



**T.C.
BİLECİK ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU**

**BİLECİK MERMER OCAĞI ATIKLARININ ZEMİN
İYİLEŞTİRME VE BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI**

PROJE YÖNETİCİSİ: Yrd. Doç. Dr. Nazile URAL

**ARAŞTIRMACILAR: Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT
Öğr. Gr. Ahmet Tuna CÖMERT**

BAŞLAMA TARİHİ: 0.1.09.2010

BİTİŞ TARİHİ: 31.03.2011

**BİLECİK ÜNİVERSİTESİ
BİLECİK, 2011**

Özet

BİLECİK MERMER OCAĞI ATIKLARININ ZEMİN İYİLEŞTİRME VE BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Atık mermer tozu mermerlerin farklı yöntemlerle temin edilmesi veya mermer işleme tesislerinde kesim sırasında ortaya çıkmaktadır. Ancak bu atıkların doğal ortama kontrolsüz bir şekilde dökülmesi bir takım çevre sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bilecik ilinde mermer kesimhane sayısının 200'ün üzerinde olması nedeniyle mermer atıklarının değerlendirilmesi oldukça önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmada Bilecik ili mermer işletmelerindeki atıkların killi zeminlerin iyileştirilmesi ve beton üretiminde ince agrega olarak kullanılması incelenecektir. Bu amaçla killi zeminlere belirlenen yüzdelerde mermer atığı ilave edilerek fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarından killi zeminlere mermer ilavesiyle fiziksel, mekanik ve fiziko-kimyasal özellikleri incelenecektir. Ayrıca mermer kesme atığı çamur malzemesi kurutularak beton üretiminde ince agrega yerine filler malzeme olarak kullanılacaktır.

Abstract

UTILIZATION OF BILECIK MARBLE QUARRY WASTES FOR SOIL IMPROVEMENT AND CONCRETE PRODUCTION

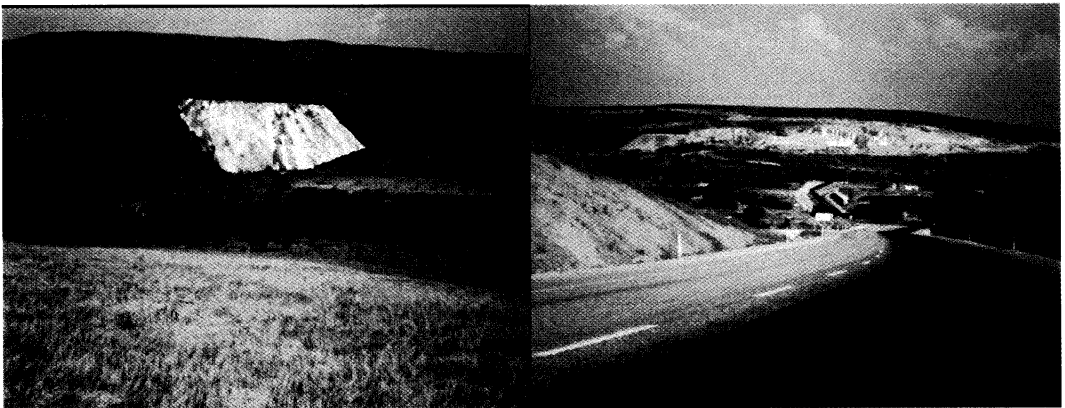
The waste marble dusts obtained by different methods or cutting process of marble in marble manufacturing companies. However, some environmental problems occur during the uncontrolled spill of these waste materials in habitat. The waste marble becomes an important fact in Bilecik province due to the number of marble factories above 200. In this study, utilization of the Bilecik province marble companies waste marble in soil improvement of clay soils and as a fine aggregate in concrete production will be investigated. For this reason, physical, mechanical and physico-chemical characteristics will be determined on clay soils with marble dust additive. The test results showed that some changes occurred in behavior of clay soil samples. Also, the cutting waste of marble sludge will be used as filler material against fine aggregate.

1. GİRİŞ

Nüfusun artışıyla dünyada tüketim artmakta ve tüketimle birlikte doğal kaynaklarımız azalmaktadır. Buna bağlı olarak, doğal kaynakların sınırlı olması geri dönüşüm ve sürdürülebilir yapı teknolojilerini oldukça önemli bir konuma getirmiştir. Özellikle inşaat sektöründe, yol inşaatlarında, çöp depolama alanlarının inşasında ve beton imalatında hammaddenin çok miktarda gerekli olması, geri dönüşüm ve sürdürülebilir malzemelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Buna ilave olarak, endüstriyel atıkların depolanması veya doğaya rastgele bırakılması başta çevre kirliliği olmak üzere birçok problemi beraberinde getirmektedir. Bu nedenle dünyada endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi ile hem atıkların meydana getirdiği çevre kirliliği önlenmekte, hem de endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılmasıyla ülke ekonomisine katkıda bulunmaktadır.

Mermer tozu, kalıp kumu, uçucu kül, fosfoalçı, cam tozu ve atık çamur gibi endüstriyel atıklar, çevreye zarar veren ve geri dönüşümü yapıldığında ülke ekonomisine katkısı olan atıklardır. Bilecik ilinde mermer sektörünün gelişmesi ve hızla işletmelerin artması böyle bir atık malzemenin değerlendirilmesini gerektirmiştir. Bu çalışmada mermer tozunun inşaat mühendisliğinin önemli iki anabilim dalını oluşturan, geoteknik ve yapı malzemesi anabilim dallarında değerlendirilmesi çalışılmıştır. İnşaat mühendisliğinde, uygulamalarda kullanılacak malzemelerin ağırlığı ton cinsinden hesaplandığı düşünülürse hammadde gereksiniminin çok olduğu bir sektördür. Bu bağlamda, endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması, hem hammadde hem de depolama sorununu çözmede çok etkili bir yöntemdir.

Mermer tozu ilk elde edildiğinde çamur halinde olmakta ve doğaya sulu halde terk edilmektedir. Mermer atığı araziye bırakıldığında, toprağın su süzme kapasitesini azaltması, bitki örtüsünün gelişimini önlemesi, dere yataklarını doldurması, araziye dökülen mermer çamurunun kurduğunda hava kirlenmesine neden olması, yağmurlu mevsimlerde mermer çamurlarının nehirlere ve kanallara akarak suyun kalitesini olumsuz etkilemesi, suda yaşayan canlılara zarar vermesi ve mermer fabrikası/işletmesi arazisinin çevresine dağılmış olan çamur kümelerinin çirkin görüntüye sebep olması mermer tozlarının değerlendirilmesi gerekliliğini göz önüne çıkarmaktadır. Şekil 1.'de mermer atıklarının oluşturduğu görüntü kirliliği görülmektedir.



Şekil 1. Mermer atığı deposu

Bu çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi, mermer tozunun zemin iyileştirmesinde kullanılması, ikincisi ise mermer tozunun beton üretiminde kullanılmasıdır. Zemin iyileştirmesi için kullanılacak yöntem, zemin özellikleri ve iyileştirme yapılmasındaki amaç göz önüne alınarak seçilmelidir. Zemin iyileştirilmesindeki amaç zemine katkı malzemesi ilave ederek, zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileşmesini sağlamaktır. Beton üretimi için ince agrega yerine filler malzeme olarak mermer tozunun kullanımı düşünülmüştür. Betonun porozitesini düşürerek agregaların homojen ve boşluksuz bir dağılım göstermesine olanak tanıyacak bu yöntemle beton dayanımında da artış olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada Bilecik ili mermer işletmelerindeki atıkların killi zeminlerin iyileştirilmesi ve beton üretiminde ince agrega malzemesi olarak kullanılması incelenmiştir.

2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Okagbue ve Onyeobi (1999) değişen oranlarda mermer tozu ilave ederek üç farklı kırmızı tropik zeminlerin geoteknik özelliklerinin değişimini incelenmişlerdir. Dane boyutu dağılımı, Atterberg limitleri, standart sıkıştırma özellikleri, basınç dayanımı ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Dayanım deneylerinin karşılaştırmaları 28 günlük kür sonrası ve 24 saat 40° C, 60° C ve 80° C sıcaklıkta kür sonrası yapılmıştır. Sonuçta kırmızı tropikal toprakların mermer tozu ilavesi ile geoteknik özellikleri önemli ölçüde değişmiştir; plastisite % 20 ile % 33 arasında azalmış, dayanımı % 30 ile % 46 artmış ve CBR değerleri ise % 27-55 artış göstermiştir. En iyi CBR deney sonucu % 8 mermer tozu ilavesinde olmuştur [1].

Saka (2001) endüstriyel atıkların değerlendirilmesi için, seramik fabrikalarının atığı olan atık çamur ve döküm atığı olan kalıp kumu kullanarak, kireç ve zeolit gibi ilave malzemeler kullanarak standart proktor deneyiyle numuneler hazırlamıştır. Böylelikle atık çamur ve kalıp kum karışımlarının fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri iyileşmiştir. Elde edilen numunelerin, serbest basma, permeabilite, sızıntı, pH, elektriksel iletkenlik, katyon değişim kapasitesi ve ağır metal miktarları belirlendikten sonra çöp depolama alanı dizaynında kullanılacak geçirimsiz temel malzemesi oranı önerilmiştir [2].

Zorluer ve Usta (2003) mermer fabrikalarının atığı olan mermer tozunu iyileştirme için katkı maddesi olarak düşünmüşlerdir. Bu amaçla, Meşelik kilinin kum ağırlığına göre atık mermer tozu ile belirli oranlarda karıştırarak standart proktor deneyini kullanarak numune hazırlamışlardır. Numunelerin şişme yüzdelerini ödometre deneyleri ile belirleyerek, atık mermer tozunun killerin şişme potansiyelini etkilediğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, atık mermer tozu zemin iyileştirmesinde kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir [3].

Sabat ve arkadaşları (2005) şişen bir zemine uçucu kül ve mermer tozu atıklarından değişen oranlı karışımlar ilave etmişlerdir. Zemin-katkı karışımlarının likit limit, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, ıslak ve yaş CBR, serbest basınç ve şişme basıncı gibi geoteknik değerlerini tespit etmişlerdir. Karışımlarda uçucu kül-mermer tozu katkı oranı artışıyla kuru birim hacim ağırlığının ve şişme basıncının azaldığını, % 20 uçucu kül ve mermer tozunun tüm oranlarında CBR ve serbest basınç dayanımında en yüksek değerlerin elde edildiğini tespit etmişlerdir [4].

Taşpolat ve arkadaşları (2006) atık depolama tabakalarında kullanılan Afyon mermer tozlarının donma ve çözülme özelliğine etkisini araştırmışlardır. Kil tabakası olarak %10 bentonit +%90 Kaolin karışımı kullanılmıştır. Bu kil tabakası üzerine %5, %10, %15 oranında mermer tozu ilave edilmiştir. Elde edilen bu karışımlar üzerinde donma-çözülme deneyi yapılarak, %10 ve %15'lik mermer tozu ilave edilen karışımların kayıp miktarında sırasıyla %13,5 ve %12,5 azalma gözlemlenmiştir. Sonuç olarak geçirimsiz kil tabakalarda çevresel şartlara karşı %10 ve %15 mermer tozu ilavesinin mukavemeti arttırdığını söylemişlerdir [5].

Uğurlu (1996) yaptığı çalışmada filler malzeme olarak kullandığı taşunu malzemesinin betonun basınç ve çekme dayanımlarını iyileştirdiğini belirlemiştir. Ayrıca betonun geçirgenliğinin, su emme yüzdesi ve porozitesinde azaldığını belirlemiştir [6]. Taşdemir ve Atahan (1996) yaptıkları çalışmada kalker fillerinin agrega-harç arayüzündeki boşlukları doldurduğunu belirterek bunun betonun geçirimsizliği ve kalıcılığı üzerinde önemli rol oynayabileceğini ifade etmişlerdir [7-8].

Ünal ve Kibici (2001) yaptıkları çalışmada mermer tozlarının beton karışımında kullanılmasının beton kalitesinde olumsuz bir etki oluşturmadığını belirlemiştir. Deney sonuçlarından mermer tozu katkısının betondaki boşluk oranını azalttığı ve beton deney numunelerinin birim ağırlıklarını artırıcı etkisi olduğu ifade edilmiştir [9].

Agarwal ve Gulita (2005) cüruf, silis dumanı ve mermer tozu gibi atıklarla çimentoyu değişik oranında ikame ettikleri, çimento:kum oranı 1:3 ve 1:6 olan harçlar üzerine çalışma yapmışlardır. Süperakışkanlaştırıcı katkısı ekledikleri ve akışkanlaştırıcı kullanılmayan harç reçeteleri geliştirmişlerdir. Çimento harçlarının farklı kür sürelerinde basınç dayanımları ölçülmüştür. 1:3 oranlı harçlarda karşılaştırma numunesine göre, %20 oranına kadarki atık ikamelerinde mermer tozu içerenler hariç 28 günde, %10'dan az ikamelerde 180 günde daha fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. 1:6 oranlı harçlarda karşılaştırma numunesine göre elde edilen dayanım 28 ve 180 günde daha yüksek olmuştur [10].

Mishra ve arkadaşları (2001) mermer çamurunun tekrar kullanımı olasılıklarını araştırdıkları çalışmalarında % 25-30 ararında oranlarda farklı tür zeminlere katılarak yol alt yapısında ve yaslanma duvarı arka dolgusunda kullanılabileceğini belirtmişlerdir [11].

Diğer taraftan, Stalin ve arkadaşları (2004) mermer tozunun şişen zeminler üzerindeki indeks ve şişme özelliklerine etkilerini inceledikleri çalışmada, mermer tozu gibi katı atıkların artmasıyla zeminin plastiklik karakterinin azaldığını bulmuşlardır [12].

Cömert ve arkadaşları (2010) çalışmalarında iki farklı zemine %5, 10, 15, 20 oranında mermer tozu karıştırılarak deneyler yapmışlar. Karışımlar Optimum su içeriklerindeki su ve standart enerji ile sıkıştırılmış. Hemen ve 28 gün ilave su ve ısı uygulanmadan sıkıştırma suyunu muhafaza ederek kürlendikten sonra ıslak CBR deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesi 28 gün kürlü, % 15 katkılı zeminde en düşük şişme yüzdeleri ve en yüksek ıslak CBR değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak orta ve düşük plastisiteli zeminlere % 15 katılan mermer tozunun yol alt yapısında dolgu olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir [13].

Ayrıca, mermer tozu zemin iyileştirme ve beton üretiminde filler malzeme olarak kullanılmasının dışında literatürde farklı çalışmalarla değerlendirilmesinin önerildiği görülmektedir. Sarkar ve diğerleri (2006) mermer işleme tesislerinde ortaya çıkan (200mikron boyutunda) toz atığı yüksek basınçlı (0.5-1.2 MPa) buhar altında iki farklı sıcaklıkta (900 ve 1000°C) kalsine etmişler, çeşitli oranlarda kil-kuvars karışımına katarak etkilerini araştırmışlardır. Kalsine mermer tozunun ekonomik açıdan doğal kireç taşından üretilen kirece (CaO) alternatif kaynak olabileceğini ve mermer tozu gibi CaCO₃ içeren büyük birim yüzey alanlı malzemelerin büyük hidrotermal iyileştirme etkisine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Düşük özgül ağırlık ve yüksek gözeneklilik özelliği nedeniyle binalarda nem ve ısı kontrolü amaçlı yeni yapı malzemelerinde kullanılabileceği belirtilmiştir [14].

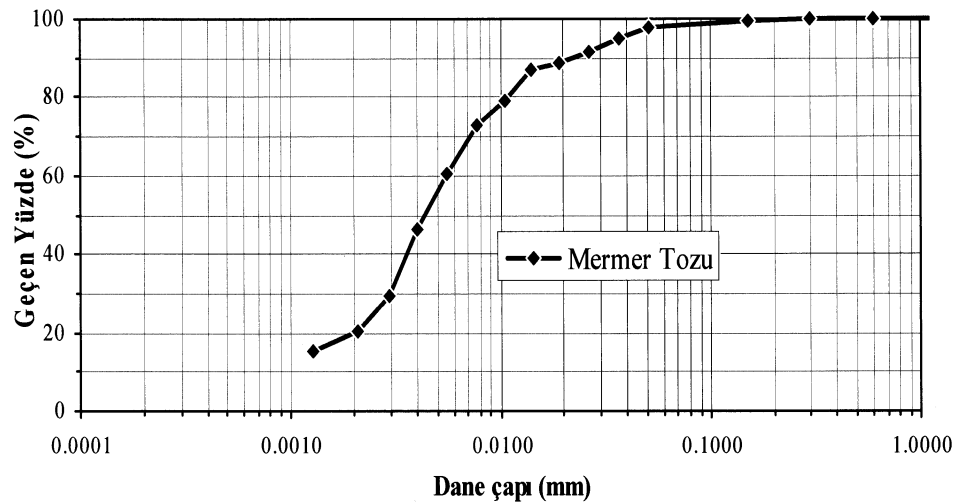
3. KULLANILAN MALZEMELER

3.1.Mermer tozu

Atık mermer tozu mermerlerin farklı yöntemlerle temin edilmesi sırasında veya mermer işleme tesislerinde kesim sırasında ortaya çıkmaktadır. Ancak bu atıkların doğal ortama kontrolsüz bir şekilde dökülmesi bir takım çevre sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bilecik ilinde mermer kesimhane sayısının 200'ün üzerinde olması nedeniyle mermer atıkları oldukça önem kazanmaktadır. Mermer tozu en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Büyük çoğunluğu 300 mikronun altında olan mermer tanecikleridir. Hem zemin deneylerinde hem de beton deneylerinde aynı mermer tozu kullanılmıştır. Çizelge 1. mermer tozunun fiziksel özellikleri verilmiştir. Şekil 2.'de mermer tozunun dane dağılımı eğrisi verilmiştir.

Çizelge 1. Mermer tozu özellikleri

Malzeme	LL	PL	IP	%Silt	%Kil	Gs
Mermer Tozu	-	-	-	80	20	2.71



Şekil 2. Mermer tozunun dane dağılımı

3.2.Zemin deneylerinde kullanılan malzemeler

Zemin deneylerinde, kullanılan kil zemini % 100 (% 80 Kaolin + % 20 Bentonit) karışımıyla elde edilmiştir. Karışımın özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Zemin deneylerinde kullanılan malzemenin özellikleri.

Malzeme	LL	PL	IP	%Silt	%Kil	Gs
%100(%80K+%20B)	109	24	85	39	61	2.68

3.3.Beton deneylerinde kullanılan malzemeler

Beton deneylerinde kullanılacak numune üretiminde, çimento olarak Bursa Çimento ürünü olan CEM IV 32.5 tipi puzolanik çimento kullanılmıştır. Agrega olarak Bilecik yöresi ocaklarından elde edilen 5-15 mm (Kırmataş I) ve 15-25 mm (Kırmataş II) kırmataş agregası ve 4-0 mm kırma kum kullanılmıştır. Filler malzeme olarakta 1 mm elek altı mermer tozu atığı kullanılmıştır.

4. DENEY ÇALIŞMALARI

3.1. Zemin Deneyleri

3.1.1.Fiziksel deneyler

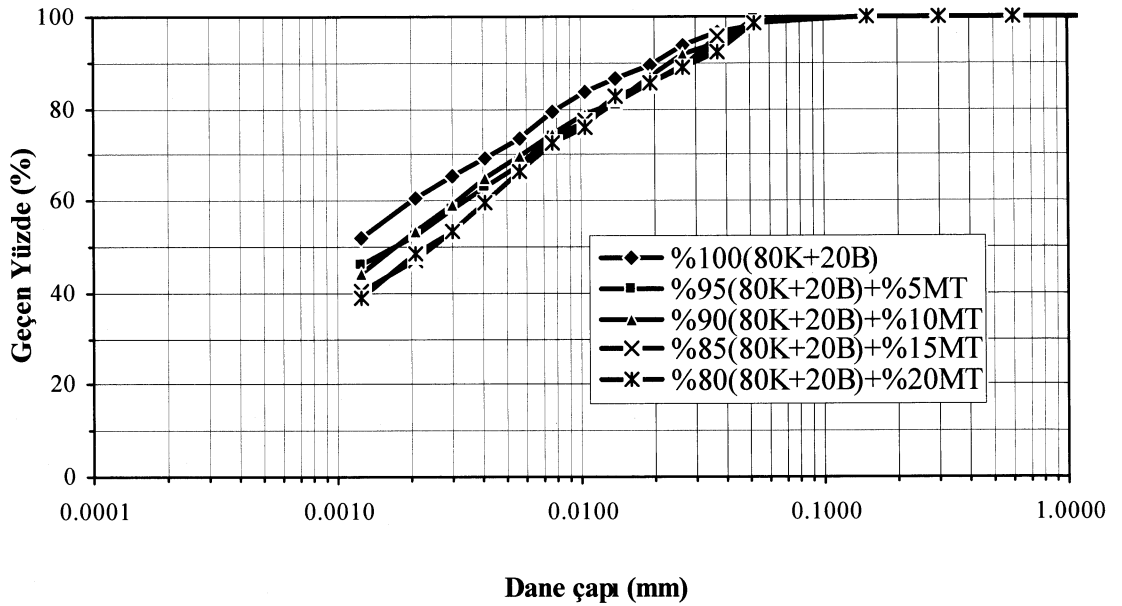
Bu çalışmada, öncelikle %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında mermer tozu ilave edilen karışımların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için, hidrometre deneyi, kıvam limitleri (Likit limit, plastik limit) ve özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Fiziksel deneyler TSE 1900-1/2007 'ye göre yapılmıştır. Çizelge 3.'de % 100 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit), % 95 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 5 MT, % 90 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 10 MT, % 85 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 15 MT ve % 80 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 20 MT fiziksel özellikleri verilmiştir.

Hidrometre deneyi

Hidrometre deneyi TSE 1900-1/2007 de yer alan "5.1.6.4 Deney 6 (D): İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımının bulunması için hidrometre metodu" (Şekil 3) yöntemiyle yapılmış ve karışımların dane dağılımı eğrileri Şekil 4.'de verilmiştir. İnce daneli zeminlerin tanımlama ve sınıflandırmada dane çapı dağılımını saptanmasında kullanılır. Hidrometre deneyinde, zeminin ince daneli kısmını kullanarak, farklı boyutlardaki danelerin farklı düşüş hızlarına sahip olmasından faydalanarak dane boyutu dağılımı bulunmuştur.



Şekil 3. Hidrometre deneyi



Şekil 4. Kullanılan karışımların dane dağılımı eğrisi

Kıvam limitleri

Likit limit ve plastik limit deneyleri, TSE 1900-1/2007 de yer alan “5.1.2.2Deney 2 (B): Likit limitin çarpmalı cihazla tayini” yöntemiyle yapılmış (Şekil 5.) ve karışımların kıvam limitleri Çizelge 3.’de verilmiştir. Kıvam limitleri olarak bilinen Atterberg limitleri zeminin tanecikleri ile su arasındaki ilişkileri ve değişen su içeriklerine göre zeminin durumunun tanımlanmasında kullanılmaktadır. Zemine fazla su verilirse zemin likit (sıvı) hale gelmektedir. Bu durumda zemin akıcıdır ve kesme direnci yoktur. Kurumaya bırakılırsa belirli bir kesme direnci kazanır. Bu geçiş durumundaki su içeriğine likit limit denir (WL ile gösterilir) Eğer su kaybı daha fazla olursa zemin yavaş yavaş plastik özelliğini kaybeder ve düz bir satıhta yuvarlanırsa ufalanır Bu durumdaki su içeriğine plastik limit denir (WP ile gösterilir). Likit limit zeminin sıvı halden plastik hale, plastik limit zeminin plastik halden yarı katı hale, büzülme limiti ise yan katı halden katı hale geçtiği sınır değerlerdir.



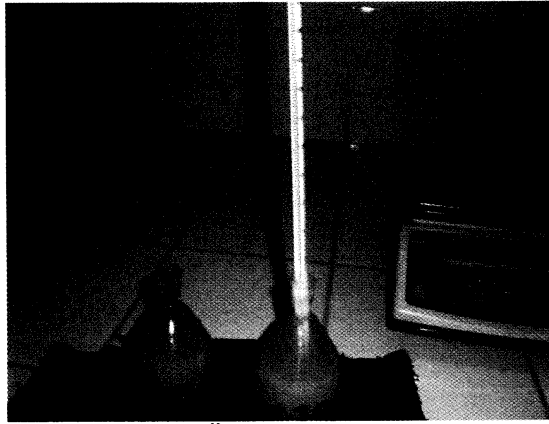
a.

b.

Şekil 5. Kıvam limitleri a.Likit Limit ve b.Plastik Limit deneyi

Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık deneyi, TSE 1900-1/2007 de yer alan “5.1.5.1 Deneysel 5 (A): İnce daneli zeminler için deney metodu” (Şekil 6.) yöntemiyle yapılmış ve karışımların özgül ağırlıkları Çizelge 3.’de verilmiştir. Daneli zeminlerde danelerin bağlı yoğunluğunun tayini için uygulanır.



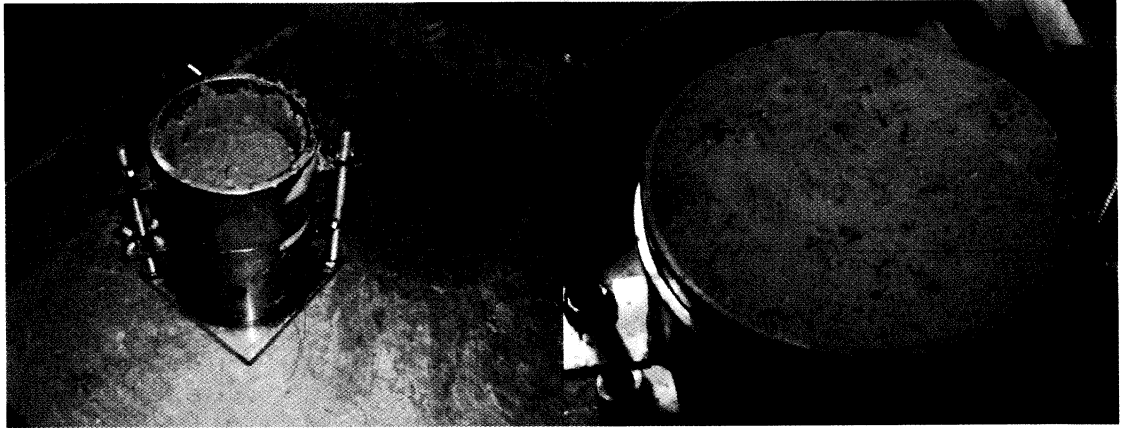
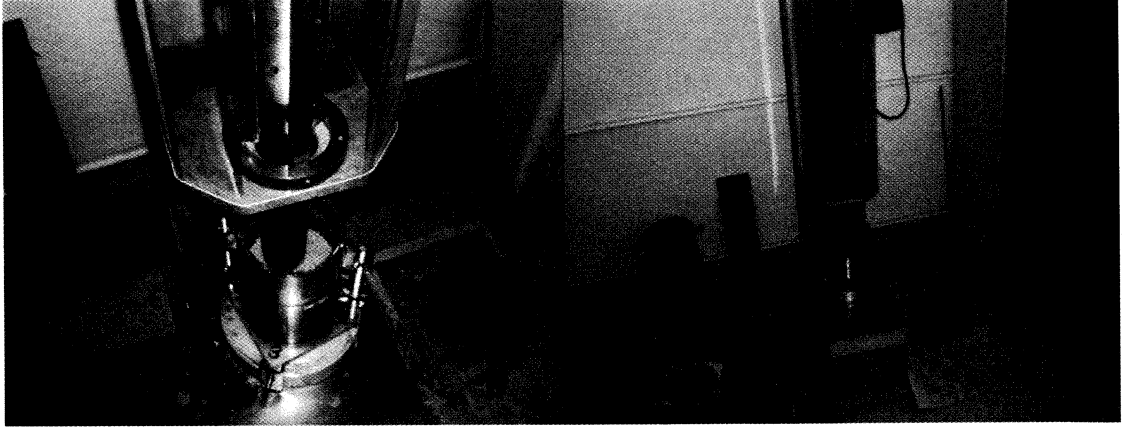
Şekil 6. Özgül ağırlığı deneyi

Çizelge 3. Kullanılan karışımların özellikleri.

Karışım	LL	PL	IP	%Silt	%Kil	Gs
%95(%80K+%20B)+%5MT	95	22	73	47	53	2.69
%90 (%80K+%20B)+%10MT	91	21	70	48	52	2.65
%85(%80K+%20B)+%15MT	91	23	68	56	44	2.64
%80(%80K+%20B)+%20MT	91	24	67	56	44	2.64

Kompaksiyon deneyleri

Kompaksiyon deneyleri, TSE 1900-1/2007 de yer alan “5.2.1 Deney 7: Zeminde kuru birim hacim kütle - su muhtevası bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji)” (Şekil 7.) yöntemiyle yapılmış ve karışımların özgül ağırlıkları Çizelge 4.’de verilmiştir. Deney sonucu her bir karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri numunelerin hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim kütleli veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Bu deneyde 305 mm’den serbestçe düşen 2,5 kg’lık tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır.



Şekil 7. Otomatik kompaksiyon cihazı

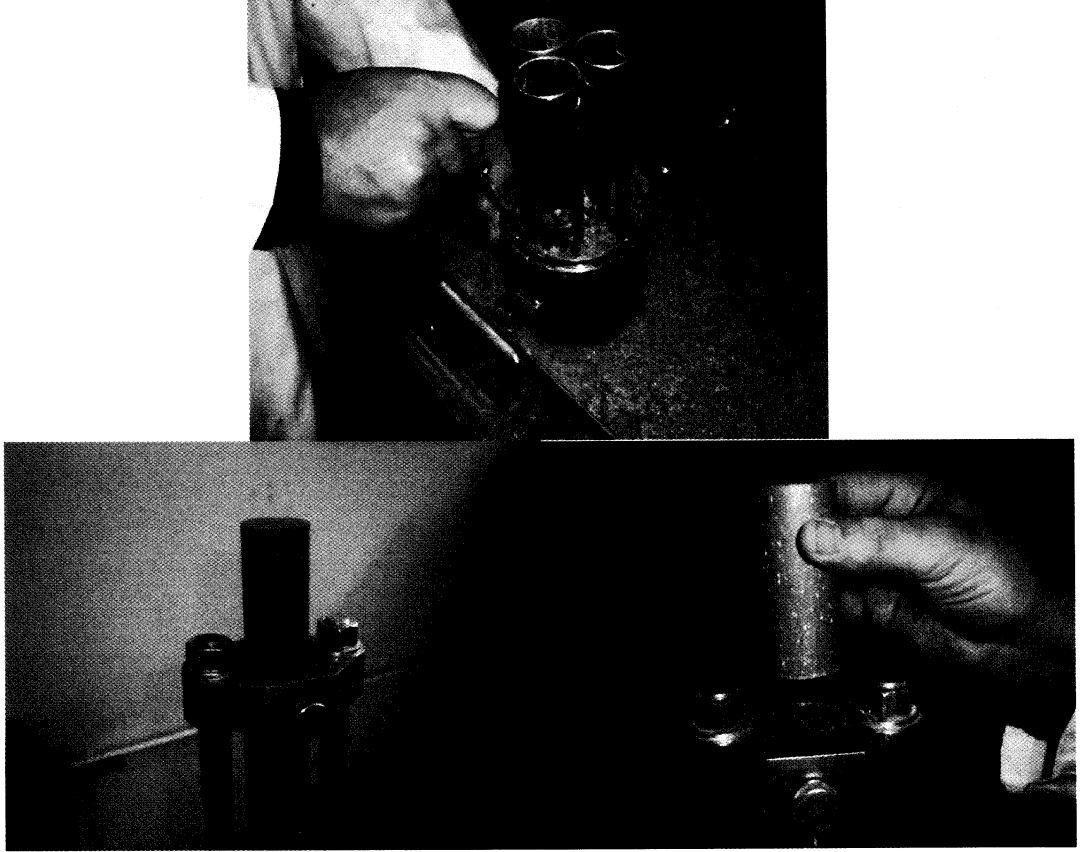
Çizelge 4. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri

Karışımlar	ρ_{\max} kN/m ³	w_{opt} %
% 100 (%80K+%20B)	15.34	22.17
% 95 (%80K+%20B)+%5MT	15.03	23.43
% 90 (%80K+%20B)+%10MT	15.35	23.20
% 85 (%80K+%20B)+%15MT	15.13	22.88
% 80 (%80K+%20B)+%20MT	15.06	22.60

Not: ρ_{\max} :Kuru birim hacim ağırlık, w_{opt} :Su muhtevası

Zemin deneylerine numune hazırlanması

Kompaksiyon yapılarak hazırlanan numunelere 38 mm çaplı tüpler batırılarak serbet basma numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 6.). Kompaksiyon kalıbına batırılan tüplerin ince cidarlı olması örselenmenin daha az olmasını sağlamaktadır.



Şekil 8. Kompaksiyon kalıbından numune alınması

3.1.3.Mekanik deneyler

Serbest basma deneyi

Serbest basma deneyi, TSE 1900-2/2007 de yer alan “5.3 Deney 3: Serbest (tek eksenli) basınç dayanımının tayini” (Şekil 9.) yöntemiyle yapılmıştır. Bu deney ince daneli zeminlerin örselenmemiş veya sıkıştırılmış haldeki serbest basma dayanımının bulunması ile ilgilidir. Numuneler tercihan 50 mm çapında, boyu çapının iki katı, doymun ve kılcal çatlak içermeyen kohezyonlu zemin olmalıdır. Zorunlu durumlarda, çapı 38 mm olan numuneler alınabilir. Bu deney, kumlu zeminler için elverişli değildir.

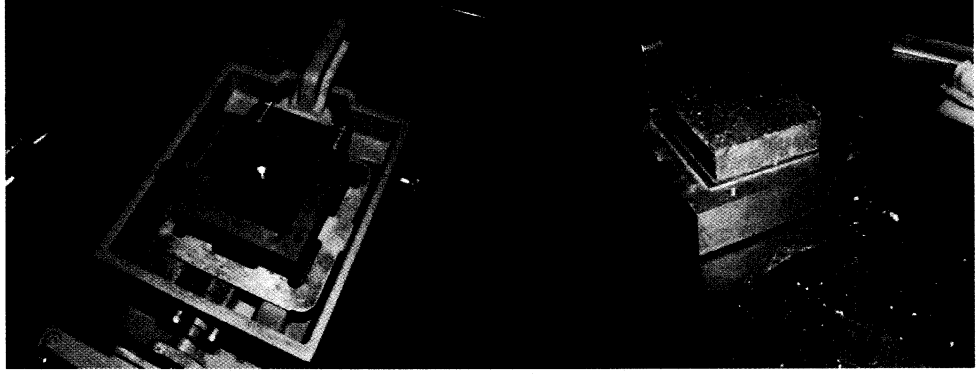
Kesme kutusu deneyi

Kesme kutusu deneyi, TSE 1900-2/2007 de yer alan “Deney 6: Kayma direncinin kesme kutusu ile tayini” (Şekil 10.) yöntemiyle yapılmıştır. Bu deney iri ve ince daneli zeminlerin örselenmemiş veya sıkıştırılmış numunelerinde, en büyük, yumuşamış ve kalıntı kayma direnç parametrelerinin, numunelerin önceden belirli yatay bir düzlem

boyunca kesilmesinden oluşmaktadır. Deney en az üç numunenin farklı normal gerilmelerde konsolide edilmesinden sonra (veya konsolide edilmeden toplam gerilmeye göre) kesilmesi ile gerçekleştirilir. Buradan gelen sonuçlarla zeminin göçme doğrusu çizilir ve efektif gerilme parametreleri c ve ϕ bulunur.



Şekil 9. Serbest basma deneyi



Şekil 10. Kesme kutusu deneyi

Ultrases dalga hızı boyu deneyi

Ultrases dalga hızı boyu deneyi, serbest basma deneylerini desteklemek için yapılmıştır. Bu deney, her bir karışım için, serbest basma deneyi öncesinde yapılmıştır (Şekil 11.). Ultra ses hızı deneyi genellikle kalite kontrol amacıyla kullanılmakta, doğrudan dayanım tespiti için kullanılmamaktadır. Yöntem daha çok yetersiz sıkıştırma ve su/bağlayıcı oranındaki değişimler konusunda fikir vermektedir. Bu deneyde öncelikle, dalganın geçiş süresi $51\mu s$ olan örnek numune üzerinde yapılarak kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra silindir numunenin bir yüzeyine temas ettirilen transdüşer'den ultrases dalgaları gönderilir. Silindir numunenin diğer yüzeyindeki dalga alıcı transdüşere bu dalga iletilir. Cihaz iki yüzey arasındaki ultrases dalga süresini mikrosaniye olarak vermektedir. Ultra ses dalga geçiş hızı, ultrases dalganın gönderildiği numune mesafesinin, galganın geçiş süresine bölünmesiyle bulunmaktadır.

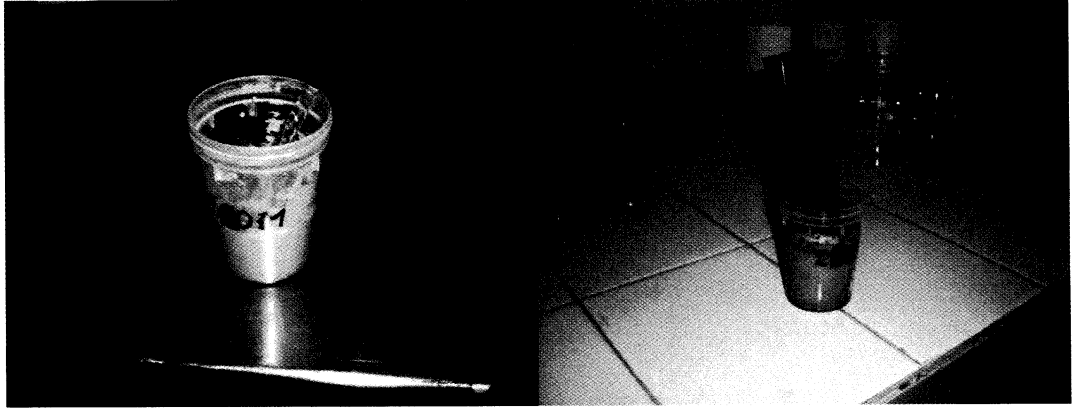


Şekil 11. Ultrases dalga hızı deneyi

3.1.3.Fiziko kimyasal deneyler

pH

Killi zeminlerin davranışlarında pH önemli rol oynamaktadır. Kil ve su sisteminin davranışı, pH etkisi düşünülmeden açıklanamaz. Kil partiküllerinin üzerine yapışık olan OH – iyonunun $\text{SiOH SiO} + \text{OH}$ şeklinde ayrışma eğilimi mevcut olup bu reaksiyon pH değerinden kuvvetle etkilenir. Bu deney, etüvden çıkan numunelerden, 40 nolu (0.425 mm) elekten elenerek 20 gr alınması ve üzerine 50 ml saf su ile bir beher içinde 30 dakika karıştırılmasından ibarettir. Karıştırılan karışımların üzeri kapatılarak 1 gün sonra pH değerleri ölçülmüştür. Ölçümler, karışımlarda bentonit olmasından dolayı karışım içerisine cam elektrotlu pH metre daldırılarak numunelerin pH değerleri belirlenmiştir (Şekil 12.).



Şekil 12. pH okumaları

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına

aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir. Numune hazırlama; Metal numuneler iletken oldukları için yüzeyleri kaplama yapılmadan incelenebilir. Ancak metal olmayan yalıtkan numunelerin yüzeyleri en fazla 20 nm mertebesinde iletkenliği sağlayan altın veya karbon ile kaplanması gerekmektedir. Karbon kaplama genellikle X-ışınları ile yapılacak analizlerde uygulanır. Yüksek çözünürlüğe ve kontrasta sahip numune görüntüsü elde etmek için, incelenecek numuneler metal olsa bile yüzeylerine altın kaplama işlemi uygulanmaktadır. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir [15].

Zemin stabilizesinde veya iyileştirmede atıkların mineral özellikleri, dane yapıları ve dağılımları mekanik özelliklerinin tespit edilmesi malzemenin dayanım değerlerini veremez ancak bize mekanik ve dinamik etkiler sonucu olan veya olabilecek değişimler hakkında önemli ipuçları barındırabilir. Bu yüzden atıkların mineral özellik ve dane yapılarının araştırılması imkânlar elverdiğince araştırılması gereken özelliklerdendir. Mineral özellikleri görülebildiği Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) mikroresimleri de kimyasal stabilizasyonda etkili olan kil ve silt minerallerinin şekilleri, dağılımları ve birbirlerine olan konumları hakkında bize bilgi verir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin XRF deneyleri Anadolu Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır.

X-ışınları difraktogram analizi (XRD)

X-ışınları difraktogram analizi (XRD) bir nitelik analizi olup, toz yada belli şekle sahip katı parçaların mineral içerikleri hakkında bize bilgiler veren bir araştırma yöntemidir. X-ray difraksiyon analizleri, her kristal fazının kendine özgü bir X-ray difraksiyon modeli (paterni) olduğu prensibine dayanmaktadır. Karışık durumda bulunan fazlarda, fazlardan her biri diğerlerinden bağımsız olarak kendi modelini vermektedir. X-ray difraksiyon grafikleri, farklı şiddet ve θ açısı değerlerindeki yansımalarından oluşmaktadır. Bu şekilde zemin içerisinde bulunan çeşitli mineral fazları, X-ray difraksiyon grafiklerinde, kendilerine özgü yansıma değerlerinden belirlenebilmektedir. Havada kurutulmuş zemin numuneleri, ezilerek toz haline getirilmiş ve XRD cihazına okunması için verilmiştir. Karışımların üzerinde yapılan XRD analizleri Şekil verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin XRD deneyleri Anadolu Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır.

X Işını Floresans Spektrometresi (XRF)

Bir X-ışını floresans spektrometresi; uyarma kaynağı, numune tutma düzeneği ve ölçüm düzeneği olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Uyarma kaynağının fonksiyonu, numuneyi fotonlar ile bombardıman ederek numune atomlarını uyarmak ve X-ışını

yayınlanmasını sağlamaktır. Numune tutma düzeneği ise, analiz boyunca numuneyi istenen konumda tutar ve numuneden çıkan X-ışınlarını detektöre ulaşacakları açıda tutarak numune dedektör-düzeneğini tamamlar. X-ışını floresans spektroskopisi çeşitleri genelde X-ışını kaynağına ve tekniğin limitlerine göre sınıflandırılabilir. Kalitatif analiz genel olarak numune içindeki varolan elementleri belirlemek amacıyla yapılır. Spektral çizgi olarak adlandırılan pikler bilinmeyen bir elementi temsil eder. Analiz enerji dağılımlı spektrometre ile yapılır. Yaklaşık 100 sn gibi kısa bir zaman sonunda bilgiler toplanabilir. Fakat hassas ölçümler için daha fazla süre gereklidir.

X-ışını floresans spektroskopisinde katı, sıvı, toz hatta gaz halindeki numunelerle çalışılabilir. Bunun için spektroskopik metotlar içinde en kolay ve en yaygın uygulanan metotlardan birisidir. Bu çalışmada kantitatif analizler tablet haline getirilen toz numunelere uygulanmıştır. Toz numuneler spektrometrede, numune kaplarına konarak, ince tabaka halinde mylar film üzerine yayılarak ya da basınç ile tablet haline getirilerek analiz edilebilir. Partikül büyüklüğü toz numuneler için önemlidir. Toz numunenin homojen olmaması, partikül büyüklüğünün, yoğunluğunun, şekil ve yapısının farklı olması durumlarında toz numune ile çalışmak zordur. Bir analizde, analit çizgi şiddetini daima etkileyen ortalama partikül büyüklüğü ve partikül dağılımı, numune ve standart için aynı olmalı ve ölçmelerde farklılıktan kaçınılmalıdır [16]. Bu çalışmada kullanılan numunelerin SEM görüntüleri Anadolu Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümünde elde edilmiştir.

3.2. Beton deneyleri

Çalışmada atık mermer tozu beton üretiminde ince agrega yerine % 5, % 10 ve % 15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılacak agregalar üzerinde önce elek analizi yapılarak uygun granülometri belirlenmiştir. Daha sonra beton üretimine geçilmiş ve betonun kıvamı çökme deneyi ile belirlenmiştir. Beton numuneleri üzerinde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

4. Deney sonuçları

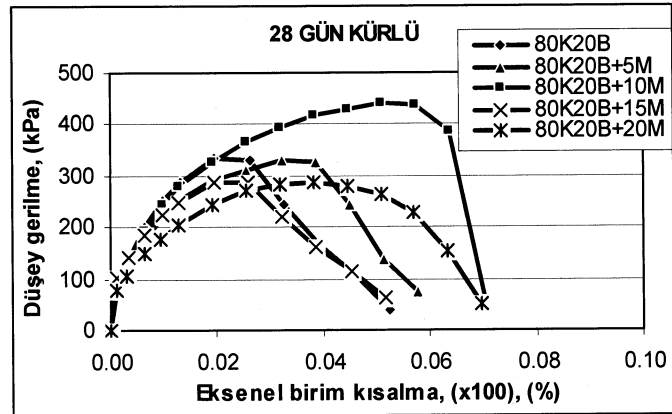
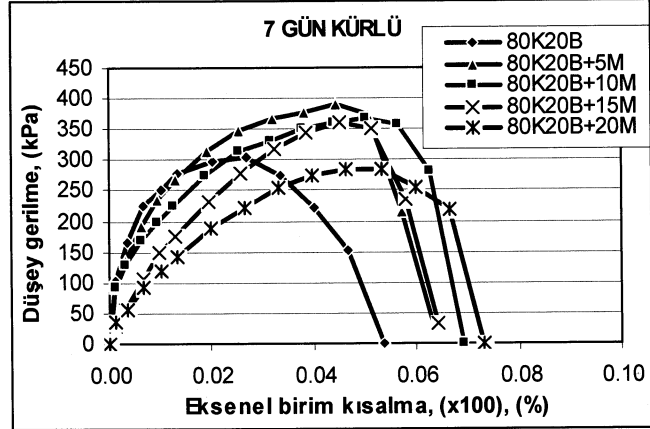
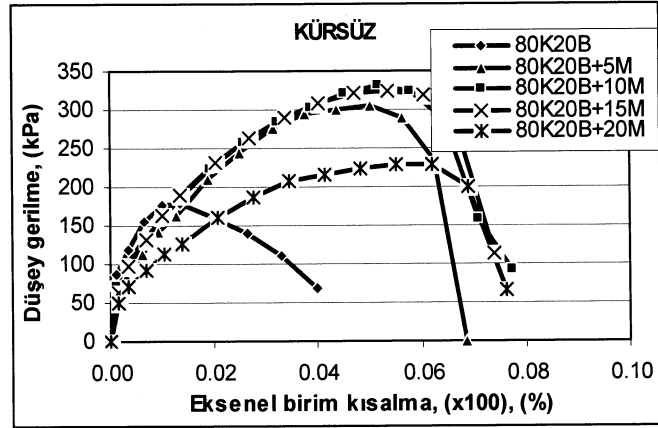
4.1. Zemin deneyleri Sonuçları

4.1.1. Serbest basma deneyi sonucu

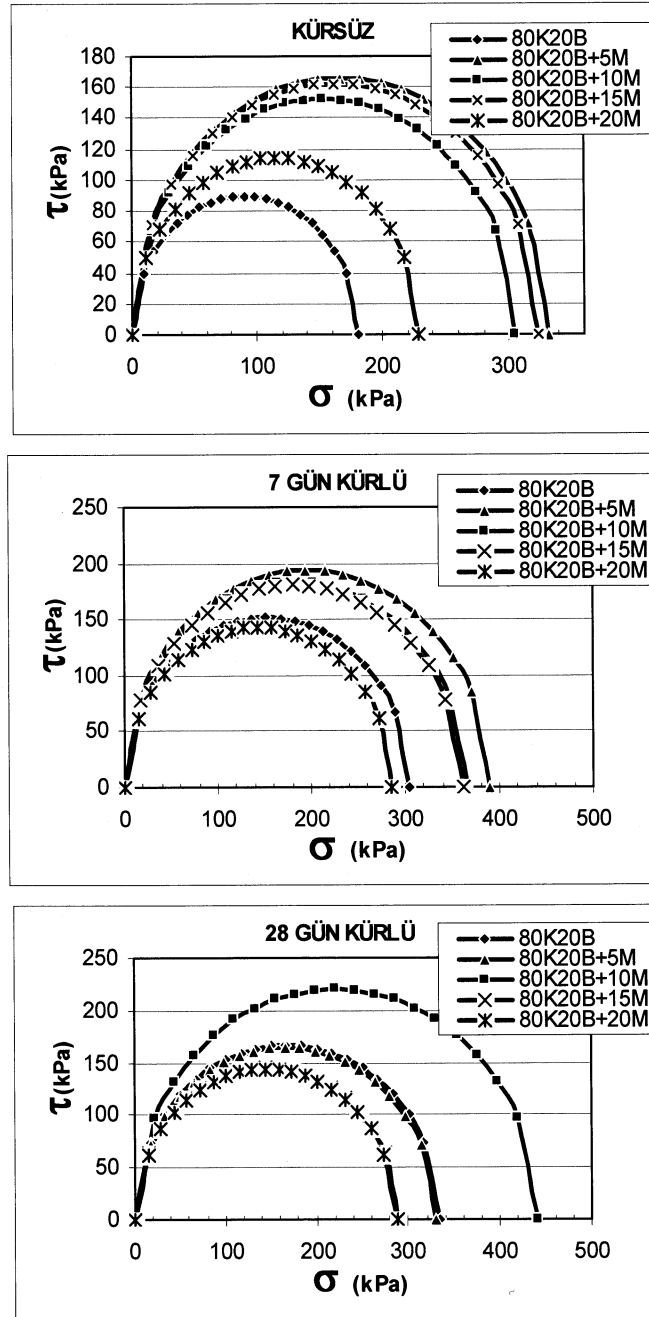
% 100 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit), % 95 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 5 MT, % 90 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 10 MT, % 85 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 15 MT ve % 80 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 20 MT karışımların serbest basma dayanımları Çizelge 5.'de verilmiştir. Serbest basma dayanımlarının Mohr dairesinde gösterilmesi ise Şekil 13.'de verilmiştir. Serbest basma deneyi sonuçlarından; mermer tozu yüzdesinin %5 olması halinde mukavemetinin en yüksek değere çıktığı, mermer tozu yüzdesinin artmasıyla mukavemetin düştüğü görülmüştür. %15 mermer tozu ilavesi %10 mermer tozu ilavesi yapılan karışıma göre daha yüksek dayanım göstermesine rağmen %5 mermer tozu ilavesinin altında bir değer vermiştir.

Çizelge 5. Serbest basma dayanımları

Karışımlar	Kürsüz	7gün kürlü	28gün kürlü
% 100 (%80K+%20B)	180	304	334
% 95 (%80K+%20B)+%5MT	332	395	-
% 90 (%80K+%20B)+%10MT	305	366	441
% 85 (%80K+%20B)+%15MT	324	361	289
% 80 (%80K+%20B)+%20MT	229	286	288



Şekil 13. Serbest basma deneyi sonuçları gerilme deformasyon eğrisi



Şekil 14. Serbest basma deneyi sonuçları Mohr daresi üzerinde gösterimi

4.1.2. Ultrases geçiş hızı deneyi sonucu

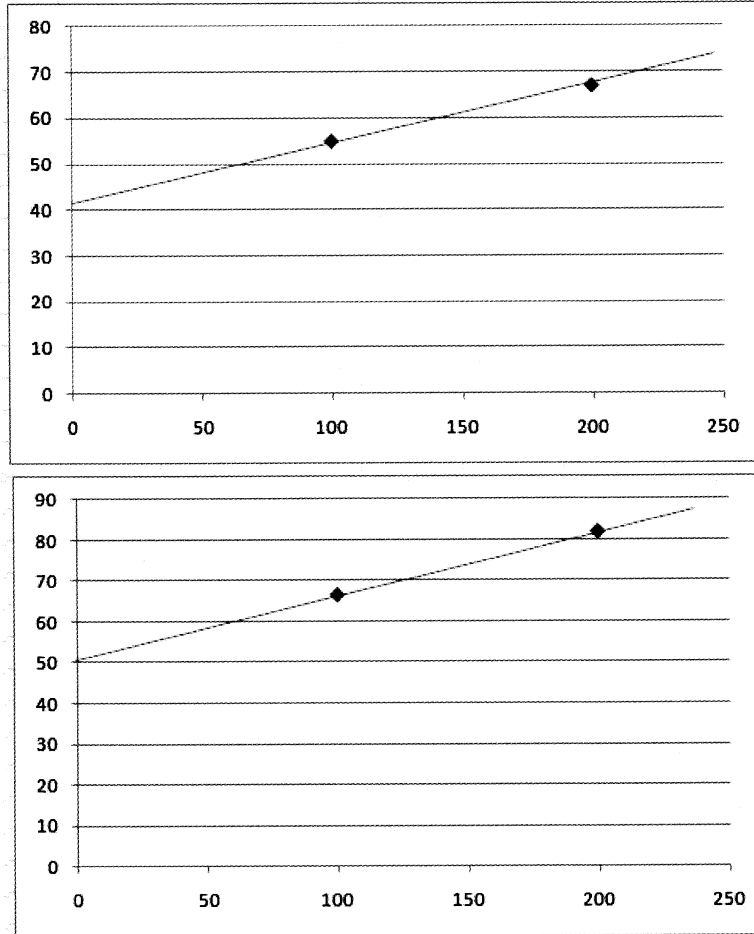
% 100 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit), % 95 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 5 MT, % 90 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 10 MT, % 85 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 15 MT ve % 80 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 20 MT karışımlar üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı deney sonuçları Çizelge 6. verilmiştir. Mermer tozu artışı artışı ile ultrases dalga hızı artmıştır.

Çizelge 6. Ultrases geçiş hızı

Karışımlar	Kürsüz	7gün kürlü	28gün kürlü
% 100 (%80K+%20B)	0.619	0.673	0.671
% 95 (%80K+%20B)+%5MT	0.663	0.668	-
% 90 (%80K+%20B)+%10MT	0.699	0.744	0.921
% 85 (%80K+%20B)+%15MT	0.771	0.728	0.288
% 80 (%80K+%20B)+%20MT	0.881	0.587	0.805

4.1.3.Kesme kutusu deneyi sonucu

Bu deneyde kullanılan karışımlar serbest basma dayanımının sonuçlarına göre belirlenmiştir. %5 ve %15 mermer tozu ilaveli karışımların serbest basma değerlerinin daha yüksek olmasından dolayı, % 100 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit), % 95 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 5 MT ve % 85 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 15 MT karışımlarının kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Kesme kutusundan elde edilen τ ve σ grafiği Şekil 14. gösterilmiştir. Kayma direnci parametreleri mermer tozu ilavesi ile artmıştır.



Şekil 14. Kesme kutusu deney sonucu a.%5 mermer tozu ilaveli numunenin deney sonuçları b. %10 mermer tozu ilaveli numunenin deney sonuçları

4.1.4.pH deneyi sonuçları

% 100 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit), % 95 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) +% 5 MT, % 90 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 10 MT, % 85 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 15 MT ve % 80 (% 80 Kaolin+ % 20 Bentonit) + % 20 MT karışımlar üzerinde yapılan pH deney sonuçları Çizelge 7. verilmiştir. %5 mermer tozu ilaveli numunenin Ph değeri en düşük iken diğer numunelerin Ph değeri daha yüksektir.

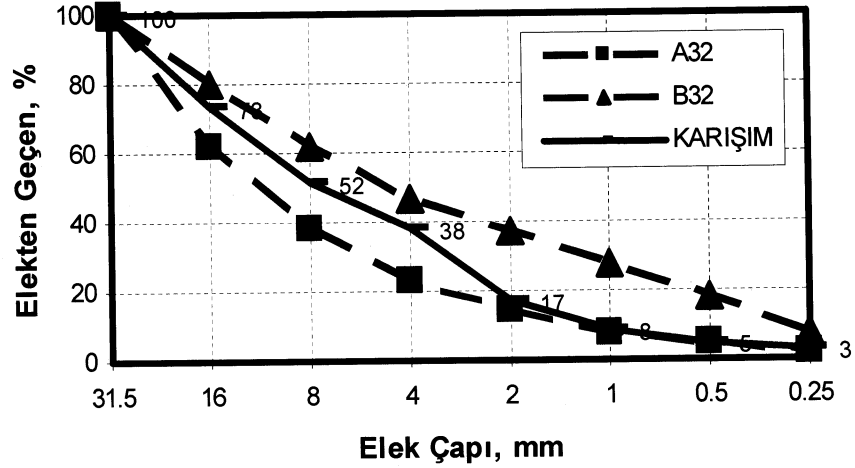
Çizelge 7. pH deneyi sonucu

Karışım	pH
% 100 (% 80 K+ %20 B)	8.5
% 95 (% 80 K+ %20 B) + %5 M	8.2
% 90 (% 80 K+ %20 B) + %10 M	8.5
% 85 (% 80 K+ %20 B) + %15 M	8.7
% 80 (% 80 K+ %20 B) + %20 M	8.7

4.2. Beton Deneyleeri

4.2.1. Elek analizi

Beton üretiminde kullanılacak agregaların tane dağılımının optimizasyonu elek analizi sonuçlarına göre yapılmıştır. Karışımın granülometrisinin A₃₂-B₃₂ eğrilerinin arasında kalması sağlanarak uygun agrega karışım oranları belirlenmiştir. Beton üretiminde kullanılacak kırmataş ve kırmakum agregası karışımının granülometri eğrisi Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Beton üretiminde kullanılan agrega granülometrisi

Beton deneyleri 15x15x15 cm boyutlarında hazırlanan küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla üretilen betonların karışım oranları aşağıda Çizelge 8'te verilmiştir.

Çizelge 8. Beton karışımında kullanılan malzeme oranları

Malzeme Tipi	1m ³ için Miktar (kg)
Cimento	350
Su	205
Kum	710
Kırmatas I	373
Kırmatas II	745
Mermer Tozu	%5, %10 ve %15 kum yerine

4.2.2. Çökme deneyi

Taze beton karışımlarında kullanılan mermer tozu kum yerine % 5, % 10 ve % 15 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Taze betonun işlenebilirliğinin belirlenmesi için her beton grubuna çökme deneyi yapılmıştır. Çökme değerlerinin 10 cm olması hedeflenerek karışım suyu buna göre belirlenmiştir. Karışımında mermer tozunun kullanımıyla birlikte ince malzeme miktarındaki artış, taze beton karışımının su gereksinimini artırmıştır. Bunun için her karışımında su düzeltilmesi yapılarak betonun işlenebilirliği sabit tutulmuştur. Mermer tozu kullanımı beton karışımında % 12'ye varan oranlarda ilave su gereksinimine neden olmuştur. Su/çimento oranlarındaki değişim Çizelge 6 ve 7'de verilmiştir.

4.2.3. Sertleşmiş beton deneyleri

Çizelge 9. 7 günlük beton numunelerinin deney sonuçları

Numune Adı	s/ç Oranı	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	0.58	2.29	4.166	17.06
% 5 Mermer	0.61	2.32	4.347	22.50
% 10 Mermer	0.63	2.28	4.225	17.75
% 15 Mermer	0.65	2.28	4.201	14.09

Erken yaş 7 günlük betonlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin verildiği Çizelge 9.'da % 5 mermer tozu kullanımı ile sertleşmiş beton birim ağırlığının arttığı görülmüştür. Yine aynı şekilde 28 günlük sertleşmiş beton numunelerinin birim ağırlığının % 5 ve % 10 mermer katkısı kullanıldığında referans betonuna göre arttığı görülmüştür (Çizelge 10.). Erken yaş beton numunelerinde özellikle % 5 mermer katkısı dayanım ve ultrases geçiş hızı değerlerini artırmıştır. Burada filler malzeme olan mermer tozunun betonun mikro boşluklarını doldurarak porozitesi düşük bir beton elde edilmesine neden olduğu görülmektedir.

İleri yaş ultrases geçiş hızı deney sonuçları incelendiğinde referans numunesine göre % 5 mermer tozu katkılı numunenin ultrases geçiş hızının % 9 daha iyi olduğu görülmüştür. Buna karşılık basınç dayanımının ise referans numunesine göre % 16 daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ancak % 10 ve üzeri mermer tozu kullanımının beton dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür.

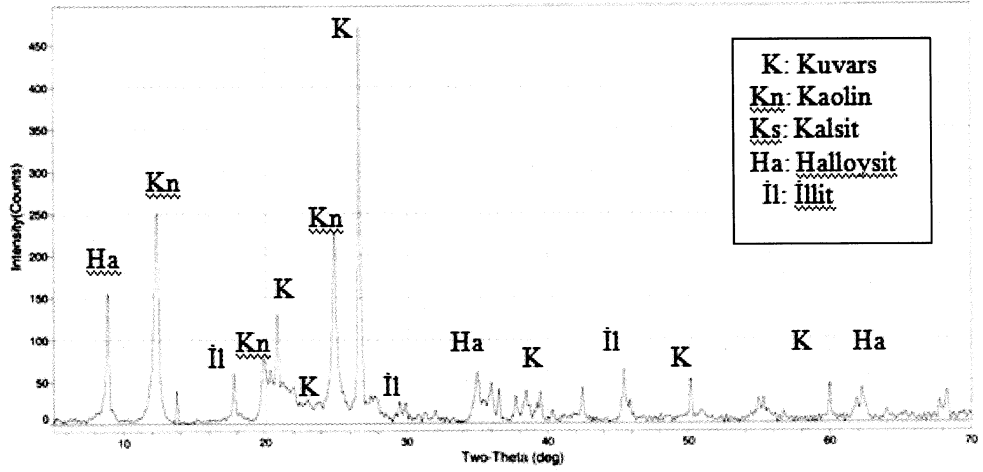
Çizelge 10. 28 günlük beton numunelerinin deney sonuçları

Numune Adı	s/ç Oranı	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	0.58	2.30	4.491	21.44
% 5 Mermer	0.61	2.36	4.901	25.03
% 10 Mermer	0.63	2.32	4.573	20.08
% 15 Mermer	0.65	2.28	4.274	19.91

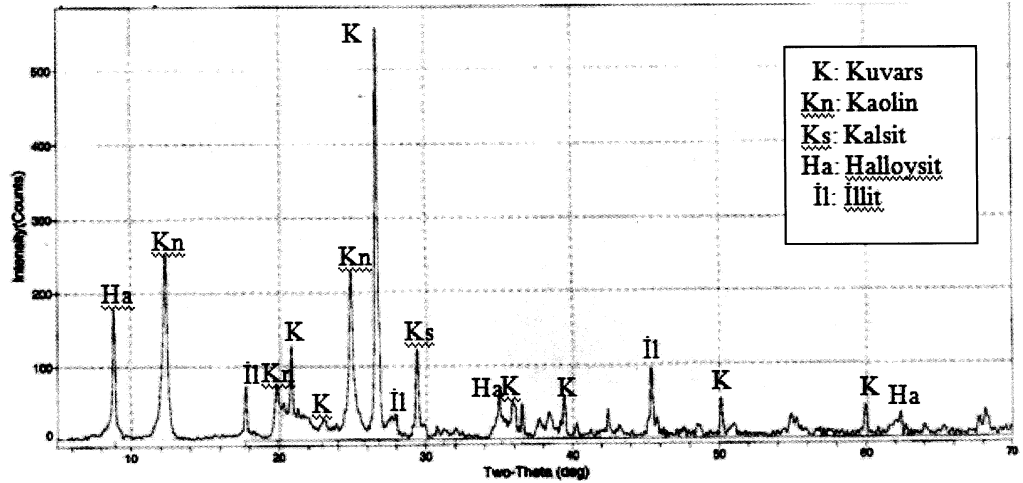
4.3.XRD Sonuçları

4.3.1. Zemin Deneğinde Kullanılan Numunelerin XRD sonuçları

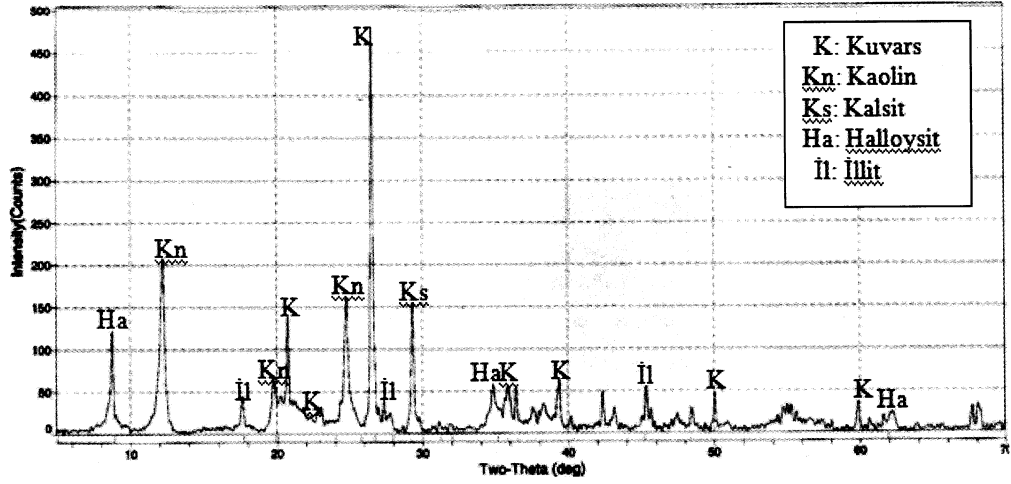
Anadolu Üniversitesinde yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 16. – 19.'da verilmiştir.



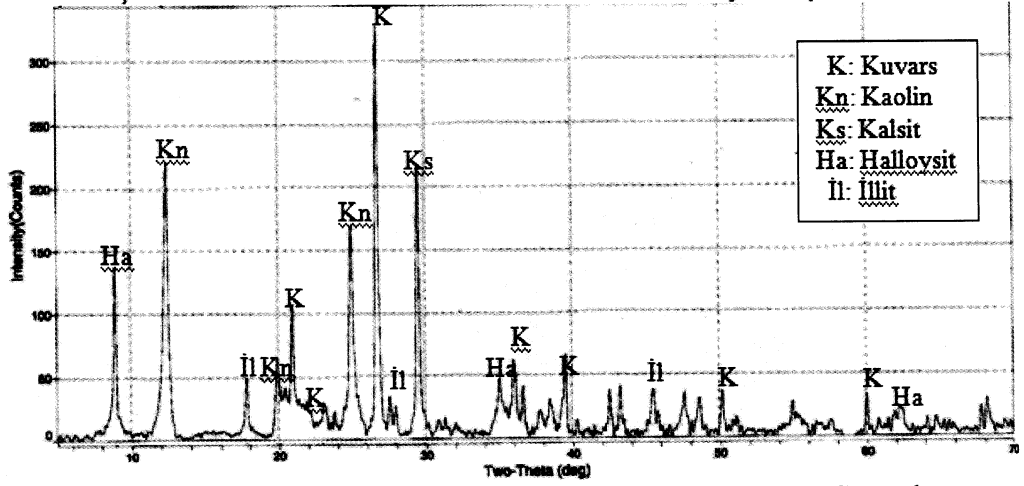
Şekil 16. % 0 Mermer Katkılı Numunelerin XRD Deney Sonuçları



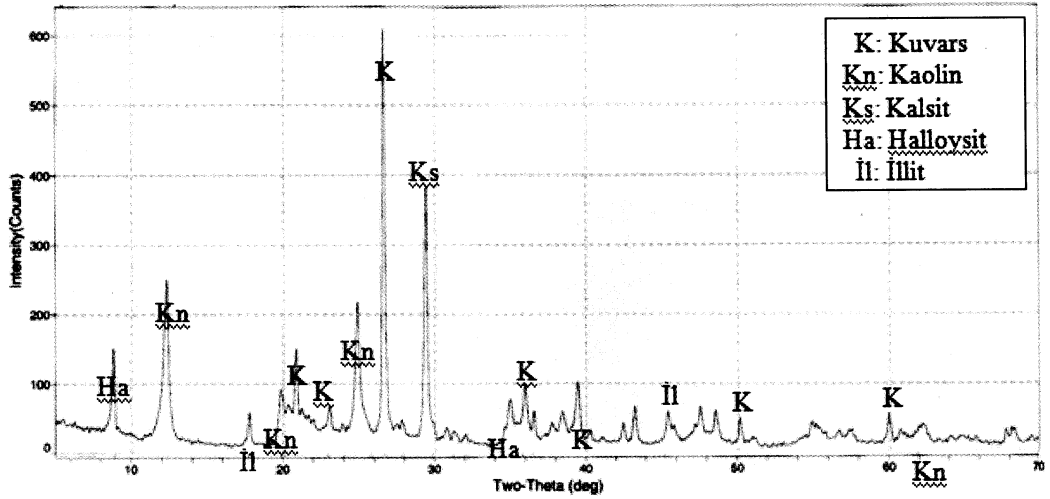
Şekil 17. % 5 Mermer Katkılı Numunelerin XRD Deney Sonuçları



Şekil 18. % 10 Mermer Katkılı Numunelerin XRD Deneş Sonuçları



Şekil 19. % 15 Mermer Katkılı Numunelerin XRD Deneş Sonuçları



Şekil 20. % 20 Mermer Katkılı Numunelerin XRD Deneş Sonuçları

4.3.2. Beton Deneşlerinde Kullanılan Numunelerin XRD sonuçları

4.4. XRF Sonuçları

Anadolu niversitesinde yapılan XRF analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.4.1. Zemin Deneylerinde Kullanılan Numunelerin XRF sonuçları

Zemin deneylerinde kullanılan numunelerin XRF sonuçları Çizelge 11.'de verilmiştir. Mermer tozunun artmasıyla, CaO ve Fe₂O₃ nun arttığı, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O ve K₂O nun azaldığı görülmüştür.

Çizelge 11. XRF analiz sonuçları

BİLEŞEN	Saf Mermer tozunun	%0 Mermer	%5 Mermer	%10 Mermer	%15 Mermer	%20 Mermer
SiO ₂	0.6154	56.2271	52.6198	50.9979	46.9916	44.3727
Al ₂ O ₃	-	26.1041	24.1740	22.9402	21.9079	20.8871
Fe ₂ O ₃	0.1677	2.5324	2.4993	2.3502	2.2231	1.9608
CaO	54.5373	1.2818	4.3310	6.8784	10.2567	12.6948
MgO	0.4111	0.9149	0.9706	0.9229	0.9407	0.9989
Na ₂ O	0.6959	0.8752	0.8629	0.7673	0.7355	0.6748
K ₂ O	0.0347	2.4733	2.3281	2.1656	2.0449	1.9557
P ₂ O ₅	0.0909	-	0.0976	-	-	-
TiO ₂	-	1.0240	0.9768	0.9105	0.9276	0.7773
A.Z	43.07	8.5670	11.1400	12.0670	13.9770	15.6780

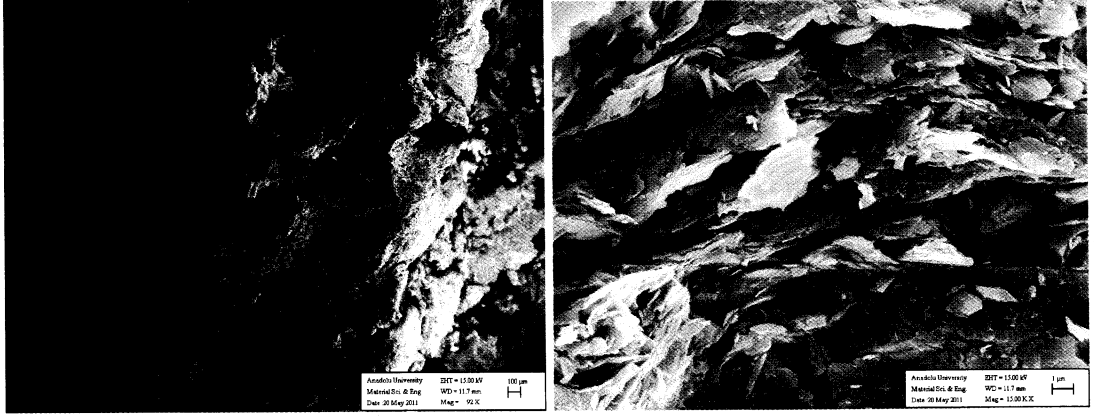
4.4.2. Beton Deneylerinde Kullanılan Numunelerin XRF sonuçları

4.5. SEM Sonuçları

Anadolu Üniversitesinde yapılan SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.

4.5.1. Zemin Deneylerinde Kullanılan Numunelerin SEM görüntüleri

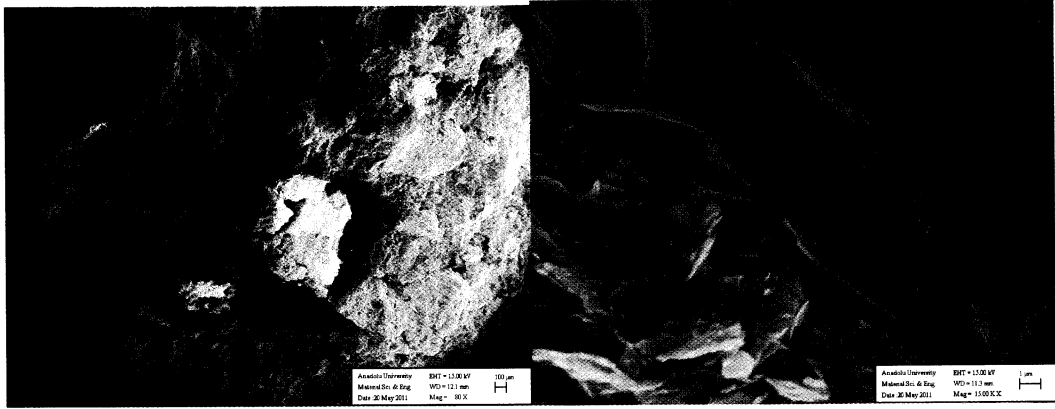
Zemin deneylerinde kullanılan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 21-25 arasında verilmiştir. Şekil 21a.'da az boşluklu, Şekil 22a.'da daha sıkı ve boşluksuz, Şekil 23a.'da az boşluklu ve Şekil 24a. ve Şekil 25a.'da mermer tozunun artmasıyla daha boşluklu bir yapı görülmektedir. Şekil 21b.'de kaolin ve bentonit plakları ve aralarında ince boşluk tabakaları görülmektedir. Bu tabakalar sırayla düz katmanlar ve karışık katmanlar halinde üst üste gelmiştir. Heterojen bir yapı sergilemektedir. Şekil 22b.'de sürekli kaolin ve bentonit tabakaları ve aralarında boşluk olmayan sıkı bir yapı görülmektedir. Şekil 23b.'de az daneli bir yapı görülmekte ve kaolin ve bentonit plakları yarı sürekli düzlemler halinde uzanmışlardır. Şekil 24b.'de daha dağınık bir yapı görülmektedir. Şekil 25b.'de kaolin plaklarının paralel konumda olduğu görülmektedir.



a.

b.

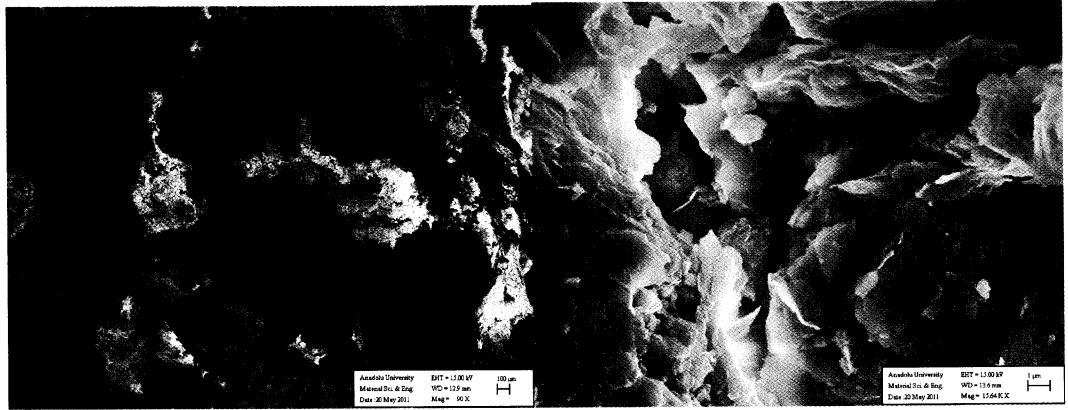
Şekil 21. %0 Mermer Katkılı Numunelerin SEM görüntüleri a.90 büyültmedeki görüntü b. 15000 büyültmedeki görüntü



a.

b.

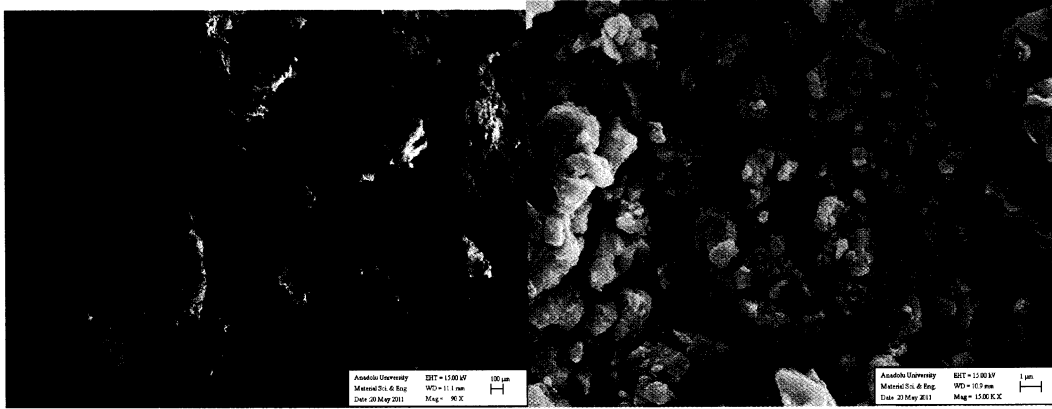
Şekil 22. %5 Mermer Katkılı Numunelerin SEM görüntüleri a.90 büyültmedeki görüntü b. 15000 büyültmedeki görüntü



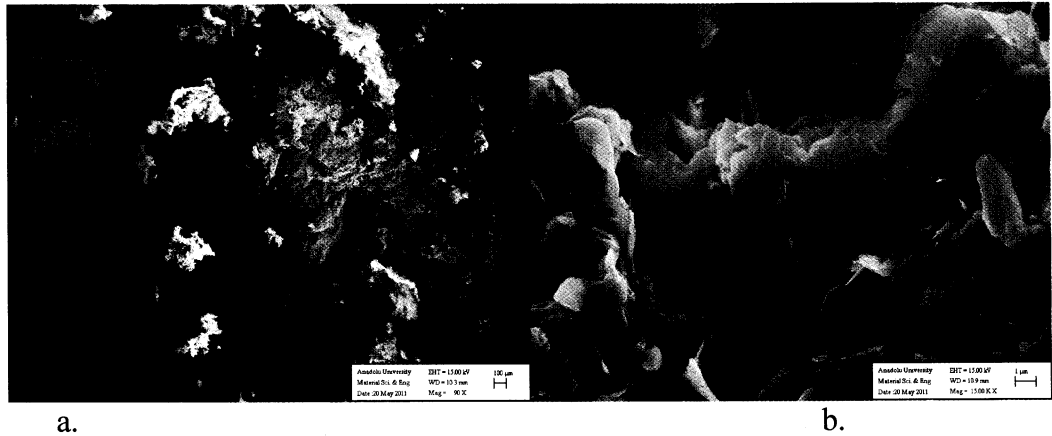
a.

b.

Şekil 23. %10 Mermer Katkılı Numunelerin SEM görüntüleri a.90 büyültmedeki görüntü b. 15000 büyültmedeki görüntü



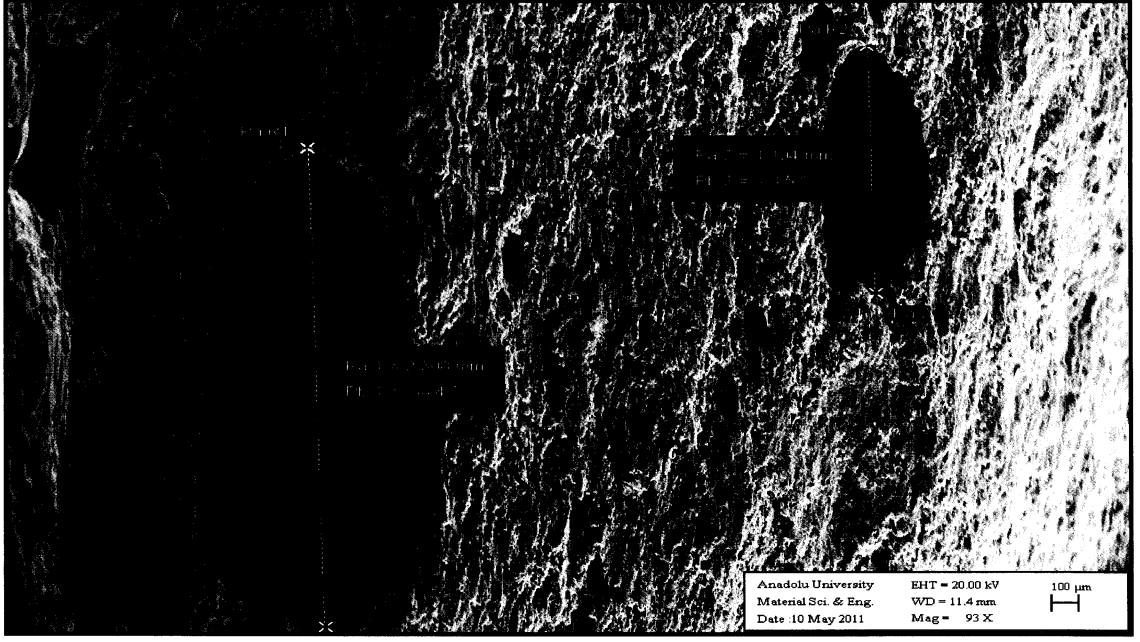
a. b.
Şekil 24. %15 Mermer Katkılı Numunelerin SEM görüntüleri a.90 büyültmedeki görüntü b. 15000 büyültmedeki görüntü



a. b.
Şekil 25. %20 Mermer Katkılı Numunelerin SEM görüntüleri a.90 büyültmedeki görüntü b. 15000 büyültmedeki görüntü

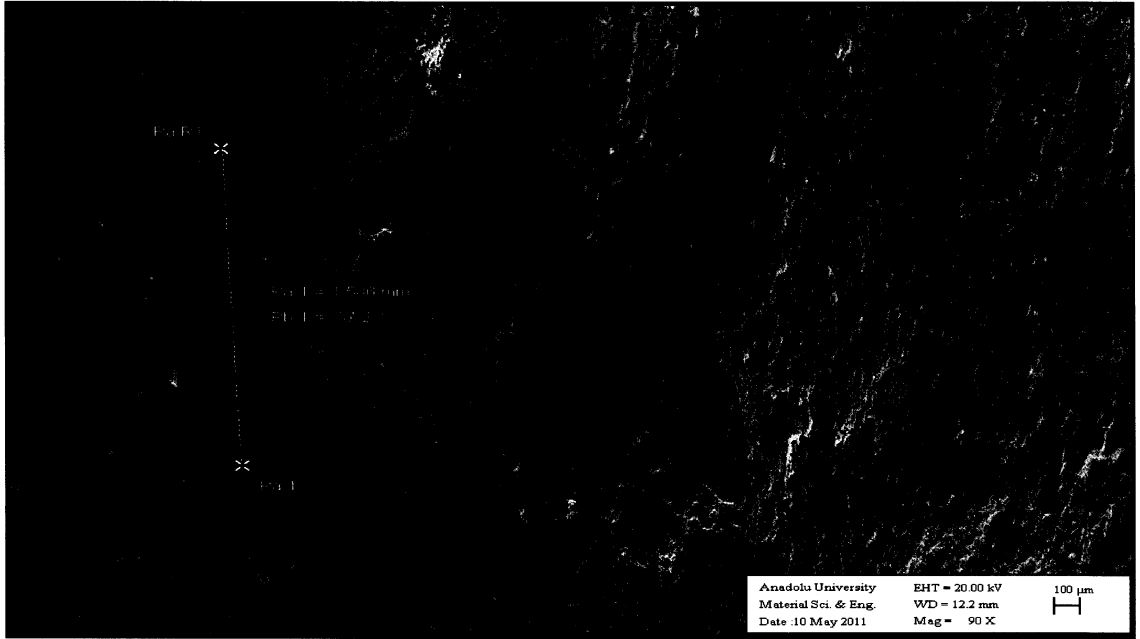
4.5.2. Beton Deneylerinde Kullanılan Numunelerin SEM görüntüleri

Beton numunelerinde kırık yüzeyler üzerinden alınan kesitlerde SEM incelemeleri yapılmıştır. Yapılan incelemede betonun boşluk yapısı incelenmiş ve mermer tozu katkı oranına bağlı olarak karşılaştırmalara yapılmıştır. Referans numunesi olan % 0 mermer tozu katkılı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 26'da verilmiştir. Buna göre beton içindeki boşluk dağılımının yaygın olduğu görülmektedir. Makro boşluklar üzerinde yapılan boyut analizinde boşluk çaplarının 2.308 mm – 1.194 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu boşluklar normal beton için beklenen boşluklardır.



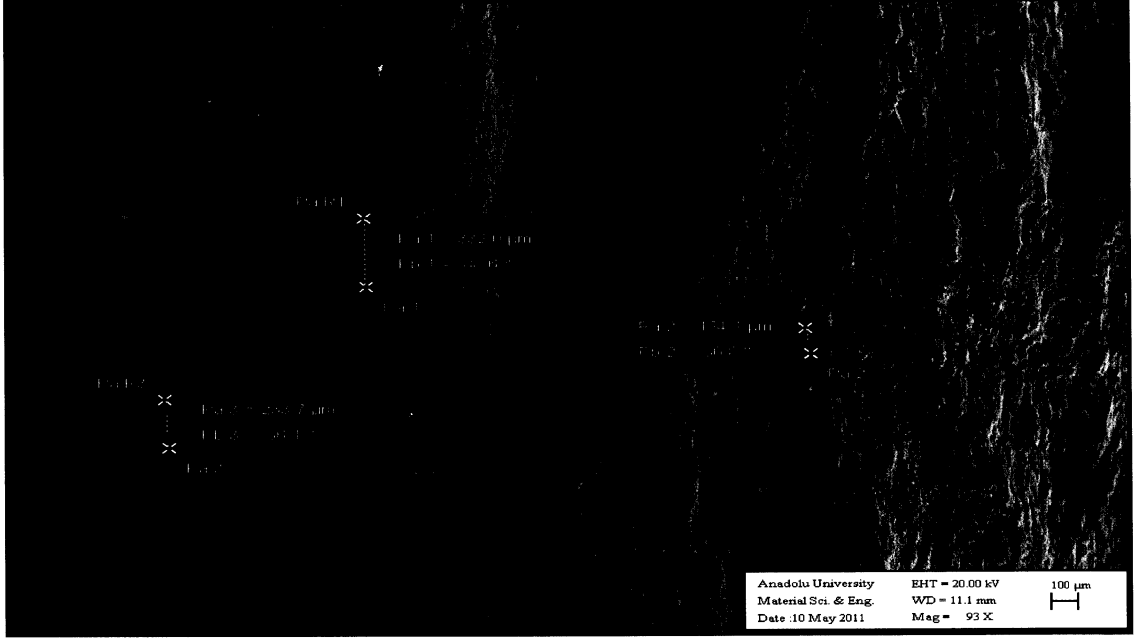
Şekil 26. % 0 Mermer Tozu Katkılı Beton Numunesinin 90x büyültmedeki SEM görüntüsü

%5 mermer tozu katkıli beton numunesinin SEM görüntüsü Şekil 27’de verilmiştir. Numune yüzeyinde yapılan incelemede en büyük boşluk çapının 1.586 mm olduğu belirlenmiştir.

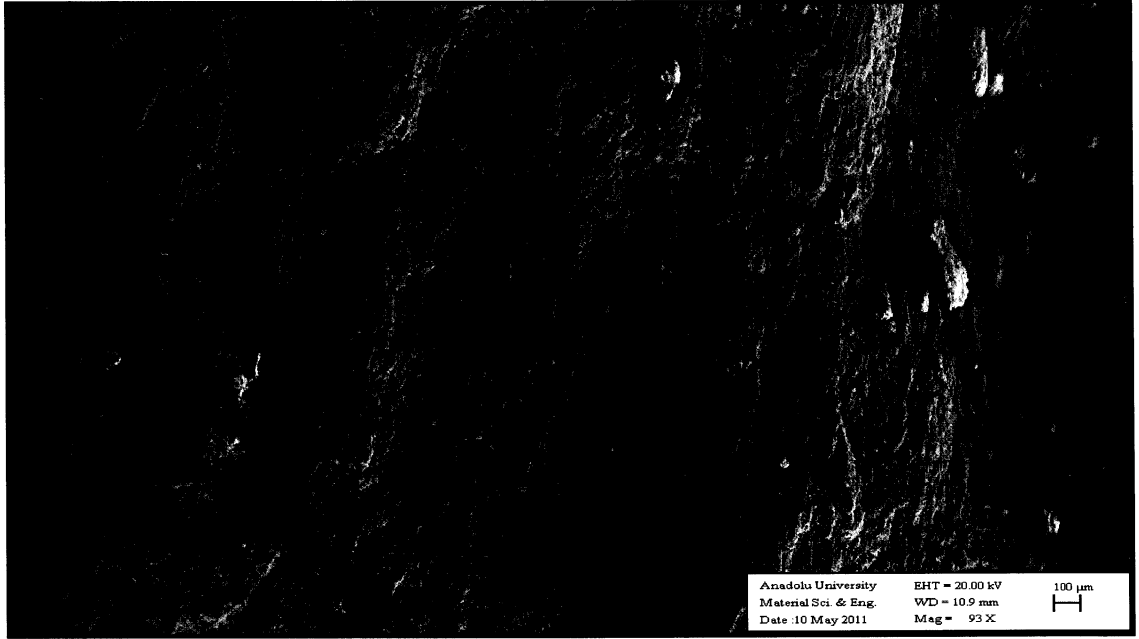


Şekil 27. % 5 Mermer Tozu Katkılı Beton Numunesinin 90x büyültmedeki SEM görüntüsü

Mermer tozu katkıli beton numunelerinden %10’luk serinin SEM görüntüsü Şekil 28’de verilmiştir. Numune yüzeyinde yapılan incelemede en büyük boşluk çapının 124 µm ile 332 µm arasında değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında mermer tozu katkısı artışına paralel olarak boşluk miktarının azaldığı görülmüştür.



Şekil 28. % 10 Mermer Tozu Katkılı Beton Numunesinin 90x büyültmedeki SEM görüntüsü



Şekil 29. % 15 Mermer Tozu Katkılı Beton Numunesinin 90x büyültmedeki SEM görüntüsü

Mermer tozu katkıli beton numunelerinden %15'lik serinin SEM görüntüsü Şekil 29'da verilmiştir. Numune yüzeyinde 90 büyütmeyle yapılan incelemede boşluk miktarının azaldığı ve makro boşlukların kaybolduğu görülmüştür. Mermer tozunun filler etkisiyle ortaya çıkan bu durum betonun porozitesini azaltıcı bir etki göstermekle birlikte betonun karışım suyu gereksinimini artırması nedeniyle basınç dayanımlarında azalmalara neden olmuştur.

4.6.Zemin deneyleri sonuçları

Atık mermer tozunun %20Bentonit+80Kaolin karışımına ilave edilmesiyle fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerde farklılıklar gözlenmiştir. Mermer tozunun yüzdesinin %5 değerinde mukavemetin en yüksek değerde olduğu gözlenmiştir. Ph sonuçlarından da en sıkı karışımın %5 mermer tozu ilaveli numunenin olduğu görülmektedir. XRD ve XRF deneyi sonucunda CaO mermer tozu ilavesiyle arttığı görülmüştür. XRF sonuçlarından MgO'nun %5 mermer tozu bulunan karışımda arttığı, %10 mermer tozu bulunan karışımda azaldığı, %15 mermer tozu karışımında biraz daha arttığı ve %20 mermer tozu bulunan karışımda azaldığı görülmüştür. Bu sonuç serbest basma deneyi sonucuyla paralellik göstermektedir. Buda MgO varlığının dolamitin fazlalığını gösterdiği ve bu nedenle mukavemetin %5 mermer tozu bulunan karışımın en yüksek değeri gösterdiği düşünülmektedir. SEM görüntülerinden, %0 mermer tozuna sahip kil karışımı sıkı bir yapı sergilemektedir. Fakat %5 mermer tozu ilaveli karışımda mermer tozu etrafında kilin adsorbe olduğu bu nedenle de danelerin büyümesiyle mukavemetin arttığı görülmektedir. %10 mermer tozu ilavesinde ise bu yüzde mukavemetin azalmasına sebep olmuştur. %5 değerinden sonra, mermer tozunun artması karışımların yapısının daha ayrık olmasını sağlamıştır.

4.7.Beton deneyleri sonuçları

Yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri sonucunda ince agrega yerine atık mermer tozu ilavesiyle betonun işlenebilirliğinin %5 üzeri mermer tozu katkı oranlarında ince madde miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı görülmüştür. Beton numunelerinin basınç dayanımları sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımının % 5 mermer tozu katkılı beton numunesinde referans numunesine göre %17'lik bir artışla 25.03 MPa olarak elde edildiği görülmüştür. Katkı miktarındaki artışla s/ç oranının artması nedeniyle basınç dayanımları %15 mermer tozu katkılı numune serisinde dayanım %11 azalarak 19.91 MPa olarak belirlenmiştir. Mermer tozu numunesinin XRF sonucunda malzemenin CaO bakımından zengin olduğu silis, alümin ve demir fazının çok az olması nedeniyle puzolanik özelliğinin olmadığı belirlenmiş olup dayanıma katkısının sadece boşluk azaltma yönünden olduğu belirlenmiştir. SEM analizleri değerlendirildiğinde de mermer tozu katkısındaki artışla birlikte makro boşlukların çap ve oranının azaldığı görülmüştür.

5. Sonuç

Çevreye verdiği zararlar nedeniyle mermer tozunun yeniden kullanılabilir hale getirilmesi, sürdürülebilir yapı teknolojilerini gündeme getirmiştir. Doğal kaynakların hızla tüketildiği günümüzde atıkların sürdürülebilir yapı malzemesi olarak kullanılması hem çevre kirliliğini önlemek adına hem de ülke ekonomisine katkı sağlanması adına önem arz etmektedir. Mermer tozunun killi zeminlerin iyileştirmesinde ve beton üretiminde sürdürülebilir malzeme olarak kullanılabilirliği bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

Bilecik ilinde mermere dayalı ürün işletme sayısının fazla olması, mermer atıklarının da oldukça yüksek miktarda ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Zemin numuneleri

üzerinde yapılan fiziksel, mekanik ve fiziko-kimyasal deneylerinin sonuçları incelendiğinde % 5 mermer tozu ilavesinin en efektif sonucu verdiği gözlenmiştir.

Beton üretiminde filler malzeme olarak mermer tozu kullanımı taze betonun işlenebilirliğini azaltmış ve beton karışımlarının su ihtiyacını artırmıştır. Ancak bu olumsuzluğun önüne akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile geçilebilir. Fiziksel ve mekanik beton deneylerinin sonuçları incelendiğinde % 5 mermer tozu kullanımı boşlukları azalttığı için beton kalitesini iyileştirmiştir. Daha yüksek oranlarda mermer tozu kullanımı betonun s/ç oranını artırdığından dayanımları düşürmüştür. Deneysel sonuçlardan betonda % 5 oranında atık mermer tozu kullanımının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bilecik Üniversitesi olarak Bilecik'in bir çevre sorunu olan mermer atıklarının çevreye olan zararının azaltılması, bununla birlikte zemin iyileştirilmesinde ve filler malzemesi olarak kullanılmasıyla hammadde kullanımının azaltılması sağlanacaktır.

Kaynaklar

- [1] Okagbue, C.O., Onyeobi, T.U.S., "Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction", Engineering Geology, Elsevier Science, Vol:53, pp 371-380, (1999).
- [2] Saka, N., "Endüstriyel atıkların çöp depolama alanı dizaynında geçirimsizlik malzemesi olarak değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Eskişehir, Türkiye (2001). (Danışman:A. Tuncan) 133 sayfa.
- [3] Zorluer, I. Ve Usta, M., "Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi", Türkiye İv Mermer Sempozyumu (Mersem '2003) Bildiriler Kitabı, syf.305-311 (2003).
- [4] Sabat, A.K., Behera, S.N. ve Dash, S.K., "Effect of Flyash- Marble Powder on the Engineering Properties of an Expansive Soil", Indian Geotechnical Conference (IGC), Bildiriler Kitabı, 269-272, Ahmedabad, (2005).
- [5] Taşpolat, L. T., Zorluer, İ. ve Koyuncu, H., "Atık Mermer Tozunun Geçirimsiz Kil Tabakalarda Donma - Çözölmeye Etkisi", Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2) 1-16 (2006).
- [6] Uğurlu, A., "Taşunu Kullanımının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkisi", 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 1996, 303-323.
- [7] Taşdemir, C. ve Atahan, H. N., "Filler Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine ve Durabilitesine Etkisi", 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 1996, 251-265.

- [8] Topçu, İ.B., Bilir, T. and Uygunoğlu, T., “Effect of waste marble dust content as filler on properties of self compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol:23, pp:1947-1953, (2009).
- [9] Agarwal, S.K. and Gulati, D., Utilization of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars, *Construction and Building Materials*, Vol:20, pp:999-1004, (2006).
- [10] Ünal, O., Kibici, A., “Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması”, *Türkiye III. Mermer Sempozyumu MERSEM 2001*, ss. 317-325, Afyon, (2001)
- [11] Mishra, A.K., Mathur, R. ve Goel, P., “Marble slurry dust in roads- an apt solution for industrial waste”, *Jl. Of Highway Research Bulletin No-65*, 83-91, (2001).
- [12] Stalin, V.K., Anu, V.J., Shrahan Kumar, R. ve Srinivasan, V., “Control of swell potential of expansive clays using solid wastes”, *Indian Geotechnical Conference (IGC), Bildiriler Kitabı, Ahmedabad*, 155-159, (2004).
- [13] Cömert, A.T., Fırat, S., Yılmaz, G., ve Sümer M., “The Effect of Fly Ash, Marble Dust, and Waste Sand on the CBR and Permeability of the Road Subbase Filling Materials”, *9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey*, (2010).
- [14] Sarkar, R., Das, S.K., Mandal P.K. ve Maiti H.S., “Phase and Microstructure Evolution During Hydrothermal Solidification of Clay-Quartz Mixture With Marble Dust Source of Reactive Lime”, *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 297–304, (2006).
- [15] Gökhan G., “Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM)”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
- [16] Ender, B., “Erzincan (Büyükardıç) ve Erzurum (Güllüdere, Tasmator, Tetikom ve Mağaratepe) Kazılarında Ele Geçen Demir Çağına Ait Seramiklerin XRF tekniği ile İncelenmesi” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 100 s., 2006.