

## Beyaz Bentonit Malzemesinde Alternatif Katkı Maddesi Olarak Kullanılan Consolid Sistemi ile Geleneksel Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması

\*Şevki EREN<sup>1</sup>, Mümin FİLİZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü / ISPARTA  
Alınış tarihi: 18.01.2007, Kabul: 17.10.2007

**Özet:** Bu çalışmada, zemin stabilizasyonu uygulamalarında; çöp depolama alanları, baraj inşaatı vb. yerlerde su ve sıvı sızdırmazlığı amacıyla kullanılan beyaz bentonit malzemesinin ilk olarak optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiş, daha sonra beyaz bentonit numunesi ıslak C.B.R. deneyine tabi tutulmuş, C.B.R yüzdesi belirlenmiş ve zemin tanımı (çok kötü) olarak belirlenmiştir. Daha sonra Cassagrande yöntemi uygulanarak bentonitin kıvam limitleri, piknometre deneyi ile de tane birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Yapılan permeabilite deneyi ile bentonit numunesinin permeabilite katsayısı ( $1.73243 \times 10^{-9}$  cm/sn)'den daha küçük olarak belirlenmiş ve elde edilen bu değer bentonit numunesinin çöp depolama alanları, baraj inşaatı vb. yerlerde su ve sıvı sızdırmazlığı amacıyla kullanılabilceğini göstermiştir. Bentonit numunesinin ıslak C.B.R. yüzdesi düşük olduğundan dolayı bentonit içerisine ayrı ayrı olmak üzere kireç, çimento ve consolid444+solidry katkıları ilave edilerek bentonit numunesinin taşıma gücü artırılmaya çalışılmıştır. Kullanılan tüm katkılar C.B.R. yüzdesinde artış meydana getirmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Beyaz Bentonit, Islak C.B.R., Permeabilite, Stabilizasyon, Consolid444, Solidry

**Abstract:** In this study, on the soil stabilization applications; optimum water content and maximum dry bulk density of the sample of white bentonite, which is used for the purpose of soil stabilization in the garbage storage areas and preventing the permeability of the poisonous waters, were first determined and then it was exposed to wet C.B.R experiment. C.B.R. percentage was proved and the soil description proved to be "very bad". Subsequently, the thickness limits of the bentonite and the particle bulk density were determined using Cassagrande's method and the pycnometer method, respectively. As a result of the permeability test, permeability coefficient of the bentonite sample was found to be lower than  $1.73243 \times 10^{-9}$  cm/sn. This value shows that the bentonite sample could be used in the garbage storage areas and the dams for the purpose of water and liquid impermeability. Since the wet C.B.R. percentage of the bentonit sample was found to be low, bearing capacity of the bentonite sample was strived to be increased through adding lime, cement, and consolid444+solidry additives. All the additives used increased the percentage of C.B.R.

**Key Words:** White bentonit, wet C.B.R., permeability, stabilization, consolid444, solidry

## Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods to the Consolid System Used as an Alternative Admixture Matter in the White Bentonite Material

### Giriş

Katı atık uzaklaştırılmasında ülkemizde en yaygın uygulanan yöntem düzenli/düzensiz depolamadır. Bir depolama alanı yeri seçiminde çok sayıda faktörün göz önüne alınması gerekir. Özellikle büyük kentlerde katı atıkların bertaraf edilmesi önemli çevre sorunlarına neden olmaktadır. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde düzenli depolama alanlarında oluşan sızıntı suları ve metan gazı önemli çevresel sorunlar yaratmaktadır (Nas ve Berktaş, 2003).

Katı atık depolama sahalarında çevre kirliliği açısından en önemli problem sızıntı suyudur. Her türlü kirlenici parametreyi ihtiva eden sızıntı suyu, suyun çözülebileceği artıkların bileşiminde bulunan suda çözülebilir bileşikleri beraberinde taşımakta ve yüzeysel veya yeraltı sularına katmaktadır. Katı atık depolanması ancak yüzeysel ve yeraltı sularına zarar vermeyen alanlarda yapılabilir. Bunun dışında kalan yerlerde, gerekli önlemler alındıktan sonra depolanabilir. Sızıntı suyunun bu olumsuz etkilerini

önlemek için depo sahasının tabanı geçirimsiz hale getirilir (Erdin, 2005).

Dopo tabanına sıkıştırılmış kalınlığı en az 60cm olan kil veya aynı geçirimsizliği sağlayan doğal ya da yapay malzeme serilir. Bu malzemelerin geçirimsizlik katsayısı  $1.10^{-8}$  m/sn'den büyük olamaz (Katı atıkların kontrolü yönetmeliği, 1991).

Bu çalışmada, zemin stabilizasyonu uygulamalarında; çöp depolama alanları, baraj inşaatı vb. yerlerde su ve sıvı sızdırmazlığı amacıyla kullanılan beyaz bentonit malzemesinin içerisine katkı malzemeleri katılarak, bentonit malzemesinin taşıma gücü artırılmaya çalışılmış ve böylelikle permeabilitesi düşük olan bentonit malzemesinin aynı zamanda taşıyıcı olarak kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bentonit malzemesi içerisine %4,6,8 ve 10 oranlarında kireç, %4,6,8 ve 10 oranlarında çimento ve consolid444+%1 ve %2 oranlarında solidry katkıları katılmış ve yapılan

deneylemlerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deneyler S.D.Ü. Jeoloji Mühendisliği Uygulamalı zemin laboratuvarında TS 1900'e uygun olarak yapılmıştır (TS1900, 1975).

## Materyal ve Metot

Bu çalışmada, taşıma gücü zayıf olan bir zemin numunesinin seçilmesi amaçlanmıştır. Beyaz bentonit numunesi de inşaat mühendisliğinde temel ve baraj yapılarında su ve sıvı sızdırmazlığı elde etmede, atık suların temizlenmesinde vb. birçok mühendislik işlerinde kullanılan permeabilitesi düşük ve taşıma gücü zayıf olan bir malzemedir. Isparta Darı dere numunesi aradığımız zemin özelliklerini taşıdığı için bu çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir. Bentonite ait hidrometre analizi değerleri Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler Sanayi ve Ticaret AŞ'den temin edilmiştir (Selçuk, 2005). Bentonit numunesine ait hidrometre analizi değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Beyaz bentonit malzemesinin hidrometre analizi değerleri

Elek	Değerler (%)
>60µ	2,00
<20µ	90,30
<10µ	87,40
>2µ	75,00

Zemin stabilizasyonunda kullanılan pek çok yöntem bulunmaktadır. Günümüzde zemin stabilizasyonunda kullanılan yöntemlerden biri olan kimyasal stabilizasyonda katkı malzemesi olarak birçok katkı çeşidi kullanılmaktadır. Bu çalışmada katkılı zemin stabilizasyonunda en çok kullanılan katkı malzemeleri olan kireç ve çimento ile bu katkılara alternatif bir katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılan consolid444 ve solidry adlı katkı malzemeleri kullanılmıştır.

### Bentonit

Bentonit, volkanik kül, tüf gibi camsı volkanik gerecin kimyasal ayrışması ile veya bozulmasıyla ortaya çıkan ve son derece küçük kristaller halindeki kil minerallerinden (başlıca montmorillonit grubu) oluşan ve büyük ölçüde kolloidal silisten ibaret, yumuşak, şekillenebilir, gözenekli ve açık renkli bir kayadır (Ay, 2002).

Çok geniş bir kullanım alanı olan bentonit başlıca aşağıdaki işlevler için tüketilir. Sondajlarda sondaj çamurunu ağdalaşık kıvrıntılarının yukarı çıkmasını sağlar, su kaçaklarını önler. Döküm kumu bağlayıcısı olarak kalıpların hazırlanmasında (1600-°C'ye kadar

dayanmaktadır), demir tozlarının peletlenmesinde, İnşaat Mühendisliğinde temel ve baraj yapılarında su ve sıvı sızdırmazlığı elde etmede, hayvan yemi yapımında, yemeklik sıvı yağların ağartılmasında, şarap ve meyve sularının berraklaştırılmasında, ilaç, kağıt, lastik sanayiinde dolgu maddesi olarak, çimento sanayiinde, seramik sanayiinde katkı maddesi olarak, evcil hayvanların altlarına yayılacak atıkların kolay temizlenmesinde, petrol rafinasyonunda, atık suların temizlenmesinde, boya sanayiinde ve yangın söndürücülerde, gübre yapımı ve toprak ıslahında kullanılır (Ay, 2002). Bu çalışmada kullanılan bentonit numunesinin karma oksit bileşenleri Çizelge 2'de gösterilmiştir (Oğuz, 2006).

**Çizelge 2.** Bentonit numunesinin karma oksit bileşenleri

KİMYASAL ANALİZ	(%)
SiO <sub>2</sub>	72,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74
TiO <sub>2</sub>	0,06
CaO	1,69
MgO	1,18
K <sub>2</sub> O	2,13
Na <sub>2</sub> O	0,57

### Metot

Beyaz bentonit numunesi üzerinde hidrometre deneyi, atterberg limitleri, standart proktor, ıslak C.B.R., permeabilite, ve piknometre deneyleri yapılmıştır. Bu numune içerisine %4,6,8 ve 10 oranlarında kireç, %4,6,8 ve 10 oranlarında çimento ile consolid444+%1;2 oranlarında solidry katkıları katılmış ve yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

C.B.R. deneyi, kontrol altında tutulabilen bir su içeriğinde ve yoğunluğundaki zeminin kayma direncini ölçmek için kullanılır. Deney sonucunda bir taşıma gücü oranı sayısı (C.B.R.) elde edilir. Deneyden elde edilen sonuç sadece zeminin mevcut su içeriği ve yoğunluğu için geçerli olmaktadır. C.B.R. sayısına göre zeminlerin sınıflandırılması ve kullanımı Çizelge 3'de gösterilmiştir (Aytekin, 2004).

**Çizelge 3. C.B.R sayısına göre zeminlerin sınıflandırılması ve kullanımı**

CBR. sayısı	Zeminin tanımı	Kullanımı	Sınıflandırılması	
			USCS	ASSHO
0-3	Çok kötü	Altyapı	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3-7	Kötü-orta	Altyapı	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7-20	Orta	Alt temel	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A6,A7
20-50	İyi	Temel-alt temel	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A1b,A2-5,A3,A2-6
50'den büyük	Çok iyi	Temel	GW,GM	A1a,A2-4,A3

#### Kireçle Stabilizasyon

Be çalışmada bentonit numunesinin içerisine karıştırmak amacıyla %4,6,8 ve 10 oranlarında toz kireç kullanılmıştır. Kireç Isparta ilinde bulunan Öztüre

Kireççilik San ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir (Kalaycı, 2006). Bu çalışmada kullanılan kirecin karma oksit bileşenleri Çizelge 4'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4. Kirecin karma oksit bileşenleri**

Malzemeler	Oksitler(%)										
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaO	MgO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Kireç	0,60	0,30	0,20	87,00	-	0,60	-	0,80	10,20	-	0,60

Kireç, yüksek plastisiteli ince taneli zeminlerle karıştırılan etkili bir maddedir. Etkili bir karışım için kireç yüzdesi genel olarak %5-10 arasında değişir (Raj, 1995). Bu oran kesinlikle zemin cinsine göre değişir.

miktarı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında düşüş o nispete fazla olur ve optimum su içeriği yüzdelerinde ise yükseliş meydana gelir (Atanur, 1973).

Aynı enerji ile sıkıştırıldığında zemin-kireç karışımı kireçsiz olan orijinal zeminden daha düşük yoğunlukta sıkışmaktadır. Zemine ilave edilen kireç yüzde

İnce taneli zeminlere kireç karıştırılması, zeminin plastisitesinin azalmasına, mukavemetinin ise artmasına yol açar (Özaydın, 1989).

#### Çimento ile stabilizasyon

Bu çalışmada bentonit numunesinin içerisine karıştırmak amacıyla %4,6,8 ve 10 oranlarında CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento Isparta ilinde bulunan

Göлтаş'tan temin edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan çimentonun karma oksit bileşenleri Çizelge 5'de gösterilmiştir (Selçuk, 2005).

**Çizelge 5. Çimentonun karma oksit bileşenleri**

Malzemeler	SO <sub>3</sub> (%)	Özgül ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	Priz başlangıcı (dak.)	Genleşme (mm)	Mukavemet değerleri (Mpa)
Çimento (CEM I 42.5 R)	2.67	3090	2910	164	1	2 gün
						7gün
						25.6
						38.3

Killi kum bir zemin, genellikle bir miktar çimento veya kireçle karıştırılır, hidrolik olarak sıkıştırılır ve kür edildikten sonra kullanılır. Böylelikle, zeminin doğal stabilitesini iyileştirerek, daha iyi sıkışma ve gerilme mukavemeti, daha iyi kohezyon ve daha iyi su direnci elde edilir (Bahar vd., 2004).

arasındadır ve yüksek plastisiteli killer için yaklaşık %10-14 arasındadır (Raj, 1995).

Kirece benzer şekilde, çimento zeminin plastisitesini azaltan ve dayanımı arttıran bir etkiye sahiptir. Kumlu toprakların stabilizasyonu için gerekli çimento %6-10 arasında değişir, düşük plastisiteli kil ve siltler için %8-12

Zemin içerisine ilave edilen çimento miktarının artmasıyla dayanım da lineer olarak artar fakat, farklı zeminlere farklı oranlarda artar (Bell, 1993).

#### Consolid sistemi ile stabilizasyon

Consolid zemin stabilizasyon sistemi, açık ve net bir şekilde zemin stabilizasyonu için geliştirilmiştir. Her kohezyonlu zemin yeniden taşlaşma özelliği gösterir. Bunun için sadece çok uzun zaman ve yüksek basınç gereklidir. Mesele katalizörlerin eklenmesiyle kohezyonlu

zeminlerin yeniden taşlaşma süresini hızlandırmaktır (Guenther, 2006).

Consolid Sistemi, her türlü kohezyonlu zeminin doğal katlaşma sürecini hızlandırır. Zemin niteliğine olumlu bir katkısı vardır. Consolid Sistemi'ni oluşturan Solidry ve Consolid444'ün zeminle çok iyi karıştırılmaları ve optimum nem oranında çok iyi derecede sıkıştırılmaları gerekmektedir (Eryılmaz, 2005).

Consolid sistemi bağlayıcı olarak ya da kimyasal reaksiyon olarak zemine etki etmez. Bir zemin iyileştirildikten sonra, bu iyileşme süreklilik arz eder ve zaman sınırlaması olmaksızın bu gelişimini muhafaza eder (Mokhtar, 2000).

Consolid sistemi zemin stabilizasyonu için daima birlikte kullanılan iki ürün tarafından oluşturulur. Bunlar consolid 444 ve solidry'dir. Consolid444 sıvı bileşen, solidry ise katı/toz biçiminde bir bileşendir. İki bileşen zeminle karıştırılır. Bunun ardından zemin tamamen sıkıştırılmış olur (Eryılmaz, 2005).

Consolid sistemi, büyük anayollar da dahil olmak üzere her türlü işlek yollar, sorunlu zeminler için alt temel, erozyon denetimi (setler, kanallar, yağma tümsekler), barajlar, oyun alanları, spor sahaları, çöplükler, yer altı yolları(madencilik) gibi mühendislik işlerinde kullanılmaktadır (Eryılmaz, 2005).

Consolid sistemi ile ilgili yapılan doktora tezi çalışmasında, araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve araştırmalara uyarlanmış don kabarması testi, iğne deliği (pinhole) testi ve CBR testi kullanılmıştır. Tüm bu test ve analiz sonuçlarına göre, lős için consolid stabilizasyonun kullanıldığı durumlarda zeminde genel olarak hem bertaraf etme arazilerinde, hem de özellikle taban sızdırmazlığında büyük iyileşmeler görülmüş, bunlar işlenmiş zeminin tutma ve emme özelliklerine de yansımıştır. Tüm bu bilgiler Cernavoda alanının düşük ve orta seviyeli radyoaktif atık depolama için uygun olduğunu göstermiştir (Giurgea, 1999).

#### **Consolid444**

Consolid444, suda çözülmüş %20 Mono-moleküler ve Poli-Moleküler CAS No 61791-550-7 ve dimetilamonyumklorit, CAS No 61798-80-8, ve izopropenol(IPA), CAS No 67-63-0 çözücüler, emülgatörler ve katalizörlerden oluşan kararlı yüzey aktif madde karışımından oluşur. 20°C'deki yoğunluğu 0.980 g/cm<sup>3</sup>, pH-değeri (1.0 g/lit. H<sub>2</sub>O'da) 5.5 – 6.5'tir (Eryılmaz, 2005).

Consolid444, yapışmış olan ince su tabakasını parçalayıp tanelerin geri dönülmez bir şekilde kümelenebilirine yol açarak suyun kapiler artışını önemli ölçüde azaltan kimyasal bir maddedir. Consolid444'ün kullanımı, ince tanelerin geri dönüşü olmayacak şekilde bağlanmasını sağlar ve böylece zeminin kendine has kenetleme kuvvetini açığa çıkarır. Zemindeki su içeriği, özellikle kapiler doygunluğu yüksek ölçüde azalır ve yavaşlar. Consolid 'in yüksek

etkililiği zemini, özellikle suyun içine işlemesine karşı korur. İşlenen zeminin daha iyi sıkışmasına olanak tanır. Consolid444 sıvı bir maddedir ve pH=6 dır. Yüksek basınç altında yanıcı değildir. Uygulama süreklilik gösterir ve bir kez kurudu mu geri dönüşümsüzdür. Consolid444, zemine ağırlığa göre %1 oranında uygulanır veya 1 m<sup>3</sup> zemine 0.8 litre olarak kullanılır (Eryılmaz, 2005).

Bu çalışmada yukarıda özellikleri anlatılan consolid444 katkısı kullanılmıştır. Consolid444 adlı katkı malzemesi Consolid Yatırım Danışmanlık A.Ş'den alınmıştır (Eryılmaz, 2005).

#### **Solidry**

%96.5 Portland çimentosu ve kireç, CAS CEM 266-043-4,%3.5 Solidry Mono-moleküler ve CAS No 61789-80-8, poliakrilikler ve reaktanlar, alkilamin ve dimetil amonyum klorit ten oluşan kararlı Poly-moleküler yüzey aktif madde ile kaplanmıştır. 20°C'deki yoğunluğu 2.8-3.2 g/cm<sup>3</sup>, pH-değeri (1.0 g/lit. H<sub>2</sub>O'da) 6.0-8.0'dir (Eryılmaz, 2005).

Solidry işlenen zeminin koruyucusu olarak hareket eden katı ve toz halde, kimyasal/organik bir maddedir. Zeminin kendine has bağlanma özelliklerini artırır. Zemine ağırlığa göre %1-%2 oranında uygulanır (Eryılmaz, 2005).

Consolid'e ek olarak, solidry işlenen zeminin yüzeydeki suya ve aşınmaya maruz kalan üst katmanlarını korur. Suyun kapiler artışını daha fazla azaltır (Eryılmaz, 2005).

Bu çalışmada yukarıda özellikleri belirtilen aynı özellikteki solidry katkısı kullanılmıştır. Solidry adlı katkı malzemesi Consolid Yatırım Danışmanlık A.Ş'den alınmıştır (Eryılmaz, 2005).

## **Bulgular ve Tartışma**

#### **Katkısız Bentonit Numunesi**

Bentonit su ile karıştırıldıktan sonra üzeri nemli bir bezle kapatılmış ve bir saat süreyle bekletilerek nemini alması sağlanmıştır. Bentonit numunesinin standart proctor deneyi (metod B) ile optimum su muhtevası (%34,8) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı(1,12 t/m<sup>3</sup>) olarak belirlenmiştir. Bentonit numunesi ıslak C.B.R deneyi için optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında tekrar sıkıştırıldıktan sonra su içerisine bırakılmış ve iki hafta sonra şişme miktarındaki artış sabitlendikten sonra şişme yüzdesi %80 olarak belirlenmiş, daha sonra bentonit numunesi sudan çıkarılmış ve ıslak C.B.R deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda ıslak C.B.R. yüzdesi (%3,0) ve zemin tanımı (çok kötü) olarak belirlenmiştir. C.B.R. kalıbından çıkarılan malzemeden alınan numune üzerinde Cassagrande yöntemi uygulanarak bentonitin kıvam limitleri belirlenmiştir. Bentonitin likit limiti 140, plastik limiti 47, plastisite indisi 93 olarak belirlenmiştir. Yapılan piknometre deneyi ile bentonitin tane birim hacim ağırlığı

2,2(gr/cm<sup>3</sup>) olarak belirlenmiştir. Daha sonra bentonit numunesi permeabilite deneyi için optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırıldıktan sonra hemen permeabilite kalıbına bağlanarak 4 gün süreyle düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi tutulmuş ve bu süre içerisinde bentonitin içerisinde hiçbir su geçişi gözlenmemiş ve permeabilite katsayısı(k) değeri  $1,73243 \times 10^{-9}$  cm/s'den daha düşük olarak belirlenmiştir. Belirlenen permeabilite değeri bentonitin çöp depolama alanlarında, baraj inşaatı vb. yerlerde su ve sıvı sızdırmazlığı amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Daha sonra taşıma gücü değerinin arttırmak amacıyla bentonitin içerisine kireç, çimento, consolid444 ve solidry katkıları ilave edilmiştir. Bentonit numunesinin geoteknik özellikleri Çizelge 6'da gösterilmiştir.

#### **Kireç Katkılı Bentonit Numuneleri**

Bentonit içerisine %4,6,8 ve 10 oranlarında toz kireç katılmıştır. İlave edilen kireç miktarı bentonitin kuru ağırlığına göre yüzdesi alınarak belirlenmiş ve bentonitin içerisine karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar sıkıştırılmadan önce bir saat üzeri nemli bezle kapalı şekilde bekletilerek numunenin nemini iyice alması sağlanmıştır. Bu karışımın proktor deneyi ile optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Kireç katkıları bentonit numuneleri ıslak C.B.R. deneyi için standart proktor deneyi ile belirlenen değerlerde tekrar sıkıştırıldıktan sonra yedi gün süreyle nem odasında, üç gün süreyle oda koşullarında küre tabi tutulmuştur. Daha sonra su içerisine bırakılan kireç katkıları bentonit numuneleri iki hafta sonunda şişme değerindeki artış miktarı sabitlenince sudan çıkarılmış ve numuneler ıslak C.B.R. deneyine tabi tutularak C.B.R. yüzdesi belirlenmiştir. Daha sonra C.B.R. kalıbından çıkarılan kireç katkıları bentonit içerisinden alınan numuneler üzerinde kıvam limitleri deneyi ve tane birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

#### **a) Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık**

Bentonit içerisine karıştırılan kireç katkıları bentonitin optimum su içeriği değerlerinde artış meydana getirmiştir. %4 kireç katkıları bentonitin optimum su içeriği %34,8; %6 kireç katkıları bentonitin optimum su içeriği %35; %8 kireç katkıları bentonitin optimum su içeriği %35,3; %10 kireç katkıları bentonitin optimum su içeriği %35,5 olarak belirlenmiştir. Burada katkısız bentonit ile % 4 kireç katkıları bentonitin optimum su içeriğinin aynı olduğu görülmekte ve katkı miktarı arttırılmaya devam edildiğinde artışların az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kirecin su emmesi, bentonitin su emmesinden çok daha düşük olduğundan dolayı ve bentonitin içerisine katılan kireç oranları çok yüksek olmadığından dolayı su içeriğinde fazla değişim meydana gelmediği düşünülmektedir.

Kullanılan kireç katkıları bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında düşüş meydana getirmiştir. %4 kireç katkıları bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1.05 \text{ t/m}^3$ , %6 kireç katkıları bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1.08 \text{ t/m}^3$ , %8 kireç katkıları

bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,10 \text{ t/m}^3$ , %10 kireç katkıları bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,10 \text{ t/m}^3$  olarak belirlenmiştir.

#### **b) Islak C.B.R**

Kullanılan kireç katkıları bentonitin ıslak C.B.R. değerlerinde artış meydana getirmiştir. %4 kireç katkıları bentonitin ıslak C.B.R. yüzdesi % 7.2 ve zemin tanımı(kötü-orta), %6 kireç katkıları bentonitin ıslak C.B.R. yüzdesi % 11.0 ve zemin tanımı( kötü-orta), %8 kireç katkıları bentonitin ıslak C.B.R. yüzdesi % 18.3 ve zemin tanımı(kötü-orta), %10 kireç katkıları bentonitin ıslak C.B.R. yüzdesi % 25.1 ve zemin tanımı (iyi) olarak belirlenmiştir.

#### **c) Kıvam limitleri**

Plastisite indisi yüksek olan topraklara az miktarda kireç ilave edildiğinde plastisite indeksinde %50-80 arasında bir düşüş meydana geldiği gözlenmiştir(Atanur, 1973). Yapılan deneylerde kullanılan kireç katkıları bentonitin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma meydana getirmiştir. %4 kireç katkıları bentonitin likit limiti 125, plastik limiti 47, plastisite indisi 78 olarak belirlenmiştir. %6 kireç katkıları bentonitin likit limiti 117, plastik limiti 46, plastisite indisi 71 olarak belirlenmiştir. %8 kireç katkıları bentonitin likit limiti 99, plastik limiti 41, plastisite indisi 58 olarak belirlenmiştir. %10 kireç katkıları bentonitin likit limiti 97, plastik limiti 40, plastisite indisi 57 olarak belirlenmiştir.

#### **d) Tane birim hacim ağırlık**

Kullanılan oranlardaki kireç katkıları bentonit numunesinin tane birim hacim ağırlığı değerlerinde artış meydana getirmiş ve tüm kireç katkıları bentonit numunelerinin tane birim hacim ağırlığı değerleri  $2.3 \text{ gr/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Kireç katkıları bentonit numunelerinin geoteknik özellikleri Çizelge 6'da gösterilmiştir.

#### **Çimento Katkılı Bentonit Numuneleri**

Bentonitin içerisine %4;6;8 ve 10 oranlarında CEM I 42,5 R tipi çimento katılmıştır. İlave edilen çimento miktarı bentonitin kuru ağırlığına göre yüzdesi alınarak belirlenmiş ve bentonit içerisine karıştırılmıştır. Bu karışımın proktor deneyi ile optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Islak C.B.R. deneyi için bentonit çimento ve su ile karıştırıldıktan sonra yarım saat beklenerek karışımın nemini iyice alması sağlanmıştır. Çimento katkıları bentonitin yarım saat bekletilmesinin sebebi, çimentonun kirece göre çok daha çabuk reaksiyona girip setleşmesinden dolayıdır. Daha sonra standart proktor deneyi ile belirlenen değerlerde çimento katkıları bentonit C.B.R. kalıbına sıkıştırıldıktan sonra bir gün nem odasında bırakılmış ve sonra su içerisine bırakılmıştır. İki hafta sonunda şişme miktarındaki artış sabitlenince çimento katkıları bentonit sudan çıkarılarak ıslak C.B.R. deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra C.B.R. kalıbından çıkarılan çimento katkıları bentonit içerisinden alınan numune üzerinde kıvam limitleri ve tane birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmıştır.



**a) Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık**

%4 çimento katkılı bentonitin optimum su içeriği %34,6; %6 çimento katkılı bentonitin optimum su içeriği %34,8; %8 çimento katkılı bentonitin optimum su içeriği %34,6; %10 çimento katkılı bentonitin optimum su içeriği %34,8 olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi bentonit içerisine ilave edilen çimento katkıları, optimum su içeriği değerlerinde bir değişim meydana getirmemiştir. Bunun sebebi, bentonitin çok ince tanelerden oluşması ve bentonit içerisine ilave edilen çimento miktarının ağırlık olarak az olmasından dolayıdır.

Kullanılan oranlardaki çimento katkıları bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artış meydana getirmiştir. %4 çimento katkılı bentonitin maksimum hacim ağırlığı  $1,15t/m^3$ , %6 çimento katkılı bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,18t/m^3$ , %8 çimento katkılı bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,25 t/m^3$ , %10 çimento katkılı bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1.25t/m^3$  olarak belirlenmiştir.

**b) Islak C.B.R.**

Kullanılan oranlardaki çimento katkıları bentonitin ıslak C.B.R. değerlerinde artış meydana getirmiştir. Ancak çimento miktarı arttırıldıkça C.B.R. değerlerinin de lineer olarak artması beklenirken %8 çimento katkısından sonra çimento miktarı arttırıldığında düşüşe geçtiği görülmüştür. Bentonit çok ince bir malzeme olduğundan dolayı su ile temas ettiğinde hemen şişmeye başlayan ve hamurumsu bir kıvama geldiği için zor karışan bir malzemedir. Çimento bentonit numunesi ile iyi karışmamış olmasından dolayı beklenen artış sağlanamamış olabileceği düşünülmektedir.

**c) Kıvam Limitleri**

Bentonit içerisine ilave edilen çimento katkıları bentonitin likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma meydana getirmiş, plastik limit değerlerinde ise artış meydana getirmiştir. %4 çimento katkılı bentonitin likit limiti 91, plastik limiti 48, plastisite indisi 43 olarak belirlenmiştir. %6 çimento katkılı bentonitin likit limiti 85, plastik limiti 49, plastisite indisi 36 olarak belirlenmiştir. %8 çimento katkılı bentonitin likit limiti 78, plastik limiti 51, plastisite indisi 27 olarak belirlenmiştir. %10 çimento katkılı bentonitin likit limiti 76, plastik limiti 53, plastisite indisi 23 olarak belirlenmiştir.

**d) Tane birim hacim ağırlık**

Kullanılan çimento katkıları bentonitin tane birim hacim ağırlığı değerlerinde bir değişim meydana getirmemiştir. Çimento katkılı bentonit numuneleri üzerinde yapılan tüm deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge6'da gösterilmiştir.

**Consolid444+Solidry Katkılı Bentonit Numuneleri**

Bentonitin içerisine öncelikle toz bileşen olan solidry, %1 ve %2 oranlarında bentonitin kuru ağırlığına göre yüzdesi alınarak ilave edilmiş ve daha sonra consolid444 katkısı

bu karışım içerisine ilave edilmiştir. Consolid444 bentonit içerisine  $0.8 \text{ lt/m}^3$  olarak su içerisinden katılıp çalkalanarak ilave edilmiştir. Öncelikle bentonitin optimum su içeriği(%34,8) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı( $1.12t/m^3$ ) belirlenmiştir. Daha sonra deneyde kullanılmış olan bentonitin kuru ağırlığı 6000 gr olduğundan orantı kurularak ilave edilen Consolid444 katkı miktarı hesaplanmıştır.

$$1.12 \text{ ton} = 1.120.000 \text{ gr}$$

$$(6000 \times 0,8) \div 1.120.000 = 0,004 \text{ lt} = 4 \text{ mlt consolid444}$$

gereklidir.

Gerekli olan consolid444 miktarı bulunduğundan sonra su miktarı hesaplanmıştır.

$$(6000 \times 34,8) \div 100 = 2088 \text{ gr}$$

Belirlenen 2088gr su içerisine 4mlt consolid444 ilave edilip iyice çalkalanarak bir süspansiyon oluşturulmuştur. Consolid444 katkılı bentoniti standart proctor yöntemiyle sıkıştırırken optimum su muhtevasını henüz bilmediğimiz için belirli oranlarda su miktarını arttırarak sıkıştırma yaptığımızdan başlangıç için kendi belirlediğimiz su miktarını bu süspansiyondan alarak başlangıç sıkıştırması yapıldıktan sonra sıkıştırma işlemine, su miktarı belirli yüzdelerde arttırılarak devam edilmiştir. Bu şekilde consolid444 katkılı bentonitin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Islak C.B.R deneyi için bentonit karıştırıldıktan sonra bir saat beklenerek karışımın nemini iyice alması sağlanmıştır. Daha sonra standart proctor deneyi ile belirlenen değerlerde bentonit sıkıştırıldıktan sonra altı gün süreyle nem odasında ve dört gün süreyle su içerisinden bekletilmiş ve iki hafta sonra şişme değerinde artış sona erdiğinde bentonit su içerisinden çıkarılarak ıslak C.B.R deneyine tabi tutulmuştur. C.B.R kalıbından çıkarılan bentonit içerisinden alınan numune üzerinde kıvam limitleri ve tane birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmıştır.

**a) Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık**

Yapılan proctor deneyi neticesinde consolid444+%1solidry katkılı bentonitin optimum su içeriği %34, consolid444+%2solidry katkılı bentonitin optimum su içeriği %34,5 olarak belirlenmiştir.

Kullanılan katkı oranları bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Consolid444+%1 solidry katkılı bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,08t/m^3$ , consolid444+%2solidry katkılı bentonitin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,11t/m^3$  olarak belirlenmiştir.

**b) Islak C.B.R.**

Kullanılan katkı oranları bentonitin ıslak C.B.R. değerlerinde artış meydana getirmiştir. Consolid444+%1 solidry katkılı bentonitin ıslak C.B.R. yüzdesi (%6,9) ve zemin tanımı (kötü-orta), consolid444+%2solidry katkılı bentonitin ıslak C.B.R. yüzdesi (%12,0) ve zemin tanımı(orta) olarak belirlenmiştir.

### c) Kıvam Limitleri

Kullanılan katkı oranları bentonitin likit limit değerlerinde azalma, plastik limit değerlerinde artma ve plastisite indisi değerlerinde azalma meydana getirmiştir. Consolid444 + %1 solidry katkı bentonitin likit limiti 124, plastik limiti 50, plastisite indisi 74 olara belirlenmiştir. Consolid444 + %2 solidry katkı bentonitin likit limiti 103, plastik limiti 55, plastisite indisi 48 olarak belirlenmiştir.

Kullanılan katkı oranları bentonitin tane birim hacim ağırlığı değerlerinde artış meydana getirmiş ve bu değer consolid444 + %1 ve %2 solidry katkı bentonit numuneleri için  $2.3\text{gr/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Consolid444 + solidry katkı bentonit numuneleri üzerinde yapılan tüm deney sonuçları Çizelge 6'da gösterilmiştir.

### d) Tane birim hacim ağırlık

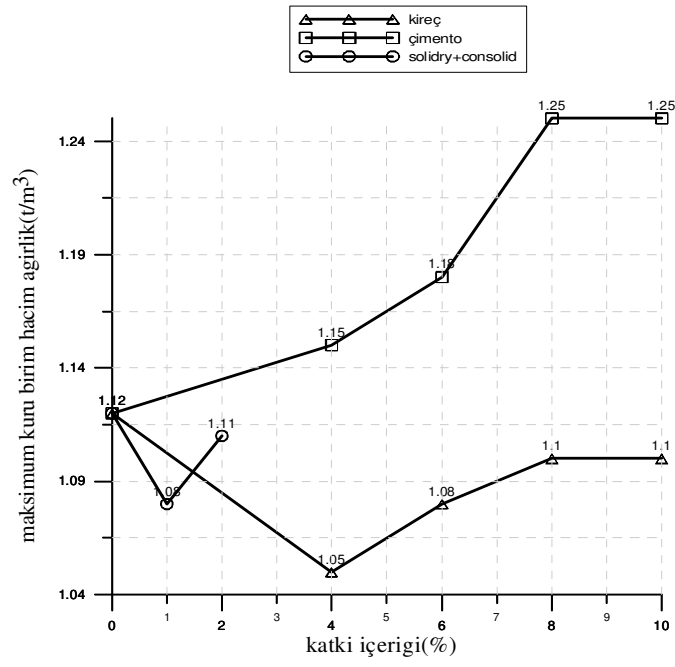
Çizelge 6. Kullanılan katkıların, katkısız bentonit malzemesinin geoteknik özelliklerinde meydana getirdiği değişimler

	$\gamma_s$ ( $\text{t/m}^3$ )	$\omega_{OPT}$ (%)	$\gamma_d$ ( $\text{t/m}^3$ )	Islak C.B.R (%)	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
Katkısız bentonit	2,2	34,8	1,12	3,0	140	47	93
%4 K	2,3	34,8	1,05	7,2	125	47	78
%6 K	2,3	35	1,08	11,0	117	46	71
%8 K	2,3	35,3	1,10	18,3	99	41	58
%10 K	2,3	35,5	1,10	25,1	97	40	57
%4 Ç	2,2	34,6	1,15	23,6	91	48	43
%6 Ç	2,2	34,8	1,18	27,1	85	49	36
%8 Ç	2,2	34,6	1,25	27,1	78	51	27
%10 Ç	2,2	34,8	1,25	25,1	76	53	23
B+C444+%1S	2,3	34	1,08	6,9	124	50	74
B+C444+%2S	2,3	34,5	1,11	12,0	103	55	48

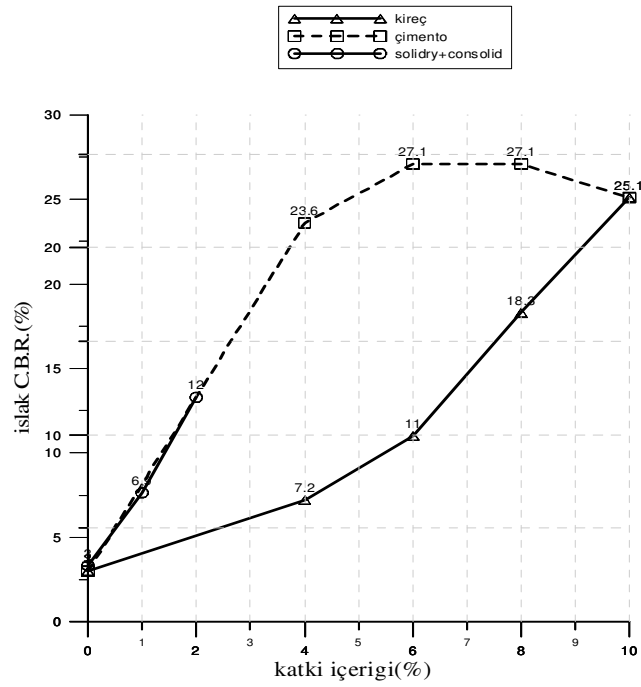
$\gamma_s$  : Tane birim hacim ağırlık,  $\gamma_d$  : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, B: Bentonit, C444: Consolid444, S: Solidry Ç: Çimento, K: Kireç

Kullanılan solidry katkıları %1 ve %2 oranında kullanılmıştır. Solidry miktarları artırılarak daha yüksek taşıma gücü değerlerine ulaşılabilir fakat solidry katkıları, çimento ve kirece göre daha pahalı olduğundan dolayı böyle bir uygulamanın ekonomik olmayacağı

düşünülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada daha yüksek solidry katkıları kullanılmamıştır. Tüm katkılı numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3 'de gösterilmiştir.

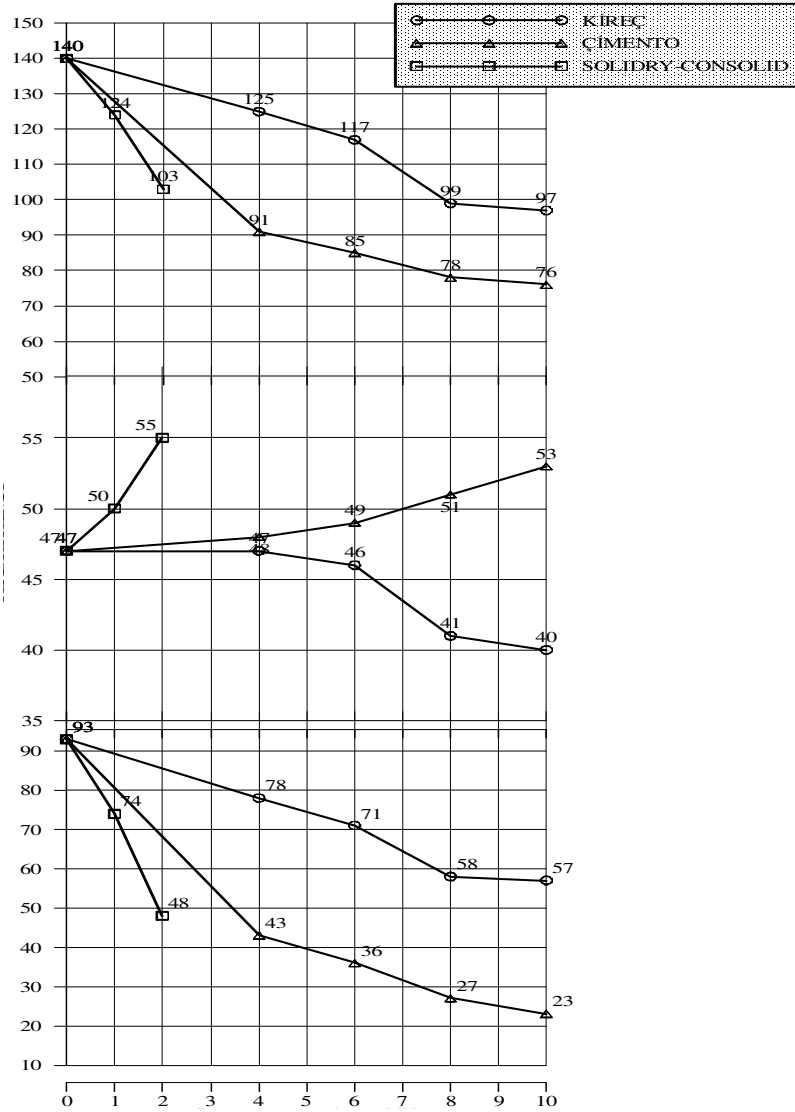


Şekil 1. Bentonitin, katkı içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerinde meydana gelen değişim



Şekil 2. Bentonitin, katkı içeriği ile ıslak C.B.R. değerlerinde meydana gelen değişim





Şekil 3. Bentonitin katkı içeriği ile likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değişimlerinin görünümü

## Sonuç

Beyaz bentonit malzemesi üzerinde yapılan permeabilite deneyi neticesinde bu malzemenin permeabilite katsayı değeri  $1.73243 \times 10^{-9}$  cm/sn olarak belirlenmiştir. Bu değer, bu malzemenin çöp depolama alanları, baraj inşaatı vb. yerlerde su ve sıvı sızdırmazlığı amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Bu nedenle katkılı numunelere ait permeabilite deneyinin yapılmasına gerek duyulmamıştır. Bu malzemenin içerisine ilave edilen katkılarla taşıma gücü değerlerinde artış sağlanmıştır. Bulunan sonuçlar taşıma gücü bakımından değerlendirildiğinde %10 kireç katkılı bentonit malzemesinin ıslak C.B.R. değeri %25.1 olarak belirlenmiştir. %6 ve %8 çimento katkısı kullanıldığında ıslak C.B.R. değeri %27.1 olarak belirlenmiştir.

Consolid444+%2 solidry katkısı kullanıldığında ıslak C.B.R. değeri %12,0 olarak belirlenmiştir. Çöp depolama alanları, baraj inşaatı vb. yerlerde su ve sıvı sızdırmazlığı amacıyla kullanılan beyaz bentonit malzemesi için kullanılması gereken en uygun katkıların %10 oranında kireç veya %6 ile %8 oranında çimento katkılarından biri olarak seçilmesi uygun olacaktır.

## Teşekkür

Yapılan bu çalışmada, her türlü laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan ve değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın Yrd. Doç. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK'e, sonsuz teşekkürü sunmayı bir borç bilirim.

## Kaynaklar

- Atanur, A. 1973. Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı. E.Ü. İnşaat Fak. Kütüphanesi, 212s.
- Ay, Z. 2002. Bentonit Üzerine Boyarmaddelerin Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 88s.
- Aytekin, M. 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik yayınevi, Ankara, 624s.
- Bahar, R., Benazzoug, M., Kenai, S. 2004. Performance of Compacted Cement-Stabilised Soil. Cement&Concrete Composites, 26, 811-820.
- Bell, F. G. 1993. Department of Geology and Applied Geology. University of Natal, Durban, 423pp.
- Erdin, E. 2005. [www.deu.edu.tr](http://www.deu.edu.tr) (kişisel web adresi) (Erişim Tarihi: 18.11.2005)
- Eryılmaz, C. 2005. Consolid İnşaat Yatırım Danışmanlık Dış Ticaret A.Ş. Isparta [www.consolid.com.tr](http://www.consolid.com.tr) (Erişim Tarihi: 10.10.2005).
- Giurgea, V. I. 1999. Hydrogeological and Geotechnical Requirements for the Construction of Radioactive Waste Disposal Sites with Respect to the Consolid-System. Karlsruhe University, Karlsruhe, 232pp.
- Kalaycı, H. 2006. Öztüre Kireççilik San ve Tic. A.Ş. Isparta [www.ozture.com](http://www.ozture.com) (Erişim Tarihi: 04.03.2006).
- Mokhtar, S. 2000. Waste Management- A Future Challenge for the Protection of Mineral Sources. Cairo University, Egypt, 118-123.
- Nas, B., Berktaş, A. 2003. 2. Katı Atık Deponi Alanlarının Yer Seçiminde Bir Karar Destek Sistemi: Coğrafi Bilgi Sistemleri(CBS). Ulusal Katı Atık Kongresi, D.E.Ü. Çevre Mühendisliği Bölümü ve Çevre Araştırma ve Uygulama Merkezi, İzmir, 17-24.
- Oğuz, H. 2005. Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler Sanayi ve Ticaret AŞ. İstanbul, [www.eczacibasi.com.tr](http://www.eczacibasi.com.tr) (Erişim Tarihi: 01.08.2005).
- Özaydın, K. 1989. Zemin Mekaniği, Yıldız Ü. İnşaat Müh. Böl., İstanbul, 456s.
- Raj, P. P. 1995. Geotechnical Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 816s.
- Selçuk, G. 2005. Göltaş Çimento A.Ş. Isparta, [www.goltas.com.tr](http://www.goltas.com.tr) (Erişim Tarihi: 21.03.2005).
- Türk Standartları Enstitüsü, TS 1900/Nisan 1975. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri, Ankara
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2005. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 1991.
- Guenther, A., S. 2006. President and Inventor of Consolid System of Stabilisation Technology, Consolid AG, Fruemslen, Switzerland. [www.consolid.co.uk.com](http://www.consolid.co.uk.com) (Erişim Tarihi: 21.03.2006).