



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

**Metro Tünellerinde Su Yalıtım Problemlerinin Çözümü
ve Yer Altı Sularının Değerlendirilmesi**

Yüksek Lisans Tezi

İhsan Can Güvenç

Ekim 2024



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

**Metro Tünellerinde Su Yalıtım Problemlerinin Çözümü
ve Yer Altı Sularının Değerlendirilmesi**

Yüksek Lisans Tezi

İhsan Can Güvenç

Danışman

Doç. Dr. Mücahit Namlı

Ekim 2024

TEZ JÜRİSİ ONAYI

İhsan Can Güvenç tarafından hazırlanan "Metro Tünellerinde Su Yalıtım Problemlerinin Çözümü ve Yer Altı Sularının Değerlendirilmesi: İstanbul Medeniyet Üniversitesi Örnek Çalışması" başlıklı bu Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mücahit Namlı

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Doç. Dr. Fatih Özalp

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Doç. Dr. Yavuz Selim Güçlü

İstanbul Teknik Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 02.10.2024

BEYANLAR

Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı

Danışmanlığımda yazılan bu tezin APA yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir

İmza

Doç. Dr. Mücahit Namlı

Etik İlkeler Sadakat Beyanı

Hazırladığım bu tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

İhsan Can Güvenç

ÖZET

Metro Tünellerinde Su Yalıtım Problemlerinin Çözümü ve Yer Altı Sularının Değerlendirilmesi

İhsan Can Güvenç

Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mücahit Namlı

Ekim 2024

Bentonit, özellikle montmorillonit minerali içeren bir doğal bir kil türüdür. Kullanım alanlarına göre çeşitli avantajları vardır. Bu tez çalışmasında; tünel delme makinesiyle (TBM) açılan tünellerde tünel çeperini oluşturan segment taşlarının arkasına dolgu malzemesi olarak uygulanan çimento katkı enjeksiyon harcına su emme kapasitesi yüksek olan %7, %9, %12 ve %15 oranlarında Sodyum (Na) esaslı bentonit eklenerek çimento harçları hazırlanmıştır. Elde edilen bentonit içeren çimento karışımlarından küp numuneler hazırlanmış ve 28 gün su içerisinde bekletilerek çimento harçlarının nihai dayanım kazanması sağlanmıştır. Hazırlanan küp numuneler 3 gün süreyle 5 bar su basıncına maruz bırakılmıştır. Test sonrası numuneler yarma-çekme testine tabi tutularak numune içerisindeki suyun iletimi kontrol edilmiştir. Çimento harcı içerisindeki bentonit miktarı arttıkça harcın suya karşı daha geçirimsiz hale geldiği tespit edilmiştir. Karışımlar arasında %15 bentonit katkı çimento harcı karışımının su geçirimsizliğinin en fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre bentonitin harç içerisindeki boşluklara tutunarak suyu emdiği değerlendirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak bentonit içeren çimento harçlarının su emme ve bazı mekanik özellikleri de incelenmiştir. TBM tünellerinde uygulanan çimento esaslı overcut (segment arkasında kalan kazı fazlası boşluk) enjeksiyon harçlarının dolgu amaçlı olması ile birlikte su geçirimsizliğini azaltması da amaçlanmaktadır. Yapılan testlerden anlaşıldığı üzere TBM tünellerinde suyun hiçbir zaman tam olarak kesildiği kabul edilemez ve sızıntı sularının debisinin minimum olması amaçlanır. Bu nedenle çıkan sızıntı suları toplanması ile sisteme geri kazandırılarak su arzının sağlanması, akan sızıntı sularının debisinin belirlenmesi, depolanması ve ihtiyaçlar dahilinde kullanılabilmesi için bu tez çalışması kapsamında çeşitli önerilerde de bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, Çimento Esaslı Dolgu Harcı, Tünel içi sızıntı sularının toplanması, Su tasarrufu

ABSTRACT

Solutions for Water Insulation Issues in Metro Tunnels and Assessment of Groundwater

İhsan Can Güvenç

Master's Thesis, Department of Environmental and Energy Systems
Engineering

Supervisor: Assoc.Prof. Dr. Mücahit Namlı

October 2024

Bentonite is a type of natural clay containing especially the mineral montmorillonite, offering several advantages depending on its application. In this thesis, cement mortar was prepared by adding 7%, 9%, 12%, and 15% sodium-based bentonite, known for its high water absorption capacity, to cement-based injection mortar. This mortar is used as a filling material behind the segment stones that form tunnel walls in tunnels excavated with a tunnel boring machine (TBM). Cube samples were created from the resulting grout-cement mixtures and cured in water for 28 days to allow the cement to reach its final strength. These samples were then subjected to 5 bar water pressure for 3 days. Afterward, the samples underwent a splitting test to check water transmission. It was observed that water impermeability increased as the grout density in the cement mixture rose. The mixture containing 15% bentonite exhibited the highest water impermeability, indicating that bentonite absorbs water by adhering to the voids in the mortar. Additionally, a water absorption test was conducted on the bentonite-affected cement mortar, and the mechanical properties of the mortar were evaluated. The cement-based overcut injection mortars used in TBM tunnels are designed to reduce water permeability while also serving as a filling material. As the tests revealed, it is impossible to completely eliminate water leakage in TBM tunnels, so the objective is to minimize the leakage flow rate. To address this, it is proposed to collect the leakage water and return it to the system for water supply. Various recommendations are provided for determining the flow rate of leakage water, storing it, and repurposing it for necessary uses.

Keywords: Bentonite, Cement Based Filling Mortar, Collection of tunnel leakage water, Water saving

TEŐEKKÖR

Değerli görüőleri ve katkıları ile tez çalıőmamın her aőamasında desteklerini gösteren,  ğrencisi olmaktan mutluluk duyduğum, danıőmanlıęına ihtiyaç duyduğum her durumda yardımcı olan ve aynı zamanda tez danıőmanım olan saygıdeğer Doç. Dr. Mücahit NAMLI ya, lisansüstü eğitimim süresince bilgilerini esirgemeyen tüm hocalarıma ve kıymetli vakitlerini ayırdıkları için tez savunmamda bulunan tüm jüri  yesi hocalarıma teőekk r ederim.

Koőulsuz desteği ve sevgisi ile çalıőmalarımı tamamlamamda en büyük paya sahip olan eőime, en büyük motivasyon kaynağım kızım Defne'ye, yardımlarına ihtiyaç duyduğum her an desteklerini esirgemeyen, Doç. Dr. Fatih  zalp ve Arő. Gör. Mehmet Göktuğ İnayet hocalarıma ve çalışma arkadaşlarım inşaat mühendisliği son sınıf  ğrencisi Elif Dilara őanlıer ve Fatma Tüfekci'ye, sonsuz teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
İÇİNDEKİLER	i
ŞEKİLLER LİSTESİ	iii
TABLOLAR LİSTESİ	iv
KISALTMALAR.....	vi
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1 TBM Tipi Tünel Kazısı ve Segment Taşı.....	3
2.2 Çimento Esaslı Dolgu Harcı (Overcut Dolgusu)	5
2.3 Dolgu Harcının Bileşenleri.....	7
2.3.1 Çimento.....	7
2.3.2 Uçucu Kül	8
2.3.3 Kum	10
2.3.4 Su.....	10
2.3.5 Kimyasal Katkı Maddeleri	10
2.3.5.1 Akışkanlaştırıcı Katkılar	11
2.3.5.2. Su Geçirimsizliği Sağlayan Katkılar	12
2.3.6 Bentonit	13
2.3.6.1.Bentonitin Kullanım Alanları	15
2.4 Dünya'daki ve Türkiye'deki Su Potansiyeli ve Dağılımı	15
2.4.1 Dünya'daki Su Potansiyeli	15
2.4.2 Dünya'da Su Kullanımı	17
2.4.3 Türkiye'deki Su Potansiyeli	18
2.4.4 Türkiye'de Su Kullanımı	18
2.5 Yağmur Suyu	19
2.5.1 Yağmur Suyu Hasadı.....	19
2.5.2 Geçmişten Günümüze Su Hasadı	20
2.5.3 Yağmur Suyu Hasadı Teknikleri.....	21
2.5.3.1 Mikro Havza Yöntemleri.....	21
2.5.3.2 Makro Havza Yöntemleri	21

2.6 Tünel İçi Sızıntı Sularının Geri Kazanımı	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1 Materyal.....	27
3.1.1 Çimento.....	27
3.1.2 Bentonit.....	29
3.1.3 Kum.....	29
3.1.3.1 Kumun Özellikleri	30
3.1.4 Uçucu Kül	31
3.1.5 Akışkanlaştırıcı Katkı Malzemesi.....	31
3.1.5.1 Kullanım Yerleri	32
3.1.5.2. Avantajları	32
3.1.5.3. Diğer Katkı Malzemeleri ile Uyumu	33
3.1.5.4 Karıştırma ve Dozaj.....	33
3.1.5.5 Teknik Özellikleri	33
3.2 Yöntem.....	34
4.BULGULAR.....	34
4.1 Çimento Harcı Denemeleri	34
4.1.1 Yarmada Çekme Testi	34
4.1.2 Sertleşmiş Betonda Basınç Altında Su İşleme Derinli	35
4.1.2.1 Uçucu Kül İlaveli Hazırlanan Grout Çimento Karışımı	37
4.1.2.2 Uçucu Kül İlavesiz Hazırlanan Grout Çimento Karışımı.....	38
4.1.3 Sertleşmiş Betonda Su Emme Testi	40
4.2 Sızıntı Sularının Değerlendirilmesi	44
4.2.1 Metrolarda Yağmur Suyu Hasadı.....	44
4.3.2 Yeşil Alan m ² Hesaplanması	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKÇA	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Tünel Delme Makinesi (TBM) Örneği	3
Şekil 2 Segment Taşı Örneği.....	4
Şekil 3 Tünel İçi Kesit ve Segment Taşı Dizilimi	7
Şekil 4 SEM Mikroskopu Bentonitli Çimento Harcı içerisindeki Görüntüsü ..	14
Şekil 5 Dünyadaki Suyun Dağılımı	16
Şekil 6 Su Kaynaklarının Dünyadaki Dağılımı.....	16
Şekil 7 Küresel Fiziksel ve Ekonomik Su Kıtlığı Haritası (WWAP, 2012)	17
Şekil 8 Havzalarda Kişi Başına Düşen Su Potansiyeli (Muluk vd, 2013).....	18
Şekil 9 Makro Havza Su Hasadı (Oweis vd.2001).....	22
Şekil 10 NATM Tipi Tünelde PVC Membran Uygulaması.....	24
Şekil 11 TBM ve NATM Tipi Tünel Birleşim Kesiti PVC Membran Uygulaması	24
Şekil 12 Agregat Eleme Analizi (2020)	31
Şekil 13 Yarmada Çekme Deney Görseli	35
Şekil 14 Basınçlı Su Geçirimsizliği Deney Düzenekleri	37
Şekil 15 Numunelerin Su Seviyelerinin Belirlenmesi	38
Şekil 16 Numunelere Nüfuz Eden Su Seviyesinin Belirlenmesi	38
Şekil 17 Uçucu Kül İlavesiz Çimento Harcının Su Derinlik Tayini Sonuçları ...	39
Şekil 18 Etüv Cihazı ve Numunelerin Tartılması.....	41

Şekil 19 Aynı Bentonit Oranında Hazırlanan Numunelerin Uçucu Kül Etkisinde Su Emme Sonuçları	42
Şekil 20 Aynı Uçucu Kül Oranında Bentonit Etkisinde Su Emme Kapasitesi ...	43
Şekil 21 Uçucu Kül Kullanılmadan Hazırlanan Numunelerin Bentonit Etkisi Altında Su Emme Kapasitesi	43
Şekil 22 Metroda Yer Altı Suyu Drenaj Çukuru	44
Şekil 23 M4 Metro İstasyonu Güzergahı	45
Şekil 24 Metrosu Güzergahının Jeolojik Haritası	45
Şekil 25 M4 Metrosu Göztepe İstasyonu	45
Şekil 26 1. Parça Alanı	47
Şekil 27 2. Parça Alanı	48
Şekil 28 3. Parça Alanı	48
Şekil 29 4. Parça Alanı	49

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1 Türkiye'deki Termik Santrallerin Uçucu Kül Analiz Sonuçları	9
Tablo 2 Bentonitin Kimyasal Yapısı	14
Tablo 3 Türkiye’de Toplam Su Çekimi Ve Sektörel Dağılımı (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2011)	19
Tablo 4 Yağmur Suyu Hasadı Teknikleri	21
Tablo 5 %7 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı	26

Tablo 6 %9 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı.....	26
Tablo 7 %12 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı.....	27
Tablo 8 %15 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı.....	27
Tablo 9 Çimentonun Kimyasal Analizi (Akçansa, 2023)	28
Tablo 10 Çimentonun Fiziksel Analizi (Akçansa, 2023)	28
Tablo 11 Çimentonun Basınç Dayanımı.....	28
Tablo 12 Na Bentonitin Kimyasal Analiz Raporu	29
Tablo 13 Uçucu Kül Kimyasal Analiz raporu (CPC 2023)	31
Tablo 14 Süperakışkanlaştırıcı Katkı Özellikleri.....	33
Tablo 15 Uçucu Kül İlavesiz Çimento Harcı Su Seviyesi Yüksekliği	39
Tablo 16 Numunelerin Su Emme Deney Sonuçları.....	41
Tablo 17 Günlük Ortalama Basılan Su Miktarı (m ³).....	46
Tablo 18 Betonarme Su Deposu Birim Fiyat Maliyet Tablosu.....	51

KISALTMALAR

TS: Türk Standartları

EN: Avrupaone Norm

ASTM: American Society for Testing and Materials

DSİ: Devlet Su İşleri

İSKİ: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi

WWAP: World Water Assesment Programmer

FAO: Food and Acgriculture Organization

OECD: Organisation for Economic Co-operation

TBM: Tünnel Boring Machine

SEM: Taramalı Elektron Mikroskopu

Na: Sodyum

Ca: Kalsiyum

CaO: Kalsiyum Oksit

1.GİRİŞ

Su canlıların yaşaması için hayati öneme sahiptir. En küçük canlı organizmadan en büyük canlı varlığa kadar, bütün biyolojik hayatı ayakta tutan sudur. Dünya üzerinde bulunan suyun %97,5'ini denizler ve okyanuslar geriye kalan %2,5'ini tatlı sular oluşturur. Bu tatlı suları %70'i kutuplardaki buzullar %30 ise yüzey ve yer altı sularından oluşmaktadır. Ülkemizde de kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında 1652 m³, 2009 yılında 1544 m³, 2020 yılında ise 1346 m³ olmuştur. Türkiye, kişi başına düşen su miktarına bakıldığı zaman su baskısı yaşayan ülkeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle suyun tasarruflu ve etkili bir şekilde kullanılması önemli ve depolamalı tesisler yapılması suretiyle su kaynakları potansiyelinin artırılması gerekmektedir. Ayrıca su kullanımı olan işletmelerde su kayıplarının önüne geçilerek suyun daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmalıdır. Topraktaki drenaj sorunlarının giderilerek yenileme projelerinin ön plana çıkarılması ve klasik açık sistem sulama şebekeleri yerine modern kapalı sulama sistemlerinin kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında; TBM tünel kazılarında tünelin dış çeperini oluşturan segment taşlarının arkasına dolgu malzemesi olarak uygulanan bentonit katkı enjeksiyon harcı (overcut dolgusu) incelemiştir. Bu teknik tünel içerisine su sızıntılarının engellenmesi ve segment taşları arkasındaki boşlukların doldurulması için uygulanmaktadır. Seçilen malzemenin sürdürülebilir olması, ekonomik olması hem de suya karşı dirençli olması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar sonucunda doğal ortamdan temin edilebilen, Türkiye'de kolay elde edilebilir ve su emme kapasitesi yüksek olan bentonit tercih edilmiştir. Çimento harcına çeşitli oranlarda bentonit ilavesi yaparak harcın suya karşı geçirimsizliğinin artırılması, ekonomik ve daha sürdürülebilir malzemelerden bir harç elde edilmesi amaçlanmıştır.

İstanbul Medeniyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Lisans Laboratuvarı'nda bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, bentonitin

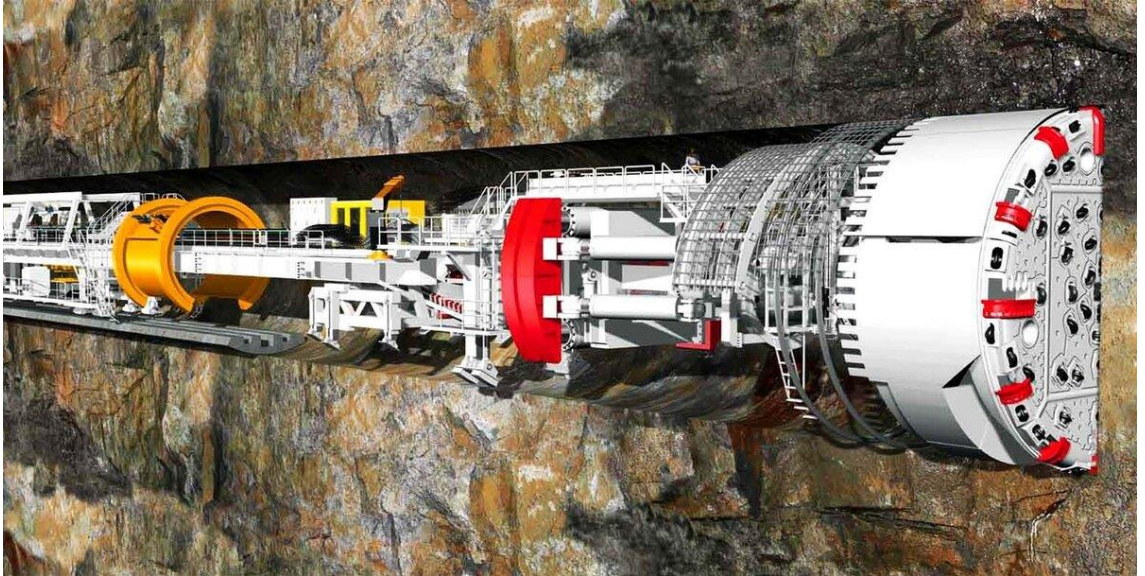
Çimento harcının geirimpliliğini azalttığı, nitel ve nicel olarak tespit edilmiştir. Bu sayede imento kullanım miktarının azaltılarak hem sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak hem de daha ekonomik bir malzeme kullanılacaktır. Bu alışma uzun vadede tünelin yer altı sularına karşı direncini arttırılması ile işletme dönemin de oluşacak ekonomik ve teknik zorlukların aşılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca tünel içerisinde toplanacak sızıntı sularının nerede depolanacağı ve suyun nasıl değerlendirileceği hakkında da araştırmalara yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 TBM Tipi Tünel Kazısı ve Segment Taşı

Modern şehirlerin altyapı projeleri, yoğun trafik, hızlı ulaşım ve çevresel sürdürülebilirlik gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmenin etkili bir yolu, güvenli ve hızlı yer altı tünelleri inşa etmektir. Bu noktada, TBM'ler (Tünel Delme Makineleri) ve tünel segmentleri, modern tünel inşaatının temel teknolojik unsurlarını temsil etmektedir.

TBM'ler, tünel delme sürecini otomatize eden ve işgücü maliyetlerini önemli ölçüde azaltan makinelerdir. Yer altında ilerlerken aynı anda tüneli delerler, bu da inşaat sürecini hızlandırır. İnsan müdahalesine neredeyse ihtiyaç duymamaları, çalışma güvenliğini artırırken inşaat sürecini daha etkin ve verimli hale getirir. Ancak TBM'lerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için uygun tünel segmentlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tünel segmentleri, genellikle betondan yapılmış bileşenlerdir ve TBM'in arkasındaki tünel boşluğuna yerleştirilir. Bu segmentler, tünelin stabilitesini sağlayarak TBM'in ilerlemesini desteklemektedir.

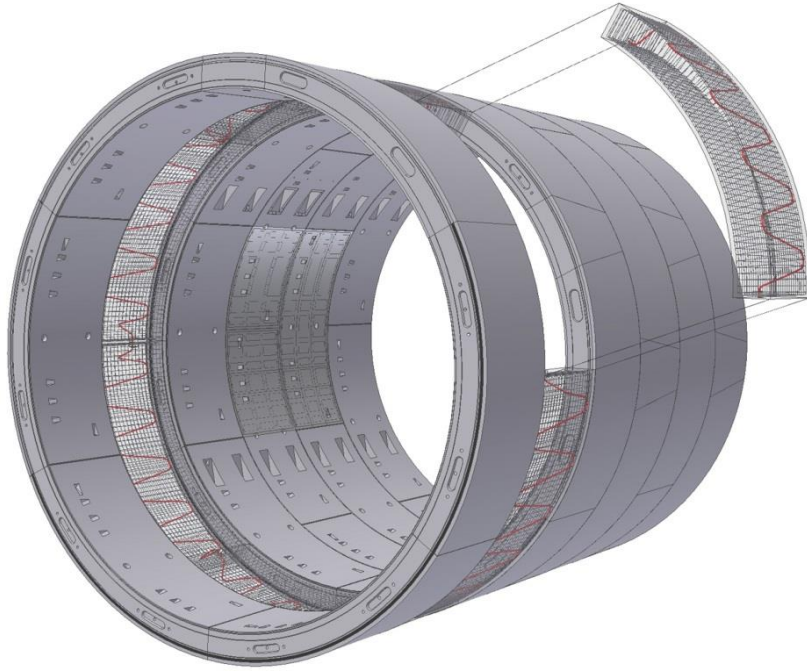


Şekil 1 Tünel Delme Makinesi (TBM) Örneği

Tünel segmentlerinin üretimi ve imalatı da büyük bir hassasiyet gerektirir. Kalite kontrol önlemlerine sıkı bir şekilde tabi tutulmalı ve yüksek dayanıklılığa sahip olmalıdırlar. Ayrıca, tünelin özelliklerine ve projenin gereksinimlerine uygun şekilde tasarlanmalıdırlar. Gelişmiş teknolojiler, yaratıcı ve yenilikçi malzemeler, segment imalatının kalitesini ve dayanıklılığını artırmak için kullanılmaktadır. Bu unsurlar bir araya geldiğinde, modern tünel inşaatı daha güvenli, hızlı ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilebilir.

TBM tünellerinde segment birleşim yerlerinde su sızıntısını önlemek için su geçirmez malzemelerin kullanımının önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmalar, segmentler arasındaki eklemlerden kaynaklanan su sızıntısının tünelin kullanılabilirliği ve stabilitesi üzerinde potansiyel sorunlar oluşturabileceğini göstermektedir (Alp, 2016).

Özellikle, segment montajı sırasında eşit olmayan oturma veya segmentlerin bağlantı açısında uyumsuzluk gibi faktörler, segment birleşim yerlerinde su sızıntısını artırabilir. Bu durum, segmentler arasındaki açı uyumsuzluğu ve birleşim yerlerinin kayması gibi sorunlara neden olabilir.



Şekil 2 Segment Taşı Örneği

2.2 Çimento Esaslı Dolgu Harcı (Overcut Dolgusu)

Çimento esaslı harçlar yıllardır temel mühendislik çözümlerinde kullanılır. Boşlukların doldurulması, yer altı toprak kısımlarında su geçirimsizliğin azaltılması gibi temel çözümlerde ana bileşendir. İnşaat sektörünün temel yapı taşı olan çimento zeminde oluşan boşlukların kapatılmasında kullanılır. Ayrıca su bulunan yerlerde su ve zemin arasındaki teması keserek, zeminlerin sağlamlaştırılması amacı ile kullanılmaktadır. Bilindiği üzere sağlam zeminler üzerine inşa edilmeyen binalar, bir süre sonra doğal afetler ile çökme tehlikesi ile karşı karşıya kalmaktadır.

Günümüzde de birçok alanda kullanılan çimento enjeksiyon sistemleri, zemininde yaşanabilecek çökmelerin engellenmesi amacı ile kullanılmaktadır. Bu sayede, elverişsiz ve problemlili zeminlerin başarı ile sağlamlaştırılması, güvenle kullanılır hale getirilmesi söz konusu olabilmektedir. Bentonit ilaveli çimento karışımı harçlar, su geçirimsizliği problemleri için doğal çözüm olarak enjeksiyon metodu ile TBM tipi tünellerin su yalıtımında kullanılmaktadır.

Beton harcı, ince agrega ve suyun belirli bir oranda karıştırılmasıyla oluşturulur ve bu da heterojen ve gözenekli bir kompozit malzeme elde edilmesini sağlar. Ancak, çimento harcının gözenek yapısı binalarda sızıntıya neden olabilir ve gözenek yapısındaki suyun göçü, yapıda kimyasal hasara neden olabilecek zararlı iyonları ortaya çıkarabilir. Çimento harcının geçirgenliğini azaltmak, bu sorunu çözenin birincil yöntemidir ve bu amaçla bentonit yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gedik, 2023).

TBM makinelerinin ilerleyebilmesi ve kurplardan dönebilmesi için kazı çapının segment dış çapından daha büyük bir kazı yapması gerekmektedir. Bu kazı fazlası kısım overcut olarak adlandırılır. Kazı sonrası Overcut alanları geri dolgu harçları kullanılarak doldurulmalıdır. Tam olarak doldurulmaz ise oturmalar ve su sızıntıları oluşabilir. Bu kısımların doldurulması tünelin sorunsuz biçimde çalışması için önemlidir. Overcut alanı dolgu harcı, tünelin stabilitesini artırmak, su geçirimsizliği sağlamak ve segmentlerin

birleştirilmesini güçlendirmek için belirli özelliklere sahip olmalıdır. İdeal dolgu harcı aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

1. Dayanıklılık: Tünel segmentlerinin içine dökülen dolgu harcı, tünelin dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmalı ve segmentlerin uzun vadeli stabilitesini sağlamalıdır.

2. Su geçirmezlik: Tünel inşaatında su sızdırmazlık önemlidir. Dolgu harcı, tünelin su geçirmezliğini sağlamak için suya dayanıklı olmalıdır.

3. Yapışma özelliği: Dolgu harcı, segmentler arasındaki birleşim yerlerini güçlendirmek için yeterince yapışkan olmalı ve segmentlerin birbirine sıkıca tutunmasını sağlamalıdır.

4. Akıcılık: Dolgu harcı, tünel segmentlerinin içine döküldüğünde akıcı olmalı ve homojen bir şekilde dağılmalıdır. Bu, dolgu harcının tüm boşlukları doldurmasını ve segmentlerin içine tam olarak yerleşmesini sağlar.

5. Hızlı sertleşme: Dolgu harcı, tünel inşaatının hızını artırmak için hızlı bir şekilde sertleşmeli ve güç kazanmalıdır. Bu, TBM' in ilerlemesini hızlandırır ve inşaat sürecini verimli hale getirir.

6. Çevresel uyumluluk: Dolgu harcının çevresel etkileri minimize etmesi önemlidir. Çevre dostu malzemelerin kullanılması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Bu özelliklerin yanı sıra, dolgu harcının yerel koşullara, projenin gereksinimlerine ve tünel segmentlerinin tasarımına uygun olması da önemlidir. Bu nedenle, dolgu harcının seçimi ve kullanımı, dikkatlice planlanmalı ve kalite kontrolüne tabi tutulmalıdır.



Şekil 3 Tünel İçi Kesit ve Segment Taşı Dizilimi

2.3 Dolgu Harcının Bileşenleri

Harcı oluşturan hammaddeler çimento, uçucu kül, su, kum, bentonit, kimyasal katkıların (akışkanlaştırıcı, geçirimsizlik sağlayıcı) karışımı sonucu belirlenen oranlarda karışımlar sağlanarak performansları değerlendirilmiştir.

2.3.1 Çimento

Çimento, ana hammaddeleri kalker ve kil olan su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır. Bu malzeme 1400-1500°C'de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir. Daha sonra klinkere bir miktar alçı taşı eklenip (%4-5 oranında) çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir. Çimento birden fazla malzemenin kimyasal işleme tabi tutulup öğütülmesi ile elde edilmektedir (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2024)

Çimento, birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşen olmasına rağmen, betonun en önemli bileşenidir. En yaygın olarak kullanılan çimento tipleri Portland çimentosu ve sulfata dayanıklı çimentodur.

2.3.2 Uçucu Kül

“Uçucu küller, yaklaşık 2300 yıl önce, bilinen en eski hidrolik çimentoların üretiminde kullanılan volkanik küllerdir. Bu çimentolar küçük bir İtalyan şehri olan Pozzuoli’ni yakınlarında yapılmış ve daha sonra “puzolan” adını almıştır.” (Alkaya, 2009). Uçucu kül, dünyadaki en yaygın ve en çok kullanılan puzolanlardan biridir. Kömür bazlı termik santrallerin atık ürünü olan uçucu küllerin, toprak kirliliği, hava kirliliği, yüzey ve yer altı su kirliliği, tarımsal arazi ve insan sağlığı üzerinde zararlı etkileri olduğu bilinmektedir. (Sheikh, 2017)

“Türkiye’de ise bu alandaki ilk çalışmalar 1964 yılında DSİ (Devlet Su İşleri Müdürlüğü) tarafından yapılmıştır. 1968 yılında TSE (Türk Standartları Enstitüsü) tarafından uçucu kül ile ilgili standartlar (TS EN-197, TS EN-450, TS EN-639, TS EN-640) yayınlanmıştır. Ülkemizde yılda ortalama 45 milyon ton düzeylerinde kömür yakılmaktadır. Buna bağlı olarak 15 milyon ton düzeyinde uçucu kül açığa çıkmaktadır” (Güler, 2005).

TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği) ve EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi) iş birliği ile Türkiye’de bulunan 11 termik santralden uçucu küller temin edilmiştir. Elektrofiltrelerden temin edilen uçucu küller içerisinde barındırdığı CaO yüzdesi ve $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ toplam yüzdesi bakımından incelenmiş, ASTM-C 618 ve TS EN 197-1’e göre uygunlukları değerlendirilmiştir.

Tablo 1’de Türkiye’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin analiz sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 1 Türkiye'deki Termik Santrallerin Uçucu Kül Analiz Sonuçları

Santral	CaO (%)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	Sonuç
Afşin-Elbistan	53,44	30,68	Standartlara uygun değildir
Orhaneli	9,48	80,73	Standartlara uygundur
Çatalağzı	1,46	89,75	Standartlara uygundur
Seyitömer	4,26	84,34	Standartlara uygundur
Yatağan	10,53	80,65	Standartlara uygundur
Tunçbilek	1,95	87,82	Standartlara uygundur
Soma	20,95	70,48	Standartlara kısmen uygundur
Kangal	31,91	53,37	Standartlara kısmen uygundur
Yeniköy	39,4	32,05	Standartlara uygun değildir
Kemerköy	38,49	43,76	Standartlara uygun değildir
Çayırhan	11,82	73,83	Standartlara uygundur

“Uçucu küllerin sınıflandırılması, içerisinde barındırdığı bileşenlerin bileşim oranlarına bağlı olarak yapılmaktadır. Sınıflandırmada ASTM-C 618 ve TS EN 197-1 standartları referans alındığında; ASTM-C 618’e göre uçucu küller F ve C, TS EN 197-1’e bakıldığında ise V (silissi) ve W (kalkersi) olmak üzere ana kategorilere ayrılmaktadır. ASTM-C 618’in F tipi olarak sınıflandırdığı uçucu kül genellikle taş kömüründen elde edilen, puzolanik özelliğe sahip küllerdir. Kalsiyum oksit (CaO) %10’dan az ve SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşenlerinin toplam oranı %70’den fazla olan uçucu küller bu kategoride yer almaktadır. F tipi küller düşük kireç oranına sahip olduklarından beton bileşiminde dayanım oranını artırır” (Türker, 2009). Yani F sınıfı uçucu küller çimento ile bağlayıcılık özelliğine sahiptir.

Uçucu küllerin beton basınç dayanıma da etkisi uçucu külün 180 günde puzolanik reaksiyona yüksek oranda katıldığını ve bunun da bu uzun hidratasyon süresinde betonun mukavemetinin artmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Ancak, bazı çalışmalarda %50 uçucu kül ilavesinin 28. gündeki geçirgenliğe zarar verdiği ve daha yüksek uçucu kül dozajının daha zayıf bir geçirimsizliğe neden olduğu belirlenmiştir. En optimal geçirimsizlik değerlerine %30 ilave uçucu kül miktarı ile ulaşılmıştır (Wang, 2022).

2.3.3 Kum

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi mineral kökenli daneli malzemelerin genel adı agregadır. Beton içindeki agregalar, hacimsel olarak %60-75 oranında bulunur. Bu agregalar, tane boyutlarına göre "ince" (kum, kırma kum gibi) ve "iri" (çakıl, kırmataş gibi) olmak üzere ikiye ayrılır. Harçta kullanılan kum çakıl ocaklarından veya akarsu yataklarında alüvyon deltalarının birikinti konilerinden elde edilir. Agregaların betonda kullanılabilmesi için TS 706 EN 12620 standardında belirtilen elek aralıklarında geçen dane dağılımına (granülometriye) uygun olması gerekir.

2.3.4 Su

Harcın bileşenlerinden biri su, çimento ve agregalarla birlikte harcın karıştırılmasında kullanılır. Bu, harcın işlenebilirliğini sağlamak için önemlidir. Karma suyu, çimento ve kumun yüzeyini ıslatarak, malzemelerin kolayca karıştırılmasını ve yerleştirilmesini sağlar. Ayrıca, su çimento taneleriyle reaksiyona girerek çimento hamurunun oluşmasına ve sertleşmesine katkıda bulunur.

Beton üretiminde kullanılacak suyun TS EN 1008 standardına uygun olması önemlidir. Bu, betonun kalitesini ve dayanıklılığını sağlamak için gereklidir.

2.3.5 Kimyasal Katkı Maddeleri

Betonun özelliklerini geliştirmek amacıyla üretim sırasında veya döküm öncesinde hazır betona transmikser içinde az miktarda ilave edilen maddelere katkı adı verilir. Katkı maddeleri, genellikle çimento ağırlığının %5'inden daha az oranda kullanılır. Bu oranın üzerine çıkıldığında, o maddeye bir bileşen gözüyle bakılır (Topçu, 2006).

Katkı maddeleri kökenlerine göre kimyasal ve mineral katkılar olmak üzere ikiye ayrılır. Bu katkılar, betonun özelliklerini çeşitli yollarla iyileştirebilir. Örneğin, betonun dayanıklılığını artırmak, çatlak oluşumunu azaltmak veya

işlenebilirliğini iyileştirmek için çeşitli katkı maddeleri kullanılabilir. Bu katkı maddeleri, betonun belirli bir uygulamaya veya kullanım alanına daha uygun hale gelmesini sağlayabilir.

Beton yapımında, dökümünde ve hava koşullarının neden olduğu zorluklarla başa çıkmak için, beton katkıları kullanarak beton kalitesini artırmak ve sorunları çözmek mümkündür. Ayrıca, döküm yerinin zor olduğu koşullarda ve diğer olumsuz durumlarda da beton katkıları kullanılabilir. Modern beton yapımına geçişin avantajlarından biri de katkıların homojen şekilde kullanılabilme imkanının olmasıdır. Beton üretiminde sorunların çözümünde katkı maddelerinin kullanılması, ekonomik bir yol olarak da kabul edilebilir.

Kimyasal beton katkıları, amaçlarına göre genellikle altı gruba ayrılır. Bu gruplar, betonun özelliklerini belirli bir şekilde iyileştirmek veya belirli bir uygulama veya kullanım alanına daha uygun hale getirmek için tasarlanmıştır. Kimyasal katkıları, betonun mukavemetini artırmak, akışkanlığını düzenlemek, çatlak oluşumunu azaltmak, donma-çözülme direncini artırmak gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Bu şekilde, betonun dayanıklılığı ve performansı genellikle önemli ölçüde artırılabilir (Dedeoğlu, 2010).

2.3.5.1 Akışkanlaştırıcı Katkılar

Akışkanlaştırıcılar, uygulamada su/çimento oranının azaltılmasıyla aynı işlenebilirliği elde etmek, daha yüksek dayanım kazanmak, çimentonun azalmasını sağlayarak hidrasyon ısını düşürmek gibi amaçlarla kullanılırlar. Akışkanlaştırıcı katkıları, beton teknolojisinde önemli bir gelişme olarak kabul edilir.

İlk olarak 1930'larda lignosülfonatlar temel alınarak ortaya çıkmışlardır. Ancak, 1960'lara gelindiğinde sülfonatlı naftalin polimer esaslı süper akışkanlaştırıcılar geliştirilmiştir. Bu katkıları, daha yüksek performans ve daha etkili akışkanlaştırma sağlamıştır. 1990'lardan itibaren ise vinil kopolimerler ve modifiye polikarboksilatlar gibi daha yenilikçi ve gelişmiş akışkanlaştırıcılar

ortaya çıkmıştır. Bu yeni nesil akışkanlaştırıcılar, daha yüksek performans, daha uzun açık kalma süresi ve daha homojen beton karışımları sağlamıştır. Ayrıca, bu katkılar betonun işlenebilirliğini artırırken su/çimento oranını azaltarak betonun dayanımını artırmak ve çimento miktarını azaltmak gibi avantajlar sunarlar. Bu yenilikler, beton teknolojisinde önemli bir ilerleme sağlamış ve daha kaliteli, dayanıklı ve sürdürülebilir beton yapıların inşası için yeni olanaklar sunmuştur. Bu gelişmeler, inşaat endüstrisinde daha verimli ve çevre dostu beton uygulamalarının yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur.

Taze betonun dökümü sırasında, karışımın döküleceği yere ulaşması zaman alabilir ve bu süre zarfında karışımın kıvamı değişebilir. Bu süre zarfında kıvam kaybını telafi etmek için su eklenmesi yaygın bir uygulamadır. Ancak, bu işlem betonun özelliklerine olumsuz etkileri olabilir. Su eklenmesiyle kıvamın yeniden ayarlanması, betonun su/çimento oranını artırabilir. Bu, betonun dayanımını ve dayanıklılığını azaltabilir. Daha fazla su, betonun iç yapısını zayıflatabilir ve çimento ile agregalar arasındaki bağları azaltabilir. Sonuç olarak, betonun dayanımı ve performansı düşebilir (Yıldırım, 2005).

Belirtilen nedenlerden dolayı, taze betonun kıvamını ayarlamak için su eklenmesinden kaçınılmalı ve alternatif yöntemler kullanılmalıdır. Akışkanlaştırıcılar gibi kimyasal katkılar, betonun işlenebilirliğini artırarak kıvam kaybını telafi etmede etkili olabilir, ancak su eklemesinin olumsuz etkilerini minimize ederler. Bu nedenle, çimento miktarı azaltılmaksızın veya basınç dayanımı düşmeksizin üretilen betonun, akıcı ve kolay yerleşebilir olması önemlidir. Akışkanlaştırıcılar, betonun işlenebilirliğini artırarak karışımın daha akıcı hale gelmesini sağlarlar. Böylece, betonun dökümü sırasında kolaylıkla yerleştirilebilir ve düzgün dağılabilir.

2.3.5.2. Su Geçirimsizliği Sağlayan Katkılar

Bu katkı maddeleri betonun su geçirmezlik özelliklerini artırmak için kullanılan çeşitli kimyasal bileşiklerden oluşur. Sülfonmelamin formaldehit, polikondansesi, sülfon naftalen formaldehit polikondansesi gibi bileşikler,

betonun suya karşı dayanıklılığını artırır ve kapiler boşlukları tıkayarak su geçirmezlik sağlar.

Bu katkı maddeleri, betonun su geçirimsizliğini artırırken, aynı zamanda suyun beton içindeki dağılımını düzenleyerek işlenebilirliği de artırır. Bu katkı maddelerinin kullanımıyla, betonda su azaltma ve akışkanlaştırıcılık özellikleri artar. Su geçirmezlik özelliğinin artmasıyla birlikte, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları da artar. Ancak, bazı yan etkileri de olabilir. Örneğin, hidrolik rötrede artışa neden olabilir, bazı hava sürükleyici katkılarla uyumsuzluk sağlayabilir veya segregasyona yol açabilir. Bu katkı maddeleri, su yapılarında (örneğin, barajlar, tüneller, arıtma havuzları, su depoları, bina temelleri gibi) çimento ağırlığının belirli bir oranında kullanılır.

2.3.6 Bentonit

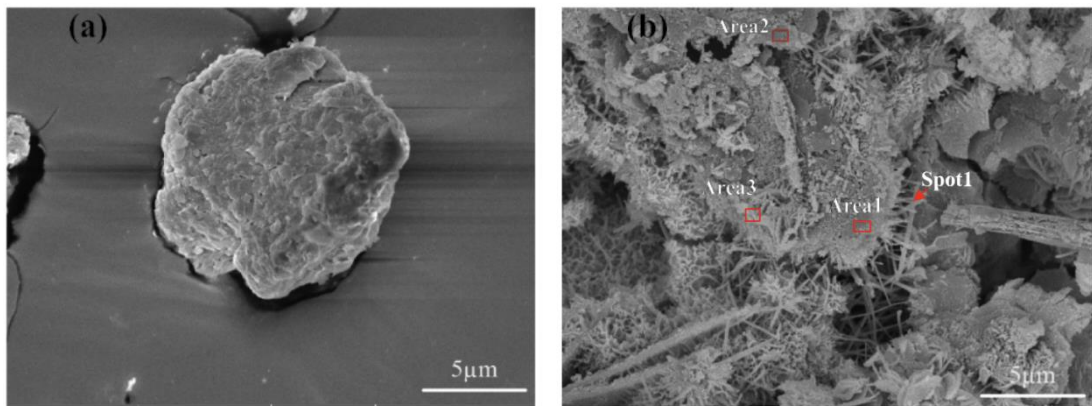
Bentonit alüminyum ve magnezyumca zengin volkanik kül ve lavların ayrışmasından oluşan ve egemen olarak montmorillonit içeren killere, ticari anlamda ise gelişmiş sıvı emici ve kolloidal özelliği olan her kile bentonit denilmektedir. Kompozit yapıdaki çimento harcı gözenekli yapıya sahiptir. Gözeneklerin oluşturduğu dezavantajlar dayanımı ve geçirimsizliği azaltmaktadır. Gözeneklere hapsolan suların taşıdığı CO₂, klorür gibi zararlı maddeler dayanımı ciddi şekilde düşürür. Daha geçirimsiz çimento harçları için gözenek yapısını dolduracak çeşitli denemeler yapılmıştır. En yaygın olan yöntem olarak su çimento oranının azaltılmasıdır. Bentonit seçilmesinin ana sebeplerinden birisi doğal kaynak olması ve doğada sık rastlanılan bir ürün olmasıdır. Endüstriyel kullanımlar için bentonitin değerlendirilmesinde kimyasal özellikler belirleyici olabilmektedir. Bu özelliklerin önemlileri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Bentonitin Kimyasal Yapısı

Bileşen (%)	Na Bentonit	Ca Bentonit	Na-Ca Bentonit
SiO ₂	64	59	62
Al ₂ O ₃	21	19,7	15,9
Fe ₂ O ₃	3,5	5,9	3
MgO	2,3	5,5	2,6
CaO	0,5	1,7	4,5
Na ₂ O	2,6	0,2	2
K ₂ O	0,4	0,2	1

Bentonitler esas olarak, suda şişen Na-bentonitler; bu özelliği daha az olan, dengeli kalsiyum ve sodyum içeren ara tip bentonitler; suda şişmeyen Ca bentonitler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılırlar. Şişme özelliği olan Na - bentonitler bünyelerine yaklaşık 1-15 kat su alabilme özelliğine sahiptirler. Su ile karıştırıldığında kolloidal özellik göstermesi, su ve bazı organik sıvı ortamda hacimce şişmesi bu killere geniş bir kullanım alanı sağlamaktadır (Yücel & Gül, 2018).

Yapılan çalışmalarda, çimento su ve kuvars kumundan hazırlanan bir harca bentonit ilave edilmiş, çimento harcının bentonit ile güçlendirilmesi sonucunun SEM mikroskopu ile gözenek yapısı incelenerek boşluklardaki bentonit gözlemlenmiştir. Çimento harcına %8 bentonit ilavesi gözeneklerin %16,9 azalma olduğu anlaşılmıştır (Yang vd., 2019).

**Şekil 4** SEM Mikroskopu Bentonitli Çimento Harcı içerisindeki Görüntüsü

2.3.6.1.Bentonitin Kullanım Alanları

Bentonitin kimyasal bileşiminden çok fiziksel yapısı önemlidir. Katyon değiştirme kapasitesi, viskozite, plastisite indeksi, şişme kapasitesi, taneleri bağlama özelliği ve ağartma yeteneği, ürünün kullanım alanlarını belirlemektedir. Bu nedenle bentonit, birçok farklı alanda kullanılmaktadır:

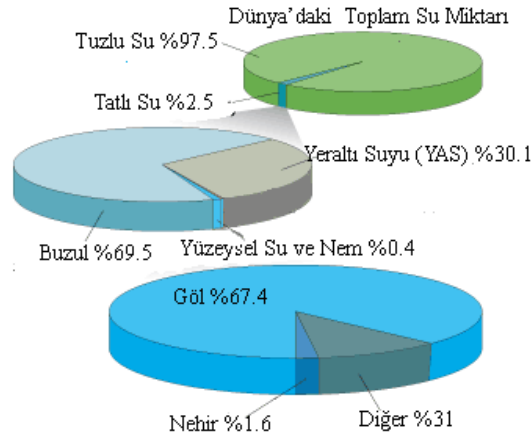
- Sondaj çamuru katkı maddesi olarak,
- Döküm kumu bağlayıcısı ve pelet yapımında,
- Gıda endüstrisinde ağartma işlemlerinde,
- İlaç, kâğıt ve plastik endüstrilerinde katkı maddesi olarak,
- Petrol rafinasyonunda,
- Hayvan yemi katkısı olarak,
- Kedi kumu gibi çeşitli alanlarda

Bentonitin bu geniş kullanım alanları, onun fiziksel özelliklerinin ve çeşitli endüstriyel uygulamalardaki uygunluğunun bir göstergesidir.

2.4 Dünya'daki ve Türkiye'deki Su Potansiyeli ve Dağılımı

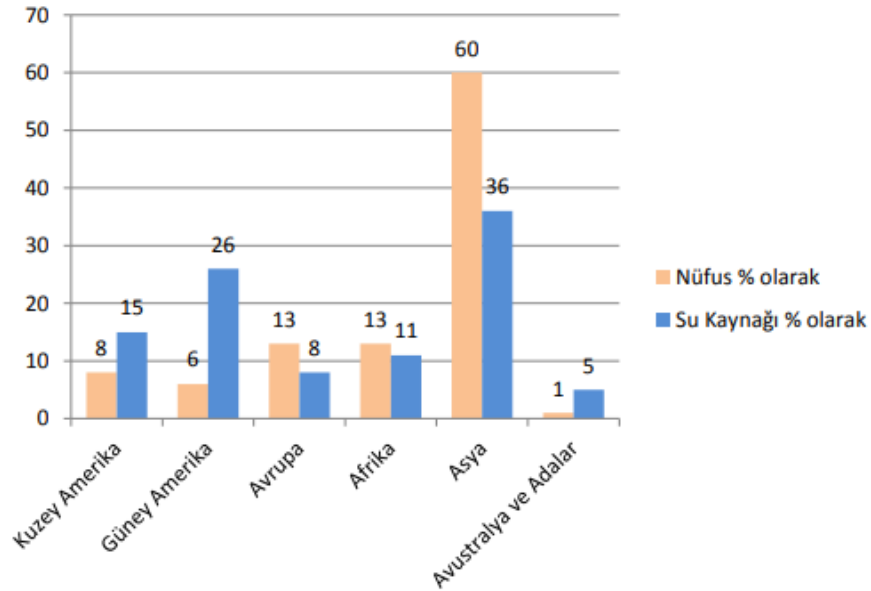
2.4.1 Dünya'daki Su Potansiyeli

“Dünyadaki toplam su miktarı 1 milyar 400 milyon km³ olup yerkürenin dörtte üçünü kaplamaktadır. Bu miktarın ne yazık ki tamamı kullanılamamaktadır. Bu durumun nedeni suların %97,5'i deniz ve okyanuslarda tuzlu su olarak bulunmakta ve yalnızca %2,5'lik kısmı tatlı sudur. Bu tatlı suların büyük bir kısmı ise (%69,5) kutuplarda buzul olarak veya donmuş toprak tabakasında bulunmaktadır. Tatlı suların yaklaşık %30,1'i yer altı suları (Rodda, 2004), kalan %0,4'lük kısmı ise yüzey ve atmosfer suları olarak tatlı su gölleri, yüzeysel sular, sulak alanlar, atmosfer, toprak ve canlılardadır” (Ekinci, 2015).



Şekil 5 Dünyadaki Suyun Dağılımı

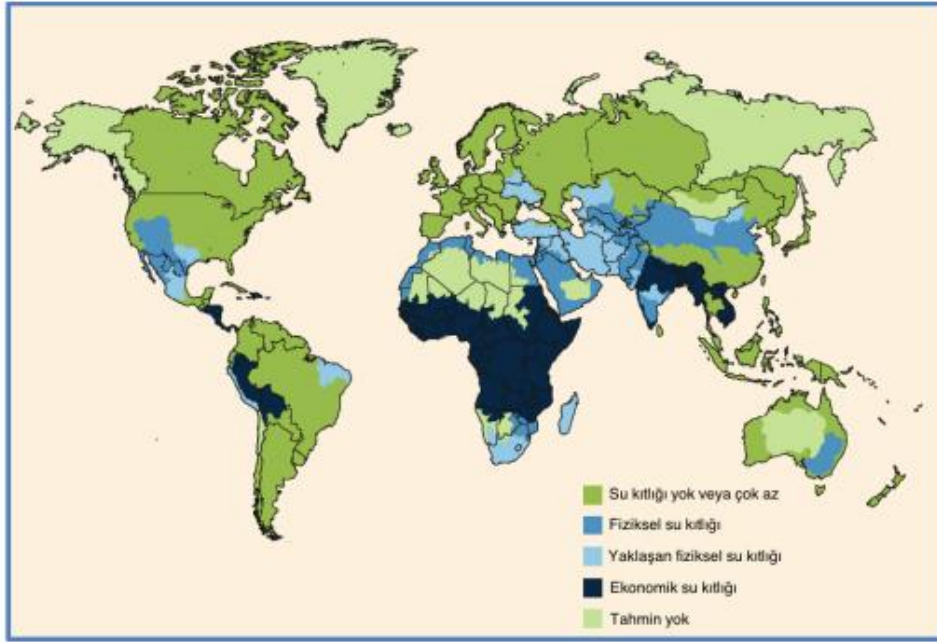
Su kaynaklarının yeryüzündeki dağılımı eşit değildir. Amerika Kıtası, Asya'nın kuzeyi, Avustralya ve Orta Avrupa su kaynakları bakımından zengindir. Kuzey Afrika, Ortadoğu ve Güneydoğu Asya'da su sıkıntıları yaşanmaktadır. Su kaynakları bölgesel olarak eşit dağılmamaktadır. Örneğin Türkiye'nin kuzeyi su bakımından zengin iken doğu ve orta kesimlerinde su kıtlığı yaşanmaktadır.



Şekil 6 Su Kaynaklarının Dünyadaki Dağılımı

Su varlığına göre ülkeler sınıflandırıldığında; yılda kişi başına düşen ortalama su miktarı 1000 m³'ten az olan ülkeler "su fakiri", 1000-2000 m³ olan ülkeler "su sıkıntısı çeken ülke", 2000-8000 m³ olan ülkeler suyun yeterli olduğu ülkeler,

8000 m³'ten fazla olan ülkeler ise “su zengini” olarak kabul edilmektedir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü , 2020).



Şekil 7 Küresel fiziksel ve ekonomik su kıtlığı haritası (WWAP, 2012)

2.4.2 Dünya’da Su Kullanımı

Dünyada su kullanımı gıda, tarım enerji, sanayi, yerleşim alanları, ekosistemlerin su ihtiyaçları gibi 3 temel başlık altında değerlendirilmektedir. (Muluk, 2013). Küresel olarak dünya su kaynaklarının yaklaşık %72’i tarım amaçlı kullanılmaktadır. İkinci sırada %18 sanayi ve üçüncü %10 ile evsel kullanım izlemektedir.

Ülkelere göre sektörel su kullanımları bir bakıma gelişmişlik düzeyini de göstermektedir. Az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde tarımsal su tüketimi ortalaması yaklaşık %80 iken, gelişmiş olan ülkelerde tarımsal su kullanımı %30’lara düşmektedir. Gelir düzeyindeki artış ile tarımsal su kullanımı arasında ters orantı bulunmaktadır (Muluk, 2013).

Tarımsal faaliyetlerde; küresel olarak, sulu tarım verimi kuru tarımdan (yağmura bağlı olarak) yaklaşık 2,7 kat daha fazladır. Bu durum, gelecekte daha fazla alanın sulu tarıma açılma ihtimalini güçlendirmektedir. “Dünyada sulu

tarım yapılan arazi miktarı 1970’lerde 170 milyon hektar iken, 2008’de 304 milyon hektara ulaşmıştır” (OECD, 2012).

“Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) raporuna göre, tarım sektörü gelecek yıllarda artan gıda talebini karşılamak gibi büyük bir sorunla karşılaşacaktır. 2030 yılında küresel gıda tüketiminin %50, 2050 yılında ise günümüze göre %100 artacağı tahmin edilmektedir” (OECD, 2012).

Kentleşme ve sanayileşme nedeni ile tarımın daha az su ile gerçekleştirilmesi gerekecektir. Bu nedenle tarımsal su planlanmasının yapılması önemli olacaktır.

2.4.3 Türkiye’deki Su Potansiyeli

“Türkiye’de yıllık ortalama yağış yaklaşık 648 mm olup yılda ortalama 501 milyar m³ suya denk gelmektedir. Türkiye’nin yerüstü ve yer altı su potansiyeli yılda ortalama toplam 112 milyar m³’tür ”(Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü , 2020).



Şekil 8 Havzalarda kişi başına düşen su potansiyeli.

2.4.4 Türkiye’de Su Kullanımı

Türkiye’nin güncel yıllık su tüketimi 44 km³’tür ve bunun %74’ü tarımda, %15’i evsel ve %11’i sanayide kullanılmaktadır. Ülkemizde kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2020 yılında ise 1346 m³ olmuştur. Türkiye kişi

başına düşen su miktarına bakıldığında, su baskısı yaşayan ülkeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle suyun tasarrufu ve su kaynaklarının çeşitlendirilmesi son derece önemlidir.

Tablo 3 Türkiye’de toplam su çekimi ve sektörel dağılımı (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2011)

YIL	Toplam su		Sektörler					
	Km ³	%	Sulama		Eysel		Sanayi	
			Km ³	%	Km ³	%	Km ³	%
1990	30,6	28	22	72	5,1	17	3,4	11
2004	40,1	36	29,6	74	6,2	15	4,3	11
2010	43	38	32	74	6	15	5	11
2023	112	100	72	64	18	16	22	20

Tablo 3’da gösterildiği gibi Türkiye’nin 1990-2023 yılları arasında tüketilen toplam su miktarı %40,5 oranında bir artış görülmüştür. Önümüzdeki 25 yıl içerisinde ihtiyaç duyacağı su miktarının, bugünkü su tüketiminin üç katı olacağı tahmin edilmektedir. (Muluk, 2013).

Türkiye’nin 2030 yılı hedeflerinde 112 km³ olan su potansiyeli, su ve potansiyel sulu tarım alanlarının geliştirilerek kullanılması vardır. Bununla beraber sektörel su kullanımı hedefleri tarımda %65 sanayide %20 ve evsel kullanımda %15 olarak belirlenmiştir.

2.5 Yağmur Suyu

2.5.1 Yağmur Suyu Hasadı

Su hasadı, yağmur suyunu çeşitli yöntemlerle toplayan ve depolayan evsel veya tarımsal üretim amacıyla kullanım için tekrar düzenleyen bir su kaynakları tekniğidir. Dünyada yağmur sularının kullanılmasına ilişkin farkındalıklar arttırılmaktadır. Özellikle tarımsal arazide su toplama teknikleri

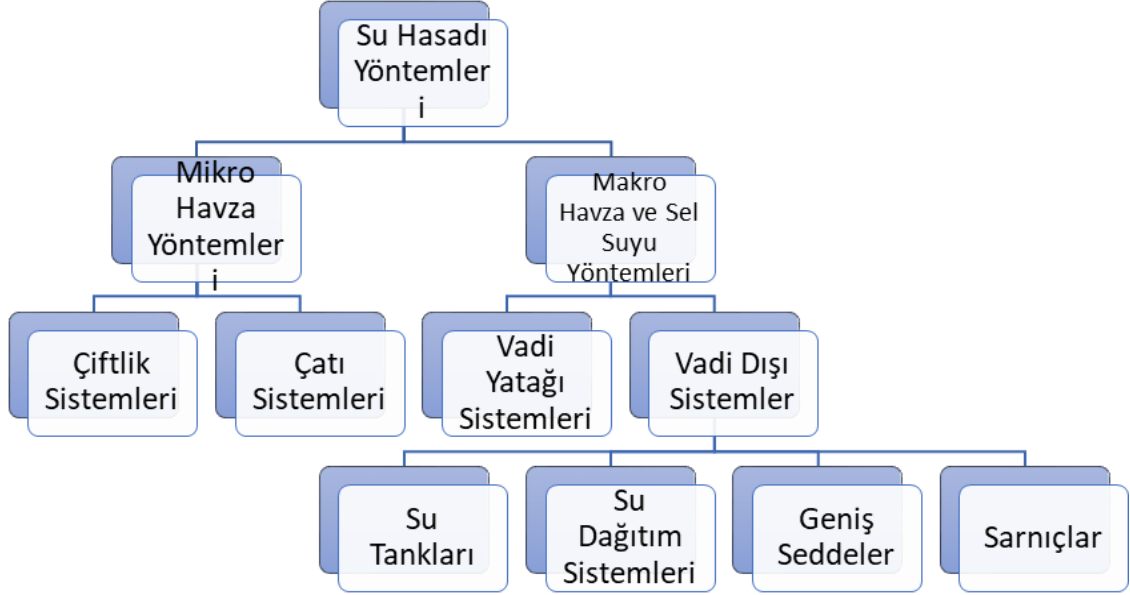
geliştirilerek kuraklığın önüne geçilmeli ve su hasadı teknikleri geliştirilmektedir.

2.5.2 Geçmişten Günümüze Su Hasadı

Su Hasadı, farklı medeniyetler tarafından yaklaşık dört bin yıldır kullanılan yaygın bir uygulama tekniğidir. Mısırlılar, bazıları bugün hala kullanılan kapasiteleri 200 m³ ile 2000 m³ arasında değişen depolama tankları üretmişlerdir. Tayland'da yağmur suyu hasadı uygulamaları yaklaşık 2000 yıl öncesine dayanır. Bugünkü uygulamaya bakıldığında, yıllar önce kullanılan temel yağmur suyu toplama ve depolama yöntemlerinin o zamandan beri pek değişmediği sadece sistemlerin teknolojik açısından özelliklerinin ve depolananların kullanım şekillerinin değiştiği görülebilir (Yetik, 2020).

2.5.3 Yağmur Suyu Hasadı Teknikleri

Tablo 4 Yağmur suyu hasadı teknikleri



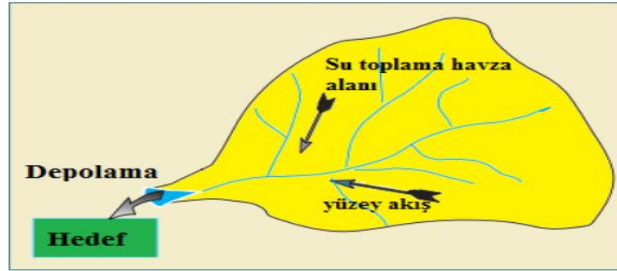
2.5.3.1 Mikro Havza Yöntemleri

Mikro havza sistemleri hem işletim hem de boyut olarak gruplandırmanın en küçük sistemlerini içerirler. Suyu yapay eğimlerden veya oluklar toplanmasıyla sağlanır. Yöntemlerde oluşabilecek kayıplarla alakalı, depolanması veya uzaklaştırılması gereken suya dair herhangi bir önlemden bahsetmek mümkün değildir. Çatılara akan suların oluklar vasıtası ile depolarda biriktirilmesi örnek verilebilir.

2.5.3.2 Makro Havza Yöntemleri

Makro havza ve taşkın suyu hasat yöntemleri, nispeten büyük bir su toplama havzasından toplanan yüzey akış suyuyla tanımlanır. Mikro havza su hasadı yönteminde olduğu gibi, toprak yüzeyinde meydana gelen akış toplanır.

Genellikle su toplama havzası doğal bir mera, bozkır ya da dağlık bir alan olup çoğunlukla çiftlik sınırları dışındadır.



Şekil 9 Makro Havza Su Hasadı

2.6 Tünel İçi Sızıntı Sularının Geri Kazanımı

21. yüzyılda en önemli ihtiyaçların başında su gelmektedir. Uluslararası gündemde başlıca konuların arasında su kaynaklarının yönetilmesi olmuştur. Su yönetimi, su kaynaklarının planlı bir şekilde geliştirilmesi, dağıtılması ve kullanılması olarak tanımlanmaktadır.

Doğanın dengesini bozmadan yer altında bir tünel açmak ve bunun sonucunda doğacak olan etkiler irdelenerek yapılan çalışmalarda en ekonomik ve uzun ömürlü olması amaçlanmaktadır. Kullanılacak malzemelerin seçilmesi sürdürülebilir olması açısından son derece önemlidir. Kullanılan ana yapıcı materyallere baktığımızda betonun tüm olumlu ve olumsuz özellikleri tünel teknolojisinde önemli bir yer tutmaktadır. Betonun yapısı incelendiğinde çimento harcı, su, ince kum ve agregaların karışımından oluşan heterojen ve kompozit yapıda bir malzemedir. Bu malzemeler tünelin ana taşıyıcı duvarlarını oluşturarak tünel çeperini oluşturur.

Bu kompozit yapıdaki çimento harcı suyun etkisi altında yalnızca fiziksel bozulma süreçlerini hızlandırıcı bir etki olarak düşünülmemelidir, suyun taşıdığı kimyasal bileşenler gözeneklere de taşıyarak agresif madde göçüne de sebep olmaktadır. Bilindiği üzere beton da en çok kullanılan yapı malzemesidir ve gözenekli yapıdan meydana gelmektedir. CO₂, Klorür vb. gibi birçok zararlı madde suyun nüfus etmesiyle birlikte betonun yapısına girerek dayanıklılığını

ciddi şekilde azaltacaktır. Bu nedenle betonda suyun iletim süreçlerini kontrol altına alınması ciddi çalışma ve araştırma süreçlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle suyun betonda iletim süreci ve kontrol yöntemleri ilgi görür. Altyapılarda uzun hizmet ömrü elde etmek için yaygın olarak su geçirimsizlik metotları su-çimento oranını kısmak ve süperakışkanlaştırıcı kullanarak betona sızdırmazlık sağlamaktır. Ayrıca çeşitli araştırmacılar betonun bariyer özelliklerini geliştirmek için su geçirimsiz membran ve polimerler gözenek engelleyici Silan/siloksan gibi yüzey kaplamalarının üzerinde çalışmışlardır (Franzoni, 2013).

Yer altına inşa edilen bir yapıda birçok olumsuz etmenle karşılaşılabilir. Bu tez kapsamında ele alınan bu olumsuz etmenlerden birisi olan tünel içi su sızıntılarına karşı çözüm önerileri sunulmuştur. TBM ile açılmayan tünellerde su yalıtımı için PVC membran ve geotekstil keçeler kullanılmaktadır. Membran yapılarının hassas olması kolaylıkla zarar görmesine sebep olur ve suyun nereden girdiğinin tespiti yapılamaz. Ayrıca üretim ve uygulama maliyetleri yüksektir.

TBM tipi metrolarda su sızıntıları segment taşları arasına kullanılan sızdırmazlık contası ve segment arkasına uygulanan overcut dolgu harcı sayesinde sağlanır. Nispeten contaların sızdırmazlık kapasiteleri PVC membranlara göre az olsa da sonradan uygulanan harç ile tamir edilmesi mümkündür.



Şekil 10 NATM Tipi Tünellerde PVC Membran Uygulaması



Şekil 11 TBM ve NATM Tipi Tünel Birleşim Kesiti PVC Membran Uygulaması

3. MATERYAL VE YÖNTEM

İstanbul Medeniyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Lisans Laboratuvarı'nda bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda çimento harcındaki bentonitin geçirimsizliğe etkisi araştırılmıştır.

Bu kapsamda inşaat çalışması devam eden Çekmeköy-Sultanbeyli-Sancaktepe Metro inşaatı kalite kontrol laboratuvarında 8 farklı %7, %9, %12 ve %15 oranında bentonit katkılı çimento harçlarından, 150x150x150 mm küp şeklinde numuneler hazırlanmış ve 28 gün su içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra numuneler İstanbul Medeniyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Lisans Laboratuvarına getirilerek Sertleşmiş betonda basınç altında su işleme derinlik tayini TS EN 12390-8 standardı ve sertleşmiş betonda su emme tayini EN 1338 standardına uygun yapılarak bentonitin çimento harcı üzerindeki geçirimsizliğe etkisi incelenmiştir.

Çalışmada 8 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Karışımlarda 1m³ harç içerisindeki bileşen malzeme miktarları sırasıyla Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmektedir.

%7 bentonit katkılı çimento harcı ile hazırlanan numuneler:

D1 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve bağlayıcı madde miktarının %50 si uçucu külden oluşmaktadır.

D1.1 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve uçucu kül kullanılmadan bağlayıcı madde olarak sadece çimento kullanılmıştır.

Tablo 5 %7 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı

	D1	D1.1
Çimento	230 kg	450 kg
Uçucu Kül	220 kg	0
Bentonit	31,5 kg	31,5 kg
Kum	894,5 kg	983,6 kg
Su	432 kg	432 kg
Geçirimsizlik katkısı	4,5 kg	4,5 kg

%9 bentonit katkılı çimento harcı ile hazırlanan numuneler:

D2 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve bağlayıcı madde miktarının %50 si uçucu külden oluşmaktadır.

D2.2 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve uçucu kül kullanılmadan bağlayıcı madde olarak sadece çimento kullanılmıştır.

Tablo 6 %9 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı

	D2	D2.2
Çimento	230 kg	450 kg
Uçucu Kül	220 kg	0
Bentonit	40,5 kg	40,5 kg
Kum	848,8 kg	937,9 kg
Su	441 kg	441 kg
Geçirimsizlik katkısı	4,5 kg	4,5 kg

%12 bentonit katkılı çimento harcı ile hazırlanan numuneler:

D3 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve bağlayıcı madde miktarının %50 si uçucu külden oluşmaktadır.

D3.3 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve uçucu kül kullanılmadan bağlayıcı madde olarak sadece çimento kullanılmıştır.

Tablo 7 %12 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı

	D3	D3.3
Çimento	230 kg	450 kg
Uçucu Kül	220 kg	0
Bentonit	54 kg	54 kg
Kum	791,9 kg	881 kg
Su	445,5 kg	445,5 kg
Geçirimsizlik katkısı	4,5 kg	4,5 kg

%15 bentonit katkılı çimento harcı ile hazırlanan numuneler:

D4.4 Numunesi: 150x150x150 mm ölçülerinde 3 adet hazırlanmış ve uçucu kül kullanılmadan bağlayıcı madde olarak sadece çimento kullanılmıştır.

Tablo 8 %15 Bentonit Katkılı Çimento Karışım Tasarımı

	D4	D4.4
Çimento	230 kg	450 kg
Uçucu Kül	220 kg	0
Bentonit	67,5 kg	67,5 kg
Kum	758,2 kg	847,3 kg
Su	445,5 kg	445,5 kg
Geçirimsizlik katkısı	4,5 kg	4,5 kg

3.1 Materyal**3.1.1 Çimento**

Çalışmada Akçansa firmasına ait CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimento, su ile karıştırıldığında kimyasal bir reaksiyona girerek sertleşir ve beton, sıva ve harç gibi yapı malzemelerinin temel bağlayıcı maddesini oluşturur. Farklı tipleri bulunur ve yapısal gereksinimlere uygun olarak tasarlanmışlardır. Çimento, modern yapıların ve altyapının oluşturulmasında önemli bir rol oynar.

Çalışmada kullanılan çimentoya ait kimyasal testler ile ilgili bilgiler ise Tablo 9 ve Tablo 10' da verilmiştir.

Tablo 9 Çimentonun kimyasal analizi (Akçansa, 2023)

Kimyasal Analiz	Standartlar	Analiz
Çözünmez Kalıntı %	$\leq 5,0$	0,89
SO ₃ %	≤ 4	3,16
Kızdırma Kaybı %	$\leq 5,0$	2,34
C ₁ %	$\leq 0,1$	0,0172

Firmanın çimentoya yaptığı fiziksel test ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir. Test metodu TS EN 196-3 ve TS EN 196-6'ya göre yapılmıştır.

Tablo 10 Çimentonun fiziksel analizi (Akçansa, 2023)

Fiziksel Özellikler	Standartlar	Analiz Sonuçları
Test Metodu TS EN 196-3 ve TS EN 196-6		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3,12
Priz Süresi	≥ 60	147
Hacim Genişlemesi (mm)	≤ 10	1
Özgül Yüzey (cm ² /gr.)		3960
İncelik		
45 μ Elek Kalıntısı (%)		2,8
90 μ Elek Kalıntısı(%)		0,2

Çimentonun dayanım değerleri TS EN 196-1'e göre MPa cinsinden Tablo 11'de verildiği gibidir.

Tablo 11 Çimentonun basınç dayanımı

Mekanik Özellikleri / gün	Standartlar	Deney Sonucu
Erken Dayanım 2 gün	≤ 20 MPa	31,8 MPa
Standart Dayanım 28 gün	$\geq 42,5$ MPa $\geq 62,5$ MPa	57,2 MPa

3.1.2 Bentonit

Bentonit, doğal bir kil mineralidir ve genellikle kil mineralleri ailesinden olan montmorillonit minerali içerir. Bentonit, su emme ve şişme gibi özelliklere sahiptir ve çamur, emülsiyon, toprak stabilize etme ve sondaj çamuru gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Bu çalışmada ise şişerek su geçirimsizliğe katkı sağlaması amacıyla Na bentonit kullanılmıştır ve %7, %9, %12 ve %15 oranında kullanılmıştır. Bentonite ait deney sonuçları aşağıdaki Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12 Na Bentonitin Kimyasal Analiz Raporu

Deney Tipi	Standart Gereken	Deney Sonucu
Nem Oranı	-	10,6
Şişme Endeksi	-	-
Metilen Mavisi	-	-
SiO ₂	55-65	61
Al ₂ O ₃	%15-25	18
Fe ₂ O ₃	Max. %0,5	0,5
CaO	Max. %0,5-1,5	1,1
Na ₂ O	%4-6	4,5
MgO	%2,5-3,5	3,2
K ₂ O	%0,5-1,5	1,1
Renk	Sarı	Sarı
Elek Analizi	%97 min.	99,4
Montmorillonit	75%	87
PH	8-10	9,8
Nem Oranı	%10-12	9,1

3.1.3 Kum

Harç karışımlarında kullanılan kum, genellikle ince taneli ve temizlenmiş bir kum çeşididir. Kum, harç karışımına dayanıklılık ve yapışkanlık katmak için kullanılır. Kumun özellikleri, harcın son özelliklerini etkileyebilir, bu nedenle genellikle ince ayarlar yapılır. Kumun mineral bileşimi, boyutu ve şekli gibi faktörler, harcın son dayanıklılığı, yapışkanlığı ve görünümü üzerinde etkili olabilir.

3.1.3.1 Kumun Özellikleri

Kum elek analizi, bir kum örneğinin tane boyutu dağılımını belirlemek için yapılan bir laboratuvar testidir ve kumun belirli bir uygulamaya uygun olup olmadığını belirlemek için önemlidir. Kum elek analizi genellikle şu adımları içerir:

1. Örnek Hazırlığı: Örnek, laboratuvar için uygun hale getirilir. Bu, örnek alınması, temizlenmesi ve kurutulması gibi adımları içerebilir.

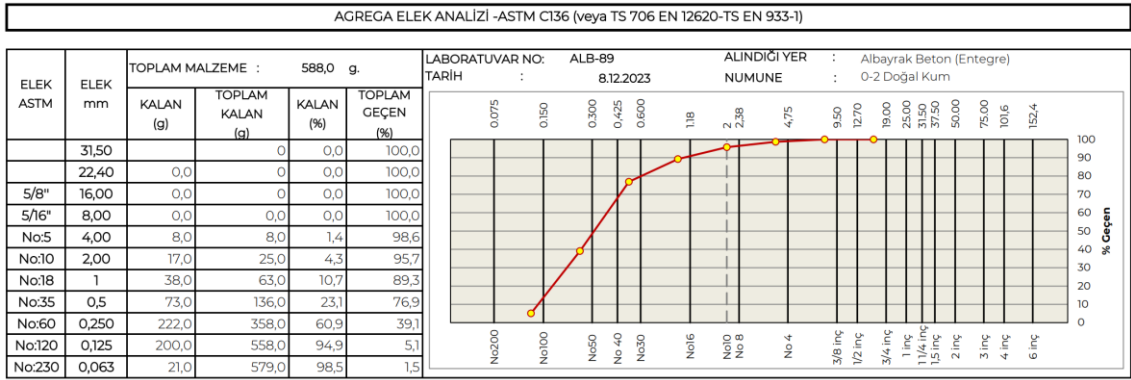
2. Eleklerin Hazırlanması: Standart elek seti kullanılarak çeşitli tane boyutlarına sahip elekler hazırlanır. Elekler genellikle belirli bir aralıkta tane boyutlarını temsil eder, örneğin, 4.75 mm'den 75 mikrona kadar olan elekler.

3. Eleme İşlemi: Hazırlanan kum örneği, elekler üzerine yerleştirilir ve bir elek makinesi kullanılarak sallanır veya titreşir. Bu işlem, örneğin farklı tane boyutlarına göre ayrılmasını sağlar.

4. Analiz: Eleme işlemi tamamlandıktan sonra, her bir elekten geçen ve kalan malzemenin ağırlığı ölçülür. Bu veriler, kumun tane boyutu dağılımını belirlemek için kullanılır.

5. Sonuçların Değerlendirilmesi: Elde edilen veriler, kumun tane boyutu dağılımını gösteren bir grafik veya tablo şeklinde sunulur. Bu bilgiler, kumun belirli bir inşaat veya yapı malzemesi için uygun olup olmadığını belirlemek için değerlendirilir.

Tane çapı 0-2 mm olan doğal kum seçilerek TS 706 EN 12620-TS EN 933-1 standartlarına uygun elek analizi yapılmış ve karışımın gradasyonu hazırlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan kumun elek analizi sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 12 Agrega Elek Analizi

3.1.4 Uçucu Kül

Harç içerisinde puzolanik malzeme olarak F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Eren Enerji Elektrik A.Ş. üretim tesislerinden elde edilen uçucu külün kimyasal analiz raporu aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 13 Uçucu Kül Kimyasal Analiz raporu (CPC 2023)

Kızdırma Kaybı %	Klor %	SO ₃ %	Serbest Cao %	Reaktif Cao %	SiO ₃ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ %	Toplam Alkali Na ₂ O+0,668+K ₂ O %
1,82	0,03	0,42	0,14	0,74	85,39	2,88

3.1.5 Akışkanlaştırıcı Katkı Malzemesi

Bu çalışma kapsamında üretilen harç için yer altı yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmiş MasterRheobuild® T1 süperakışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Bu katkı, yer altı yapılarına yönelik süper akışkanlaştırıcı beton katkısıdır. Geleneksel süper akışkanlaştırıcı beton katkıları ile karşılaştırıldığında MasterRheobuild® T1 yaş sistem püskürtme betonda daha yüksek oranda su azaltılmasına imkân sağlar.

3.1.5.1 Kullanım Yerleri

MasterRheobuild® T1 akışkanlaştırıcı erken ve nihai yüksek mukavemet istenen yaş sistem püskürtme beton uygulamaları için uygun seçimlerden biridir. Söz konusu katkı, yaklaşık %25-30 oranında su azaltırken aynı zamanda gerekli işlenebilirliği de sağlar. Bu özellikleri aşağıdaki uygulamalar için idealdir:

- Geçici ve nihai tahkimat amaçlı püskürtme beton işlerinde,
- Tek kabuk tünel kaplama beton işlerinde,
- Erken ve nihai yüksek dayanım istenilen yaş sistem püskürtme beton işlerinde,
- TBM segmentlerinin arkasına yapılan ve uzun süreli işlenebilirliğe ihtiyaç duyulan geri dolgu işlerinde,
- İşlenebilirlik ve pompalanabilirliğin durabilite ve yüksek dayanımla beraber istendiği yer altı yapı işlerinde kullanılır.

3.1.5.2. Avantajları

- Segregasyon ve su kuma yapmadan düşük su/çimento oranı ile yüksek işlenebilirlik.
- Beton karışımının kohezyonunu arttırırken, betonun pompalanabilirliğini de kolaylaştırma.
- Pompa üzerinde meydana gelen aşınmaları azaltma.
- MasterRoc® SA 160, MasterRoc® SA 187, MasterRoc® SA 189 ve benzeri Master Builders Solutions ürünü priz hızlandırıcı katkılar ile beraber kullanıldığında püskürtme betonun priz süresi ve mukavemet gelişimini hızlandırma.
- Püskürtme betonun fiziksel dayanımını ve durabilitesini arttırma.

- Yüksek erken ve nihai mukavemetlere ulaşılmasına imkân sağlama.
- Düşük su/çimento oranı ile beton yapımına imkân verdiği için betonun geçirimsizliğini artırma

3.1.5.3. Diğer Katkı Malzemeleri ile Uyumu

MasterRheobuild® T1 tüm çimento tipleri ile uyumludur. Bu süperakışkanlaştırıcı katkı aşağıdaki katkılarla beraber kullanılabilir:

- Donma-Çözünme direncini arttırmak için hava sürükleyiciler.
- Rötire engelleyici katkılar.
- Sentetik ve çelik fiberler.
- Beton iyileştiriciler.

3.1.5.4 Karıştırma ve Dozaj

MasterRheobuild® T1 betona diğer katkılardan önce eklenmelidir. Katkının etkisi beton karışım suyunun %50-70'i verildikten sonra eklendiğinde en iyi şekilde görülür. MasterRheobuild® T1'i kuru agrega ve çimentoya eklemekten kaçınmak gereklidir. MasterRheobuild® T1 normal koşullarda toplam bağlayıcı miktarının %0,8-2,5'i oranında kullanılmaktadır.

3.1.5.5 Teknik Özellikleri

Tablo 14 Süperakışkanlaştırıcı Katkı Özellikleri

Şekil	Viskoz Sıvı
Renk	Koyu Kahverengi
Yoğunluk	1,214 ± 0,03 kg/lit.
PH Değeri	6,5-9
Alkali Miktarı	Max. %10
Klor Miktarı	≤0,01 %

3.2 Yöntem

Bu çalışma kapsamında geçirimsiz bir harç elde etmek amacıyla bentonit ve uçucu kül oranları farklı 8 ayrı harç hazırlanmıştır. Tüm numuneler de aynı oranda kimyasal akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere ek olarak 1 numune de geçirimsizlik katkısı kullanılarak hazırlanmıştır.

Tüm numuneler 150x150x150 mm'lik numune kalıplarında hazırlanarak su da 28 gün bekletilmiş sertleşmiş beton testlerine tabi tutulmuştur.

4.BULGULAR

4.1 Çimento Harcı Denemeleri

Harcın fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertleşmiş beton numunelerine ait test ve deneyler yapılarak sonuçlar paylaşılmıştır. Bu çalışmada sertleşmiş numunelere basınç altında su işleme derinliği tayini, yarmada çekme testi ve su emme testleri yapılmıştır. Bu testler için numuneler 150x150x150 mm'lik kalıplarda hazırlanıp 28 günün sonunda deneylere tabii tutulmuştur.

Sertleşmiş betonun geçirimsizlik ve mekanik özellikleri için beton 28 günlük priz alma sürecini tamamladıktan basınç altında su işleme derinliği tayini, yarmada çekme testi ve su emme testi yapılmıştır.

4.1.1 Yarmada Çekme Testi

Sertleşmiş betonun yarmada çekme testi TS EN 12390-6 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Bu test, betonun basınçlı su altında su işleme derinlik tayinini belirlemek için yapılmıştır. Yarmada çekme deneyi için öncelikle, sertleşmiş betondan numuneler hazırlanır. Bu numuneler genellikle priz almış betondan küçük bloklar veya silindirler şeklindedir. Numune yüzeyleri düzgünleştirilir ve numunenin yüzey pürüzlülüğü minimize edilir. Numune, yarmada çekme testi cihazının üzerine yerleştirilir. Yarmada çekme testi için özel bir yükleme cihazı kullanılır. Bu cihaz, numunenin iki ucu arasındaki

mesafeyi sabit tutar ve belirli bir yükleme hızıyla numuneye yatay bir kuvvet uygular. Yükleme cihazı, numunenin iki ucuna belirli bir yük uygular ve bu yük altında numune çekilmeye başlar. Numunenin üzerine uygulanan yük, çatlak oluşumunu başlatır ve çatlak numunenin içinde ilerler. Kırılma noktası, çatlakların ilerleyerek numunenin tamamen kırıldığı noktadır. Kırılma yükü aşıldıktan sonra numune ortadan ikiye yarılır ve su işleme derinlik tayini gerçekleştirilir.



Şekil 13 Yarmada Çekme Deney Görseli

4.1.2 Sertleşmiş Betonda Basınç Altında Su İşleme Derinli

Betonda basınç altında su işleme derinlik tayini ile betonun su geçirgenliğini belirlemek için yapılan bir deneydir. Bu test, betonun su geçirgenliği özelliklerini değerlendirmek ve yapısal dayanıklılığını etkileyebilecek suyun içeriye nüfuz etme yeteneğini ölçmek için kullanılır. Bu test TS EN 12390-8 standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

Basınç altında su işleme derinliği testini yapmak için öncelikle, test için sertleşmiş betondan numuneler hazırlanır. Bu numuneler genellikle silindirik veya priz almış beton küp bloklar şeklindedir. Numunelerin standart boyutları genellikle belirlenmiş standartlara göre belirlenir. Numunelerin yüzeyleri

düzgünleştirilir ve gerekirse özel bir kaplama veya yağlama işlemi uygulanarak numunenin yüzey pürüzlülüğü minimize edilir. Numuneler, test öncesi belirli bir nem seviyesine getirilmelidir. Basıncı su geçirimsizliği testi için özel bir test cihazı kullanılır. Bu cihaz, numuneye belirli bir su basıncı uygulamak için tasarlanmıştır. Cihazın basınç ve su akışını kontrol edebilme yeteneği vardır. Numune, test cihazının içine yerleştirilir ve test cihazı numunenin etrafını sıkıca kavrar. Numunenin su geçirgenliğini belirlemek için kullanılan özel bir sistem aracılığıyla su, numunenin bir yüzeyine 72 ± 2 saat süreyle 500 ± 50 KPa (5 bar) basınçlı su, numunenin yüzeyine uygulanır. Su, belirli bir basınç altında numunenin yüzeyine sızar ve su geçirimsizliği ölçülür. Su geçirimsizliği, belirli bir basınç altında numunenin yüzeyinden suyun ne kadar sızdığını gösteren bir ölçümdür.

Test sırasında su sızıntısı ve su basıncı sürekli olarak izlenir ve kaydedilir. Bu test, betonun su geçirgenliği özelliklerini değerlendirmek ve yapısal beton elemanlarının tasarımında kullanılan su yalıtım sistemlerini belirlemek için önemlidir ve standartlara göre ≤ 25 mm'den az suyun nüfuz ettiği numuneler geçirimsiz kabul edilir.



Şekil 14 Basınçlı Su geçirimliliği Deney Düzenegi

4.1.2.1 Uçucu Kül İlaveli Hazırlanan Grout Çimento Karışımı

Uçucu külü %50 oranda içeren çimento harcı ile hazırlanan D1, D2 ve D3 numuneleri ile yapılan basınçlı su emme testi sonucunda numunelerin tamamen su emdiği tespit edilmiştir ve basınçlı su emme deneyine uçucu kül ilavesiz D1.1, D2.2, D3.3 ve D4.4 numuneleri ile devam edilmiştir.



Şekil 15 Numunelerin Su Seviyelerinin Belirlenmesi

Karışımlarda %50 oranında uçucu kül kullanılmasının suyun penetrasyonunu arttırdığı görülmüştür.

4.1.2.2 Uçucu Kül İlavesiz Hazırlanan Grout Çimento Karışımı

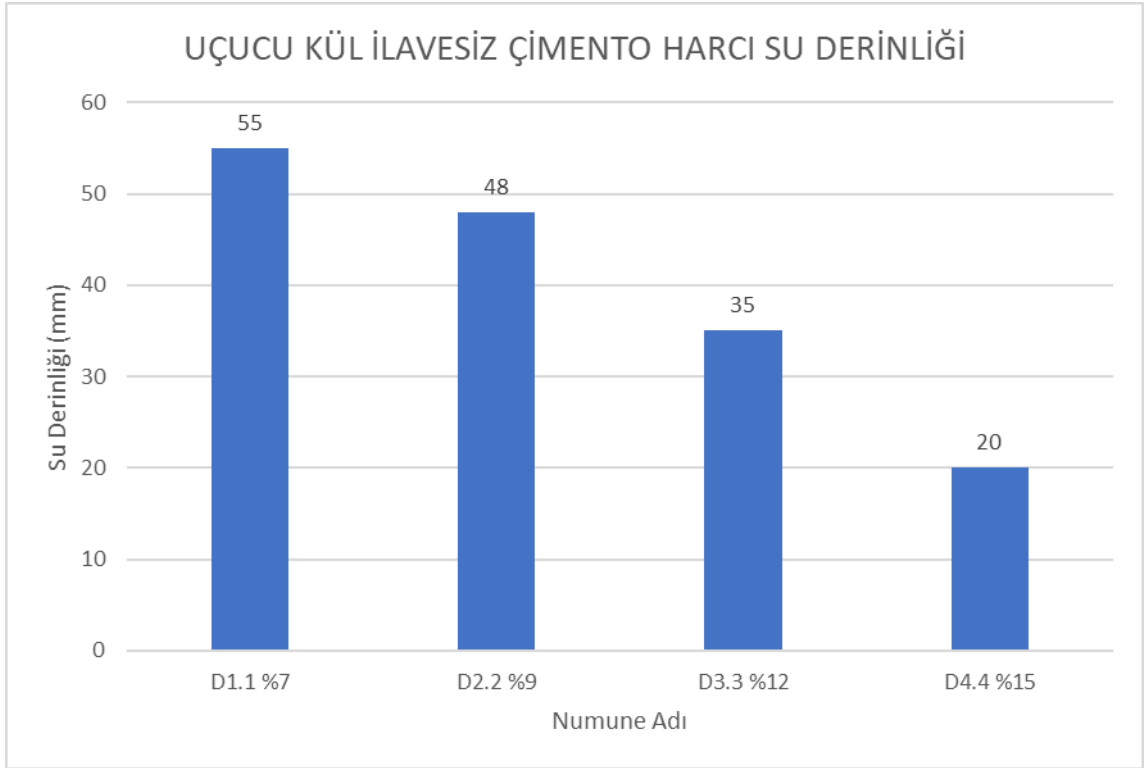


Şekil 16 Numunelere Nüfuz Eden Su Seviyesinin Belirlenmesi

Tablo 15 Uçucu Kül İlavesiz Çimento Harcı Su Seviyesi Yüksekliği

Numune Adı	Su Yüksekliği
D 1.1	55 mm
D 2.2	48 mm
D 3.3	35 mm
D 4.4	20 mm

Yapılan deney neticesinde, küp numune yarma çekme testi sonrası penetrasyon derinliklerinin ölçümü kaydedilmiştir. Deneyler neticesinde, D1.1, D2.2, D3.3 ve D4.4 uçucu kül ilavesiz hazırlanan numunelerin basınçlı su altında maksimum penetrasyon derinliğinin D1.1 numunelerinde, D2.2 numunelerine göre %15' e varan bir artış kaydedilirken bu oran D3.3 numunelerinde %57 ve D4.4 numunelerine göre %175'e kadar çıkmıştır. Bu deney ve kaydedilen sonuçlar neticesinde, uçucu kül kullanılmayan çimento karışımında bentonit miktarı arttıkça penetrasyon derinliğinin azaldığı görülmektedir. TS EN 12390-8 standardına göre yapılan deneyde su geçirimsizlik özelliği en yüksek olan %15 oranında bentonit katkılı çimento harcı olmuştur.



Şekil 17 Uçucu Kül İlavesiz Çimento Harcının Su Derinlik Tayini Sonuçları

4.1.3 Sertleşmiş Betonda Su Emme Testi

Sertleşmiş betonda su emme testi, betonun su geçirgenliğini belirlemek için yapılan bir deneydir. Bu test, betonun su emme kapasitesini ve suya karşı direncini değerlendirmeye yardımcı olur. Sertleşmiş betonda su emme testi için öncelikle sertleşmiş betondan numuneler hazırlanır. Genellikle bu numuneler, priz almış betondan küçük bloklar veya silindirler şeklindedir. Numunelerin standart boyutları genellikle 100x100x100 mm veya 150x150x150 mm'dir. Numunelerin yüzeyleri düzgünleştirilir ve gerekirse özel bir kaplama veya yağlama işlemi uygulanarak numunenin yüzey pürüzlülüğü minimize edilir. Numuneler, test öncesi belirli bir nem seviyesine getirilmelidir. Numuneler, test öncesinde tartılır. Bu tartım, numunenin başlangıç ağırlığını belirlemek için yapılır. Hazırlanan numune, belirli bir süre boyunca suya daldırılır. Numunenin tamamen suya batırılması sağlanır ve su emme süreci başlatılır. Numunenin suya daldırıldığı belirli aralıklarla, genellikle belirli zaman aralıklarında, numunenin su emme miktarı ölçülür. Bu süreçte numunenin ağırlığı düzenli aralıklarla ölçülür. Numunenin su emme miktarı, belirlenen zaman aralıklarında kaydedilir. Bu veriler, betonun su emme hızını ve toplam su emme kapasitesini belirler. Sertleşmiş betonda su emme testi, betonun dayanıklılığını ve su geçirgenliğini belirlemek için önemli bir yöntemdir. Bu test, özellikle betonun kullanıldığı yapıların suya karşı direncini değerlendirmek ve betonun uzun vadeli performansını tahmin etmek için önemlidir. Test sonuçları yapısal beton elemanlarının tasarımında ve kalitesinin kontrolünde kullanılır.



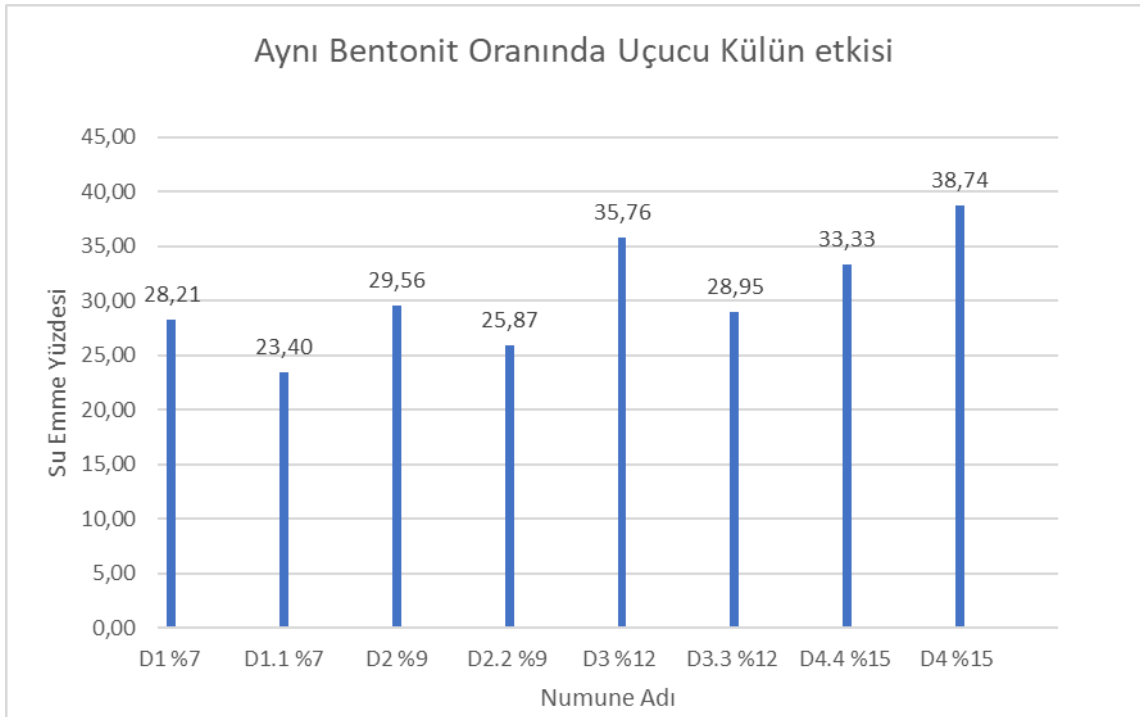
Şekil 18 Etüv Cihazı ve Numunelerin Tartılması

Tablo 16 Numunelerin Su Emme Deney Sonuçları

Numune Adı	Bentonit	Etüv Öncesi (gr.)	Etüv Sonrası (gr.)	Islak Ağırlık (gr.)	Fark	Yüzde %
D1 %7	7%	2401,3	2490,1	2899,4	409,3	16,44
		2241,4	2057,6	2734,5	676,9	32,90
		2446,3	2216,2	2966,7	750,5	33,86
		2342,4	2197	2848	651	29,63
D1.1 %7	7%	2738,3	2472,5	3053,4	580,9	23,49
		2340,4	2115,5	2607	491,5	23,23
		2661,8	2051,6	2544,9	493,3	24,04
		2644,1	2423,6	2976,6	553	22,82
D2 %9	9%	2409,4	2222,9	2876,7	653,8	29,41
		2524,3	2320,3	3016,9	696,6	30,02
		2550,1	2320,7	3005,9	685,2	29,53
		2525,7	2301,1	2974,9	673,8	29,28
D2.2 %9	9%	2692,7	2387	3020,1	633,1	26,52
		2557,1	2266,5	2844	577,5	25,48
		2926,7	2567,2	3242,6	675,4	26,31
		2737,3	2446,6	3062,8	616,2	25,19
D3 %12	12%	2354,7	1869	2561,4	692,4	37,05
		2504,3	1938,7	2662,5	723,8	37,33
		2638,3	2109,2	2840,5	731,3	34,67
		2737,2	2212	2963,6	751,6	33,98
D3.3 %12	12%	2724,8	2170,8	2736,2	565,4	26,05
		2870,1	2249,9	2879,5	629,6	27,98
		2734,9	2164,7	2941,8	777,1	35,90
		2912,6	2320,9	2921,7	600,8	25,89

D4.4 %15	15%	2331,8	2181,4	2906,4	725	33,24
		2381,1	2200,3	2953,7	753,4	34,24
		2481,2	2327,2	3101,4	774,2	33,27
		2158,4	2087,2	2766,9	679,7	32,57
D4 %15	15%	2331,8	2181,4	3086,4	905	41,49
		2381,1	2200,3	3153,7	953,4	43,33
		2481,2	2327,2	3201,4	874,2	37,56
		2158,4	2087,2	2766,9	679,7	32,57

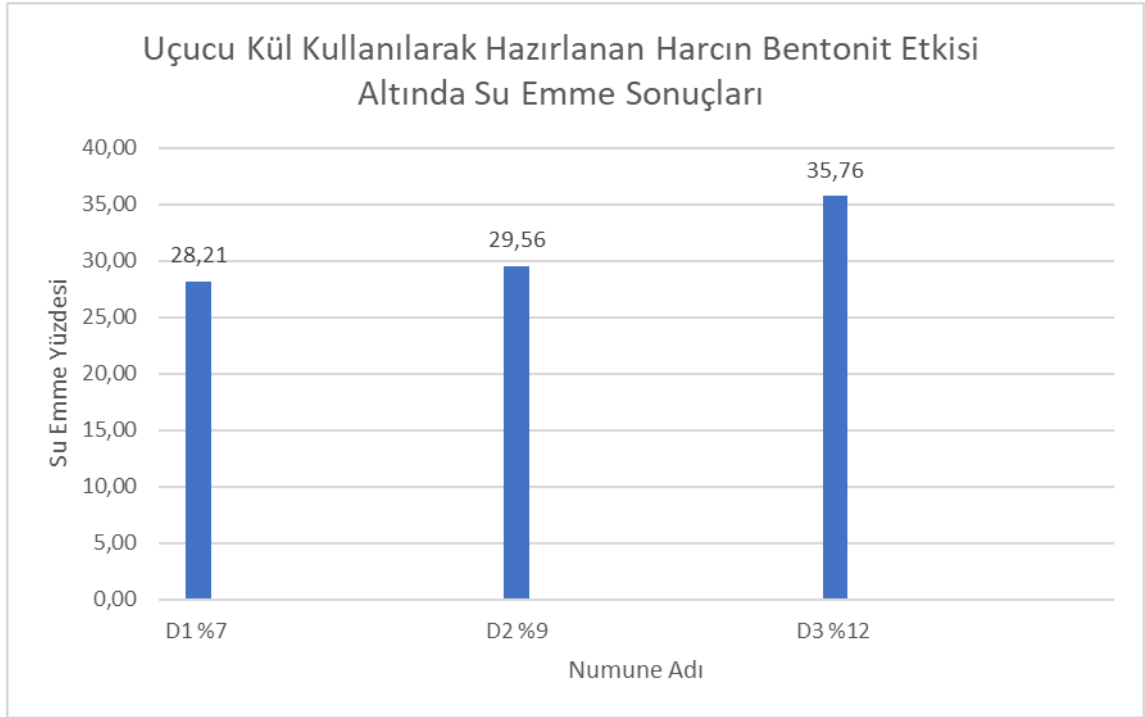
Tablo 16'da ki sonuçlara göre aynı bentonit yüzdesinde %50 uçucu kül kullanılarak hazırlanan numunelerin su emme miktarının daha fazla olduğu görülmüştür. Karışımlarda %50 oranında uçucu kül kullanımı su emme kapasitesini arttırmaktadır.



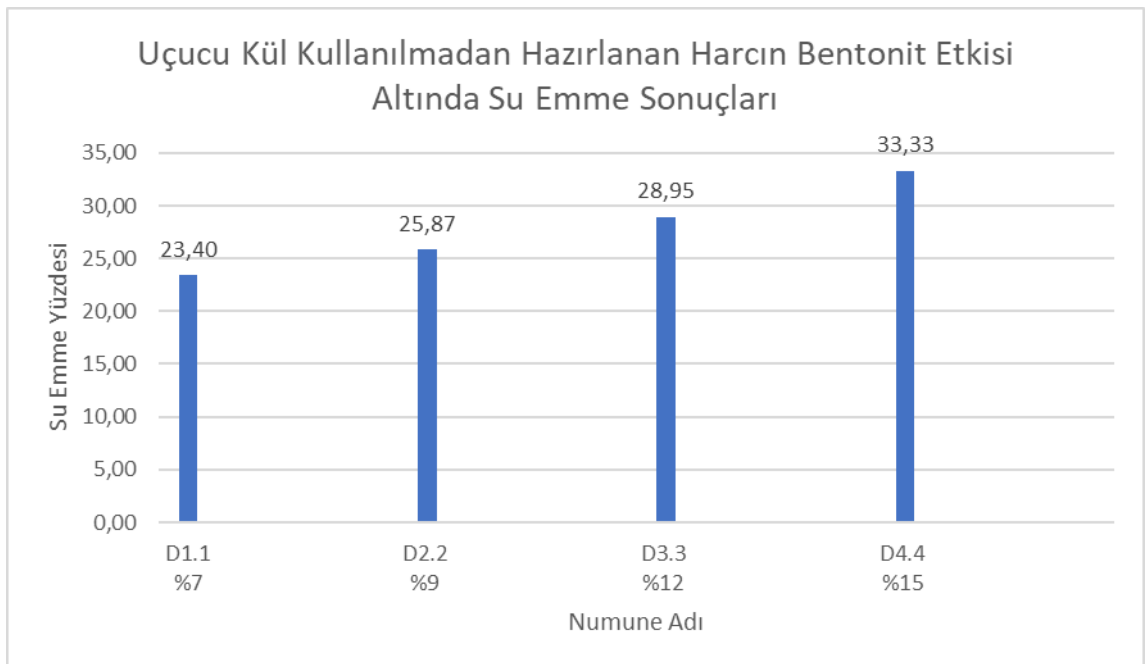
Şekil 19 Aynı Bentonit Oranında Hazırlanan Numunelerin Uçucu Kül Etkisinde Su Emme Sonuçları

Benzer olarak Tablo 16'da elde edilen sonuçlara göre aynı beton karışımında bentonit miktarının artması su emme kapasitesini arttırmaktadır (**Şekil 16** ve **Şekil 17**). Bu durum Na bentonitin su emme kapasitesinin 1-15 kat aralığında

olduğu kabul edildiğinde bentonit miktarının artması ile su emme kapasitesinin arttığı görülür.



Şekil 20 Aynı Uçucu Kül Oranında Bentonit Etkisinde Su Emme Kapasitesi

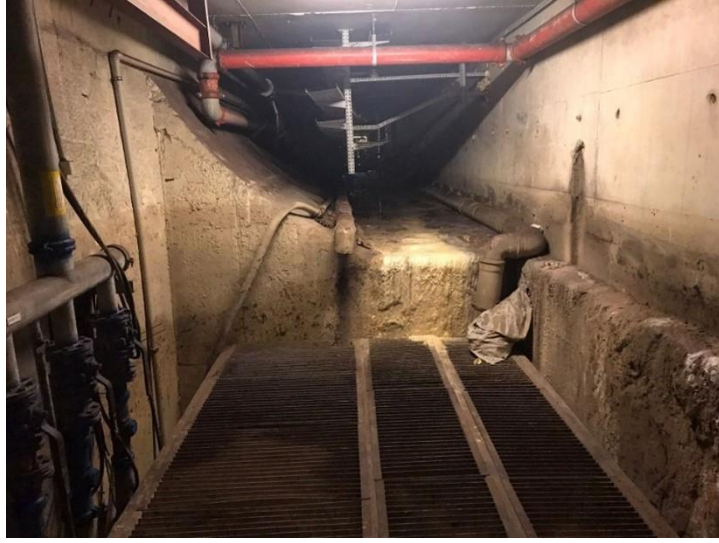


Şekil21 Uçucu Kül Kullanılmadan Hazırlanan Numunelerin Bentonit Etkisi Altında Su Emme Kapasitesi

4.2 Sızıntı Sularının Değerlendirilmesi

4.2.1 Metrolarda Yağmur Suyu Hasadı

Metro projelerinde istasyon bölgelerinde bırakılan su toplama çukurları suyun toplanıp pompa ile istenilen yere atılır. Tüm sistem boyunca sızıntı suları istasyon bölgelerine aktararak suyun tahliye çukurlarında birikmesi sağlanır



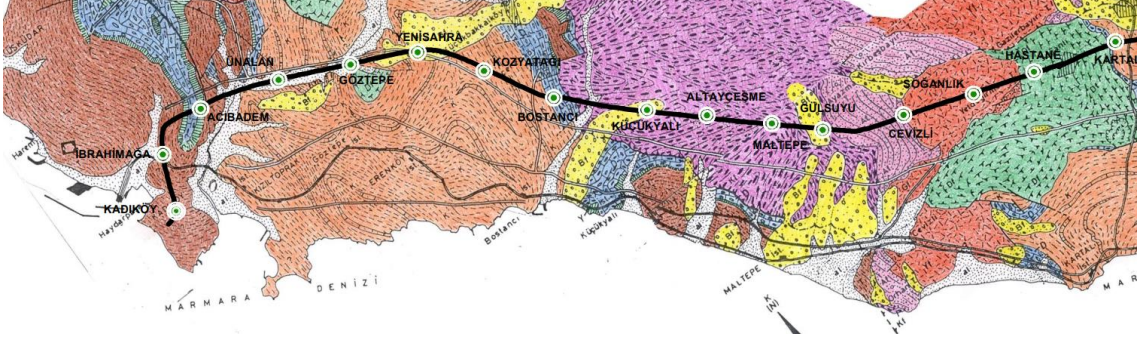
Şekil 22 Metroda Yer altı Suyu Drenaj Çukuru

16 istasyondan oluşan Kadıköy Kartal Metro Hattı inşaatı 2012 yılında tamamlanmıştır. Daha sonra hattın ikinci etabı Pendik Tavşan Tepe Hattı açılmıştır. 2. Etap ile toplam uzunluğu 26,2 km olup toplam 19 istasyondan oluşmaktadır.

Hat Kadıköy'den başlayarak D100 güzergahında Tavşan Tepe'ye kadar uzanır. Maltepe istasyonu bölgesinde, 13 tren kapasiteli depo ve toplam 8 tren kapasiteli bakım atölyesi bulunmaktadır. 26,2 km'lik hattın tamamı yer altına inşa edilmiştir.



Şekil 23 M4 metro istasyonu güzergahı



Şekil 24 Metrosu Güzergahının Jeolojik Haritası

Göztepe metro istasyonu da M4 metro hattında bulunan bir metro istasyonudur. İstasyon ismini bölgeden almıştır ve Göztepe Köprüsünün hemen yanında inşa edilmiştir. İstasyonun tamamı aç kapa yöntemi ile yapılmış, teknik katlar, turnike katı ve giriş çıkış istasyonlarından oluşmaktadır.



Şekil 25 M4 Metrosu Göztepe İstasyonu

İstasyonumuzda halihazırda bulunan pompa çukurlarında depolanan suyun yağmur suyu hattına verildiği bilinmektedir. Bu suyun yağmur suyu hattına direkt olarak değil de önce projemizde bulunan depoya aktarılması

gerekmektedir. Bu sayede yağmur suyu toplanıp hatta verilip boşa gitmesi yerine depolanarak bu istasyon için su ihtiyacı, istasyon çıkışında bulunan yeşil alan için sulama suyu ve yangın esnasında su alması için itfaiye araçlarına ve kanalizasyon temizliğinde kullanılan kombine araçları için su temini sağlamak amacı ile depolanabilecektir.

Metro İstanbul verilerinden yararlanılarak:

Tablo 17 Günlük ortalama basılan su miktarı (m³)

İstasyon ve Pompa Gücü	DSP 101.1 Sayacı Tarih ve Saat		DSP 101.2 Sayacı Tarih ve Saat		DSP 101.3 Sayacı Tarih ve Saat		Ortalama Fark 14. Gün	
	İlk Okuma	Son Okuma	İlk Okuma	Son Okuma	İlk Okuma	Son Okuma	Günlük Ort. Pompa Çalışma Süresi (h)	Günlük Ort. Pompa Çalışma Süresi (m ³)
Göztepe (22kW-22kW-7.5kW)	595,64	595,64	127,06	127,4	187,45	222,95	0,85	25,6
İstasyon ve Pompa Gücü	DSP 101.1 Sayacı Tarih ve Saat		DSP 101.2 Sayacı Tarih ve Saat		DSP 101.3 Sayacı Tarih ve Saat		Ortalama Fark 14. Gün	
	İlk Okuma	Son Okuma	İlk Okuma	Son Okuma	İlk Okuma	Son Okuma	Günlük Ort. Pompa Çalışma Süresi (h)	Günlük Ort. Pompa Çalışma Süresi (m ³)
Göztepe (22kW-22kW-7.5kW)	431,27	460,39	124,58	128,49	352,29	356,54	1,82	54,49

Tablo 17’de görüldüğü gibi Göztepe istasyonunda yoğun bir su geliri olduğu görülmektedir. Bu suyun depolanması yapılacaktır.

1 günde sistemden kazandırılacak su miktarı:

$25,6 \text{ m}^3 + 54,49 \text{ m}^3 = 80,09 \text{ m}^3$ istasyondan çıkan su miktarıdır. Sistemimize gelecek olan ortalama günlük su miktarı $80,09 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

4.3.2 Yeşil Alan m² Hesaplanması

İstasyon çıkışındaki yeşil alan miktarını ölçülmesi gerekmiştir. Bunun sonucunda Google Earth uygulaması kullanılarak alan ölçüm çalışması yapılmıştır. Yapılan bu ölçüm çalışması sonucunda sulanması gerek alanımızın 2070 m^2 olduğu görülmüştür. Bu ölçümün yapılmasında yeşil alan 4 farklı parçaya bölünmüştür.



Şekil 26 1. Parça Alanı

Şekil 25’de görüldüğü gibi ilk parçanın alanı 1192.66 m^2 olduğu görülmüştür.



Şekil 27 2. Parça Alanı

Şekil 26’de görüldüğü gibi ikinci parçanın alanı 617,19 m² olduğu görülmüştür.



Şekil 28 3. Parça Alanı

Şekil 27’da görüldüğü gibi üçüncü parçanın alanı 36,88 m² olduğu görülmüştür.



Şekil 29 4. Parça Alanı

Şekil 28’de görüldüğü gibi dördüncü parçanın alanı 222,21 m² olduğu görülmüştür.

Sulamada Kullanılacak Su Miktarı

Türkiye’de park ve bahçelerin sulanması için 1 metrekare için günlük yaklaşık 6 litre su kullanımı yapılmaktadır. Bunun sonucunda sulama suyu ihtiyacı hesap edilecek olursa:

$$2070 * 6 \text{ litre} = 12.420 \text{ litre/m}^2$$

2070 metrekare için gereken günlük sulama suyu miktarı 12,42 m³ olarak hesaplanmıştır.

Göztepe İstasyonundan Sisteme Katılacak Suyun Hesaplanması

Sistemden Çıkacak Suyun Hesaplanması

Sisteme gelen su hesap edilmesi sonrasında istasyonda, sulamada ve araçlarda kullanılacak suyun hesabının yapılması gerçekleştirilmiştir.

İstasyonda Kullanılan Su Miktarı

Göztepe istasyonunun su kullanımı (istasyon temizliği + tuvalet suyu) 31 gün için 79 m³’tür.

Bir gün için hesap yapılacak olursa:

$$79 \text{ m}^3 / 31 \text{ gün} = 2,55 \text{ m}^3$$

Göztepe istasyonu bir günde $2,55 \text{ m}^3$ su kullanmaktadır.

İtfaiye ve Kombine Araçları için Su İhtiyacı

Kombine araçları, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi tarafından kanalizasyon borularının temizliğinde; hem alet kullanarak basınçlı suyla temizleme hem de çıkan kirli suyun biriktirilmesinde kullanılan araçlardır. Bu araçlar 13.000 litre suyu depolayabilmektedir.

İtfaiye araçları 13.000 litre suyu depolayabilmektedir.

Bu şekilde işlem yapılırsa günde 3 farklı araca su verilmesi düşünüldüğünde:

$$13.000 \text{ litre} = 13 \text{ m}^3$$

$$13 \text{ m}^3 * 3 = 39 \text{ m}^3$$

1 günde 3 farklı aracın su ihtiyacını karşılırsak 39 m^3 su ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Toplam su ihtiyacını hesap edilecek olursa:

$$12,42 \text{ m}^3 + 2,55 \text{ m}^3 + 39 \text{ m}^3 = 53,97 \text{ m}^3 \text{ su ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.}$$

Sonuçlara bakıldığı zaman sisteme kazandırılacak sızıntı sularının miktarı günlük $80,09 \text{ m}^3$ ve günlük kullanım suyu ihtiyacı $59,97 \text{ m}^3$ bu durumda pompa çıkan suların depolanarak tekrar kullanılması için su depoları yapılarak suyun tasarrufu sağlanmalıdır.

Su Deposu Maliyet Analizi

Göztepe istasyonunun suyu İSKİ'den temin edildiği ve İSKİ'nin özel grup kategorisindeki fiyatlandırmasından işleme sokulduğu için suyun birim fiyatı 14.05.2024 tarihi itibarıyla 15,82 TL olarak belirlenmiştir. Her istasyonda $80 + 80$

tondan 2 adet yangın deposu olduğundan buradaki suyun temini için 15,82 TL'den fiyatlandırma yapıldığı zaman:

$160 * 15,82 = 2531,2$ TL 1 günde 160 m³ su temin edilmesi.

İstasyonun günlük su harcaması 2,55 m³ olduğuna göre basit hesap yapıldığı zaman:

$2,55 * 15,82 = 40,341$ TL/m³ olarak günlük harcanan su için 40,341 TL su maliyeti ortaya çıkmaktadır. Bu suyun 1 yıl boyunca temin edilmesi 14.724,465 TL maliyet ortaya çıkarmaktadır. Metro projesinin uzun ömürlü olduğunu bilindiğine göre 10 yıllık bir süreç hesaba katıldığı zaman 147.244,65 TL harcanması gerekmektedir. Metro inşası ile karşılaştırıldığı zaman 147.244,65 TL küçük bir değer gibi görülmemesi gerekmektedir.

Betonarme depo tasarımı için 60 m³ deponun maliyeti için:

Tablo 18 Betonarme Su Deposu Birim Fiyat Maliyet Tablosu

Sıra No	Yapılacak İşin Cinsi	Birim	Miktar	2024 Yılı Birim maliyet	Toplam Maliyet
1	400 dozlu demirli beton	m3	16,49	₺2.800,00	₺46.172,00
2	Kalıp Yapılması	m2	103,19	₺1.000,00	₺103.190,00
3	5 mm kalınlıkta su yalıtımı	m2	39	₺517,86	₺20.196,54
4	Ø 8- Ø 12 mm nervürlü beton çelik çubuğu 250/350 kg çimento dozlu	Ton	0,88	₺33.511,95	₺29.490,52
5	kaba ve ince harçla sıva yapımı (dış cephe) 200/250 kg çimento dozlu	m2	39,51	₺322,83	₺12.755,01
6	kaba ve ince harçla sıva yapımı (iç cephe)	m2	34,87	₺408,70	₺14.251,37

Tablo 18’de verilen hesaplamalar dikkate alındığı zaman toplam maliyet: 226.055,44 TL olarak bulunmuştur. 2 adet depo yapılacağı için toplam maliyet 425.110,88 TL olarak belirlenmiştir.

2024 yılı İSKİ suyun birim fiyatı 15,82 TL’den 60 m³ depoda biriken suyun maliyeti 949,2 TL olarak hesaplanır. Yani betonarme su deposu kendini 8 ayda amorti edecektir. 2 depo yapılacağı için toplam amorti süresi 16 ay olacaktır.

Deponun %10’luk hata payı ile tasarlanmasından dolayı kullanılacak deponun hangi ebatlarda ve kaç m³ su alacağı araştırılmıştır.

Sistemden gidecek olan su miktarı göz önüne alındığında 53.97 m³ olan sistemden çıkan suyun %10’luk bir pay ile bakıldığında 60 m³ olarak yapılması planlanmaktadır. Deponun aynı pompaj çukurunda olduğu gibi kullanılmadığı zaman dolu olacağından fazla gelecek suyu 2. Depoda aktaracaktır. 2 depoda tamamen dolu olması durumunda fazla su yağmur suyu hattına iletilecektir.

Metro projelerinde öncelikli olarak su sızıntılarının kesilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada TBM ile açılan metro tünellerinde kullanılan geri overcut dolgu harcının suya karşı daha geçirimsiz hale getirilmesi için çimento ve bentonit karışımı hazırlanmış, basınç altında suya karşı geçirimsizlikleri kontrol edilmiştir. Bu teknik sadece TBM ile kazı yapılan tünellerde uygulanmaktadır. Şekil 10 ve Şekil 11’de görülen geleneksel yöntemle TBM kullanılmadan açılan (Yeni Avusturya Yöntemi, NATM) tünellerde ise su yalıtımı için PVC kaplama geosentetik yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Bu uygulama hem pahalı hem de uygulanabilirlik açısından zorlukları vardır. PVC kaplamalarda oluşabilecek hasarların geri dönüşü olmamakla birlikte beton kaplamaların altında kalacağı için tamir edilmesi de mümkün değildir. NATM tipi tünellerin yalıtımı için de aynı şekilde hazırlanan su geçirimsizlik özelliği yüksek backfill harçlarının uygulanması ve su sızıntılarının debisi düşürülerek kontrollü şekilde drenaj çukurlarında suyun toplanması öngörülmektedir. Toplanan sızıntı suları drenaj çukurlarından pompa ile yerüstünde inşa edilen su depolarına aktararak sisteme geri kazandırılmalıdır. Bu sayede hem PVC

membran uygulamasına gerek kalmayacak hem de oluşacak sızıntı suları toplanarak sisteme geri kazandırılabilir.

Metrolarda bu yöntemin uygulanması ile metro işletmecisinin ekstra suya vereceği maliyetin ortadan kalkması ile hem istasyonlarda kullanılacak suyun hem de istasyon çıkışlarının genelinde bulunan yeşil alanın sulanmasında kullanılabilir. Sulamanın Mayıs ile Ekim ayları arasında yapıldığı düşünüldüğünde kış aylarında toplanan su ile birçok kombine ve itfaiye aracına su ve istasyonların su ihtiyacı karşılanabilecektir.

Bu doğrultuda dünyada örneklerinin az olduğu bu projenin yeni yapılan metro inşası sırasında kullanılması önem arz etmektedir. Yer altı suyu ile topladığımız suyu pompa çukurundan pompalar yardımıyla inşa edilecek su deposuna aktarması düşünülmüştür.

Su deposuna istasyondan gelecek su miktarının 80,09 m³ olduğu görülmüştür. Harcanan suyun 53,97 m³ olmasıyla birlikte 60 m³, kenar uzunluklarının da 3-4-5 m olması ile sistemin kendi kendine yetmesi planlamıştır. Depoda kullanılacak olan pompanın maksimum 10 bar basıncı kaldırabilecek herhangi bir sıcaklıkta çalışabilen bir pompa olması yeterlidir. Deponun içerisinde pompaları ayıracak bir hazne yaparak çöktürme oluşması için önce kirecin çöktürülmesi için beklenenecek alan olması gerekmektedir. Daha sonra çöken kireçten sonra suyun pompalanması ile kireçten arınmış olarak sistem çalışabilecektir. Teknik olarak su deposunda oluşabilecek aksaklıklar sebebi ile 2 adet 60 m³ depo kurulması uygun olacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, 8 farklı beton karışımı ile hazırlanmış harç numunelerine 28 günlük priz alma süreçlerinin tamamlanmasının ardından yarmada çekme dayanımı, su emme testi ve basınç altında su işleme derinlik deneyleri yapılmıştır.

Su emme testlerinde, D1, D2 ve D3 uçucu kül ilaveli numunelerin su emme test sonuçları %28,21 %29,56 ve %35,8 ve aynı bentonit yüzdesine sahip uçucu kül ilavesiz D1.1, D2.2 ve D3.3 numunelerin su emme test sonuçlarının %23,4 %25,9 ve %28,95 olduğu görülmüştür

Sonuçlar değerlendirildiğinde,

- Bentonit miktarının artması ile su emme kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir.
- 28. gündeki uçucu kül ilaveli sertleşmiş numunelerin su emme kapasitesinin uçucu kül ilavesiz sertleşmiş numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum uçucu külün daha ileri yaşlarda performans göstermesi ile ilişkilendirilmiştir. Uçucu kül ilavesi daha fazla su emmeye sebep olmuştur.

Basınç altında su işleme derinliği tayini testlerinde , farklı miktarlarda kullanılan bentonitin çimento harcının su sızdırmazlığına etkisi hazırlanan numuneler ile incelenmiştir.

İstanbul Medeniyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Lisans Laboratuvarında yapılan basınçlı su geçirimsizliği testiyle bentonit ilaveli çimento harcının su sızdırmazlık seviyesinin bentonit oranı ile doğru orantılı olarak geliştiği tespit edilmiştir. Bentonitin çimentonun mekanik özelliklerini de belirli seviyelere kadar iyileştirdiği görülmüştür. Uçucu kül kullanılmayan %15 Na bentonit ilaveli çimento harcının basınçlı su seviyesi testi sonucunun su yüksekliği ≤ 25 mm az olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çimento harcı içerisindeki bentonit miktarının artması ile su yüksekliği gözle görülür ölçüde azalmaktadır. Su geçirgenliği en düşük olan çimento karışımı için uçucu kül kullanılmayan %15 bentonit katkılı çimento harcı karışımı olmuştur.

Uçucu kül ilaveli çimento karışımlarında uçucu külün reaksiyon hızı düşük olduğundan çimento ile tepkimesi geç olmaktadır. Bu süre zarfında su emdiği ve suyu sızdırdığı görülmektedir. Uçucu kül ilaveli dolgu harçlarının overcut

imalatlarında kullanılması için uçucu külün reaksiyonunu hızını arttıracak önlemler alınarak harcın su sızdırmazlık özelliği iyileştirilebilir.

Beton harcının tasarımı belirlenirken, ihtiyaçların doğru bir şekilde belirlenmesi ve bu ihtiyaçlara uygun bir karışım geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Özellikle, kullanılacak harcın TBM segmentlerinin arkasında geri dolgu harcı olarak kullanılacağı göz önüne alındığında, temel amaç geçirimsiz bir tabaka elde etmektir. Bu bağlamda, mukavemet özellikleri ikinci planda kalmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, geçirimsizlik özelliği en yüksek %15 oranında bentonit kullanılarak elde edilen karışımda gözlemlendiği söylenebilir. Bu bilgi doğrultusunda sonuçlar, %15 bentonit eklenen numunenin en düşük geçirgenlik değerlerini sağladığını göstermektedir. Bu bulgu, TBM segmentleri arkasındaki geri dolgu harcının geçirimsizlik gereksinimlerini karşılamak için çalışma kapsamındaki optimum bentonit oranını ortaya koymaktadır. Bu oran, pratik uygulamalarda hem ekonomik hem de teknik açıdan daha uygun geçirimsizlik seviyesini sağlamakta ve böylece hedeflenen geçirimsiz tabakanın oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında çimento harcına çimento ile birlikte karıştırılan uçucu külün su geçirimsizliğini azaltmadığı ve su emme miktarını arttırdığı görülmüştür. Çimento oranını azaltmak için uçucu kül kullanımında uçucu külün su emmeyi arttırmayacak şekilde daha hızlı aktif hale gelmesini ve su sızdırmazlığını arttıracak şekilde katkı sağlayabilmesi için daha farklı karıştırma yöntemleri ve/veya ilave kimyasal katkılar araştırılabilir.

Ayrıca, TBM ile açılan tüneller dışında geleneksel yöntemlerle açılan tünellerde bentonit katkılı çimento enjeksiyon yöntemi ile su sızdırmazlığının kontrol altına alınması araştırılmalı ve bu şekilde toplanacak sızıntı sularının geri dönüşümde kullanılması için metro istasyonlarının inşaatı ile birlikte su depolarının da planlanarak projelendirilmesi uygun olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Alkaya, D. (2009). *Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi*. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi.
- Alp, M. (2016). *Tünel Delme Makinesi Ve Konvansiyonel Yöntem İle Açılan Tünellerde Kaplama/Segment Tasarımı*. DSI Technical Bulletin/DSİ Teknik Bülteni, (122).
- Ateş, O. (2019). *Betonarme Su Biriktirme Haznelerinin Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. Yozgat Bozok Üniversitesi.
- Ayyıldız, Z. (2007). *Sulamanın Temel Esasları 2*. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Adana Zirai Üretim İşletmesi ve Personel Eğitim Merkezi Müdürlüğü, 2007.
- Dedeoğlu, R. Ş. (2010). *Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin beton üzerine etkilerinin incelenmesi*.
<https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/80508>.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2020). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Toprak ve Su Kaynakları Sayfa 754: <https://www.dsi.gov.tr/> adresinden alındı
- Gedik, E., A. A. (2023). *An experimental study investigating the effects of bentonite clay on mechanical and thermal properties of concrete*. Construction and Building Materials.
- Ekinci, B. (2015). *Su Kaynaklarının Verimli Kullanılmasına Yönelik Örnek Ülke Uygulamaları ve Ülkemizde Bu Çalışmaların Uygulanabilirliği*. Ankara: TC Orman Ve Su İşleri Bakanlığı.
- Food and Agriculture Organization of The United Nation. (2011). *The state of food and agriculture 2010-2011- Women in Agriculture: Closing the gender gap for development*

- Franzoni, E. P. (2013). *Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments*. . Cement and Concrete Composites, 44, 69-76.
- Güler, E. G. (2005). *Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları*. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2Q05. izmir. Türkiye, 09-12 Haziran 2005.
- Ghraid, A. M.-K. (2023). *Utilization of Jordanian Bentonite Clay in Mortar and Concrete Mixtures*. Jordan Journal of Earth & Environmental Sciences, 14(1).
- Gökalp, T. A. (2010). *Türkiye’de Su Kaynakları Yönetiminin Değerlendirilmesi*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tabad/issue/34782/385073>.
- Gökdereli, G. (2015). *Su Çerçeve Direktifi Kapsamında Yer Altısu Kütlelerinin Belirlenmesinde Tanımlanan Metodoloji Ve Türkiye İçin Öneriler*. . Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Orman Ve Su İşleri Bakanlığı.
- Yang, H., Long, D., Zhenyu, L., Yuanjin, H., Tao, Y., Xin, H. . . Lv Shuzhen. (2019). *Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar*. Construction and Building Materials.
- Huang, W.-H. (1997). *Properties of cement-fly ash grout admixed with bentonite, silica fume, or organic fiber*. . Chungli, Taiwan: Department of Civil Engineering National Central University.
- Topçu, İ. B., M. C. (2006). *Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı*. Journal of Polytechnic.
- K.M. Klima a, K. S. (2022). *Enhancing the thermal performance of Class F fly ash-based geopolymer by sodalite*. Construction and Building materials.
- Lei Wang 1, 2. . (2022). *The Influence of Fly Ash Dosages on the Permeability, Pore Structure and Fractal Features of Face Slab Concrete*. Fractal and Fractional.

- Ly, M. L. (2020). *Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars*. Construction and Building Materials.
- M.Bayram Yücel, & Özgen Gül. (2018). *Dünya'da ve Türkiye'de Bentonit*. Maden Tetkik Arama ve Genel Müdürlüğü.
- Muluk, Ç. B. (2013). *Türkiye'de suyun durumu ve su yönetiminde yeni yaklaşımlar*. İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, Doğa Koruma Merkezi.
- OECD. (2012). oecd-ilibrary: https://www.oecd-ilibrary.org/education/education-at-a-glance-2012_eag-2012-en adresinden alındı
- Türker, P., B. E. (2009). *Türkiyede'ki Uçucu küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- SooNGSWANG, P., M. T. (1988). *Efficient Test Setup for Determining the Water-Permeability of Concrete*. Transportation Research Record.
- Rodda, I. A. (2003). *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambiridge Universty Press.
- Sheikh, S. S. (2017). *Construction of a building using fly ash concrete*. International Journal of Civil Engineering and Technology.
- Türkiye Hazır Beton Birliği. (2024). <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/cimento/>
- Yetik, A. K. (2020). *Su Hasadı Sistemlerinin Önemi ve Teknikleri*. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 8, 46-53.
- Yıldırım, H. &. (2005). *YıldBetonda akışkanlaştırıcı katkı kullanımında istenen şartlar ve Türkiye'deki durum*. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi. Antalya: (TMMOB Kimya Mühendisleri ve İnşaat Mühendisleri Odası), 157-168.