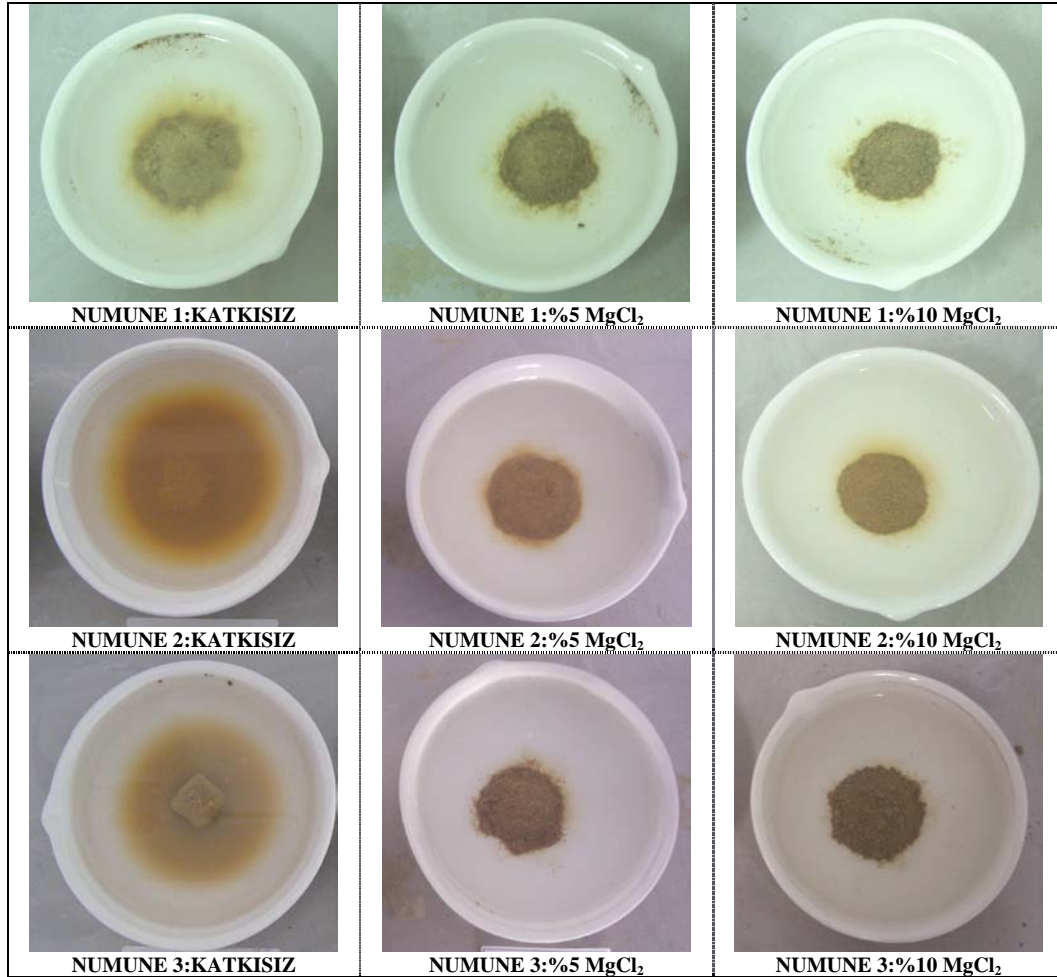
Kil zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan en uygun ve en başarılı yöntemler doğrudan ölçümlerdir [2]. Bu yöntemler; serbest şişme, genleşme indisi (EI), potansiyel hacim değişimi (PVC) ve ödometre deney yöntemlerinin laboratuvar şartlarında değerlendirilmesidir.

Şişme yüzdesinin belirlenmesinde kullanılan genleşme indisi deneyi ASTM D4829-88 standartlarına uygun olarak yapılmıştır [33]. Şişme yüzdesi, 7 kPa basınç altında suya boğulan numunenin 24 saat veya şişme tamamlanana kadar gelişen nihai deformasyonun, numunenin başlangıç boyuna oranı olarak tanımlanır. Bu esasa, genleşme indisi ölçüm ekipmanı kalıbı dönüştürülmüştür. 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde ince cidarlı halka içine alınan numunelerin üzerine 7 kPa’lık basınç oluşturacak ağırlık imal edilmiştir. Numunelerin suya boğulmasından hemen sonra, farklı zaman aralıklarında (0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, 240, 360 1440 dakika) şişme yüzdesi bu amaç için tasarlanmış sisteme bağlı bulunan dijital deformasyon saatleri kullanılarak ölçülmüştür.

Tablo 6. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları (Chemical analysis test results of the samples)

Numune No	İletkenlik (mmhos/cm)	pH	TDS ^(*) (meq/L)	Na (%)	SAR	ESP (%)
1	20,600	8,55	143,19	92,30	56,36	33,85
2	9,920	9,04	69,25	95,42	53,95	46,20
3	13,190	10,72	105,64	98,77	129,42	44,94

TDS: Toplam Çözünen Tuz, Na: Sodyum yüzdesi, SAR: Sodyum Adsorpsiyon Oranı, ESP: Değişebilir Sodyum Yüzdesi.

**Şekil 5.** Bazı numunelerin katkı miktarlarına bağlı dağılma deneyi sonuçları (Crumb test results of the some samples having different admixture)

Bu çalışma kapsamında üç ayrı numune için standart Proctor enerjinde ve beş ayrı katkı seviyesinde (% 0, 1, 3, 5, 7 ve 10) hazırlanmış numuneler üzerinde şişme yüzdesi deneyleri direkt yöntem kullanılarak yapılmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (TEST RESULTS AND DISCUSSION)

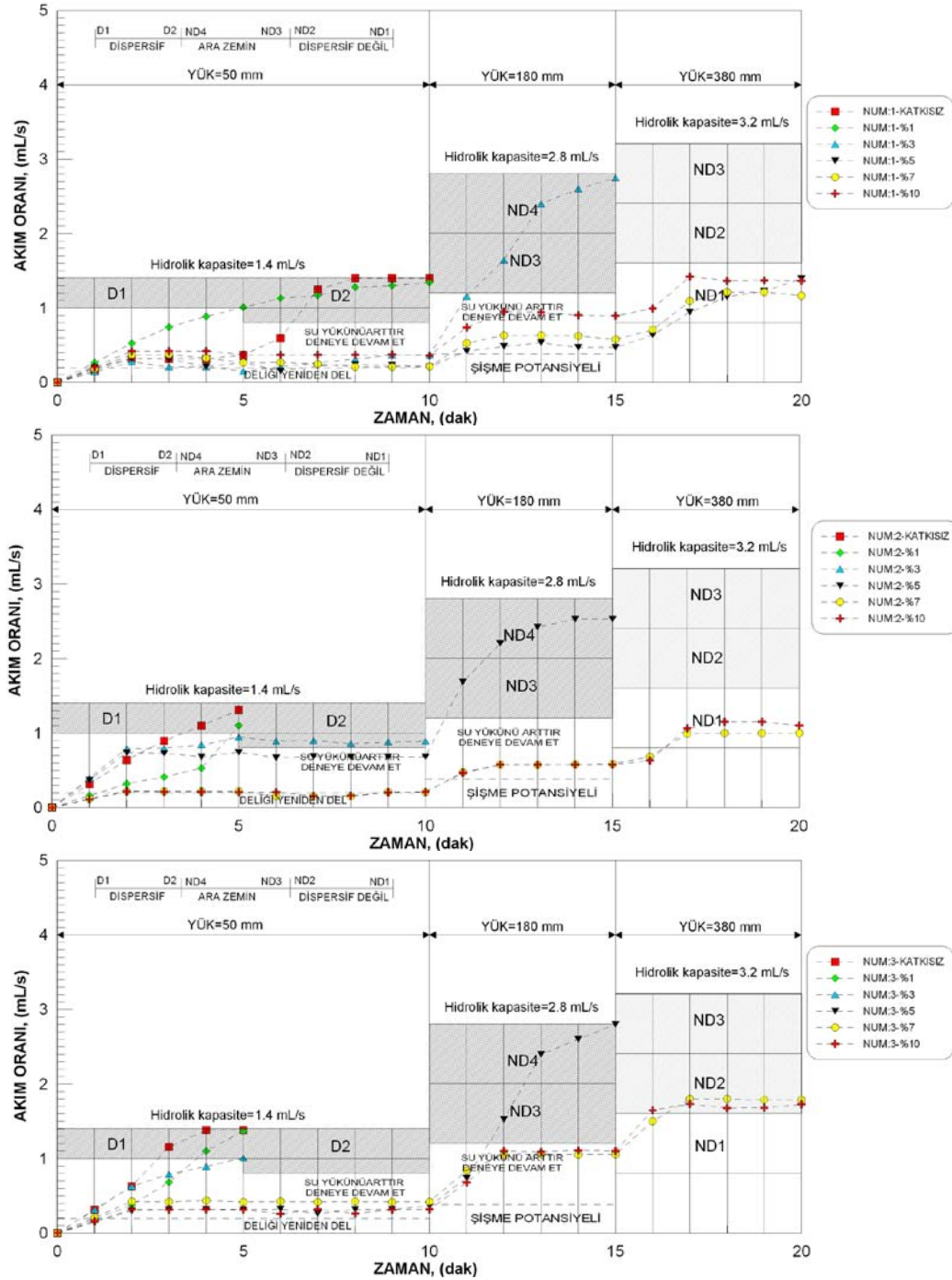
5.1. Dispersibilite Deney Sonuçları (Dispersibility Test Results)

İğne deliği, çifte hidrometri, dağılma deneyleri ve kimyasal analizler kullanılarak katkısız örneklerinin dispersibilite sınıfları belirlenmiştir. Tablo 6'da kimyasal deney sonuçları ve Tablo 7'de fiziksel dispersibilite deney sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 6'dan, dispersif davranışın nedeni olarak gösterilen değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu veriler esasında tüm numuneler "dispersif zemin" olarak tanımlanmıştır. Fiziksel dispersibilite deney sonuçlarına göre (dağılma, çifte hidrometri ve iğne deliği) numunelerin dispersif (D1-D2) özellikte olduğu görülmektedir (Tablo 7).

Tablo 7. Numunelerin fiziksel dispersibilite deney sonuçları (Physical dispersibility test results of the samples)

Numune	Dağılma	Dispersiyon	İğne Deliği
1	K3	67,7	D2
2	K3	75,7	D1
3	K3	57,1	D1



Şekil 6. Numunelerin katkı miktarlarına bağlı iğne deliği deney sonuçları. (Pinhole test results of the samples depending on different admixture levels)

Numunelerin dispersibilite özelliğinin katkı yüzdesine bağlı olarak değişimini incelemek amacı ile dağılım ve iğne deliği deneyleri her bir katkı oranı için ayrı ayrı yapılmıştır. Üç ayrı numune için her bir katkı oranında yapılmış dağılım deney sonuçlarından bazıları Şekil 5’de verilmektedir.

Dağılım deney sonuçlarına göre, numune 2 ve numune 3 sırasıyla % 7 ve %10 katkı oranlarına, numune 1 ise % 5 katkı oranlarında (K1) dispersif olmayan zemin olarak sınıflandırılmıştır.

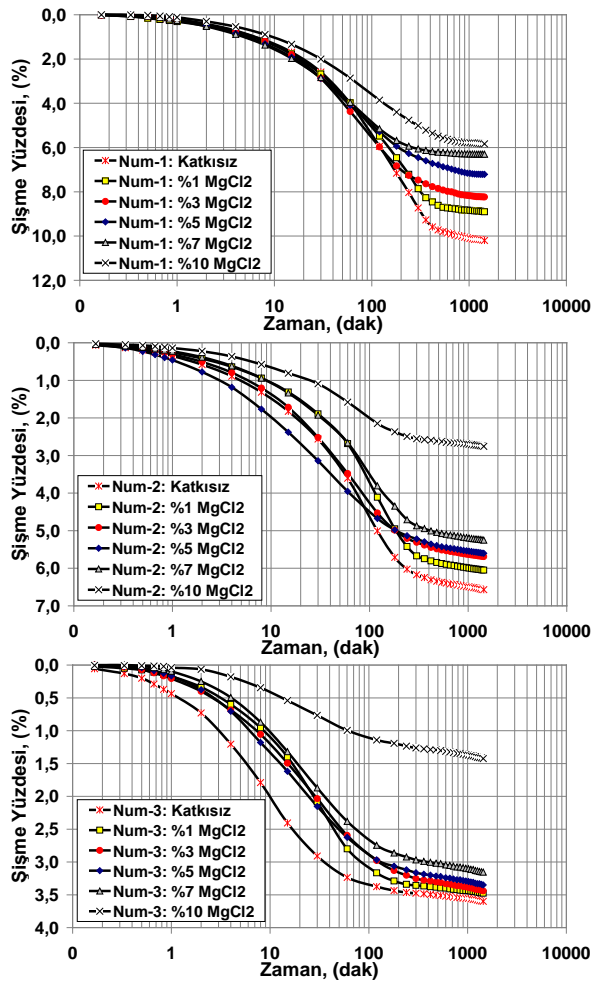
Numunelerin katkı yüzdesine bağlı olarak yapılan iğne deliği deneyinde elde edilen zaman-debi grafiği her bir numune için Şekil 6’da sunulmaktadır.

İğne deliği deney sonuçlarına göre, yüksek plastisiteye sahip olan numune 1, %3 katkı oranında ara zemin (ND4) özelliği gösterirken % 5 katkı oranında dispersif olmayan zemin (ND1) olarak sınıflandırılmıştır. Numune 2 ve numune 3’de ise, %5 katkı oranında ara zemin (ND4) özelliği gösterirken % 7 MgCl₂ katkı oranında, dispersif olmayan zemin (ND1-ND2) özelliği sergilemişlerdir.

Tablo 8. Katkılı numuneler üzerinde yapılan dispersibilite deney sonuçları (Dispersibility test results performed on the samples with admixtures)

Numune No	Yapılan deney	Katkı miktarı (MgCl ₂)					
		0	%1	%3	%5	%7	%10
1	Dağılma deneyi sınıfı	K3	K2	K2	K1	K1	K1
	İğne deliği deney sınıfı	D2	D2	ND4	ND1	ND1	ND1
2	Dağılma deneyi sınıfı	K3	K3	K2	K2	K1	K1
	İğne deliği deney sınıfı	D1	D1	ND4	ND4	ND1	ND1
3	Dağılma deneyi sınıfı	K3	K3	K2	K2	K2	K1
	İğne deliği deney sınıfı	D1	D1	D1	ND4	ND2	ND2

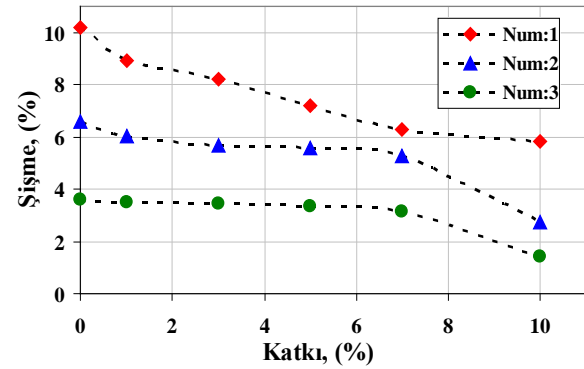
D1 ve D2 : Dispersif, ND3 ve ND4: Ara zemin, ND1 ve ND2: Dispersif olmayan zemin
K3 ve K4: Dispersif, K2: Ara zemin, K1: Dispersif olmayan zemin.

**Şekil 7.** Numuneleri katkı yüzdesine bağlı şişme yüzdesi-zaman ilişkisi (Relationship swell percentage versus time of the samples depending on admixture percent)

Numunelerin dispersif özelliklerinin katkı yüzdesi ile değişimleri Tablo 8'de verilmektedir. Tablo 8'den her üç numunede de katkı oranına bağlı olarak dispersif özelliklerinin iyileştiği görülmektedir. Numunelerin dispersibilite derecelerine bağlı olarak iyileştirme, farklı katkı yüzdeslerinde gerçekleşmiştir.

5.2. Şişme Deney Sonuçları (Swell Test Results)

Farklı katkı yüzdeslerinde yapılan şişme deney sonuçları şişme yüzdesi-zaman ilişkileri Şekil 7'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu deney sonuçlarına bağlı olarak, katkı yüzdeslerinin numunelerin şişme potansiyeli üzerindeki etkisi Şekil 8'de sunulmaktadır.

**Şekil 8.** Şişme yüzdesi- katkı yüzdesi arasındaki ilişkiler. (Relationships swell percentage versus additives percent)

Katkısız durumda, en yüksek şişme değerine yüksek plastisiteli özellik gösteren numune 1 sahip olup, şişme yüzdesi %10,2 olarak elde edilmiştir. Bu numunede artan katkı miktarına bağlı olarak şişme yüzdesinde azalma meydana geldiği, şişme yüzdesinin %7 katkı oranında %6,3 ve %10 katkı oranında %5,8 olduğu bulunmuştur. Diğer bir ifadeyle, %7'den sonraki artan katkı oranında şişme yüzdesinde önemli bir düşüş görülmemiştir. Numune 2'de artan katkı miktarı ile şişme yüzdesindeki azalma düşük olmakla birlikte, %7 katkı oranında şişme yüzdesi %5,3 iken %10 katkı oranında %2,8 olarak elde edilmiştir. Düşük plastisiteli özellik gösteren numune 3'de numune 2'ye benzer bir davranış sergilemiş olup %7 ve %10 katkı oranında şişme yüzdesi değerleri sırasıyla %3,2 ve %1,4 olarak belirlenmiştir.

Şekil 8'de, her üç numunede de artan katkı miktarına bağlı olarak şişme potansiyellerinde düşüşler

görülmüştür. Bu düşüşler numunelerin plastisite karakteristiklerine bağlı olarak, farklı katkı yüzdelerinde gerçekleşmiştir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneysel çalışmada aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- i. Çalışmada kullanılan kil zeminler hem şişme özelliği hem de dispersif özellik taşımaktadırlar. Bu durum özellikle yüksek plastisiteye sahip dispersif kil zeminlerin aynı zamanda yüksek şişme potansiyeline sahip olabileceğini göstermiştir.
- ii. Kıvam karakteristikleri dispersif zeminlerin tanımlanmasında yeterli bilgiyi sağlamamaktadır. Buna karşın, kıvam karakteristikleri zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- iii. Dispersif özelliğin iyileştirilmesinde kullanılan katkı miktarlarının etkinliği değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerlerine bağlı olarak, farklı yüzdelerde gerçekleşmiştir. ESP değerinin diğer numunelere göre düşük olduğu numune 1’de etkin iyileştirme %5 katkı oranında gerçekleşirken, ESP değerleri yaklaşık aynı olan diğer iki numunede ise %7 katkı oranında dispersif özellik iyileştirilmiştir.
- iv. Numunelerin şişme yüzdelerindeki azalmalar, plastisite karakteristiklerine bağlı olarak, farklı katkı yüzdelerinde gerçekleşmiştir. Yüksek plastisiteye sahip olan numune 1’de %7 katkı oranında, düşük plastisiteye sahip diğer numunelerde de %7 katkı oranından sonra şişme potansiyelinde iyileşme sağlanmıştır.
- v. Magnezyum klorür katkısı kil zeminlerin dispersif özellikleri iyileştirilirken şişme yüzdelerini de azaltılmıştır. Bunun nedeni, katkıdaki magnezyumun +2 değerlikte bir iyon olması ve zeminde adsorbe edilen sodyumla yer değiştirebilir özellikte olması olarak değerlendirilmiştir.
- vi. Bu sonuçlar, dispersif ve şişme özelliğine sahip zeminlerde benzer mekanizmalarının etkili olduğunu göstermekte ve nihai olarak iyileştirmede benzer katkıların kullanılabileceğini doğrulamıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. NRC., **Safety of Existing Dams, Evaluation and Improvement**, National Research Council, National Academy Press, 1983.
2. Nelson, J.D and Miller, J.D., **Expansive Soils- Problems and Practice in Foundation and**

Pavement Engineering, J. Willey and Sons, New York, 1992.

3. Parker, C., Amos, D.F., and Kaster, D.L., “An Evaluation of Several Methods of Estimating Soil Volume Change”, **Soil Science Society of America Journal**, Vol.1(41), 1059-1064, 1977.
4. Chen, F.H., **Foundation on Expansive Soils**, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1988.
5. Basma, A.A., Al-Hamoud, A.S., and Husein, A., “Laboratory Assessment of Swelling Pressure of Expansive Soils”, **Applied Clay Science**, Vol.9, 355-365, 1995.
6. Abdullah, W.S., Alshibli, K.A., ve Al-Zou’bi, M.S., “Influence of Pore Water Chemistry on the Swelling Behavior of Compacted Clays”, **Applied Clay Science**, Vol.15, 447-462, 1999.
7. Al-Rawas, A.A., Taha, R., Nelson, J.D., Al-Shap, T.B., and Al-Siyabi, H., “A Comparative Evaluation of Various Additives Used in The Stabilization of Expansive Soils”, **Geotechnical Testing Journal**, Vol 25(2), 199-209, 2002.
8. Shi, H., Jianh, Z., Liu, H., and Y., Fang, “Engineering Geological Characteristics of Expansive Soils in China”, **Engineering Geology**, Vol.67, 63 – 71, 2002.
9. Steinberg M., **Geomembranes and the control of expansive soils in construction**, McGraw-Hill, New York, 1998.
10. Sherard, J.L., Richard, J.W., Gieniski, S.F. and William, A.C., **Earth-rock Dams, Engineering Problems of Design and Construction**, John Wiley and Sons, A.B.D., 1963.
11. Ouhadi, V.R., and Goodarzi, A.R., “Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum”, **Engineering Geology**, Vol.85, 91-101, 2006.
12. Murty, V.R., and Praveen, G.V., “Use of Chemically Stabilized Soil as Cushion Material below Light Weight Structures Founded on Expansive Soils”, **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol.20 (5), 392-400, 2008.
13. Cole, B. A., Ratanasen, C., Maiklad, P. , Liggins, T. B., and Chirapunthu, S., “Dispersive clay in irrigation dams in Thailand.” **ASTM Spec. Tech. Publ.**, 623, 25– 41, 1977.
14. Indraratna, B., “Utilisation of Lime, Slag and Fly Ash For Improvement of a Colluvial Soil in New South Wales, Australia” **Journal of Geotechnical & Geological Engineering**, Vol. 14, 169-191,1996.
15. Biggs, A.J.W. and Mahony, K.M. “Is soil science relevant to road infrastructure?” **13th International Soil Conservation Organization Conference (ISCO) – Brisbane**, Paper No 410, 2004.
16. Çokça, E., “Use of Clay C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soils”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 127(7), 568-573, 2001.

17. Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R.G., and Gandhi, S.R., "Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils", **First International Conference on Soil and Rock Engineering**, Columbo, Srilanka, August 5-11, 2007.
18. Young and Warkentin, B.P., **Introduction to Soil Behavior**, Chapter 7, Macmillan, New York, 1996.
19. Mitchell, J.K., **Fundamentals of Soil Behavior**, John Wiley and Sons, A.B.D., 1993.
20. Tosun, H., "Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi", **DSİ Teknik Bülteni**, Cilt 80, 51-60, 1994.
21. Knodel, P.C., **Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils**, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Materials engineering Branch, Denver, USA, R91-09, p.17, 1991.
22. Bohn, H.L., McNeal, B.L., and O'Connor, G.A., **Soil Chemistry**, John Wiley and Sons, A.B.D., 1985.
23. TS 1500, **İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1987.
24. TS 1900, **İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1987.
25. TS 1901, **İnşaat Mühendisliğinde Sondaj Yolları İle Örselenmiş ve Örselenmemiş Numune Alma Yöntemleri**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1987.
26. Van der Merwe, D.H., "The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction of Soils", **Civil. Eng. South Africa**, 103-107, 1964.
27. Dakshanamurthy, V., and Raman, V., "A Simple Method of Identifying an Expansive Soil. Soils and Foundation", **Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol.13(1), 97-104, 1973.
28. USBR 5400, **Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method**, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 414-418, 1989.
29. USBR 5405, **Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Double Hydrometer Test Method**, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 425-437, 1989.
30. USBR 5410, **Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Pinhole Test Method**, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 425-437, 1989.
31. Acciardi, R.G., **Pinhole test equipment design and test result evaluation**, United States Department of The Interior Bureau of Reclamation, REC- ERC-85-3, 1985.
32. Tosun, H., Savaş, H., ve Yazıcı, A., **Dispersif Zeminlerin Tanımlanmasında Kullanılan İğne Deliği Deney Ekipmanının Yeniden Tasarımı**, Tübitak, Proje No: İÇTAG-İ732, 2007.
33. ASTM D 4829, **Standard Test Method for Expansion Index of Soils**, Annual Book of ASTM Standards, 04.08., 1988