

ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)



SAYI: 105

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına
Haydar KOÇAKER

Sorumlu Müdür

Dr. Vehbi ÖZAYDIN

Yayın ve Hakem Kurulu

İsmail GÜNEŞ
Zuhal VELİOĞLU
Nurettin KAYA
Servan YILDIRIM
Kemal ŞAHİN

Haberleşme adresi

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yüce-tepe - Ankara

Tel (312) 399 2793
Faks (312) 399 2795
bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı yer

İdari ve Mali İşler Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik - Ankara

SAYI : 105

YIL : Ocak 2009

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Üç ayda bir yayınlanır

ISSN

1012 - 0726 (Baskı)

1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER**BORLU AKTİF BELİT (BAB) ÇİMENTOSU VE DSİ PROJELERİNDE UYGULANABİLİRLİĞİ**

Aydın SAĞLIK, Oya SÜMER, Ergin TUNÇ

Mehmet Fatih KOCABEYLER, Rahmi Sencer ÇELİK..... 1

BASINÇLI BİR FİZİKSEL AKİFER MODELİNDE POMPAJ VERİLERİNİN ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE ANALİZİ

Nilgün DOĞDU 23

DSİ GÖLET VEYA SULAMA KANALI PROJELERİNDE KULLANILAN ZEMİNLERİN SIKIŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİ İLE DRENAJSIZ KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Yüksel YILMAZ, Vehbi ÖZAYDIN 32

TEKRARLI YÜKLER ALTINDA NORMAL KONSOLİDE KİLLERİN DRENAJSIZ KAYMA MUKAVEMETİ

Hayreddin ERŞAN..... 39

DSİ TEKNİK BÜLTENİ'NİN AMACI

DSİ Teknik Bülteni'nde, konusu DSİ faaliyetlerini yakından ilgilendiren ve gönderilen bildirimler arasından Hakem Kurulu tarafından seçilmiş mühendislik bildirimleri yayınlanır. Telif bildirimlerinin, daha önce, DSİ teknik personelinin büyük kısmının veya tamamının okuması muhtemel yayın organlarında yayınlanmamış ve bu hususun yazar tarafından beyan edilmiş olması gereklidir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI

1. Gönderilen yazılar kolay anlaşılır dilde ve Türkçe kurallarına uygun şekilde yazılmış olmalıdır.
2. Yazıların teknik sorumluluğu yazarına aittir (yazılardaki verilerin kullanılması sonucu oluşabilecek maddi ve manevi problemlerde muhatap yazardır).
3. Yayın Kurulu, bildirimler üzerinde gerekli gördüğü düzeltme ve kısaltmaları yapar.
4. Bildirimler bilgisayarda Microsoft Word olarak bir satır aralıkla yazılmalı ve Arial 10 fontu kullanılmalıdır. Bildirimler A4 normundaki kâğıdın her kenarından 25 mm boşluk bırakılarak yazılmalıdır.
5. Sadece ilk sayfada, yazı alanı başlangıcından sola dayalı olarak, italic 10 fontunda Arial kullanılarak ilk satıra "*DSİ Teknik Bülteni*" yazılmalıdır.
6. Konu başlığı: Yazı alanı ortalanarak, "*DSİ Teknik Bülteni*" yazısından sonra dört satır boş bırakıldıktan sonra Arial 12 fontu kullanılarak büyük harflerle koyu yazılmalıdır.
7. Yazar ile ilgili bilgiler: Adı (küçük harf), soyadı (büyük harf), yazarın unvanı ile bağlı olduğu kuruluş (alt satıra) ve elektronik posta adresi (alt satıra) başlıktan iki boş satır sonra ilk yazardan başlamak üzere Arial 10 fontu ile yazı alanı ortalanarak yazılmalıdır. Diğer yazarlar da ilk yazar gibi bilgileri bir boşluk bırakıldıktan sonra yazılmalıdır.
8. Türkçe özet, elektronik posta adresinden dört boş satır sonra, özetten bir boş satır sonra ise anahtar kelimeler verilmelidir. Aynı şekilde, Türkçe anahtar kelimelerden iki boş satır sonra İngilizce özet, bir boş satır sonra ise İngilizce anahtar kelimeler verilmelidir.
9. Bölüm başlıkları yazı alanı sol kenarına dayandırılarak Arial 10 fontu kullanılarak koyu ve büyük harfle yazılmalı. Bölüm başlığının üzerinde bir boş satır bulunmalıdır.
10. Ara başlıklar satır başında başlamalı, üstlerinde bir boş satır bulunmalıdır. Birinci derecedeki ara başlıktaki bütün kelimelerin sadece ilk harfi büyük olmalı ve koyu harflerle Arial 10 fontunda yazılmalıdır. İkinci ve daha alt başlıklar normal harflerle Arial 10 fontu ile koyu yazılmalıdır.
11. Yazılar kağıda iki sütün olarak yazılmalı ve sütün aralarındaki boşluk 10 mm olmalıdır.
12. Paragraf sola dayalı olarak başlamalı ve paragraflar arasında bir boş satır bırakılmalıdır.
13. Eşitlikler bilgisayarda yazılmalı ve numaralandırılmalıdır. Eşitlik numaraları sayfanın sağına oturmali ve parantez içinde yazılmalıdır. Her eşitlik alttaki ve üstteki yazılardan bir boş satır ile ayrılmalıdır. Eşitliklerde kullanılan bütün semboller eşitlikten hemen sonraki metinde tanımlanmalıdır.
14. Sayısal örnekler verildiği durumlarda SI veya Metrik sistem kullanılmalıdır. Rakamların ondalık kısımları virgöl ile ayrılmalıdır.
15. Yararlanılan kaynaklar metinde kaynağın kullanıldığı yerde köşeli parantez içerisinde numaralı veya [Yazarın soyadı, basım yılı] olarak belirtilmelidir. Örneğin: "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [1]" veya "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [Aktan 1999]" gibi.
16. Kaynaklar yazar soyadlarına göre sıralanmalı, listelenirken yazar (veya yazarların) soyadı, adının baş harfi, yayın yılı, kaynağın ismi, yayınlandığı yer ve yararlanılan sayfa numaraları belirtilerek, köşeli parantez içerisinde numaralandırılmalı ve yazarken soldan itibaren 0,75 cm asılı paragraf şeklinde yazılmalıdır. Makale başlıkları çift tırnak içine alınmalı, kitap isimlerinin altı çizilmelidir. Bütün kaynaklara metin içinde atıf yapılmalıdır.
17. Çizelgeler, şekiller, grafikler ve resimler yazı içerisine en uygun yere gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Fotoğraflar net çekilmiş olmalıdır. Şekil ve grafikler üzerine el yazısı ile ekleme yapılmamalıdır.
18. Bildirinin tamamı 20 sayfayı geçmemeli, şekil, çizelge, grafik ve fotoğraflar yazının 1/3'ünden az olmalıdır.
19. Sayfa numarası, sayfaların karışmaması için sayfa arkalarına kurşun kalem ile hafifçe verilmelidir.
20. Yazım kurallarına uygun olarak basılmış bildirinin tam metni hem A4 kağıda baskı şeklinde (2 adet) hem de dijital ortamda (CD veya DVD) yazışma adresine gönderilmelidir.
21. Yayınlanan bütün yazılar için "Kamu Kurum ve kuruluşlarınca ödenecek telif ve işleme ücretleri hakkındaki yönetmelik" hükümleri uygulanır.
22. Bildiriyi gönderen yazarlar yukarıda belirtilenleri kabul etmiş sayılırlar.
23. Yazışma adresi aşağıda verilmiştir:

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı

06100 Yücetepe ANKARA

Tel (312) 399 2793

Faks (312) 399 2795

E-posta bulten@dsi.gov.tr

Web http://www.dsi.gov.tr/kutuphane/dsi_teknik_bulten.htm

BORLU AKTİF BELİT (BAB) ÇİMENTOSU VE DSİ PROJELERİNDE UYGULANABİLİRLİĞİ

Aydın SAĞLIK

Kimya Yüksek Mühendisi, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücepete ANKARA
aydinsaglik@dsi.gov.tr

Oya SÜMER

Kimya Mühendisi, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücepete ANKARA
oyasumer@dsi.gov.tr

Ergin TUNÇ

İnşaat Mühendisi, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücepete ANKARA
ergint@dsi.gov.tr

Mehmet Fatih KOCABEYLER

İnşaat Yüksek Mühendisi, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücepete ANKARA
mehmetf@dsi.gov.tr

Rahmi Sencer ÇELİK

Elektrik Yüksek Mühendisi, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücepete ANKARA
sencerc@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 17.09.2008, Bildirinin kabul tarihi: 09.10.2008)

ÖZET

Dünyada bor mineralleri ve bileşikleri çeşitli endüstri dallarında çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Dünyada bor yataklarına sahip sayılı ülke mevcuttur. Bunların arasında Türkiye, dünya toplam rezervinin % 72'sine sahiptir ve bu rezerv oranıyla dünyada birinci sırada yer almaktadır. Ticari açıdan ve Türkiye'de bulunma bakımından önemli olan bor mineralleri; Boraks (Tinkal), Kernit, Üleksit, Kolemanit, Pandermit ve Hidroborasit'tir. Bunların arasında Kolemanit minerali en çok Türkiye'de ve biraz ABD'de bulunmaktadır. Kolemanit cevherinin kimyasal yapısında çimento üretimi için gerekli olan hammaddeler de bulunmaktadır. Ayrıca, Kolemanit alkali de içermemektedir. Kolemanit cevheri esas olarak CaO, SiO₂ ve B₂O₃ içeriği ile çimento için hammadde olmaktadır. Kolemanitin bu temel özellikleri kullanılarak Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu geliştirilmiştir. Bu çalışmada, BAB çimentosunun genel özellikleri belirtildikten sonra, bu konuda DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Beton Malzeme Laboratuvarı'nda elde edilen deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Yapılan endüstriyel ölçekteki deneme üretimleri esnasında bu çimentonun en az % 25 civarında CO₂ emisyonunu azalttığı gözlenmiştir. Bunun yanında, normal Portland çimentosunda bulunan en önemli fazlardan birisi olan C₃S fazının (Alit) oluşmaması nedeniyle klinker pişirme sıcaklığında da önemli ölçüde azalma (1325 °C) sağlanarak yaklaşık % 10'luk bir enerji tasarrufu elde edilmiştir. BAB çimentosunun bu özelliği ile çevreci olması sağlanmış ve sürdürülebilir teknoloji açısından da umut aşılamıştır. Çimento üretiminde bor oksit (B₂O₃) kullanımı yeni değildir. Dünyada bazı araştırmacılar saf bor oksit kullanarak ürettikleri çimentonun özelliklerinde iyileşmeler sağlandığını tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda ülkemizde de bu tür çalışmalar başlatılmış ve Kolemanitin çimento üretiminde en uygun bor minerali olduğu belirlenmiştir. Elde edilen Borlu Aktif Belit Çimentosu ile beton fazında gerçekleştirilen deney sonuçları normal CEM I 42,5 Portland çimentosuna oranla oldukça iyi sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu bildirimizde BAB çimentosu ve özellikleri tartışılarak sonuçta yeni bir çimento tipi geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kolemanit, bor oksit, Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu, hidratasyon ısı, durabilite, çimento üretimi.

BORON MODIFIED ACTIVE BELITE (BAB) CEMENT AND ITS APPLICABILITY FOR DSI PROJECTS

ABSTRACT

Boron minerals and compounds have been used to produce quite a different materials and products in various industrial fields. Very few countries have boron reserves in the world. Among these, Turkey has the 72.2 % of boron minerals of total world reserves and it is in the first rank with this value. With regard to its trading capacity and the existence in Turkey, some important minerals are Borax, Kernit, Ulexit, Colemanite, Pandermite and hydroboraxide. Among these minerals, Colemanite mineral are only present in Turkey and the USA. Most of the Colemanite reserve is located in Turkey. Some of the raw materials needed for cement production abundantly exist in Colemanite. Besides, Colemanite does not contain any alkali which does not wanted in cement. Colemanite mineral is just a raw material of cement because it mainly contains CaO, SiO₂ and B₂O₃. Boron modified active belite (BAB) cement has been developed by using these main characteristics of Colemanite mineral. In this study, after determining general physical and chemical properties of BAB cement, the results of concrete testing programme have been given completed in the State Hydraulic Works, Technical Research and Quality Control Department, Concrete Materials Laboratory. During the production of industrial pilot scale, it is observed that this cement has decreased the CO₂ emission by up to about 25 %. In addition to this, because the alite (C₃S) phase which is the most important phase of Portland cement, can not be formed due to B₂O₃, clinker sintering temperature decreased to 1325 °C and energy saving of about 10 % has been obtained. With these properties, BAB cement has become a environmental friendly cement and in view of sustainability of technology, it has inoculated hope to the future. Usage of boric oxide (B₂O₃) in the cement production is not a new phenomenon. Some researchers in the world determined that there have been improvements in the properties of the cement which are produced by using pure boric oxide. In that aspect, those types of studies have been started in our country and it has been determined that colemanite is the most suitable boron mineral in the production of cement. This new type of cement called as Boron Modified Active Belite (BAB) cement has very low heat of hydration, good ultimate strength and produces very durable concrete against most serious environmental conditions.

Keywords: Colemanite, boric oxide, active belite cement, heat of hydration, durability, cement production

1 GENEL

Bugün dünyada hükümetler, çevresel meseleleri tartışmaları için toplumlar tarafından baskı altında tutulmaktadır ve küresel ısınma en önemli ihtilaflı tartışma konularından bir tanesidir. Kyoto Protokolü Birleşmiş Milletler çatısı altındaki ülkelerin İklim Değişikliği Çerçeve Konvansiyonu (UNFCCC) ile ilgili bir anlaşmasıdır. Kyoto Protokolü kapsamında bazı ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltması talep edilmektedir. İklim Değişikliği ile ilgili hükümetler arası panel, dünyada sıcaklığın küresel artışını tahmin etmiş ve karbondioksit gazının küresel ısınmada en önemli sera gazı olduğu konusunda görüş birliğine varmışlardır.

Günümüzde sürdürülebilir teknoloji için enerji, doğal kaynaklar ve çevrenin korunması üç önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyada toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık % 8'i çimento üretimiyle ortaya çıkmaktadır. Bugün küresel ısınmada en önemli rolü oynayan CO₂ gazı emisyonunun azaltılması amacıyla birçok araştırma ve girişimler başlatılmış ve devam ettirilmektedir. Yakın

gelecekte de çimento üretimi ile ilgili olarak aşağıdaki faktörlerin ciddi şekilde dikkate alınmaya başlanacağı beklenmektedir:

1. Alternatif yakıt kullanımıyla maliyetlerin ve CO₂ emisyonunun önemli ölçüde azaltılabilmesi,
2. Alternatif hammadde kullanımıyla maliyetlerde ve CO₂ emisyonunda düşüş,
3. Teknolojideki gelişime paralel olarak çimento kullanım alanlarının genişlemesi,
4. Taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda asfalt yerine beton yol uygulaması,
5. Türkiye'nin Kyoto Protokolü'nü imzalaması durumunda CO₂ emisyonlarına sınırlama getirilmesi.

Dünyada bor mineralleri ve bileşikleri çeşitli endüstri dallarında çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Bor minerallerinin çimento üretiminde de kullanılması ile çevreye büyük oranda katkı ve enerji sarfiyatı sağlanmaktadır. Böylece bor minerali daha fazla değerlendirilmiş olacaktır.

Ayrıca daha gelişmiş özelliklerde yeni bir tür çimento elde edilecektir.

Dünyada bor yataklarına sahip sayılı ülke mevcuttur. Bunların arasında Türkiye, dünya toplam rezervinin % 72'sine sahiptir ve bu rezerv oranıyla dünyada birinci sırada yer almaktadır. Ticari açıdan ve Türkiye'de bulunma bakımından önemli olan bor mineralleri; Boraks (Tinkal), Kernit, Üleksit, Kolemanit, Pandemit ve Hidroborasit'tir. Bunların arasında Kolemanit minerali ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sadece Türkiye ve ABD'de bulunmaktadır. Kolemanit cevherinin kimyasal yapısında % 28 CaO, % 6,5 SiO_2 , % 42 B_2O_3 ve % 23,5 H_2O bulunmakta ve çimento üretimi için gerekli olan hammaddeleri de bünyesinde barındırmaktadır. Bu mineralde, çimento özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek hiçbir kimyasal bileşen bulunmamaktadır. Birçok bor minerali içerisinde alkaliler bulunmakta olup bunlar çimento içinde istenmemektedir. Kolemanitin alkali içermemesi de büyük bir tesadüftür. Çimento hammaddelerinden en önemlisi olan kireçtaşı (CaCO_3), öncelikle CaO ihtiyacı için kullanılmaktadır ve 900 °C'un üzerindeki bir sıcaklıkta kalsine ($\text{CaCO}_3 + \text{enerji} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) edilmesi gerekmektedir. Bu sıcaklıkta yapılan işlem sonucunda, belirli bir miktarda enerji harcanmakta, aynı zamanda atmosfere çok yüksek oranda CO_2 gazı emisyonu yapılmaktadır. Kolemanit için kalsinasyon sözü konusu değildir, zira yapısında CaO bulunmakta ve çimento üretiminde herhangi bir ön-kalsinasyona tabi tutulmadan doğrudan kullanılabilir. Bileşiminde Kolemanit kullanılan çimentoda, kireçtaşı ve diğer bileşenler belirli oranlarda azaltılmaktadır.

Çimento üretiminde bor oksit (B_2O_3) kullanımı yeni değildir. Dünyada bazı araştırmacılar saf bor oksit kullanarak ürettikleri çimentonun özelliklerinde iyileşmeler sağlandığını tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda ülkemizde de bu tür çalışmalar başlatılmış ve Kolemanitin çimento üretiminde en uygun bor minerali olduğu belirlenmiştir.

2 GELECEĞİN ÇİMENTOSU - BORLU AKTİF BELİT (BAB) ÇİMENTOSU

Kalsiyum boratlar, çimento üretimi esnasında döner fırın içindeki eriyiğin viskozitesini ve yüzey gerilimini düşürdükleri için oldukça faydalı akışkanlaştırıcı maddelerdir. Kalsiyum silikatların stabilitesi ve bileşimleri üzerindeki etkileri, $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ üçlü sistem faz diyagramı ile tahmin edilebilir. Faz diyagramına göre boroksit sadece C_2S içinde çözünmektedir. Buna karşın C_3S 'in oluşumunu engellemektedir. B_2O_3 'ün varlığında C_3S 1700 °C'un üzerinde dahi oluşmamaktadır.

Oluşan C_2S 'in içerisinde kararlı halde bulunan B_2O_3 nedeniyle 1325 °C'ta dahi C_2S 'in en aktif polimorflarından α ve/veya α' - C_2S biri olan kristal fazı oluşmaktadır. Bu doğrultuda bu durumdan faydalanmak amacıyla ülkemizde çok miktarda bulunan kolemanitin çimento üretiminde kullanılması ile ilgili çalışmalar başlatılmış ve çimento üretiminde en uygun bor minerali olduğu belirlenmiştir. Bor oksit (B_2O_3) kullanarak yapılan laboratuvar ve endüstriyel çaplarda çimento üretimlerinde C_3S yerine oluşan C_2S fazının oldukça hızlı soğutulması ile daha kararlı ve aktif olan α ve/veya α' - C_2S polimorfunun oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle çimentonun klinkerleşme sıcaklığı 1450 °C yerine daha düşük sıcaklıkta oluşan C_2S 'in oluşma sıcaklığı olan 1325 °C'a kadar inilebilmektedir.

Göлтаş Çimento Fabrikası'nda deneme olarak üretilen bor katkılı çimento üzerinde DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı ve Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) arasında yapılan protokol ile çok yönlü bir araştırma programı başlatılmıştır. Borlu çimento ile ilgili olarak elde edilen genel bilgiler ve bu araştırmadan elde edilen bazı sonuçlar özet olarak aşağıda verilmiştir:

2.1 Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu

Bilindiği üzere kireçtaşı (CaCO_3), kil ve/veya silt, demir esaslı alüminasilikatlar ve diğer bazı yardımcı hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda döner fırınlarda pişirilmesi sonucunda normal Portland çimentosu klinkeri esas olarak 4 ana fazdan ibaret olarak oluşur. Bunlar çimento kimyasında kısaca Alit: C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Belit: C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Alüminat: C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ve Ferrit: C_4AF ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) olarak gösterilir. Bu klinker daha sonra alçıtaşı; (kalsiyum sülfat; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülerek toz halindeki Portland çimentosu elde edilir. Normal Portland çimentosu içerisinde yaklaşık olarak % 55-65 C_3S , % 15-25 C_2S , % 7-12 C_3A ve % 5-10 C_4AF ve % 5 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bulunur. Bu fazlar arasında en reaktif (su ile reaksiyon verme açısından) olanları sırasıyla C_3A , C_4AF , C_3S ve C_2S dir. Ancak, çimento dayanımının zamanla gelişimi açısından C_3S başlangıçtan (erken dayanım kazandıran bileşen) itibaren en fazla katkıda bulunan bileşen iken C_2S başlangıçta çok zayıf ancak daha ileri dönemlerde C_3S kadar ve hatta daha fazla dayanım gelişimine sahip olabilmektedir. Diğer alüminat ve ferrit fazlarının dayanıma büyük katkıları yoktur

Bugün dünyada çimento ile ilgili sürdürülen çalışmalar araştırma kurumları ve üniversitelerde beklenenin üzerinde devam etmektedir. Dünya genelinde onlarca farklı

çimento tipi üretilmektedir. Çimentonun kompozit bir malzeme olması göz önüne alınırsa ve Dünya bor yataklarının % 72'lik rezerv ile dünyada birinci sırada yer alan ülkemizde bor katkılı çimento araştırmalarının yapılması kaçınılmazdır. Çimento üretiminde borun kullanılması (B_2O_3) aslında yeni değildir. Muhtelif araştırmacılar saf B_2O_3 kullanarak ürettikleri çimentonun özelliklerinde önemli sayılabilecek iyileşmeler sağlandığını tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda ülkemizde de bu tür çalışmalar başlatılmış ve kolemanitin en uygun mineral olabileceği belirlenmiştir. Çünkü yapısında çimento özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek herhangi zararlı bir bileşenin olmaması büyük bir avantajdır.

Borun bir filizi olan Kolemanit'in bor oksit üretiminde kullanılmasının ardından çok değerli olmayan **daha düşük tenörlü** kısmının çimento üretiminde hammadde olarak kullanılan kireçtaşının bir kısmının yerine ikame edilmesi ile üretilen borlu çimento içerisinde normal Portland çimentosunda oldukça yüksek oranlarda meydana gelen C_3S fazının hiç oluşmadığı tespit edilmiştir. Ortamda çok az miktarda bulunan B_2O_3 nedeniyle bile C_3S fazı döner fırının sıcaklığının daha fazla artırılmasında dahi oluşmamaktadır. Aktif belit C_2S fazı ise en fazla 1325 °C sıcaklıklarda yeterince oluşmaktadır. BAB çimentosu üretimi esnasında döner fırındaki pişirme sıcaklığı 1450 °C sıcaklığına çıkarılmadan çok daha düşük sıcaklıklarda oluşmakta ve 1325 °C'ü geçmemektedir. Bu durumda hem büyük oranda enerji tasarrufu (~ % 10) ve hemde atmosfere salınan CO_2 emisyonunda en az % 25'lere varan mertebelerde azalma sağlanmaktadır. Çimentoda C_3S (alit) yerine C_2S 'in polimorflarından α ve/veya α' - C_2S kristal yapısına sahip oldukça aktif ve kararlı belit fazının oluşması sağlanmaktadır. Bu nedenle bu çimento borlu aktif belit (BAB) çimentosu olarak isimlendirilmiştir.

Çimentonun dört ana fazından (C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF) hidrasyon ısı yüksek ve oldukça reaktif olan C_3S fazının oluşmaması ve düşük sıcaklıklarda üretilmesi nedeniyle C_3A oranının da % 7'den daha az oluşması ile hidrasyon ısı çok düşük oluşmakta ve kütle betonu yapılarında bu tip bir çimentonun ideal bir çimento olarak kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Normal çimentolarda C_3S ve C_3A fazlarının oranları azaldıkça çimentonun hidrasyon hızı ve ısı özellikle erken yaşlarda oldukça düşük seviyelerde seyretmektedir. BAB çimentosunda fazlaca oluşan aktif α veya α' - C_2S fazının düşük hidrasyon hızı ve ısı ve buna rağmen özellikle ileri yaşlarda yüksek

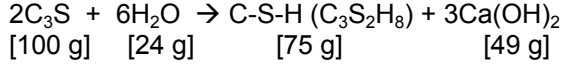
dayanımlar vermesi kütle betonlarında çimento dozajında da azalma sağlanabileceğini göstermektedir. BAB çimentosunun hidrasyon reaksiyonu izotermal bir kalorimetre vasıtasıyla izlenmiş ve hidrasyon ısısının son derece düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile bu tip bir çimentonun kullanımı ile kütle betonu yapılarında (beton kemer barajlar vb.) çimento dozajının azaltılması, ön soğutma ve ard soğutma işlemlerinde büyük ölçüde tasarruf sağlanması ve ısı çatlak oluşum riskinin rahatlıkla önlenilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca C_3A fazının % 7'nin altında olması şiddetli sülfat etkisine maruz yapılarda (deniz suyuna maruz yapılar, sülfatlı sulara maruz yapılar, sülfatlı zemine maruz yapılar) Borlu aktif belit çimentosunun kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. Ayrıca, çimentonun inceliğinin bir miktar artırılması ve ilâve tedbirler ile basınç dayanım sonuçları incelendiğinde erken yaşlarda da normal bir Portland çimentosu ile eşdeğer ve hatta daha yukarıda değerler elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun sonucunda normal yapı betonlarında da kullanılmasının mümkün olabileceği tartışılmaktadır.

Bu araştırmada borlu aktif belit (BAB) çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bileşiminde yaklaşık % 3,0 civarında B_2O_3 (bor oksit) bulunan çimento, basınç dayanım deney sonuçları itibarıyla değerlendirildiğinde, erken yaş (**ilk 7 gün**) değerlerinin normal bir Portland çimentosuna kıyasla (incelik değerine bağlı olarak) inceliği 3750 cm^2/g ve civarında olduğunda düşük veya inceliği 3750 cm^2/g ve üzerinde ise hemen hemen aynı seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Ancak belirli bir süre sonra (**28 gün ile 90 gün arası**) incelik değerine bağlı olmaksızın normal Portland çimentosunun değerlerini yakaladığı ve daha uzun vadede (90 gün ve ötesi) ise geride bıraktığı gözlenmiştir. Bunun en önemli nedenleri arasında Borlu aktif belit çimentosunun kimyasal içeriğinde aktif ve kararlı yapıya sahip olan α veya α' - C_2S kristal fazının bulunması ve hidrasyon hızının normal Portland çimentosunda bulunan β - C_2S fazına göre biraz daha yüksek olması ve sonuçta hidrasyonunun sürekli olarak devam etmesi ile daha kompakt ve sıkı bir mikroyapının oluşması neden olarak gösterilebilir.

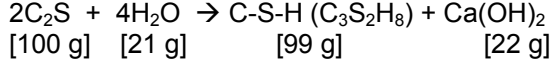
Normal şartlarda çimentoda oluşan β - C_2S fazının reaktivitesi C_3S fazına göre oldukça yavaştır ve geç dayanım kazanmaktadır. Ancak, nihai dayanımı C_3S ile neredeyse aynı seviyede olabilmektedir. Gerek Alit olarak bilinen C_3S fazının ve gerekse Belit fazının ister

β -C₂S veya α veya α' -C₂S olsun, su ile olan reaksiyonları aşağıdaki gibi özetlenebilir,

(Hızlı Reaksiyon)



(Yavaş Reaksiyon)



C₃S fazının su ile hidratasyon reaksiyonu sonucu C₂S fazından oluşana göre daha az C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) ve 2 kat daha fazla Ca(OH)₂ oluşmaktadır. BAB çimentosunda α veya α' -C₂S'den dolayı oluşan C-S-H yaklaşık 99 g iken normal bir Portland çimentosunda C₃S'den dolayı 75 g kadar C-S-H oluşmaktadır. Çimento hidratasyonu sonucunda C-S-H oluşumunun daha fazla olması arzu edilir. C-S-H'in fazla oluşması ile çimento pastasında daha düşük boşluk oranı ve sonuçta da kompakt bir yapının oluşması sağlanmaktadır. Kalsiyum hidroksit normal bir Portland çimentosu pastasının hacimce % 20 ile % 25'ini oluşturur. Bu bileşen betonda en zayıf bileşendir ve betonda daha çok agregaya ile çimento pastası arasındaki arayüzeyde toplanmaya meyillidir. Betonda kırılma genellikle agregaya ile çimento pastası arasındaki arayüzeyden başlar ve devam eder.

C₃S içeren normal bir çimentodaki diğer bir olumsuzluk ise yüksek oranda oluşan kalsiyum hidroksitin betonun boşluk oranının artmasına neden olmasıdır. Buna karşın C₂S oranı yüksek olan BAB çimentosu ile yapılan betonlarda kalsiyum hidroksit oranı oldukça düşük olacağından betonun boşluk oranı (kapiler boşluklar) da düşük olacak ve daha sıkı bir yapıya sahip olan betonun dayanımı ve dayanıklılığı da bu oranda yüksek olacaktır.

Hidrolik bir bağlayıcı olan BAB çimentosu, ince öğütülmüş inorganik bir malzeme olup su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ile priz alan ve sertleşen bir pasta oluşturur. Bu çimento pastası hidratasyondan sonra oluşan kararlı hidrate fazlar sayesinde dayanım ve kararlılığını korur. Bu tanım TS EN 197-1'de yer alan çimento tanımına aynen uymaktadır.

BAB çimentosu klinkerinin ana bileşeni aktif belit fazı olan di-kalsiyum silikattır (α ve/veya α' -C₂S modifikasyonları). Diğer mineralojik bileşenleri trikalsiyum alüminat (C₃A) ve tetrakalsiyum alüminaferrit (C₄AF) fazıdır. BAB çimentosu klinkerinin Portland çimentosu klinkerinden farkı, alit fazı yerine hidrolik aktivitesi yüksek aktif belit fazının ana bileşen olmasıdır.

BAB çimentosunun hidrolik sertleşmesini sağlayan öncelikle aktif belit fazının hidratasyonudur, ancak diğer çimento fazları da sertleşme sürecinde rol alabilirler.

BAB çimentosu ve çok düşük hidratasyon ısıli çimentoların özellikle düşük yüzey/hacim oranına sahip yapı elemanları gibi kütle betonlarında kullanılması daha uygundur. Kütle betonu yapılarında çimentonun hidratasyonu esnasında çimentonun tipine bağlı olarak ortaya belirli bir miktar hidratasyon ısısi çıkmaktadır. Bu ısı betonun ısıli iletiminin çok düşük olması nedeniyle yapı içinde yüksek sıcaklık artışları meydana getirmektedir. Sonuçta yapının iç ve dış kısımları arasında termal gradyanlar meydana gelmekte ve bu nedenle oluşan iç gerilimler betonun çekme gerilimi kapasitesinden yüksek olduğunda beton çatlamakta ve işlevselliğini yitirmektedir. Ancak, bu özellikleri nedeniyle erken dayanımın istenildiği donatılı ve ön yapımlı elemanların imalatında kullanılması çok uygun olmamaktadır. Bu alanda kullanılabilirliğinin olup olmadığının belirlenmesi amacıyla detaylı bir çalışma ortaya konmalıdır. BAB çimentosunun çok düşük hidratasyon ısısına sahip olma özelliği, sıcaklıkla oluşabilecek çatlakların daha kolay kontrol edilebilmesi, yüksek dayanıma sahip yüksek akışkanlı beton yapımı ve sıcaklık yükselmesinin kontrolü hususlarında avantaj yaratacaktır.

Hidratasyon ısısının düşüklüğü sıcak havalarda kimyasal reaksiyonlara yardımcı olarak priz, sertleşme ve dayanım kazanmanın normal sürelerde oluşmasına katkıda bulunur. Buna karşın soğuk havalarda bu çimento ile yapılan betonlama işlerinde beton içerisinde priz hızlandırıcı ve orta ve/veya yüksek oranda su azaltıcı tipinde kimyasal katkıların birlikte kullanılması gerekebileceği dikkate alınmalıdır.

Diğer bir önemli bulgu BAB çimentosunun normal Portland çimentosuna göre karışım suyunu bir miktar azaltmasıdır. Bunun nedeni bu çimento ile yapılan betonun slump kaybının çok az olması ve düşük kıvam değerinde hedeflenen dayanım değerlerinin daha düşük çimento dozajı ile elde edilmesi mümkün görülmektedir. Bu özelliği ile hazır beton sektöründe büyük bir avantaj sağlanabilmesi mümkündür.

Elde edilen bulgular BAB çimentosunun özellikle kütle betonu gibi düşük hidratasyon ısıli çimentoların kullanılmasının zorunlu olduğu yapılar için çok ideal bir malzeme olduğunu göstermektedir. Keza kütle betonu yapılar da kullanılacak olan çimentoların toplam

hidratasyon ısı değerlerinin 7 gün ve 28 günde sırasıyla 60 cal/g ve 70 cal/g değerlerini (kütle betonu yapıları için hidratasyon ısı kriterleri) aşmaması gerekmektedir. BAB çimentosunda bu değerler sırasıyla 7 günde 50 cal/g < 60 cal/g ve 28 günde 60 cal/g < 70 cal/g olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar normalde uçucu kül vb. bir puzolanik malzemenin Portland çimentosu ile birlikte kullanılması suretiyle ancak sağlanabilen kriterlerin bu çimento kullanılması durumunda (kısmen bir puzolanik malzeme ile ikame edilmeksizin) rahatlıkla sağlanacağını ortaya koymaktadır. Kütle betonu imalatlarında oldukça yüksek maliyet getiren ön-soğutma ve ard-soğutma işlemleri ile bunlara bağlı olan diğer bazı işlerde büyük ölçüde tasarruf sağlayacağı açıktır. Ayrıca bu tür bir çimento kullanımı ile inşaat yapım süresinin kısaltılması da sağlanabilecektir.

Kütle betonu yapıları için çimento incelik değerinin 3750 cm²/g civarında olması yeterli görülmektedir. Ancak, yüksek erken dayanım aranan yapılarda (konut ve sanat yapıları vb.) mevcut borlu çimento inceliğinin bir miktar daha artırılması suretiyle (4000±50 g/cm²) erken yaşlardaki dayanım değerlerinin normal Portland çimentosu kriterlerini rahatlıkla sağlama ve hatta geçmesi mümkündür. Ayrıca, çimento inceliği arttırılmaksızın beton teknolojisinde sıkça kullanılan beton kimyasal katkıları ile de yüksek erken dayanım değerleri rahatlıkla elde edilebilmektedir.

2.2 BAB Çimentosunun Genel Özellikleri

BAB Çimentosu ile yapılan betonların normal Portland çimentosu ile yapılanlara göre erken (3 ve 7 gün) dayanım değerleri daha düşük tespit edilmektedir. Ancak, beton teknolojisindeki alınabilecek önlemler ile bu sorunun çözüme kavuşturulması mümkündür. Belirli bir süre sonra (28 gün ile 90 gün arası), BAB Çimentosu dayanımı ile PÇ dayanımının aynı seviyeye ulaştığı, uzun vadede (90 gün ve ötesi) ise, BAB Çimentosunun öne geçtiği gözlenmiştir. Ayrıca, çimento inceliği arttırılmaksızın beton teknolojisinde sıkça kullanılan beton kimyasal katkıları ile de yüksek erken dayanım değerleri rahatlıkla elde edilebilecektir.

BAB Çimentosu ile yapılan betonların normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre boşluk oranı (kapiler boşluklar) çok daha düşük olduğundan daha sıkı bir yapıya sahip olan (kompasitesi yüksek) betonun dayanımı ve dayanıklılığı da bu oranda yüksek olacaktır. Boşluk oranı diğer normal çimentolara göre çok daha düşük olduğundan aynı nispette geçimsizliği de yüksek olmaktadır.

Geçirimsizliği yüksek olan betonların durabilitesi ve servis ömrü daha uzun olacaktır.

BAB Çimentosu TS EN 197-1'de yer alan çimento tanımına aynen uymaktadır. BAB Çimentosu klinkerinin ana bileşeni aktif belit fazı olan di-kalsiyum silikattır (α ve/veya α' -C₂S modifikasyonları). BAB Çimentosunun hidrolik sertleşmesini sağlayan öncelikle aktif belit fazının hidratasyonu olup, diğer çimento fazları da sertleşme sürecinde rol alabilirler.

BAB Çimentosunun hidratasyon ısı çok düşük olduğundan özellikle ince kemer tipindeki baraj kütle betonlarında kullanılması çok uygundur. Bu çimentonun kullanılması ile özellikle ön-soğutma ve bazen de ard-soğutma gibi yüksek maliyetli işlemlerin kaldırılması mümkündür. Kütle betonlarında kullanılacak olan çimentolarda toplam hidratasyon ısısının 7 gün ve 28 günde sırasıyla 60 cal/g ve 70 cal/g değerlerini (kütle betonları için hidratasyon ısı kriterleri) aşmaması gerekmektedir. BAB Çimentosunda bu değerler, sırasıyla 50 cal/g ve 60 cal/g olarak elde edilmiştir.

Hidratasyon ısısının düşüklüğü sıcak havalarda kimyasal reaksiyonlara yardımcı olarak priz, sertleşme ve dayanım artışının normal sürelerde oluşmasına katkıda bulunur. Buna karşın, soğuk havalarda BAB Çimentosu kullanılarak dökülen betonlarda, priz hızlandırıcı ve orta ve/veya yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkıların bir arada kullanılması gereği dikkate alınmalıdır.

Diğer bir önemli bulgu, BAB Çimentosu kullanılarak hazırlanan betonun karışım suyu ihtiyacının, PÇ kullanılarına göre daha az olmasıdır. Bunun nedeni, BAB Çimentosu ile yapılan betonun çökme (slamp) kaybının çok az olmasıdır. BAB Çimentosu kullanılarak imal edilen düşük kıvamlı beton için hedeflenen dayanım değeri, daha düşük çimento dozajı ile sağlanabilir. Bu özelliği ile BAB Çimentosunun hazır beton sektöründe avantaj sağlayacağı açıktır.

2.3 BAB Çimentosu ile Elde Edilebilecek Teknik ve Ekonomik Faydalar

1.Çimento fabrikaları, klinkeri döner fırında 1450°C yerine 1325°C'ta pişirmek suretiyle daha düşük enerji (en az % 10) sarf edecek ve CO₂ emisyonunda en az % 25'lere varan oranda azalma sağlanacaktır.

2.Kolemanit'in borik asit üretiminde yüksek tenörlü kısmının kullanılmasının ardından kalan düşük tenörlü kısmının da çimento

sektöründe kullanılmasıyla yeni bir pazar payı oluşması sağlanacaktır. Daha düşük tenörlü kolemanitin kireçtaşının yerine daha fazla kullanılması ile CO₂ emisyonunun daha da azaltılması mümkündür.

3. Çok düşük hidratasyon ısısına sahip olması, kütle betonları için ideal bir çimento olmasını sağlamaktadır. Bu çimentonun kullanılması ile kütle betonlarında çok gerekli olan ön-soğutma ve art-soğutma işlemlerinde büyük tasarruf sağlanacaktır. Ayrıca, kütle betonlarında çok sık rastlanılan termal çatlak oluşumlarının önüne geçilmesi ile betonda hasar oluşma ihtimali ortadan kaldırılmış olacaktır.
4. BAB Çimentosu ile imal edilen betonlar, PÇ ile imal edilen betonlara göre daha az çökme kaybına uğradığından, daha düşük çökme değerine sahip beton imal edilebilmesi sonucunda, betonda daha düşük su/çimento oranı kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Bu sayede, betonda çimento dozajı düşürülebilmektedir.
5. BAB Çimentosu kullanılan beton ile PÇ kullanılan betonların su geçirgenliklerinin karşılaştırılması sonucunda, 275 kg/m³ dozajlı BAB Çimentosu kullanılan beton suya ve kimyasallara karşı geçirimsizlik sağladığı, PÇ kullanılan betonda bu özelliğin sağlanması için 400 kg/m³ dozajının kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Bu özellikler, BAB Çimentolu betonun dayanıklılık ve zararlı etkiye sahip ortamlarda kullanılma bakımlarından önemli derecede üstünlüğe sahip olduğunu göstermektedir.
6. Yukarıdaki maddede (Madde 5) belirtilen sonuçların teyit edilmesi amacıyla aynı betonlar klorür iyonları penetrasyonuna karşı gösterdikleri direnç yönünden de değerlendirmeye alınmışlardır. BAB Çimentosu ile yapılan 250 ilâ 300 kg/m³ dozajlı betonların geçirgenlik sınıfı **orta dereceli** çıkarken, normal PÇ ile yapılan 350 ilâ 400 kg/m³ dozajlı betonun geçirgenlik sınıfı **yüksek dereceli** çıkmıştır. Bu durumda, BAB Çimentosu kullanımı ile çok yüksek oranda çimento tasarrufu sağlanabileceği tahmin edilmektedir ve dayanıklılık bakımından çok zararlı ortam şartlarına dirençli beton yapıların inşaaı mümkün olacaktır.
7. Özellikle su ve kimyasallara karşı geçirimsizliğin önemli olduğu her türlü beton yapıda (beton yollar, büyük sulama kanalları, önyüzü beton kaplı barajlar, kemer barajlar, baraj dolusavakları, köprü ve viyadükler) BAB

Çimentosunun kullanılması birçok avantajı da beraberinde getirecektir.

2.4 BAB Çimentosu ve Betonda Korozyonun Önlenmesi

Korozyon metallerin çevreleri ile girdikleri bir elektrokimyasal reaksiyon sonucu aşınmaya ve bozunmaya uğrayarak niteliklerini kaybetmesi olarak tanımlanabilir. Betonarme yapılarda özellikle donatılar korozyon etkisine maruz kalabilmektedir. Donatıda meydana gelen korozyon sonucu önemli kesit kayıplarının yanında donatı-beton aderansı da zamanla yok olmaktadır. Bunun sonucu bir bütün olarak çalışması gereken donatı ve beton birbirinden farklı davranmaya başlamaktadır. Taşıyıcı elemanlarda donatı korozyonu sonucu oluşan aderans düşüklükleri nedeni ile zamanla yapının taşıma gücünde önemli ölçüde azalma beklenebilir.

Korozyon İngilizce “Corrosion” sözcüğünden aynen Türkçeye geçirilmiş bir sözcük olup, “paslanma, aşınma, çürüme, bozukluk, çürüklük” olarak açıklanmaktadır. Diğer bir korozyon tanımı ise, “çevrenin elektrokimyasal etkisi ile oluşan malzeme tahribi ve malzeme kaybı” şeklindedir. Daha kapsamlı bir korozyon tanımı de “Korozyon bir malzemenin yüzeyinin dıştan kimyasal etkiler veya elektrokimyasal yolla değişime uğraması olayıdır”. Çelik malzemesinde, bu değişim sonucu oluşan ürüne pas denir.

Betonarme yapıların güvenliğini ve servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri de betona gömülü çelik donatıların korozyonu olmaktadır. Yapılardaki hasarın gerçek derecesinin tespiti ve gelişiminin değerlendirilmesi için donatılardaki korozyon seviyesinin bilinmesi gerekmektedir. Geçmişte uygulanan tahribatlı yöntemler çok fazla zaman ve işçilik kaybına neden olmaktadır. Bunun yanında, son yıllarda geliştirilmeye çalışılan yöntemler ise oldukça karmaşık, uygulaması güç ve yüksek maliyetli yöntemlerdir.

1970’li yıllarda betonarme eleman içindeki çelik donatıların, donatıları kaplayan ve kısaca “paspayı” olarak adlandırılan, yaklaşık 1,5 - 2 cm kalınlığındaki beton örtü tabakası tarafından paslanmaya karşı korunduğu varsayıldı. Betonarme üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda, durumun pek böyle olmadığı görüldü. Bazı koşullar sağlanmadığı zamanlarda veya bazı kötü koşulların bir araya geldiği durumlarda, beton içindeki donatı korozyona uğramakta, çeliğin kesitinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum ayrıca beton ile çeliğin aderansının zayıflamasına

sebepler olarak betonarme elemanın kendisinden beklenen taşıma görevini tehlikeye sokmaktadır.

Son 15 yıl içinde, "paspayı" olarak adlandırılan, donatı örtü tabakasının kalınlığının bazı ülkelerde (örneğin Almanya'da) 4-5 cm'ye kadar artırıldığı görülmüştür. Kuşkusuz ki bunun nedeni, betonarme eleman içindeki donatının korozyonunu önlemeye çalışmaktır. Paspayı tabakası donatı korozyonunu fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki şekilde engelleyebilmektedir. Fiziksel koruma beton geçirimsizliği ile ilgili olup, zararlı maddelerin donatı çeliğine ulaşmasının engellenmesi ile sağlanır. Genellikle 12-13,5 arasındaki beton pH'ı çelikte pasif tabaka oluşumuna neden olarak donatılara kimyasal bir koruma sağlar. Ancak zaman ile betonarme yapılarda şiddetli korozyon problemleri oluşabilir. Betonarme çeliğinin korozyon başlangıcının en önemli nedenleri klorür iyonlarının ve karbondioksitin çelik yüzeyine doğru girişidir. Klorür iyonları pasif filmin lokal olarak göçmesine ve lokal korozyon oluşumuna neden olur. Diğer yandan, karbondioksit hidrate çimento matrisi ile reaksiyona girer ve pH'ı düşürür. Düşük pH'ta aktif hale gelen çelik korozyona maruz kalır.

Günümüzde korozyon, yapı elemanlarının servis ömürlerini etkileyen en önemli etken olmaktadır. Korozyon, donatılarda ve betonda birbirini takip eden kimyasal reaksiyonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Betonarmede donatıyı paslanmaya karşı koruyan, betonun pH≈13 civarında bulunan yüksek alkali düzeyidir. Bu yüksek alkali seviyesi düşmeye başladığı zaman beton artık içindeki donatıyı korozyona karşı koruyamaz hale gelir ve donatılar paslanmaya başlar. Paslanan donatının hacmi genişler ve betonarmede donatılara paralel çatlaklara sebep olur. Beton bir kere çatladıktan sonra, tamamen atmosferik etkilere maruz kalır ve yapı elemanı büyük bir hızla ömrünü doldurur.

Değişik tipte korozyon mekanizmaları olup, betonarmede korozyonu dört ana başlıkta incelemek mümkündür:

- Atmosferik korozyon,
- Elektrolitik korozyon,
- Klorid korozyonu,
- Temas korozyonu.

Klorür korozyonu bunların arasında betonda en yaygın olarak bilinen korozyon tipidir. Betondaki karbonatlaşma olayı sonucunda, alkali özelliğini yitirmiş, geçirgen betonarme elemanların yüzeyinden kapiler boşluk ve çatlaklardan donatıya ulaşan klor iyonlarının yol açtığı iki

aşamalı ve sürekli bir korozyon tipidir. Betonarme yapılarda en tehlikeli korozyon tipi olarak nitelendirilir.

2.4 Korozyonun oluşum nedenleri

Betonarme yapılarda donatı korozyonu iki şekilde başlayabilmektedir.

- Betonarme elemanlardaki pas payı betonun yeterli geçirimsizliğe sahip olmaması nedeniyle karbonatlaşarak bazikliğini yitirmesi, böylece koruyucu tabakanın bozulması sonucu donatının korozyona açık hale gelmesi durumunda,
- Donatıda korozyon klor iyonlarının etkisi sonucu da meydana gelmektedir. Özellikle deniz kenarındaki yapılarda klor iyonları pas payını geçerek, donatıya ulaşabilmektedir.

Yukarıda verilen her iki durumda da korozyonun başlayabilmesi pas payı betonunun geçirimsizliğine bağlıdır. Bu şekilde korozyona açık hale gelen donatıda, bu olayın sürebilmesi için gerekli olan iki etken oksijen ve nem de yine pas payı betonunu aşarak donatıya ulaşmaktadır. Bu durumda korozyon açısından betonun geçirimsizliğinin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu konuda alınabilecek önlemler aşağıdaki gibidir;

- Standartlara uygun ve yeterli kalınlıkta pas payının bırakılması,
- Geçirimsiz yüksek kaliteli beton kullanımı (BAB Çimentosu ile Üretilen),
- Beton dökümünde vibratör kullanımı, bakım kurallarına uyulması
- Betonda, katkı türü korozyon inhibitörlerinin kullanılması,
- Kaliteli donatı çeliği kullanılması ve donatının korunması,
- Betonun kullanım amacına göre yüzeyini koruyucu kimyasallarla kaplamak,

Deprem bölgelerinde kullanılacak betonlarda, donatıda korozyon oluşmamasının yanında betonu dış etkilere karşı korumak ve uzun ömürlü kılmak için geçirimsizliğini sağlamak gerekmektedir. Bunun için özellikle beton sınıfı en az C30/37 düzeyine yükseltilmelidir. Betonun bu sınıfa göre tasarlanması için normal Portland çimentosu ile betonda en az 400 kg/m³ dozaj kullanmak gerekmektedir. BAB çimentosu ile bu beton sınıfının ortalama 350 kg/m³ dozajı ile sağlanabilmesi mümkün görülmektedir.

Genel olarak beton, içindeki donatı çeliklerini korozyona karşı mükemmel bir şekilde korur. Beton içindeki yüksek alkali ortamı, donatı çeliğine sıkıca yapışacak bir film oluşturur ve bu film çeliği pasifize ederek korozyona

uğramasını önler. Donatı çeliğinde korozyon; beton yeterli kalitede değilse, yapı çevre koşullarına göre tasarlanmamışsa (korozyona karşı yalıtım önlemleri alınmamışsa), ortam koşulları önceden tahmin edilmemişse veya betonun hizmet ömrü boyunca değişiklikler varsa oluşur. Korozyonun başlıca sebebi olarak klor iyonları gösterilmektedir.

Bununla beraber, normal olarak betonun pH değeri 12'den büyüktür (≈ 13) ve bu değer korozyondan korunmak için yeterlidir. BAB çimentolu betonun pH'sı da 13,0 olarak ölçülmüştür. Ancak, diğer çevresel faktörlerin etkisiyle (karbonatlaşma vb.) ortam pH değeri düşmekte ve donatı çeliğinde korozyon oluşmasına neden olabilmektedir. Betonun zamanla havadaki CO₂ ile reaksiyona girmesi sonucunda ortam pH değerinin 10 ile 4 arası olması durumunda, korozyon nedeniyle donatı kesit kaybı 0,25 mm/yıl olmaktadır. Örnek olarak, hesap dayanımı 365 MPa olan BÇ IIIb sınıfı Ø10' luk bir donatı çeliği alındığında bu çubuk 28,6 kN (2922 kg) yük taşıyabilmektedir. Bu donatı çubuğu 0,25 mm/yıl oranında korozyona uğradığında kesit azalması nedeniyle taşıyabileceği yük birinci yılda 2,8 kN (285 kg) azalmaktadır. Aynı oranla 10 yıl sonunda taşıyabileceği yük ilk duruma göre 21,5 kN (2190 kg) azalmakta, bu süre sonunda 7,1 kN (723 kg) taşıyabilir hale gelmektedir. 20 yıl sonunda ise çelik tamamen çürüyeceği için hiç yük taşıyamaz durumda olacaktır.

Betonarme yapılarda donatı çeliğinin korozyona karşı korunmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Korozyona karşı su yalıtımı dendiğinde akla ilk gelen sulu zeminlerdeki yapıların temelleri ve köprü viyadük gibi sanat yapılarının tabliyelerinin korunmasıdır. Köprü-viyadük tabliyelerinde suyun birikmemesi ve kışın yapılan tuzlama çalışmalarında klor iyonlarından etkilenmemesi için mutlaka su yalıtımı yapılmalıdır. Köprü ve viyadüklerde su yalıtımı, yüksek mukavemetli, 4 mm kalınlıkta, polimer bitümlü membranların tabliye üstüne yapıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Su yalıtım katmanının üstüne daha sonra asfalt aşınma tabakası serilerek imalat tamamlanır. Benzer şekilde, yapıların temelleri de suya karşı yalıtılmalıdır. Aksi takdirde, beton içine nüfuz edecek su, ortamın alkalinitesini düşürebilir ve bu su içinde bulunabilecek klor iyonları korozyona ve neticede yapının taşıyabileceği yük kapasitesini azaltarak yapı güvenliğini tehlikeye sokar.

Betonarme yapının sudan izole edilmesinin gerekli olduğu durumlarda mutlaka bir şekilde yapılmalıdır, ancak daha önce betonun mutlaka geçirimsizliğinin sağlanması çok daha

önemlidir. Betonun yeterince geçirimsiz tasarlanması ve üretilmesi ile diğer önlemlerin alınmasına gerek kalmayacaktır. BAB Çimentosu betonda istenilen geçirimsizliği normal Portland çimentosuna oranla çok daha yüksek oranda sağlayacaktır.

2.5 BAB Çimentosu ile Yapılan Betonun Durabilitesi

BAB çimentosu ile beton fazında da özellikle durabilite ve performans deneylerine yönelik bir kısım deneyler gerçekleştirilmiş ve kayda değer sonuçlar elde edilmiştir. Her iki tip çimento ile oldukça geniş bir çimento dozajı aralığında (250 kg/m³ ilâ 450 kg/m³) çalışma yapılmış ve basınç dayanımı gelişimi ile su geçirgenliği ve klorür penetrasyonuna karşı direncinin ölçülmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir.

BAB ve normal Portland çimentoları ile yapılan farklı dozajlardaki beton numuneler üzerinde TS EN 12390-8 standardına uygun olarak su geçirgenliği deneyleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 1'deki gibi bir ilişki elde edilmiştir. BAB çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerinin normal Portland çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerinden çok daha düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. BAB çimentosu ile yapılan betonların klorür penetrasyonlarının normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre daha iyi oldukları bariz şekilde tespit edilmiştir.

BAB çimentosu ile birlikte uçucu kül veya silis dumanı gibi puzolanik malzemelerin kullanılması sonucunda betonda çok daha düşük geçirimsizlik değerlerinin elde edileceğinin tahmin edilmesi zor değildir. BAB çimentosu ile birlikte normal Portland çimentosu ile kullanılan puzolanik malzeme oranlarından daha düşük oranlarda puzolanik malzeme kullanılması da diğer bir avantajı oluşturmaktadır.

BAB Çimentosunun betonarme yapılarda kullanılması ile hem suya ve hem de kimyasallara karşı ve özellikle de klorür iyonlarına karşı çok daha düşük geçirimsizliğe sahip betonlar üretmek mümkün görülmektedir. Bunun yanında donatı korozyonu da büyük ölçüde engellenecek ve beton yapının hizmet ömrü uzayacak ve zamanla dayanım ve dayanıklılığını da koruyacaktır. Bunun bu şekilde olması ise deprem etkileri içinde ilâve önlem sağlanmasında faydalı olacaktır. Betonarme yapılarda normal Portland çimentosu ile çok daha yüksek çimento dozajlarında (400 - 450 kg/m³) yüksek mukavemetli ve dayanıklı beton yapılabilirken BAB Çimentosu ile normal çimento dozajlarında

(300 - 350 kg/m³) istenilen mukavemette ve dayanıklılıkta beton üretmek mümkün hale gelebilecektir.

2.6 BAB Çimento ile Beton Yol ve Ekonomisi

Ülkemizde beton yollar ile ilgili çok fazla çalışma mevcut değildir. Deneme mahiyetinde bazı yörelerde bulunan şehirlerarası yollara beton yol uygulaması yapılmış ve gözetlenmesine devam edilmektedir. Beton yollarda mukavemet ve durabilite parametrelerinin her ikisinin de birlikte düşünülmesi gerekmektedir. Özellikle durabilite öncelikli parametredir. Ülkemizde farklı bölgelerde çok farklı iklim şartları hüküm sürmektedir. İklim şartlarının çeşitliliği farklı beton tasarımlarının yapılmasına yol açmaktadır. TS EN 206-1 standardı beton tasarımında izlenmesi gerekli rehber bir şartnamedir. Genellikle durabilite şartlarının yerine getirilebilmesi amacıyla beton yapılarda su/çimento oranının minimum bir değerde olması istenmektedir. Bu amaçla çimento dozajı artırılarak istenilen kriterler sağlanabilmektedir. Birçok durumda betonda su/çimento oranı en fazla 0,45 olduğunda birçok çevre ve ortam şartına karşı geçirimsizlik sağlanmış olmaktadır. Ancak, buna rağmen normal Portland çimentosu ile belirli bir düzeyde geçirimsizlik sağlanabilmektedir. Bunun ispatı klorür iyonlarına karşı her iki tip çimento ile yapılan betonların ortaya koymuş olduğu performans değerleri ile gösterilmiştir. Betonda klorür iyonlarının penetrasyonuna karşı gösterilen direnç çok önemlidir. Özellikle beton yol, köprüler ve viyadüklerde ve binalarda betonun geçirimsiz olması çok daha önemlidir.

Asfalt yol ile beton yol karşılaştırması;

Beton yollar, asfalt yollara göre mevsimsel hasara çok fazla uğramaz; Betonun dayanıklılığının en çok önem kazandığı mevsim kış aylarıdır. Asfalt yolların % 60 civarı ağır kış koşullarında bozulmaktadır. Aynı koşullarda betonun bozulma oranı beton eğer düzgün tasarlanmış ve uygulanmış ise en fazla % 5 ilâ 6 mertebelerinde olmaktadır.

Beton yollar daha uzun ömürlüdür; Beton kaplamanın en önemli üstünlüğü uzun hizmet ömrü ve üstün dayanıklılığıdır. Örneğin ABD'de eyalet karayolu performansları yıllar içerisinde izlenerek kaydedilen bir araştırmada, beton yolların servis ömürleri en az 20-25 yıl civarında olurken kaliteli asfalt yollarda 6-14 yıl olduğu bulunmuştur.

Beton yolun ilk yapım maliyeti asfalttan düşüktür; Yapılan araştırma sonuçlarına göre ülkemizde beton yol yapım maliyetinin sanılanın aksine asfalta göre daha ucuz olduğu da ortaya çıkmıştır. 2004 yılı verilerine göre, ilk yapım maliyetleri karşılaştırıldığında kaliteli bir asfalt yolun araç yoğunluğuna göre kilometre maliyeti 436.000 - 622.000 YTL arasında değişmektedir. Yolun beton yol olarak inşa edilmesi halinde ise kilometre maliyetleri 369.000-570.000 YTL arasında değişmektedir. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın kriterlerine göre yapılan bu maliyet hesapları beton yolun asfalt yola göre % 20 - 30 arasında daha ucuz olacağını göstermektedir.

Beton yolların taşıma gücü yüksektir; Beton yol, üzerine gelen yükleri asfalta göre çok daha geniş bir alana yaydığından çökme olmaz. Zemin kötü olsa dahi asfalta göre daha az hasara uğramaktadır ve araç trafiğini hasarsız taşıyabilmektedir.

Beton yollar her mevsimde ve her koşulda yapılabilir; Asfalt uygulaması düşük sıcaklıkta ve yağışlı havalarda yapılamadığından, yapım ve onarım mevsimi kısadır. Beton yol ise asfaltın aksine ıslak zemin de dahil olmak üzere, hemen her iklim koşulunda yapılabilir. Asfalt kaplamaların belirli bir sıcaklıkta dökülmesi ve silindire sıkıştırılması gerekmektedir. Beton kaplamalar ise vibratörlerle sıkıştırılmakta olup, ısı kaybı gibi bir sorun söz konusu değildir.

% 100 yerli malzeme ile yapılır; Beton yollar, Türkiye'nin kendi kaynaklarından yapılır. Bugün Türkiye'nin dört bir yanına dağılmış 48 çimento fabrikası ve 845 adet beton tesisi bulunmasına rağmen, asfalt (bitüm) temin edilen yalnızca 5 adet rafineri bulunmaktadır. Kullanılan asfaltın önemli bir kısmı olan asfaltın üretildiği petrol ithal edilmektedir.

- Beton yolda kullanılan malzemeler petrol türevi olmadığından çevre kirliliğine yol açmaz,
- Yüzey sürtünme katsayısı asfalta göre daha fazla olduğundan beton yollarda fren mesafesi kısadır,
- Esnek olan asfalta ağır taşıtların araç lastikleri gömüldüğünden (dönmeye karşı asfaltta direnç fazladır) daha fazla yakıt tüketilir,
- Beton yollar açık renkte olduğundan gece görüşünü kolaylaştırır.
- Beton yolun ömrü, asfalt yolun en az 2 katı.
- Türkiye çimento üretimi ve teknolojisi açısından zengin bir ülkedir. Hammadde avantajı var.

Sonuç olarak; Karayolları Genel Müdürlüğü ve Belediyeler gibi yol yapımından sorumlu kurumlar avantajlarını göz önünde bulundurarak beton yolları ciddi şekilde araştırmalı, öğrenmeli ve değerlendirmelidir. Ülkemiz havaalanlarında beton yol yapım tecrübesine sahip çok sayıda müteahhitlik firması bulunmaktadır. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği 2004 yılında Afyon'da 3,0 km uzunluğunda bir beton yol yapmıştır. Asfalt ve beton yolu karşılaştırmak amacıyla bu beton yolun paralelinde bir de asfalt yol yapılmıştır. Ancak, asfalt yol çok geçmeden bozulmaya başlamıştır. Ülkemiz uzun yıllardır beton yol yapımına başlayacak altyapıya sahiptir.

Beton yol yapımında BAB Çimentosu kullanılması durumunda sadece durabilite yönünden düşünüldüğünde normal Portland çimentosuna göre yaklaşık 50-100 kg/m³ çimento tasarrufu yapılması mümkün görülmektedir. Bu sonuç her iki tip çimento ile yapılan betonların klorür iyonlarına karşı gösterdikleri performans değerleri ile elde edilmektedir.

Dünyada yoğun olarak kullanılan beton yollar için ülkemizde ilk adım Afyon'da atıldı. Beton yolun uzunluğu 3,0 kilometre olarak planlandı ve tamamlandı. Türkiye'de bundan sonraki projelere emsal teşkil edecek beton yolun maliyeti, bakım masrafı, dayanıklılığı gibi unsurlar da incelenmektedir. Yolun yapım aşaması ve tamamlandıktan sonraki süreç, "Beton yol mu, asfalt mı" tartışmalarına da son noktayı koyacak.

BAB Çimentosu ile yapılacak 1 km uzunluğunda 12 m genişliğinde ve 25 cm kalınlığında beton yolda 1 m³ betonda en az 50 en fazla 100 kg/m³ çimento dozajı tasarrufu sağlandığında elde edilebilecek en az fayda aşağıdaki gibidir;

1 km beton yol hacmi: $1000 \times 12 \times 0,25 = 3000 \text{ m}^3$

Çimento tasarrufu: $3000 \times 50 = 150.000 \text{ kg} = 120 \text{ ton}$ olmaktadır.

Çimento Maliyeti: 130 YTL/ton olduğunda 1 km beton yolda sağlanacak tasarruf;

Ekonomik Fayda: $150 \times 130 \cong 20.000,00 \text{ YTL}$ olacaktır.

Bu faydanın geleceğin çimentosu olarak adlandırılan BAB Çimentosu ile sağlanabilmesi mümkün görülmektedir. Beton teknolojisinde günümüzde hala betonun dayanımı ön planda tutulmaktadır ve dayanıklılık genellikle ikinci öneme sahip olarak düşünülmektedir. Dünyada beton teknolojisinde dayanıklılık yanında

sürdürülebilirlik konusu da artık birinci derece öneme haiz olmaktadır. Bu çimento bu faktörlerin hepsini bir arada sağlayabilen bir çimento olarak karşımıza çıkmaktadır. BAB Çimentosunun özellikle ihracatı düşünülmeli ve yurt dışında da tanıtımı yapılarak ülkemize döviz getirmesi temin edilmelidir.

3 BAB ÇİMENTOSU İLE YAPILAN DENEY SONUÇLARI

3.1 Kullanılan Malzemeler

Kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılan çimento deneylerinde çimento olarak BOREN ve TÇMB'nin katkılarıyla Denizli Çimento Fabrikası'nda ve Isparta Göltaş Çimento Fabrikası'nda üretilen Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu kullanılmıştır. Beton deneylerinde ise çimento olarak ile Göltaş Çimento Fabrikası'nda üretilen Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu kullanılmıştır. Deneylerde kıyas yapmak amacıyla Göltaş Çimento Fabrikasına ait Portland çimentosu olan TS EN 197-1'e uygun CEM I 42,5R kullanılmıştır. Her iki fabrikaya ait Borlu Aktif Belit BAB çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik deney sonuçları aşağıda, Göltaş Çimento Fabrikası'nda üretilen Borlu Aktif Belit BAB çimentosu kullanılarak yapılan beton deney sonuçları ise bildirimizin ilerleyen sayfalarında verilmiştir. Beton deneylerinde kullanılmak üzere 3 sınıf kırmataş agrega ASTM C33 şartname kriterlerine uygun olarak belirlenmiş ve tüm beton dökümlerinde kullanılmıştır. Ayrıca beton deneylerinde TS EN 450-1 standardına uygun uçucu kül ve TS EN 934-2'ye uygun kimyasal katkı ilaveleri de yapılarak dökümler gerçekleştirilmiştir.

3.2 Kimyasal Analiz Deney Sonuçları

Gerek Denizli Çimento Fabrikası'nda üretilen ve gerekse de Isparta Göltaş Çimento Fabrikası'nda üretilen Borlu Aktif Belit BAB çimentosunun kimyasal analiz deney sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

3.3 Fiziksel ve Mekanik Analiz Çalışmaları ve Deney sonuçları

Fiziksel ve mekanik analiz deney çalışmaları, Denizli Çimento Fabrikası'nda üretilen Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosunda tek bir incelikte (blaine: 4309 cm²/g) yapılırken, Isparta Göltaş Çimento Fabrikası'nda üretilen Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosunda bu çalışmalar 3562 cm²/g, 3778 cm²/g, 4056 cm²/g ve 4273 cm²/g incelik (Blaine) değerlerinde yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda elde edilecek sonuçların portland çimentosu ile karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm çalışmalar aynı zamanda TS EN 197-1

standardına uygun Isparta Göлтаş Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42,5 R portland çimentosu ile de yapılmıştır.

3.4 Fiziksel Analiz Çalışmaları ve Deney Sonuçları

Denizli Çimento Fabrikası ürünü Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu, blaine değerleri 3562 cm²/g, 3778 cm²/g, 4056 cm²/g ve 4273 cm²/g olan 4 farklı incelikteki Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu ve TS EN 197-1 standardına uygun Göлтаş CEM I 42,5 R portland çimentosu ile yoğunluk, özgül yüzey, 45 µm elek kalıntısı, standart kıvam suyu, priz başlama süresi, priz sona erme süresi ve hacim genişmesi deneyleri yapılmış olup, deney sonuçları Çizelge 2 ve Çizelge 3'de verilmiştir.

3.5 Mekanik Analiz Çalışmaları ve Deney Sonuçları

Blaine değeri 4309 cm²/g olan Denizli Çimento Fabrikası ürünü Borlu Aktif Belit (BAB)

çimentosu ile Blaine değerleri 3562 cm²/g, 3778 cm²/g, 4056 cm²/g ve 4273 cm²/g olan 4 farklı incelikteki Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu ve TS EN 197-1 standardına uygun Göлтаş CEM I 42,5 R portland çimentosu ile 2, 4, 7, 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılmış olup, basınç dayanım gelişimleri Çizelge 4'de verilmiştir. Ayrıca bu çalışmalarla ilgili olarak aşağıdaki Çizelge 4'de verilen basınç dayanımları değerleri ile oluşturulan basınç dayanımı gelişimi karşılaştırma grafikleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Beton ile ilgili olarak yapılan deneylerde aşağıda bazı özellikleri verilen ve betonda kullanmaya uygun agregalar kullanılmıştır. 3 sınıf olarak (2 sınıf iri ve 1 sınıf ince agreg) kullanılan kırmataş agregalara ait bazı fiziksel analiz sonuçları aşağıda Çizelge 5'te verilmiştir

Çizelge 1 - Borlu aktif belit (BAB) çimentosunun kimyasal analiz deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Deney Metodu	Denizli BAB Çimentosu (DBÇ)	Göлтаş BAB Çimentosu (GBÇ)
Silisyum Dioksit (SiO ₂) (%)	TS EN 196-2	20,80	19,1
Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃) (%)	TS EN 196-2	4,10	4,68
Demir Oksit (Fe ₂ O ₃) (%)	TS EN 196-2	4,20	3,42
Kalsiyum Oksit (CaO) (%)	TS EN 196-2	59,0	57,1
Magnezyum Oksit (MgO) (%)	TS EN 196-2	1,50	1,32
Klorür (Cl ⁻) (%)	TS EN 196-21	0,026	0,001
Kükürt Trioksit (SO ₃) (%)	TS EN 196-2	2,25	2,68
Kızdırma Kaybı (%)	TS EN 196-2	1,40	3,82
Çözünmeyen Kalıntı (%)	TS EN 196-2	0,20	0,70
Alkalinite Sodyum Oksit ve Potasyum Oksit Toplamı (%) (Na ₂ O+0,658.K ₂ O) (Na ₂ O=0,34 K ₂ O=0,78)	TS EN 196-21	0,53	0,86
B ₂ O ₃ (%)	-	3,46	3,00
Klinker Miktarı (%)	TS EN 196-2	92,57	86,1
R (Alçıtışı) (%)	-	4,07	4,85

Çizelge 2 - Denizli Çimento Fabrikası ürünü borlu aktif belit çimentosu (DBÇ) ve TS EN 197-1 standardına uygun Göltaş CEM I 42,5 R çimentosu üzerinde gerçekleştirilen fiziksel analiz deney sonuçları

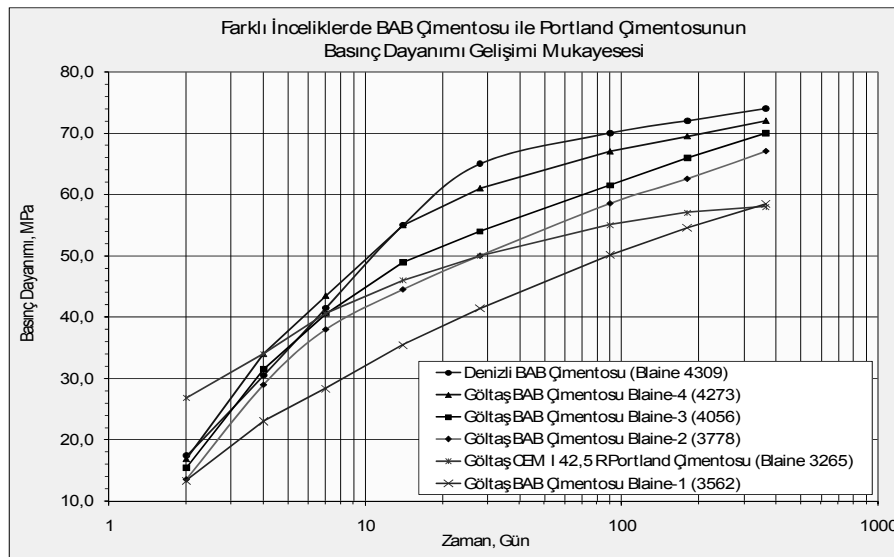
Deney Adı ve Deney Standardı	42,5 R Dayanım Sınıfı Çimentolar İçin TS EN 197-1 Standardında Verilen Değerler	Denizli BAB Çimentosu	Göltaş CEM I 42,5R Çimentosu
Yoğunluk (g/cm ³) (TS EN 196-6)	-	3,17	3,11
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g) (TS EN 196-6)	-	4309	3265
Standard Kıvam Suyu (%) (TS EN 196-3)	-	28,0	26,4
Priz Başlama Süresi (dakika) (TS EN 196-3)	≥ 60	150	155
Priz Sona Erme Süresi (dakika) (TS EN 196-3)	-	205	190
Hacim Genleşmesi (mm) (TS EN 196-3)	≤ 10	1,5	0,5
45 µm Elek Kalıntısı (%) (TS EN 196-6)	-	3,60	21,22

Çizelge 3 - Göltaş Çimento Fabrikası ürünü farklı inceliklerdeki borlu aktif belit (BAB) çimentosu üzerinde gerçekleştirilen fiziksel analiz deney sonuçları

Deney Adı ve Deney Standardı	42,5 R Dayanım Sınıfı Çimentolar İçin TS EN 197-1 Standardında Verilen Değerler	Göltaş Blaine-1 3562	Göltaş Blaine-2 3778	Göltaş Blaine-3 4056	Göltaş Blaine-4 4273
Yoğunluk (g/cm ³) (TS EN 196-6)	-	3,09	3,09	3,15	3,14
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g) (TS EN 196-6)	-	3562	3778	4056	4273
Standard Kıvam Suyu (%) (TS EN 196-3)	-	22,0	23,0	24,2	25,2
Priz Başlama Süresi (dakika) (TS EN 196-3)	≥ 60	145	130	100	90
Priz Sona Erme Süresi (dakika) (TS EN 196-3)	-	180	180	145	125
Hacim Genleşmesi (mm) (TS EN 196-3)	≤ 10	1,0	1,0	1,0	1,0
45 µm Elek Kalıntısı (%) (TS EN 196-6)	-	27,98	21,60	18,20	15,43

Çizelge 4 - Denizli ve Göltaş Çimento Fabrikalarına ait farklı inceliklerdeki BAB çimentosu ve TS EN 197-1'e uygun Göltaş CEM I 42,5 R çimentosu ile elde edilen basınç dayanımı gelişimleri

Deney Yaşı (Gün)	Göltaş BAB Blaine-1 3562 cm ² /g (MPa)	Göltaş BAB Blaine-2 3778 cm ² /g (MPa)	Göltaş BAB Blaine-3 4056 cm ² /g (MPa)	Göltaş BAB Blaine-4 4273 cm ² /g (MPa)	Denizli BAB 4309 cm ² /g (DBÇ) (MPa)	Göltaş CEM I 42,5R 3265 cm ² /g (MPa)
2	13,4	13,6	15,5	16,9	17,4	26,8
4	23,1	29,0	31,6	34,0	30,5	34,0
7	28,4	38,0	40,6	43,5	41,5	40,6
14	35,5	44,5	49,0	55,0	55,0	46,0
28	41,5	50,0	54,0	61,0	65,0	50,0
90	50,2	58,5	61,5	67,0	70,0	55,0
180	54,6	62,5	66,0	69,5	72,0	57,0
365	58,5	67,0	70,0	72,0	74,0	58,0



Şekil 1 - Denizli ve Göltaş Çimento Fabrikalarına ait farklı inceliklerdeki BAB çimentosu ve TS EN 197-1'e uygun Göltaş CEM I 42,5 R çimentosunun basınç dayanımı gelişimi karşılaştırma grafikleri

Çizelge 5 - Agregalara ait fiziksel deney sonuçları.

Agrega Tane Sınıfları	Özgül Ağırlık	Su Emme Oranı (%)	Beton İçin Bulunan En Uygun Agreganın Karışım Oranları Kütlece (%)	Kum/Tüvenan Kum İncelik Modülü F.M.
İri Çakıl (15-30 mm)	2,71	0,2	25,0	Beton İçinde 0-4 mm İnce Agreganın F.M.= 2,63
İnce Çakıl (7-15 mm)	2,70	0,3	25,0	
İnce Agreganın (0-7 mm)	2,70	1,2	50,0	2,57

3.6 Hidratasyon Isısı ve Elde Edilen Sonuçlar

Portland çimentosunun su ile olan hidratasyon reaksiyonlarının hepsi ekzotermik reaksiyonlardır. Daha açık olarak bu reaksiyonların sonucunda ısı açığa çıkar. Bundan dolayı, betonun sertleşmesi esnasında çok fazla ısı açığa çıkarıyorsa sürekli olarak içeriden ısınmaya devam edecek ve betonun iç sıcaklığı artacaktır. Bir beton yapı içerisinde sıcaklık yükselmesi en başta çimento ile ilgili bir konudur ve aynı zamanda üretilen ısının hızı ile beton yapının çevreye doğru ısı kaybetme hızına bağlıdır. Bu nedenle, betonda ısı yayılım hızı çok önemli bir parametre olmaktadır. Çimento içerisindeki her bir bileşenin toplam ısı yayılım oranına katkısı,

toplam hidratasyon ısısının, hidratasyon hızının ve her bir bileşenin çimento içerisindeki miktarına bağlıdır. En küçük kareler regresyon analiz metodu kullanılarak herhangi bir yaştaki betonun içerisindeki çimentonun cinsine bağlı olarak toplam hidratasyon ısısı miktarı hesaplanabilmektedir;

$$H_t = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF)$$

Burada, H_t toplam hidratasyon ısısını kJ/kg olarak, C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF ise Bogue hesabında elde edilen ağırlık oranlarını % olarak ve a, b, c ve d ise betonun yaşına göre değişmektedir. Bu değerler aşağıdaki Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6 - Yukarıda verilen kümülatif ısı yayılımı bağıntısında tanımlanan a, b, c, d katsayılarının yaşa göre değişim değerleri. (w/c=0,4 ve 21 °C)

Bileşik	Katsayı	Verilen Yaş için Katsayının Değeri, (kJ/kg)							Tamamlanmış ^a Hidratasyon Sonunda (kJ/kg)
		3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün	1 Yıl	6.5 Yıl	13 Yıl	
C_3S	a	243	222	126	435	490	490	510	-520±13
β - C_2S	b	50	42	105	176	226	222	247	-260
C_3A	c	887	1556	1377	1301	1167	1372	1356	-1140 ^b ; -1670 ^c
C_4AF	d	289	494	494	410	377	464	427	-420 ^d

^a Bileşiklerin saf halde reaksiyonları sonucunda açığa çıkan ısı.

^b C_3A ile Jips'in reaksiyonu sonucunda $C_4A\bar{S}H_{12}$ verirken açığa çıkan ısı.

^c C_3A ile Jips'in reaksiyonu sonucunda Etringit verirken açığa çıkan ısı.

^d Ortamda bulunan fazla CH ile C_4AF 'nin reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı.

En küçük kareler yöntemi ile bulunan katsayılarla bileşiklerin saf halde verdikleri reaksiyon sonucunda açığa çıkardıkları ısılar arasında ileri yaştaki çimento pastaları için bir bütünlük mevcuttur, ancak aynı şeyi erken yaştaki pastalar için söylemek doğru olmamaktadır. Prensipde hidratasyon ısılarının hesaplanması hiç reaksiyona uğramamış çimentonun veya pastanın faz kompozisyonlarının analitik olarak bulunmasından sonra standard hidratasyon entalpi değerleri kullanılmakla mümkün olabilmektedir.

BAB çimentosunun en önemli özelliklerinden bir tanesi hiç kuşkusuz çok düşük hidratasyon ısısına sahip olmasıdır. Hidratasyon ısısı ile ilgili olarak yapılan izotermal kondüksiyon kalorimetre çalışmaları normal CEM I 42,5R Portland çimentosu ve belirli oranda uçucu kül ilavesi ile karşılaştırmalı olarak aşağıda Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'te

BAB çimentosunun hidratasyon hızı ve ısısı Portland çimentosu ve içerisine % 35 uçucu kül ilavesi ile elde edilmiş bağlayıcının hidratasyon hızı ve ısısı ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. % 65 Portland çimentosu ve % 35 uçucu küllü bağlayıcı (çimento+uçucu kül) normal şartlarda kütle betonlarında kullanılmakta ve buna rağmen hidratasyon ısısı problem yaratabilmektedir. Hidratasyon ısısı özellikle erken yaşlarda kütle betonlarında problem yaratmakta ve ilk 3 ilâ 4 günlük açığa çıkan ısı nedeniyle betonda adyabatik sıcaklık artışı meydana gelmektedir. BAB çimentosu tek başına uçucu küllü çimentodan dahi daha az ısıya sahiptir. Şartname kriterlerini rahatlıkla tek başına başka hiçbir puzolanik malzeme olmadan sağlayabilmektedir.

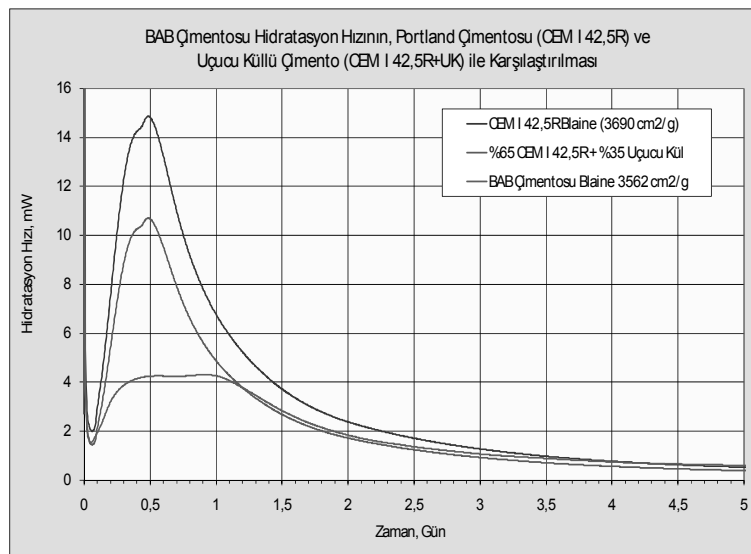
3.7 Beton Deneyleri

BAB çimentosu ile yürütülen çimento fiziksel ve kimyasal deneylerinden elde edilen bulgular ışığında beton deneyleri başlatılmıştır. Beton

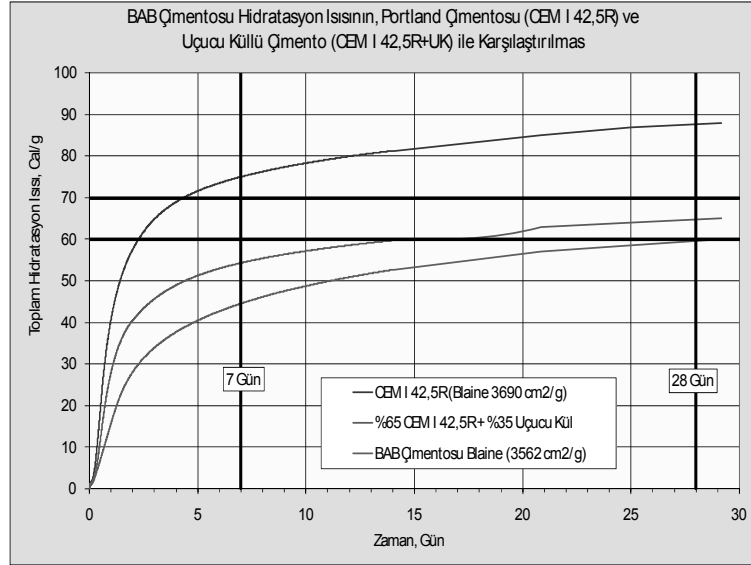
deneylerinde de çimento deneylerinde olduğu gibi BAB çimentosu ile normal CEM I 42,5R Portland çimentosunun kıyaslanması hedeflenerek çalışmalar başlatılmıştır. Göltaş Çimento Fabrikası ürünü Borlu Aktif Belit ve aynı fabrikaya ait CEM I 42,5R Portland çimentosu ile benzer çalışmalar yapılarak karşılaştırma yapılmasına olanak sağlanmıştır. Mineral katkıların BAB çimentosu ile kullanıldığında özelliklerinin nasıl değiştiğini anlamak amacıyla TS EN 450-1 standardına uygun bir uçucu kül de deneylerde kullanılmış ve portland çimentosu ve uçucu kül karışımları ile karşılaştırma yapılmasına olanak sağlanmıştır. Yapılan beton deneyleri daha çok mekaniksel ve durabilite özellikleri yönünden betonun bir kısım özelliklerini inceleme ve tayin amacıyla yapılmıştır. Her iki tip çimento ile yapılan betonlarda aynı dozajlarda ve aynı slump (işlenebilirlik) değerlerinde çalışmalar yürütülmüştür. Öncelikle pompa ile iletilen beton tasarımına uygun olarak düşünülen beton slamları başlangıçta 10-15 cm slump aralığı sağlanacak şekilde ayarlanmış ve numuneler bu şekilde alınmıştır. BAB çimentosu ile yapılan betonların 15 cm slamlı üretildiklerinde su ihtiyaçlarının daha az olması nedeniyle ve slump kaybına uğramadıklarından numunelerin fazla suyu terleme yoluyla numune kalıp yüzeyine çıkardığı tespit edilmiştir. BAB çimentosunun içeriğinde C_3S yerine C_2S olması ve bu nedenle hidratasyonun normal çimentoya göre yavaş ve kararlı ilerlemesi bunun muhtemel sebebi olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, BAB çimentosu ile yapılan betonların slump değeri 10 cm slump verecek şekilde ayarlanması amacıyla bir miktar daha

karışım suyunun azaltılması yoluna gidilmiş ve w/c oranının azaltılması sağlanmıştır. Bu şekilde yapılan dökümlerde yaklaşık % 5 civarında su azaltılması sağlanmış ve beton karışım suyu 200 kg/m^3 iken 190 kg/m^3 değerine indirilmiştir. Normal CEM I 42,5 çimentosu ile yapılan betonun ilk yarım saat içinde kimyasal katkı olmadan da önemli derecede slump kaybına uğradığı görülmüş, ancak BAB çimentolu betonda slump kaybı ilk yarım saat içerisinde önemsenmeyecek seviyede kalmıştır. Laboratuvarımızda yapılan beton dökümlerine ait detaylı bilgiler aşağıda Çizelge 7'de verilmiştir.

Her iki çimento ile çimento ve beton fazında gerçekleştirilen deney sonuçları bu bölümde verilmiştir. Çimentonun hidratasyon ısı diğer farklı tipteki ve uçucu küllü çimentolarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Özellikle kütle betonlarında kullanılması gereken çimentoların 7 günde en fazla 60 cal/g ve 28 günde de en fazla 70 cal/g civarında toplam hidratasyon ısısına sahip olmaları talep edilmektedir. Ayrıca, çimentonun erken yaşlarda hidratasyon hızının düşük olması da adyabatik sıcaklık artışını engellediğinden BAB çimentosu bu açıdan da aşağıda görüleceği üzere diğer farklı bağlayıcılara göre daha avantajlıdır. BAB çimentosunun hidratasyon ısı son derece düşük olmasına karşın basınç dayanımı gelişimi ve artış oranı ise iyi düzeydedir. Her ne kadar erken dayanım yönünden normal Portland çimentosuna göre bir miktar geride kaldığı görülmüşse de ileri dönemlerde normal Portland çimentosunu geride bıraktığı da tespit edilmiştir.



Şekil 2 - BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen hidratasyon hızı ve toplam hidratasyon ısısı ile Portland çimentosu ve % 35 uçucu küllü Portland çimentosunun karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon hızları ve toplam hidratasyon ısısı



Şekil 3 - BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen hidratasyon hızı ve toplam hidratasyon ısısı ile Portland çimentosu ve % 35 uçucu küllü Portland çimentosunun karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon hızları ve toplam hidratasyon ısıları

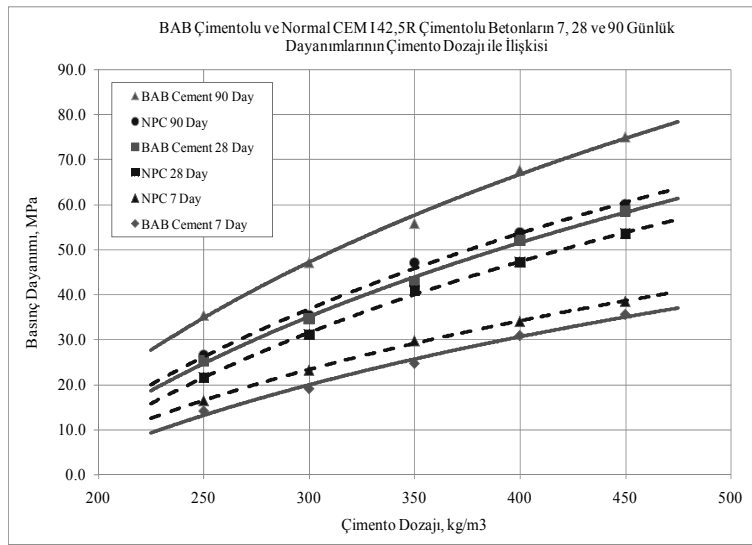
Çizelge 7 - Laboratuvar da betonla ilgili olarak yapılmış olan dökümlere ait tasarımlar ile çimento, karışım suyu miktarı ve su/çimento oranları. Dökümlerde kimyasal katkı kullanılmamıştır

Beton Kodu	BAB ve Normal CEM I 42,5 Çimentosu Dozajı, kg/m ³	Karışım Suyu Miktarı kg/m ³	Su/Çimento Oranı
BAB Çimentosu ile Yapılan Betonlar (Slamp 10 cm)			
BAB-1	250	190	0,76
BAB-2	275	190	0,69
BAB-3	300	190	0,63
BAB-4	325	190	0,58
BAB-5	350	190	0,54
BAB-6	375	190	0,51
BAB-7	400	190	0,48
BAB-8	450	190	0,42
Normal Portland Çimentosu ile Yapılan Betonlar (Slamp 15 cm)			
NPC-1	250	200	0,80
NPC-2	300	200	0,67
NPC-3	350	200	0,57
NPC-4	400	200	0,50
NPC-5	450	200	0,44
BAB Çimentosu ve Uçucu Kül ile Yapılan Betonlar (Slamp 10-15 cm)			
BAB-UK-1	250	170	0,68
BAB-UK-2	300	170	0,57
BAB-UK-3	350	170	0,49
BAB-UK-4	400	170	0,43
BAB-UK-5	450	170	0,38
Normal Portland Çimentosu ve Uçucu Kül ile Yapılan Betonlar (Slamp 10-15 cm)			
PC-UK-1	250	190	0,76
PC-UK-2	300	190	0,63
PC-UK-3	350	190	0,54
PC-UK-4	400	190	0,48
PC-UK-5	450	190	0,42

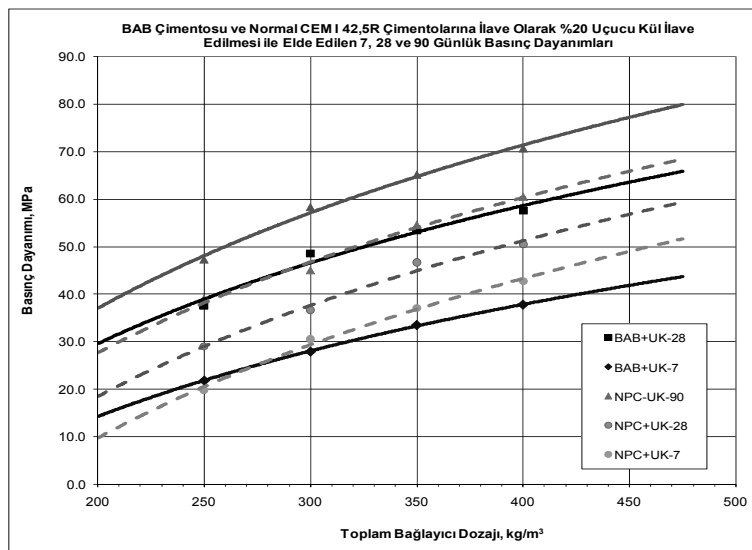
Not: Beton kodu olarak verilenlerden BAB: BAB çimentosu ve NPC: Normal CEM I 42,5 Portland çimentosu ile dökülen betonları tanımlamaktadır. Uçucu kül, karışımlarda toplam bağlayıcıya oranla % 20 oranında kullanılmıştır.

BAB çimentosu ile beton fazında da özellikle durabilite ve performans deneylerine yönelik bir kısım deneyler gerçekleştirilmiş ve kayda değer sonuçlar elde edilmiştir. Her iki tip çimento ile oldukça geniş bir çimento dozajı aralığında (250 kg/m^3 ilâ 450 kg/m^3) çalışma yapılmış ve basınç dayanımı gelişimi ile su geçirgenliği ve klorür penetrasyonuna karşı direncinin ölçülmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Aşağıda Şekil 4 ve Şekil 5'te BAB çimentosu ve normal Portland CEM I 42,5R çimentosu ile uçucu küllü olarak yapılan farklı dozajlı ve 10-15 cm slamlı betonların 7, 28 ve 90 günlük dayanımları karşılaştırmalı olarak ve çimento dozajı ile değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te BAB çimentosu ile ve normal

Portland CEM I 42,5R ile uçucu küllü olarak yapılan 10-15 cm slamlı betonların dayanım gelişimini veren grafikler gösterilmektedir. BAB + Uçucu küllü 10-15 cm slamlı betonların 7, 28 ve 90 günlük dayanımları oldukça iyi düzeyde çıkmıştır. Sadece BAB çimentosu ile 7 günlükler düşük ancak 28 günlük dayanımlar arasında fark kapanmış ve aynı düzeyde çıkmıştır. Ayrıca, BAB çimentosu ile yapılan 10-15 cm slamlı betonların basınç dayanımları, normal Portland CEM I 42,5R çimentosu ile yapılan 10-15 cm slamlı betonların basınç dayanımına göre hem 7 gün ve hem de 28 günde daha yüksek çıktığı da tespit edilmiştir. 90 günde ise BAB çimentosu ile yapılan betonların dayanımları daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4 - BAB çimentosu ve normal Portland CEM I 42,5R ve uçucu kül ilavesi ile 10-15 cm slamlı olarak yapılan betonların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

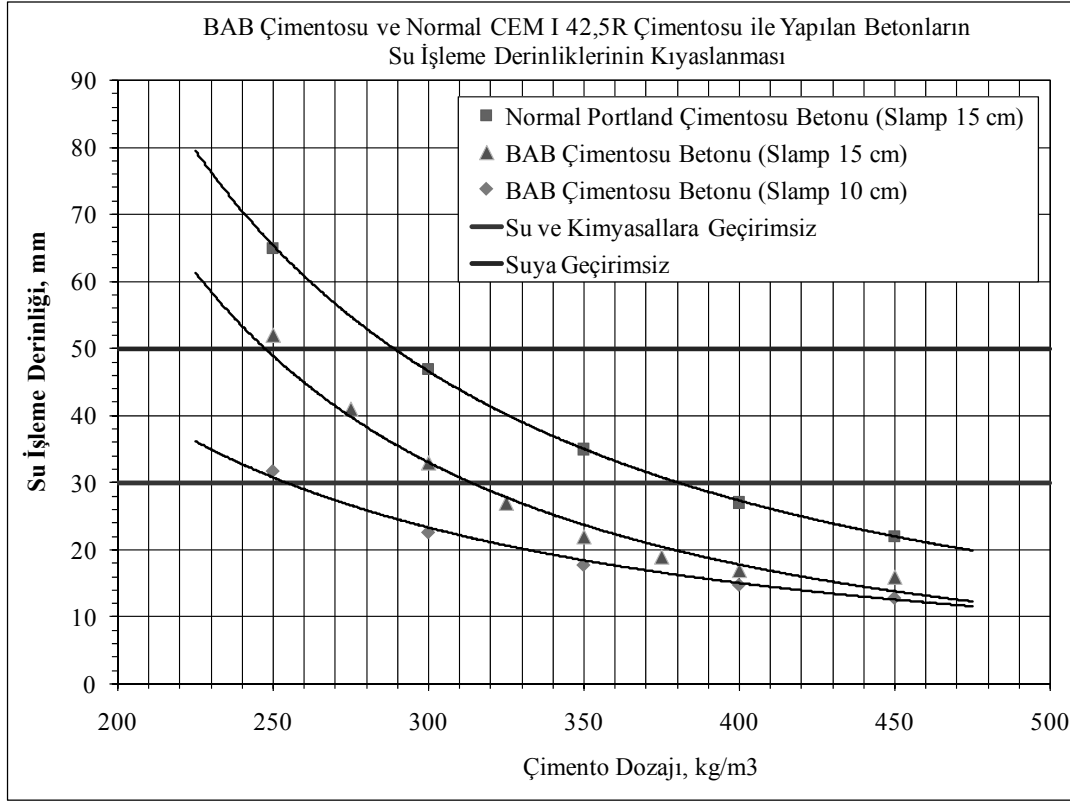


Şekil 5 - BAB çimentosu ile yapılan 10-15 cm slamlı ve normal Portland CEM I 42,5R ve uçucu kül ilavesi ile 15 cm slamlı olarak yapılan betonların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

4 BAB ÇİMENTOSU VE DURABILİTE

BAB ve normal Portland çimentoları ile yapılan farklı dozajlardaki beton numuneler üzerinde TS EN 12390-8 standardına uygun olarak su geçirgenliği deneyleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 6'daki gibi bir ilişki elde edilmiştir. BAB çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerinin normal Portland çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerinden çok daha

düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. BAB çimentosu ile yapılan 250 kg/m³ dozajlı ve 10 cm slamlı beton suya ve neredeyse zararlı kimyasallara karşı geçirimsiz bulunurken 15 cm slamlı beton ise suya karşı geçirimsiz bulunmuştur. Buna karşın normal Portland çimentosu ile yapılan betonun ancak 300 kg/m³ dozajından itibaren suya karşı geçirimsiz olduğu görülmüştür.



Şekil 6 - BAB Çimentosu ile 10 cm ve 15 cm slamlı ve normal Portland CEM I 42,5R ile 15 cm slamlı betonların su geçirgenliği yönünden karşılaştırılması

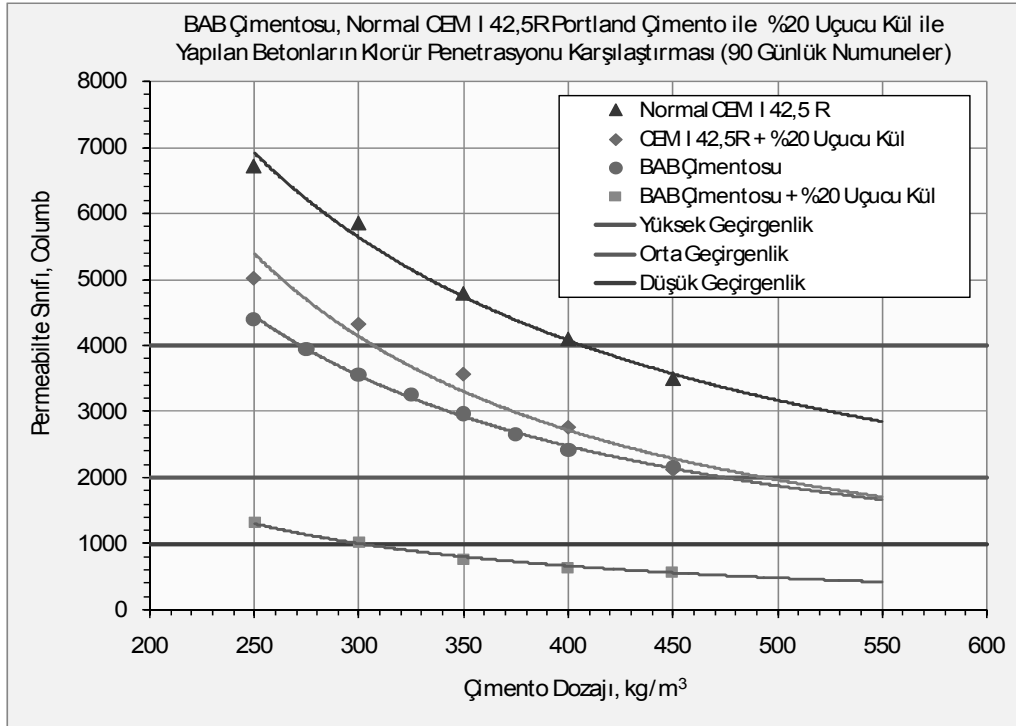
Çizelge 8 ve Şekil 7'de BAB Çimentosu ve normal Portland CEM I 42,5R çimentosu ve % 20 uçucu kül ilavesi ile yapılan 10-15 cm slamlı betonların klorür penetrasyonuna karşı dirençlerinin ölçülmesi amacıyla ASTM C1202-05 standardına uygun olarak yapılan deney sonuçları gösterilmektedir. BAB çimentosu ile yapılan betonların klorür penetrasyonlarının normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre daha iyi oldukları bariz şekilde tespit edilmektedir. Şekil 7'de elde edilen tüm sonuçlar grafiksel ortamda verilmiştir. Aynı işlenebilirlikte her iki tip çimento ve aynı oranda uçucu kül ile 250, 300, 350, 400 ve 450 kg/m³ dozajlarında BAB çimentosu ve uçucu kül ile üretilen betonların klorür penetrasyonu 250 kg/m³

çimento dozajında dahi **düşük permeabilite sınıfını** gösterirken, normal Portland çimentosu ve uçucu kül ile yapılan betonlar ancak 450 kg/m³ dozajından itibaren **düşük permeabilite sınıfını** göstermişlerdir. Aynı benzer sonuçlar BAB çimentosu ile yapılan betonların 250 kg/m³ dozajında dahi **orta permeabilite sınıfı** elde edilmektedir. Buna karşın normal Portland çimentosu ile 400 kg/m³ dozajında ancak **orta permeabilite sınıfı** elde edilmektedir.

Bu sonuçlar BAB Çimentosu ile yapılan betonların kompozitesinin çok yüksek ve porozitesinin (kapiler boşluk oranının) çok düşük olduğunu göstermektedir

Çizelge 8 - BAB çimentosu, normal CEM I 42,5 çimento ve % 20 Oranında Uçucu Kül ilavesi ile üretilen betonların klorür iyonlarına karşı gösterdikleri dirençler ve permeabilite sınıfları

ASTM C1202-05 Standardına Uygun Olarak Elde Edilen Rapid Klorür Penetrasyonu Deney Sonuçları						
Beton Kodu	Çimento Dozajı kg/m ³	Su İçeriği kg/m ³	Su/Çimento Oranı	Coulomb Değeri	Geçen Akım, mA	Permeabilite Sınıfı
BAB Çimentosu + %20 Uçucu Küllü Betonlar						
BAB-UK-1	250	170	0,68	1327	66	Düşük
BAB-UK-2	300	170	0,57	1029	49	Çok Düşük
BAB-UK-3	350	170	0,49	780	37	Çok Düşük
BAB-UK-4	400	170	0,43	651	30	Çok Düşük
BAB-UK-5	450	170	0,38	584	26	Çok Düşük
Normal CEM I 42,5 + %20 Uçucu Küllü Beton						
PC-UK-1	250	190	0,76	5018	264	Yüksek
PC-UK-2	300	190	0,63	4324	224	Orta
PC-UK-3	350	190	0,54	3567	194	Orta
PC-UK-4	400	190	0,48	2765	182	Orta
PC-UK-5	450	190	0,42	2124	168	Düşük
BAB Çimentolu Beton						
BAB-1	250	190	0,76	4400	242	Orta
BAB-2	275	190	0,69	3945	226	Orta
BAB-3	300	190	0,63	3560	188	Orta
BAB-4	325	190	0,58	3256	174	Orta
BAB-5	350	190	0,54	2969	163	Orta
BAB-6	375	190	0,51	2654	156	Orta
BAB-7	400	190	0,48	2420	143	Orta
BAB-8	450	190	0,42	2165	140	Düşük
Normal CEM I 42,5 Beton						
NPC-1	250	200	0,80	6710	342	Yüksek
NPC-2	300	200	0,67	5850	297	Yüksek
NPC-3	350	200	0,57	4788	251	Yüksek
NPC-4	400	200	0,50	4100	224	Orta
NPC-5	450	200	0,44	3500	220	Orta



Şekil 7 - BAB çimentosu ve normal CEM I 42,5 çimentosu ile uçucu kül kullanılarak üretilen betonların 90 günlük klorür penetrasyonu yönünden araştırılmasında elde edilen sonuçlar

BAB çimentosu ile birlikte uçucu kül veya silis dumanı gibi puzolanik malzemelerin kullanılması sonucunda betonda çok daha düşük geçirimsizlik değerlerinin elde edileceği görülmektedir. BAB çimentosuna toplamda % 20 olmak üzere ilave edilen uçucu kül ile basınç dayanımları ileri yaşlarda daha da artış göstermiş ve durabilite deneylerinde ise çok daha düşük değerler elde edilmiştir. Klor penetrasyonu deneyinde 250 kg/m^3 toplam bağlayıcılı (% 20 kül içeren) betonun geçirgenlik sınıfı çok düşük çıkmıştır. BAB çimentosu ile birlikte normal Portland çimentosu ile kullanılan puzolanik malzeme oranlarından daha düşük oranlarda puzolanik malzeme kullanılması da diğer bir avantajı oluşturmaktadır.

BAB çimentosu ile kütle betonu denemeleri de gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak Deriner Barajı kütle betonu tasarımı seçilmiştir. Elde edilen ilk bulgular ışığında, C20/25 beton sınıfının toplamda $150\text{-}160 \text{ kg/m}^3$ dozajında BAB çimentosu ile sağlanabileceğini göstermektedir. Mevcut durumda toplamda 190 kg/m^3 dozajında (% 65 CEM I 42,5 ve % 35 uçucu kül) bağlayıcı ile sağlandığı düşünüldüğünde 1 m^3 beton için yaklaşık % 20 tasarruf sağlanacağı görülmektedir. Deriner barajı gibi bir yapıda yaklaşık $3,5$ milyon m^3 betonda toplamda 140.000 ton çimento tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu miktar çimento ise tonunun 130 YTL olduğu varsayımı ile yaklaşık $18.000.000$ YTL civarında bir tasarruf getirmektedir. Portland çimentosu ve uçucu kül yerine traslı çimento kullanılması durumunda aynı beton sınıfı daha yüksek dozajla sağlanabilecektir. Bu durumda tasarruf oranının daha da artacağı aşikardır.

BAB Çimentosu ile normal Portland çimentosu+Uçucu Kül karışımının (% 65 PÇ + % 35 UK) kütle betonunda adyabatik sıcaklık artışı yönünden karşılaştırılması amacıyla yapılan birebir ölçekli deneme sonucunda BAB çimentolu betonun adyabatik sıcaklık artışının daha düşük olduğu da ispatlanmıştır.

BAB Çimentosunun betonarme yapılarda kullanılması ile hem suya ve hem de kimyasallara karşı ve özellikle de klorür iyonlarına karşı çok daha düşük geçirimsizliğe sahip betonlar üretmek mümkün görülmektedir. Bunun yanında donatı korozyonu da büyük ölçüde engellenecek ve beton yapının hizmet ömrü uzayacak ve zamanla dayanım ve dayanıklılığını da koruyacaktır. Bunun bu şekilde olması ise deprem etkileri içinde ilâve önlem sağlanmasında faydalı olacaktır. Betonarme yapılarda normal Portland çimentosu ile çok daha yüksek çimento dozajlarında ($400\text{-}450 \text{ kg/m}^3$) yüksek mukavemetli ve dayanıklı beton yapılabilirken

BAB Çimentosu ile normal çimento dozajlarında ($300\text{-}350 \text{ kg/m}^3$) istenilen mukavemette ve dayanıklılıkta beton üretmek mümkün hale gelebilecektir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Gerek çimento ve gerekse beton fazında yapılan deneylerde elde edilen çok detaylı sonuçlar, BAB çimentosunun başta tüm kütle betonu uygulamalarında ve özellikle durabilite yönünden dikkatli olunması gerekli birçok normal beton yapılarında kullanılabileceğini göstermektedir. Erken dayanım yönünden normal Portland çimentosuna göre dezavantajlı görünse de gerekli ilâve önlemler alınması sureti ile bu engelin de aşılabileceği görülmektedir. Laboratuvarında yapılan ön deneylerde BAB çimentosu ile birlikte bir priz hızlandırıcı ve süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılarak 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı yönünden incelemesi yapılmıştır. Priz hızlandırıcı ile 1, 3 ve 7 günde sırasıyla 5,0 MPa, 18,0 MPa ve 29,0 MPa basınç dayanımları elde edilirken süper akışkanlaştırıcı ile 1, 3 ve 7 günde sırasıyla 8,8 MPa, 31,2 MPa ve 54,2 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. Daha yüksek erken dayanım değerlerinin gerekli olduğu durumlarda özellikle erken yüksek dayanımın istendiği farklı projelerde çimentonun incelik değerinin bir miktar daha (4000 veya $4300 \text{ cm}^2/\text{g}$ mertebeleri) artırılması ile kullanılabilmesi mümkün görülmektedir. BAB çimentosuna mineral katkı olarak ilave edilen uçucu küllü karışımlarda da daha iyi performans değerleri elde edilmiştir. Her iki tip çimento ile yapılan beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen ultrasonik test sonuçlarında dinamik elastisite modülü, statik elastisite modülü, eğilme dayanımı, ses geçiş hızı ve geçiş süreleri aynı düzeylerde tespit edilmiştir. Araştırmanın ikinci bölümünde farklı hammaddeler kullanılarak üretilmiş farklı incelik değerinde çimentolar kullanılarak üretilen betonlar üzerinde çok kapsamlı (mikroyapı, petrografik inceleme, kimyasal ve fiziksel tesirlere karşı dayanıklılık) olarak araştırmanın sürdürülmesi planlanmaktadır. BAB Çimentosu ile sürdürülen çok kapsamlı araştırma programında elde edilen ilk bulgular çimentonun bir çok yönüyle normal CEM I 42,5R çimentosuna göre daha üstün özellikler ortaya koyduğunu göstermektedir. Günümüzde bir ürünün değeri artık enerji, çevrenin korunması ve sürdürülebilir teknoloji konuları ile birlikte değerlendirilmektedir. Bu çimento ile bu üç faktöründe büyük ölçüde uyumlu olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle BAB çimentosu üzerinde araştırmalar devam etmeli ve hiçbir soru işareti kalmayana dek detaylı olarak çalışmalar sürdürülmelidir.

6 KAYNAKLAR

- [1] Türk, S., G. Gürbüz, T. Ertün, A. Yeginobali (2006), "Heat of hydration and shrinkage properties of Boron containing active belite cements", ConcreteLife'06 - International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments, RILEM Publications SARL, pp.397 - 404
- [2] Hewlet, P. C. (1998), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, London, UK "Mass Concrete" reported by ACI Committee 207.1R-05, ACI Materials Journal; November 1996
- [3] Jinyu, L., Peng Xiaoping, Cao Jianguo, Chen Gaixin, Tian Juntao, Wang Xiujun, Lin Li, Wang Aiqin, Sui Tongbo, Wen Zhajun, Zhang Chaoran and Shi Zhenhuan, "Development and research of high belite cement dam concrete with low heat and high crack resistance", China Institute of Water
- [4] Resource and Hydropower Research, Beijing, 100038, PRC, China Institute of Building Materials Research, Beijing, 100024, PRC, China Three Gorges Construction Corporation General, Yichang County, Hubei, Province, 443100, PRC.
- [5] Tongbo S., Lei F., Zhajun W., Jing W., Zhonglun Z., "Study on the Properties of High Strength Concrete Using High Belite Cement", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 2, No.2, pp. 201-206, Japan Concrete Institute, 2004

BASINÇLI BİR FİZİKSEL AKİFER MODELİNDE POMPAJ VERİLERİNİN ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE ANALİZİ

Nilgün DOĞDU

Dr., Hidrojeoloji Yük.Müh., MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi
Eskişehir Yolu 7. km 06520 Balgat ANKARA
dogdu@mta.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 13.08.2008, Bildirinin kabul tarihi: 07.10.2008)

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, fiziksel bir model ile basınçlı akiferlerde dengesiz akım koşullarında gerçekleştirilen pompalama denemeleri verileri analitik ve sayısal modeller ile değerlendirilerek, akifer parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Theis yönteminin yeterliliği ve temsil ediciliği araştırılmıştır. Hidrolik parametreleri bilinen fiziksel bir basınçlı akifer modelinde ideal ortam koşulları sağlanarak dengesiz akım koşullarında pompalama denemeleri yapılmıştır. Theis yönteminin dayandığı tüm varsayımların gerçekleştirildiği bu laboratuvar modelinde, çekim kuyusunun etrafında yer alan çok sayıda piyezometre ile hidrolik yükün alansal değişimi zamana bağlı olarak hassas bir şekilde gözlenmiştir. Theis yöntemi ile farklı uzaklıklarda yer alan piyezometrelerde belirlenen hidrolik iletkenlik katsayılarının, birbirlerinden ve laboratuvarda permeametre aracılığıyla belirlenen hidrolik iletkenlik katsayısından farklı olduğu görülmüştür. Theis eşitliği ile belirlenen hidrolik yük dağılımının da, fiziksel modelde gözlenen hidrolik yük dağılımıyla uyumlu olmadığı, buna karşılık MODFLOW sayısal modeli ile akiferdeki hidrolik yük dağılımının ortam koşullarına uygun bir şekilde benzeştirilebildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik iletkenlik, basınçlı akifer, analitik model, fiziksel model, sayısal model

ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE PUMPING TEST DATA OF A PHYSICAL CONFINED AQUIFER MODEL

ABSTRACT

In the scope of this study, validity and efficiency of the Theis method has been evaluated through the pumping tests carried out in a physical confined aquifer model and the numerical and analytical simulations of the test results. The unsteady pumping tests have been carried out in an idealized confined aquifer model with known and homogeneous hydraulic properties. All the assumptions of Theis method has been realized in the physical model and the drawdown-time relations have been observed precisely in many piezometers surrounding the pumping well. Different values of the hydraulic conductivity coefficients have been estimated for the piezometers depending on the radial distance of the piezometers to the pumping well. The values are far from the hydraulic conductivity of the aquifer material determined by the permeameter tests in the laboratory. The analytical hydraulic head distributions estimated by Theis method is also far from the head distributions observed in the physical model, whereas the simulation of the head distribution with numerical MODFLOW model perfectly corresponds to the observed values.

Key Words: Hydraulic conductivity, confined aquifer, analytical model, physical model, numerical model

1 GİRİŞ

Akifer hidrolik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen pompalama denemeleri analizlerinde kullanılan Theis (1935), Hantush (1956), Neuman (1973), Boulton (1954), Walton (1962), vb. analitik modeller ancak idealleştirilmiş ortam koşullarında geçerlidir. İdeal ortam koşulları akiferin homojen, izotrop, sonsuz yayımlı ve sabit kalınlıklı olduğu varsayımlarına dayanmaktadır. Pompalama denemesine bağlı olarak hidrolik yükün (ve düşümün) zamanla değişimi, kuyunun etki yarıçapı içerisinde kalan bölgede akifere ait tüm hidrolik ve geometrik özelliklerinin ortak bir yansımasıdır. Analitik çözüm teknikleri, bu özelliklerin pompalamadan etkilenen bölge içerisinde değişmez olduğu varsayımına dayanır. Ancak doğada, akifer özelliklerinin bu şekilde homojen ve tek bir değer ile ifade edilmesi mümkün değildir. Aynı pompalama denemesi sırasında çekim kuyusundan farklı uzaklıklarda bulunan gözlem kuyularından elde edilen veriler ile yapılan analizler, akifer parametrelerinin de farklı belirlenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, pompalama denemeleri verilerinin analizlerinde akifer özelliklerinin etki yarıçapı içerisindeki değişiminin göz önüne alınması gerekmektedir.

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisinde gözlenen gelişimin bir sonucu olarak sayısal akım modelleri birçok yeraltısuyu akım probleminin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir araç haline gelmiştir. Sayısal model uygulamaları, genellikle bilinen akifer özelliklerinden hareket ederek, akifer sisteminin herhangi bir etkiye karşı göstereceği tepkinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda, akifer kendi içerisinde sınırsız ölçüde küçük alt homojen bölgelere (sonlu farklar hücreleri ya da sonlu elemanlar) ayrılarak, hidrolik yükün zamana bağlı değişimi her alt bölge için ayrı ayrı belirlenmektedir. Bu şekilde akiferin heterojen ve karmaşık yapısı modellenabilmektedir. Bu modeller kullanılarak, hidrolik yükün zaman içerisindeki değişimine akifer özelliklerinin etkisini araştırmak ve akiferin homojen olmayan yapısını da göz önüne almak mümkündür.

Bu çalışma kapsamında, laboratuvarında fiziksel bir basınçlı akifer modeli üzerinde gerçekleştirilen pompalama denemeleri verileri analitik ve sayısal modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Homojen, izotrop bir basınçlı akiferde

dengesiz akım koşullarında, analitik yöntemlerin dayandığı varsayımlar kontrol edilerek, elde edilen pompalama denemeleri sonuçları, analitik ve sayısal modeller ile değerlendirilerek karşılaştırılmış ve akifer parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan analitik çözümlerin geçerliliği araştırılmıştır (Demirci, 1997).

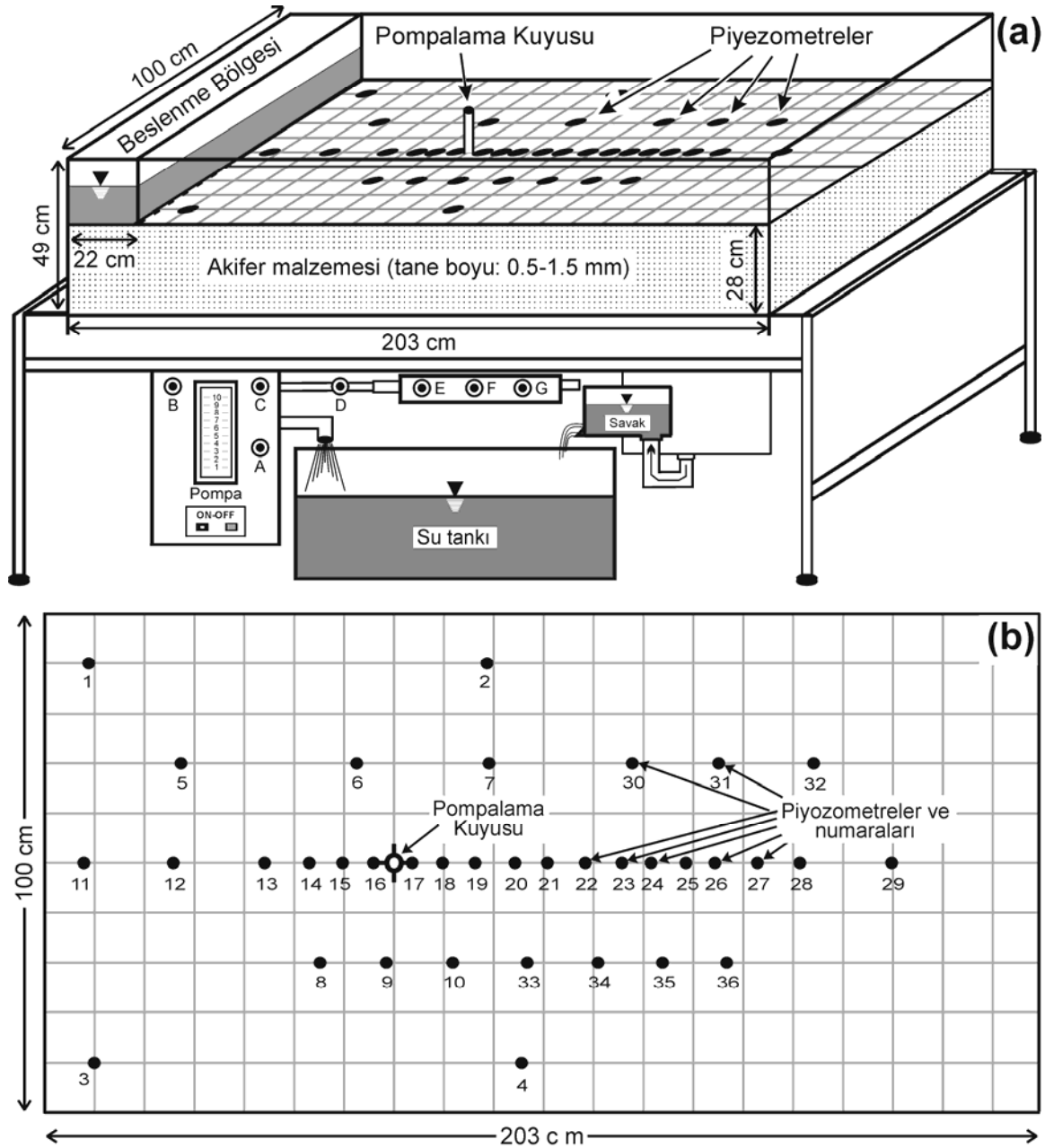
Çalışmada yer alan analitik çözümlerinde Theis (1935) yöntemi kullanılmış, sayısal model olarak ise üç boyutlu sonlu farklar yaklaşımına dayanan MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model) (McDonald ve Harbaugh, 1988) yeraltısuyu akım modeli kullanılmıştır.

2 FİZİKSEL MODEL

Çalışmada kullanılan fiziksel modelde (Şekil 1); akifer kalınlığı 28 cm, genişliği 1 m ve boyu ise 181 cm'dir. Akifer malzemesi 0,5-1,5 mm tane boyu aralığına sahip pekişmemiş kumdan oluşmuştur. Akifer malzemesini oluşturan bu kumun gözenekliliği (porozitesi (n)) 0,3 olup, hidrolik iletkenlik katsayısı (K) değeri sabit seviyeli permeametre deneyi ile yapılan ölçümler sonucu 0,2 cm/s olarak hesaplanmıştır.

Model, 203 cm x 100 cm boyutlarında 49 cm derinliğe sahip bir kum tankından oluşmaktadır. Tankın her iki yanında yanıl beslenimi ve boşalımı sağlayan kanallar yer almaktadır. Kum tankının 181 cm uzunluğundaki bir kısmında basınçlı akifer koşullarını sağlamak amacıyla 28 cm kalınlığındaki kum malzemenin üzeri tamamen geçirimsiz bir örtü tabakası ile kapatılmış, sol tarafta ise piyezometrik seviyeyi oluşturmak üzere akiferden daha yüksek bir beslenme bölgesi oluşturulmuştur (pompalama denemeleri sırasında bu bölgede 42 cm yüksekliğinde hidrolik yük oluşturulmuştur).

Akifer içerisinde iki adet çekim kuyusu ve bunların çevresine yerleştirilmiş 36 adet piyezometre bulunmaktadır. Piyezometreler kuyulara simetrik olarak eşit aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 1). Deneyler sırasında çekim verdisi bir dikdörtgen savak ile ölçülmüştür. Pompalama denemelerinde piyezometrelerdeki su seviye değişimi video kamera kullanılarak kayıt edilmiş ve daha sonra bu kayıtlardan düşüm-zaman-uzaklık verileri sağlıklı bir şekilde okunmuştur.



Şekil 1 - Fiziksel basınçlı akifer modelinin a) profilden ve b) üstten görünümü
 (Şekil 1a'nın açıklaması: (a) pompa verdisi kontrol vanası, (b) yağmurlama sistemini besleme vanası, (c) sağ ve sol kanalları besleme vanası, (d) sağ kanalı besleme vanası, (e) yağmurlama sisteminin sağ tarafını kontrol eden vana, (f) pompalama kuyusundan su tankına olan akımı kontrol eden vana, (g) pompalama kuyusundan savağa olan akımı kontrol eden vana)

3 ANALİTİK MODEL (THEIS YÖNTEMİ)

Basınçlı akifer, alttan ve üstten geçirimsiz bir yüzey ile sınırlandırılmış ve piyezometrik seviyenin akiferin üst kotundan daha yukarıda bulunduğu akiferlerdir. Basınçlı akiferlerde açılmış bir kuyuya doğru radyal akım:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada;

- ϕ Hidrolik yük (L),
- r Çekim kuyusuna olan radyal uzaklık (L),
- S Depolama katsayısı (birimsiz),
- T Akiferin transmissivite katsayısı (L^2/T),
- t Zaman (T) dir.

Eşitlik (1)'in analitik olarak çözümü Theis (1935) tarafından:

$$\phi_0 - \phi(r, t) = \frac{Q_w}{4\pi T} \int_{x=u}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (2)$$

şeklinde verilmiştir.

Yukarıdaki eşitliğin dayandığı varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Akifer homojen, izotrop ve sabit kalınlığa sahiptir.
- Kuyuya doğru olan akım dengesiz rejimdedir.
- Akifer sonsuz yayılıma sahiptir ($\phi(\infty, t) = \phi_0$, $t \geq 0$).
- Pompalamadan önceki piyezometrik seviye hemen hemen yataydır ($\phi(r, 0) = \phi_0$, $r_w \leq r \leq \infty$).
- Kuyu çapı çok küçüktür ($r \gg r_w$).
- Pompalama verdisi sabittir ($\lim_{r=r_w \rightarrow 0} 2\pi r T \partial \phi / \partial r = Q_w = \text{sabit}$, $t > 0$).

Yukarıdaki varsayımlar altında, basınçlı akiferde dengesiz akım koşullarında düşüm değerleri için Theis (1935) eşitliği (Eşitlik 2) şu şekilde yazılabilir:

$$s(r, t) = \frac{Q_w}{4\pi T} W(u) \quad (3)$$

$$W(u) = \left[-0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \right] \quad (4)$$

Eşitlik (4)'de yer alan u parametresi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (5)$$

Eşitlik (4) ve (5)'de yer alan parametreler;
 r_w Üretim kuyusunun yarıçapı (L),
 Q_w Pompalama verdisi (L^3/T),
 $W(u)$ Theis (1935) kuyu fonksiyonudur.

4 SAYISAL MODEL (MODFLOW)

Hidrolik yükün zamanla değişiminin sayısal benzeşiminde McDonald ve Harbaugh (1988) tarafından geliştirilmiş MODFLOW modeli kullanılmıştır.

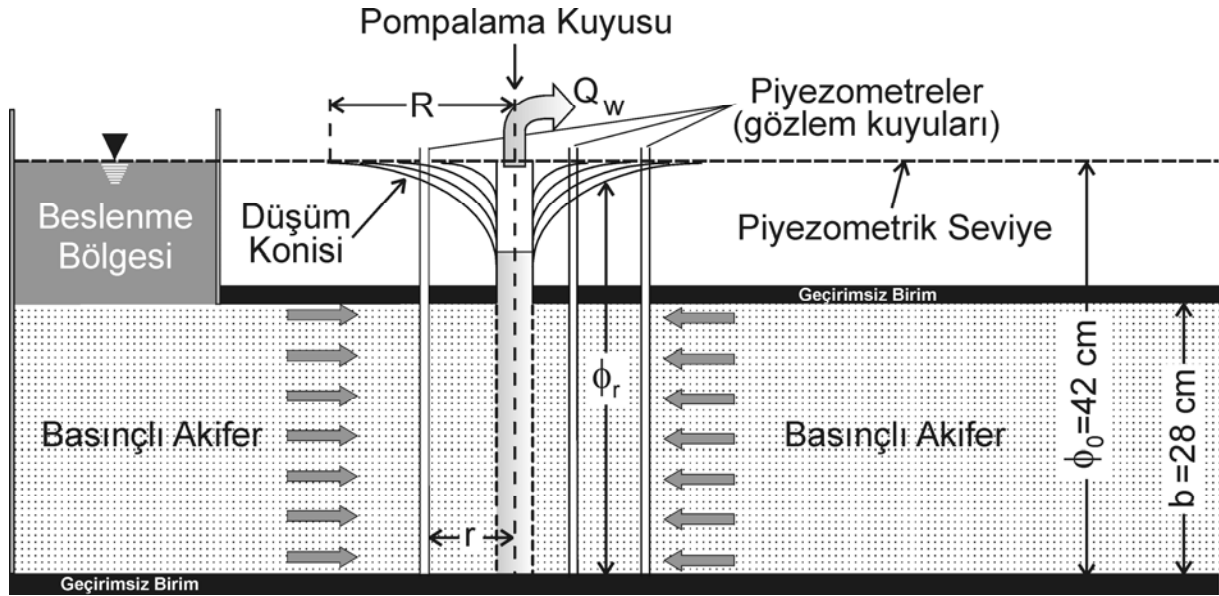
Günümüzde en çok kullanılan yeraltısuyu akım modeli olan MODFLOW: dengeli-dengesiz akım koşullarında basınçlı, serbest ve yarı basınçlı akifer tiplerinde üç boyutlu doygun yeraltısuyu akımını sonlu farklar sayısal analiz tekniği ile benzeştirebilmektedir. Alansal beslenme, buharlaşma-terleme, kuyu ve drenler ile boşalım, akarsu-akifer ilişkileri bu model ile oldukça kolay bir şekilde benzeştirilebilmektedir. Akifer malzemesinin hidrolik iletkenlik (K) veya transmissivite katsayısının (T) alansal değişim ve anizotropisi ile depolama katsayısının (S) heterojenliğini de göz önüne alan model ile birden fazla tabakadan oluşan akiferlerde düşey akım bileşeni de hesaplanabilmektedir. Dirichlet ve Neuman sınır koşulları belirlenerek akifer ortamının sadece bir kısmını da modellemek mümkün olabilmektedir. Sonlu farklar yaklaşımına dayanan modelde akifer, ortam özelliklerinin homojen varsayıldığı hücrelere bölünür. Grid aralıkları değişken olabilir. Sayısal benzeşim için sınır şartları, başlangıç koşulları, hidrolik ve geometrik özellikler tüm grid hücreleri için belirlenir. Modelin kullanımını kolaylaştırmak amacıyla çok sayıda yazılım firması tarafından grafik tabanlı ön-ardıl veri/sonuç işleme programı geliştirilmiştir.

5 POMPALAMA DENEMELERİ

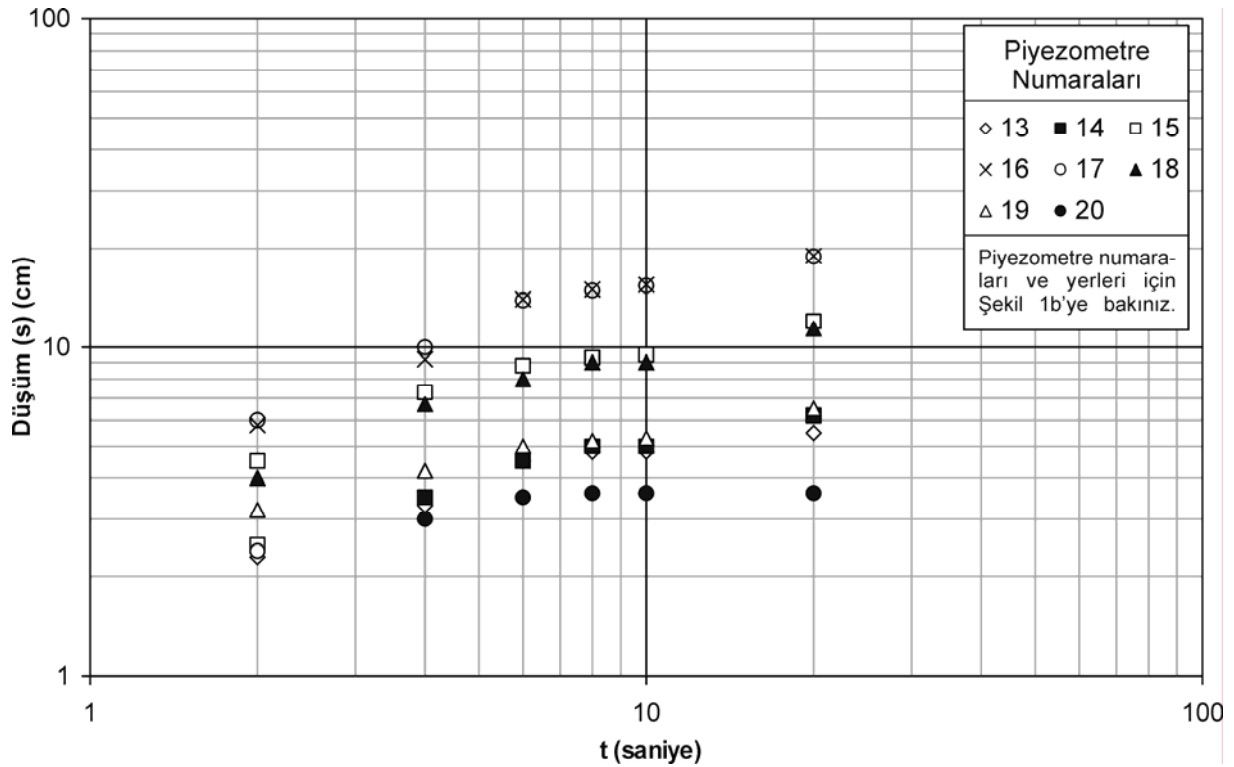
Fiziksel model üzerinde pompalama denemeleri sırasında basınçlı akifer koşullarında, akiferin tüm kalınlığı (b) boyunca açılmış bir kuyudan $Q_w=200 \text{ cm}^3/\text{s}$ 'lik verdi ile çekim yapılmıştır. Pompalama denemesi öncesi piyezometrik seviye yatay konumda olup $\phi_0=42 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

Pompalama kuyusundan yapılan çekime bağlı olarak etki yarıçapı içerisinde kalan piyezometrelerde hidrolik yükün zamanla azalımı 2, 4, 6, 8, 10 ve 20. saniyeler için kaydedilmiştir. Pompalama süresince etki yarıçapı çekim kuyusundan yaklaşık 35 cm'lik bir uzaklığa ulaşmıştır. Etki yarıçapı (R) içerisinde kalan 8 adet piyezometrede gözlenen düşüm-zaman ilişkileri Şekil 3'de verilmiştir. Gözlem noktaları, çekim kuyusunun her iki tarafında 4 cm ile 29,8 cm uzaklıklar arasında bulunmaktadır (Şekil 1).

Pompalama denemesi sonucu elde edilen düşüm-zaman değerleri ve piyezometrelerin pompalama kuyusuna olan uzaklık (r) verileri Theis yönteminde kullanılarak akifere ait hidrolik iletkenlik (K) ve depolama katsayısı



Şekil 2 - Fiziksel modelde basınçlı akifer koşullarında gerçekleştirilen pompalama denemesinin şematik kesit görünümü



Şekil 3 - Basınçlı akifer koşullarında piyezometrelerde gözlenen düşüm-zaman ilişkileri

(S) değerleri her piyezometre için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1 - Pompalama deney verileri ile değişik piyezometrelerde hesaplanan hidrolik iletkenlik (K) ve depolama katsayıları (S)

Piyezometre No.	r (cm)	K (cm/s)	S
13	29,8	0,36	0,012
14	20,0	0,33	0,024
15	10,0	0,21	0,040
16	4,0	0,09	0,319
17	4,0	0,09	0,330
18	10,0	0,18	0,058
19	18,0	0,34	0,020

Homojen ve izotrop özellikteki bu basınçlı akifer modelinde kuyudan değişik uzaklıklarda yapılan gözlemler kullanılarak hidrolik iletkenlik katsayıları (K) elde edilmiştir. Kontrol amacıyla pompalama denemesi bir kaç kez tekrarlanmış ve yine aynı sonuçlar elde edilmiştir. Oldukça idealize edilmiş bir basınçlı akifer modelinde Theis yöntemine ait tüm varsayımların sağlanmasına karşılık tek bir akifer hidrolik iletkenlik katsayısı (K) yerine 0,09 cm/s ile 0,36 cm/s arasında değişen değerler elde edilmiştir. Pompalama kuyusuna yakın bölgelerde yüksek yeraltısuyu akım hızına bağlı olarak meydana gelecek ilave yük kayıpları nedeniyle, bu bölgelerde bulunan hidrolik iletkenlik katsayılarının (K) düşük çıktığı düşünülebilir. Ancak, diğer piyezometrelerde, özellikle çekim kuyusundan uzaklaştıkça oldukça büyük hidrolik iletkenlik katsayıları (K) belirlenmiştir. Özellikle etki yarıçapına yakın noktalarda gerçek hidrolik iletkenlik katsayısının (K) yaklaşık iki katına sahip değerler hesaplanmıştır.

6 HİDROLİK YÜK DEĞİŞİMİNİN ANALİTİK MODELİ

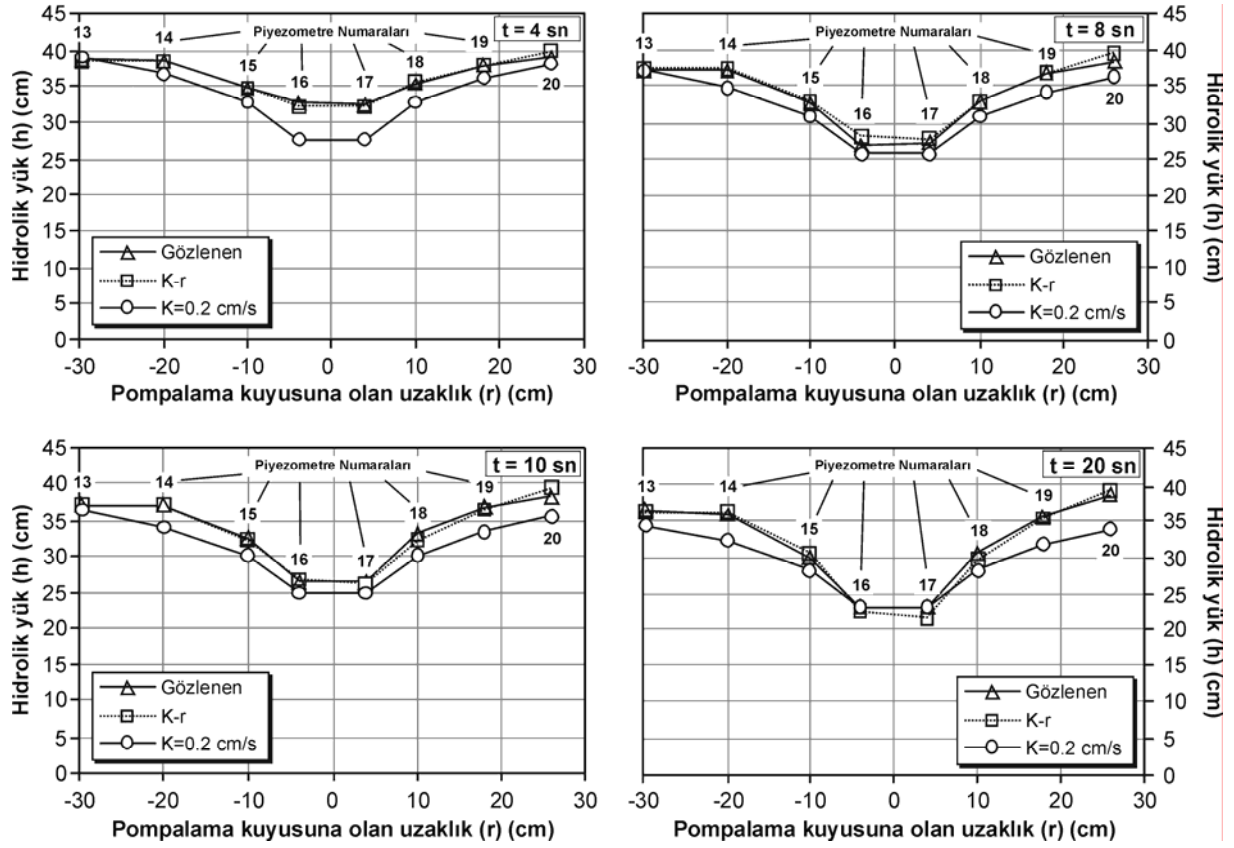
Basınçlı akiferlerde, bir kuyudan yapılan su çekimine bağlı olarak hidrolik yükün zamana ve radyal uzaklığa bağlı değişimi yukarıda verilmiş olan (3), (4) ve (5) numaralı eşitliklerde sunulmuştur.

Akiferin hidrolik parametre değerlerinin bu eşitliklerde kullanılmasıyla, kuyudan yapılan su çekimine bağlı olarak etki yarıçapı içerisinde

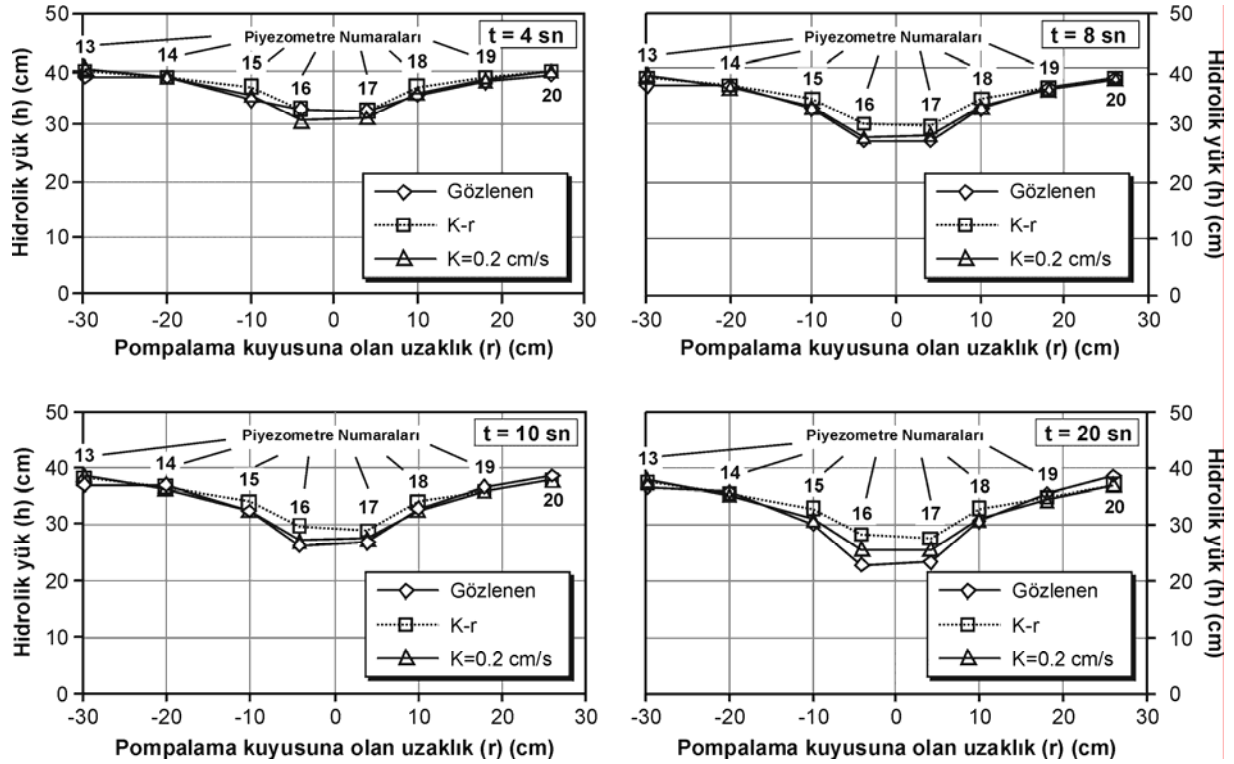
hidrolik yükün uzaklığa ve zamana bağlı olarak hesaplanması mümkündür. Theis yönteminin ideal ortam koşullarındaki temsil ediciliğini kontrol etmek amacıyla etki yarıçapı içerisinde kalan piyezometrelerin bulunduğu noktalarda 2, 4, 6, 8, 10 ve 20. saniyeler için hidrolik yük değerleri hesaplanmıştır. Akiferin hidrolik iletkenlik katsayısı (K) olan 0,2 cm/s değeri kullanılarak yapılan hesaplamalarda (K=0,2 cm/s) elde edilen hidrolik yük değerlerinin gözlenen yük değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Gözlenen ve hesaplanan yükler arasındaki fark, pompalamanın başlangıcına yakın zamanlardan çekim kuyusuna yakın bölgelerde daha fazla iken ilerleyen sürelerde etki yarıçapına yakın bölgelerde daha fazla olmaktadır. Piyezometrelerde gözlenen düşüm-zaman değerleri kullanılarak belirlenen ve uzaklığın bir fonksiyonu şeklinde davranan farklı hidrolik iletkenlik katsayıları (K-r) ile hesaplanan hidrolik yük değerlerinin ise gözlenen hidrolik yük değerleri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Şekil 4).

7 HİDROLİK YÜK DEĞİŞİMİNİN SAYISAL MODELİ

Fiziksel model ile kuyudan çekilen su miktarı ve buna bağlı olarak meydana gelen yeraltısuyu hidrolik yük değişimi MODFLOW sayısal modeli ile benzeştirilmiştir. 1 cm boyutunda eşit aralıklı 100x200 adet sonlu farklar hücresine bölümlenen model alanında kuyudan gerçekleştirilen çekimin etki yarıçapı içerisinde meydana getirdiği düşüm belirlenmiş ve model sonuçları fiziksel modelden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalarda akiferin hidrolik iletkenlik katsayısı 0,2 cm/s olarak kullanılmış, ancak karşılaştırma amacıyla, Theis yöntemi ile değişik uzaklıklarda yer alan piyezometrelerden belirlenen farklı hidrolik iletkenlik katsayıları da kullanılarak hidrolik yük değişimi benzeştirilmiştir. Etki yarıçapı içerisinde kalan piyezometrelerde her iki şekilde hesaplanan hidrolik yükler (K-r) ile fiziksel modelde gözlenen hidrolik yüklerin karşılaştırılması Şekil 5'te sunulmuştur. Akiferi oluşturan malzemenin hidrolik iletkenlik katsayısı (K=0,2 cm/s) ile yapılan sayısal model hesaplamalarının analitik modelin tersine fiziksel modelde gözlenen değerler ile birebir uyumlu olduğu görülmektedir. Theis yöntemi ile belirlenen hidrolik iletkenlik katsayıları ise sayısal modelde genellikle daha yüksek hidrolik yük değerlerinin hesaplanmasına yol açmaktadır.



Şekil 4 - Gözlenen hidrolik yük değerlerinin analitik model ile hesaplanan yük değerleri ile karşılaştırılması



Şekil 5 - Gözlenen hidrolik yük değerlerinin sayısal model ile hesaplanan yük değerleri ile karşılaştırılması

8 TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Basınçlı akiferlerin hidrolik parametreleri genellikle bu akiferlerde gerçekleştirilen pompalama denemelerinin Theis (1935) tarafından geliştirilen analitik bir yöntem ile değerlendirilmesi sonucu belirlenmektedir.

Pompalama denemeleri sırasında sınırlı sayıda gözlem kuyusunun bulunması nedeniyle hidrolik yükün alansal değişiminin ve buna bağlı olarak hidrolik parametrelerin konumsal değişiminin belirlenmesi mümkün değildir. Theis yöntemi, ideal ortam koşulları şeklinde adlandırılacak bir dizi varsayımı dayanmaktadır. Bu varsayımlar arasında en önemlisi ise akiferin homojen ve izotrop olma koşuludur. Homojen bir akiferde hidrolik parametreler konumdan ve zamandan bağımsız olup akiferin her noktasında aynı değere sahiptirler. Bu nedenle aynı akifer içerisinde değişik noktalarda gözlenen düşüm-zaman ilişkilerinden de aynı hidrolik parametrelerin belirlenmesi gerekir.

Laboratuvarda oluşturulan ideal bir basınçlı akifer modelinde çok sayıda gözlem kuyusu ile gerçekleştirilen pompalama denemeleri sonucunda Theis yönteminin homojen ve izotrop bir basınçlı akiferi temsil etmekte yetersiz kaldığı ortaya çıkmıştır. Bu yöntem ile farklı uzaklıklarda yer alan gözlem kuyularında gözlenen veriler kullanıldığında homojen bir akifer için farklı hidrolik iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Çekim kuyusundan değişik uzaklıklarda bulunan gözlem kuyularında hesaplanan hidrolik iletkenlik katsayıları, akiferin sabit seviyeli permeametre deneyi ile belirlenen hidrolik iletkenlik katsayısından 0,5-2 kat daha farklı bulunmuştur. Theis eşitliği kullanılarak belirlenen hidrolik yük dağılımının analitik modelinde ise akiferin homojen hidrolik iletkenlik katsayısı ile belirlenen hidrolik yüklerin gözlenen değerlerden daha düşük olduğu buna karşılık heterojen hidrolik iletkenlik katsayıları ile belirlenen yüklerin gözlenen değerler ile daha iyi uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Sayısal modelleme yoluyla belirlenen hidrolik yüklerin, homojen hidrolik iletkenlik katsayısı kullanıldığında gözlenen yükler ile son derece uyumlu olduğu gözlenmiştir. Theis yöntemi ile belirlenen uzaklığa bağımlı hidrolik iletkenlik katsayıları ise gözlenen değerlerden daha yüksek hidrolik yüklerin hesaplanmasına neden olmuştur.

Hidrolik iletkenlik katsayısı, yeraltısuyu akım dinamiğini temsil eden en önemli parametrelerden biridir. Akiferi oluşturan malzemenin jeohidrolojik özelliklerine son derece bağımlı olan bu parametrenin doğal

akifer koşullarında belirlenmesi çok güçtür. Pompalama denemeleri ile ideal ortam koşullarında belirlenen hidrolik iletkenlik katsayılarının ise gerçek akifer ortamını temsil etmesi mümkün değildir. Bu şekilde belirlenen hidrolik iletkenlik katsayısı sadece yaklaşık bir değer olmaktadır. Pompalama denemeleri ile gözlenen düşüm-zaman değerleri kullanılarak belirlenebilen bu parametrenin basınçlı akifer koşullarında piyezometrelerin kuyuya olan uzaklığına çok duyarlı olduğu ve değişik uzaklıklardaki piyezometrelerdeki veriler ile hesaplanan hidrolik iletkenlik katsayısı değerlerinin gerçek değerden çok uzak olduğu gözlenmiştir.

Akiferin homojen bir hidrolik iletkenlik katsayısı ile temsil edilmesi durumunda ise pompalama denemesi ile ortaya çıkan hidrolik yük dağılımının sayısal modelleme ile son derece hassas bir şekilde benzeştirilebildiği görülmüştür. Theis yöntemi ile belirlenen ve gerçek ortamı temsil etmeyen hidrolik iletkenlik katsayılarının ise sayısal modelde fiziksel ortamı temsil edemediği ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak ideal ortamlar için geliştirilmiş analitik yöntemler ile belirlenen akifer parametrelerinin gerçek değerlerden uzaklaştığı, buna karşılık sayısal modellerin akiferin hidrolik yapısını daha iyi temsil ettiği görülmüştür. Bu nedenle, karmaşık sistemlerde akifer parametrelerinin belirlenmesinde tek kuyuda yapılacak pompalama denemeleri yerine tüm akifer sistemini göz önüne alan evrik modeller ile yapılacak parametre tahminlerinin daha uygun bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.

9 KAYNAKLAR

- [1] Boulton, N.S., 1954, The Drawdown of The Water Table Under Non-steady Conditions Near a Pumped Well in an Unconfined Formation, Inst. Civil Engineers Proc., 3(3), 564-579.
- [12] Demirci, N., 1997, Değişik Akifer ve Akım Koşullarında Fiziksel Modeller Kullanılarak Yapılan Pompalama Denemelerinin Analitik Çözümlemesi ve Sayısal Modeller ile Karşılaştırılması, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Mühendislik Tezi, Ankara, 127 s.
- [3] Hantush, M.S., 1956, Analysis of Data From Pumping Tests in Leaky Aquifers, Trans. Am. Geophys. Un., 37(6), 702-714.
- [4] McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-

- Resources Investigations Book 6, Chapter A1, 586 p.
- [5] Neuman, S.P., 1973, Supplementary Comments on Theory of Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of The Water Table, Water Resources Research, (9), p. 1102-1103
- [6] Theis, C.V., 1935, The Relation Between the Lowering of The Piezometric Surface and The Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage, American Geophysics Union, 16, p. 519-524.
- [7] Walton, W.C., 1962, Selected Analytical Methods for Well and Aquifer Evaluation, Illinois State Water Survey Bulletin, 49, 81 pp.

DSİ GÖLET VEYA SULAMA KANALI PROJELERİNDE KULLANILAN ZEMİNLERİN SIKIŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİ İLE DRENAJSIZ KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Yüksel YILMAZ

Yardımcı Doçent Dr., Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
yyilmaz@kku.edu.tr

Vehbi ÖZAYDIN

Dr., DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı
ozaydin@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 23.10.2008, Bildirinin kabul tarihi: 19.12.2008)

ÖZET

Bu araştırmada, değişik gölet veya sulama kanalı projelerine ait örselenmiş zemin numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri (maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği) ve kayma dayanımı parametreleri (görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı) arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye'nin değişik yerlerinde 14 farklı projeye ait toplam 114 adet numunenin sıkıştırma karakteristikleri ile drenajsız kayma mukavemeti deney verileri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıkıştırma karakteristikleri, drenajsız kayma dayanımı, korelasyon

CORRELATION OF COMPACTION CHARACTERISTICS WITH UNDRAINED SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF SOILS USED IN PONDS OR IRRIGATION CANAL PROJECTS OF DSI

ABSTRACT

In this research, the relations between compaction characteristics (maximum dry density and optimum water content) and undrained shear strength parameters (cohesion intercept and internal angle of friction) of the disturbed soil samples collected from different ponds and irrigation canal projects are studied. Compaction characteristics and undrained shear strength parameters of 114 samples belonging to 14 different projects all around Turkey were analyzed.

Key words: Compaction characteristics, undrained shear strength, correlation

1 GİRİŞ

Toprak dolgu barajlar, göletler, sulama kanalları vb. mühendislik yapılarının inşasında kullanılacak gevşek zeminlerin birim ağırlıkları sıkıştırılarak artırılır. Zira sıkıştırma (kompaksiyon) zeminin mukavemet karakteristiklerini olumlu yönde etkiler [7], [8]. Kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılması ile ilgili temel prensipler 1930'ların başında Proctor tarafından ortaya konmuştur [9]. Literatürde, Proctor veya Modifiye Proctor enerjisi altında sıkıştırılmış zeminlerin çekme dayanımı, drenajlı veya drenajsız kayma dayanımları üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır [1], [2], [5], [6], [10], [11], [12]. Bu çalışmada,

genellemeden daha ziyade DSİ bünyesinde bazı uygulamalarda daha önce kullanılan zeminlerin sıkıştırma karakteristikleri ile drenajsız kayma dayanımı parametreleri arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmıştır.

Zeminlerin maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içerikleri ASTM D 698 standardına göre elde edilmiştir [3]. Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanan ve 50 mm çapında ve 100.5 mm boyunda sıkıştırılan numunelerin tek eksenli basınç deneyleri ise ASTM D 2850 standardına göre

0,5 mm/min yükleme hızı altında deformasyon kontrollü olarak elde edilmiştir [4].

2 ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Bu çalışmada, değişik tarihlerde DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'ne gönderilen, gölet ve sulama kanalı projelerine ait (Çizelge 1) örselenmiş zemin numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri (maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği) ile drenajsız kayma dayanımı

parametreleri (görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı) arasındaki ilişkiler irdelenmiştir.

Çalışma kapsamında değerlendirilen toplam 114 adet zemin numunesinin sadece 67 adedinin tane boyutu dağılımları ve kıvam limitleri elde edilmiştir. Birleşik zemin sınıflama sistemine (USCS) göre; 67 adet numunenin, 31 adedi CL, 14 adedi SC, 12 adedi CH, 5 adedi MH, 3 adedi GC ve 2 adedi SM olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 1 - Çalışmada değerlendirilen numunelerin ait olduğu gölet ve sulama kanalı projeleri

	Gönderen Kuruluş	Proje Adı
1	DSİ II. Bölge Müdürlüğü	Menderes Ataköy Göleti Uşak-Banaz Ahat Göleti Uşak-Banaz Kızılcasöğüt Göleti
2	DSİ V. Bölge Müdürlüğü	Çankırı-Yapraklı Karacaöz Göleti Çorum-Boğazkale Evcı Göleti Kırıkkale Hasandede Göleti Nallıhan-Belen Alan Göleti
3	DSİ VI. Bölge Müdürlüğü	A. Ceyhan Aslantaş II. Merhale Projesi
4	DSİ IX. Bölge Müdürlüğü	Bingöl-Kale Göleti Elazığ-Kovancılar Tatar Göleti
5	DSİ XII. Bölge Müdürlüğü	Kayseri-Develi Şıhlı Göleti
6	DSİ XIII. Bölge Müdürlüğü	Korkuteli-Çığılık Göleti
7	DSİ XXV. Bölge Müdürlüğü	Deliktaş Göleti Tatlıpınar Göleti

3 SIKIŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Çalışma kapsamında değerlendirilen 114 adet numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının optimum su içeriği ile nasıl değiştiği Şekil 1 de gösterilmiştir. Şekil 1 üzerinde ayrıca maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su içeriği arasında kurulan birinci dereceden polinom bağıntısının denklemi ve polinomun eğrisi de gösterilmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlıkla optimum su içeriği arasındaki birinci dereceden polinom ilişkinin R^2 değeri ($\approx 0,85$) oldukça yüksektir.

3.1 Sıkıştırma Karakteristiklerinin Frekans Histogramları

Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin frekans histogramları Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, deney numunelerinin büyük bir çoğunluğunun optimum su içeriklerinin yaklaşık % 20 civarında olduğu görülmektedir. Tüm numunelerin % 90'nının optimum su içeriklerinin % 15 ile % 25 aralığında gerçekleşmektedir. Nadir de olsa optimum su içeriğinin % 25 den büyük olduğu durumlarda söz konusudur.

Şekil 3 incelendiğinde ise, deney numunelerinin büyük bir çoğunluğunun (yaklaşık % 82'sinin) maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının 16 kN/m^3 ile 19 kN/m^3 aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 16 kN/m^3 den küçük olması veya 19 kN/m^3 den büyük olan numuneler tüm numunelerin yaklaşık % 20'si civarındadır.

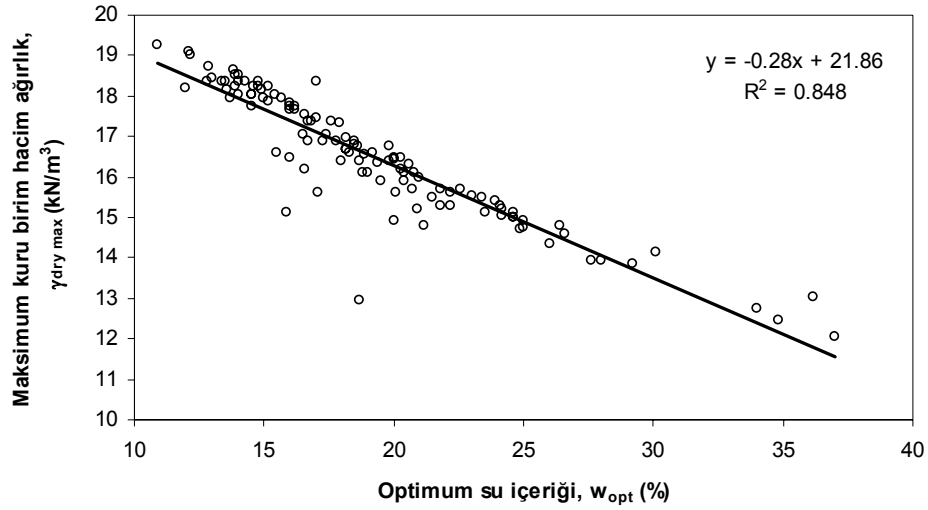
4 DRENAJSIZ KAMYA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Numunelerin kohezyon değerleri ile içsel sürtünme açılarının değişimi Şekil 4 de gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde kohezyon değerleri ile içsel sürtünme açısı değerleri arasında herhangi bir ilişki görülmektedir.

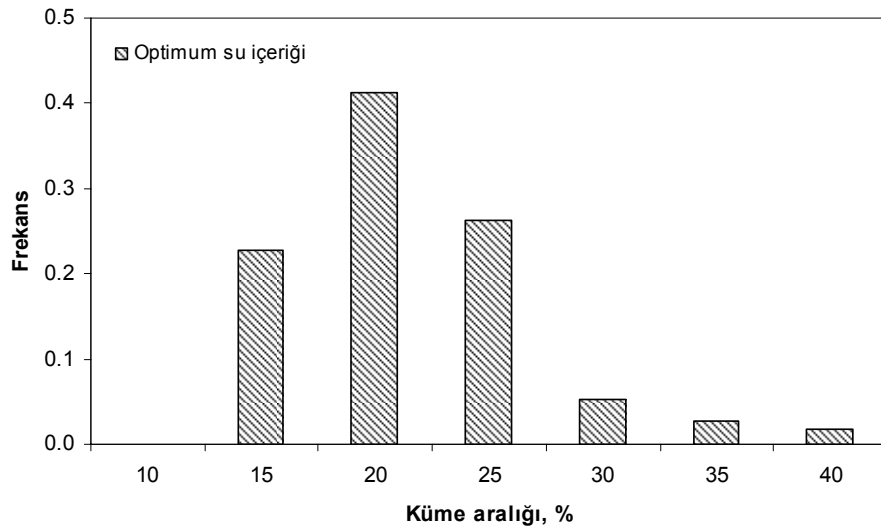
4.1. Drenajsız Kayma Dayanımı

Parametrelerinin Frekans Histogramları

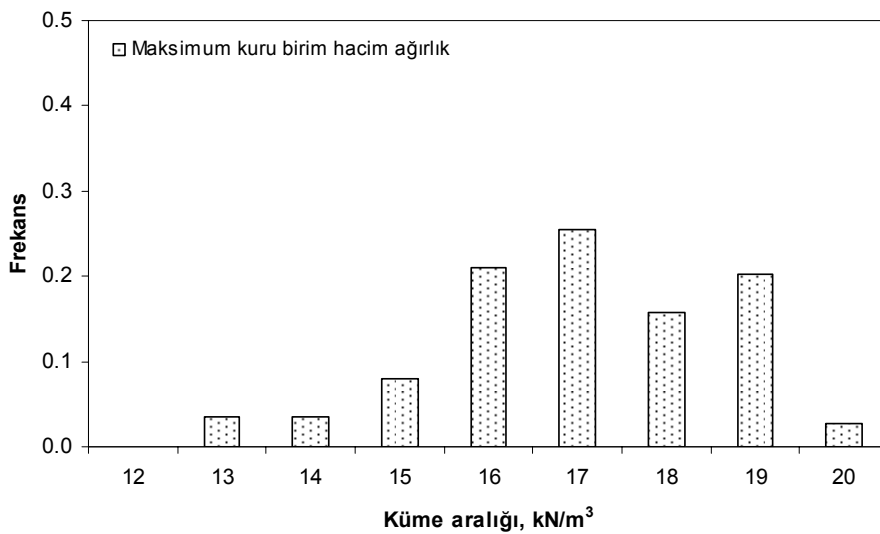
Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin frekans histogramları Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 5'e göre, deney numunelerinin büyük bir çoğunluğunun (yaklaşık % 95'inin) kohezyon değeri 100 kPa ile 200 kPa aralığında değişmektedir. Kohezyon değerinin 200 kPa 'dan daha büyük olması durumuna nadiren de olsa rastlanılmıştır.



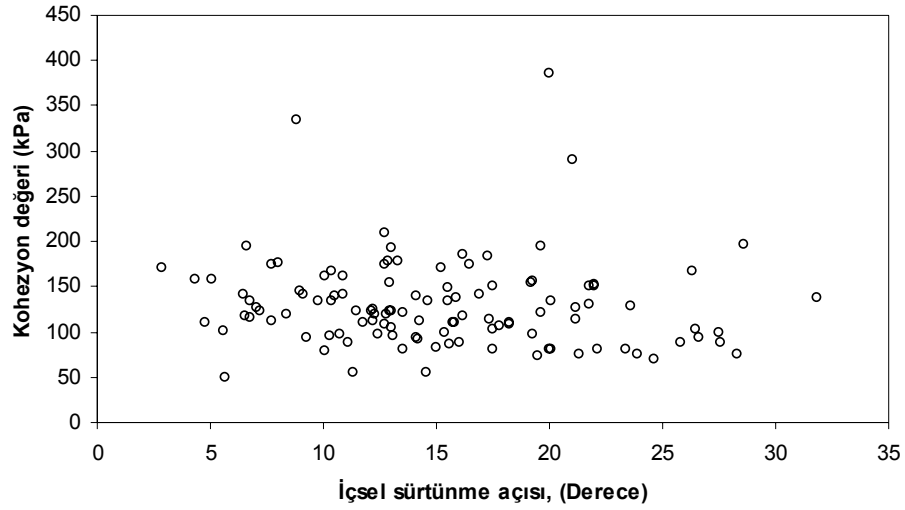
Şekil 1 - Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin optimum su içeriği ile değişimi



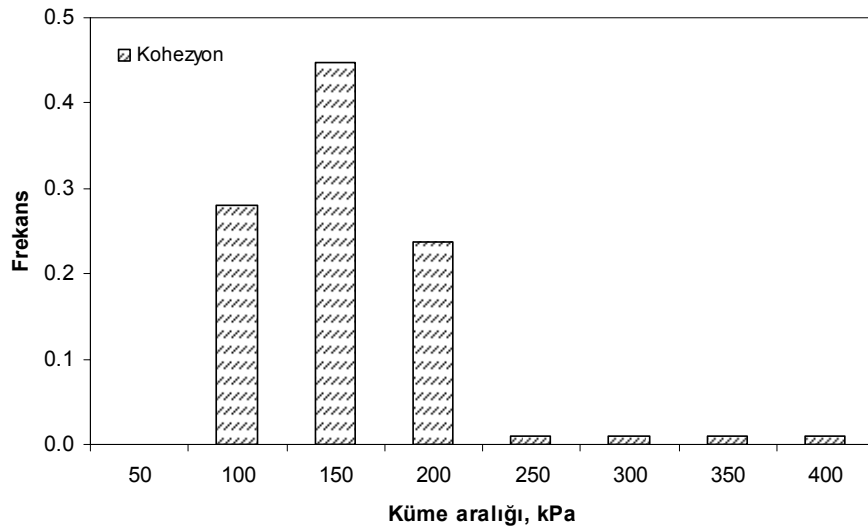
Şekil 2 - Optimum su içeriklerinin frekans histogramı



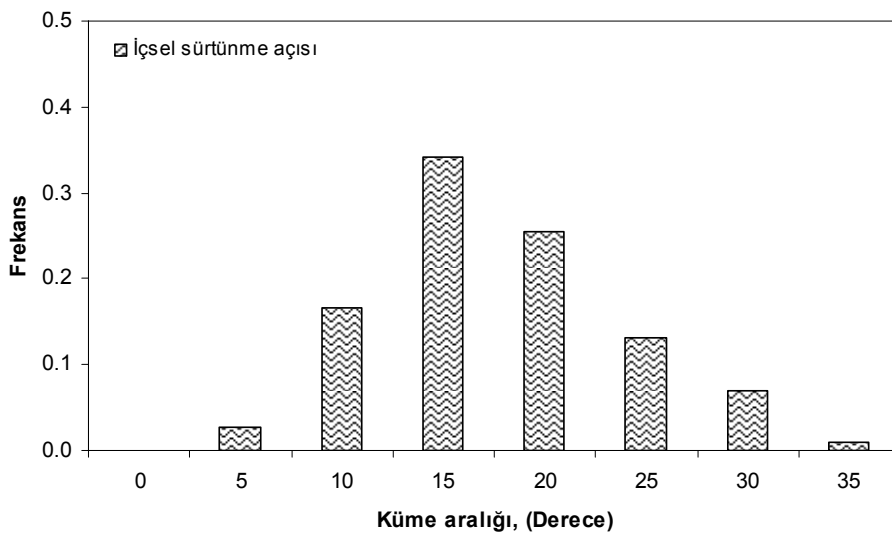
Şekil 3 - Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin frekans histogramı



Şekil 4 - Kohezyon değerleri ile içsel sürtünme açıları arasındaki ilişki



Şekil 5. Kohezyon değerlerinin frekans histogramı



Şekil 6 - İçsel sürtünme açısı değerlerinin frekans histogramı

Şekil 6 incelendiğinde ise, deney numunelerinin büyük bir çoğunluğunun (yaklaşık % 90'nının) içsel sürtünme açısı değerlerinin 10° ile 30° aralığında değişmektedir. Ayrıca içsel sürtünme açısının 15° civarında yoğunlaştığı Şekil 4'ten açıkça görülmektedir.

5 DRENAJSIZ KAYMA MUKAVEMET PARAMETRELERİNİN KOMPAKSİYON KARAKTERİSTİKLERİ İLE DEĞİŞİMİ

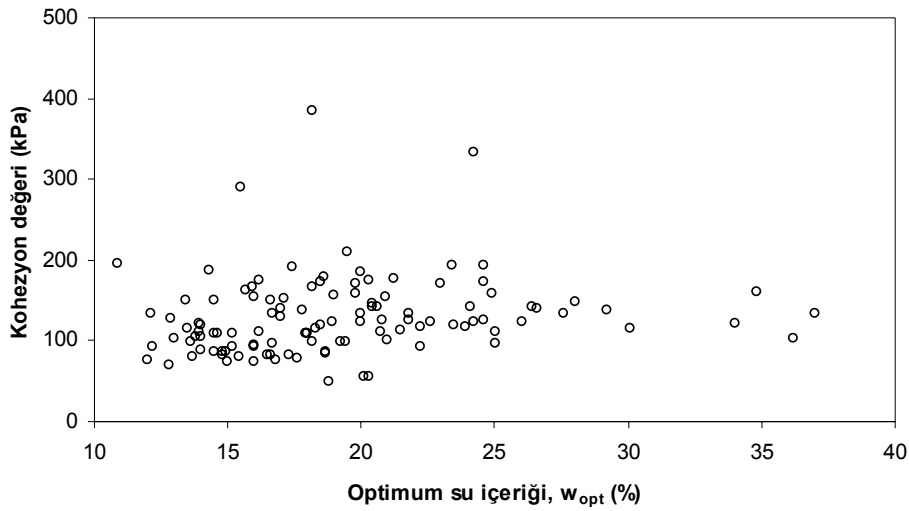
5.1 Kohezyon değerinin sıkıştırma karakteristikleri ile değişimi

Çalışma kapsamında değerlendirilen numunelerin kohezyon değerlerinin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ile değişimi Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde,

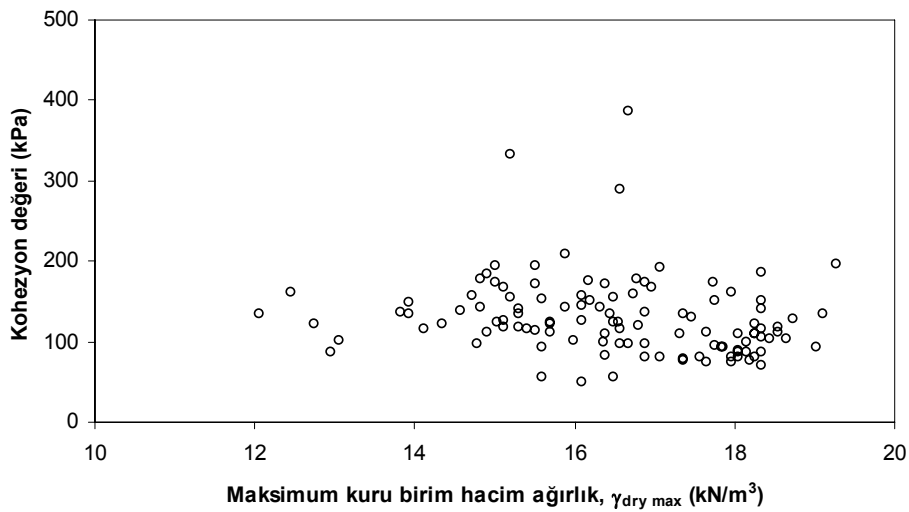
kohezyon değeri ile optimum su içeriği veya maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri arasında belirgin bir ilişkinin olmadığı açıkça görülmektedir.

5.2 İçsel sürtünme açısının sıkıştırma karakteristikleri ile değişimi

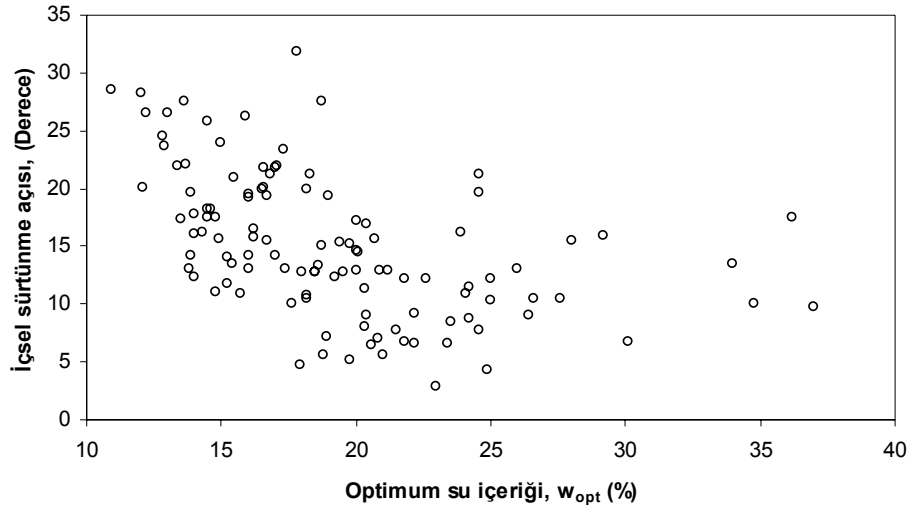
Numunelerin içsel sürtünme açısı değerlerinin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ile değişimi Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 9'a göre optimum su içeriği azaldıkça içsel sürtünme açısının da azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Fakat içsel sürtünme açısı ile optimum su içeriği arasında yüksek korelasyonlu herhangi bir bağıntı kurulamamıştır.



Şekil 7 - Numunelerin kohezyon değerlerinin optimum su içeriği ile değişimi



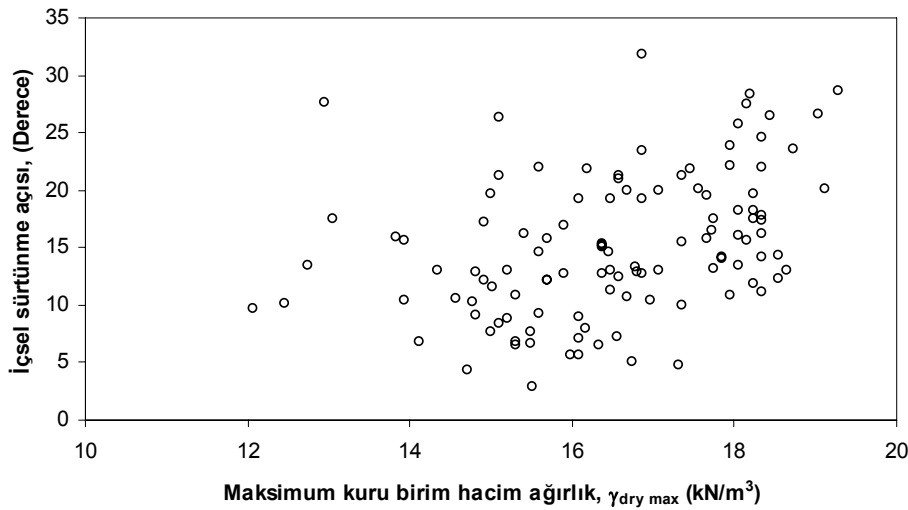
Şekil 8 - Numunelerin kohezyon değerlerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ile değişimi



Şekil 9 - Numunelerin içsel sürtünme açılarının optimum su içeriği ile değişimi

Diğer yandan Şekil 10 incelendiğinde, çok belirgin olmamakla beraber maksimum kuru birim hacim ağırlık artışıyla içsel sürtünme açısı artma eğilimindedir. İçsel sürtünme açısıyla

maksimum kuru birim hacim ağırlık arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki mevcut değildir.



Şekil 10 - Numunelerin içsel sürtünme açılarının maksimum kuru birim hacim ağırlık ile değişimi

6 SONUÇ

DSİ Bölge Müdürlükleri tarafından değişik tarihlerde DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü Laboratuvarına gönderilen gölet veya sulama kanal projelerine ait 114 adet numunenin sıkıştırma karakteristikleri ve drenajsız kayma dayanımı parametreleri incelenmiştir. Elde

edilen bulgular ve yapılan öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su içeriği arasında birinci dereceden yüksek korelasyonlu ($R^2 \approx 0,85$) bir polinom bağıntısı ($\gamma_{dry\ max} = -0,28 \times w_{opt} + 21,86$) kurulmuştur. Yapılacak sıkıştırma deneyleri sonrasında elde edilecek optimum su içeriği ve maksimum kuru birim

hacim ağırlık değerlerinin yukarıda önerilen bağlantı ile kontrol edilmesi yazarlar tarafından önerilmektedir.

- 2) Sıkıştırma karakteristikleri (maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği) ile drenajsız kayma dayanımı parametreleri (kohezyon değeri ve içsel sürtünme açısı) arasında herhangi bir bağlantı kurulamamıştır. Genel eğilim olarak optimum su içeriği azaldıkça veya maksimum kuru birim hacim ağırlık arttıkça içsel sürtünme açısı artma eğiliminde olmaktadır. Diğer yandan, kohezyon değerinin optimum su içeriği veya maksimum kuru birim hacim ağırlığın beraber artması yada azalmasından etkilenmemektedir.

7 KAYNAKLAR

- [1] Ahmed, S., Lovell, C. W. Jr., Diamond, S., 1974, "Pore sizes and strength of compacted clay", *American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v 100, n GT4, p 407-425.
- [2] Ajaz, A. and Parry, R. H. G., 1975, "Stress-strain behaviour of two compacted clays in tension and compression", *Geotechnique*, v 25, n 3, p 495-512
- [3] ASTM D 698-00a, (2002) "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³))", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-7, 2002.
- [4] ASTM D 2850-03a, (2002) "Standard Test Method for Unconsolidated, Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1-6.
- [5] Barden L. and Proctor D. C., 1971, "Drained strength of granular material", *Canadian Geotechnical Journal*, v 8, n 3, p 372-383.
- [6] Bowders, J. J., Loehr, J. E. and Owen, J. W., 2000, "Shear behavior of compacted silty loess", *Geotechnical Special Publication, ASCE*, n 99, 2000, p 235-246.
- [7] Das, B. M., 2001, "Principles of Geotechnical Engineering", Wadsworth Group, Brooks/Cole 511 Forest Lodge Road, Pacific Grove, CA 93950 USA, pp. 589.
- [8] Ebels, L.J., Lorio, R. and Van Der Merwe, C., 2004, "The importance of compaction from an historical perspective", *23rd Annual Southern African Transport Conference, SATC 2004: Getting Recognition for the Importance of Transport*, Jul 12-15 2004, Pretoria, South Africa, p 34-42.
- [9] Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 2002 "Geoteknik Mühendisliğine Giriş", Çeviren: Kamil Kayabalı, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 723, 105-159.
- [10] Rampino, C., Mancuso, C. and Vinale, F., 2000, "Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil", *Canadian Geotechnical Journal*, v 37, n 4, p 748-763
- [11] Rivard, P. J. and Goodwin, T. E., 1978, "Geotechnical characteristics of compacted clays for earth embankments in the prairie provinces", *Canadian Geotechnical Journal*, v 15, n 3, p 391-401.
- [12] Wong, I. H.; Abdelhamid, M. S. and Fischer, J. A., 1978, "Compaction and cyclic shear strength of granular backfill", *Proc of the ASCE Geotech Eng Div Spec Conf, Earthquake Eng and Soil Dyn*, Jun 19-21 1978, Pasadena, Calif, n 2, p 1042-1055.

TEKRARLI YÜKLER ALTINDA NORMAL KONSOLİDE KİLLERİN DRENAJSIZ KAYMA MUKAVEMETİ

Hayreddin ERŞAN
Dr., DSİ Proje ve İnşaat Dairesi Başkanlığı 06100 Yüce-tepe Ankara
hayrettin@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 21.11.2008, Bildirinin kabul tarihi: 29.12.2008)

ÖZET

Bu çalışmada normal konsolide killerin gerilme-deformasyon ve tekrarlı yükleme sonrası mukavemetindeki değişim deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak konsolidasyonlu, drenajsız tekrarlı ve statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Çamur konsolidasyon aletinde hazırlanan numuneler, beş kez tekrarlı yükleme ve her bir tekrarlı yüklemeden sonra 60 dakika drenaja maruz bırakılmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneyler, farklı gerilme genliği ve çevrim sayılarında yapılmıştır. Numuneler beşinci drenajdan sonra drenajsız olarak statik koşullarda kesilmiştir. Çalışma sonunda, tekrarlı yük ve drenaja maruz kalan yumuşak killerin daha sonra etkiyecek drenajsız tekrarlı yüke daha fazla direnç gösterdiği görülmüştür. Tekrarlı yükleme sonrası meydana gelen konsolidasyon oturmaları, boşluk basınçları ve kayma deformasyonları her kademe tekrarlı yüklemekten sonra biraz daha azalmış, drenajsız kayma mukavemetleri ise gerilme genliği ve çevrim sayısına bağlı olarak artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Normal konsolide kil, tekrarlı yükleme, boşluk suyu basıncı, kayma mukavemeti

UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF NORMALLY CONSOLIDATED CLAYS UNDER CYCLIC LOADS

ABSTRACT

In this study, stress-strain and undrained shear strength after cyclic loading were experimentally investigated. For this purpose, consolidated and undrained cyclic and static tests were performed by using cyclic simple shear testing device. The samples prepared in a slurry consolidometer were subjected to five times cyclic loading and drainage for 60 minutes after every cyclic loading. Cyclic tests were performed with different stress levels and number of cycles. The samples were sheared statically under undrained conditions after fifth cyclic loading. As a result of experimental study, it can be concluded that normally consolidated clays subjected to undrained cyclic loading and drainage are more resistant to undrained cyclic loadings that can be applied afterwards. The consolidation settlements, pore water pressure and shear strains of the specimens subjected to undrained cyclic loading and drainage decreases after each stage of loading. The consolidation settlements, pore pressures and shear strains decreases after each stage of cyclic loading. However, undrained shear strength increases with increasing shear stress ratio and number of cycles.

Key Words: Normally consolidated clay, cyclic loading, pore water pressure, shear strength

1 GİRİŞ

İstisnai durumlar dışında, yapının ağırlığı tek başına temelin taşıma gücü açısından probleme neden olmaz. Temel, tekrarlı yükler altında deforme olabilir ve yapı, düşey oturmalarındaki kademeli artışla birlikte yatay yer değiştirmelere maruz kalabilir. Tekrarlı yükler altındaki temelin davranışı, kısa süreli ve uzun

sürelili olarak ikiye ayrılabilir. Tekrarlı yükleme, zeminde boşluk suyu basınç artışları oluşturur. Kısa süreli durumda drenaj oluşması için yeterli zaman olmadığından zeminin drenajsız olduğu varsayılır. Uzun süreli durumda ise drenaj oluşacaktır [1]. Kısa süreli durumda tekrarlı yükleme esnasında zamanla zeminin rijitliği ve drenajsız kayma mukavemeti

azalır [2]. Bunun nedeni tekrarlı yüklemelerden oluşan boşluk suyu basınç artışlarının efektif gerilmelerde azalmaya yol açmasıdır. Rijitlik ve mukavemetin azalması sonucunda tekrarlı yer değiştirmeler ve düşey oturmalar kademeli olarak artar, taşıma gücü güvenliği kısa dönemde zamanla azalır.

Drenajın takip ettiği tekrarlı yüklemeler, zeminin rijitliğini ve daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı göstereceği direnci de etkiler. Kumlar, önceden tekrarlı yükleme ve drenaja maruz kaldıklarında çok sıkı bir durumda bile olsa drenajsız tekrarlı yüklemelerden oluşan boşluk basıncı oldukça küçüktür [3]. Normal konsolide killerde de ön yüklemelerden dolayı boşluk basınçları benzer şekilde küçük olur. Fakat aşırı konsolide killerde büyük miktar boşluk basınçları oluşur [1]. Tekrarlı yüklerle karşı killerin kumlardan daha büyük direnç gösterdiği bilinmektedir. Örneğin killer tekrarlı yükler altında kolaylıkla göçmezken suya doygun gevşek kumların sismik yükler altında sıvılaşması söz konusudur. Kil için bu durum, depremde olduğu gibi kısa süreli tekrarlı yükleme durumunda doğrudur.

Bununla beraber kil uzun süre tekrarlı yük ve drenaj çevrimlerine maruz kalırsa durum farklı olur, iki drenajsız tekrarlı yükleme arasında drenaj meydana gelir. Tekrarlı yük ve sonrasında drenaj uygulanarak yapılan çalışmalarda deformasyon sertleşmesinden dolayı normal konsolide killerin daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklerle karşı göstereceği direnç artarken bu durumun aşırı konsolide killerde her zaman gerçekleşmeyeceği görülmüştür [4]. Brown ve diğerleri [5] yapmış oldukları deneylerde, numuneye uygulanan tekrarlı yük ve drenaj çevrimlerinin normal konsolide killerin drenajsız kayma mukavemetinde % 49'a ulaşan artışa neden olduğu görülmüştür. Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli drenajsız tekrarlı yükleme, zeminin dane yapısında kırılma ve efektif gerilmede de azalmaya neden olur. Bu durum zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğinde bozulma meydana getirir. Tekrarlı yüklemeler arasında drenajın olduğu okyanus dalgaları gibi uzun süreli durumlarda normal konsolide zeminlerin mukavemetinde daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı iyileşme olur [6]. Geçmişte kil zeminlerde depremler, fırtına dalgalarına maruz açık deniz yapıları ve trafik yükleri altındaki yol kaplamaları ve demiryolu dolguları gibi tekrarlı yüklemelerden kaynaklanan birçok oturma ve stabilite problemleriyle karşılaşmış olmasına rağmen bu konuda az sayıda sistemli çalışma yapılmıştır [4].

2 AMAÇ

Zeminler, deprem, açık deniz dalgaları, yüksek binalara etkiyen rüzgâr yükleri, makine temellerinde oluşan sürekli titreşimler, karayolu ve demiryolunun maruz kaldığı yükler gibi çok farklı tekrarlı yüklerle periyodik aralıklarla maruz kalabilir. Bu tür yükler altında zeminin ve bu zeminin üzerindeki yapıların davranışı, kesme kuvvetleri altında zeminin gösterdiği gerilme-deformasyon özelliklerine büyük oranda bağlıdır. İnşaat mühendisliği yapıları ve onların temellerinin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için temel zeminine ait gerilme-deformasyon özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu da amaçla tekrarlı yüklerin farklı gerilme ve yükleme durumlarının laboratuvarında detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirir.

Bu çalışmada, periyodik aralıklarla zemine ve üzerindeki yapıya etkiyen tekrarlı yüklerin model edildiği yükleme ve gerilme durumlarını da içeren deney programı uygulanmıştır. Zeminin tekrarlı yükler altında davranışı, tekrarlı yüklemeler sonunda uygulanan drenajın daha sonraki tekrarlı yükler altındaki davranışa etkileri, uygulanan drenaj nedeniyle oluşan konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonunda drenajsız kayma mukavemetindeki değişimler incelenmiştir. Bütün deneylerde tekrarlı yükleme sırasında düşey deformasyon, yatay deformasyon, yatay yük ve boşluk suyu basıncı, yükleme sonrasındaki drenaj sırasında ise oluşan konsolidasyon oturması gibi değişkenler ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve değişkenlerin birbirine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir.

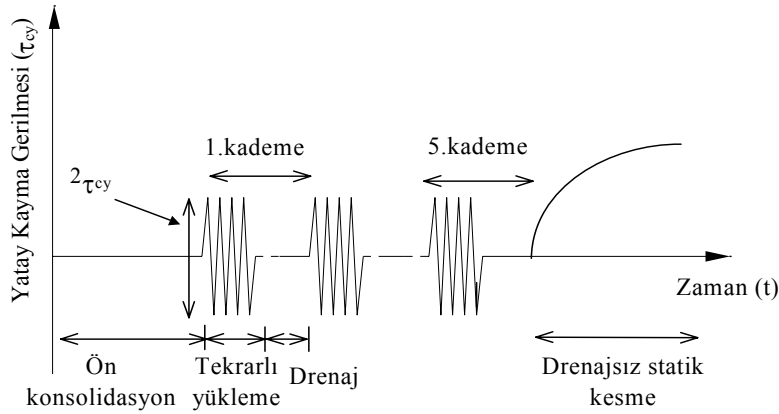
3 LABORATUVAR ÇALIŞMASI

Çalışmada likit limiti % 73, plastik limiti % 25, plastisite indisi 48 ve dane birim hacim ağırlığı $26,4 \text{ kN/m}^3$ olan yüksek plastisiteli kil kullanılmıştır. Numuneler arazideki gerilme durumunu model edebilmek için K_0 şartlarında çamur konsolidasyon aletinde konsolide edilerek hazırlanmıştır. Kuru, toz haline getirilmiş zemin likit limitin 2 katı su muhtevasında homojen bir çamur elde etmek için karıştırılmıştır. Düşey yük 25 kPa'dan başlayarak her defasında önceki düşey yükün iki katı olacak şekilde artırarak 100 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir. Bunun nedeni zeminin heterojenlik, gerilme geçmişi, su muhtevası değişimi ve başlangıç yapı gibi faktörleri minimize etmektir. Bu yöntem, homojen ve aynı özellikte çok sayıda numune hazırlanmasına imkân vermektedir [7].

Dinamik basit kesme hücresine yerleştirilen numuneler ön konsolidasyon basıncından biraz

daha yüksek efektif düşey gerilme altında kademeli bir şekilde konsolide edilmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra numunelere daha önce belirlenen çevrim sayısı ve gerilme seviyesinde drenajsız koşullarda tekrarlı yük uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeyi takiben drenaja izin verilmiş ve tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçları sönümlenmiştir. Numunelere beş kez tekrarlı yük uygulanmış, yükleme esnasında meydana gelen boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için her yükleme arasında genellikle 60 dakika drenaj uygulanmıştır. Daha sonra drenaj vanaları kapatılarak konsolidasyon esnasında sönümlenen boşluk suyu basınçlarında herhangi bir değişim olup olmadığı gözlenmiştir. Tekrarlı yükleme esnasında efektif gerilmeye göre yüksek boşluk suyu basınçlarının oluştuğu

birkaç deneyde drenaj süresi sonunda drenaj vanaları kapatıldığında boşluk suyu basıncında hala küçük miktar artış görülmüştür. Bu deneylerde boşluk suyu basınçları sönümlenmesi amacıyla drenaj süresi daha uzun tutulmuştur. Çalışmada uygulanan deneysel prosedür Şekil 1'de şematik olarak verilmiştir [8]. Her tekrarlı yükleme esnasında yatay yük, yatay deformasyon, düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı kaydedilmiştir. Deneylerde numunelere $N=50, 60, 80, 90, 100$ ve 120 olan çevrim sayısı ve $\tau/\tau_f=0,55, 0,60, 0,65$ ve $0,70$ gibi farklı gerilme oranlarında yatay kayma gerilmeleri uygulanmış, tekrarlı yükleme periyodu 10 sn olarak sabit tutulmuştur. Yapılan 23 deneye ait yüklemeye koşulları Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1 - Deney numunelerine uygulanan yüklemeye modeli

Çizelge 1 - Çalışmada uygulanan deney koşulları

Deney no	Çevrim sayısı, N	Tekrarlı gerilme oranı, τ/τ_f	Düşey efektif gerilme, σ'_v (kPa)
A1	5x50	0,55	120
A2		0,60	120
A3		0,65	120
A4		0,70	120
A5	5x60	0,55	120
A6		0,60	120
A7		0,65	120
A8		0,70	120
A9	5x80	0,55	120
A10		0,60	120
A11		0,65	120
A12		0,70	120
A13	5x90	0,55	120
A14		0,60	120
A15		0,65	120
A16		0,70	120
A17	5x100	0,55	120
A18		0,60	120
A19		0,65	120
A20		0,70	120
A21	5x120	0,55	120
A22		0,60	120
A23		0,65	120

4 DENEY SONUÇLARI

Aşağıda suya doygun bir kilin çok kez tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalması durumunda, boşluk basıncı, kayma deformasyonu, konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonundaki drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme genliğiyle değişimi incelenmiştir.

4.1 Boşluk Suyu Basıncı Davranışı

Şekil 2'de farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarında boşluk basınçlarının değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi artan çevrim sayısı ile boşluk suyu basınçlarında da artışlar meydana gelmiştir. Şekil 3 ise yine farklı çevrim sayısı ve farklı tekrarlı kayma gerilme seviyelerinde yapılan deneylerden elde edilmiş olup gerilme seviyesine bağlı olarak boşluk suyu basıncının değişimini göstermektedir. Çevrim sayısının etkisi gerilme oranında da görülmekte olup artan gerilme seviyesi ile boşluk suyu basınçlarında da artışlar meydana gelmektedir. Boşluk suyu basınçları numune alt başlığı üzerinde bulunan bir boşluk suyu basıncı ölçerle ölçülmüştür.

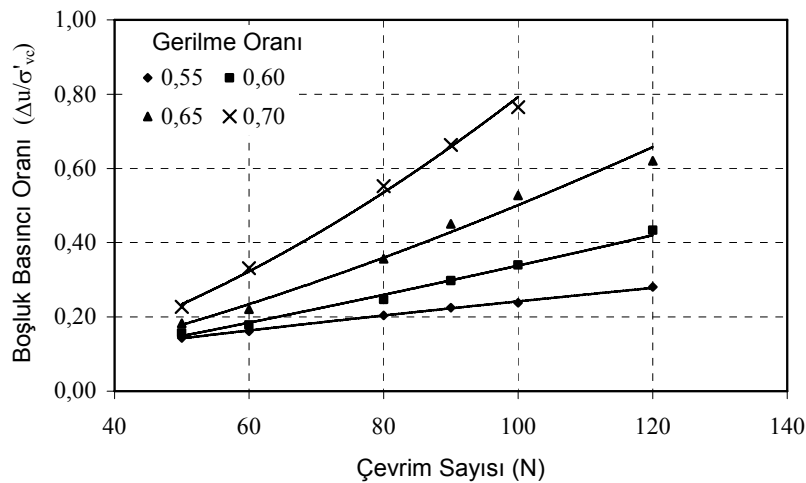
4.2 Kayma Deformasyonu Davranışı

Kayma deformasyonu ile boşluk suyu basıncında görülen davranış benzerlik göstermektedir. İlk kademe tekrarlı yükleme esnasında en büyük kayma deformasyonu görülmektedir. Tekrarlı yüklemelerden sonra uygulanan drenaj nedeniyle boşluk basınçlarının sönümlenmesi ve oluşan konsolidasyon oturmaları zeminin daha sonraki tekrarlı yüklere karşı daha dirençli olmasına ve meydana gelen kayma deformasyonlarının her kademe biraz daha azalmasına yol açmakta, kayma modülünde artışlar meydana gelmektedir.

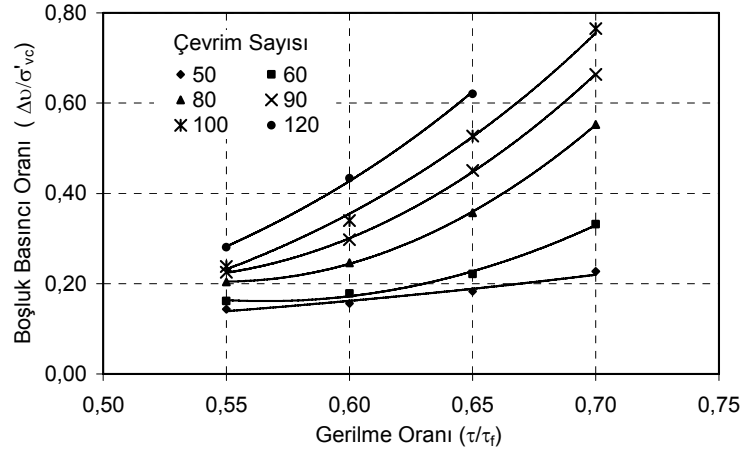
Farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarında yapılan deneylerden elde edilen deformasyonların çevrim sayısı ve gerilme oranıyla değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Zeminlerin maruz kaldığı tekrarlı yükün genliği ve çevrim sayısı diğer davranışlarda olduğu gibi kayma deformasyonlarında da etkisini göstermektedir. Her iki değişkenin etkisi, kayma deformasyonlarında artış şeklinde olmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi gerilme genliğinin ve çevrim sayısının artmasıyla kayma deformasyonlarında önemli artışlar meydana gelmektedir. Tekrarlı gerilme oranına göre kayma deformasyonlarının değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil üzerinde çevrim sayılarının etkisi de gösterilmiştir. Şekilden, gerilme oranı arttıkça kayma deformasyonlarının da arttığı görülmektedir.

4.3 Konsolidasyon Oturmaları

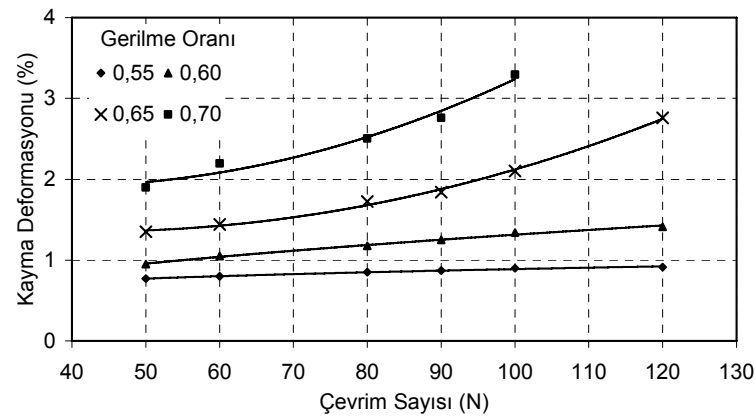
Tekrarlı yüklerin uygulandığı kısa süre içinde, killerin düşük permeabilitesi nedeniyle drenajsız koşullar hakim olmaktadır. Tekrarlı yüklemelerden sonraki uzun dönemde ise, zamanla artık boşluk suyu basıncı sönümlenir ve kil zeminin boşluk oranı azalır, zeminde dikkate değer oturmalar meydana gelir. Tekrarlı yüklerin uygulanması ile oluşan boşluk suyu basınçları nedeniyle efektif gerilmelerde azalma meydana gelmektedir. Drenajlar açılarak efektif gerilmelerin artarak başlangıç değerine ulaşması esnasında zeminde oturmalar oluşmaktadır. Farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarındaki ilk kademe tekrarlı yüklemeler sonunda meydana gelen oturmaların değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi hacimsel deformasyonların büyüklüğüne etki eden iki önemli değişken çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı olmaktadır..



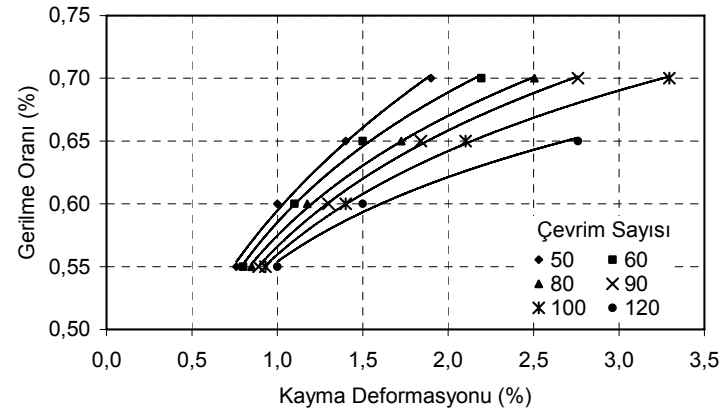
Şekil 2 - Çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarına etkisi



Şekil 3 - Gerilme oranının boşluk suyu basınçlarına etkisi



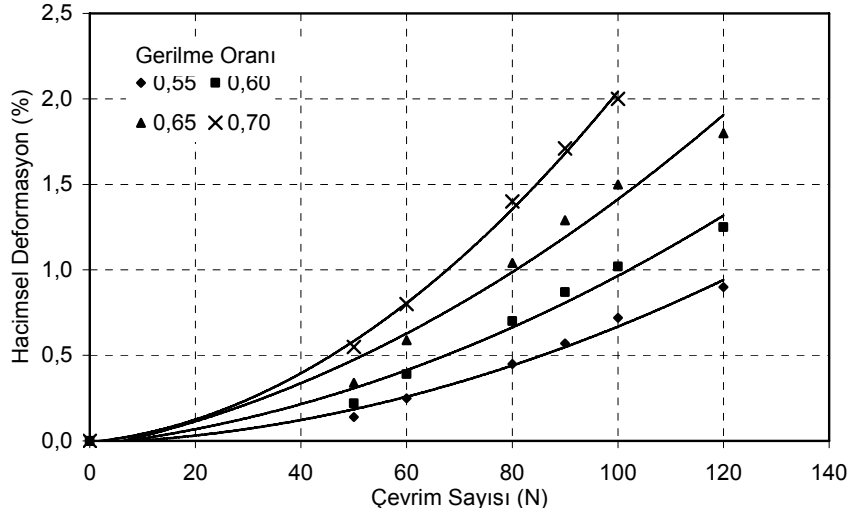
Şekil 4 - Kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi



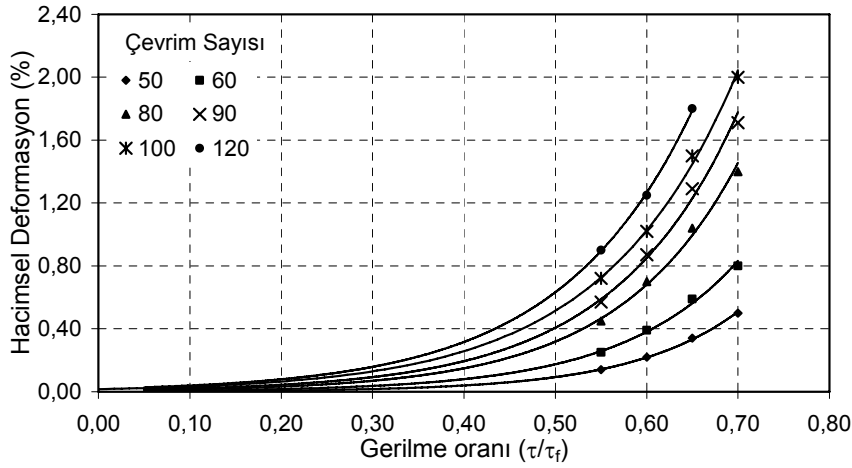
Şekil 5 - Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi

Çevrim sayısının artmasıyla oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Görüldüğü gibi deney özelliklerindeki her değişiklik tekrarlı yükten kaynaklanan oturmalarda da önemli değişikliklere neden olmaktadır. Şekil 7'de ise tekrarlı kayma gerilmelerinden dolayı zeminde oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesiyle oluşan konsolidasyon oturmalarının gerilme genliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi

deneylerde kullanılan gerilme oranlarının altındaki gerilme oranlarında oturmalar çok düşük olmaktadır. Gerilme oranının artmasıyla birlikte oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Numuneye uygulanan çevrim sayılarının artmasıyla ise oturma eğrisinin eğimi sürekli artmaktadır. Bu iki şekilde deneylerin ilk kademe tekrarlı yüklemelerden sonra oluşan oturma değerleri kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 6 - Hacimsel deformasyonların çevrim sayısı ile değişimi

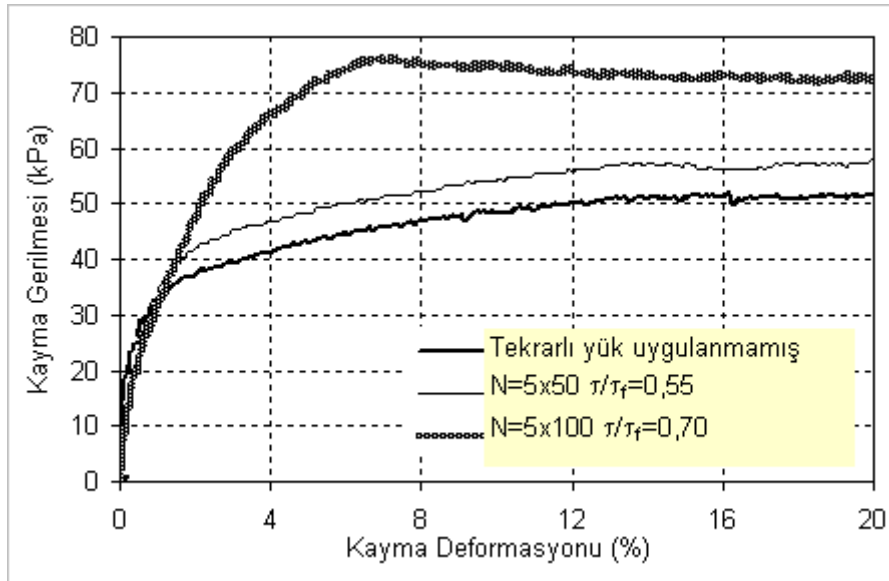


Şekil 7 - Hacimsel deformasyonların gerilme oranı ile değişimi

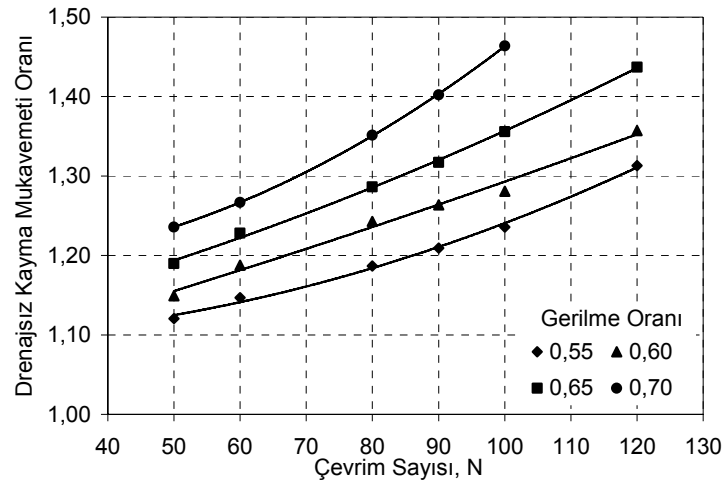
4.4 Drenajsız Kayma Mukavemeti Değişimi

Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış kil numuneler üzerinde yapılan drenajsız statik deneylerden elde edilen bir grup gerilme-deformasyon eğrisi Şekil 8'de verilmiştir. En yüksek drenajsız kayma mukavemeti artışı, A20 deneyinde % 46,4, en düşük drenajsız kayma mukavemeti artışı ise A1 deneyinde % 12,1 olarak elde edilmiştir. Şekil 9'da drenajsız kayma mukavemetlerinin çevrim sayısına bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tekrarlı yükleme sonrasında drenaj uygulanmış deneylerde çevrim sayısının artmasıyla numunelerde oluşan boşluk suyu basınçlarının ve dolayısıyla toplam oturmalarında artması drenajsız kayma mukavemetlerinde de önemli artışlar meydana

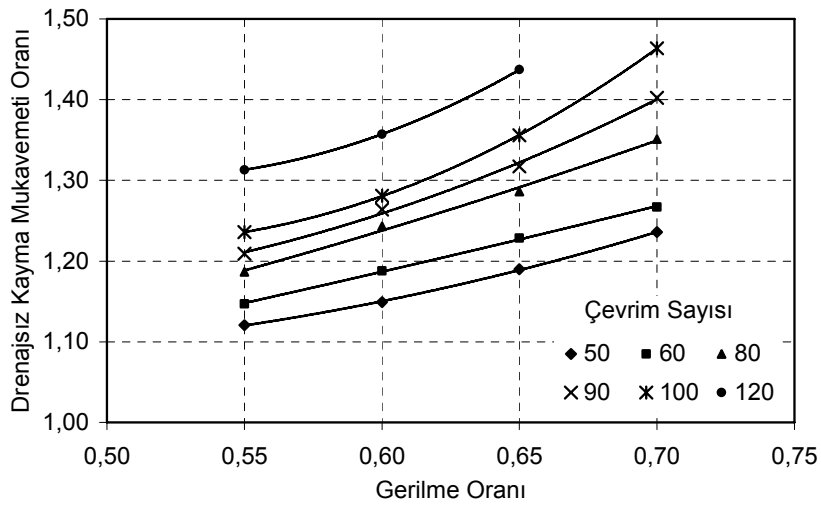
getirmiştir. 5x50 çevrim uygulanan numunelerin drenajsız kayma mukavemetindeki maksimum artış % 23,4 iken çevrim sayısının 5x90 olduğu numunelerdeki maksimum artış % 40,2 ve 5x120 çevrim sayısındaki artış % 43,7 olmuştur. Drenajsız kayma mukavemetindeki en büyük artış çevrim sayısının N = 100 ve tekrarlı gerilme oranının $\tau/\tau_f = 0,70$ olduğu numunede % 46,4 olarak görülmüştür. Şekil 10'da tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişimin tekrarlı gerilme oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi çevrim sayısının artmasıyla ortaya çıkan etki gerilme oranlarının artmasıyla da görülmüştür.



Şekil 8 - Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerilme deformasyon eğrileri



Şekil 9 - Drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ile değişimi



Şekil 10 - Drenajsız kayma mukavemetinin gerilme oranı ile değişimi

5 SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Normal konsolide killerde drenajla birlikte uygulanan tekrarlı yükler altında giderek daha az boşluk suyu basınçları oluşmakta ve oluşan boşluk suyu basınçları sönmölenirken meydana gelen oturmalarda her kademedede biraz daha azalmaktadır.
2. Tekrarlı gerilme genliğinin artmasıyla daha fazla boşluk basınçları oluşmakta ve bu basınçlar sönmölenirken oturmalarında daha fazla olduğu görölmektedir.
3. Çevrim sayısı da zeminin davranışını etkileyen önemli değişkenlerdendir. Tekrarlı gerilme genliğinde olduğu gibi çevrim sayısının artmasıyla meydana gelen boşluk basınçlarında ve tekrarlı yük sonrası drenaj süreçlerinde konsolidasyon oturmalarında artış meydana gelmektedir.
4. Tekrarlı yükler altında zeminde meydana gelen oturmalar, zeminin daha sonra maruz kalacağı yüklere karşı konsolidasyon davranışını değiştirmekte, sıkışma indisi tekrarlı gerilme genliğine bağlı olarak azalmaktadır.
5. Killerde tekrarlı kayma gerilmeleri etkisinde oluşan kayma deformasyonları aynı boşluk basınçlarında olduğu gibi her kademedede bir önceki yüklemde oluşan kayma deformasyonlarına göre azalma meydana gelmekte, gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi artmaktadır. Tekrarlı gerilme genliği ve çevrim sayısı kayma deformasyonlarının büyüklüğünü belirleyen önemli değişkenlerdir.
6. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerinden sonra uygulanan drenaj esnasında zemindeki oturmalar, normal konsolide zeminin drenajsız kayma mukavemetinde çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak % 12,1 - % 46,4 arasında değişen oranlarda artışa neden olmuştur.

6 KAYNAKLAR

- [1] Andersen, K.H., "Behaviour of Clay Subjected to Undrained Cyclic Loading", Proceedings Conference On Behaviour of Off-Shore Structures, Trondheim, August 1976.
- [2] Bjerrum, L., "Geotechnical Problems Involved in Foundations of Structures in North Sea", Geotechnique, 1973.

- [3] Brown, S.F., Andersen, K.H. ve McElvaney, J., "The Effects of Drainage on Cyclic Loading of Clay", Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo 1977.
- [4] Özaydın, K. ve Erguvanlı, A., "The Generation of Pore Pressures in Clayey Soils During Earthquakes", Proceedings of the 7th World Conference on Earth Engineering, İstanbul 1980.
- [5] Seed, H.B., "Landslides During Earthquakes due to Liquefaction", Proceedings American Society of Civil Engineers, 1968.
- [6] Yasuhara, K., "Postcyclic Undrained Strength for Cohesive Soils", Journal of Geotechnical Engineering, 1994.
- [7] Yasuhara, K. and Andersen, K.H., "Post-cyclic Recompression Settlement of Clay", Proceedings 4th International Conference Soil Dynamics and Earthquake Engineering, October 1989.
- [8] Yasuhara, K., Hirao, K. ve Hyde, A.F.L., "Effects of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay", Soils and Foundations, 1992.