

1130 4

**ATIK KUMLARIN ÇİMENTO
İLE STABİLİZASYONU**

NURCAN DEMİRHAN
Yüksek Lisans Tezi

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı
HAZİRAN- 1998

NURCAN DEMİRHAN' ın Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığı Atık kumların çimento ile stabilizasyonu başlıklı tez..23.6.1998...tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Lisansüstü Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye (Tez Danışmanı) : Doç. Dr. Nuran Ay

Üye : Yrd. Doç. Dr. Servet Turan

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gülşim ÜNAL

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
24.6.1998. Tarih ve ..11/25... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****ATIK KUMLARIN ÇİMENTO
İLE STABİLİZASYONU****NURCAN DEMİRHAN****Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman : Doç. Dr. Nuran AY
1998, 89**

Kum, en önemli seramik hammaddelerinden biridir. Bu çalışma, Ankara - Gölbaşı bölgesinde 3000 ton rezervi olan atık kumun, inşaat sektöründe alt temel malzemesi olarak kullanıma elverişliliğinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır.

Üst yapının getirdiği yükleri karşılamak için zeminin özellikleri yeterli olmadığında, zemini iyileştirmek gerekmektedir. Kötü zemin uygun duruma getirildikten sonra temeller sağlam tabakaya oturtulur. Bu işlem; kötü malzeme tamamen kaldırılarak yerine üstün nitelikli zemin doldurularak yada doğal zemin ıslah edildikten sonra tekrar yerleştirilme şeklinde yapılmaktadır. Zemin özelliklerini, yerinde yapılan işlemlerle iyileştirmek ise diğer bir yöntemdir. Zemin stabilizasyon yöntemleri; sıkıştırma, ön yükleme, enjeksiyon, ısı işlemler, donatı ve katkı maddeleri uygulamasıdır.

Bu çalışmada, katkı maddeleri ile stabilizasyon yöntemi uygulanarak, atık kuma, % 5,5- 6- 7- 7,5- 8 ve 10 oranında çimento katılarak optimum su içeriğinde 7 günlük ve 28 günlük serbest basma deneyleri yapılmıştır. % 6 çimento katkısı ile 7 ve 28 günlük serbest basma değerlerinde olması gereken minimum 1000 kPa ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) için minimum % 50 değerlerinin üzerinde değerler elde edilmiştir. Kumun % 6 çimento katkısı ile alt temel malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Zemin, stabilizasyon, katkı maddeleri, serbest basma dayanımı.

ABSTRACT
Master Of Science Thesis

STABILIZATION OF INACTIVE SAND BY CEMENT

NURCAN DEMİRHAN

Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Ceramic Engineering

Supervisor : Doç. Dr. Nuran AY
1998, Page 89

Sand is one of the major raw materials of ceramic industry. This study is performed for evaluating the usability of inactive sand having 3000 tons reserve in Gölbaşı region for sub-base material in civil industry.

When soil characteristics are insufficient to counter the loads of superstructure, soil should be reformed. In this case, some techniques are applied to the soil and base is settled on a rigid layer. Either insufficient material is removed completely and a soil having superior characteristics is filled instead of this or natural soil is settled after it is reformed. Improving soil characteristics by in-situ operations is another method. Soil stabilization methods are compaction, pre-loading, injection, heat treatment, reinforcement and application of additives.

In this study, additive application method is carried out as adding 5.5, 6, 7, 7.5, 8 and 10 % cement into inactive sand at optimum water content and disengaged pressure experiments are performed for 7 and 28 days aged samples. Values obtained for 6 % cement additions are higher than required minimum values of disengaged pressure strength of 1000 kPa and 50 % for Californian Bearing Rate (CBR). It is seen that, this inactive sand can be used as sub- base material with 6 % cement addition.

Key words: Soil, stabilization, additive, compressive strength.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımı yönlendiren, her zaman yardımını ve ilgisini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Nuran AY 'a, deneysel çalıőmalarımda yardımcı olan TCK zemin laboratuarı personeline, TCK bakım Őube müdürü Rıza SARIKAYA ' ya, tezin bilgisayar yazılımina yardımcı olan kuzenim Nilgün FER 'e ve maddi ve manevi hiç bir fedakarlığı esirgemeyen aileme teőekkürü borç bilirim.

Nurcan DEMİRHAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. Zeminlerin Yapısı.....	3
2.1.1. Kohezyonsuz zeminlerin özellikleri.....	4
2.1.2. Kohezyonlu zeminlerin özellikleri.....	6
2.2. Zeminlerin Sınıflandırılması.....	7
2.2.1. Tane boyutları ve granülometri.....	7
2.2.2. Sınıflandırma sistemleri.....	8
3. STABİLİZASYON.....	12
3.1. Islah Yöntemlerine Yaklaşım.....	12
3.2. Stabilizasyon Yöntemleri.....	13
3.2.1. Sıkıştırma.....	16
3.2.1.1. Kohezyonsuz zeminlerde derin sıkıştırma.....	16
3.2.1.2. Patlamayla sıkıştırma.....	16

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

3.2.1.3. Sondalı titreşim teknikleri.....	17
3.2.1.4. Ağır tokmakla sıkıştırma.....	17
3.2.2. Önceden yükleme ile ıslah.....	18
3.2.2.1. Yükleme ile ön sıkışma.....	18
3.2.2.2. Sıkışmanın drenlerle hızlandırılması.....	18
3.2.2.3. Kireç kuyuları ile ıslah.....	18
3.2.2.4. Elektro osmoz.....	19
3.2.3. Enjeksiyon.....	19
3.2.3.1. Taneli enjeksiyon.....	19
3.2.3.2. Kimyasal enjeksiyon.....	20
3.2.3.3. Sıkıştırma ile enjeksiyon.....	20
3.2.3.4. Jet enjeksiyon.....	20
3.2.4. Isıl işlemler.....	21
3.2.4.1. Yüksek sıcaklıkta stabilizasyon.....	21
3.2.4.2. Soğutma yöntemleri.....	21
3.2.5. Ortamın donatılandırılması.....	22
3.3. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon.....	23
3.3.1. Katkı maddeleri uygulanması.....	23
3.3.2. Kireçle stabilizasyon.....	23
3.3.3. Çimento stabilizasyonu.....	25
3.3.3.1. Çimento.....	25
3.3.3.2. Çimento hammaddeleri.....	26
3.3.3.3. Çimento üretimi.....	31
3.3.3.4. Çimento bileşenleri.....	33
3.3.3.5. Çimento türleri.	34

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

3.3.3.6. Çimento zemin etkileşimi.....	36
3.3.3.7. Su - çimento sistemi (Hidratlanma).....	41
3.3.3.8. Su - çimento stabilizasyonunda mekanizmalar.....	42
3.3.4. Bitümlü stabilizasyon.....	43
3.3.5. Diğer katkı maddeleri ile stabilizasyon.....	44
3.4. Ulaşım Yollarında Stabilizasyon.....	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	48
4.2. Kullanılan Cihazlar.....	50
4.3. Yapılan Deneyler.....	50
4.3.1. Yoğunluk deneyi.....	51
4.3.2. Elek analizi.....	51
4.3.3. Hidrometre deneyi.....	52
4.3.4. Sıkıştırma deneyi.....	54
4.3.5. Dayanım deneyleri.....	56
4.3.5.1. Serbest basma dayanımı.....	56
4.3.5.2. Kaliforniya taşıma oranı (CBR).....	58
4.4. Deney Sonuçları.....	59
4.4.1. Yoğunluk deneyi sonuçları.....	59
4.4.2. Elek analizi sonuçları.....	59
4.4.3. Hidrometre sonuçları.....	61
4.4.4. Sıkıştırma deneyi sonuçları.....	61
4.4.5. Dayanım deneyleri sonuçları.....	67
4.4.5.1. Serbest basma dayanım deneyi sonuçları.....	67

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

4.4.5.2. Kaliforniya taşıma oranı sonuçları.....	81
5. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI.....	84
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
7. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Kohezyonsuz zemin yapısı	3
2.2. Kohezyonlu zemin yapısı	3
2.3. Tane boyutu dağılım eğrisi	5
2.4. Kohezyonlu zeminlerin kıvamının değişimi	7
2.5. Elek analizi	7
3.1. Çimento katkı yüzdesinin hesaplanması	39
4.1. Yapılan deneylerin akış şeması	50
4.2. İnce taneli zeminlerde tane boyut dağılımının bulunması için kullanılan hidrometre	53
4.3. Hidrometre deneyi hesapları için kullanılan nomogram	55
4.4. Kumun elek analizi	60
4.5. % 0 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri	63
4.6. % 5 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri	64
4.7. % 6 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri	65
4.8. % 7,5 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri	66
4.9. CBR değerleri grafiği	83
5.1. Çimento katkı oranına göre 7 günlük serbest basma dayanımı değerleri	85
5.2. Çimento katkı oranına göre 28 günlük serbest basma dayanımı değerleri	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Tane boyutuna göre ayırım	8
2.2. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USC)	9
2.3. Aashto zemin sınıflandırma sistemi	11
3.1. Islah yöntemlerinin uygulanabilirliği	14
3.2. Donatı yöntemlerinin işlevi	22
3.3. Çimento hammaddelerinin CaCO_3 içerikleri	28
3.4. Portland çimentosu üretiminde kullanılan değişik kalker ve marnların kimyasal analizleri	28
3.5. Bazı killerin kimyasal analizleri	30
3.6. Bazı düzeltme maddelerinin kimyasal analizleri	31
3.7. Çimentonun ana bileşenleri	33
3.8. Çimentonun ana bileşenlerinin özellikleri	33
3.9. Portland çimentoları ve katkılı çimentonun kimyasal özellikleri	35
3.10. Portland çimentoları ve katkılı çimento dışında Türkiye' de üretilen diğer çimentoların kimyasal özellikleri	36
3.11. Portland çimentoları ve katkılı çimentonun fiziksel özellikleri	37
3.12. Portland çimento ve katkılı çimento dışında Türkiye' de üretilen diğer çimentoların fiziksel özellikleri	38
3.13. Çimento stabilizasyonunun sıkıştırılmış zemine etkisi	40
4.1. Kullanılan kumun kimyasal bileşimi	48
4.2. Kullanılan kumun mineralojik analizi	48
4.3. Kullanılan çimentonun (PÇ 42,5) kimyasal ve fiziksel özellikleri	49
4.4. Hidrometre değerleri	62

4.5. Katkı miktarına göre sıkıştırma deneyi değerleri	67
4.6. % 5,5 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri	67
4.7. % 6 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi 1. değerleri	68
4.8. % 6 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi 2. değerleri	69
4.9. % 7 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri	70
4.10. % 7,5 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri	71
4.11. % 8 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri	72
4.12. % 10 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri	73
4.13. % 5,5 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri	74
4.14. % 6 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi 1. değerleri	75
4.15. % 6 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi 2. değerleri	76
4.16. % 7 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri	77
4.17. % 7,5 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri	78
4.18. % 8 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri	79
4.19. % 10 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri	80
4.20. Çimento katkı oranlarına ve zamana göre serbest basma değerleri	81
4.21. Penetrasyon değerleri ve buna karşılık gelen piston yükü	82

1. GİRİŞ

Ulaşım yolları, inşaat mühendisliğinde toprağın en çok kullanıldığı yapılar olarak tariflenebilir. Boy - en oranı sonsuz temel ve üst yapı sisteminde, karşılaşılan taban zeminleri çoğunlukla trafik yüklerini taşıyamazlar. Bu gibi durumlarda tabanın taşıma gücü sıkıştırma (kompaksiyon) işlemiyle artırılabilir. Ancak yüksek yağışlı bölgelerde ve özellikle kil oranı yüksek olan zeminlerde sıkıştırma ile sağlanan iyileşme geçici olmakta, su ile temas ettiklerinde taban zeminlerinin ve alt temel tabakasının hızla kaybolan kaliteleri üst yapısında hasar görmesine neden olmaktadır. Düşük kaliteli malzemeyi kaldırmanın - söz konusu olan büyük hacimler için çok pahalı ve hatta imkansız olması, bunlardan yeni malzemeler üretmek fikrini akla getirmiş ve makul bir çözüm olarak stabilizasyon bir çok ülkede standard uygulama haline gelmiştir.

Üst yapının getirdiği gerilme, drenaj, titreşim değişiklikleri genellikle kullanılan zeminde karşılanabilir. Zemin özellikleri yeterli olmadığında seçilecek birkaç yol bulunmaktadır. Bunlar; kötü zemini bir yöntemle geçerek temelleri sağlam tabakaya oturtmak, yapı temellerini zayıf zeminin taşıyabileceği özelliklerde yapmak, kötü malzemeyi tamamen kaldırarak yerine üstün nitelikli zemin doldurmak, doğal zemini ıslah ettikten sonra tekrar yerleştirmek veya zemin özelliklerini yerinde yapılan işlemlerle iyileştirmektir.

Stabilizasyon konusunda en önemli uygulama doğal zeminin yerinde yapılan işlemlerle sağlamlaştırılmasıdır. İnşaat mühendisliğinde ilk ve orta çağın en ileri toplumu olan Roma İmparatorluğunda stabilizasyon tekniklerine özellikle karayolu yapımında başvurulmuştur. İtalya'da bol bulunan puzzolan ve kirecin yardımıyla killi zeminlerin iyileştirilmesi başarıyla sağlanmıştır.

1970'lerin stabilizasyon teknolojisine getirdiği yenilik plastiğin çok ucuza maledilmesi sonucu bu malzemenin bol miktarda kullanılmasıdır. Geçirimsizliği ya da kayma direnci yetersiz olan doğal zemin plastik tabakalar uygulamasıyla kullanılır hale getirilmektedir.

Ortam özelliklerini iyileştirmek amacıyla bugüne kadar geliştirilen yüzlerce yöntem çeşitli yönlerden değerlendirilerek sınıflandırılmıştır. Stabilizasyon yöntemleri, işlemlerin özelliğine göre; sıkıştırma, ön yükleme, enjeksiyon, ısı işlemler, donatı ve katkı maddeleri uygulamasıdır.

Bu çalışmada, katkı maddeleri ile stabilizasyon tekniği uygulanarak, atık kuma % 5,5-6-7- 7,5 - 8 ve 10 oranında çimento katılarak, serbest basma dayanımları ölçülmüş ve bu kumun alt temel malzemesi olarak kullanımına elverişliliği araştırılmıştır.

2. ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

Zemin; bir bağlayıcı maddeyle tamamen veya kısmen çimentolaşmamış değişik türden minerallerin su ve hava ile karışımıyla oluşan malzemedir.

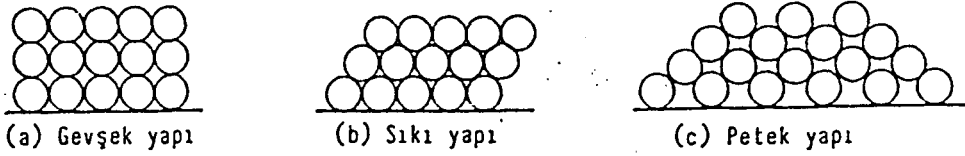
Mühendislik bakımından zemin; çakıl, kum, silt, kil veya bunların karışımından meydana gelen bir malzeme olarak düşünülür [1].

2.1. Zeminlerin Yapısı

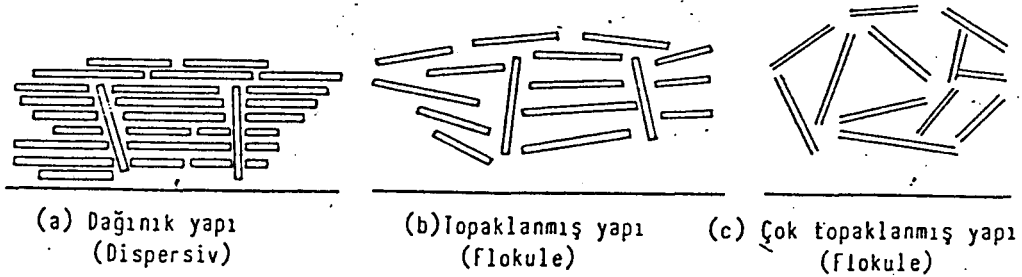
Zeminler iki grup altında incelenir;

- Kohezyonsuz zeminler
- Kohezyonlu zeminler

Kohezyonsuz zemin yapısı Şekil 2.1' de, kohezyonlu zemin yapısı ise Şekil 2.2' de görülmektedir [2].



Şekil 2.1. Kohezyonsuz zemin yapısı



Şekil 2.2. Kohezyonlu zemin yapısı.

2.1.1. Kohezyonsuz zeminlerin özellikleri

Kohezyonsuz zeminlerin mühendislik özellikleri tane çapı dağılımları ile yakından ilgilidir. Zemin granülometresinden yararlanılarak bulunan üç parametre kullanılarak, zemin özellikleri yaklaşık olarak tarif edilebilir [3]. Bunlar :

Efektif çap : Tane boyutu dağılım eğrisinde (Şekil. 2.3) yüzde P=10'a karşılık gelen D_{10} çapıdır. Yani taneciklerin %10'u efektif çaptan daha ince, %90'ı ise daha büyüktür.

Üniformluk katsayısı (C_u), eşitlik (2.1) ile yazılır.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

D_{60} , P = 60 yüzdesine karşılık gelen tane çapıdır.

Kohezyonsuz kum çakıl zemin karışımında tüm tanelerin aynı boyutta olması halinde $C_u \cong 1$ olur. Bu tür zeminlere " uniform zemin " denir ve " kötü derecelenmiş " olarak adlandırılır. Eğer;

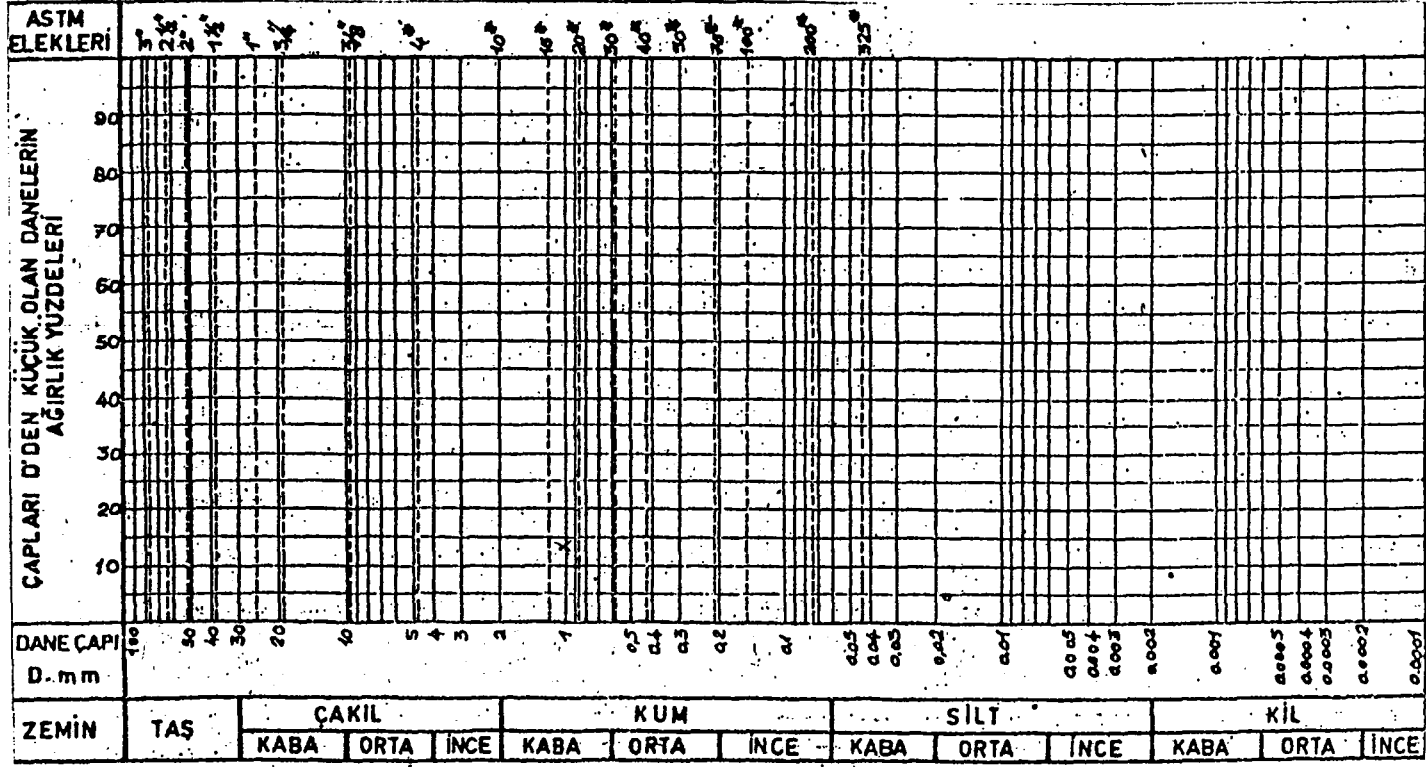
$C_u > 4-6$ ise zemine " iyi derecelenmiş " denir.

Süreklilik katsayısı (C_c) :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

olarak tarif edilir.

D_{30} ; P = 30 yüzdesine karşılık gelen çaptır.



D₆₀ :
D₁₀ :
U :

TAS : %
ÇAKIL : %
KUM : %

SILT : %
KİL : %

NOT:

Şekil 2.3. Tane boyutu dağılım eğrisi.

Bir zemin numunesine ait tane boyutu dağılım eğrisinde bazı tane boyutlarının eksik olup olmadığı C_c derecelenme katsayısı ile kontrol edilebilir. Zeminin, sürekli tane dağılımına sahip olması $1 < C_c < 3$ koşuluyla mümkündür.

2.1.2. Kohezyonlu zeminlerin özellikleri

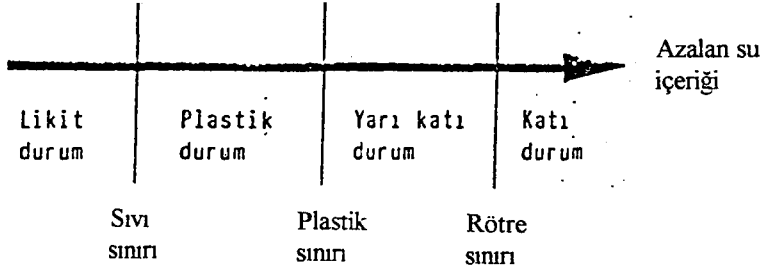
Kohezyonlu zeminler su içeriğine bağlı olarak çeşitli kıvamlarda olabilirler. İsveçli bilim adamı A. Atterberg, 1911 yılında kohezyonlu zeminlerin kıvamını su içeriğine bağlı olarak tanımlayan beş ayrı deney yöntemi geliştirmiştir. Bunlardan üçü halen zemin mühendisliğinde kullanılmaktadır [1, 2, 4] ,

Sıvı Sınırı (W_L) : Zeminin daha fazla su içeriğinde viskoz bir sıvı gibi davrandığı haldeki su içeriğidir.

Plastik Sınırı (W_p) : Zeminin daha düşük su içeriğinde plastik malzeme gibi davranamayacağı, katı hale geleceği su içeriğidir. Zemin, W_L ile W_p arasındaki su içeriği değerlerinde plastik malzeme gibi davranır. Bu aralığa " Plastisite İndisi " denir.

Rötre Sınırı (W_R) : Zemin doymun halde iken, daha fazla su kaybının daha fazla hacim değişmesine neden olmayacağı su içeriğidir. Bu sınır, su içeriğindeki değişimin büyük hacim değişimlerine sebep olduğu zeminlerde büyük önem taşır.

Tabii su içeriği ile Atterberg sınırların karşılaştırılması zeminin kıvamı hakkında fikir verebilir [3]. Şekil 2.4' de kohezyonlu zeminlerin kıvamının değişimi görülmektedir.

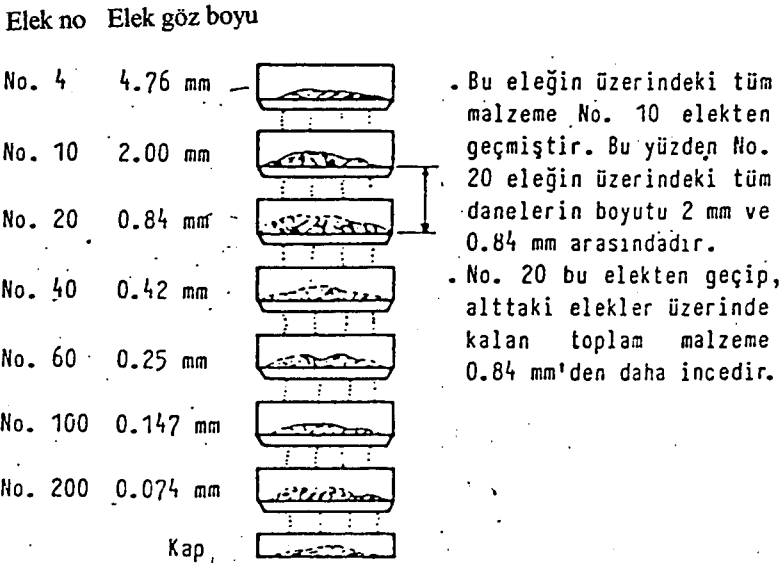


Şekil 2.4. Kohezyonlu zeminlerin kıvamının değişimi .

2.2. Zeminlerin Sınıflandırılması

2.2.1. Tane boyutları ve granülometri (Tane Boyut Dağılımı)

Zeminlerin tane boyutları, bunların eleklerden elenmesi suretiyle elde edilir. Eleklerin göz açıklıkları yukarıdan aşağıya doğru giderek azalır (Şekil. 2.5).



Şekil.2.5. Elek analizi [5]

2.2.2. Sınıflandırma sistemleri

Çoğu sınıflandırma sistemlerinde tane boyutlarına göre ayırım yapılması esastır. Zeminler, tane boyutlarına göre üç ana grupta toplanabilirler [1, 2, 4] . Bunlar:

1. Kum, çakıl gibi iri taneli zeminler,
2. Silt, kil gibi ince taneli zeminler,
3. Turba gibi organik zeminler.

Çakıl, kum, silt ve kilin tane boyutuna göre ayırımı Çizelge 2.1' de görülmektedir [6] .

Çizelge 2.1.Tane boyutuna göre ayırım

Adı	Simge	İrilik	Tane Boyutu (mm)
Çakıl	G	İri	60-20
		Orta	20- 6
		İnce	6- 2
Kum	S	İri	2-0,6
		Orta	0,6-0,2
		İnce	0,2-0,06
Silt	M	İri	0,06-0,02
		Orta	0,02-0,006
		İnce	0,006-0,002
Kil	C		< 0,002

Sınıflandırma sistemleri içinde birleşik zemin sınıflandırması sistemi bütün sistemler içinde dünyada en çok kullanılanıdır. Çizelge 2.2' de Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USC) görülmektedir. Yaygın kullanımı olan diğer sınıflandırma sistemleri arasında [1, 2, 7] ,

1. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation)
2. ASTM (American Society For Testing and Materials)
3. FAA (Federal Aviation Administration of the U.S. Department of Transportation)
4. MIT (Massachusetts Institute of Technology) sıralanabilir.

Çizelge 2.2. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USC)

LABORATUVAR DENEYLERİNİ KULLANARAK SİMGELEME KRİTERLERİ				SİM	GRUP ADIB	
İRİ TANELİ ZEMİNLER (% 50 ' den fazlası NO . 200 Elek Üzerinde kalan)	ÇAKILLAR Kaba tanelerin % 50 ' den fazlası 2 mm elek üzerinde kalıyor	Temiz Çakıllar (% 5 ' ten az ince içeriyor)	Cu > 4 ve 1 < Cr < 3	GW	Düzgün tane dağılımı Çakıl	
		Kirli Çakıllar (İncesi % 5 ' ten fazla) A	İnceleri ML veya MH	GM	Siltli Çakıl C	
			İnceleri CL veya CH	GC	Killi Çakıl C	
		KUMLAR % 50 veya fazlası 2 mm elekten geçiyor	Temiz kumlar (% 5 ' ten az incesi var)	Cu > 6 ve 1 < Cr < 3	SW	Düzgün tane dağılımlı Kum
	Kirli Kumlar (İncesi % 5 ten fazla) A		İnceleri ML veya MH	SM	Siltli Kum D	
			İnceleri CL veya CH	SC	Killi Kum D	
	İNCE TANELİ ZEMİNLER (% 50 ' den fazlası NO : 200 elekten geçen)		SİTLER VE KİLLER (Likit Limit 50 ' den kötük	Anorganik	Ip > 7 ve A- doğrusu üstünde	CL
		Organik		Ip > 7 ve A- doğrusu altında	ML	Silt
(Wl kurutulmuş /WL tabii) <0,75				OL	Organik Kil/ Organi Silt	
SİTLER VE KİLLER (Likit Limit 50 ' den yüksek		Anorganik	Ip A- doğrusu üstünde veya üzerinde	CH	Yağlı Kil	
		Organik	Ip A- doğrusu altında noktalanıyor	MH	Elastik Silt	
			(WL kurutulmuş /WL tabii) <0,75	OH	Organik Kil / Organik Silt	
ORGANİK ZEMİN	Koyu Renkli Kokulu Aşırı Organik			PT	Turba	

A - NO. 200 elekten geçeni % 5 - % 12 arası ise çift simge kullanılır.

B - Zemin moloz blok içeriyorsa grup adına eklenir.

C - Örnekte % 15 ' ten fazla kum varsa grup adına " kumlu " terimi eklenir.

D - İnceler CL - ML bölgesi GC - GM veya SC - SM simgesi verilir.

AASHTO Sınıflandırması : Zeminin AASHTO sistemine göre sınıflandırmak için Çizelge 2.2 (Birleştirilmiş sınıflandırmada akış diyagramı)'na No.10, No.40 ve No.200 elekten geçen malzemenin yüzdesiyle girilerek, soldan sağa doğru tarama yapılır (Çizelge 2.3) [1, 2, 7] .

Çizelge 2.3. AASHTO zemin sınıflandırma sistemi

GENEL SINIFLANDIRMA	TANELİ MALZEMELER (% 35 VEYA DAHA AZ NO : 200 GEÇEN)							SİLT - KİL MALZEMELER (% 35 DEN FAZLA NO : 200 GEÇEN)			
	A-1		A-3 ¹	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
GRUP SINIFLANDIRMA	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
ELEK ANALİZİ											
Yüzde Geçen											
NO : 10	50 Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO : 40	30 Max	50 Max	51 Max	-	-	-	-	-	-	-	-
NO : 200	15 Max	25 Max	10 Max	35 Max	35 Max	35 Max	35 Max	36 Min	36 Min	36 Min	36 Min
No : 40 altına geçen kısmın özellikleri											
Sıvı sınırı		-	-	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min
Plastisite İndisi		6 Max	NP	10 Max	10 Max	11 Min	11 Min	10 Max	10 Max	11 Min	11 Min
Grup İndisi	0	0	0	0	0	4 Max	4 Max	8 Max	12 Max	16 Max	20 Max
Ana malzemenin ekseriye görülen tipleri	TAŞ PARÇALARI ÇAKIL VE KUM		İNCE KUM	SİTLİ veya KİLLİ ÇAKIL ve KUM				SİTLİ ZEMİNLER		KİLLİ ZEMİNLER	
Taban olarak genel değerlendirme	FEVKALEDE İLE İYİ							ORTA İLE KÖTÜ			

1. A-3 ün A-2 den önce konulması soldan sağa eleme işlemi için gereklidir ve A-3 ün A-2 den üstün olduğunu belirtmez.
2. A-7-5 ara grubunun plastisite indisi ($W_L - 30$) eşit veya azdır. A-7-6 ara grubundaki ($W_L - 30$) dan fazladır.

3. STABİLİZASYON

Yapının getirdiği gerilme, drenaj, titreşim değişiklikleri kullanılan zemin tarafından karşılanmalıdır. Zeminin özellikleri yeterli olmadığında seçilecek birkaç yol bulunmaktadır [8] ;

1. Kötü zemini ortadan kaldırmadan temelleri sağlam tabakaya oturtmak.
2. Yapı temellerini zayıf zeminin taşıyabileceği özelliklerde yapmak.
3. Kötü malzemeyi tamamen kaldırarak yerine üstün nitelikli zemin doldurmak, ya da doğal zemini ıslah ettikten sonra tekrar yerleştirmek.
4. Zeminin özelliklerini yerinde yapılan işlemlerle iyileştirmek.

3.1. Islah Yöntemlerine Yaklaşım

Stabilizasyon terimi, zemin ya da kaya kütesinin kayma direncini, dayanıklılığını artıran geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan her türlü işlem için kullanılır. Olumlu sonuç, boşluk oranının azaltılması ve tanelerin bağlanması ile alınır. Ancak, bugünkü anlamıyla sıkıştırma ve yabancı zeminlerin doğal zeminle karıştırılması (mekanik stabilizasyon) gibi işlemler stabilizasyon kapsamına girmemektedir. Dayanım dışında özellikler için yapılan işlemler ise " iyileştirme " olarak adlandırılır.

Stabilizasyon teknolojisinin gelişimi, geotekniğin diğer bazı dallarında olduğu gibi deneysel bilgilerin teoriden önce edinilmesiyle süregelmiştir. Bu nedenle 1960 ortalarına kadar patentli ve uzmanlık gerektiren bir alan olarak kaldığı görülmektedir [9].

Stabilizasyon uygulaması çok özel durumlar dışında ancak büyük kar getirdiğinde söz konusu olur. Başarılı sonucun kesin olmadığı her durumda uygulayıcı çekingen kalmaktadır. Askeri uygulamada ise bu görüşler geçerli değildir. Stratejik amaçla zeminin en kısa zamanda ıslahı mali görüşlerin önünde gelmektedir.

Her stabilizasyon yöntemi ancak özel koşullarda geçerlidir. Bu koşulları şöyle özetlemek mümkündür [10, 11].

1. Ortamın türü : kil, organik, tortul v.b.
2. İslah edilecek bölgenin alanı ve hacmi (Ortamın geometrik özellikleri ve yapı türüne bağlı olarak)
3. Yapının türü ve yüklerin dağılımı.
4. Zeminin özellikleri : Kayma direnci, sıkışabilirlik, geçirimsizlik.
5. İzin verilebilir toplam ve farklı oturmalar.
6. Malzeme durumu : Taş, kum, su, katkı maddeleri.
7. Teknisyen, vasıflı işçi, özel aletlerin varlığı.
8. Çevre koşulları : Atıkların kullanımı, erozyon, su kirlenme kısıtlamaları.
9. Yerel deneyim ve birikim.
10. Ekonomik veriler.

3.2. Stabilizasyon Yöntemleri

Ortam özelliklerini iyileştirmek amacıyla bugüne kadar geliştirilen yüzlerce yöntem çeşitli yönlerden değerlendirilerek sınıflandırılmıştır. Sınıflandırmaları incelemek, yöntemlerin özelliklerini anlama açısından önem taşır. Stabilizasyon; genellikle sığ ve derin olarak iki gruba ayrılır [12] ; Sığda yapılan işlemler, kontrol kolaylığı ve hız nedeniyle derin stabilizasyon yöntemlerinden farklıdır.

Stabilizasyon yöntemlerine diğer bir bakış yönü ise ortamın özellikleridir. Çizelge 3.1.' de İslah yöntemlerinin uygulanabilirliği verilmiştir. Çizelgede de görüldüğü gibi, ayırmda hakim olan kriter, zeminin inceliğidir. Çakıl ve kumlar için geçerli olan bir tekniğin, çoğunlukla ince taneli zeminlerde verimsiz kaldığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni; yüzeysel kuvvetlerin hakim olduğu killerde, geçirimsizliğin zayıflığı nedeniyle suyun zemindeki farklılığıdır.

Stabilizasyon yöntemlerinin değerlendirilmesinde bir başka yaklaşım; fiziksel mekanik tekniklerine karşın kimyasal etkilerin gözönünde tutulmasıdır. Genel kural olarak, kimyasal işlemler tek yönlüdür. Bir başka deyişle; reaksiyon tamamlandıktan sonra elde edilen ürün, niteliklerini kolayca kaybetmez [9, 13].

Stabilizasyon yöntemlerinde daha genel bir ayırım; işlemlerin özelliğine göre yapılabilir.

Sıkıştırma : (Zeminde titreşim verilmesi ve malzeme ilavesi)

Ön Yükleme : (Özellikle yumuşak zeminlerde, efektif gerilmelerin artırılması)

Enjeksiyon : (Ortama yabancı malzeme şırınga ederek boşluk ve çatlakların azaltılması)

Isıl İşlemler : (Zeminlerin suyla olan bağının, soğutarak veya yüksek sıcaklık yoluyla zayıflatılması)

Donatı : (Zayıf zemin ve kayaç kitlelerin genellikle zayıflık yönlerine dikey yerleştirilen sağlam elemanlarla özelliklerinin iyileştirilmesi)

Katkı Maddeleri : (Ortama eklenen maddelerle, tane ve bloklar arasında bağ oluşturulması veya kuvvetlendirilmesi)

3.2.1. Sıkıştırma

3.2.1.1. Kohezyonsuz zeminlerde derin sıkıştırma

Derin ve gevşek kum-çakıl zeminlerin en önemli problemi; titreşimler altında sıvılaşarak büyük hacim düşmeleri göstermesidir. Yapılan küçük müdahaleler sonucu, bu tür zeminlerin etkin şekilde ıslah edilebildiği kesin olarak belirlenmiştir.

Sıkıştırma işlemleri dinamik olarak, bir sondanın zemine itilmesi ya da genel titreşimle yapılır. Zeminin hacim kaybı, çoğunlukla öylesine büyük olur ki, boşluk ve çukurların doldurulması için çakıl getirilmesi gerekir.

Kohezyonsuz zeminin bağıl birim hacim ağırlığının artması; tane dağılımı ve kil yüzdesi yanında; su tablasının düzeyi ve doygunluk derecesi, ilk birim hacim ağırlığı, varsa doğal gerilmeleri, yaşı, çimentolaşma gibi zemin yapısının özellikleri ve yöntemin ayrıntıları gibi faktörlere bağlıdır.

Titreşimler sonucu sıkılaştırma süreci tanelerin hareket ederek yeni bir dizilim almalarıyla oluşur. Batık durumdaki ince kum zeminlerde dinamik ve tekrarlı yükler sıvılaşmayı sağlamakta ve bağıl birim hacim ağırlık bu mekanizmayla yükselmektedir [14].

3.2.1.2. Patlamayla sıkıştırma

Kısıtlı patlayıcı ağırlıkları kullanılarak, ardışık patlamalarla zeminin sıkıştırılması giderek rağbet kazanan bir yöntemdir. Bu yöntemde ana prensip; zeminin içinde patlama ile oluşan yüksek hızlı basınç dalgalarının kısıtlı bir hacimde sıvılaşma sonucu birim hacim ağırlığın artmasıdır. Basınç dalgaları patlama odağından dışarı doğru hızla zayıfladığından; bir noktada büyük patlama yerine, bir çok noktada küçük atımlar tercih edilmelidir.

Bu yöntemin üstün yanı; diğerlerinde mümkün olmayan derinliklerde etkin olabilmesidir. Derinliği 40 m'yi bulan noktalarda 30 kg yüklerle atım yapılmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [14, 15] .

3.2.1.3. Sondalı titreşim teknikleri

Bu gruba giren yöntemlerde zemine içi boş ya da dolu bir sonda yüksek frekanslı bir hareketle batırılır ve sıkıştırma; torpido şekilli sondanın dışarı alınması sonucunda kuyuya çakıl yada kırmataş doldurularak sıkıştırılan kitleye rijitlik sağlanır. (Zeminin sıkıştırılması sırasında kratere doldurulan malzeme ile doğal malzemenin uyumluluğu stabilizasyonun etkinliğini artırır. İri kum, ince kuma oranla titreşimleri daha iyi ilettiğinden tercih edilir.)

Bu yöntemlerde olağan etki derinliği 20 m'dir.

3.2.1.4. Ağır tokmakla sıkıştırma

Bu yöntemde 2 tondan 200 tona varan ağırlıkların 15-40 m yüksekten düşürülmesi tekniği kullanılmaktadır. Eski yöntemlerin uygulaması; doygun olmayan zeminlerin yoğunlaştırılması prensibine göre yapılırken, ağır tokmaklamada doygun ve batık kumlar çok büyük enerji ve titreşim verilerek sıvılaştırılmaktadır.

Son zamanlarda kohezyonlu zeminlerde de uygulama düşünülmüşse de yöntemin geçerli olabilmesi için zemin yapısını bozacak enerji, makul zamanda artan boşluk suyu basınçları ve suyun hareketi için çatlak kanalların oluşması gerekli görülmektedir.

3.2.2. Önceden yükleme ile ıslah

3.2.2.1. Yükleme ile ön sıkışma

Kullanılacak arazinin, yapımdan önce yüklenmesi yoluyla, yapının uzun vadeli oturmalarını hızla oluşturarak bunun sonucu siltli ve killi zeminin taşıma gücünün artırılması prensibine dayanır. Ön yükleme sonucu zemin belirli miktarda sıkışacağı için, yapı yüklerini aldığı anda ilk haline oranla daha az sıkışma gösterecektir [15] .

Sıkışma taneli malzemelerle sağlanır. Bunun yanında, tanklar içinde su, yeraltı su düzeyinin sürekli olarak düşürülmesi, yüzeye bir miktar yük altına serilen plastik örtü yardımıyla vakum uygulaması başvurulan yollar olarak sayılabilir.

3.2.2.2. Sıkışmanın drenlerle hızlandırılması

Sözkonusu alanların çoğunda, ön yükleme ile sıkışma için gerekli zaman kabul edilemeyecek kadar uzundur, ya da araziye yığılması gereken dolma yüksekliği ekonomik sınırlar içinde olmaz.

Birincil sıkışmanın kontrol edici faktör olduğu zeminlerde ön sıkışma, düşey drenlerin kullanılmasıyla büyük ölçüde hızlandırılabilir. Dolayısıyla bu yaklaşım, organik kil ve siltler gibi ikincil sıkışmanın hakim olduğu zeminlerde geçerli değildir [11, 13] .

3.2.2.3. Kireç kuyuları ile ıslah

Bu yöntem, su içeriği % 50' nin üzerindeki siltler ve killi siltlerde verimli bir stabilizasyon tekniğidir. Uygulama; 1 m aralıkla açılan 30 cm çaplı kuyulara 10 m derinliğe kadar sönmemiş kireç doldurulmasıyla yapılır. Kireç su ile karşılaştığında CaO ağırlığının % 32' si kadar su emmektedir. Hidratasyon sonucu kirecin hacmi artarak, kuyu

duvarlarına yanal basınç uygulanır. Bu metod, ucuz ve kolay olarak görünmektedir. Ancak yapım için bazı özel makinalar gereklidir [15] .

3.2.2.4. Elektro osmoz

Doygun silt ve siltli killerde normal sıkışma ve boşluk suyunda eriyik oranının düşük olduğu durumlarda verimli bir yöntemdir.

Silt ve siltli kil gibi ince taneli zeminlerde, doğru akım uygulandığında boşluk suyunun anottan (+), katotta (-) hareket ettirilmesine elektro-osmoz denir. Eğer katotta toplanan su, sistem dışına pompalanır ve bu sırada anot yeni suyla beslenmezse etkin bir sıkışma mekanizması sağlanmış olur. Bu sırada anot tarafına özel sıvılar bırakılırsa, zeminde ek stabilizasyon etkisi oluşacaktır [13] .

3.2.3. Enjeksiyon

Enjeksiyon, kayma direncini artırmak ve geçirimsizliği azaltmak için kaya yada zemin kitlesine basınç altında bir sıvıyı yollama işlemidir. Kayaç çatlakları, zemin boşlukları doldurulur yada gevşek bölge kısmen sıkılaştırılır. En çok kullanılan enjeksiyon malzemesi çimento türleri, bentonit, silikatlar ve son yıllarda rağbet bulan lignin, akrilamid, rezorsinol, formol gibi kimyasal bileşiklerdir [10, 11] .

3.2.3.1. Taneli enjeksiyon

Saf çimento ve çimento-kil karışımlarının enjeksiyon sıvısı olarak kullanıldığı metottur. Karışımdaki su/çimento oranı 0.5/ 1' den 6/1' e kadar değişebilir.

3.2.3.2. Kimyasal enjeksiyon

Taneli enjeksiyondan üstün yanı, daha ince zeminlere uygulanabilmesidir. Ayrıca, pompalama sırasında daha düşük viskozitede oldukları gibi; ortamda donma zamanı da önceden tesbit edilebilmektedir.

Bugün en çok kullanılan kimyasal maddeler; silikatlar, lignin, reçine, akrilamid ve üretanlardır. Ortamda % 20' den fazla silt ve kil varsa kimyasal enjeksiyon hidrolik çatlaklar boyunca hareket edebilmektedir. Silikatlar zehirsiz olduklarından, uygulamanın % 90' ında tercih edilmektedir.

3.2.3.3. Sıkıştırma ile enjeksiyon

Bu kompaksiyon enjeksiyonu ile, vizkositesi çok yüksek tutulan kil, çimento gibi enjeksiyon malzemeleri, zeminde oluşturdukları yüksek basınçta ampullerle çevredeki zeminin konsolide olması ve sıkışmasını sağlarlar. Yöntem, sıkışabilirliği yüksek olan, makul bir katman yükü altındaki siltler ve kumlu siltlerde verimli olur.

3.2.3.4. Jet enjeksiyon

İşlemin temeli; çıkış basıncı 150-700 atm. olan su jetidir. Önce yüksek düşey basınçla sondaj deliği istenen derinliğe indirilir. Sonra su jeti yanal olarak yöneltilerek 3m' ye varabilen çaplarda oyulan kuyuda doğal zeminle katkı malzemesi karıştırılır. Bu yöntemin avantajları; ıslah edilen bölgelerin yakından kontrol edilmesi yanında, kumlar ve killerde uygulanabilmesidir.

3.2.4. Isıl işlemler

3.2.4.1. Yüksek sıcaklıkta stabilizasyon

Doygun olmayan silt ve killer ortam sıcaklığının olağan sınırları üzerine çıkartılmasıyla kuvvetlendirilebilir. Isı uygulaması iki kademede düşünülebilir. 110 C° dolaylarında ısıtıldığında zeminin suya karşı isteği bir ölçüde azaldığından geçici uygulama için bir çıkış olarak görülebilir. Öte yandan killer, 900 C° de faz değiştirmektedirler. Edinilen deneyim 400-600 C° ye ısıtıldığında killerin az miktarda rutubet alacak kadar değişikliğe uğradığını göstermektedir.

Sondaj delikleri açıldıktan sonra, burada elektrodlar yada benzin alevini radyal olarak saçan borular aracılığı ile yüksek sıcaklık oluştururlar. (1-2 m çapında bir bölgeyi stabilize etmek için bir haftalık yakım gerekmektedir.) [9, 13].

3.2.4.2. Soğutma yöntemleri

Kendini kısa süre de olsa tutmayacak akma ve göçme eğilimi gösteren ortamlarda kuyu, temel ya da tünel gibi önemli kazıların stabilitesi, yeterli bir bölgenin soğutulması ile geçici olarak sağlanabilir. Zemin ve kayaç dondurulduğunda kısa bir süre yüksek kayma direnci kazanmaktadır. Bu yöntemin kesinlikle uygulanamayacağı tek durum, hareketli yer altı suyudur.

Yöntemin en önemli bölümü, soğutucu sıvı ve sistemin seçilmesidir. Eski sistem mekanik kompresörde soğutucu sıvı olarak amonyak veya freon gazı kullanılmıştır. Soğutma borularında " devridaim " yapan kalsiyum klorürlü su, zemini kolaylıkla ve ucuza soğutabilmektedir [9].

3.2.5. Ortamın donatılandırılması

Betonarme ve donatılı zemin, bilimselliği artık tartışılmayan yöntemler olarak yerleşmiş tekniklerdir. Son yıllarda incelenen zemin stabilizasyon türlerinden en çok ilgi çekenin donatı işlemleri olduğu söylenebilir.

Donatının genel uygulaması, zeminin içine serbest ya da bir ön gerilme ile yerleştirilen yabancı cismin son karışımına basınç, çekme, eğilme ya da makaslama direnci vermesi ya da geçirimsizlik ve sıkışabilirliği azaltmasıdır.

Taş kazıkları, ankraj, kök kazıkları, çivileme, donatı ve jeotekstil en çok tanınan yöntemlerdir. Çizelge 3.2' de donatı yöntemlerinin işlevi verilmiştir [12].

Çizelge 3.2. Donatı yöntemlerinin işlevi

Görevi	YÖNTEM					
	Taş kazığı	Ankraj	Kök kazığı	Çivileme	Donatı	Jeotekstil
Çekme		x	x	x	x	x
Basınç	x		x			
Makaslama	x	x		x		
Eğilme			x			
Geçirimsizlik						x
Sıkışabilirlik	x			x		x

3.3. Katkı Maddeleri ile stabilizasyon

3.3.1. Katkı maddeleri uygulanması

Geoteknikte, hint yağından fosforik asite, tuzdan melasa kadar her türlü kimyasal bileşim, zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için uygulanmıştır. Kayma direncini artırmak, geçirimsizlik ve suya isteği azaltmak, hacim değişimini en aza indirmek gibi amaçlarla yapılan çalışmaların her zaman bilimsel olduğu söylenemez. Ayrıca endüstri yan ürünleri ve artıklarının kullanılması gayretleri jeolojik ortamın kirlenmesine de yol açabilmiştir.

Zamanın kazandırdığı deneyim; incelenen yüzlerce maddeden sadece bir kaçının sürekli uygulama olanağı bulunduğunu göstermektedir. Bunlar; etkinlikleri yanında ucuzluk ve gereksinme duyulduğunda kolayca bulunabilme özelliğine göre çimento, bitüm, kireç, fosforik asit, kalsiyum bileşikleri, reçine ve polimerler, son olarak da çok değerlikli iyon içeren maddelerdir.

Katkı maddeleri zemine laboratuvarda çok yararlı görünürken arazi uygulamasında etkin karıştırma güçlükleri, yağmur, sıcak gibi çevre koşulları nedeni ile bu olumlu yöntem, uygulayıcı tarafından arazide öncelik verilen bir yöntem değildir.

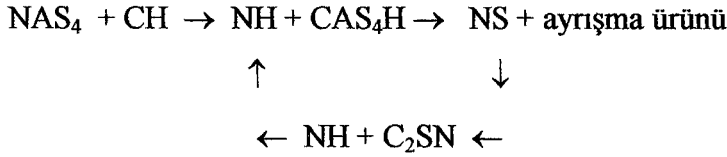
Katkı maddeleri ile stabilizasyon ulaşım yollarında öncelikle kullanılmıştır. Bunun yanında su yapılarında da uygulama giderek artmaktadır. Bir diğer ilginç uygulama hafif binaların temellerinin sertleştirilmesidir. Böylece yetersiz doğal zemin kolaylıkla kullanılabilir [13] .

3.3.2. Kireçle stabilizasyon

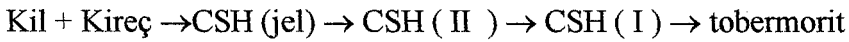
Kireç bilinen en eski stabilizasyon malzemesidir. Kil mineralleri içeren zeminlerin önemli bir bölümü % 3 - 8 arası sönmüş kireç eklenmesine olumlu cevap verir. Suyun varlığında hidratlı silis içeren kil mineralleri ve diğer , ince malzemelerle sert ve suda erimeyen kalsiyum silikat jeli oluşturur. Kireç kil mineralinin kristal kafesinden silisi sökerek reaksiyona girer. Oluşan jel kil topraklarını çevreleyip

boşlukları tıkar. Zaman geçtikçe jel, tobermorit ve hillebrandit olarak adlandırılan hidratlı silikata dönüşür. Bu sırada ortamda su azalır ise süreç önlenecektir.

Oluşan reaksiyon;



ile gösterilirse, burada N: Na_2O , A: Al_2O_3 , S: SiO_2 , H: H_2O , C ise CaO ' i göstermektedir. Zamana ve ortam ısısına bağlı olarak ise reaksiyon şöyle sürer,



Kireç stabilizasyonunda en zararlı etken zeminde bulunabilecek organik malzemedir. Organik madde ve sülfat iyonunun varlığı önceleri stabilizasyonun olumsuz etkilendiğini belli etmemekte, ancak daha sonra kuruma, ıslanma olduğunda zemin ufalanmaktadır. Zeminle karıştırıldığında kirecin ilk etkisi plastisiteyi düşürmektedir. Ortamın pH' ı azaldığında yapı topaklanmakta, böylece ağır killeri işlemek kolaylaşmaktadır. Kullanılan kirecin kimyasal özelliği de önem taşır. Dolomitik ve saf kalsiyum kireçleri farklı özellikli killerde montmorillonit başta olmak üzere değişik sonuçlar vermektedir [15].

Bir büyük projede zeminin hangi yüzde kirece gereksinimi olduğunu saptamak için en uygun yolun küçük bir araştırma programı uygulayarak % 3-8 arası katkı ve 7, 14, 28 gün bekletmeyle optimumun bulunması olduğu bilinmektedir. Ancak, çabuk yanıt istenen durumlarda her %10 kil içeriği için %1 kireç uygulaması kuralı kullanılabilir. Bulunacak yüzdenin ± 2 'sinde hazırlanan iki örnekten optimum hakkında bilgi edinilebilir. Yine hızlı kontrol için zeminin pH değerini ilave edilışinden 1 saat sonra 12,4'e çıkaracak kireç yüzdesi de üst sınır olarak tanımlanabilir.

Kireç katkısı kil içeriği yüksek zeminler için en uygun malzeme olarak belirlenmiştir. Ayrıca, oluşan reaksiyon hızının yüksek olmaması nedeniyle uygulama

sırasında sorunlar çıkarmaması bir avantajdır. Yerinde yapılacak gecikmeli sıkıştırmanın bazı sakıncaları öne sürülmüşse de diğer katkı maddelerine oranla ihmal edilebilir ölçüdedir. Yeni yapılan araştırmalar kil içeriği yüksek olan zeminlerde jipsin de kireç kadar faydalı bir katkı malzemesi olabileceğini göstermektedir [14] .

3.3.3. Çimento stabilizasyonu

Çimento kullanımı ile zemin stabilizasyonu A.B.D.' de eyalet karayollarının 1920'deki uygulamalarına kadar gitmektedir. Endüstrinin gelişmesi nedeniyle de Türkiye koşullarında uygun bir yöntem haline gelmiştir. Artan trafik yükleri başta hava meydanları olmak üzere tüm ulaşım yollarında çimento ile stabilize edilmiş temel ve alt temel uygulamasını zorunlu hale getirmektedir [13] .

3.3.3.1. Çimento

Çimento denince akla portland çimentoları gelmekle birlikte; taş, kum, çakıl gibi taneli malzemeyi birbirine bağlayarak, bir anlamda yapıştırarak sert bir kitle meydana getiren bağlayıcı maddelerin tamamına verilen bir isimdir.

Bağlayıcı maddeler genel olarak toz halindedir. Suyla karıştırılan bağlayıcı maddeler önce viskoz bir sıvı haline dönüşürler, daha sonra katılaşıp ve zaman içinde sertleşerek dayanım kazanırlar. Bağlayıcı maddelerin sıvı halden katı hale geçmesine “ priz “ adı verilir. Bu hal değişimi salt fiziksel bir olay değildir, fiziko - kimyasal bir olaydır.

Priz olayı suyla karıştırma başladığında meydana gelir, ancak belirgin değildir. Pratik olarak, katılaşmanın belirli bir düzeye varması durumuna “ priz başlangıcı “ denir [16] .

Bağlayıcı maddeler, kökenleri itibariyle;

i. Organik (asfalt, katran, kauçuklu maddeler)

ii. İnorganik

ii.1.Hidrolik bağlayıcılar (hem havada hem su içinde katılaşabilen bağlayıcılardır. Alçı, tabii ve suni hidrolik çimentolar)

ii.2. Hava bağlayıcıları (priz olayını sadece havada yapabilen bağlayıcılardır. Kireç, havada sertleşen killi topraklar)

Burada esas konu, hidrolik çimentolar olup, çimento kelimesiyle, portland çimentoları kastedilmektedir [17] .

3.3.3.2. Çimento hammaddeleri

Çimento yapımında hem tabii mineraller, hem de endüstriyel ürünler kullanılabilir. Kireç, silis, alüminyum oksit ve demir oksiti içeren mineraller, çimento yapımında hammadde olarak kullanılır.

Kireç yönünden zengin olan minerallere "kireç komponenti", kireç bakımından fakir olan fakat genelde fazla silis, alüminyum oksit ve demir oksit içeren minerallere de "kil komponenti" denir.

Çimento üretiminde, bu iki ana komponentin hesaplanmış karışımı seçilir [18] .

• Kireç komponenti

Kalker

Kalsiyum karbonat (CaCO_3) doğada geniş ölçüde bulunur. Portland çimentosu yapımı için, tüm jeolojik biçimlerdeki CaCO_3 uygundur.

Kalkerin en saf şekilleri; kalsit ve aragonittir. Kalsitin özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$, aragonitin ise $2,95 \text{ g/cm}^3$ ' tür.

Kalker ve tebeşir, kalsiyum karbonatın en fazla yaygın olan şekilleridir.

Mermer ise, kalsitin gözle görülür taneli yapılı bir cinsidir. Kalkerin sertliği jeolojik yapısına göre tespit edilir. Jeolojik formasyon ne kadar eski olursa, kalker o kadar sert olur. Kalkerin sertliği Mohs sertlik cetvelinde 1,8-3,0 arasında bulunmaktadır.

Tebeşir

Tebeşir, jeolojinin tebeşir çağında oluşmuş ve jeolojik bakımdan nispeten yeni olan bir tortul taşıdır. Kalkerin aksine, çok yumuşak, topraksı bir yapıya sahiptir. Saf cinslerinde, % 98-99 CaCO_3 bulunmaktadır.

Marn

İçinde silis, killi maddeler ve demir oksit bulunan kalkerlere “ marn “ denilir. Yeryüzünde geniş ölçüde yaygın olduğu için çimento yapımında hammadde olarak en fazla kullanılmaktadır.

Jeolojik bakımdan marn, CaCO_3 ' ın ve killi maddelerin aynı zamandaki çökelti teşekkülü sonucunda oluşmuş bir tortul taşıdır. Sertliği, kalkerin sertliğinden çok düşüktür. Bu düşüklük kil maddelerinin miktarı ile orantılıdır. Marnın bünyesindeki killi maddelerin artması ile sertlik düşer.

Marnın rengi, killi maddelere bağlı olarak, sarıdan gri siyaha kadar değişir.

Çimento hammaddeleri, ihtiva ettikleri CaCO_3 miktarlarına göre Çizelge 3.3' de sıralanmıştır [17, 18] .

Çizelge 3.3. Çimento hammaddelerinin CaCO₃ içerikleri

Hammadde	% CaCO ₃
Yüksek yüzdeli kalker	96-100
Marnlı kalker	90-96
Kireçli marn	75-90
Marn	40-75
Killi Marn	10-40
Marnlı kil	4-10
Kil	0-4

Portland çimentosu üretiminde kullanılan değişik kalker ve marnların kimyasal analizleri Çizelge 3.4' de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Portland çimentosu üretiminde kullanılan değişik kalker ve marnların kimyasal analizleri

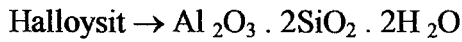
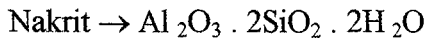
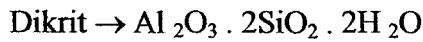
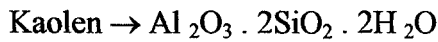
%	Kalker	Kalker	Kalker	Kalker	Marn	Marn	Marn
SiO ₂	3,76	6,75	4,91	4,74	27,98	33,2	21,32
Al ₂ O ₃	1,10	0,71	1,28	2	10,87	8,22	4,14
Fe ₂ O ₃	0,66	1,47	0,66	0,36	3,08	4,9	1,64
CaO	52,46	49,8	51,55	51,3	30,12	27,3	39,32
MgO	1,23	1,48	0,63	0,3	1,95	1,02	0,75
K ₂ O	0,18	Eser	Eser	0,16	0,2	0,12	0,06
Na ₂ O	0,22	Eser	Eser	0,28	0,33	0,18	0,08
SO ₃	0,01	1,1	0,21		0,7	0,37	
Kızdırma kaybı	40,38	39,65	40,76	40,86	24,68	24,59	32,62
Toplam	100	99,96	100	100	99,91	99,9	99,93

- **Kil komponenti**

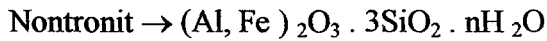
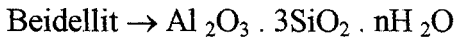
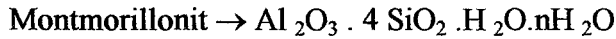
Çimento yapımında kullanılan ikinci önemli hammadde kildir. Killerin ana maddesi alüminyum hidro silikatlardır [17, 18] .

Killer, şu mineral gruplarına ayrılırlar;

Kaolen grubu;



Montmorillonit grubu;



Alkali içeren killer grubu;



Bazı kil minerallerinin özgül ağırlıkları da şöyledir:

Kaolen : 2,60-2,68 g/cm³

Halloysit: 2,00-2,20 g/ cm³

İllit: 2,76-3,00 g/ cm³

Killerin ergime noktaları 1150 C° den 1785 C° e kadar değişmektedir. İçinde yabancı madde bulunmayan killer genellikle beyaz renklidir. Yabancı maddelerin miktar ve cinsine göre killerde renk sarıdan, gri siyaha kadar değişmektedir. Bazı killerin kimyasal analizleri Çizelge 3.5' de verilmiştir [19] .

Çizelge 3.5. Bazı killerin kimyasal analizleri

%	Kil I	Kil II	Kil III	Kil IV
Kızdırma kaybı	7,19	8,67	10,4	6,4
SiO ₂	67,29	62,56	52,3	60,1
Al ₂ O ₃	8,97	15,77	24,7	18
Fe ₂ O ₃	4,28	4,47	6,1	8,2
CaO	7,27	4,8	4,4	0,8
MgO	1,97	1,38	0,1	0,2
SO ₃	0,32		1,1	3,8
K ₂ O		2,35	0,8	2,5
Na ₂ O	1,51			
Toplam	100	100	99,9	100

• Yardımcı hammaddeler (Düzeltme maddeleri)

Çimentonun hammadde karışımında gerekli olan bir kimyasal madde, yeterli miktarda bulunmuyorsa, bu karışıma düzeltme maddeleri ilave edilir. Çizelge 3.6' da bazı düzeltme maddelerinin kimyasal analizleri görülmektedir.

Silis miktarını artırmak için; kum, silisli kil, diatome toprağı v.b. ilave edilir.

Demir oksit eksikliği için; demir cevheri, limonit, magnetit ve yanmış pirit külü v.b. ilave edilir [16, 17] .

Çizelge 3.6- Bazı düzeltme maddelerinin kimyasal analizleri:

%	Diatome toprağı	Boksit	Yanmış pirit	Demir cevheri	Yüksek fırın külü	Uçucu kül	Kum
Kızdırma kaybı	6,2	15-20		5-12	5-15	0,2-4	0,2
SiO ₂	77	16-22	6,6-25	20-35	11-12	26-36	99,2
Al ₂ O ₃	9,6	44-48	2-16	3-9	5-14	6,5-9,5	
Fe ₂ O ₃		10-16	62-87	45-60	54-69	5-8	0,5
CaO	0,3	2-4	0,7-0,9	0,5-2,5	1-9	42-50	
MgO	0,9	0,2-1,0	0,2-2	1,5-7	0,5-2,5	3-4	
SO ₃			0,8-8	0,3-0,6	0,2-2,5	2,5-3	
Na ₂ O							
K ₂ O	1,5					0,8-3,5	

3.3.3.3. Çimento üretimi

Kalker, kil karışımının 1400 C°' ye kadar ısıtılması, içine ergitmeyi kolaylaştırmak için demir filizi içeren toprak katılması, meydana gelen ceviz büyüklüğündeki granüle malzemeye (klinker) % 3 oranında alçı taşı (CaSO₄ 2H₂O) ilave edildikten sonra çok ince olarak öğütülmesi, çimentonun üretim aşamalarıdır. Bu üretimde en önemli husus, ilkel karışımın fırın içinde ayrışması, yarı ergimiş hale geldikten sonra tekrar, fakat farklı kimyasal formüle sahip aktif elemanlar halinde birleşmesidir.

Hammaddeler, muhtelif kademelerden geçerek, uygun parça iriliğine indirilir. Hammadde, genellikle yaş sistemde bilyalı, kuru sistemde, bilyalı ve valsli hammadde değirmenlerinde gerekli inceliğe kadar öğütülür [20] .

Yaş sistem

Homojenize edilen çamur, uzun döner fırınlara sevk edilir. Çamur, giriş tarafındaki ilk bölgede rutubetini kaybeder, orta bölgede kalsine olur, çıkış tarafındaki sinter bölgesinde klinkerize olur ve soğutucuya dökülür. Bu sistem, ancak hammaddenin çok rutubetli ve sedimanter marn ve kilden oluşması halinde ekonomik olabilir.

Yarı kuru sistem

Hammadde karışımı, eğik bir döner tabak üzerinde % 14-16 rutubetli granül hale getirilmekte, sevk edildiği hareketli ızgarada rutubetini kaybederek, kısmen kalsine olmakta ve takiben kısa döner fırında önce kalsinasyon tamamlanmakta, sonra da klinkerizasyon olmaktadır. Bu sistemde 3000 ton/ gün kapasiteye ulaşılmıştır.

Kuru sistem

Kuru sistemli çimento üretiminde ise, konkasörde kırılan hammadde, değirmende öğütülerek homojenize edilir. Öğütme işlemi sırasında, fırından alınan yanma gazları ile aynı zamanda kurutma yapılır. Kurutma ve ısıtma işlemleri, yaş ve yarı kuru sistemden farklı olarak, döner fırında yapılmamaktadır. Bu nedenle, fırın boyu, diğerlerinden kısadır. Kuru sistem fırınlarında yalnızca kalsinasyon ve sinterleme işlemleri yapılmaktadır. Ön ısıtıcı ünitesinde, döner fırın çıkışındaki gaz, siklon kademelerinden geçerken enerjisini vererek soğur, homojenize edilmiş hammaddeler ise ters istikamette geçerken bu enerji ile ısınır ve kısmen kalsine olur. Kademe sayısı dört veya daha fazla olabilmektedir. Kademe sayısı arttıkça ısı tasarrufu artar.

Kuru sistem fırınların ön kalsinasyon sistemini de içermesi halinde, yakıt döner fırından başka kalsinatörde de yakılmaktadır. Kalsinatöre sekonder hava olarak, soğutmadan, sıcak gaz alınmaktadır. Ön ısıtıcılı kuru sistem döner fırında, fırına girişteki kalsinasyon derecesi en fazla % 40 iken, ön kalsinasyonlu sistemlerde bu değer

% 80-90 oranına kadar ulaşmaktadır. Ön kalsinasyonlu döner fırınlarda, kalsinatörde düşük kalorili kömür kullanımı sağlanabildiği gibi, ısı tüketimi % 5-10 düşer ve fırın kapasitesi artar.

3.3.3.4. Çimento bileşenleri

Çimentonun dört ana bileşeni olan "karma oksitler" şu şekilde oluşur: Kalsiyum karbonat 700-1000 C° arasında ayrışarak karbondioksit verir ve kalsiyum oksite dönüşür. CaO, kuvvetli bir bazik oksit olup, sıcaklık yükseldikçe diğer maddelerle doğrudan doğruya reaksiyona girer, böylece silikatlar ve alüminatlar teşekkül eder. Bu sırada karışım sarımsı bir renk alır ve hafif hidrolik özellikler kazanır. 1350 C° e doğru sinterleşme başlar ve takriben 1400-1480 C° 'da kuvvetle sinterleşerek kalsiyum alüminoferrit teşekkül eder. Bu sırada karışım, yeşilimsi-siyah bir renk alarak klinkere dönüşür. Sinterleşmesi güç olan bir hammadde olsa bile 1480 C° lik sıcaklık nadiren aşılır. Çimentonun ana bileşenleri Çizelge 3.7' de, bu bileşenlerin özellikleri ise Çizelge 3.8' de görülmektedir [21] .

Çizelge 3.7. Çimentonun ana bileşenleri

Ana bileşenler	Sembolleri
Bikalsiyum silikat (2CaO. SiO ₂)	C ₂ S
Trikalsiyum silikat (3CaO.SiO ₂)	C ₃ S
Trikalsiyum alüminat (3CaO.Al ₂ O ₃)	C ₃ A
Tetrakalsiyum alüminoferrit (4CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃)	C ₄ AF

Çizelge 3.8. Çimentonun ana bileşenlerinin özellikleri

Bileşen	Bağlayıcı özelliği	Sertleşme hızı	Hidrasyon ısı
C ₂ S	iyi	yavaş	az
C ₃ S	iyi	orta	orta
C ₃ A	zayıf	hızlı	fazla
C ₄ AF	zayıf	yavaş	az

Çimentonun ilk günlerdeki mukavemetini sıra ile C_3A ve C_3S temin eder. Bunların hidratasyon ısısı yani su ile muamele edildikleri zaman açığa çıkan ısıları fazladır. Hidratasyon ısıları fazla olduğundan, C_3A ve C_3S içeriği fazla olan bir çimentonun baraj gibi kütle inşaatlarında kullanılmasının iç gerilmeler yapması nedeniyle sakıncalı olduğu bilinmektedir. Buna karşılık, çabuk mukavemet alınması istenen durumlarda kullanılır.

C_2S ' nin hidrolizi ve sertleşmesi C_3S ' e nazaran daha geçtir. Esas mukavemetini 28 günde veya daha sonraki günlerde alır. Bu silikatların ($C_2S + C_3S$) toplam yüzdesi 70-75 kadardır. Klinker imalinde pişme iyi olmazsa C_2S fazla teşekkül eder. Böyle bir çimentonun ilk mukavemeti düşük olur.

C_3A yüzdesi fazla olan çimentolar ise sülfatlı sulara dayanıksızdır.

C_4AF ise klinker içindeki en önemsiz bileşendir. Bunun hidratasyonu neticesinde meydana gelen kristaller çimentonun sertleşmesinde rol oynar [17] .

3.3.3.5. Çimento türleri

Yüksek fırın cüruf çimentoları

Bu çimentolar; portland çimentosu klinkerinin, ani soğutma ile granüle hale getirilmiş yüksek fırın cürufu ile belli oranlarda karıştırılıp öğütülmesi ile elde edilir [18] .

Traslı çimentolar

Bu çimentolar; ince öğütülerek söndürülmüş kireçle karıştırıldığı takdirde hava ve suda sertleşebilir aktif volkanik tüfler veya benzeri traslar ile portland çimento

klinkerinin veya portland çimentosu ile belli oranlarda alçı taşının karıştırılıp öğütülmesi ile elde edilirler.

Uçucu küllü çimentolar

Bunlar, portland çimentosu klinkerinin az miktarda alçıtaşı ve belli oranda kül ile karıştırılarak öğütülmesiyle elde edilir. % 15 kül, % 85 klinker karışımı şeklindedir.

Sülfatlı cüruf çimentoları

Bu çimentolar; ani olarak soğutulup granüle hale getirilmiş yüksek fırın cürufu ile, içinde en az % 5 SO_3 olacak şekilde $CaSO_4$ 'ın katalizör olarak az miktarda portland çimento klinkerinin veya portland çimentosunun öğütülüp homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilir. Portland çimentoları ve katkıli çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.9' da, fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.11' de verilmiştir. Portland çimento ve katkıli çimento dışında Türkiye' de üretilen diğer çimentoların kimyasal özellikleri Çizelge 3.10' da, fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.12' de görülmektedir [16] .

Çizelge 3.9 Portland çimentoları ve katkıli çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Portland Çimentosu PÇ 32,5 (TS 19)	Portland Çimentosu PÇ 42,5 (TS 19)	Portland Çimentosu PÇ 52,5 (TS 19)	Katkılı Portland Çimentosu KPÇ 32,5 (TS 10156)
En çok,%				
SO_3	3,5	3,5	3,5	3,5
MgO	5	5	5	5
Kızdırma kaybı	4	4	4	4
Çözünmeyen kalıntı	1,5	1,5	1,5	15
Klorür miktarı	0,1	0,1	0,1	0,1

Çizelge 3.10. Portland çimentosu ve katkı çimento dışında Türkiye’de üretilen diğer çimentoların kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Trash çimento	Uçucu küllü çimento	Harç çimentosu	Yüksek fırın cürufu çimentolar	Sülfatlara dayanımlı çimento	Süper sülfat çimentosu	Erken dayanımı yüksek çimento	Beyaz Portland çimentosu
En çok, %	TS 26	TS 640	TS 22	TS 20	TS 10157	TS 809	TS 646	
SO ₃	3,5	4		3,5	3,5	4,5	3,5	4
MgO	5	5		10		9	5	5
Kızdırma kaybı	5	5		5	5		4,5	5
Çözünmeyen kalıntı		29	50		1,5	3	1,5	5
Klorür, Cl ⁻	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1		0,1
Cüruf				80				
Tras	40							
C ₃ A					5			
C ₄ F+2C ₃ A					25			

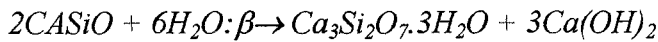
3.3.3.6. Çimento zemin etkileşimi

Beton özellikleri nedeniyle çimento - zemin ilişkilerinin bir bölümü iyi bilinmektedir. Kilin varlığı katkı maddesinin birincil reaksiyonlar dışında da süreçler oluşturmasını sağlamaktadır. Suyun varlığında kireçte olduğu gibi çimento - zemin reaksiyonları CSH ürününü vermektedir. Çimentonun içinde silis bol miktarda bulunduğundan kireçte olduğu gibi ortamın bu bileşiğe gereksinmesi bulunmamaktadır. Diğer reaksiyonlar kirece benzer. Betonda olduğu gibi özellikle sülfatlı tuzlar ve organik malzeme zemin - kireç karışımının dayanım kazanmasını geciktirmekte ve önlemektedir [22] .

Çizelge 3.11. Portland çimentoları ve katkı çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel ve mekanik Özellikler	Portland çimentosu PÇ 32,5 TS 19	Portland çimentosu PÇ 42,5 TS 19	Portland çimentosu PÇ 52,5 TS 19	Katkılı Portland Çimentosu KPÇ 32,5 TS 10156
Basınç dayanımı; en az (N/ mm ²)				
2 günlük	10	20	25	10
7 günlük	21	31,5	35,5	21
28 günlük	32,5	42,5	52,5	32,5
Özgül yüzey, Blaine en az (cm ² /g)	2800	2800	2800	2800
Priz başlama süresi en az (saat)	1	1	1	1
Priz sona erme süresi en çok (saat)	10	10	10	10
Hacim genişmesi Le Chatelier aleti ile, en çok (mm)	10	10	10	10

Çimento birincil reaksiyonlar sonucu zemin matrisinde güçlü bağlar oluşturur. Bu reaksiyonun etkinliğini azaltmamak için laboratuvar ve arazide altı saatten geç sıkıştırma işlemlerinden kaçınılmalıdır. Birincil reaksiyonda çimentonun bilinen hidroliz ve hidratlanması rol oynar [23] .



Şekil 3.1' de verilen grafik bir anlamda bu sürecin hakim olduğu malzemenin çimento gereksinimini göstermektedir.

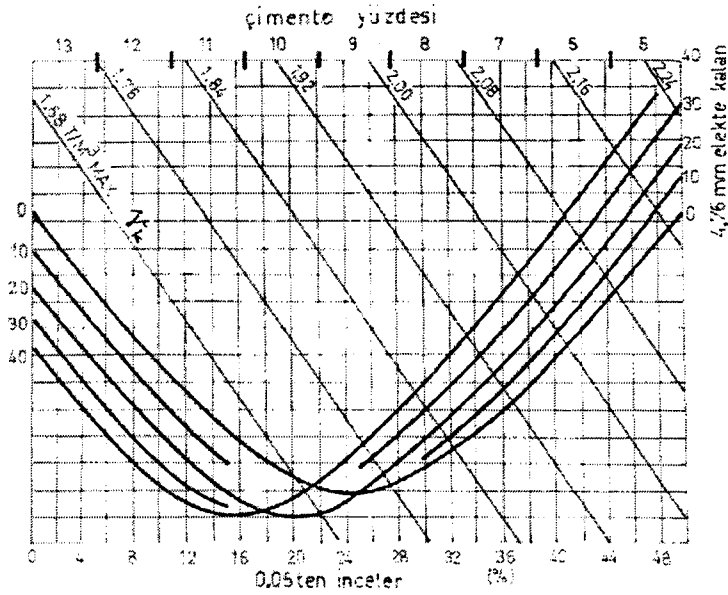
Çizelge 3.12. Portland çimento ve katkı çimento dışında Türkiye'de üretilen diğer çimentoların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Trashlı çimento	Uçucu küllü çimento	Harç çimentosu	Yüksek fırın cürüflü çimentolar	Sülfatlara dayanımlı çimento	Süper sülfat çimentosu	Erken dayanımı yüksek çimento	Beyaz Portland çimentosu
	TS 26	TS 640	TS 22	TS 20	TS 10157	TS 809	TS 646	
Basınç dayanımı; en az (N/ mm ²)								
2 günlük	10	10		10 (10)		10	30	10 (20)
7 günlük	21	21	10	16 (21)	21	21	40	21 (31,5)
28 günlük	32,5	32,5	16	32,5 (42,5)	32,5	32,5	52,5	32,5 (42,5)
Özgül yüzey, Blaine en az (cm ² /g)	2800	2800	2800	2800 (2800)	2800	2800	3500	2800 (2800)
Priz başlama süresi en az (dakika)	60	60	60	60 (60)	60	45	45	45 (45)
Priz sona erme süresi en çok (saat)	10	10	24	10 (10)	10	10	6	10 (10)
Hacim genleşmesi Le Chatelier aleti ile, en çok (mm)	10	10	10	10 (10)	10	10	10	10 (10)

* Yüksek fırın cürüflü çimentolar için parantez içinde belirtilen değerler, cürüflü çimento CÇ 42,5 tipine aittir.

Parantez içerisinde olmayan değerler, cürüflü çimento CÇ 32,5 tipine aittir.

** Beyaz Portland çimentoları için, parantez içerisinde belirtilen değerler, beyaz portland çimentosu BPC 42,5 tipine aittir. Parantez içerisinde olmayan değerler, beyaz portland çimentosu BPC 32,5 tipine aittir.



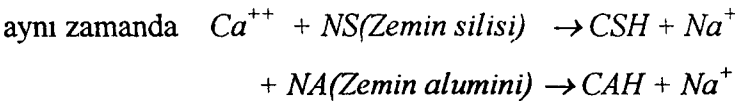
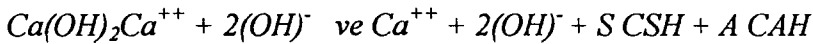
Şekil 3.1. Çimento katkı yüzdesinin hesaplanması

İkincil reaksiyonlar kil minerali yapısı ve ortamda mevcut amorf malzemedeki değişikliklerle yeni bir bağlayıcı oluşmasını sağlamaktadır. O halde, çimentonun beton oluşumundaki etkisinin zemin - çimento karışımlarında da tek etken olduğunu düşünmek hatalı olacaktır.

Çimentoda C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF ($F = Fe_2O_3$) bileşikleri bulunduğu bilindiğine göre birincil reaksiyonu :



Kalsiyum hidroksit kristalleşerek hem iri taneleri hem de kil floklarını bağladıktan sonra ayrışır:



Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat eklenerek reaksiyonlar hızlandırılabilir. Zemin özellikleri çimento karışma yüzdesi ve kür süresine bağlı olarak iyileşmektedir. Bunun yanında dayanıma önemli katkısı olan etken kuru birim hacim ağırlıktır.

Serbest basınç dayanımı $q_u = A e^{by}$ biçiminde logaritmik bir bağıntıyla verilmiştir. A ve b zemin için değişmez sayılardır. Son yirmi yılın deneyimleri çimento ile stabilize edilmiş iri ve ince taneli zeminlerde Çizelge 3.13 'de özetlenen özelliklerin olasılığını göstermiş bulunmaktadır. Burada da serbest basınç dayanımı ana kriter olarak kullanılmaktadır. C çimento içeriğidir. Çimento katkılı malzemelerde dayanımın serbest basınç yanında çekme, tercihen Brezilya deneyi (silindir yarma deneyi) ile de ifade edilmesi anlamlı olacaktır [22, 23].

Çizelge 3.13' de verilen değerler laboratuvarda kontrollü koşullarda hazırlanmış örnek özelliklerini yansıtmaktadır. Ancak uygulamada , özellikle stabilize edilmiş zeminin çekme ve eğilme dayanımı oldukça farklı çıkmaktadır. Bunun nedeni büzülme çatlakları olarak açıklanmıştır. Yol ve hava meydanı pistlerinde temel kalınlığı 20 cm den az olduğundan önem kazanan büzülme çatlakları sorunu statik sıkıştırma ve yüksek çimento oranlarıyla azalmaktadır. Ayrıca büzülme için karışımı kuru yapmak ve suyu yayma - yerleştirme sırasında ekleyerek buharlaşmayı önlemek gerekmektedir [13] .

Konu hakkında farklı bir görüş, ortamda çatlama önlenemeyeceğine göre stabilize zeminin iri bloklara bölünmesinin olumsuz bir sonuç olmayacağıdır.

Çizelge 3.13. Çimento stabilizasyonunun sıkıştırılmış zemine etkisi.

ÖZELLİK	İRİ TANELİ	İNCE TANELİ
Birim Hacim Ağırlık (T/m^3)	1,6 - 2,2	1,4 - 2,0
Serbest Basınç Direnci (kPa)	500 - 1000C	300 - 600C
Kür Etkisi (t günde)	$q_u = q_{uo} + 500 C \log (t/t_0)$	$q_u = q_{uo} + 70 C \log (t/t_0)$
Kayma Mukavemeti (kN/m^2)	$\tau = 50 + 0.225q_u + \sigma \tan 45^\circ$	$\tau = 50 + 0.22q_u + \sigma \tan 40^\circ$
CBR	$0.0038 (q_u)^{1.45}$	
Elastisite Modülü (mPa)	$7 - 35 \times 10^3$	$0.7 - 7 \times 10^6$
Poisson oranı	0,1 - 0,2	0,15 - 0,35
Geçirimsizlik k (cm / sn)	$< 1 \times 10^{-6}$	

3.3.3.7. Su - çimento sistemi (Hidratlanma)

Portland çimentosunun taneleri başlıca C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF (katı eriyik) bileşiklerinin ($C: CaO$, $S:SiO_2$, $A:Al_2O_3$, $F:Fe_2O_3$) küçük kristallerden oluşur . Bunlara ek olarak K , Na , Mg , Ti , Mn gibi elementlerin oksitlerinin oluşturduğu ikincil bileşikler de bulunur. Lea [24], bu elemanların hidratlanmaları sırasındaki etkileşimleri basitleştirerek bir özetini vermiştir. Çimento elemanları hidratlanmada su ile etkileşime girerler ve sonuçta bazı ürünler oluşur. Bu ürünlerin başlıcaları hidratlı silikatlar, hidratlı alüminatlar ve kalsiyum hidroksittir. Silikat ve alüminat fazları karmaşık olup başlangıçta hemen tümü tam olarak kristalli yapıda değildir. Bu arada kalsiyum hidroksitin bir kısmı da diğer fazlarla karışık durumda bulunur ve kısmen kristalleşir. Buradaki olayları belirtmek amacıyla kullanılan hidratlanma terimi ile hidroliz şeklindeki etkileşimleri de içeren bir kimyasal tepkimeler bütünü anlatılmak istenmektedir.

Hidratlanmış bileşiklerin suda çözünebilirlikleri çok düşük düzeydedir ve etkileşmeye giremeyen çimento tanelerine kuvvetlice bağlı kalırlar. Hidratlanmanın gelişimi çimento tanelerinin çaplarının sürekli olarak azalması şeklinde olduğu söylenebilir. Ancak hidratlanmanın hızı da sürekli olarak düşer ve uzun bir zaman sonunda bile sistemde etkilenmemiş çimento taneleri bulunur. Kolloidal boyutlardaki hidratasyon ürünleri çok büyük ve suya karşı istekli olan yüzey alanları yoluyla serbest suyun önemli bir bölümünü adsorbe ederler.

Başlangıçta hemen tümünün jel (pelte) halinde oldukları var sayılan ürünlerin kireç ile birlikte gösterdikleri mekanik dayanımın kökenini açıklayan iki hipotez vardır. Bunlardan ilk tezi veren Le Chatelier'e göre çimentonun bileşenlerinden daha az çözünebilir özellikte olan ürünler, ortamın aşırı doygun çözeltisi içinde, birbirine bağlı, yüksek yapışma ve bağlanma özellikleri olan ince - uzun kristaller biçiminde yoğunlaşırlar. Bunlara mukavemet kazandıran iç kuvvetler elektromanyetik ve kimyasal asıllıdırlar. İkinci görüşü getiren Michaelis'e göre kalsiyum alüminat, sülfü alüminat ve hidroksit kristalleri ilk mukavemeti verirler. Sonra kalsiyum hidroksitte doygun

ortamda silikatlarla tepkimeler başlatarak hemen hiç çözülmez olan CSH'ları oluştururlar. Sonuçta pelteye benzer bir kitle ortaya çıkar. Hidratlanma geliştikçe ve bu kitleden dışarıya çıktıkça pelte sertleşir. Araştırmacılar her iki tezide destekleyen bulgular vermektedirler.

Yukarıda toprak - su - kireç sisteminde değinilen olaylar toprak - su - çimento sisteminde de geçerlidir. Ancak olayların buradaki gelişimi çimentonun ortama verdiği kireç miktarı ile sınırlı kalacaktır [25] .

3.3.3.8. Su - çimento stabilizasyonunda mekanizmalar

Sıkıştırılmış toprak - çimento karışımlarında çimentonun çeşitli bileşenlerinin hidratlanmaları değişik hızlarda gelişerek bağlayıcı özellikli amorf ve çok küçük kristalli ürünler oluştururlar. Bu ürünler karışımın erken ve geç zamanlardaki fiziksel ve mekanik özelliklerini sağlarlar. Söz konusu bağlayıcılık esas olarak kimyasal olup, kum - su - çimento taneleri ve bunlar ile toprak tane yüzeyleri arasında bağ oluşması şeklindedir. İnce taneli topraklar için, hidratlanma sırasında açığa çıkan kirecin etkisi ile, ince tanelerin bağlanması da ek bir mekanizmadır. Bu nedenle çimento etkisini toprakların ince ve kaba taneli oluşlarına göre iki grupta incelemek doğru olur [22] .

Killi topraklarda çimentonun hidratlanması ve sertleşmesi olayları özetle iki bölüme ayrılarak incelenebilir. Bu görüşle çimentonun hidratlanması birincil olaylar olarak ele alınır. Olaylardan önce bilinen hidratlanma ürünleri oluşur ve ortamın pH'ı yükselir. Çünkü bu sırada ortama kalsiyum hidroksit de girmektedir. Daha sonra gelişen ikincil olaylarda kilde rol alır. Çimentodan açığa çıkan kalsiyum iyonları önce katyon değişimi yoluyla killeri kalsiyum formuna dönüştürürler. Çimentodan gelen diğer katyonik elemanlarla birlikte ortam içinde artan elektrolit topluluğunun başlattığı bir kil taneleri topaklanması söz konusu olup topaklanma katyonlarıyla daha da kuvvetlenir. Böylece, birincil olayların sağladığı kireç ile ikincil olaylar gelişir ve ortaya çıkan ikincil ürünlerde yakınlarındaki amorf ya da kristalize kolloidal parçacıklara bağlanarak yoğunlaşırlar. Bu ikincil ürünlerin, kil tanelerinin yüzey ya da kenarları üzerinde

oluşmasıyla, topaklanmış tanelerin birbirlerine yaklaşan ve değen noktaları arasında bağlayıcı köprüler kurulmuş olur. Bu bağlardan daha da kuvvetli olanları, çimento taneleri ile çevrelerindeki kil taneleri arasında, çimentonun hidratlanma ürünleri yoluyla oluşacaktır. Bu ürünler ile killerin çok benzeyen kristal yapıları epitaksiyel bir gelişimin de olabileceğini akla getirmektedir [22, 23] .

Oluşan kil - çimento yapısındaki birincil ürünler normal çimento pastası ürünlerinden kimyasal açıdan farklıdır. Birincil ürünlerde kalsiyum miktarı, başka olaylara da katılma nedeniyle , daha az olacaktır. Bu bağlara ek olarak ikincil olaylarla kazanılan bağlar toprak - çimento karışımının mukavemetini ve stabilitesini daha da güçlendirmektedir.

Kaba taneli topraklarda çimentonun etkisi beton karışımlardakine benzer; ancak boşlukların büyük bölümü, kullanılan düşük yüzdeler sonucu çimento pastası ile dolu olmaz. Kumlardaki bağlanma tanelerin birbirlerine değdikleri noktalarda belirmektedir. Ünitelik ve süreklilik katsayılarına bağlı olarak boşluklar azalır küçüldükçe tanelerin değme noktalarının sayısı ve alanları (koordinasyon sayısı) artacağından çimento ile bağlanma da daha kuvvetli ve yaygın olacaktır. Bu şekilde tane dağılımı iyi oldukça, belirli bir dayanım artışı için sağlanabilecek maksimum bağlanma, karışımın olabildiğince boşluksuz hazırlanıp sıkıştırılmasıyla sağlanabilir. İşlemden kullanılacak suyu, hem sıkıştırmayı ve hem de çimentonun hidratlanmasını sağlayacak şekilde dengelemek zorunluluğu vardır [25] .

3.3.4. Bitümlü stabilizasyon

Yollarda temel malzemesine uygulanan bitümlü stabilizasyon taneli malzemeye kohezyon verir. İnce taneli zeminlere katıldığında ise malzemenin suya karşı isteğini azaltmaktadır. Kireç ve çimentoya oranla pahalı olduğundan daha az uygulanır. Bitüm, zemine emülsiyon ya da köpük biçiminde katılmaktadır [26] .

Olağan koşullarda 76 mikrondan geçeni 10-50 arasında, plastisite indisi 18'den küçük olan zeminler bu yöntemle en iyi cevap verir. Bu şekilde taneler asfaltla rahatça kaplanabileceği gibi bitüm boşlukları tıkama işlevini de yerine getirmektedir.

Stabilizasyonun başarılı olması için asfaltın tüm zemini kaplaması gerekmemektedir. Öte yandan gereğinden fazla bitüm taneler arası bağlar ve kilitlemeyi önleyerek malzemenin kayma direncini azaltmaktadır. En yüksek kayma direnci ve birim hacim ağırlık, en düşük su emme özelliğini yansıtan optimum çözümün %20 hava boşluğu durumunda olduğu bulunmuşsa da porozite ile bitüm içeriği arasında güvenilir bir bağıntı da oluşturulamamıştır. Sadece kum emisyon karışımlarında asfalt gereksinmesi (% p) için

$$p = 0,75 (0,05 a + 0,1 b + 0,5 c) \dots\dots\dots (3.1)$$

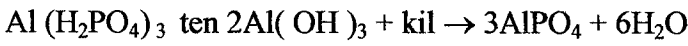
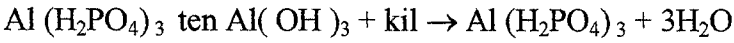
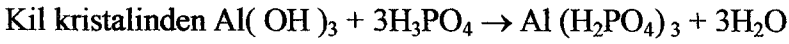
denklemini güvenilirliği ispatlanmıştır. Burada a, 2 mm elek üzerinde kalan b, 2-0,074 mm elekler arasındaki, c ise 74 mikron elekten geçen kum yüzdesini göstermektedir[27].

3.3.5. Diğer katkı maddeleri ile stabilizasyon

Çimento, kireç, bitüm dışında zeminlere katılan diğer kimyasal maddeler bugün için ancak özel koşullar ve kısıtlı hacimlerde ekonomik olabilmektedir. Örneğin, elektrik santrallerinin yan ürünü olan uçucu fırın külü (PFA) başarılı bir dolgu malzemesi ve kireç stabilizasyonunda reaksiyonu hızlandıran bir katkıdır. Ancak, uygulaması, taşıma masrafları nedeniyle, santrallerin olduğu bölgelerle kısıtlıdır [10] .

Bu güne kadar önerilen yüzlerce katkı maddesi arasında ekonomik olan ve başarı kazanılan tuz, kalsiyum klorür, fosforik asit, fosfor tuzları, kostik soda, reçine ve polimerler ve lignin olarak sıralanabilir. Tuz ve kalsiyum klorür çok eskiden beri ince tanelerin topaklanmasını sağlayarak zeminin birim hacim ağırlığını, dolayısıyla kayma direncini artıran özellikleri nedeniyle kaplamasız ve kaplamalı yollarda kullanılmıştır. Boşluk suyunda artan tuz yoğunluğu, donma derecesini de düşürdüğünden donmadan oluşan zararların önlendiği gibi bir kanı da uyanmıştır. Bu katkı yönteminin en olumsuz yönü, yağış ve yeraltı su seviyesindeki oynamalar sonucu tuzların hızla zemin bünyesinden yikanarak etkisini yitirmesidir. Bir olumlu etkisi ise kaplamasız yollarda, tozu bastırma özelliğidir. Tuz uygulaması, günümüzde çok ucuz ve artık madde olarak sağlanması ve taban zeminindeki killi bölümün montmorillonit kökenli olması

durumunda düşünülebilir. pH değeri 7' nin çok altında ve kil mineralinin klorit olması durumunda düşünülebiyecek stabilizasyon yöntemi fosforik asit katkısıdır. Kile % 2-10 arası katılıp, rutubetli ortamda küre bırakıldığında asitle kil mineralleri ve bunlara bağlı iyonlar arasında oluşan reaksiyonlar sonucu çok sıkı bağlı bir ürün elde edildiği görülmüştür. Asit önce kristal kafesinden alüminyum ve demiri almakta, sonra bu polimer Al yada Fe fosfatları zemin tanelerini şu süreçte bağlamaktadır [11].



Buna benzer bir etkinin zemine katılacak çok değerlikli iyonlarla sağlanabileceği öne sürülmektedir. Zemine hava ile temas sağlanması koşulu ile eklenen alüminyum klorür yada demir tozu ile getirilen Fe^{+++} ve Al^{+++} iyonları zemin tanelerini bağlamaktadır.

Sodyum hegza meta fosfatın donmaya duyarlı olan zeminleri etkin olarak stabilize ettiği öne sürülmüştür. Bu tuzlardan sodyum tripolifosfat (STP) ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) donmaya en duyarlı zeminleri bile başarı ile stabilize etmiştir. Normal tuzların işlevini fazlasıyla yerine getirme yanında, hidroliz sonucu ayrılan sodyum iyonları kil taneciklerinin negatif yüklü yüzüne, çok iri olan polifosfat iyonları ise pozitif yüklü kırık kenarlarına yapışarak kil yapısının topaklanmadan uzaklaşmasını sağlamaktadır. Geçirimlilik katsayısında 300 kata kadar düşmeler getiren % 0,5 STP katkısı böylece boşluk suyunun donmasını geciktirme yanında suyun zemin içinde hareketini büyük ölçüde önlemektedir. Dağınık yapının uzun sürede dengesiz olması ve diğer tuzlara benzer olarak STP iyonlarının yeraltı suyu etkisiyle yıkanma eğilimi göstermesi metoda yöneltlen eleştirilerin kaynağıdır.

Sudkostik adıyla da bilinen sodyum hidroksit (NaOH) çok uygulanmakla birlikte, ucuzluğu ve laterit türü zeminlerde etkinliği nedeniyle ilgi çekmektedir. Sıkıştırma için serpilecek suya kolayca karıştırılarak % 3-10 arası uygulandığında kaolen kökenli killere reaksiyona girerek birim hacim ağırlığı artırır, 28 güne kadar da kayma

direncini yükseltir. Bu maddenin kireçle stabilizasyonda çok faydalı bir ikincil katkı olabileceği de saptanmıştır [26, 27].

Reçineler, zeminin suya karşı isteğini % 1-2' lik uygulama ile azaltarak stabiliteyi sağlayan katkı maddeleridir. Daha çok Avrupa ülkelerinde yapılan uygulamada kullanılan doğal reçineler, organik ayrışmaya uğradığından, daha sonra “vinsol” olarak bilinen yapay reçine kullanılmıştır.

Zemin stabilizasyonu için önerilen polimerler çok çeşitlidir. Katyon, anyon ve iyonik olmayan biçiminde üç grupta toplanabilen polimerlerin işlevleri farklıdır. Katyonik grup, ince silis kumu ile kil minerallerinin negatif yüklü yüzeyi arasında güçlü bir elektro-statik bağ oluşturmaktadır. Bu etki, floklu yapıyı oluşturarak, kilin kayma direncini artırmakta ise de arazi koşullarında düşen kuru birim hacim ağırlık değeri bu etkiyi ortadan kaldırabilmektedir. Çok uygulanmış katyon tipi katkı maddesi “poliakrilamid” dir. İyonik olmayan katkı maddesinin tipik türü polivinil alkoldür. Polimer zincirindeki OH grupları ile kil minerallerinin yüzeyindeki oksijenlerin oluşturduğu bağ ile etkin olur.

Kağıt endüstrisinin artık maddesi olan potasyum di-kromatın'ın da etkin bir katkı maddesi olabileceği öne sürülmüştür. Lignin molekülü iriliği ve yapısı nedeniyle, volkanik ve kloritik yapıli zeminlerde etkili olur [13].

3.4. Ulaşım Yollarında Stabilizasyon

Zemin iyileştirme tekniklerinin en yaygın uygulandığı alan karayolları başta olmak üzere demiryol ve hava meydanlarıdır. Bu amaçla geliştirilen yapı makinaları standart ürün olarak satılmaktadır. Konu, Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Örgütünce (TCK), 1960' larda ele alınmışsa da aradan geçen zaman içinde ülke çapında yaygın uygulamaya geçildiği söylenememektedir. Oysa, artan araç yükleri ve trafik hacmi gerek temel - temel altı, gerekse taban zeminin stabilize edilmesi gerekliliğini göstermektedir [26].

Bağlayıcısız temel malzemesi ne kadar üstün nitelikli olursa olsun zamanla kalıcı şekil değiştirmelere uğramaktadır. Ulaşım mühendisliğinde gelişmeler, uygulamanın yaygınlaşacağını göstermektedir.

Yollarda, mekanik stabilizasyon hariç tutulursa, uygulamanın, yaklaşık %55'i çimento, %20'si bitüm, %15'i ise kireç katkısıyla gerçekleştirilmektedir [26, 27] . Zeminin katkı maddesi ile karışımı; yerinde veya imalat sırasında yapılabilir.

Yerinde karışım için kullanılan en basit düzen, tek bıçaklı ve hareketli karıştırıcıdır. Elle serme ve karıştırma; işçilerin güvenliği nedeniyle önerilmez. Bir tankerden yüzeyi temizlenerek düzenlenmiş yüzeye serpilene çimento ya da kireç arkadan gelen makina tarafından taban ya da temel malzemesiyle karıştırılarak yerine serilir. Eğer katkı maddesi sıvı ya da suyla karıştırılacak cinsten ise, makina önden zemini aldıktan sonra içinde karıştırıp ürünü gevşek olarak arkasındaki ızgara-mastar yardımıyla serer. Bu işlem, greyder-pulluk ile de yapılabilirse de zemini ufalayıp katkı maddesi ile iyice karıştırmak gerektiğinden başarı kesin değildir. Fabrika yöntemi; malzemenin iki kez taşınmasını gerektirdiğinden, sadece hava meydanları gibi kısıtlı malzeme, kullanılan projelerde verimlidir.

Karışım yapıldıktan sonra, lastik tekerlekli titreşimli silindirle sıkıştırılır. Malzemeyi ezmemek için ilk geçişler hafif silindirle yapılır. Benzer şekilde, yüksek titreşim, yüzeyde kalıcı oluklar oluşturabileceğinden genlik ve frekans dikkatle ayarlanmalıdır. Son geçişler 3-4 tonluk titreşimli silindirle yapılır. Kireç ve çimento stabilizasyonundan sonra yüzey su kaybını önlemek için sulanır ya da ısı emen koyu renkli plastik örtü ile korunur. Artan ısı, kuru hızlandıracaktır. Yolun stabilizasyon işleminden 7-14 gün sonra normal yüklere açılması uygun olur. Böylece, gelecekte olası büzülme çatlakları, bir ölçüde önceden oluşturularak, trafik etkisiyle onarılacaktır.

Taşıma yeteneğini yitirme belirtileri gösteren killi tabanda, trafik kesilmeden, stabilizasyonun sağlanması için kireç enjeksiyonu önerilmiştir. Zemine kolonlar halinde basılan kireç, zamanla difüzyon yardımıyla kille tepkimeye girebilmektedir [28] .

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Malzemeler

Deney çalışmalarında kullanılan kumun kimyasal bileşimi, Çizelge 4.1' de, mineralojik analizi ise, Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Kullanılan çimento ise, PÇ 42,5 çimento olup , kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.3' de verilmiştir. Çalışmalar şebeke suyu ile yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Kullanılan kumun kimyasal bileşimi

	Kimyasal Analizi
SiO ₂	95,22
Al ₂ O ₃	1,84
Fe ₂ O ₃	0,45
TiO ₂	0,14
CaO	0,13
MgO	0,04
Na ₂ O	0,05
K ₂ O	1,37
Kızdırma kaybı	0,43
TOPLAM	99,67

Çizelge 4.2. Kullanılan kumun mineralojik analizi

Kaolinit	% 0.69
Kuvars	% 89.05
Albit	% 0.42
Ortoklas	% 8.11
Diğer	% 1.42

Çizelge 4.3. Kullanılan çimentonun (PÇ 42,5) kimyasal ve fiziksel özellikleri

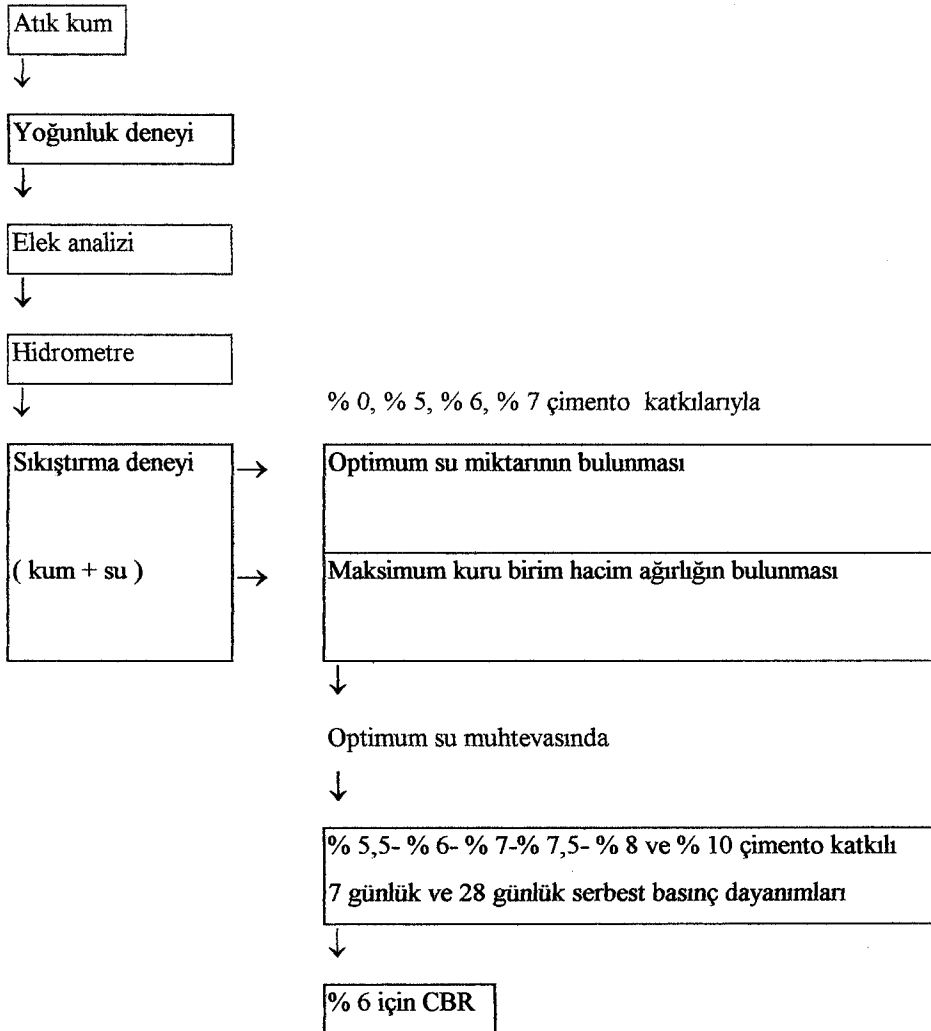
GÜN	KİMYASAL ANALİZ					FİZİKSEL ANALİZLER										
	Ç.K.	SO3	K.K.	Cl	MgO	d	SW	H.g. mm	lt.ağ. gr	İncelik		Basıncı N/ mm ²				
										200 mm	80 mm	1.G	2.G	7. G	28. G	
1	1,21	3,23	1,23	0	2,56	3,08	3151	2	1080	0,1	1,1	21,6	28,5	37,5	46,6	
2	1,3	3,11	1,4	0		3,11	3233	2	1080	0,1	1,1	20	28,8	37,8	45,6	
3	1,04	3,24	1,34	0		3,08	3178	1	1080	0,1	1,1	20,8	31,3	40,3	48,1	
4	1,05	3,25	0,95	0		3,09	3089	2	1080	0,1	1	19,1	28,9	36,6	46,6	
5	1,05	2,99	0,99	0		3,12	3103	2	1080	0,1	0,8	16	27,5	36,9	47,2	
6	1,11	3,07	1,03	0		3,09	2987	2	1070	0,1	0,7	17,5	25,6	36,9	49,1	
7	1,16	2,95	0,97	0		3,11	2838	1	1080	0,1	1	15	22,8	34,1	43,5	
8	1,03	3,22	0,96	0	2,5	3,09	3026	2	1080	0,1	0,9	15,6	25	36	45	
9	1,05	3,31	1,01	0		3,11	3206	2	1080	0,1	0,7	17,2	28,8	38,8	47,5	
10	0,94	3,23	1	0		3,13	3026	2	1080	0,1	0,9	18,1	27,2	38,1	47,8	
11	0,68	3,4	1	0		3,09	3076	1	1080	0,1	0,9	19,1	28,8	38	48	
12	0,97	3,14	1,05	0		3,09	3152	2	1080	0,1	0,9	17,2	26,9	37,5	47	
13	1,35	3,44	0,96	0		3,09	3042	1	1080	0,1	0,8	15,6	26,9	36,9	47,8	
14	1,26	3,16	1	0		3,1	3011	1	1080	0,1	1	16,3	26,6	36,9	46,3	
15	1,13	3,35	0,95	0	2,44	3,09	2976	1	1080	0,1	1	16,6	23,8	33,8	46,6	
ORT.	0,99	3,26	1,04	0	2,48	3,11	3078	1,53	1080	0,1	0,86	17,47	26,89	37	46,85	
S.S.	0,25	0,18	0,13	0	0,06	0,02	122	0,51	4,14	0	0,13	2,03	2,22	1,83	1,66	

4.2. Kullanılan Cihazlar

Siemens spektrometre, Siemens difraktometre, piknometre(bağıl yoğunluk şisesi, hacmi 1000 ml), vakum pompası, elekler (31,50- 16,00- 8,00- 4,00- 2,00- 0,71- 0,25- 0,147 ve 0,074 mm), elek sarsma cihazı, Ele International etüv, kronometre, termometre, hidrometre, çelik tokmak, metal kalıp, Soil Test serbest basma cihazı, Hamilton Beach mekanik karıştırıcı, mezür.

4.3. Yapılan Deneyler

Bu çalışmada yapılan deneyler, Şekil 4.1' de görülmektedir.



Şekil 4.1. Yapılan deneylerin akış şeması

4.3.1. Yoğunluk deneyi

Bu deney, kullanılan kumun özgül ağırlığının ölçümü için yapılmıştır. Numune alınarak, etüvde 105-110 °C ' de kurutulmuştur. Piknometre kurutulmuş ve tartılmıştır (W_1). Kurutulan numune, piknometre içine boşaltılmış ve tartılmıştır (W_2). İçerisinde numune olan piknometre, su ile doldurularak karıştırılıp 4 saat süreyle bekletilmiştir. Numune içindeki hava, piknometrenin kapağındaki delikten bir vakum pompasıyla emilerek dışarı çıkarılmıştır. Piknometrenin dış yüzeyi kurularak tartılmıştır (W_3). Piknometre boşaltılıp, temizlenerek oda sıcaklığındaki suyla doldurulmuş, dış yüzeyi kurulandıktan sonra tartılmıştır (W_4).

Zemin tanelerinin bağıl yoğunluğu (G_s) aşağıdaki formülden hesaplanmıştır:

$$G_s = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}$$

W_1 = Piknometrenin ağırlığı

W_2 = Piknometre + zeminin ağırlığı

W_3 = Piknometre + zemin + su

W_4 = Piknometre + su

4.3.2. Elek analizi

Bu deney, zemindeki ince kum boyutunda ve daha iri tanelerin, tane boyut dağılımının belirlenmesi için yapılmıştır. Zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da hesaplanmıştır.

Numune, 80 mikronluk (0,074 mm) elek üzerine konularak, iyice yıkanmıştır. Etüvde kurutulduktan sonra, elek sarsma makinasına elekler yerleştirilerek, makina çalıştırılmıştır. Elekler üzerinde kalan miktarlar tartılmıştır.

4.3.3. Hidrometre deneyi

Bu deney, 80 mikronluk elekten geçen malzemenin tane boyut dağılımının bulunması için yapılmıştır.

Organik madde miktarının bulunması

Havada kurutulmuş 40,52 gr numune üzerine 150 ml hidrojen peroksit dökülmüştür. Birkaç dakika karıştırıldıktan sonra ağzı cam kapla kapatılarak bir gün bekletilmiştir. Bir gün sonra hafif ısıtılarak karıştırılmıştır. Daha sonra etüvde kurutulmuştur. Kap ağırlığı çıkarıldıktan sonra kuru ağırlık bulunmuştur.

Zeminin dağıtılması

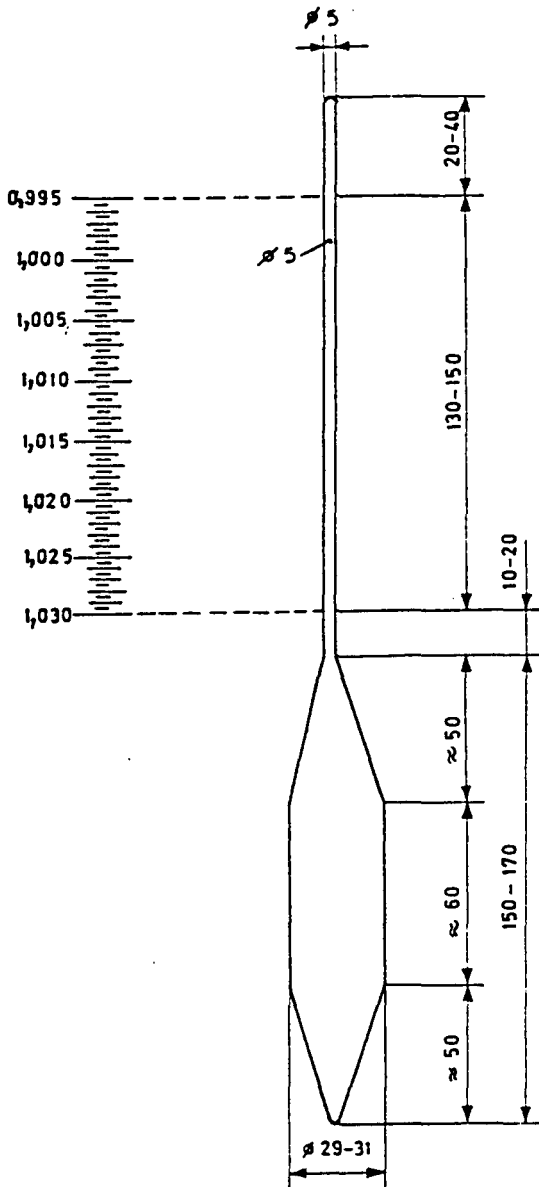
100 gr numune üzerine, önce 1000 ml sodyumheksametafosfat çözeltisi daha sonra ise 150 ml su katılarak 15 dakika süre ile mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Numunenin tamamı 80 mikronluk elekten geçene kadar yıkanmıştır. Numune mezür içine konarak 1000 ml' ye kadar su ilave edilerek tamamlanmıştır. Mezürün ağzı kapatılarak karıştırılmıştır. Mezür düz bir yüzeye oturtularak, hidrometre (Şekil 4.2), yüzme durumunun az altına gelene kadar süspansiyona daldırılmış ve serbestce yüzmeye bırakılmıştır.

Kronometreye bakılarak, 0,5 - 1 - 2 ve 4 üncü dakikalarda hidrometre okumaları alınmıştır. Daha sonra hidrometre çıkartılarak yıkanmış ve süspansiyonla aynı sıcaklıktaki su dolu başka bir mezürde bekletilmiştir. Her okumadan 15 sn önce süspansiyona daldırılarak, 8, 15, 30, 60 ve 120 inci dakika okumaları alınmıştır. Ortam sıcaklığı her okumadan sonra termometre ile ölçülmüştür.

Hidrometre okuması: Okunan sayının kesir bölümü alınıp, 3. ve 4. basamak arasına bir virgöl konarak bulunmuştur.

Menisk düzeltmesi: Hidrometre okumasına + 0,5 ilave edilmiştir.

Ölçüler mm dir



NOT - Bölüntüler $20^{\circ} C$ 'de g/ml esasına göre dir.

Şekil 4.2. İnce taneli zeminlerde tane boyut dağılımının bulunması için kullanılan hidrometre [29].

Eşdeğer tane boyutu (D) : Şekil 4.3 'de görülen nomogram yardımıyla bulunmuştur. Bunun için, bağıl yoğunluk (G_s) ve sıcaklık T eksenleri üzerine deneydeki değerler işaretlenmiş ve bu iki noktayı birleştiren doğrunun B eksenini kestiği nokta bulunarak kaydedilmiştir. Hidrometre okuması (R_h) ve geçen süre (t) eksenleri üzerine deneydeki değerler işaretlenmiştir. Bu noktaları birleştiren doğrunun (V) eksenini kestiği noktadan hız değerini; (B) ve (V) eksenleri üzerinde bulunan noktaları birleştiren doğrunun (D) eksenini kestiği noktadan ise eşdeğer tane boyutu bulunmuştur.

Sıcaklık düzeltmesi (M) değerleri belirlenmiştir.

$$K = \frac{100 G_s}{W_b (G_s - 1)} + (R_h + M_t - X)$$

4.3.4. Sıkıştırma Deneyi

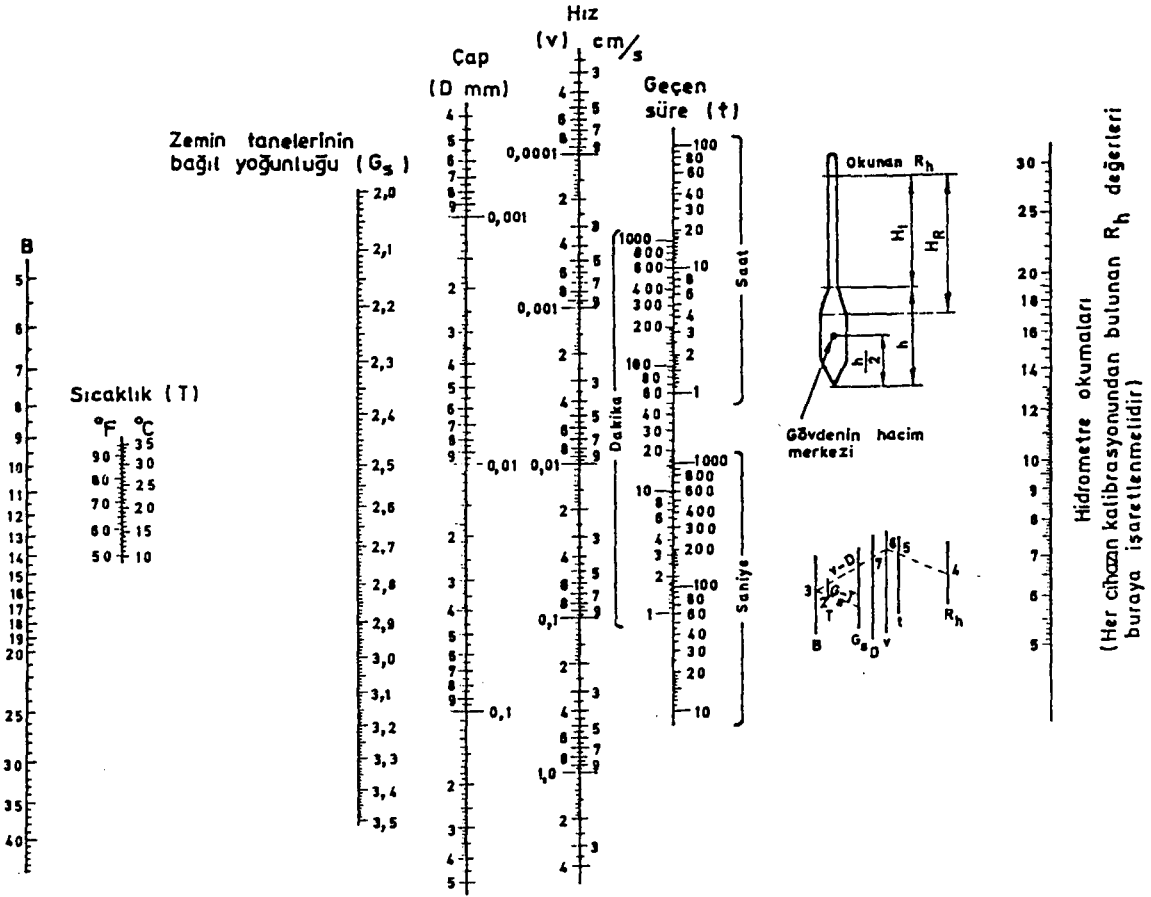
Bu deney, belirli metodla sıkıştırılmış zeminde maksimum kuru birim ağırlığı veren su miktarı civarında, değişen su muhtevasında, birim hacimdeki kuru zemin ağırlığını bulmak için yapılmıştır.

Numune 40 mm 'lik elekten geçirilip 25 kg ' lık numune alınıp su ile karıştırılmıştır. % (4 , 8 , 10 , 15, 20) su kullanılarak hazırlanan karışımlar için her seferinde deney tekrarlanmıştır.

Metal kalıp, taban plakası ve 5 cm' lik yakası takılmış olarak tartılmıştır (W_1). Kalıp, sert bir yüzey üzerine oturtulmuştur. Mümkün olduğu kadar eşit ağırlıkta 3 tabaka halinde ve sonuçta toplam olarak 12,7-13,3 cm arasında bir derinlik oluşturacak şekilde, daire biçimli tokmağın takılı olduğu titreşimli cihaz ile kalıbın içine sıkıştırılmıştır. Her tabaka 60 sn sıkıştırılmıştır. Son tabakanın sıkıştırılmasından sonra kalıbın çeperine yakın yerlerden toplanan gevşek malzeme atılmıştır. İçindeki zeminle birlikte kalıp tartılmıştır (W_2).

$$W_1 = \text{Metal kalıp} + \text{taban plakası} + 5\text{cm 'lik yakası (gr)}$$

$$W_2 = \text{Metal kalıp} + \text{taban plakası} + 5\text{cm 'lik yakası} + \text{sıkıştırılmış zemin (gr)}$$



Şekil 4.3. Hidrometre deneyi hesapları için kullanılan nomogram [29].

Sıkıştırılmış zemin, kalıptan çıkarılıp, büyükçe bir metal kaba konmuş, zeminin tümünü yansıtan bir numune alınarak su muhtevası ölçülmüştür: 30 gr zemin numunesi ufalanmış, kap ağırlığı, zeminle birlikte tartılmıştır. Etüvde 105- 110 C° de kurutulmuş ve tartılmıştır. Son olarak, kabın ağırlığı ölçülmüştür.

$$\text{Su muhtevası} = \frac{(\text{kap} + \text{yaş numune ağırlığı}) - (\text{kap} + \text{kuru numune ağırlığı})}{(\text{kap} + \text{kuru numune ağırlığı}) - \text{kap ağırlığı}} \times 100$$

$$\text{Sıkıştırılmış zemin ağırlığı} = W_2 - W_1$$

$$\text{Yaş birim hacim ağırlığı (} \rho_n \text{)} = \frac{\text{Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (gr)}}{\text{Kalıbın iç hacmi (cm}^3 \text{)}} \times 9,81$$

$$\text{Kuru birim hacim ağırlığı (} \rho_k \text{)} = \frac{100 \rho_n}{100 + w_{su}}$$

Bu deneyler, % 0 , % 5 , % 6 ve % 7,5 çimento katkılarıyla yapılarak ρ_{kmax} ' a karşılık gelen optimum su içeriği bulunmuştur.

4.3.5. Dayanım Deneyleri

4.3.5.1. Serbest basma dayanımı

Maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren optimum su miktarı katılarak;
 % 5,5 çimento katkılı 7 günlük ve 28 günlük
 % 6 çimento katkılı 7 günlük (1. deney) ve 28 günlük

% 6 çimento katkılı 7 günlük (2. deney) ve 28 günlük

% 7 çimento katkılı 7 günlük ve 28 günlük

% 7,5 çimento katkılı 7 günlük ve 28 günlük

% 8 çimento katkılı 7 günlük ve 28 günlük

% 10 çimento katkılı 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Kum, katkı maddesi ve belirlenen miktarda su , derin bir kap içinde homojen bir biçimde karıştırılarak örnekler hazırlanmıştır.

Numuneler 48,4 mm - 50,7 mm çapında ve 89 mm - 103,2 mm yüksekliğinde sıkıştırma deneyinde olduğu gibi üç parça halinde çelik tokmakla sıkıştırılarak hazırlanmıştır.

Numune, presin alt platformuna merkezlenerek oturtulduktan sonra üst başlık numune üst yüzeyine rahatça ve tam degecek şekilde indirilmiştir. Boyca değişmeyi (kısalmayı) ölçen saatler, düzeneğe yerleştirilerek sıfırlanmıştır. Ne kadar yük uygulandığı, takılan kuvvet halkası üzerinden (kuvvet halkasına karşılık gelen kalibrasyon katsayısı değerlerinden) okunmuştur. Yükleme, numunede kesin kırılma (yenilme) elde edilene kadar sürdürülmüştür.

$$\Delta L$$

$$\% \text{ Birim boy kısalması}(\epsilon) = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

$$L_0$$

$$A_0$$

$$\text{Ortalama kesit alanı } A \text{ (m}^2\text{)} = \frac{A_0}{(1 - (\epsilon/100))} \times 100$$

$$(1 - (\epsilon/100))$$

$$\text{Yük (kN)} = \text{Kuvvet halkası} \times \text{Kalibrasyon katsayısı (N)} / 1000$$

$$P$$

$$\text{Numune serbest basınç dayanımı } q_u = \frac{P}{A} \text{ (kPa)}$$

$$A$$

4.3.5.2. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

CBR, belli boyutları olan silindrsel pistonun, özel olarak sıkıştırılarak hazırlanmış bir numuneye, belirli bir derinliğe kadar batması için gerekli basıncın, aynı pistonun düzgün bir gradasyonu olan kırmataştan hazırlanmış bir numunede aynı batmayı sağlayan basınca oranı olarak tanımlanan ve % olarak ifade edilen bir sayıdır.

Bu deney, kesit alanı $19,35 \text{ cm}^2$ olan silindrsel pistonun, belirlenmiş bir hızla zemine itilmesiyle bulunan yük / penetrasyon bağıntısını kullanarak taşıma oranının bulunması için yapılmıştır.

Numune, 20 mm elekten geçirilmiş kuma, % 6 çimento katılarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma işlemi, Proktor deneyinde olduğu gibi yapılmıştır. Sıkıştırmadan sonra son taban plakası delikli bir plaka ile değiştirilmiş, numune büyükçe bir su kabı içine yerleştirilmiştir. Su seviyesi yakanın üst kenarının hemen altında tutulmuştur. Numune üstüne ağırlık konarak 4 gün suda bekletilmiştir. Taban plakası takılmış ancak üst yüzeyi açık olarak basınç cihazının üzerine yerleştirilmiştir. Numune üzerine yol yapısından gelebilecek yükler uygulanmıştır. Yaka ters çevrilerek, aynı işlem alt yüzey için de uygulanmıştır.

Penetrasyon değerleri ve buna karşılık olan piston yükleri grafiği çizilmiştir. % 100 CBR değerine karşılık gelen standart yük-penetrasyon eğrisi şu şekilde tarif edilir;

1,25 mm' lik penetrasyonda 0,84 kN (860 kg)

2,5 mm' lik penetrasyonda 13,2 kN (1350 kg)

5 mm' lik penetrasyonda 20 kN (2035 kg)

4.4. Deney Sonuçları

4.4.1. Yoğunluk deneyi sonuçları

Yoğunluk deneyi ile kumun bağıl yoğunluğu ölçülmüş ve $2,61 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuştur.

$$W_4 = 434,49 \text{ gr}$$

$$W_3 = 471,64 \text{ gr} \quad G_s = 2,61 \text{ gr/cm}^3$$

$$W_2 = 206,25 \text{ gr}$$

$$W_1 = 145,96 \text{ gr}$$

4.4.2. Elek analizi sonuçları

Kumun elek analizi yapılarak, D_{10} , D_{30} ve D_{60} çapları, uniformluk ve süreklilik katsayısı değerleri bulunmuştur. Elek analizi değerleri, Şekil 4.4' de verilmiştir.

$$D_{10} = 0,0048$$

$$D_{30} = 0,11$$

$$D_{60} = 0,19$$

$$C_u = 40 \text{ (Uniformluk katsayısı)}$$

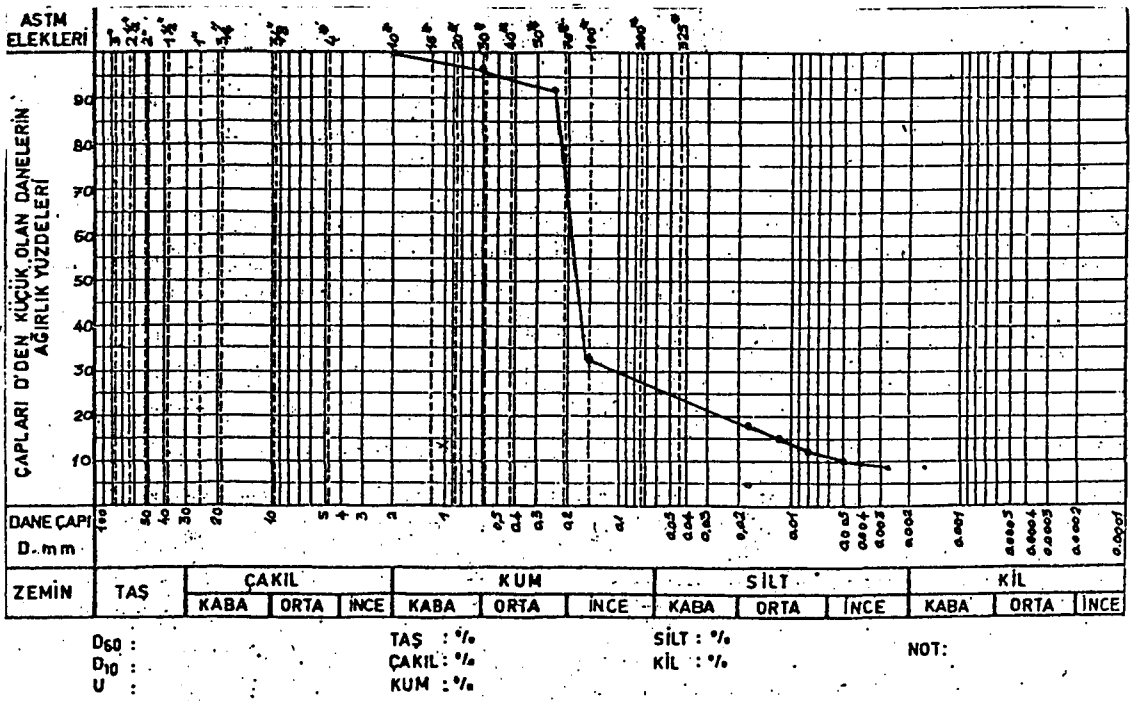
$C_u > 4-6$ olduğu için, zemin " iyi derecelenmiş" tir.

$$C_c = 13 \text{ (Süreklilik katsayısı)}$$

$1 < C_c < 3$ olmadığı için, zemin, sürekli tane dağılımına sahip değildir.

Kil ve siltin toplam miktarı = % 25

ELEK AÇIKLIĞI	KALAN AĞIRLIK	% KALAN	% GEÇEN
31,50 mm	0	0	100
16,00 mm	0	0	100
8,00 mm	0	0	100
4,00 mm	0	0	100
2,00 mm	0	0	100
0,71 mm	1,51	3	97
0,250 mm	2,21	4	93
0,147 mm	29,87	60	33
0,074 mm	3,8	8	25
KAP	12,61	25	0
TOPLAM	50		



Şekil 4.4. Kumun elek analizi

4.4.3. Hidrometre sonuçları

Hidrometre deneyi, No.200 (0,074 mm) elekten geçen kum ile yapılarak, organik madde miktarı, kil ve siltin miktarı bulunmuş ve zemin sınıflandırılmıştır.

$$W_a = 40,52 \text{ gr}$$

$$W_b = 39,61 \text{ gr} \quad \text{Organik madde: } 0,91 \text{ gr.}$$

Hidrometre deneyi sonuçları; Çizelge 4.4.' de verilmiştir.

No: 200 elek altı: % 25

Kil: % 8

Silt : % 17

Kum: % 75

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre sınıfı : SM (Siltli kum)

AASHTO zemin sınıflandırma sistemine göre : A-2-4 (siltli veya killi çakıl veya kum)

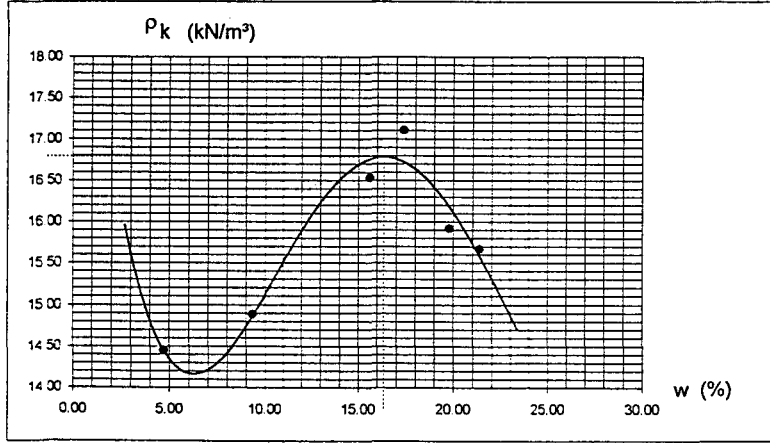
4.4.4. Sıkıştırma deneyi sonuçları

Sıkıştırma deneyi % 0- 5- 6 -7,5 çimento katkılı kum ile yapılarak, maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren optimum su içerikleri bulunmuştur. Sonuçlar, Şekil 4.5' den 4.8' e kadar verilen şekillerde görülmektedir.

Çizelge 4.4. Hidrometre değerleri

ORGANİK MADDE MİKTARI				DAĞITICI MADDE DÜZELTMESİ					ÇÖKELTME			
KAP NO		A		KAP NO					HİDROMETRE NO		1	
NUMUNE + KAP AĞIRLIĞI (gr)		239,41		DAĞITICI MİKTARI					NUMUNE AĞIRLIĞI (gr)		39,61	
KAP AĞIRLIĞI (gr)		199,80		KAP AĞIRLIĞI					DANE ÖZGÜL AĞIRLIĞI (gr)		2,61	
NUMUNE AĞIRLIĞI (gr)		40,52		TORTU + KAP AĞIRLIĞI					MENİSK DÜZELTMESİ		0,5	
KURU AĞIRLIK (gr)		39,61		TORTU AĞIRLIĞI					NO.200.DEN GEÇEN (% G)		25	
ORGANİK MADDE MİKTARI (gr)		0,91		DAĞITICI MADDE DÜZELTMESİ								
TARİH	SAAT	SICAKLIK	SÜRE(dak.)	HİDROM. OKUMASI	DÜZELT.HİD OKUMASI	EŞDEĞER ÇAP (mm)	SICAKLIK DÜZ	Rh+Mt-X	HIZ	B	% G	% K
	11:36	23	0,5	20	20,5	0,074	0,59	21,09	0,75	10,8	100	25
	11:37	23	1	19,7	20,2	0,06	0,59	20,79	0,34	10,8	98,58	24,86
	11:38	23	2	16,8	17,3	0,041	0,59	17,89	0,15	10,8	84,83	21,39
	11:04	23	4	14,6	15,1	0,026	0,59	15,69	0,06	10,8	74,4	18,76
	11:44	23	8	12,8	13,3	0,018	0,59	13,89	0,028	10,8	65,86	16,61
	11:51	23	15	10,2	10,7	0,012	0,59	11,29	0,012	10,8	53,53	13,5
	12:06	23,5	30	8,6	9,1	0,0075	0,69	9,79	0,005	10,6	46,42	11,71
	12:36	24	60	7,1	7,6	0,0047	0,81	8,41	0,002	10,5	39,88	10,06
	13:36	24,5	120	5,4	5,9	0,0029	0,91	6,81	8E-04	10,4	32,29	8,14

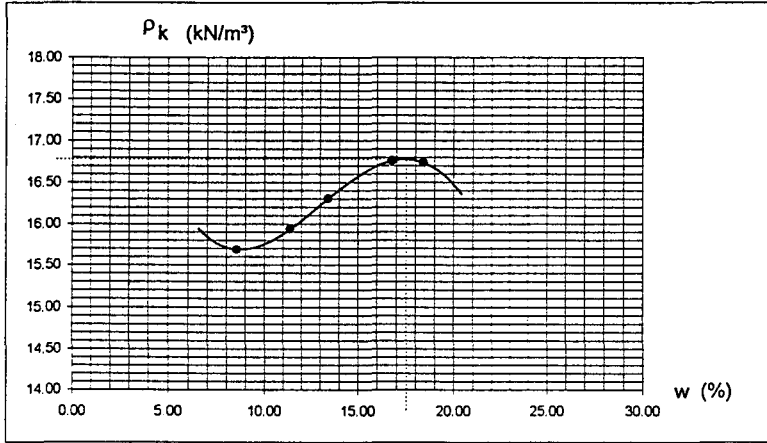
ÖRNEĞİN TANIMI		Katkısız							
SONDAJ NO.		DENEYİ YAPAN							
DERİNLİK		DANE ÖZGÜL AĞIRLIĞI						2.613	
TARİHİ		ÖRNEK AĞIRLIĞI (kg)							
20 mm.ELEX		KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)						2217.77	
DENEY NO.		1	2	3	4	5	6	7	8
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		11840	12100	12740	12960	12730	12720		
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr.)		8420	8420	8420	8420	8420	8420		
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		3420	3680	4320	4540	4310	4300		
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (kN/m ³)		15.13	16.28	19.11	20.08	19.06	19.02		
KAP AĞIRLIĞI (gr.)		85.98	86.50	86.95	74.79	79.25	69.25		
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		225.17	211.09	204.08	196	240	249.2		
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		218.94	200.45	188.28	178.04	213.46	217.52		
SU MUHTEVASI (%)		4.69	9.34	15.59	17.39	19.77	21.37		
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (kN/m ³)		14.45	14.89	16.53	17.11	15.92	15.67		



$P_{k \max} = 16,80$
 $\% w_{\text{opt}} = 16,20$

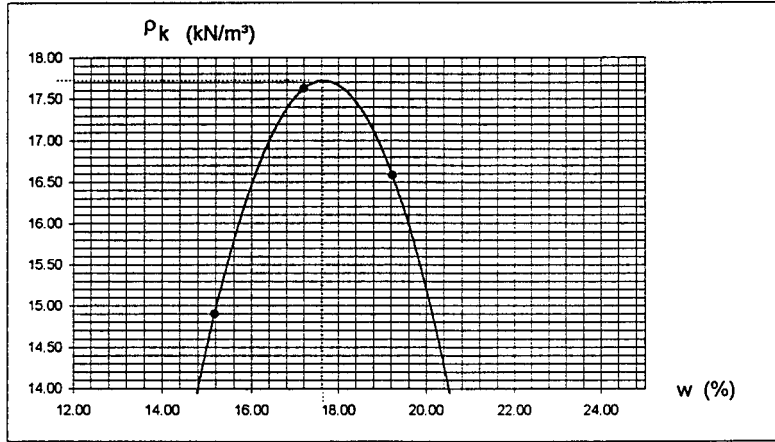
Şekil 4.5. % 0 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri

ÖRNEĞİN TANIMI		% 5 Çimento							
SONDAJ NO.		DENEYİ YAPAN							
DERİNLİK		DANE ÖZGÜL AĞIRLIĞI						2.613	
TARİH		ÖRNEK AĞIRLIĞI (kg)							
20 mm.ELEK		KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)						942.48	
DENEY NO.		1	2	3	4	5	6	7	8
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		3982	4051	4123	4226	4250			
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr.)		2346	2346	2346	2346	2346			
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		1636	1705	1777	1880	1904			
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (kN/m ³)		17.03	17.75	18.50	19.57	19.82			
KAP AĞIRLIĞI (gr.)		154.19	100.72	97.95	106.15	111.48			
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		255.54	225.23	277.77	278.29	333.25			
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		247.57	212.52	256.48	253.56	298.76			
SU MUHTEVASI (%)		8.54	11.37	13.43	16.78	18.42			
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (kN/m ³)		15.69	15.94	16.31	16.76	16.74			



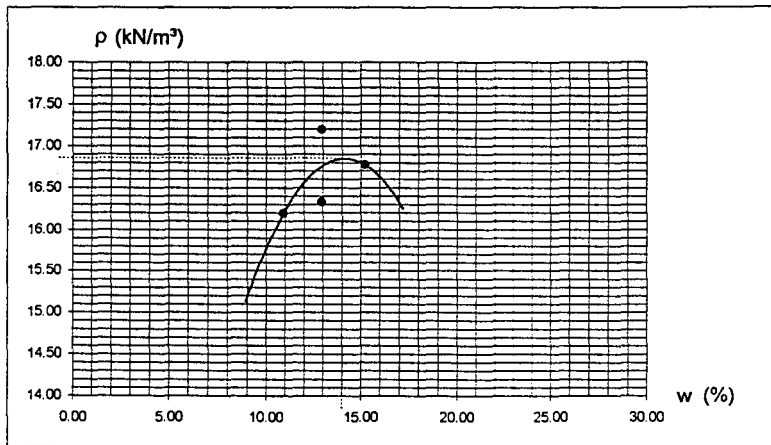
Şekil 4.6.% 5 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri.

ÖRNEĞİN TANIMI		% 6 Çimento							
SONDAJ NO.		DENEYİ YAPAN							
DERİNLİK		DANE ÖZGÜL AĞIRLIĞI						2.61	
TARİH		ÖRNEK AĞIRLIĞI (kg)							
20 mm.ELEK		KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)						2217.77	
DENEY NO.		1	2	3	4	5	6	7	8
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		12480	13270	13070					
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr.)		8600	8600	8600					
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		3880	4670	4470					
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (kN/m ³)		17.16	20.66	19.77					
KAP AĞIRLIĞI (gr.)		86.95	75.46	79.23					
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		164.09	201.82	148.86					
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		153.93	183.28	137.63					
SU MUHTEVASI (%)		15.17	17.20	19.23					
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (kN/m ³)		14.90	17.63	16.58					



Şekil 4.7. % 6 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri

ÖRNEĞİN TANIMI		% 7.5 Çimento							
SONDAJ NO.		DENEYİ YAPAN							
DERİNLİK		DANE ÖZGÜL AĞIRLIĞI						2.613	
TARİH		ÖRNEK AĞIRLIĞI (kg)							
20 mm.ELEK		KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)						2217.77	
DENEY NO.		1	2	3	4	5	6	7	8
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		12480	12810	12790	12590				
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr.)		8420	8420	8420	8420				
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr.)		4060	4390	4370	4170				
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (kN/m ³)		17.96	19.42	19.33	18.45				
KAP AĞIRLIĞI (gr.)		75.46	80.52	73.14	86.5				
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		181.32	174.48	202.01	157.65				
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr.)		170.91	163.72	185	149.49				
SU MUHTEVASI (%)		10.91	12.93	15.21	12.95				
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (kN/m ³)		16.19	17.19	16.78	16.33				



Şekil 4.8. % 7,5 çimento katkılı standart sıkıştırma değerleri

Sıkıştırma deneylerin sonuçları toplu olarak Çizelge 4.5' de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Katkı miktarına göre sıkıştırma deneyi değerleri

Çimento katkı oranı (%)	$\rho_{k,max}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
% 0	16,80	16,20
% 5	16,80	17,50
% 6	17,70	17,60
% 7,5	16,85	14

4.4.5. Dayanım deneyleri sonuçları

4.4.5.1. Serbest basma dayanım deneyi sonuçları

Değişen çimento miktarlarında (% 5,5-6-7-7,5-8 ve 10), 7 günlük ve 28 günlük serbest basma deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, Çizelge 4.6' dan 4.19' a kadar verilen çizelgelerde görülmektedir.

Çizelge 4.6. % 5,5 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4693
Kalibrasyon Katsayısı (N)	2,152
Numune Çapı (cm)	4,98
Numune Yüksekliği (cm)	8,9

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q_u (kPa)
0					
10	0,001123596	0,00194902	30	0,06456	33,12431712
25	0,002808989	0,00195232	120	0,25824	132,2737073
50	0,005617978	0,00195783	468	1,007136	514,4143107
75	0,008426966	0,00196338	710	1,52792	778,2103112
90	0,01011236	0,00196672	735	1,58172	804,2427704
100	0,011235955	0,00196895	725	1,5602	792,4002371

Çizelge 4.7. % 6 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi 1. değerleri

Kuvvet Halkası No	4693
Kalibrasyon Katsayısı (N)	2,152
Numune Çapı (cm)	5,03
Numune Yüksekliği (cm)	9,97

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q_u (kPa)
0					
10	0,001003009	0,00198811	32	0,068864	34,63783974
20	0,002006018	0,00199011	59	0,126968	63,79939703
30	0,003009027	0,00199211	79	0,170008	85,34045569
40	0,004012036	0,00199412	108	0,232416	116,5505925
50	0,005015045	0,00199613	149	0,320648	160,6347207
60	0,006018054	0,00199815	197	0,423944	212,168723
70	0,007021063	0,00200016	256	0,550912	275,4334245
80	0,008024072	0,00200219	317	0,682184	340,719536
90	0,009027081	0,00200421	380	0,81776	408,0205369
100	0,01003009	0,00200624	435	0,93612	466,6033918
110	0,011033099	0,00200828	495	1,06524	530,4245245
130	0,013039117	0,00201236	610	1,31272	652,3285934
140	0,014042126	0,00201441	670	1,44184	715,7639192
160	0,016048144	0,00201851	793	1,706536	845,4417227
180	0,018054162	0,00202264	917	1,973384	975,6487878
210	0,02106319	0,00202885	1080	2,32416	1145,552652
220	0,022066199	0,00203094	1125	2,421	1192,061385
230	0,023069208	0,00203302	1160	2,49632	1227,887075
240	0,024072217	0,00203511	1185	2,55012	1253,062325
250	0,025075226	0,0020372	1197	2,575944	1264,450688
260	0,026078235	0,0020393	1200	2,5824	1266,315602
270	0,027081244	0,0020414	1195	2,57164	1259,740585

Çizelge 4.8. % 6 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi 2. değerleri

Kuvvet Halkası No	4693
Kalibrasyon Katsayısı (N)	2,152
Numune Çapı (cm)	5,0
Numune Yüksekliği (cm)	9,98

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _u (kPa)
0					
10	0,001002004	0,00196447	29	0,062408	31,76839079
20	0,002004008	0,00196644	46	0,098992	50,3406977
30	0,003006012	0,00196842	77	0,165704	84,18134613
40	0,004008016	0,0019704	120	0,25824	131,0598573
50	0,00501002	0,00197238	182	0,391664	198,5741429
60	0,006012024	0,00197437	253	0,544456	275,7618942
70	0,007014028	0,00197636	338	0,727376	368,0377907
80	0,008016032	0,00197836	428	0,921056	465,5657506
90	0,009018036	0,00198036	525	1,1298	570,5026358
100	0,01002004	0,00198236	616	1,325632	668,7129244
110	0,011022044	0,00198437	710	1,52792	769,9766616
130	0,013026052	0,0019884	888	1,910976	961,0616698
140	0,014028056	0,00199042	960	2,06592	1037,930781
160	0,016032064	0,00199448	1059	2,278968	1142,640224
185	0,018537074	0,00199957	1140	2,45328	1226,906174
210	0,021042084	0,00200468	1180	2,53936	1266,714177
220	0,022044088	0,00200674	1185	2,55012	1270,779582
230	0,023046092	0,00200879	1183	2,545816	1267,334976
240	0,024048096	0,00201086	1172	2,522144	1254,263051

Çizelge 4.9. % 7 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	4,85
Numune Yüksekliği (cm)	9,7

Boy kıs.	ε	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _b (kPa)
0					
10	0,001030928	0,00184842	8	0,09608	51,97947673
25	0,00257732	0,00185129	27	0,32427	175,1591694
50	0,005154639	0,00185608	76	0,91276	491,7666181
75	0,007731959	0,0018609	92	1,10492	593,7542137
100	0,010309278	0,00186575	110	1,3211	708,0795592
110	0,011340206	0,0018677	222	2,66622	1427,544716
120	0,012371134	0,00186965	227	2,72627	1458,174521
130	0,013402062	0,0018716	228	2,73828	1463,069389

Çizelge 4.10. % 7,5 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	4,84
Numune Yüksekliği (cm)	10,32

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _a (kPa)
0					
10	0,000968992	0,00184069	10	0,1201	65,24715735
25	0,002422481	0,00184338	20	0,2402	130,3044588
50	0,004844961	0,00184786	30	0,3603	194,9820483
75	0,007267442	0,00185237	52	0,62452	337,1461747
80	0,007751938	0,00185328	80	0,9608	518,4332813
90	0,00872093	0,00185509	146	1,75346	945,2167728
100	0,009689922	0,0018569	230	2,7623	1487,584559
110	0,010658915	0,00185872	255	3,06255	1647,664758
120	0,011627907	0,00186054	230	2,7623	1484,673435

Çizelge 4.11. % 8 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12.01
Numune Çapı (cm)	4,90
Numune Yüksekliği (cm)	9,94

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q_u (kPa)
0					
10	0,001006036	0,00188668	24	0,28824	152,7760567
25	0,002515091	0,00188954	32	0,38432	203,3937029
50	0,005030181	0,00189431	57	0,68457	361,381531
75	0,007545272	0,00189911	97	1,16497	613,4280488
100	0,010060362	0,00190394	148	1,77748	933,5801736
150	0,015090543	0,00191366	251	3,01451	1575,256279
200	0,020120724	0,00192349	330	3,9633	2060,476677
250	0,025150905	0,00193341	382	4,58782	2372,913713
300	0,030181087	0,00194344	402	4,82802	2484,264842
340	0,034205231	0,00195154	366	4,39566	2252,408329

Çizelge.4.12. % 10 çimento katkılı 7 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	2,152
Numune Çapı (cm)	5,10
Numune Yüksekliği (cm)	9,95

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _u (kPa)
0					
10	0,001005025	0,00204384	100	0,2152	105,2920452
25	0,002512563	0,00204693	280	0,60256	294,3728307
50	0,005025126	0,0020521	748	1,609696	784,4151443
60	0,006030151	0,00205417	1000	2,152	1047,624072
70	0,007035176	0,00205625	1300	2,7976	1360,534234
80	0,008040201	0,00205833	1700	3,6584	1777,359383
90	0,009045226	0,00206042	1920	4,13184	2005,336788
100	0,010050251	0,00206251	2148	4,622496	2241,195206
120	0,012060302	0,00206671	2400	5,1648	2499,044197
130	0,013065327	0,00206881	2542	5,470384	2644,211632

Çizelge 4.13. % 5,5 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,02
Numune Çapı (cm)	4,98
Numune Yüksekliği (cm)	8,9

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _u (kPa)
0					
10	0,001123596	0,00194902	30	0,3603	184,8620114
25	0,002808989	0,00195232	70	0,8407	430,6168902
50	0,005617978	0,00195783	99	1,18899	607,29978
75	0,008426966	0,00196338	128	1,53728	782,9776083
90	0,01011236	0,00196672	134	1,60934	818,2864604
100	0,011235955	0,00196895	145	1,74145	884,454168

Çizelge 4.14. % 6 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi 1. değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	5,07
Numune Yüksekliği (cm)	10,1

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _u (kPa)
0					
10	0,000990099	0,00201983	20	0,2402	118,9206352
20	0,001980198	0,00202184	32	0,38432	190,0844404
30	0,002970297	0,00202385	50	0,6005	296,7122884
40	0,003960396	0,00202586	72	0,86472	426,8413997
50	0,004950495	0,00202787	98	1,17698	580,4010583
60	0,005940594	0,00202989	127	1,52527	751,4039815
70	0,006930693	0,00203192	152	1,82552	898,4224159
80	0,007920792	0,00203395	178	2,13778	1051,050981
90	0,008910891	0,00203598	206	2,47406	1215,170887
100	0,00990099	0,00203801	232	2,78632	1367,174795
110	0,010891089	0,00204005	258	3,09858	1518,872267
120	0,011881188	0,0020421	260	3,1226	1529,114292
130	0,012871287	0,00204415	263	3,15863	1545,208061
140	0,013861386	0,0020462	265	3,18265	1555,397049
150	0,014851485	0,00204825	270	3,2427	1583,153054
160	0,015841584	0,00205031	287	3,44687	1681,141772
170	0,016831683	0,00205238	285	3,42285	1667,746995

Çizelge 4.15. % 6 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi 2. değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	5,02
Numune Yüksekliği (cm)	9,94

Boy kis.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _i (kPa)
0					
10	0,001006036	0,00198022	16	0,19216	97,03954759
20	0,002012072	0,00198222	23	0,27623	139,353872
30	0,003018109	0,00198422	32	0,38432	193,6882007
40	0,004024145	0,00198622	45	0,54045	272,0991846
50	0,005030181	0,00198823	62	0,74462	374,5135309
60	0,006036217	0,00199024	87	1,04487	524,9956793
70	0,007042254	0,00199226	117	1,40517	705,3140682
80	0,00804829	0,00199428	155	1,86155	933,4437348
90	0,009054326	0,00199631	200	2,402	1203,221984
100	0,010060362	0,00199834	252	3,02652	1514,520552
110	0,011066398	0,00200037	258	3,09858	1549,004772
120	0,012072435	0,00200241	260	3,1226	1559,424553
130	0,013078471	0,00200445	265	3,18265	1587,794939
140	0,014084507	0,00200649	267	3,20667	1598,147534
150	0,015090543	0,00200854	270	3,2427	1614,455162
160	0,016096579	0,0020106	276	3,31476	1648,646211
170	0,017102616	0,00201265	280	3,3628	1670,829471
180	0,018108652	0,00201472	285	3,42285	1698,92501
190	0,019114688	0,00201678	275	3,30275	1637,633981

Çizelge 4.16. % 7 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	4,97
Numune Yüksekliği (cm)	9,73

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _u (kPa)
0					
10	0,001027749	0,00194102	18	0,21618	111,3746886
25	0,002569373	0,00194402	35	0,42035	216,2276941
50	0,005138746	0,00194904	90	1,0809	554,581783
75	0,007708119	0,00195408	166	1,99366	1020,253514
100	0,010277492	0,00195916	255	3,06255	1563,198755
150	0,015416238	0,00196938	305	3,66305	1860,000587

Çizelge 4.17. % 7,5 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	4,97
Numune Yüksekliği (cm)	9,73

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q_u (kPa)
0					
10	0,001027749	0,00194102	18	0,21618	111,3746886
25	0,002569373	0,00194402	35	0,42035	216,2276941
50	0,005138746	0,00194904	90	1,0809	554,581783
75	0,007708119	0,00195408	166	1,99366	1020,253514
100	0,010277492	0,00195916	260	3,1226	1593,849711
110	0,011305242	0,00196119	307	3,68707	1880,01442

Çizelge 4.18. % 8 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	4,99
Numune Yüksekliği (cm)	9,93

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _u (kPa)
0					
10	0,001007049	0,00195663	26	0,31226	159,5908659
25	0,002517623	0,00195959	62	0,74462	379,9873862
40	0,004028197	0,00196256	121	1,45321	740,4652345
50	0,005035247	0,00196455	156	1,87356	953,6841259
65	0,006545821	0,00196754	205	2,46205	1251,336065
75	0,00755287	0,00196953	233	2,79833	1420,808546
90	0,009063444	0,00197254	259	3,11059	1576,949818
100	0,010070493	0,00197454	270	3,2427	1642,253866
125	0,012588117	0,00197958	293	3,51893	1777,617141
150	0,01510574	0,00198464	307	3,68707	1857,805487
175	0,017623364	0,00198972	313	3,75913	1889,272583
200	0,020140987	0,00199484	308	3,69908	1854,328049

Çizelge 4.19. % 10 çimento katkılı 28 günlük serbest basma deneyi değerleri

Kuvvet Halkası No	4690
Kalibrasyon Katsayısı (N)	12,01
Numune Çapı (cm)	5,0
Numune Yüksekliği (cm)	10

Boy kıs.	ϵ	Alan (m ²)	Kuv. Halk.	P (kN)	q _n (kPa)
0					
10	0,001	0,00196446	30	0,3603	183,4087643
25	0,0025	0,00196742	72	0,86472	439,5201019
50	0,005	0,00197236	200	2,402	1217,829299
75	0,0075	0,00197733	384	4,61184	2332,357299
100	0,01	0,00198232	390	4,6839	2362,833631

Çizelge 4.20. çimento katkı oranlarına ve zamana göre serbest basma değerleri

Çimento katkı oranı (%)	Serbest Basma Dayanımı $q_{u\ max}$ (kPa)	
	7 Günlük	28 Günlük
5,5	804	884
6	1268	1689
7	1463	1860
7,5	1647	1880
8	2484	1889
10	2644	1594

4.4.5.2. Kaliforniya taşıma oranı sonuçları

Belirli bir penetrasyonu sağlayan yükün, aynı penetrasyonu standart eğri üzerinde sağlayan yüke oranı, o penetrasyondaki CBR değeri olarak tanımlanır.

Penetrasyon değerleri ve buna karşılık gelen piston yükü Çizelge 4.21' de gösterilmiştir. Şekil 4.10' da CBR değeri grafiği çizilmiştir.

CBR değeri 1,25 ve 2,5 mm'lik penetrasyonlarda hesaplanmıştır ve elde edilen iki değerden yüksek olanı zeminin CBR değeri olarak kabul edilmiştir.

% 6 çimento katkılı numunede;

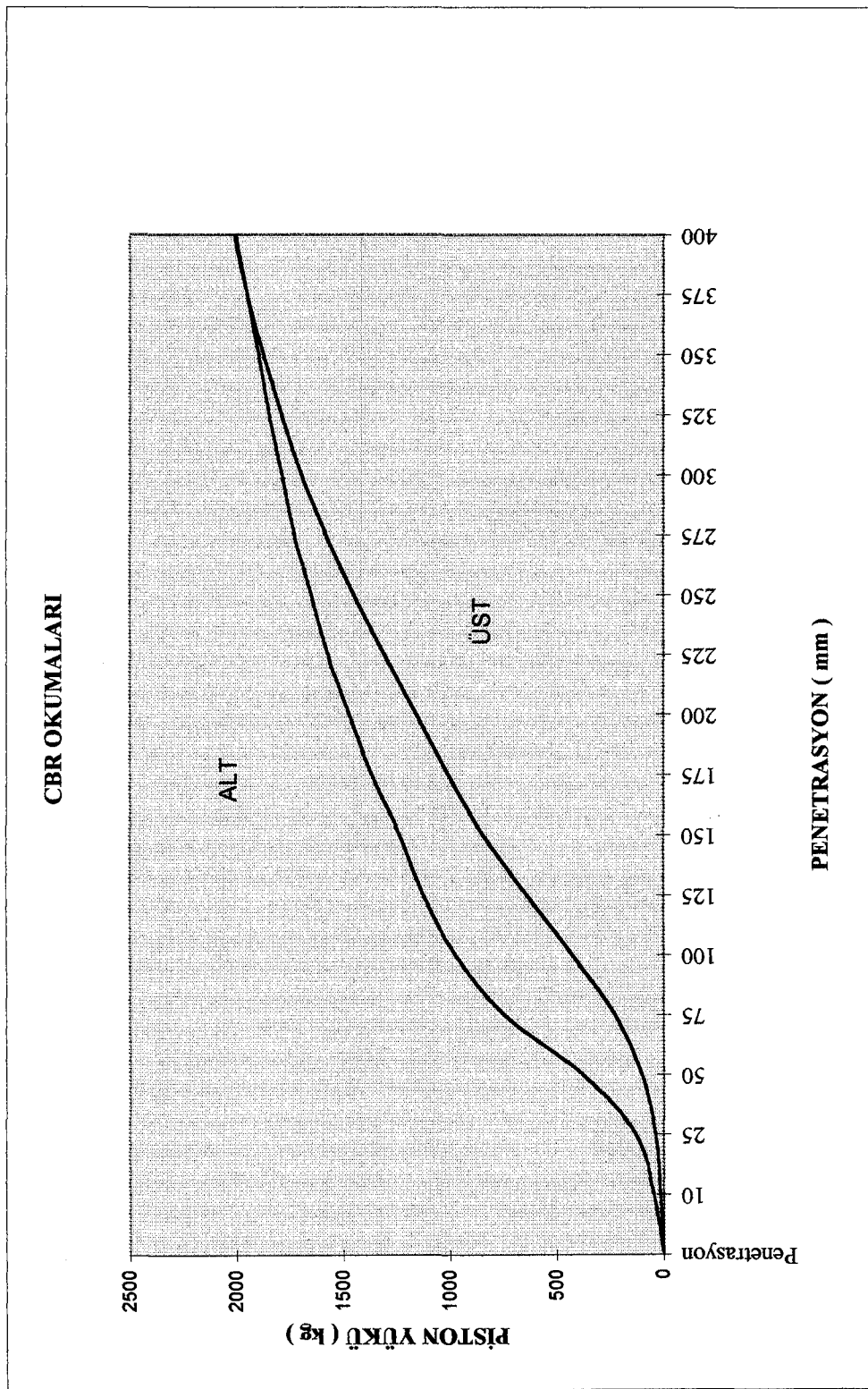
$$1,25 \text{ mm} = \frac{937 \times 1,201}{860} = \% 130$$

$$2,5 \text{ mm} = \frac{1374 \times 1,201}{1350} = \% 122$$

Cihazın kalibrasyon katsayısı: 1,201' dir. CBR değeri % 130 ' dur.

Çizelge 4.21 Penetrasyon değerleri ve buna karşılık gelen piston yükü

Penetrasyon (mm)	ÜST		ALT	
	Okuma (kg)	Düzeltilmiş okuma (kg)	Okuma (kg)	Düzeltilmiş okuma (kg)
10	13	15	39	47
25	33	39	110	132
50	85	102	318	382
75	192	230	622	747
100	357	429	812	975
125	534	641	937	1125
150	705	847	1030	1237
175	840	1008	1140	1369
200	965	1159	1228	1474
225	1090	1309	1310	1573
250	1207	1450	1374	1650
275	1315	1580	1440	1729
300	1412	1696	1490	1789
325	1491	1790	1539	1848
350	1562	1875	1581	1898
375	1625	1951	1625	1951
400	1675	2011	1670	2005



Şekil 4.9. CBR değerleri grafiği

5. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Kum, seramik hammaddeleri içinde en önemlilerinden biridir. Bu çalışmada, mineralojik olarak, % 0,69 kaolinit, % 89,05 kuvars, % 0,42 albit ve % 8,11 ortoklastan oluşan atık kumun, inşaat sektöründe alt temel malzemesi olarak, kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır.

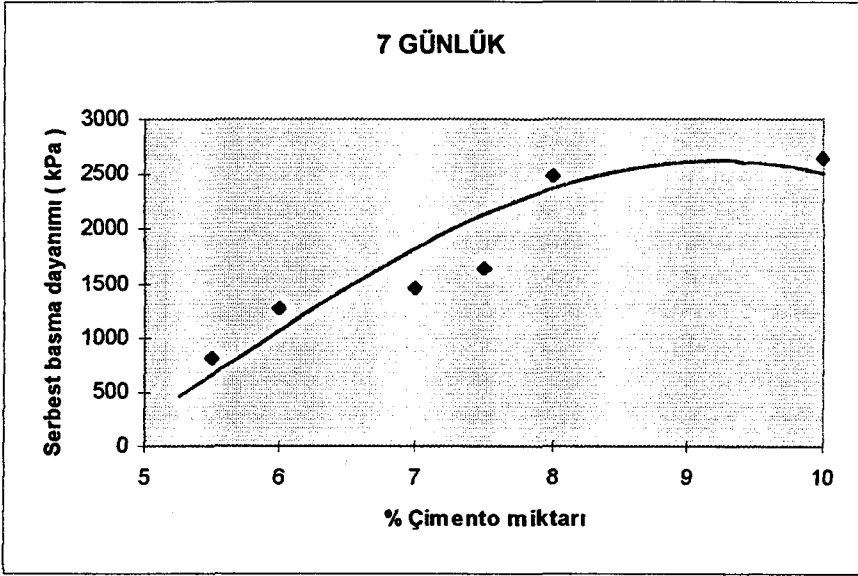
Kumu stabilize etmek için, stabilizasyon tekniklerinden, katkı maddeleri ile stabilizasyon tekniği seçilmiş ve PÇ 42,5 Portland çimentosu katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Kumun önce yoğunluk deneyi ile bağıl yoğunluğu, $2,61 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Elek analizi yapılarak, kumun zemin olarak özellikleri tanımlanmıştır. Zemin iyi derecelenmiş olmasına rağmen, sürekli tane dağılımına sahip değildir. Hidrometre deneyi ise No 200 (0.074 mm) elekten geçen malzeme ile yapılarak, atık kumun % 8 kil, % 17 silt ve % 75 kumdan oluştuğu saptanmıştır. Kum, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USC) göre siltli kum, AASHTO sistemine göre ise A-2-4 (siltli veya killi çakıl veya kum) olarak tanımlanmıştır.

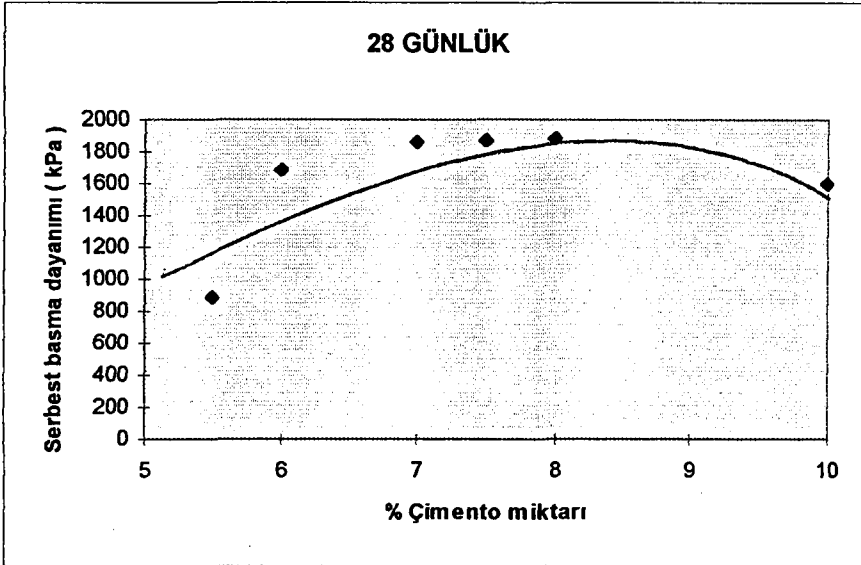
Standart sıkıştırma deneyi (Proktor) yapılarak, % 0, % 5, % 6 ve % 7,5 çimento katkılarıyla, maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren optimum su içeriği bulunmuştur. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, katkısız için, % 16,20 su içeriğinde $16,80 \text{ kN/m}^3$; % 5 çimento katkılı için, % 17,50 su içeriğinde $16,80 \text{ kN/m}^3$; % 6 çimento katkılı için, % 17,60 su içeriğinde $17,70 \text{ kN/m}^3$ ve % 7,5 çimento katkılı için, % 14 su içeriğinde $16,85 \text{ kN/m}^3$ olarak bulunmuştur.

Optimum su içeriğinde ise % 5,5, % 6, % 7, % 7,5, % 8 ve % 10 çimento katkılı numuneler için 7 günlük ve 28 günlük serbest basma deneyleri yapılmıştır. % 6 çimento katkılı için 7 günlük ve 28 günlük serbest basma dayanımı değerleri sırasıyla, yapılan iki deneyin ortalaması olarak, 1268 kPa ve 1689 kPa olarak bulunmuştur. Bir malzemenin alt temel malzemesi olarak kullanılabilmesi için, 7 günlük ve 28 günlük dayanımlarının en az 1000 kPa olması gerektiğinden, % 6 çimento katkısı uygun bulunmuştur. % 7, % 7,5, % 8 ve % 10 çimento katkısı da aranan şartı sağlamaktadır, ancak, maliyetler göz önüne alınarak, % 6 uygun bulunmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda tüm örneklerde dayanım katkı oranı bağıntıları, Şekil 5.1 ve 5.2' de verilen parabolik eğrilerde görülmektedir.



Şekil 5.1. Çimento katkı oranına göre 7 günlük serbest basma dayanımı değerleri



Şekil 5.2. Çimento katkı oranına göre 28 günlük serbest basma dayanımı değerleri

Yoğunluk, basma dayanımı verilerine göre % 6 çimento katkısının uygun olduğu saptandığından, bir zeminin dikkatle kontrol edilen yoğunluk ve rutubet şartları altında taneler arası kayma direncinin bir ölçüsü olan Kaliforniya taşıma oranı (CBR), % 6 çimento katkılı numune için belirlenmiştir. CBR deneyi esnasında, malzemenin üzerine, üstyapıdan gelebilecek yükler konulmuştur. CBR deneyi % 6 çimento katkılı numune için, optimum su içeriği olan % 17,60 için yapılmış ve 1,25 mm penetrasyonu sağlayan piston yükü 1125 kg, 2,5 mm penetrasyonu sağlayan piston yükü ise 1650 kg olarak bulunmuştur. Bulunan değerler, standart kırmataş değerleri ile karşılaştırılarak, 1,25 mm penetrasyon için % 130; 2,5 mm penetrasyon için ise % 122 gibi çok yüksek değerler elde edilmiştir. Bir zeminin alt temel malzemesi olarak kullanılabilmesi için % 50 CBR değeri yeterli olduğu kabul edildiğinden, % 6 çimento katkısının uygunluğu CBR ile de desteklenmiştir.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma sonucunda:

- % 0,69 kaolinit, % 89,05 kuvars, % 0,42 albit ve % 8,11 ortoklastan oluşan atık kumun, inşaat sektöründe, özellikle zemin dolgusunda %6 çimento katılarak, standartlarda belirtilen değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir..

- Atık kum, bu şekilde, ekonomik olabilecek ürün haline dönüşebilir.

- Değişen çimento oranlarında maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

- Çimento katkı oranlarının artması ile serbest basma dayanımları artmıştır.

- Çimento katkı oranının belli bir değerine kadar zamana bağlı olarak serbest basma dayanımında artışlar gözlenmesine rağmen bu değer üstünde, zamana bağlı olarak azalma tespit edilmiştir.

- Atık kumun çimento ile stabilizasyonunda değişik çimento türleri ile çalışma yapılarak, maliyet açısından incelenebilir.

7. KAYNAKLAR DİZİNİ

1. LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V., Soil mechanics, John Wiley and Sons Inc., New York, 1979.
2. CRAIG, R.F., Soil mechanics, Chapman and Hall, Great Britain, 1990.
3. ÖZÜDOĞRU, K., TAN, O., AKSOY, İ.H., Çözümlü problemlerle zemin mekaniği, İstanbul, Eylül 1988.
4. DAS, B.M., Advanced soil mechanics, McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1983.
5. TERZAGHI, K., PECK, R.B., Soil mechanics in engineering practise, John Wiley and Sons Inc., New York, 1967.
6. ROSENAK, S., Soil mechanics, (TOĞROL, E., TÜMAY, M., tarafından çeviri yapılmıştır), İ.T.Ü., Gümüşsuyu, 1969.
7. T.S. 1500, İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, T.S.E., Ankara, Eylül 1987.
8. YODER, E.J., Principles of pavement design, John Wiley and Sons Inc., p.255-282, 1967.
9. HERZOG, A., Soil mechanics, foundations and earth structures, McGraw Hill, p.311-330
10. NEW SOUTH WALES, Proc. symp. on soil reinforcing and stabilizing techniques, New South Wales Institute of Technology and University of New South Wales, Sydney, Australia, 1978.
11. ROBERTSON, J.A., BLIGHT, G.E., Proc symp. on soil reinforcing and stabilizing techniques in engineering practise, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1978.
12. INGLES, O.G., METCALF, A., Soil stabilization, J. Wiley, New York, 1973.
13. ÖNALP, A., İnşaat mühendislerine geoteknik bilgisi, K.T.Ü., s.1144-1209, Trabzon, 1983.

KAYNAKLAR (DEVAM)

14. INGLES, O.G., METCALF, J.B., Soil stabilization principles and practice, Wiley, New York.
15. HOOVER, J.M., Soil stabilization, Highway Research Board, Washington, 1968.
16. AKMAN, S., Yapı malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Ders Notları, s. 3-19, 1987.
17. ÖZTABAK, F.H., Beton ve beton malzemeleri ders notları, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, s.35-48, Ankara, 1990..
18. ÖZDEN, N., Çimento teknolojisi, Türkiye Çimento San. T. A. Ş., s. 7-11, 1973.
19. ERDOĞAN, T.Y., Çimentolar, Türkiye Hazır Beton Birliği, s.12-30, 1985.
20. T.C. Başbakanlık D.P.T. VII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Çimento sanayii özel ihtisas raporu, Eylül 1993.
21. TÜTÜN, T., Kalite ve laboratuvar yönetimi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Eğitim ve Değerlendirme Müdürlüğü, s. 19-22, Ankara, 1997.
22. GLANVILLE, W.H., Soil mechanics for road engineers, London Her Majesty's Stationary Office, London, 1954.
23. MITCHELL, J.K., The properties of cement stabilized soils, University of New South Wales, Australia, p.365-404, 1976.
24. LEA, F.M., The chemistry of cement and concrete, E. Arnold, London, 1965.
25. SHERWOOD, M., The properties of cement stabilized materials, Report LR 205, TRRL, Crowthorne, 1968.
26. DEMİREL, Z., ARAY, S., Toprak ve stabilizasyon laboratuvarı el kitabı, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1991.
27. ATANUR, A., Toprak - çimento stabilizasyonu laboratuvar deneyleri, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1966.
28. Yollar Fenni Şartnamesi, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1980.
29. T.S. 1500, İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, T.S.E., Ankara, Eylül 1987.