

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ VE BETONLARDA
ÇİMENTO İKAME MALZEMESİ OLARAK ZEOLİTİN
KULLANILABİRLİĞİ**

ŞÜKRAN GEÇER

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

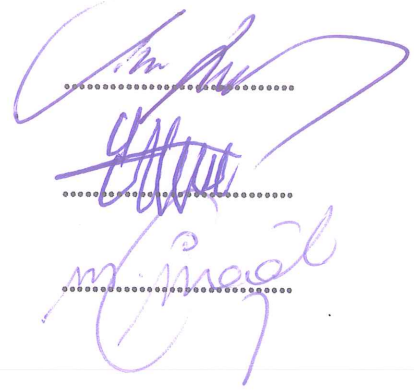
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ VE BETONLARDA
ÇİMENTO İKAME MALZEMESİ OLARAK ZEOLİTİN
KULLANILABİLİRLİĞİ

ŞÜKRAN GEÇER

Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖNER
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 16.01.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Türkiye’de mevcut rezervleri düşünülerek, kullanımının bilgi eksikliği nedeniyle yaygın olmayan doğal zeolitin, inşaat sektörüne değerlendirilmesi için yürütülen bu çalışmada Balıkesir-Bigadiç yöresinden elde edilen zeolitin belli oranlarda çimento yerine ikame edilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Yüksek Lisans eğitimim sırasında her aşamada yanımda olan desteğini ve değerli bilgi birikimleriyle yardımlarını hiç esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Zeolit malzemesi ve bilgilerinin temin edildiği Ege Zeolit Sanayi firması yetkilileri Sayın Hatice ÇAKIR, Nurgül TEMREN ve Hasan ESER’e yardımlarından dolayı teşekkürü borç bilirim.

Bilgi birikimiyle yol gösteren, çalışmanın seyrinde fikir aldığım değerli hocam İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. Hasan YILDIRIM’a, ultrasonik ses cihazının temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi öğretim üyesi Prof.Dr. Metin İPEK’e ve laboratuvar teknisyenlerine, çalışma için gerekli malzemelerin tedarik edilmesinde Halim CAMBAZ’a, Selim Bey’e ve Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Yüksel Proje Ailesine, Malzeme ve Numunelerin transferi için büyük emek sarf eden Arıkan UGUR, annesi Aysel UGUR’a ve Kardeşim Şehmus GEÇER’e Laboratuvar kullanımı için gerekli desteği gösteren Ender DURMUŞCAN’a, Emre ERSOY’a ve Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kalyon İnşaat Ailesine, numunelerin dökümünde yardımcı olan Enes KIRIKTAŞ, Emrah ERGÜN ve Kalyon İnşaat Lab. teknisyenlerine, betonların dizaynı ve malzeme konusunda bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Gökşin GÜVEN’e ve Cemal IŞIK’a, Sülfat testi için gerekli çözeltilerin hazırlanması ve malzemenin temini için desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Efgan KİBAR’a, Donma-Çözünme testi için, yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Onur ÖZTÜRK’e ve Rukiye AKYÜZ’e, Tez Hazırlama sürecinde desteğini esirgemeyen Rahime-Mehmet ERKAL ve Muazez-Mübarek ALTUN ailelerine çok teşekkür ederim.

Hayatta her daim yanımda olan Annem Türkan GEÇER, babam Sebahattin GEÇER, tüm kardeşlerime ve bu zorlu süreçte beni yalnız bırakmayan, desteğini asla esirgemeyen ruh eşim Mohamed Mostafa Ahmed MOHAMED’de çok teşekkür ederim.

Ocak - 2020

Şükran GEÇER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	4
1.1. Zeolitler	4
1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton	11
1.2.1. Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları	11
1.2.2. Kendiliğinden yerleşen betonun taze haldeki özellikleri	12
1.2.3. Kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanılan deney yöntemleri	13
1.2.3.1. Çökme yayılma deneyi	13
1.2.3.2. V-hunisi deneyi	14
1.2.3.3. L kutusu deneyi	14
1.2.3.4. U kutusu deneyi	15
1.2.3.5. Dondurma kutusu deneyi	16
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	17
3. MALZEME VE YÖNTEM	41
3.1. Malzeme	41
3.1.1. Çimento	41
3.1.2. Zeolit	42
3.1.3. Katkı maddesi	43
3.1.4. Agregalar	44
3.1.5. Kum	45
3.1.6. Su	46
3.2. Yöntem	47
3.2.1. Yayılma deneyi	48
3.2.2. Basınç dayanımı deneyi	49
3.2.3. Birim ağırlık ve su emme deneyleri	50
3.2.4. Donma çözünme deneyi	51
3.2.5. Sülfata karşı dayanıklılık deneyi	54
3.2.5.1. Harçların hazırlanması	54
3.2.5.2. Çözeltinin hazırlanması	55
3.2.5.3. Harç çubuklarının ölçümü ve çözeltiye yerleştirilmesi	58
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
4.1. Kıvam Deneyi Sonuçları	60
4.2. Basınç Dayanımı Sonuçları	60
4.3. Birim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri Sonuçları	62
4.4. Donma Çözünme Deney Sonuçları	64

4.5. Sulfata Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları	66
4.6. Maliyet Hesabı	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	70
EKLER	76
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	79
ÖZGEÇMİŞ	80



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünyada yıllık zeoit üretimleri	5
Şekil 1.2. Çökme yayılma testi deney düzeneği	13
Şekil 1.3. V-hunisi deney aparatı	14
Şekil 1.4. L kutusu deney aparatı	15
Şekil 1.5. U kutusu deney aparatı.....	15
Şekil 1.6. Doldurma kutusu deney aparatı	16
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan agregalar	44
Şekil 3.2. Kullanılan kum	45
Şekil 3.3. Betonda yayılma deneyi.....	48
Şekil 3.4. Yayılma tablası deneyi.....	49
Şekil 3.5. Basınç dayanımı deneyi	50
Şekil 3.6. Basınç dayanımı deneyi sonucu.....	50
Şekil 3.7. Donma çözünme test cihazına numunelerin yerleşimi	52
Şekil 3.8. Donma çözünme test cihazı ayarlaması	53
Şekil 3.9. Beton numunelerinin ultrason cihazı ile ölçümü	54
Şekil 3.10.Sülfata karşı dayanıklılık deneyi için hazırlanan harç çubukları	55
Şekil 3.11.Sülfata karşı dayanıklılık deneyi için hazırlanan küp numuneler	55
Şekil 3.12.Sülfat deneyi için sodyum sülfat çözeltisinin tartımı.....	57
Şekil 3.13.Sülfat deneyi için sodyum sülfat çözeltisinin hazırlanması.....	57
Şekil 3.14.Harç çubuklarının komperatör	58
Şekil 3.15.Sodyum sülfat çözeltisinin pH değerinin ölçülmesi	59
Şekil 4.1. Numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	61
Şekil 4.2. Karışımların DYK birim ağırlık ve su emme değerleri sonuçları.....	64
Şekil 4.3. 200 döngü sonrası karışımların ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı sonuçları	65
Şekil 4.4. Sülfata karşı dayanıklılık test sonuçları	66
Şekil A.1. Kür havuzunda bekletilen silindir numuneler	77
Şekil A.2. Donma çözünme testi için hazırlanan referans numunenin merkez sıcaklığı.....	77
Şekil A.3. Donma çözünme testi için hazırlanan referans numunenin gösterimi	78

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Ülkemizdeki zeolit yatakları ve türleri	6
Tablo 1.2. Grub adlarına göre zeolitlerin sınıflandırılması	7
Tablo 1.3. İYB geometrisine zeolitlerin sınıflandırılması	7
Tablo 1.4. Özel İYB'lere sahip zeolitlerin sınıflandırılması.....	8
Tablo 3.1. Portland çimentosunun kimyasal analiz sonuçları	41
Tablo 3.2. Portland çimentosunun fiziksel ve mekanik analiz sonuçları	42
Tablo 3.3. Zeolitin kimyasal analiz sonuçları	43
Tablo 3.4. Süper akışkanlaştırıcı beton katkısı	44
Tablo 3.5. Kumun tane büyüklüğü dağılımı	45
Tablo 3.6. İstanbul ilinin B. Çekmece ilçesinin haziran ayı raporu	46
Tablo 3.7. 1 m ³ beton için malzeme miktarları	47
Tablo 3.8. 1 m ³ harç için malzeme miktarları	47
Tablo 4.1. Kıvam deneyi sonuçları	60
Tablo 4.2. 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sonuçları	60
Tablo 4.3. Karışımların taze beton birim ağırlıkları	63
Tablo 4.4. Karışımların DYK birim ağırlık ve su emme değerleri sonuçları	63
Tablo 4.5. 200 döngü sonrası karışımların ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı sonuçları	65
Tablo 4.6. Sülfata karşı dayanıklılık test sonuçları	66
Tablo 4.7. 1 m ³ beton için maliyet hesabı.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASR	: Alkali silika reaksiyonu
Ca (OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
DYK	: Doygun kuru yüzey
DZT	: Doğal zeolit tozu
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
m	: Hazırlanmak istenen maddeden alınması gereken miktar (kg-gr)
MA	: Molü hazırlanacak olan maddenin molekül ağırlığı (kg-gr)
MZ	: Modifiye zeolit
MgSO ₄	: Magnezyum Sülfat molekülü
NZ	: Doğal zeolit
n	: Hazırlanması istenen maddenin mol sayısı (mol)
Na ₂ SO ₄	: Sodyum Sülfat molekülü
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	: Sodyum Sülfat deka hidrat
ÖYFC	: Öğütülmüş yüksek fırın curufu
UK	: Ucucu kül

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ VE BETONLARDA ÇİMENTO İKAME MALZEMESİ OLARAK ZEOLİTİN KULLANILABİRLİĞİ

ÖZET

Son yıllarda çevresel etkiler ve enerji verimliliği gereksinimi nedeniyle, araştırmacılar; çimento sanayinde mekanik özelliklerden ödün vermeden, daha az enerji gereksinimiyle daha dayanıklı ve sürdürülebilir malzemeler yapmayı amaçlamıştır. Bu nedenle en yaygın kullanımlardan biri geleneksel çimentolu malzeme üretim sürecinde puzolanik katkı kullanımınıdır. Bu kapsamda Balıkesir-Bigadiç yöresinden elde edilen zeolit kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımında ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Portland çimentosu ile ikame edilerek kullanılmıştır. Bağlayıcı miktarı ve su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Üretilen karışımların taze betonda kıvam, sertleşmiş betonda birim ağırlık, su emme, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve donma çözünme direnci ölçülmüştür harç çubuklarında ise sülfata karşı dayanıklılık testi yapılmıştır. Zeolit ilavesi ile yayılma miktarı %15 katkı oranına kadar sorun yaşatmazken, %20 oranında zeolit işlenebilirliği ciddi oranda düşürmüştür. Her oranda zeolit kullanımı betonun birim ağırlık değerini düşürmüştür. %15'e kadar zeolit kullanımı dayanımı kontrol betonuna kıyasla her yaşta arttırırken, %20 zeolit kullanımı ise kısa kür koşullarında dayanımı düşürürken uzun kür koşullarında dayanımı kontrol betonuna eşdeğer sonuçlar vermiştir. Donma-çözünmeye karşı en yüksek direnci zeolitsiz numuneler gösterirken zeolit miktarının artmasıyla direnç düşmüştür. Sülfata karşı dayanıklılık testinde ise zeolit katkılı betonların tümü kontrol betonuna kıyasla sülfata karşı direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Basınç Dayanımı, Fiziksel Özellikler, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Zeolit.

THE USABILITY OF ZEOLITE AS CEMENT REPLACEMENT MATERIAL IN SELF-COMPACTING MORTAR AND CONCRETE

ABSTRACT

In recent years, due to environmental impacts and the need for energy efficiency; aims to make more durable and sustainable materials with less energy requirements in the cement industry without compromising mechanical properties. Therefore, one of the most common uses is the use of pozzolanic additives in the production process of conventional cementitious materials. In this context, zeolite obtained from Balıkesir-Bigadiç region was replaced by Portland cement with 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by weight in the self-compacting concrete mixture. The amount of cement and the water/cement ratio were kept constant. For the produced mixtures; physical properties such as consistency in fresh concrete and unit weight, water absorption in hardened concrete, compressive strengths of 3, 7, 28 and 90 days, freezing-and-thawing test, length change of mortar bars exposed to a sulfate solution were measured. While the addition of zeolite up to 15% did not cause any problems on amount of flow, 20% zeolite reduced workability significantly. The use of zeolite in each ratio reduces the unit weight value of the concrete, while the use of zeolite up to 15% increases the strength. The use of 20% zeolite decreased the strength in short curing conditions, whereas the strength in long curing conditions was equivalent to control concrete. The highest resistance of concrete to rapid freezing and thawing was shown by samples without zeolites, but the resistance decreased with increasing zeolite. Sulfate resistance test showed that all zeolite concretes had higher sulphate resistance than control concrete.

Keywords: Compressive Strength, Physical Properties, Self-Compacting Concrete, Zeolite.

GİRİŞ

Dünyada devam eden nüfus artışı ve teknolojik faaliyetler daha fazla enerji tüketimine ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Artan enerji gereksiniminin karşılanmasında sınırlı oranda bulunan doğal kaynaklarımızın aşırı tüketimi küresel çevre sorunu olarak önümüze çıkmaktadır (Bilim, 2011).

Çağımızda inşaat sektöründe beton kullanılan en popüler ve en yaygın malzemedir. Taze betonun istenilen şekil ve boyutlardaki beton elemanlarının üretilebilmesi, sertleşmiş betonun oldukça yüksek basınç dayanımına sahip olması, sertleşmiş betonun hizmet verdiği süre boyunca çevrede oluşan yıpratıcı faktörlere karşı diğer birçok yapı malzemelerine kıyasla daha dayanıklı olması, betonun çelik donatılarla çok iyi aderans gösterebilecek özellikte olması, diğer yapı malzemelerine göre daha ekonomik olması, estetik amaçlarla kullanılmaya uygun özellikte bir malzeme olması nedeniyle, betonun kullanımını diğer yapı malzemelerine kıyasla daha elverişli hale getirmektedir (Erdoğan, 2003).

Betonun bu hakimiyeti beraberinde en önemli bileşenlerinden çimentonun vazgeçilmez olmasına neden olmuştur. Ancak çimento üretiminin doğadaki karbon dioksit (CO₂) emisyonuna katkısı oldukça fazladır. Sera gazlarının emisyonunun azaltılmasına yönelik çevresel düzenlemelerin beraberinde, doğal kaynaklarının verimli kullanımı, düşük maliyet ve betonun özelliklerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi (hidratasyon ısını azaltmak, su geçirgenliğini azaltmak, sülfata karşı dayanıklılığı arttırmak, segregasyonu ve terlemeyi azaltmak vb.) gibi faktörler nedeniyle inşaat sektörünün alternatif malzeme arayışı vardır. Betonun hem çevreci hem de ekonomik yoldan daha iyi performans gösterebilmesi için puzolanlardan faydalanılmaktadır. Puzolanlar, “Kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan ya da çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit (Ca (OH)₂) ile reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler” olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003).

Günümüzde uygun miktarlarda uygun puzolanların kullanılması beton ve çimento endüstrisine ekolojik, teknik ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle puzolanların sektörde kullanımı gittikçe artmaktadır (Erdoğan ve ark., 2007).

Çimento ile belirli oranlarda ikame edilerek kullanılabilen katkı maddeleri elde edildikleri kaynaklara göre doğal malzemeler, endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilenler, ısıtılmış malzemeler olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Erdoğan, 2003). Puzolanik aktivite puzolanın içindeki aktif silisin Ca(OH)_2 ve su ile reaksiyona girebilme yeteneği olarak belirtilmektedir (Akgün, 2017). Doğal puzolanların beton üretiminde uygun olup olmadığını TS 25 ve ASTM C 618 no.lu standartlarda belirtilen fiziksel ve kimyasal özelliklere dair sınır değerlerini ile kontrol edilmektedir. Gerekli deney yöntemleri yine bu standartlarla belirtilmektedir. Örneğin katkı maddesi olarak kullanılacak mineralin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin %70'ten az olmaması gerekir (Aruntaş, 2014, Akgün, 2016). Zeolitin iyi bir puzolanik aktivite gösterdiği bilinmektedir (Perraki ve ark., 2003, Dayı ve ark., 2013, Ahmadi ve Shekarchi, 2010, Uzal ve ark., 2010). Zeolitin puzolanik aktivitesinin silis dumanı ile uçucu kül arasında olduğu bilinmektedir (Poon ve ark., 1999).

Zeolit katkılı betonların sülfata karşı direncini belirlemek adına yapılan bazı çalışmalarda zeolit betonun sülfata karşı dayanıklılığını arttırdığı tespit edilmiştir (Canpolat ve Yılmaz, 2002, Janotka, 2003, Karakurt ve Topçu, 2011, Malolepszy ve Grabowska, 2015, Oymael, 2010, Tran, 2011). Aynı zamanda betona zeolit katkısı, alkali silika reaksiyonu kaynaklı oluşan zararlı genleşmeleri önlediği bilinmektedir (Ahmadi ve Shekarchi, 2010, Naigian ve Tinguian, 198, Daskiran ve Daskiran, 2015, Karakurt ve Topçu, 2011).

Günümüzde çok farklı kullanım alanlarında yer edinen zeolitler çoğu zaman gündeme gelmektedir. Bu sebeple ülkemizin zeolitten faydalanabilmesi için araştırmaların hızlandırılması gerekmektedir (DPY, 1996). Zeolit yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine sahip bir mineraldir. Yapısındaki boşluk ve kanallarda yabancı iyon ve su gibi molekülleri barındırabilmesi (yüksek iyon değiştirilme kapasitesi), ısıtılınca yapıları bozulmadan bünyelerindeki suyu yavaş yavaş vermesi (moleküler elek olma özelliği) ve düşük yoğunluğu sayesinde betonun birim ağırlığını düşürmesi gibi

etkenler zeolitin mineral katkı olarak kullanılmasına yol açmıştır. (Canpolat ve ark., 2002).

Zeolitlerin beton üretiminde çimento yerine ikame edilerek kullanılması diğer mineral katkılara oranla daha düşüktür. Bunu nedenleri kullanımda olan diğer puzolanlara kıyasla daha az tanınması ve sadece diğer puzolanlara erişilebilirliğin az olduğu yerlerde kullanılmaktadır (Aruntaş ve Beycioğlu, 2014). Dünyada doğal zeolitin üretimi ve kullanımını artarken Türkiye’de zeolit yataklarının kalitesi, büyüklüğü, kullanım alanları ve işletilebilirliği ile ilgili yeterli bilgi birikiminin olmaması zeolit üretimini ve dolayısıyla kullanımını engellemektedir (Köktürk,1995).

Zeolit puzolanlar betonun su ile teması durumunda korozyon oluşabilecek durumlarda hidrolik çimentolarda kullanımı yaygındır. Zeolitin içeriğinde yüksek miktarda silis olması nedeniyle sulu ortamlarda betonun katılaşması aşamasında açığa çıkan kirecin nötrleşmesine neden olmaktadır (Turanlı ve ark., 2007).

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Zeolitler

Bu 1756 yılında İsveçli mineralog ve kimyacı Frederic Cronstedt tarafından ısıtılınca yapısında bulunan suyun köpürerek çıkması sonucunda Yunanca kaynayan “zein” ve taş anlamına gelen “lithos” kelimelerinden oluşan “kaynayan taş” olarak isimlendirilmesiyle zeolit adını almıştır (DPT, 1996).

Zeolitler gözeneklerinde katyon ve su bulundururken, kafes yapılarında silis, alüminyum ve oksijen bulunduran mikro gözenekli kristal yapıdadırlar. Silikat minerallerine kıyasla çok açıklıklı bir kafes yapıya sahip olduklarından yoğunlukları daha düşüktür Alüminyum ve silis atomları ortak oksijen atomu sayesinde birbirlerine tetrahedral olarak tutunmuşlardır (Zeolyst International, 2009, Gülen ve ark., 2012).

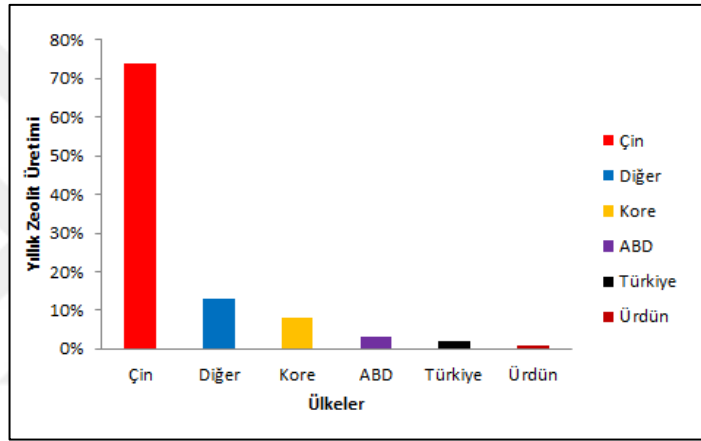
Doğal zeolit yataklarının oluşumu altı grupta ayrılmıştır:

- Suyu tuzlu göllerde biriken volkanik malzemelerin göldeki tuzlu su ile reaksiyonu sonucu meydana gelen yataklar,
- Suyu tuzlu veya tatlı olan açık göllerde biriken volkanik malzemenin göldeki su ile reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen yataklar,
- Derin denizel yerlerde veya kıyıda volkanik malzemenin birikip deniz suyu ile reaksiyona girmesi ile meydana gelen yataklar,
- Al-Si sedimanter veya volkanik malzemelerin düşük ısılı gömülme metamorfizma nedeniyle meydana gelen yataklar,
- Al-Si’lu malzemelerin sıcak kaynak veya hidrotermal suları ile karşılaşması sonucu bu Al-Si’lu içeriğin bozulması neticesinde meydana gelen yataklar,
- Çoğunlukla ikinci zaman tortularında rastlanan ve orjinlerinin volkanik olup olmadığı bilinmeyen, gölsel veya denizel yerlerde meydana gelen zeolit yatakları (Köktürk, 1995, Gülen ve ark., 2012).

Tanınan 150 tür zeolit mineralinden 40 tanesi yeterince saf ve fazla miktarda tabiatta doğal halde bulunmaktadır. Bu zeolit çeşitlerinden sadece 14 çeşidi endüstride

materyal olarak kullanılabilir. Doğada en sık rastlanan doğal zeolitler natrolit, lamontit, h lantin, şabazit, filipsit, klinoptilolittir ve analsitdir. Adsorblama, kristal yapı, silisçe zengin kimyasal birleşim, iyon değişimi ve molekül eleme özellikleri hem yapay hem de doğal zeolitler için geçerlidir (Köktürk, 1995).

Dünya zeolit rezervleri 1950'lerden sonra belirlenmeye başlandığı için belirli bir rakam vermek zordur. Çin dünyada en fazla zeolitin üretildiği yerdir. Küba, Japonya Macaristan, ABD, İtalya ve Bulgaristan önemli üreticilerdendir (Soylu, 2017). Dünya üzerinde çıkarılan zeolit türlerinin ülkeler bazında yıllık  retimi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Dünyada yıllık zeolit üretimleri (Virta, 2002)

1756 yılında tanınan zeolitlerin ülkemizde tespiti 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında yapılmıştır. Ülkemizdeki zeolitler en çok analsim, h landit ve klinoptilolit minerallerinden oluşurken diğer türlerine daha az karşılaşılmıştır (Köktürk,1995, Soylu, 2017).

Ülkemizde net olarak rezerv tespit çalışması yoktur. Bunun nedeni ise volkanikler içerisindeki zeolit sınırlarının henüz belirlenememiş olmasıdır. Ancak bazı bölgelerde yapılan detaylı çalışmalarla net rezerv bilgisi vardır. Balıkesir-Bigadiç yoresinde 50 milyar ton zeolitik t f olduğu tespit edilmiştir (Esenli, 1998, Akgün, 2016).

Türkiye'de belirlenen zeolit yatakları Balıkesir- Bigadiç, Gördes, Emel-Yukarı Yonca a , Bahçecik. Gölpazarı. Göynük, Kalecik, Çandır, Saban z , Hasavaz, Kapadokya Yoresi, Kütahya-Şaphane ve Balıkesir Bigadiç bölgeleridir (Köktürk,

1995, Çetinel, 1993). Ülkemizdeki mevcut bulunan zeolit yatakları ve türleri Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Ülkemizdeki zeolit yatakları ve türleri (Köktürk, 1995, Soylu 2017)

Zeolit Yatakları	Türleri	Zeolit Yatakları	Türleri
Bahçecik, Gölpazarı, Göynük	Analsim	Kütahya- Şaphane	Klinoptilolit
Polatlı, Mülk, Oğlakçı, Avaş, Mallıhan, (Beypazarı, Mihalıççık	Analsim	İzmir- Urla	Klinoptilolit
Kalecik, Çandır, Şabanözü, Hasavaz	Analsim	Gördes	Klinoptilolit
Balıkesir- Bigadiç	Klinoptilolit	Kapadokya Yöresi	Klinoptilolit, Şabazit, Mordenit, Erionit
Emel – Yukarı Yoncağaç	Klinoptilolit	Geniz, Hisarcık	Klinoptilolit

Zeolitlerin adlandırılması veya gruplandırılabilmesi için üç farklı sınıflandırma yöntemi kullanılır. İlk iki sınıflandırma zeolitlerin kristal yapı görüşüne dayanan sınıflandırma türüdür. Üçüncü sınıflandırma türü ise zeolitlerin benzer özelliklerine göre yapılan sınıflandırma türüdür.

Zeolitlerin yapısal sınıflamalarından ilki kafes ve kafesler topolojisine dayanan üç harfli bir kodlama şeklidir. Örneğin kafes kodu her iki zeolit için “HEU” olarak verilen klinoptilolit ve höylandit mineralleri özdeş kabul edilir (Meiler,1996). Höylandit minerali klinoptilolitten önce isimlendirildiği için öncelik bu minerale verilmiştir. “NAT” tanımlaması ise Natrolit, skolesit, gonardit ve mezolit minerallerine özdeş olması sebebiyle bu gruba verilmiştir. Bu adlandırmada da ilk bulunan mineral natrolit olması sebebiyle grup adlandırılmasında natrolit mineralinin adı baz alınmıştır. Genel olarak ilk bulunan mineralin adı grup isimlendirilmesinde etkindir. Zeolitlerin kafes ve kafesler topolojisine dayanarak yapılan bu sınıflandırma için en çok tanınan bilinen ana gruplar için kullanılan adlandırmalar Tablo 1.2.’de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Grup adlarına göre zeolitlerin sınıflandırması (Meiler, 1996)

Grup Adı	Zeolit Türü	Grup Adı	Zeolit Türü
ANA	Amonyolösit, Analsim, Lösit, Polusit, Wairakite	HEU	Klinoptilolit, Höylandit.
CHA	Şabazit, Willhendersonite.	LAU	Lamontit.
ERI	Eriyonit	NAT	Gonardit, Mezolit, Natrolit, Paranatrolit, Skolesit.

Zeolitlerin sınıflandırılması için kullanılan ikinci yol ise “ikincil yapı birimleri” nin esas alındığı yöntemdir. Zeolitlerin birincil yapı birimi dörtyüzlüdür. İkincil yapı birimleri ise dörtyüzlünün geometrik olarak düzenlenmiş halidir. Silikat minerallerinde dört yüzlü zincirler, kafesler, halkalar ve levhalar halinde dizilmiş olabilir. Buradan yola çıkarak ikincil yapı birimleri esas alınır. Ancak bu sınıflandırma türünde dikkate alınmayan çokyüzlü birimlerin olması nedeniyle uygun değildir. İYB geometrisine dayanan 7 ayrı zeolite grubu Tablo 1.3’te verilmiştir.

Tablo 1.3. İYB geometrisine zeolitlerin sınıflandırılması (Breck, 1974)

Grup No	Zeolit Türü
1 (S4R – single 4-ring)	Analsim, Lamontit
2 (S6R – single 6-ring)	Erionit
3 (D4R – single 4-ring)	A, N-A, ZK-4
4 (D6R – single 6-ring)	Şabazit
5 (Kompleks T5O10)	Natrolit, Mezolit
6 (Kompleks T8O16)	Mordenit
7 (Kompleks T10O20)	Höylandit, Klinoptilolit

Üçüncü sınıflandırma şekli ise İYB’ye benzer olup geçmişte keşfedilmiş ve adlandırılmış zeolitleri kapsar. Zeolit grup isimlendirilmesinin bir kombinasyonu kullanan bu şema birçok jeolog tarafından sıkça kullanılan özel İYB’lere içerir. Bu

şemayı belirli bilim adamlarına kullanışlı gelmesi dolayısıyla kullanılmaktadır. Özel İYB'lere sahip zeolitlerin sınıflandırılması Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Özel İYB'lere sahip zeolitlerin sınıflandırılması (Gottardi ve Galli, 1985)

Grup No	Zeolit Türü
Fibröz Zeolitler	Natrolit
Tek Bağlı, 4 Zincirliler	Analsim, Lamontit
Çift Bağlı, 4 Zincirliler	Amisit, Filipisit.
6 Zincirliler (Tek ve Çift Bağlılar)	Şabazit, Erionit.
Mordenit Grubu	Mordenit.
Höylandit Grubu	Höylandit, Klinoptilolit.

Adsorbsiyon, iyon değişikliği yapabilme, yapısında bulunan silis içeriği, moleküler elek yapısı, tortul zeolitlerde küçük kristallerin gözenek yapısı, hafif ve açık renkli olması nedeniyle birçok işkolunda kullanılmasını sağlamıştır. Doğal zeolit kullanım alanları 5 bölümde incelenebilir (DPT, 2001).

Kirlilik Kontrolü:

- Radyoaktif Atıkların Temizlenmesi: Adsorbsiyon ve iyon değiştirme özellikleri kirlilik kontrolünde sıkça kullanılmaktadır. Nükleer santral atıklarında bulunan çevreye zarar veren Sr^{90} , Co^{60} , Ca^{45} , Cs^{137} gibi izotopları zeolitler sayesinde ayrıştırılabilmektedir. Bu şekilde atık sudan uzaklaştırılan radyoaktif atıklar yer altına gömülerek tehlikesiz hale gelir. Bunun için asitlere karşı dirençli olan mordenit ve klinoptilolit tercih edilir.
- Atık Suların Arıtılması: Atık sularda bulunan bazı azot bileşikleri ve bazı metaller yer üstü ve yeraltında suyu kirlettiği için bu maddelerin atık sular dan uzaklaştırılması gerekmektedir. Atık sulardaki azot bileşikleri (amonyum vb.) ve bazı ağır metal katyonları zeolitler yoluyla uzaklaştırılabilmektedir. Klinoptilolitin Pb (II) iyonu adsorpsiyon kapasitesi hazırlanan bir atık su numunesinde %66 oranında metal giderimi tespit edilmiştir (Dursun ve Pala, 2007).
- Baca Gazlarının Temizliği: Kömür ve petrol üretimi sırasında doğaya salınan bazı kirletici gazların (CO_2 ve SO_2) zeolit sayesinde filtrenebilmektedir.

- Oksijen üretimi: Dolaylı yoldan iyi etkileri vardır. Doğada bulunan azotu adsorblama özelliği sayesinde tutarak ortamdaki oksijen miktarını arttırmaktadır. Bu amaçla en çok sentetik zeolitler kullanılırken klinoptilolit ve mordenit kullanılan doğal zeolitlerdendir.
- Çöp Deponi Alanları: Çöp deponi alanları önemli bir kriter olan zemin, bentonit türü killere zeolitin birlikte kullanılması durumunda zeolit hem zemin kararlılığında, hem de zemin stabilizasyonunda olumlu bir katkı sağlamıştır. Ayrıca su sızıntılarında filtre olarak görev almaktadır.
- Petrol Sızıntılarının Temizliği: Yeni gelişen bir uygulama olup zeolit sodyum karbonat, %20 metilsiloksan, tartari asit ve genişletilmiş perlit ile peletlenmiş olan bu malzeme 200 saat suda yüzerek petrolü adsorblamaktadır (DPY, 2001, Gülen ve ark., 2012).

Enerji

- Doğal Gazların Saflaştırılması: Zeolitler 1969 yılından beri saf olmayan veya kirli doğal gazlarından CO₂'in uzaklaştırılmasını sağlar,
- Güneş Enerjisinden Yararlanma: Sıcaklığa dayanarak su alıp kaybetme özelliğinden yararlanılarak küçük yapıların klimatize edilmesi ve ısıtılması sağlar. Bu sayede güneş enerjisinin transferinde ısı değiştirici olarak kullanılmaktadır.
- Kömür üretimi: Çok yaygın olmamakla birlikte derinlerde bulunan kömür yakılarak elektrik enerjisine çevrilir. Kömürün yakılması için ihtiyaç duyulan oksijen ve yanma sonrasında patlayıcı özellikteki oksitlerin temizlenmesini sağlamak için zeolit kullanılmaktadır.

Tarım ve Hayvancılık

- Toprağın Hazırlanması ve Gübreleme: Su tutma özelliği ve iyon değişirmesi sayesinde genellikle kil içeriği düşük olan topraklarda sıkça kullanılır. Klinoptilolit nemin fazlasını adsorpladığı için gübrelerde depolamadan kaynaklı sertleşme ve pişirme sorununa çare olmaktadır.
- Tarımsal Mücadele: Zeolitlere tarımsal mücadelede adsorplama ve iyon değişirmesi sayesinde ilaç taşıyıcı olarak faydalanılmaktadır.
- Besicilik: Tavuk, Domuz ve geviş getiren hayvanların yemine zeolit eklenmesi ile normal yem ile beslenen hayvanlara kıyasla sağlıklı kilo artışının olduğu belirlenmiştir

- Su Kültürü: Klinoptilolit başta olmak üzere göl ve göletlerde meydana gelen kirliliğin temizlenmesinde kullanılmaktadır. Su kültür ortamında oksijen zengin hava sirkülasyonunu sağlamaktadır.
- Organik Atıkların Muamelesi: Dışkıların çürümesi sonucu açığa çıkan metan gazının ayrılması, dışkıdan kaynaklı kötü kokuların uzaklaşmasını ve nem oranının kontrolünü sağlamaktadır (DYP, 2001).

Madencilik ve Metalürji

- Maden Yataklarının Bulunması: Zeolitler maden yataklarının araması konusunda yardımcı olmaktadır. Örneğin Japonya'da uranyumun hölanditli-klinoptilolit seviyelerine bağlantılı olduğu saptanmıştır. Ülkemizde ise borat oluşumlarının zeolit tüflerle bağlantılı olduğu bilinmektedir.
- Atık Suların Temizlenmesi: Madencilik ve metalürji çalışmaları sırasında oluşan atık suların ağır metallere arıtılmasını işinde yine zeolitler kullanılmaktadır (DYP, 2001).

Diğer kullanım alanlarından bahsedecek olursak:

- Kâğıt endüstrisinde dolgu maddesi olarak yer almaktadır. Zeolit (klinoptilolit) katkılı kâğıtları kil katkılı kâğıtlara oranla daha az mürekkebi dağıtırken daha toktur.
- İnşaat sektöründe puzolan olarak kullanılmasının yanında, genişlemeye uygun olan zeolitlerin aşınma karşı dayanımı yüksek olduğundan geliştirilmiş hafif agrega olarak üretilmektedir. Rahatlıkla kesilip işlenebilir ve hafif olması nedeniyle yapı taşı olarak kullanılırlar.
- Sağlık sektöründe parlatici etkisi nedeniyle diş macunlarına, Küba'da ishal ve ülser rahatsızlıklarında ilaç içeriğinde zeolit eklenmektedir. Bu konuda patentleri mevcuttur. Ayrıca hayvanlarda kesik yerlerin enfeksiyon kapmaması için zeolite başvurulmaktadır.
- Deterjanlarda kullanılan fosfatın çevre kirliliğine neden olması nedeniyle bazı ülkelerde kısıtlama yoluna gidilmiştir. Fosfat yerine her ne kadar sentetik zeolitler kullanılsa da doğal zeolit kullanılması yönünde çalışmalar devam etmektedir (DYP, 2001).

Türkiye'de mevcut rezervleri düşünülerek, kullanımının bilgi eksikliği nedeniyle yaygın olmayan doğal zeolit, inşaat sektörüne değerlendirilmesi hem ekolojik hem

ekonomik açıdan avantaj sağlayacağı göz önünde bulundurularak yürütülen bu çalışmada zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton

Kendi ağırlığı ile yerleşebilen, yüksek akıcılık özelliğe sahip bir betondur. 1983'ten önceki yıllarda betonda dayanıklılık Japonya'da büyük bir sorun haline gelmiştir. Dayanıklı beton üretimi için yeterli sayıdaki işçinin yeterli miktarda vibrasyon uygulayarak elde edilmesiyle mümkündür. Ancak artan işçi sayısı ile birlikte yapının kalitesi bozulmaya başlamıştır. Şantiyede fazladan işçiye gerek duyulmadan istenilen dayanıklılıkta beton üretimi ancak kendiliğinden yerleşen betonla mümkün olmuştur. Kendi ağırlığıyla dışardan herhangi bir baskı olmadan yayılmaktadır. Bu şekilde aranan beton 1986 senesinde Okamura tarafından elde edildi. Bundan sonra bu betonun işlenebilirliği için için Maekawa ve Ozawa Tokyo Üniversitesinde çalışmalar yapılmıştır.

Kendiliğinden yerleşen beton tüm betonarme yapı imalatlarında kullanılabildiği gibi en sık tercih edilen kullanım alanlarını şöyle özetleyebiliriz; donatıların sık olduğu betonun yayılmasının güç olduğu alanlar, güçlendirme ve iyileştirme projelerinde, sıradışı ve geometrik kesit tasarımlarında ve vibratör kullanımının çok zor olduğu dar ve ulaşılmaz yerlerde sıkça kullanılmaktadır.

1.2.1. Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları

Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) geleneksel betona kıyasla birçok olumlu yönleri vardır. Uygulamanın hızlı olması, çok az işçilik gerektirmesi, işlenebilirliğinin rahat olması, sık donatılı yapılarda donatılar arasına rahatlıkla yayılarak kalıbın içine doldurması ve dışardan herhangi bir zorlama baskı olmadan vibrasyona gerek olmadan kendi ağırlığı ile kolaylıkla yayılması önemli avantajlarındandır (Kılınç, 2012). Vibratör kullanımının gerek kalmaması ile daha az işçiye ihtiyaç duyulur, işçilerin maruz kaldığı gürültü ve titreşim miktarın düşer, zaman konusunda tasarruf sağlanır. İşçilik kaynaklı hatalar azalır. Prefabrik üretim yapılan tesislerde üretimi kolaylaştırır. Geleneksel betona kıyasla daha geçirimsiz olması nedeniyle daha dayanıklı beton üretimini mümkün kılmıştır. Hava kabarcığı olmadan yüzeyi daha pürüzsüz beton üretilirken betonun mastarlama ihtiyacı azalır. Dizaynının düzgün yapılmasına dikkat edilmeli aksi takdirde betonun yapısında boşluklu yapılar oluşur. Üretimi sırasında ise

daha çok özen ve titizlik gerektirmektedir. Çok akıcı bir kıvamda olduğu için kullanılacak kalıba dikkat edilmesi gerekir. Özellikle ek yeri olan kalıp sistemleri kullanılacaksa betonun akmasının önüne geçmek için bir takım önlemler alınmalıdır.

1.2.2. Kendiliğinden yerleşen betonun taze haldeki özellikleri

Kendiliğinden yerleşen betonun performansı ile taze beton özellikleri arasında sıkı bir bağ vardır. Kendiliğinden yerleşme yeteneği, doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği olmak üzere üç parametre ile ifade edilebilir;

Doldurma yeteneği; betonun doldurulduğu yerden ne kadar uzağa yayılabildiği ve bu yayılma hızı (deformasyon kapasitesi) olarak ifade edilebilir. Deformasyon yapabilme ile deformasyon hızı arasında bir uyum olmalıdır. Çimento hamurunun deforme olabilmesi de önemlidir. İnce agrega, iri agrega ve katı taneler arasında sürtünme ne kadar az olursa beton o kadar iyi deforme olabilir. Betonun doldurma yeteneğinin iyi olabilmesi için katkı maddesi kullanımı ve uygun oranda su/bağlayıcı ile çimento hamurunun deformasyon yeteneği geliştirilebilir. Aynı zamanda düşük kaba agrega hacmi ve uygun tane boyutu dağılımı ile tanecikler arası sürtünme azaltılarak doldurma yeteneği artırılabilir (Kılınç, 2012).

Ayrışmaya karşı direnç;betonu oluşturan malzemelerin homojen olarak dağılmamasıdır. Normal şartlarda taze haldeyken ayrışmaya uğramayan betonlar kimi zaman sık donatılı bir yapı ile karşılaşınca ayrışmaya uğrayabilir. Ancak KYB betonunda çimento hamuru ile agregalar arasında ayrışma, kaba agregaların ayrışması, ve terleme (su ve katı ayrışması) ve hava boşluğunun düzensiz dağılması gibi durumlar göstermemelidir.Terlemenin önlenmesi için karışım içinde katı malzeme ile harmanlanmayan suyun az olması gerekir. Bu su miktarının az olabilmesi için su/ince madde oranını azaltmak gerekir. Aynı zamanda terleme viskozite arttırıcı katkıları ile de önlenir (Kılınç, 2012).

Geçiş yeteneği;iyi bir akıcılığa ve yüksek ayrışma direncine sahip bir beton sık donatılı bir yapı ile karşılaşınca kaba agregaların blokajlanması riskiyle karşı karşıyadır. Agrega en büyük dane çapı çok büyükse veya iri agrega içeriği çok yüksekse bu risk artmaktadır. Betonun geçiş yeteneğini arttırmak için kaba agrega hacmi ve en büyük dane çaplı agrega düşük olmalıdır. Agrega ayrışmasının önüne geçmek için düşük su/bağlayıcı oranı ve vizkoziteyi arttırmak gereklidir.

Genel olarak kendiliğinden yerleşen betonun tasarımı yapılırken; daha az iri agrega kullanımı, düşük su/ince oranı, süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ve gerekli ise vizkozite düzenleyici katkı kullanımı gereklidir.

1.2.3. Kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanılan deney yöntemleri

KYB'nin taze haldeyken özelliklerini belirlemek için birtakım deneyler yapılır.

1.2.3.1. Çökme yayılma deneyi

Abram's konisi ile 80x80 boyutlarında bir tabla kullanılır. Tamamen düz bir zemine yerleştirilen tabla nemlendirilerek tam merkezine koni yerleştirilir. KYB'ye dışardan herhangi bir zorlama yapmadan beton tek seferde doldurulur. Sonrasında koni dik olarak yukarı çekilir. Yayılma hareketi durduktan sonra birbirine iki dik noktadan çap ölçülür. Bu şekilde betonun doldurma kabiliyeti belirlenmeye çalışılır. İstenirse bir kronometre yardımıyla betonun 50 cm yayılması için geçen süre ölçülebilir. Şekil 1.2'de gösterilmiştir.

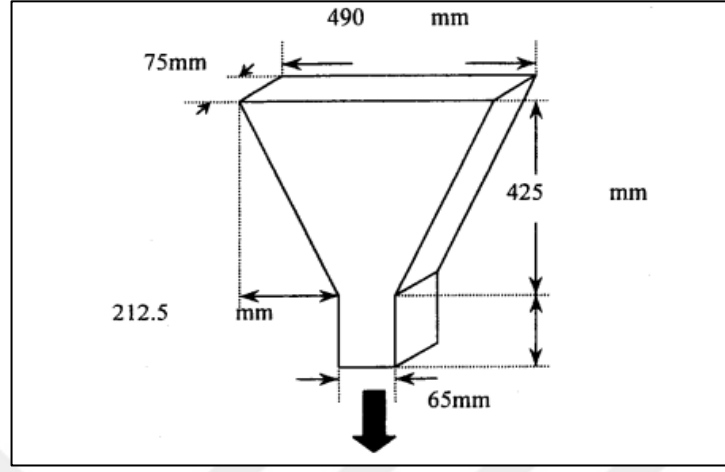


Şekil 1.2. Çökme yayılma testi deney düzeneği (Kılıncı, 2012)

1.2.3.2. V hunisi deneyi

KYB'nin dar bir alandan kendi ağırlığı ile geçiş yeteneğini belirlemek için yapılır. Gözlem yapılarak betonun vizkozite hakkında fikir edinilebilir. V şeklinde dikdörtgen kesit özel bir aparat kullanılır. Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Bu aparatının içine

doldurulduktan sonra aparatın altında bulunan kapak açılır ve tüm betonun boşalması için gerekli olan süre ölçülür.



Şekil 1.3. V-hunisi deney aparatı (Skarendahl, 2000)

1.2.3.3. L kutusu deneyi

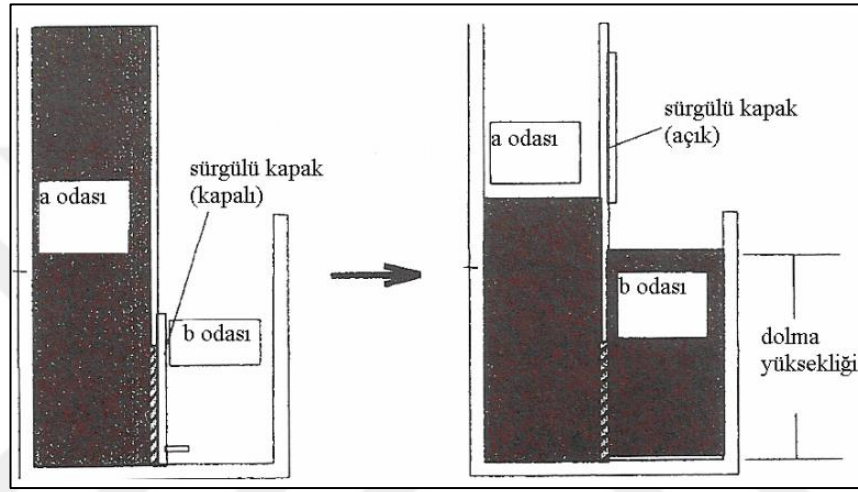
Bu deney yöntemiyle KYB'nin sık donatılı veya dar alanlarda hareketini belirlemek için yapılır. Hacmi belli olan beton bu çubuklar arasından yatay olarak hareket eder. Deney sonunda düzeyde kalan ve yatayda yayılan beton yükseklikleri $H1/H2$ oranı ölçülür. Bu oran betonun geçiş yeteneği ve blokajlama davranışı ile ilgili bilgi verir. Deney düzeneği Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. L kutusu deney aparatı

1.2.3.4. U kutusu deneyi

Betonun kendi ağırlığı ile özel bir kutu içinde yükselmesini incelenir. U şeklinde alt tarafında sürgülü bir kapak ve engel olması için çubuklar konulmuş bir kutudur. Şekil 1.5’de gösterilmiştir. KYB herhangi bir zorlama olmadan U kutusunun içine doldurulur ve bir dakika sonra kapak açılır. Betonun diğer bölmeye geçmesi beklenir. Her iki bölmedeki betonun yükseklikleri ölçülür ve fark betonun geçme yeteneğini belirler (Topçu, 2008).



Şekil 1.5. U kutusu deney aparatı (Topçu, 2008)

1.2.3.5. Doldurma kutusu deneyi

Özel şeffaf bir kutu içine doldurulan KYB’nin yükselme kapasitesi ölçülür. Aynı zamanda bu şeffaf kutunun içinde engel teşkil etmek amacıyla çubuklar bulunur. Betonun terleme ve ayrışma yapmadan bu çubuklar arasında geçmesi beklenir. Test sonunda iki ucu arasındaki yükseklik farkı ölçülür. Şekil 1.6’da deney aparatı gösterilmektedir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Ahmadi ve Shekarchi (2010), doğal zeolit doğal puzolanik malzeme olarak dünyanın bazı bölgelerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin artırılmasında zeolitin etkinliği değerlendirilmiş ve diğer puzolanlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel testler üç bölümden oluşuyordu: Birinci bölümde, doğal zeolit ve silis dumanının puzolanik reaktivitesi, termogravimetrik yöntemle incelendi. Bu durumda, sonuçlar doğal zeolitin silika dumanı kadar reaktif olmadığını, fakat iyi bir puzolanik reaktivite gösterdiğini göstermiştir. İkinci bölümde, beton karışımlarında farklı oranlarda çimento için zeolit ve silis dumanı ikame edilmiş ve çeşitli fiziksel ve dayanıklılık testleri yapılmıştır. Bu deneysel testler, çökme, basınç dayanımı, su emme, oksijen geçirgenliği, klorür difüzyonu ve betonun elektriksel direncini içermiştir. Bu sonuçlara dayanarak, zeolit katkı oranı arttıkça süper plastikleştirici ihtiyacı artmıştır. Ek olarak zeolit ilavesi ile betonun vizkositesi artmıştır. Farklı zeolit içerikli betonların performansı bazı durumlarda iyileştirilmiş ve hatta silis dumanı ikameleriyle hazırlanan betonlara kıyasla iyi ya da daha iyi olmuştur. Bütün numunelerin su emme değerleri kontrol numunesinden düşük olmakla birlikte zeolitin katkı oranının artmasıyla su emme değerleri pek bir farklılık olmamıştır. Doğal zeolit katkısı silis dumanı katkılı betonlara kıyasla su emme değerleri daha düşüktür. Yine bütün yaşlarda zeolit ilaveli betonların dayanımı kontrol numunesinden yüksektir. 90 günlük dayanım açısından bakacak olursak en uygun oran %15'tir. Son olarak, ASTM C 1260 ve ASTM C 1567'ye göre, zeolit ve uçucu külün, harcın Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) genleşmesini sınırlandırma etkisi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Harç prizmalarında yapılan genleşme testleri, zeolitin ASR'den kaynaklanan zararlı genleşmeyi önlemek için uçucu kül kadar etkili olduğunu göstermiştir.

Ikotun ve ark. (2010), bu çalışmada çimento harcı özelliklerinin iyileştirilmesi için yarı sentetik zeolit katkısının potansiyel kullanımı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, çimentonun özelliklerine etkisi ve etkinliği araştırılmamıştır. Bu çalışmada çimento

harçlarının dayanıklılığı üzerinde durulmuştur. Güney Afrika’da olan dayanıklılık endeksi yaklaşımı kullanılarak değerlendirildi. Katkı maddesi, %0, %0,4, %0,6, %0,8, %1,0 ve %2,5 oranlarında EN 196’ya göre hazırlanan 0.5 su-çimento oranının standart harçlarına eklenmiştir. Basınç dayanımı, oksijen geçirgenliği, kılcallıkla su emme ve sülfat atağına karşı direnç testleri yapıldı. Katkı maddesinin, optimum oranlarda kullanıldığında mukavemet ve işlenebilirliği artırırken dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği tespit edilmiştir. %0,4 ve %0,6 oranları arasında kullanılması durumunda testlerde optimum sonuçlar alındı.

Ikotun ve Ekolu (2010), bu çalışma, modifiye edilmiş bir zeolit katkısının betonun mukavemet ve dayanıklılık davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Ancak betondaki davranış ve performans üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. Bu araştırmada, karışımlara zeolit ve / veya %30 uçucu kül katılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. zeolit, çimento ağırlığının %0,6, %0,8 ve %1,0 oranında kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.5 olup betonun işlenebilirliği, çekme mukavemeti, basınç mukavemeti, oksijen geçirgenliğine ve gözeneklilik testlerine tabi tutulmuştur. Zeolit katkısının puzolanik etkisi ve çimentonun hidrasyon sistemi differansiyel termal analiz ve termogravimetrik analiz kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak %0,6, %1,0 gibi oranlarda kullanıldığında zeolit betonun mukavemetini arttırdığı görülmüş. Betonun geçirimsizlik özelliği, karışımdaki oranına bakılmaksızın zeolit kullanımı ile geliştirilirken, betonun geçirgenliği sadece %30 uçucu külün varlığında gelişmiştir. Uçucu kül varlığında zeolit en etkin performansta olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak zeolitli beton numunesi kontrol numunesine kıyasla hem erken hem de geç yaşta basınç dayanımında artış gözlenmiştir. 28 günlük külden sonra zeolitli beton numuneleri kontrol numunesine göre çekme mukavemetinde azalma görülürken, 180 gün sonra ise çekme mukavemetinin kontrol numunesinden de daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Zeolit katkısı uçucu kül ile kullanıldığında beton dayanımı önemli ölçüde artar. Betonda %30 uçucu kül oranı %0,6 zeolit katkısıyla kullanıldığında, kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında 180 gün sonunda basınç dayanımında %21,3 artış oldu. Sadece tek başına %0,6 zeolit katkısıyla basınç dayanımında 180 günde %7,5’lik küçük bir artış gözlemlendi. 28 günde hızlandırılmış basınç dayanımı testinde %0,6 zeolit +%30 uçucu kül, %22,7 artış gösterirken, sadece %0,6 zeolit katkısıyla test edildiğinde %12,6 olmak üzere daha düşük dayanım elde

edilmiştir. Betonun oksijen geçirgenliği sadece katkı maddesi uçucu kül ile birlikte kullanıldığında gelişti. Zeolitin sebep olduğu gözeneklilik ve emicilik sadece uçucu kül kullanımıyla azalmış. Termal analiz sonuçları, zeolit katkısının bir puzolanik malzeme olduğunu ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimine yardımcı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar uçucu kül kullanıldığında zeolit katkısının en etkili olabileceğini göstermiştir.

Uzal ve ark. (2010), puzolanik aktivitesi en yüksek olan ve en yaygın kullanılan klinoptilotin silis dumanı, uçucu kül ve zeolitik olmayan doğal puzolanlarla sık sık karşılaştırmalı olarak çalışılmıştır. Değerlendirme yapılırken malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile birlikte düşünülmüştür. Doğal zeolitin puzolanik aktivitesi birçok teste tabi tutuldu. (Elektriksel iletkenlik, basınç dayanımı, gözenek büyüklüğü dağılımı vb.). Sonuçlar klinoptilotin yüksek kireç-puzolan reaktivitesinin; silis dumanı ile kıyaslanabilir olduğunu, uçucu kül ve zeolitik olmayan doğal puzolanlardan yüksek olduğu ortaya koydu. Klinoptilotin yüksek reaktivitesi spesifik yüzey alanına ve SiO_2 içeriğine atfedilebilir. Yüksek puzolanik aktiviteye rağmen klinoptilotin düşük dayanımı kireç-ucucu kül sistemine kıyasla zeolit-kireç ürünlerinin daha büyük gözenek boyutundan kaynaklanıyor.

Uzal ve Turanlı (2012), bu çalışmada ağırlıklı olarak klinoptilolit mineralinden oluşan ağırlıkça %55 zeolitik tüf içeren çimento hamurunun mikro yapısı ve hidrasyon özellikleri araştırılmıştır. Süper plastikleştirici gereksinimi ve basınç dayanımı gelişimi belirlenmiştir. Yüksek hacimde doğal zeolit içeren çimentolar da, 28 günlük hidrasyon sonunda sertleşmiş numunelerde serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bulunmaması, portland çimento ile karşılaştırıldığında 50 nm'den daha büyük gözeneklerin daha az oranda olması, 28 gün hidrasyon sonunda zeolitin kristal yapısının tamamen ayrışmasını, puzolanik reaksiyonun kristalin bir ürünü olarak tetra kalsiyum alüminat hidratın varlığı, naftalin bazlı ürüne kıyasla melamin bazlı süper plastikleştirici ile daha fazla uyumluluk ve sadece portland çimentosu ile hazırlanan harçlarla 28 gün sonunda benzer dayanım gösterdiği gibi durumlar tespit edilmiş. Aynı zamanda yüksek oranda klinoptilolite içeren betonların portland çimentosuna kıyasla priz başı ve priz sonu süreleri daha hızlıdır. Bu durum zeolitin yüksek su emiliminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yılmaz ve ark. (2007), bu çalışmanın amacı doğada bol miktarda bulunan zeolit minerali olan klinoptilolit artan oranlarla portland çimentosuyla kullanılmasıyla üretilen harçların fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemektir. Plastisite sürelerinin klinoptilolit harmanlı çimentoların katkı oranlarına bağlı olarak uzadığı ve blaine değerlerine göre erken dayanımların değiştiği gözlemlendi. Nihai dayanımın reaktif SiO₂ miktarına ve klinoptilolit iyon değişim kapasitesine orantılı olarak geliştiği belirlenmiştir. Klinoptilolit reaktif SiO₂ içeriği ve iyon değişimi özellikleri bağlı olup puzolan olarak kullanılabilirliği tespit edildi. Klinoptilolit karışımı, çimentoların özgül ağırlığını azaltır. Klinoptilolit harmanlı çimentoların su talebi artar. 7. güne kadar zeolit miktarı dayanımı kontrol numunesine kıyasla düşürürken 28. günde tüm zeolit katkılı betonların dayanımı kontrol numunesinden yüksektir. 28. gün sonuçlarına göre %20 oranına kadar zeolit kullanımı dayanımı artırırken %40 kullanımında dayanım düşmüştür.

Jo ve ark. (2012), sertleşmiş zeolit harç numunelerinin alkali ile aktive edilen reaksiyonlar ile hazırlanması için su yerine (H₂O) bir alkali aktivatör (NaOH) kullanarak mukavemet özelliklerini ve optimal karışım oranlarını ele alındı. Bu çalışmanın sonucunda zeolit içeren çimentoların dayanımı normal portland çimentosu ile hazırlananlara kıyasla iyi bir dayanım elde edildi. Zeolit çimento harcının basınç dayanımı, karışım suyu, alkali aktivatör ve agrega miktarına bağlı olarak değişir. Farklı oranlarda meydana gelen basınç dayanımındaki değişiklikler sayesinde, en yüksek mukavemete sahip karışım oranlarını, 423 MPa'yı 180 gr çimento, 171 gr NaOH (%50) ve 565 g agregadan oluşan olarak tanımlandı. 7 günlük basınç dayanımı 28 güne %90 eşdeğerdir, bu da erken yaşlarda betonun çarpıcı biçimde geliştiği anlamına gelir. Alternatif bir yapı malzemesi olarak kullanılabilen belirli özelliklere sahip bir malzeme olduğunu belirtilmiştir. Bununla birlikte, inşaat sektöründeki uygulamalar için ek bir çalışma gereklidir.

Sedlmajer ve ark. (2015), beton üretiminde çimento miktarını azaltmak için çeşitli olanaklar vardır. Doğal zeolit, Portland çimentosunu kısmen ikame edebilen hammaddelerden biridir. Beton üretiminde kullanılan Portland çimentosu miktarının azaltılması hem ekonomik hem de ekolojik faydalar getirmektedir. Bu çalışmanın amacı Portland çimentosunu yerine %0, %7, %15, %22, %30 ikame edilen aktif bir zeolit içeren betonun özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu çalışma zeolit içeren

betonların mekanik özellikleri ve donma direnci hakkında bilgi vermeyi amaçlamıştır. Zeolit içeren numuneler zeolit içermeyen kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Zeolit diğer beton bileşenleriyle tamamen uyumludur. Zeolitin yapısı göz önünde bulundurulduğunda karışımda daha büyük bir su muhtevasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek oranda zeolit kullanımının önünde en büyük engel gerekli duyulan su miktarıdır. 90 ve 360 gün kürlenme sonrasında basınç dayanım değerleri sadece çimento %22'ye varan oranlarda ile hazırlanan numunelerle karşılaştırılabilir basınç dayanımlarına ulaştı. Zeolit betonun mikro yapısını ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirebildiği için aktif bir katkı olarak kullanılması kabul edilebilir. Donma direnci bütün numunelerde standarttaki en yüksek limitin altında olsa da, en yüksek direnci zeolitsiz numuneler gösterirken zeolit miktarının artmasıyla direnç düşmüştür. Bu nedenle ince öğütülmüş doğal zeolitin beton üretiminde portland çimentosu yerine kısmen kullanılabilirliği mümkün olan bir hammadde olarak görülmektedir.

Feng ve ark. (1990), zeolitik mineral katkısı betonda normal portland çimentosunun ağırlıkça %10'luk yer değiştirmesi ve uygun bir miktarda süper plastikleştirici ile kullanıldığında, yaklaşık 80 MPa'lık basınç dayanımlı yüksek mukavemetli beton ve yaklaşık 180 mm'lik bir çökme elde edilebilir. Bu dayanım, normal portland çimentosu kullanılması durumunda elde edilen betonların basınç dayanımlarından %10-%15 civarında daha yüksek olmaktadır. Ayrıca betonun ayrışma gibi istenmeyen durumlar ile karşılaşmayıp betonun pompalanabilirliğinde memnun edici sonuçlar vermiştir. Zeolitik mineral katkısı sadece normal portland çimentosu için değil aynı zamanda cüruf portland çimentosu için de uygundur. Zeolitik mineral katkısının güçlendirici etkisi silika dumanına benzer. Ama maliyet normal portland çimentosunun sadece üçte ikisi kadardır. Böylece, zeolitik mineral katkısı betonun belirli bir miktarını betonda yer değiştirmek için kullanıldığında, bu şekilde üretilen betonun maliyeti, saf çimento ile karşılık gelen betonunkinden %3 ila %5 daha ucuz olacaktır. Zeolitik mineral katkısı, mikro gözeneklerin miktarını artırabilir ($d < 625 \text{ \AA}$) ve çimento hamurundaki zararlı büyük gözeneklerin miktarını ($d > 938 \text{ \AA}$) azaltabilir. Bu nedenle betonun mukavemeti arttırılmakta ve diğer özellikleri de iyileştirilmektedir.

Gerengi ve ark. (2015), bu çalışma donatının paslanarak mukavemetini yitirmesi olarak bilinen korozyonun bir nebze önüne geçmeyi amaçlamıştır. Bu sebepten üç tip

beton numunesi hazırlandı. Katkı kullanmadan hazırlanan kontrol numunesi, %20 zeolit katkı ve %20 diatomit katkı numunelerin içindeki nervürlü donatının sanayide en sık karşılaşılan 1 M HCl asit içindeki korozyonu her 10 günde bir EIS yöntemi kullanılarak 240 gün süreyle hesaplanmıştır. Ölçümler sonucunda 1 M HCl asit ortamında zeolit katkı betonlar kontrol numunesi ve diatomit katkı betonla kıyasla korozyona daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Zeolit ve diatomit katkısı betonun gözenekliliğini iyileştirmesi nedeniyle korozyonun önüne geçtiği düşünülmektedir. 1 M HCl ortamında korozyon direncinin yüksek olması istenen betonların zeolit katkı olması daha uygun olduğu düşünülmektedir.

Najimi ve ark. (2012), beton endüstrisinin Portland çimentosu üretimi sırasında çok miktardaki CO₂ emisyonundan sorumlu olduğu bilinmektedir. Bu durumu iyileştirmek adına çimentoya ek malzeme olarak doğal zeolit uygulaması incelenmiştir. %15 ve %30 oranında çimento doğal zeolit ile ikame edilerek, doğal zeolit ikamesi olmayan betonla bazı mekanik ve dayanım özellikleri karşılaştırılmıştır. Doğal zeolit uygulamasının su penetrasyonu, klorür iyonu penetrasyonu, korozyon hızı ve betonun büzülmesi üzerinde önemli etkisini ortaya çıkardı. Bununla birlikte asit ortamında tatmin edici bir performans gözlenmedi. Pratik açıdan bakıldığında %15 oranında zeolit uygulaması betonun dayanımını ve durabilitesini geliştirmek adına uygun bir oran olarak bulunmuştur. Kullanılan doğal zeolit kaba ve gözenekli yapısı nedeniyle betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmış, istenen işlenebilirliği korumak için su azaltıcı katkıyı gerekli kılmıştır. Zeolit katkı betonların dayanımı kontrol betonundan her yaşta daha düşüktür. Genel olarak çimento yerine ikame doğal zeolit kullanımı betonun durabilite özelliklerini geliştirdi. Daha fazla doğal zeolit uygulaması durabilite performansında iyileştirme gösterse de pratik bakış açısıyla %15 oranında kullanımı ümit vericidir. %15 oranındaki ikame uygun basınç dayanımı, su penetrasyonuna, klorür iyon penetrasyonuna, korozyon hızı ve kuruma büzülmesi gösterip çok fazla süper akışkanlaştırıcı gerek duymamıştır.

Perraki ve ark. (2003), bu çalışmada Pentafos bölgesinden, gelen zeolit çimento hidratasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney kısmı üç aşamadan oluşuyordu. İlk aşamada zeolit mineralojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ek olarak zeolit puzolanik reaktivitesi Chapelle testine göre değerlendirildi. İkinci aşamada Portland çimentosuna kütlece %0, %10, %20, %30 oranlarında ince yapılı zeolit

ikamesi yapıldı. Numuneler 1, 2, 7 ve 28 gün boyunca 20 ° C’de suda küre tabii tutulmuş. Bir takım yöntemler kullanılarak hidrasyon oranı ve ürünleri incelenmiştir. Sonuç olarak, incelenen zeolitin esas olarak “heulandite tip II” den oluştuğu ve iyi bir puzolanik reaktivite gösterdiği tespit edildi (Chapelle testine göre zeolitin gramı başına 0.555 g Ca (OH)₂). Çimentoda zeolitin katılması, çimento hidratlanması ve çimento benzeri hidratlı ürünlerin oluşumu sırasında oluşan Ca (OH)₂ ‘nin tüketimine katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Janotka ve ark. (2003), ağırlıkça %35 oranında zeolit içeren çimentonun asidik ve sülfat saldırısına karşı direnci, katkısız Portland çimentosu ile karşılaştırılmıştır. Harç numuneleri %0,5 ve %1,0 HCl çözeltisi, %5 Na₂SO₄ çözeltisi içinde tutuldu ve 365 ve 720 günler için referans suda bir dizi fiziksel-mekanik ve kimyasal teknik kullanılarak test edildi. Zeolitik çimentolar içeren harçların ağırlıkça %15, %25, %35 ve %50 zeolit katkısı çeliği korozyona karşı koruduğu belirlendi. Her yaş ve her orandaki katkı oranı basınç dayanımını kontrol numunesine kıyasla düşürmüştür. Zeolitik çimento ile sülfat dayanımı geliştirilmiş harçta zeolit, Portland çimentosuna kıyasla çimento harmanındaki C₃A’nın azalmasına neden olduğu, çimento hamuruna SO₃ bağlanmasında bir azalma ve reaksiyona girebilen CaO içeren hidrasyon ürünlerinin miktarının azalmasını sağlamıştır. Böylece hacimsel reaksiyon ürünleri oluşturan bir sülfat çözeltisinde ve bunun sonucunda genleşme, çatlak yayılımı ve yapısal parçalanmanın önüne geçilmiştir. Bu zeolitik çimentonun, birçok uygulamada Portland çimentosunu asidik ve sülfat atağına karşı daha yüksek direnç avantajıyla değiştirebileceğini doğrulamaktadır.

Dayı ve ark. (2013), bu çalışmada Portland kompoze çimento üretiminde atık cam, uçucu kül ve zeolit malzemelerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Portland çimentosu klinkeri ile birlikte atık cam, uçucu kül ve zeolit çimentonun ağırlığının %5 ve %10 oranlarında üçlü katkılı çimentolar elde etmek amaçlanmıştır. Öğütme süresi tüm üretilen çimentolarda sabit tutulmuştur. Üretilen kompoze çimentoların fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları CEM I Portland çimentosu ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak zeolit ve uçucu külün düşük oranda amorf, cam’ın ise tamamen amorf olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan zeolit, uçucu kül ve cam’in yüksek puzolanik özellikli olduğu belirlenmiş. Portland kompoze çimentolar kimyasal kompozisyon bakımından standartlara

uygundur. Portland kompoze çimentolarda standart kıvam suyu zeolit artışıyla artmaktadır. Portland kompoze çimentoların hem priz başlangıcı hem de priz sonu süreleri standartlara uygundur. Kullanılan puzolanların yoğunluklarının düşük olması nedeniyle Portland kompoze çimentoların yoğunluk değerleri düşmüştür. Cam ve zeolit karışımındaki artış oranına paralel çimentoların öğütülebilirliği kolaylaşmıştır. Ucucu kül ve zeolit beraber ikame edildiği çimentolarda uçucu külün toz olarak karışıma girmesiyle zeolit çimentonun özgül yüzeyinin artmasına sebep olmuştur. Portland kompoze çimentoların arasında bütün yaşlarda en yüksek eğilme değerinde basınç ve çekme dayanımları atık cam zeolit ve uçucu külün %5 olduğu oranlarda yakalandı. Atık cam, ucucu kül ve zeolit %5 ve %10 oranında katılım halinde Portland kompoze çimentolarında katkı malzemesi olarak kullanılabilir.

Sevim ve Okumuş (2011), bu çalışmada, silis dumanı ve doğal zeolit dayanım özelliklerine ve betonun geçirimsizliğine etkisi belirlenmeye çalışıldı. Doğal zeolit Manisa-Gördes yöresinden kullanılmıştır. Su bağlayıcı oranı sabit olup 0,4 alınmıştır. Çimento yerine ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranında zeolit katkı ve %10, %20 ve %30 katkıli numunelere %8 oranında silis dumanı eklenerek, toplamda 7 karışım elde edilmiştir. Bu 7 karışım yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı, basınçlı su geçirgenlikleri, su emmeleri ve kapilarite katsayıları testlerine 28. gün tabi tutuldu. Deney sonuçları %20 oranında doğal zeolit ikame edilmesi durumunda kullanılması uygun görülmüştür. Numunelerin %10 ve %20 katkı oranına sahip olanları kontrol numunesine göre yüksek dayanım değeri ve düşük su geçirgenliğine sahiptir. 28. günde en yüksek basınç dayanımına %8 silis dumanı ve %10 zeolit içeren karışımlar ulaşmışlardır. Zeolitli betonların arasında basınç dayanım testleri incelendiğinde en yüksek dayanımı %20 oranında karışımda görüldü. Silis dumanının ise basınç dayanıma olumlu etkisi %10 zeolit katkısı durumunda görülmüştür. %10 oranındaki numunenin yarma dayanımı kontrol numunesinden daha fazla çıkmıştır. Bunun yanında numunelerden zeolit ve silis dumanı kullanılanlarda yalnızca %10 zeolit katkıli numuneye göre yarma dayanımını azaltmıştır. %20 oranındaki zeolit ilaveli numuneler kontrol numuneye yakın yarma dayanımlarına ulaşmış olsa da yarma dayanımını bir miktar düşmüştür. Su işleme derinlik test sonuçlarına göre %20 ve %10 zeolit ilaveli betonlar kontrol numuneye göre su işleme derinliklerini düşürmüş böylece su geçirgenliği de düşmüştür. Bütün silis dumanı ve zeolit ikameli numuneler kontrol

numunesine kıyasla daha düşük su emme değerine sahiptir. Zeolit katkısının artmasıyla su emme değeri artmıştır. En düşük su emme değeri %8 silis dumanı ve %20 zeolit katkılı beton gösterdi. Silis dumanı katkılı veya katkısız %20 oranına kadar su emme değeri düşürken, %30 zeolit katkısında su emme artarken yine de zeolit çimentodan daha ince yapılı olması nedeniyle betonun mikro yapısını düzeltmiş. Yine de silis dumanı katkılı katkısız tüm zeolit katkılı betonların su emme değeri kontrol numunesinden düşüktür. Kapiler su emme katsayıları belirlenmeye çalışıldığında bütün ilaveli betonların kontrol numuneden daha yüksek kapiler geçirgenlik değeri vermiştir. Bütün bunların ışığında zeolit %10 veya %20 oranında kullanılmasını uygun görülmüştür.

Bilim (2011), çalışmada çimento yerine ikame malzemesi olarak silis dumanı+ zeolit kullanılmış. Bu çimento harçlarının durabilite, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış. Kum ve su miktarları sabit olup silis dumanı %10 oranında sabitlenip zeolit ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında ikamesi yapıldı. Karışımların priz süresi, hacim genleşmesi, su ihtiyacı, eğilme dayanımı, su emme, porozite, aşınma direnci, karbonatlaşma derinliği ve kuru birim ağırlık değerleri ölçülmüş. Kontrol numunenin %8,42 iken %20'e kadar zeolit ilavesi su emme değerini kontrol numunesine göre düşürürken %30 oranında zeolit ilavesinin su emme değeri %9,88 olarak ölçülmüştür. Zeolit ilavesi kuru birim ağırlık değerini her oranda düşürürken, zeolit ilavesi arttıkça kuru birim ağırlık değeri düşmüştür. 28,56 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı her yaşta kontrol numunesinden yüksek olmakla birlikte %10 oranına kadar katkı dayanımı artarken sonra düşmeye başlamıştır. Karışımındaki zeolit oranının artmasıyla su ihtiyacı artmış. Zeolit ve silis dumanı ikamesi yapılan harçların özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir.

Yıldız ve ark. (2010), yüksek silis içeriğine sahip pomza ve zeolit mineralleri yüksek dayanımlı beton (YDB) dizaynında puzolan olarak kullanılmasının elektrokinetik (zeta potansiyel), moleküler, mineralojik ve simültane termal yönden uyumu çalışılmıştır. Bu nedenle birtakım analizler yapılmıştır. Tasarımda çimentoya ikame olmak 4 tip karışım hazırlandı. (0P15Z “%0 pomza+%15 zeolit”, 5P10Z “%5 pomza+%10 zeolit”, 10P5Z “%10 pomza+%5 zeolit” ve 15P0Z” %15 pomza+%0 zeolit”). Yüksek dayanımlı betonlar üzerinde basınç dayanımı deneyleri ve taze beton deneyleri yapılmıştır. Pomzanın düzensiz yani amorf yapıya sahip olduğu tespit edildi.

Malzemenin yapısındaki bulunan su içeriği önemli bir faktördür. Bu anlamda yapılan testlerde çimento ve zeolitin yapısındaki su iyonları ve moleküllerin birbirlerine yakın dalga sayılarında olduğu anlaşılmıştır. Numunelerin taze beton özelliklerine incelendiğinde zeolit katkı oranı arttıkça buna paralel olarak taze betonda çökme değerinin arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin arttığı belirlenmiştir. Bu pozitif etkinin zeolitin yapısındaki sudan kaynaklandığı sanılıyor. Bütün karışımlarda herhangi bir ayrışma gözlenmedi. Basınç dayanımı sonuçları mineral katkının cinsi ve katkı oranına bağlı olduğu ve zeolit oranının artışına göre sırayla %11,11, %16,40 ve %5,54 artış olduğu, %15 Pomza +%0 zeolit numunesinde en düşük, %0 Pomza + %15 Zeolit numunesinde en yüksek dayanımı sahip olduğu belirlenmiştir. Hem yapay hem de doğal puzolanların çimento ile üretimine geçilmeden önce mineralojik ve moleküler analizleri yapılmalı, aynı zamanda çimento ile elektrokinetik etkileşimin olup olmadığına bakılması gerekmektedir. Ülkemizde pomza ve zeolit rezervleri göz önüne alınırsa puzolanlara (ucucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, vb.) alternatif olarak beton sektöründe kullanılabilirliği uygun görülmüştür.

Yıldız (2012), bu çalışmada NaCl çevresel etkisi altında, beton yol kaplamalarında kullanılabilmesi için zeolit ve pomza katkılı yüksek dayanımlı betonun aşınma direnci belirlenmeye çalışılmıştır. Bazı fiziksel, kimyasal ve mekanik analizler gerçekleştirildi. %0P+%15Z (0P15Z), %5P+%10Z (5P10Z), %10P+%5Z (10P5Z) ve %15P+%0Z (15P0Z) olmak üzere dört tip yüksek dayanımlı beton elde edilmiş. Bu numunelerde taze beton deneyleri, aşınma direnci ve basınç dayanımı deneyleri (NaCl çevresel etkisi altında) yapılmıştır. Taze beton deneyleri sonuçlarına bakıldığında işlenebilirlik kavramı zeolit ikamesine bağlı olarak artmış. Bu değerlere dayanarak tasarlanan betonların rijit üstyapı kaplamasında kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Bütün numunelerde kohezyonun çok iyi olduğu ve herhangi bir ayrışma olmadığı gözlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımına bakıldığında %15P + %0Z betonunda en düşük %0P + %15Z betonunda en yüksek değere sahip olduğu gözlenmiştir. NaCl çevresel etkisindeki betonların hepsinde de üst yüzeyinde tuz kristalleri oluşmuş. Ancak bu kristaller betonun içine nüfus etmemiş sadece yüzeyde kalmıştır. Aşınma dayanımı değerleri ASTM C944-99 'daki değerden düşük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla zeolit ve pomza katkısı yapılan betonların rijit üst yapı kaplamalarında

değerlendirilebileceği belirtilmiş. Betonun zeolit ve pomza gibi çevreci malzemelerle geliştirilmesi betonun çevreye duyarlı bir malzeme olma özelliğini arttıracaktır.

Şahmaran ve ark. (2008), bu çalışmada doğal zeolitin enjeksiyon karışımları üzerinde hem reolojik hem de işlenebilirlik özellikleri üzerine etkisi çalışılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek adına ticari olarak temin edilebilen bir viskozite modifiye edici katkı (VMA) ile karışımlar hazırlanmış. Deneysel sonuçlar doğal zeolit ikamesinin harcın hem reolojik hem de işlenebilirlik özelliklerini değiştirdiğini göstermiştir. Doğal zeolit ilavesi ile hazırlanan enjeksiyonların bir yalancı plastik davranışa sahip olduğu görülmüş. Zeolit ve viskozite modifiye edici katkı (VMA) miktarının artmasıyla plastik viskozite, görünen viskozite ve akma gerilmesi artar. Sabit oranda kullanılan süper plastikleştirici (SP) harçların akma gerilmesini ve plastik viskozitesini düşürmek için kullanılabilir. Süper plastikleştiricinin eklenmesi genellikle viskozite modifiye edici katkı (VMA) ile karşılaştırıldığında doğal zeolit ile karışımların reolojisi üzerinde daha önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, doğal zeolit süper plastikleştirici (SP) ile birleştirildiğinde enjeksiyonlarda başarıyla kullanılabilir. Süper plastikleştirici (SP) ve viskozite modifiye edici katkı (VMA) gibi kimyasal katkıların sadece kimyasal katkı enjeksiyonların priz süresi üzerinde olumsuz etki gösterir. Diğer taraftan doğal zeolit enjeksiyon karışımında kullanılması priz süresini azaltır. Ama doğal zeolit ile hazırlanan enjeksiyonların süper plastikleştirici (SP) katkısı priz süresine etkilemez.

Aruntaş ve Beycioğlu (2014), farklı oranlarda zeolit ilavesinin çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Zeolit ağırlıkça %5,%10,%15 ve %20 oranlarında çimento yerine ilave edilmiş. Su ve kum ve miktarları tüm karışımlarda aynı alındı. Elde edilen numunelerin 7,28 ve 90 günlük kür sonunda eğilme ve basınç testleri sonucunda fiziksel özellikleri değerlendirilmiş. Tüm karışımlarda sonuçlara göre priz başı süresi değerlerinin standartta alt sınır ≥ 60 dk olan değerini sağladığı tespit edildi. Eğilme testi sonuçlarına bakıldığında bir tek 90 günlük numunelerde ve %5 ilave oranında eğilme dayanımında artış görülürken bu orandan yüksek tüm katkı oranlarında eğilme dayanımı değerlerinde düşüş görülmüştür. %5 ikame oranının üstündeki bütün ikame oranlarında basınç dayanımı değeri düşmüştür. 28 günlük kür sonrasında basınç dayanımı ise %10 oranına kadar TS EN 197-1'deki en düşük dayanım değerini karşılamaktadır. Bütün bu

değerlendirmeler sonucunda %10 oranında zeolit ikame edilmesi durumunda kullanılabilirliği uygun görülmüştür.

Taban ve Şimşek (2009), Portland kompoze çimento üretiminde ilave edilen tüfler tras olarak bilinir. Zeolitik tüfler; doğal, gözenekli zeolit mineral içeren ve volkanik tüflerdir. İyon değiştirme kabiliyeti zeolit minerallerinin en önemli özelliğidir. Betonun geçirimsizliği ile birlikte birçok sorun baş gösterir. Beton ne kadar az geçirimsiz ise o kadar deniz suyu ve birçok etkene karşı daha iyi performans göstermesi mümkün olur. Bu nedenle ilk adımda kayaktan alınan zeolitik tüf (ZT) ve CEM 1 42,5 R çimentosuna ilave edilebilmesi için yalnız öğütülmüştür. Zeolitik tüfün tras gibi kullanılabilirliği tespit edilmeye çalışılmış, mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri çalışılmıştır. TS 25 (Tras) standartlarına uygunluğuna bakılmıştır. Bir sonraki adımda ise %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında zeolitik tüf çimento yerine ilave edilmiştir. 40x40x160mm boyutunda harç prizmaları ve çimento hamuru yapımında karıştırma ve olgunlaştırma suyu olarak deniz suyu ve içme suyu iki değişik biçimde kullanıldı. Birinci grubun karıştırma ve olgunlaşma suyu olarak içme suyu kullanılırken, ikinci grubun numuneleri karışım için deniz suyu olgunlaşma için ise içme suyu kullanılarak hazırlandı. Deniz suyunun karışım hazırlanırken kullanılması ve zeolitik tüfün çimento içerisine ilave edilme oranının hacim genişlemesine, priz süresine ve harç prizmalarının 7, 28, 90 günlük basınç ve eğilme dayanımlarına etkileri teste tabi tutuldu. Sonuç olarak zeolitik tüf miktarı arttıkça kıvam için gereken su miktarı artmış, zeolitin özgül yüzeyinin standart çimento değerinden fazla olması boşlukların azalmasını sağlamış ve çimento harcı basınç ve eğilme dayanım değerlerindeki en iyi artışı %10 oranında ikame edilmesiyle yakalamıştır.

Bideci ve ark. (2013), bu çalışmada çimento yapımında daha az enerji harcanması ve bu yolla çevrenin korunması için birtakım çalışmalar yapıldı. Klinker miktarını düşürüp yerine puzolanik katkı malzemelerinin yer alması ile çimento yapımı esnasında salınan CO₂ gazının miktarı düşürülebilmekte ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Portland çimentosuna %0, %5, %10, %15 ve %20 miktarlarında zeolit eklenmiş ve etkisi incelenmiştir. Kimyasal ve fiziksel analizler yapılmış. 2,7 ve 28 günlük dayanımları ve SEM görüntüleri incelenmiş. Zeolit katkısıyla çimentonun özgül ağırlıkları düşmüş, özgül yüzeyi artmıştır. Katkı oranı arttıkça su ihtiyacı artmış. Zeolit ilaveli çimentoların priz süreleri kontrol numunesine kıyasla katkı oranına ve su

miktarı artışına doğrusal olarak artmıştır. 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarıan göre her yaştaki zeoli ilavesi dayanımı düşürürken, 28 günlük her orandaki zeolit katkıli betonların dayanımı kontrol numunesinden yüksek olmakla birlikte en yüksekği %15 oranındaki beton göstermiştir. CEM 1 42,5 R çimentosuyla kıyaslandığında optimun zeolit ilave oranının %10 olduğu sonucu varılmıştır.

Oymael (2010), puzolanlar, kendiliğinden çimentolu olmayan mineral bazlı malzemelerdir, fakat kireç ve çimento ile birleştiğinde ve su ile reaksiyona girdiklerinde çimentolu özellikler kazanırlar. Puzolanik çimentolarla yapılan betonda performansı arttırmak için çalışmalar hızla ilerlemektedir. Bu deneysel çalışma da, 40x40x160 mm'lik çimentolu numuneler suda kürlenmiş, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını, XRD ve SEM görüntülerini incelemek için MgSO₄ çözeltisinde tutulmuştur. Suda ve MgSO₄ çözeltisinde kürlenmiş örneklerde kimyasal ve fiziksel değişikliklerin incelenmesi sonucunda, %15 zeolit ile karıştırılmış ve süper plastikleştiriciler içeren örneklerin MgSO₄ solüsyonunda kürlenmiş örneklerden biraz daha yüksek bir basınç dayanımı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nokta, yüksek puzolanik aktiviteye ve %15'lik karışım oranının MgSO₄ çözeltisine karşı dirençli zeolit karışımli numuneler oluşturduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle zeolit katkıli çimentoların korozyonu önlediği, betonun geçirgenliğini azalttığı ve sülfat ortamlarına karşı direnci arttırdığı iddia edilebilir.

Koçak ve ark. (2013), bu çalışmada doğal zeolit içeren çimentoların çeşitli özellikleri ve hidrasyon mekanizmaları incelenmiştir. İlk aşamada zeolit ve çimento fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler karakterizasyonu gerçekleştirildi. İkinci aşamada, ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 zeolit içeren harmanlanmış çimentoların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Son olarak, 28 gün süreyle X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çimentonun hidrasyon oranı ve ürünleri incelenmiştir. Çimentoların özgül ağırlığı, zeolit karışım oranlarına bağlı olarak azalır. Zeolit karışımli çimento harçlarının su ihtiyacı zeolit ikame oranı ile artmıştır. Zeolit içeren çimentoların başlangıç ve son priz süreleri, neredeyse saf çimentonun priz sürelerine benzer. Tüm çimento numunelerinin hacim genleşme değerleri, TS EN 196-3 tarafından sunulan minimum değerden daha düşük olan, 10 mm'den daha düşük olduğu görülmüştür. Zeolit, Portland çimentosunun hidrasyonu ve oluşan çimento

hidratlı ürünler gibi oluşumu sırasında oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimine katkıda bulunan bir puzolanik malzemedir. Zeolit eklenmesi ilk günlerde eğilme ve basınç dayanımı gelişimini geciktirir. Her yaşta ve her orandaki zeolit katkısı kontrol numuneye kıyasla dayanımı daha düşüktür. Ancak, 56 gün sonra, CEM II 42.5 R'ye dayanan çimentolar %5 ve %10 katkı oranındaki betonların dayanımı kontrol numunesinin dayanım kapasitesinin %88 ila %99'unu ulaştı.

Koçak ve Savaş (2015), bu çalışmada MgSO_4 etkisi altındaki zeolit davranışı araştırılmıştır. Kontrol numunesi, çimento yerine %10 ve %20 oranlarında zeolit ikamesi yapılarak 3 tip numune elde edilmiştir. Toplam 54 tane $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarında küp numune üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde su emme, ultrases geçiş hızı, yarmada çekme dayanımı, birim ağırlık, basınç dayanımı ve görünür boşluk oranı deneyleri yapılmıştır. Üç tip beton türü üzerinde 28 güne kadar 23 ± 2 °C suda, sonrasında MgSO_4 ve 56. ve 90. günde sertleşmiş beton deneyleri yapıldı. Deney sonuçlarına göre zeolit ikamesinin betonun basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu görülmüştür. Zeolit puzolanik özellikler açısından uygun olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük su emme sonuçlarına göre zeolit ilavesi ile su emme değeri artmıştır. En uygun %10 oranında zeolit kullanılmasına ve bu oran ile üretilen 90 günlük beton numunelerinde yapılan bütün testlerin kontrol numunesine göre daha iyi olduğu, zengin doğal kaynaklarından olan zeolit kullanılabilirliği uygun görülmüştür.

Sarıkaya ve ark. (2009), zeolit, doğal ve yapay olmak üzere yüksek su emme özelliğine sahip atomik düzeyde mikro gözenekli kristal yapılı, alümina silikat içeren geniş yüzeyli bir mineraldir. Gözenekli oluşu nedeniyle zeolit hafif betonlarda agrega gibi yer alabilir. Bu çalışmada zeolit kullanılarak elde edilen betonların pratik olarak önceden elastisite modül değerlerini tahmin edebilmek için birtakım çalışmalar yapıldı. Isparta (Atabey) normal agregası ile Manisa-Gördes'ten getirilen zeolit agregası farklı oranlarda karıştırılarak katkılı ve katkısız olmak üzere beton numuneleri elde edilmiş. Slump, ultrases hızı, su emme, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, elastisite ve schmidt yüzey sertliği deneyleri yapılmıştır. Bu veriler doğrultusunda elastisite modül değerlerini tespit edilmiş ve deneysel sonuçlara göre eşitsizlikler sunulmuştur. Sonuçlar doğrultusunda zeolit katkılı betonların elastisite

modül değerleri mekanik ve fiziksel özelliklerden yola çıkarak tahmin edilebileceği görölmüştür.

Gökçe ve ark. (2010), bu çalışmada amaçlanan, perlit, kireçtaşı ve andezit kayaçlarından elde edilen kırmataş agregaların, karışımlarda değişik oranlarda zeolit tufün çimento yerine ikame edilmesi durumunda alkali-silika reaksiyonuna ilişkin özellikleri tespit etmektir. Numuneler üzerinde alkali silika reaksiyonunu tespit etmek için hızlandırılmış harç çubuk deneyleri (ASTM C 1260'a göre) yapıldı. Zeolitik tuf çimentoya (CEM I 42.5 R tipi) %0-%10-%20-%30-%40 oranlarında katılmış ve agrega türleri üzerinde alkali silika reaksiyonun etkinliği tespit etmek için 45 tane harç çubuğu üretilmiştir. 3,7,14,28,42 ve 56 günlük numunelerin boy değişim miktarları hızlandırılmış harç çubuk metoduna göre ölçölmüştür. Kontrol için hazırlanan karışımlarda 14 günlükken andezit %0,101 oranıyla kritik seviyede, perlit %0,570 potansiyel zararlı seviyede ve kireçtaşında %0,061 oranında zararsız düzeyde boy değişimi gerçekteşmiştir. Yüksek düzeyde boy değişimi gösteren andezit %20-%30 ve %40 ve perlitte %30 ve %40 zeolitik tuf ilavesi ile boy değişimleri kontrol edilebilmiştir. Boy değişim miktarı tüm numunelerde zeolitik tuf katkısı ikamesi arttıkça azalmaktadır. Sonuç olarak reaktif agregaların alkali-silika reaksiyonunu önlemede zeolitik tuf ikamesinin etkili olduğu anlaşılmıştır.

Kılınçarslan (2008), zeolit yüksek su emme özelliğine sahip, mikro gözenekli kristal yapılı ve geniş yüzeye sahip hafif bir malzemedir. Betonun kimyasal bileşimlerini zeolitlerin iyi yönde etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmadaki zeolit Manisa-Gördes'ten elde edilmiş ve çimento yerine ağırlıkça ikame edilerek numuneler üretilmiştir. Üretilen betonlarda iri ve ince agrega miktarı ve su sabit tutularak çimento yerine %0, %5, %10, %15 oranlarında zeolit ikamesi yapılmıştır. Bu betonların basınç dayanımları, yoğunlukları ve termal iletkenlik katsayıları tespit edilmiş. Kontrol numuneleriyle zeolit katkılı betonlara arasında 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızı değerleri arasında önemli bir farklılık görölmemiştir. Zeolit miktarı arttıkça numunelerin birim ağırlık ve beraberinde ısıl iletkenlik katsayılarında bir düşüş gözlemlenmiş. Basınç dayanımı, ısıl iletkenlik katsayısı, ultrases geçiş hızı ve birim ağırlık arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Isıl iletkenlik katsayıları ve ultrases geçiş hızı arasında ters bir ilişki görölmüş. Sonuç olarak zeolit ilavesi

betonlarda ısı iletkenlik katsayısı ve birim ağırlık değerlerinde azalmaya sebep olduğundan ısı yalıtımına olumlu etki gösterdiği tespit edilmiştir.

Narasimhulu ve ark. (2014), zeolit kalsinasyon yoluyla betonda mineral katkı olarak yararlanılabilen doğal bir puzolanik malzemedir. Bu çalışmada doğal zeolit ve farklı durumlarda kalsine edilmiş aynı zeolitin fizikokimyasal özellikleri analiz edilmiş. Puzolanik reaktivite ve spesifik yüzey alanı kalsinasyonun 8 dakika boyunca 800 ° C’de yapılmasıyla elde edildi. Zeolit katkılı betonların su ve süper akışkanlaştırıcı ihtiyacının olduğu da belirtildi. Zeolit katkılı harçlar ve betonlarda özellikle kalsine edilmiş zeolitle hazırlananlar mukavemet ve dayanıklılık bakımından iyi bir performans gösterdiği belirtildi, uçucu kül katkılı beton ve normal betonla kıyasla geçirgenlik ve korozyon özelliklerinin de daha iyi olduğu söylenebilir. Büzülme açısından normal zeolitin kalsine edilmiş zeolitten ve uçucu külden daha iyi olduğu düşünülüyor. Genel olarak, sonuçlar, kalsine zeolitin, yüksek performanslı beton üretiminde, akışkanlık özellikleri haricinde, uçucu kül ile karşılaştırılabilir özelliklere sahip bir mineral katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Seraj ve ark. (2016), uzun vadeli beton dayanımına rağmen yüksek su ihtiyacından dolayı doğal zeolitin kullanımı yaygın değildir. Bu araştırmanın amacı doğal zeolitin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çimento karışımlarının işlenebilirliğini nasıl etkilediği tespit etmek ve doğal zeolitin yüksek su ihtiyacının kalsinasyon yoluyla modifiye edilip edilemeyeceğini belirlemektir. Bu çalışmada üç farklı doğal zeolit, x-ışını kırınımı (XRD) ve Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı ölçümleri kullanılarak orijinal ve kalsine hallerinde karakterize edilmiştir. Daha sonra bu doğal zeolit içeren çimentolu hamurlar üzerinde orijinal ve kalsine durumlarında, karışımın viskozitesini ve akma gerilmesini değerlendirmek için birtakım deneyler yapılmış. Sonuçlar, doğal zeolitin reolojik sonuçları ile birlikte, doğal zeolitlerin mezo-gözlerinde ve mikro gözeneklerinde su emiliminin, bu minerallerin yüksek su ihtiyacının arkasındaki temel nedenlerden biri olduğunu göstermiştir. Kalsinasyonun doğal zeolitlerin yapısını destabilize ettiğini ve yüzey alanlarını azalttığını göstermiştir. Bunun da karışım viskozitesi ve akma gerilmesinde bir iyileşmeye yol açtığını gösterdi.

Zhang ve ark. (2018), Bu araştırmanın amacı kalsine edilmiş zeolit kullanarak normal dayanımlı betonların büzülme ve geçirgenliğe olan etkisini araştırmak. Büzülme, basınç dayanımı ve geçirgenlik testleri yapıldı. Normal dayanımlı betonlarda önceden ıslatılmış zeolit parçacıklarının kullanımı betonun büzülmesini özellikle kuruma büzülmesini azalttığı görülmüş. Gözenekli zeolitin eklenmesi betonda erken yaşlarda permabiliteye olumsuz etki ettiği ancak uzun vadede (90 günlük) permabilitesi kontrol numunesinden iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Şahmaran ve ark. (2008), doğal zeolitin, harç karışımlarının reolojik ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Harçların priz süreleri deneysel çalışmanın bir parçası olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma için, harç karışımları ayrıca ticari olarak temin edilebilen bir viskozite modifiye edici katkı (VMA) ile hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlar, doğal zeolit ilavesinin, harçların hem reolojik hem de işlenebilirlik özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. Sabit bir Süper-Plastikleştirici (SP) içeriği için, zeolit miktarındaki bir artış akma gerilmesini ve plastik viskoziteyi önemli ölçüde arttırdığı görülürken, akışkanlığı ve deformabiliteyi azalttığı görülmüştür. Ayrıca, SP miktarındaki bir artış hem akma gerilmesi hem de plastik viskozitede önemli bir azalmaya neden olur. Ayrıca, doğal zeolit ilavesi ile hazırlanan harçların bir pseudo-plastik davranışa (pseudo-plastic behavior) sahip olduğu ve zeolit miktarında bir artış ile kesme-inceltme davranışının (shear-thinning behavior) arttığı da gözlenmiştir. Bu nedenle, doğal bir zeolitin bir viskozite modifiye edici katkı (VMA) olarak kullanılmasının, özellikle de bir süper-plastikleştirici ile birlikte kullanılması halinde, tatmin edici reolojik özelliklere sahip olan harçların elde edilmesi mümkün olduğu gösterilmiştir.

Poon ve ark. (1999), doğal zeolit büyük miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren bir mineralojik malzeme türüdür. Diğer puzolanik malzemeler gibi CaOH_2 ile reaksiyona girerek betonun dayanımını artırıyor. Bu çalışmada basınç dayanımı, puzolanik aktivite seviyeleri ve çimento yerine zeolit katkısı yapılan betonların gözenekliliği hakkında deneysel sonuçlar sunmaktadır. Deneysel sonuçlara dayanarak, doğal zeolitin silis dumanı ile uçucu kül arasında aktiviteye sahip bir puzolanik malzeme olduğu sonucuna varılabilir. %15 oranındaki zeolit katkısı gözenekliliği azaltırken, %25 daha yüksek ikame oranında gözeneklilik artmıştır (3 ila 180 arasında). Zeolit uçucu külden daha reaktif olduğundan erken yaşlarda daha az dayanımı azaltırken, uzun kürlenme

sonunda dayanım arttırma özelliği uçucu külden daha düşüktür. Farklı doğal zeolitlerin farklı kimyasal özelliklere sahip olduğundan betonda kullanılmadan önce uygun bir incelik elde edilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Özen ve ark. (2016), Türkiye'den gelen mordenit analsim taşıyan doğal kayaçlardan elde edilen doğal zeolitin fiziksel ve kimyasal parametlerinin etkisi ve yapısı incelendi. Puzolan aktivitesi Avrupa standartları testleri ve termogravimetrik yöntemle tahmin edildi. Bu iki prosedürün iyi bir uyum içinde olduğu belirtiliyor. Klinoptilolit bakımından zengin kayaçlar çok iyi sonuçlar verdi, ancak performansı zeolitin yüzey alanına ve potasyum formundaki ön zenginleştirmeye bağlıdır. Deneysel veri analizi puzolanik reaksiyonun kinetik olarak reaktiflerin difüzyonu ile kontrol edilebildiğini gösterdi. Bu zeolitle hazırlanmış çimentoların zamana bağlı olarak basınç dayanımları test edildi. Puzolanik etkinin etkinliği XRD ve FTIR analizleri ile izlendi. Sertleşmiş numuneler üzerinde hassas bir mikro yapı çalışması da yapıldı ve zeolit-kireç etkileşiminin iki aşama ile karakterize edildiğine işaret ederek nokta analizi yapıldı. İlk önce zeolit çevresindeki kalsiyumu katyon değişimiyle çıkarır, yapısı bozulur bozulmaz gerçek bir puzolan gibi görev yapar. Spesifik yüzey alanı klinoptilolit bakımından zengin bir dizi numune üzerinde ilk 3 günde reaksiyonun reaktivitesini etkilerken daha uzun kürlenme sürelerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Si/Al oranı uzun hidratasyon zamanlarında puzolanik aktivite kontrol eden ana parametrelerinden biri olduğu onaylanıyor.

Küçükyıldırım ve Uzal (2014), farklı özelliklere sahip iki doğal zeolit, çimento karışım malzemesi olarak faydalarını arttırmak için çeşitli sıcaklıklarda kalsine edilmiştir. Kalsine edilmiş doğal zeolitin çimento ikame malzemesi olarak performansını değerlendirmek için, Portland çimentosu harçlarına ham ve kalsine zeolit içeren harçlar su gereksinimi, serbest kireç içeriği, gözenek büyüklüğü dağılımı ve basınç dayanımı açısından test edilmiştir. Deneysel sonuçlar kalsine zeolit ile hazırlanan çimentoların ham zeolit hazırlananlara kıyasla daha düşük su gereksinimi ve daha yüksek dayanım performansı gösterdiğini belirtmektedir. Basınç dayanımındaki bu artış kalsine edilen zeolit ile hazırlanan çimentoların gözenekliliğin azalmasına bağlanmaktadır. Zeolitlerin kristal yapısı kalsine edildikten sonra miktarına ve yapısında bulunan su oranı bağlı olarak farklı seviyelerde değiştirilmiştir. Kalsine edilmiş doğal zeolitlerin spesifik yüzey alanı ve su gereksinimi temelde ham

formlarından daha düşüktür, bu da onları su ihtiyacı veya taze işlenebilirlik açısından daha fazla tercih edilebilen katkı malzemesi yapar. Kalsine edilmiş doğal zeolitlerin puzolanik aktivitesinin zeolitlerin saflığına ve kalsine edilen sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Öte yandan kalsine edilmiş zeolitlerle hazırlanan karışımların basınç dayanımları ham zeolitlerle hazırlananlara kıyasla %15 seviyelerine kadar daha yüksek değerlerde sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak kalsine edilmiş zeolitlerin katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği gerekli olan su miktarına ve daha yüksek dayanımı performansı göstermesi nedeniyle tercih edilmelidir. Bu nedenle kalsine edilmiş doğal zeolitler, kalsinasyon teknolojilerindeki son gelişmeler dikkate alınarak ileri çalışmalarda enerji ve maliyet verimliliği açısından değerlendirilmelidir.

Owsiak ve Czapik (2015), alkali-agrega reaksiyonu, çimento hamurunda mevcut alkaliler ile agregalarda bulunan mineraller arasında geniş bir kimyasal reaksiyondur. Mineral katkıları bu reaksiyonun neden olduğu zararlı süreçleri azaltabilir. Alkali - agrega reaksiyonunun etkilerini azaltan minerallerden biri de doğal zeolittir. Bu çalışma, doğal zeolit ilavesiyle yapılan çimento harcında reaktif çakılı çevreleyen bölgede meydana gelen süreci açıklamaya çalışmaktadır. Harç çubuğu genleşme testleri yapıldı ve agrega iç yüzeyini gözlemlemek için enerji dağıtıcı bir X ışını spektrometresi ile donatılmış bir taramalı elektron mikroskobu kullanıldı. Sonuçlar, zeolitlerin reaktif agrega bazlı harç genleşmesinde azalma üzerindeki etkisini doğruladı.

Mertens ve ark. (2009), Portlandite ve farklı tiplerde neredeyse saf doğal zeolitler arasındaki puzolanik reaksiyon incelenmiştir. Analcime, phillipsite, chabazite, erionite, mordenite ve klinoptilolit bakımından zengin tüfler portlandit ile karşılaştırıldı. Puzolanik reaksiyonun ilerlemesi nicel olarak 3 ila 180 gün arasında termo gravimetrik analizler ile belirlenmiştir. Farklı katyonlarla ya da öğütülmüş farklı tanecik boyutlarına değiştirilen klinoptilolit bakımından zengin numuneler arasında değişen farklı Si/Al oranlarına sahip zeolit içeren numunelerin reaktivitesindeki farklılık değerlendirildi. Sonuçlar, dış yüzey alanının sadece kısa süreli reaktiviteyi etkilediğini gösterirken, katyon içeriği hem uzun vadede hem de kısa vadede reaktivite üzerinde etkisi olduğu göstermiştir. Si bakımından zengin zeolitlerin Al bakımından zengin zeolitlere kıyasla daha hızlı tepki verir.

Chan ve Ji (1999), bu çalışmanın amacı, zeolitin silis dumanı ve öğütülmüş yakıt külü ile karşılaştırıldığında betonun performansını arttırmada etkinliğini değerlendirmektir. İlk deney dizisinde zeolit, silis dumanı ve öğütülmüş yakıt külü betondaki çimento ağırlığının %5, %10, %15, %30 oranlarında ikame edildi. Su/bağlayıcı oranı 0,282 mertebesinde tutulmuştur. Sonuçlar zeolitin terlemeyi azalttığı ve slumtandan ödün vermeden viskoziteyi ciddi anlamda arttırdığını göstermiştir. %15 ikame oranında 28. günde basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla %14 artış sağladı. Test sonuçları ayrıca, zeolit için başlangıçtaki yüzey emiliminde ve betonun klorür difüzyonunda bir düşüşe neden olacak optimum bir ikame seviyesi bulunduğunu göstermiştir. İkinci deney serisinde zeolit, silis dumanı ve öğütülmüş yakıt külü sırasıyla %10 oranında çimento ikamesi yapıldı su/bağlayıcı oranı 0,27-0,45 arasında değiştirildi. Zeolitin öğütülmüş yakıt külünden daha iyi performans gösterdiği ancak silis dumanından daha düşük performans gösterdi. Zeolitin puzolanik etkisi sertleşmiş çimento karışımının mikro yapısını iyileştirerek zararlı büyük gözeneklerin içeriğini azaltarak daha geçirimsiz olmasını sağlamıştır.

Şişman ve ark. (2008), tarımsal yapılarda Klinoptilolit ile üretilecek hafif betonların kullanılabilirliğini saptamak için fiziksel, mekanik ve termal özellikleri belirlenmeye çalışıldı. Bu nedenle 300 dozda agrega karışımına %25, %50, %75 ve %100 oranlarında agrega ile ikameli doğal zeolit ilavesi yapıldı. Basınç dayanımı, birim ağırlık, dona dayanıklılık ve ısı iletkenlik katsayıları 28. günde belirlenmiştir. Sonuç olarak zeolit ilavesi ile basınç dayanımı, birim ağırlık, dona dayanıklılık artarken su emme değeri düşmüştür. Zeolit katkılı tüm betonlar, dona dayanıklılık açısından yeterli dayanıklılığı göstermiştir. Bu nedenle zeolit soğuk bölgelerde hafif beton kullanılabilirliği arttırabileceği düşünülmüştür. Tüm karışımların dona dayanıklılık deneyleri sonucundaki basınç dayanımı kayıpları %20 değerinden düşüktür. Su emme oranları %8'in altında ve ısı iletkenlik katsayıları 0,5-0,8 kcal/Ch arasında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda doğal zeolitin hafif beton üretiminde dayanıklılık, ısı yalıtımı ve dayanım yönünden tarımsal yapılarda kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tran ve ark. (2019), beton, mükemmel mekanik yapısı nedeniyle inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan kompozit bir malzemedir. Bu faydalara rağmen beton, olumsuz çevresel etkiler ve mekanik dayanıklılık (örneğin büzülme, don krizi ve korozyon) dahil olmak üzere birçok dezavantaja sahiptir. Bugüne kadar, bu tür

dezavantajların üstesinden gelmek için betonun özelliklerinin iyileştirilmesi bu araştırma alanındaki birçok araştırmacı için en zorlu ama çekici araştırma konularından biri olmuştur. Bu talebi karşılamak için etkili araçlardan biri olarak, beton üretiminde doğal zeolitlerin kullanımı, tercihen yapı, dayanıklılık ve mekanik özellikler bakımından iyileştirmenin yanı sıra mükemmel performansı elde etmek için kullanılmıştır. Bu amaçla doğal zeolit yapısal, temel özellikleri doğal puzolan, iç kütleme maddesi ve beton üretiminde hafif agrega olarak kullanımı çalışıldı. Doğal zeolitlerin içerisinde betona katkı olarak mekanik geçirgenliği ve dayanıklılığı büyük ölçüde artırabilecekleri ve geçirgenliğini azaltmaya yardımcı olacağı düşünülmektedir. En belirgin şekilde, büzülme, klorür penetrasyonu, su geçirgenliği, karbonasyon direnci ve sülfat direnci gibi özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir. Bununla birlikte doğal zeolit betonun katkı maddesi olarak kullanımının yanında, doğal zeolit betondaki uygulanabilirliğini arttırmaya yardımcı olmak için araştırmacılara basınç dayanımını arttırmak, süper akışkanlaştırıcı tüketimin azaltmak ve diğer mineral katkıların kullanımını dahil etmek için stratejiler önerip geliştirilmesi önerilmektedir.

Mohseni ve ark. (2017), zeolit ve tuf betonda çimento ve kumun yerine ikame edilerek betonun özellikleri incelenmiştir. Basınç dayanımı, su emme, klorür iyonu difüzyonu, asit ortamlarına karşı direnci %10 ile %15 oranlarında zeolit çimento yerine ikame edilerek, %5, %10 ve %15 oranında tuf agrega yerine ikame edilerek incelenmiştir. Sonuçlar, zeolit ve tuf içeren örneklerin basınç dayanımının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Genel olarak, tuf içeriği arttıkça beton dayanımı artar ve çimento zeolit ile değiştirilirken dayanım daha da artar. Su emme sonuçlarına göre, zeolit, en düşük su emme değerlerini göstermiştir. Tuf ve zeolit dahil edilmesi ile numunelerin klorid direnci önemli ölçüde arttırılmıştır. Su emme ve klorür difüzyon sonuçları açısından en uygun çimento ve kum değişimi sırasıyla % 10 zeolit ve % 15 tuf olmuştur. Bununla birlikte, asit saldırısına karşı direnç, tufün emme özelliği ve kireçli yapısı nedeniyle azalmıştır.

Canpolat ve Yılmaz (2002), doğal zeolit ve uçucu külün puzolanik özelliği deneysel olarak belirleniyor. %5 ve %10 'luk sodyum sülfat çözeltileri ile sülfata karşı dayanıklılığı tespit edilmeye çalışıldı. %20 ve %30 oranlarında çimento ağırlığı yerine doğal zeolit ikamesi yapılan standart harçlarda ve %15 zeolit-%5 uçucu kül ve %25

zeolit-%5 uçucu kül katkıli harçlarda deneyler uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlar kirece doygun suda 28 gün bekletilmiş ve eskitme sürecinin başlangıcı için 28. gün temel alınmıştır. 2, 7, 28, 90. günlük numuneler her grup için 3 numune olmak üzere birim ağırlık, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı testlerine tabi tutulmuş. Su ve çözeltiler 14 günde bir değiştirilmiş ve bu aralıklarla da kütle değişimleri ölçülmüştür. Zeolit oranına göre, sodyum sülfat çözeltilerinin harç özelliklerine etkileri belirlenmiştir. 90. güne kadar çimentoya zeolit ikamesi, yüksek konsantrasyonda bile harcın sülfata karşı dayanıklılığına pozitif etki sağlamıştır. Sonuçlara bakılacak olursa, zeolit katkıli harçların başlangıçtaki basınç dayanımları, kontrol gruptan daha fazladır. Zeolit katkıli harcın basınç dayanımı zamanla artmıştır. Uçucu kül ve zeolit puzolanik bir yapısının olduğu belirlenmiş. Zeolit ikameli karışımlarda 90. güne kadar parçalanma, dökülme, çatlama ve yumuşama meydana gelmemiştir. Farklı ikame oranları için mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından sodyum sülfat çözeltilerinin 90. güne kadar olumsuz etkisine rastlanmamıştır. Bu durumlar göz önüne alındığı zaman zeolit ve uçucu kül katkı oranının %20 ve %25 oranında olması uygun görülmüştür.

Naiqian ve Tingyu (1998), doğal zeolit tozunun (DZT) betondaki alkali iyon konsantrasyonunun iyon değişimini azaltarak alkali-silika reaksiyonunu (ASR) önleyebilir. Doğal zeolit tozunun (DZT)'nin adsorpsiyon ve puzolanik reaksiyonu alkali silika jel oluşumunu engelleyerek arayüzü geliştirir. CaOH çözeltilisine NaOH karıştırılıp DZT eklenmesi Na⁺, Ca⁺² ve OH⁻ iyonlarının konsantrasyonu azaltır. DZT'nin inceliği arttıkça PH azalıyor. Gözenek çözeltilisinin alkalitesi DZT miktarının artışıyla azalır. DZT'nin harç çubuğu genişlemesini azaltma kabiliyeti, gözenek çözeltilisindeki [OH⁻] azaltma kapasitesi ile bağlantılıdır. Çalışma DZT ve andezitten yapılan numunenin yüzeyinin sodyum silikat jel içermediğini doğruladı. Betona doğal zeolit tozunun (DZT) eklenerek ASR'nin önlenebileceğini göstermektedir.

Daskiran ve Daskiran (2015), bu çalışmada alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonun genişleyip çatlamasını azaltmak için iki doğal zeolitinin etkinliği araştırılmıştır. Bu doğal zeolitler farklı reaktif silika içeriğine sahiptir. Hızlandırılmış harç çubuğu test yöntemi ASTM C1260 uyarınca harç çubukları hazırlanırken iki adet doğal kum ve bir adet kırma taş agrega kullanılmıştır. Doğal zeolitlerin performansları, alkali silika

reaksiyonuna bağlı genleşmeler incelenerek karşılaştırılır. Doğal zeolitler, karışımlara çimento ağırlığına göre %10 ve %20 oranında ilave edildi. Yüksek reaktif silika içeriğine sahip doğal zeolit, ASR'ye bağlı açılımların azaltılmasında daha iyi performans göstermiştir. Bu araştırmada %20 ikame seviyelerinde yüksek reaktif zeolit kullanmanın, genleşmelerin azaltılmasında etkili olduğu belirtilmiştir.

Quanlin ve Naiqian (2005), modifiye zeolitin (MZ) ASR genleşmesi üzerindeki etkisi analiz edildi ve ASTM C441'e göre MZ, uçucu kül ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu gibi diğer katkıları arasındaki karşılaştırma yapıldı. Doğal zeolitin 2N NH₄Cl çözeltilisine daldırılmasından türetilmiş modifiye zeolitin, gözenek çözeltilisindeki çözünür alkali iyonlarının konsantrasyonunu daha etkili bir şekilde azaltabileceği gösterilmiştir. Alkali iyonları, NH₃.H₂O oluşumu ile doğal zeolitte bulunan NH₄⁺ ile değiştirilebildiği için, sonuç olarak alkali-silika reaksiyonuna (ASR) bağlı genleşme kontrol edildi. ASTM C441 testinde, %5 doğal zeolit içeren numunenin 14 günlük genişlemesi %0,1'in altındayken, aynı verimlilikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu yüzdesi sırasıyla %25 ve %40'tı. Normal kıvam, priz süresi, eğilme ve basınç dayanımı gibi doğal zeolitin %5'ini içeren çimentonun fiziksel özellikleri de Çin ulusal standardının gerekliliklerini karşılamıştır.

Karakurt ve Topçu (2011), bu çalışmada farklı tip puzolanlarla hazırlanan çimentoların alkali-silika reaksiyonu (ASR) ve betonun sülfat direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu nedenle çimento üretiminde doğal zeolit (klinoptilolit), öğütölmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Çimentoların durabilitesini öğrenmek için ASR ve sülfat direnci deneyleri yapılmıştır. ÖYFC ile hazırlanan çimentoların öteki puzolanlara kıyasla erken yaşta dayanım kazandığı görölmüş. %30 oranlarında katkı yapılan bütün numunelerin 180 gün sonunda basınç dayanımları CEM 1 42.5 ile hazırlanan referans numuneden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Genişleme sonuçlarına göre, katkılı numunelerin ASR performansı sıradan Portland çimentosundan daha iyidir. Bu katkıları kompozit karışımlarda ASR jelleri oluşumunu azalttı. ÖYFC ASR testlerine karşı en iyi performansı gösterdi. Betonun sülfat direnci etritit, alçıtaşı ve kompozitte taumasit oluşumuna bağlıdır. Farklı çimento türlerine ait numunelerin uzunluk değişimleri ve mikro yapı incelemeleri, zeolit, uçucu kül ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu sıradan CEM 1 42.5 referans örneği ile kıyaslandığında ASR ve sülfat hasarlarının azaltıldığını göstermiştir.

Malolepszy ve Grabowska, (2015), yeraltı suyuna, toprağa ve deniz suyuna maruz kalan en yaygın yapı malzemelerinden biri olan beton, genellikle sülfat saldırısına karşıdır. Portland çimentosunun doğal zeolit tarafından kısmen değiştirilmesinin sülfat saldırısının azaltılmasında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu çalışmada Na_2SO_4 çözeltisinde 52 hafta sonra çimentonun sülfat direncinin sonuçları sunulmaktadır. Çimento harçlarının mikro yapı çalışmaları, enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile donatılmış elektron mikroskobu taranarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sülfat saldırısının azaltılmasında doğal klinoptilolitinin spesifik özellikleri nedeniyle, değerli bir mineral katkı maddesi olarak başarıyla kullanılabilir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

3.1.1. Çimento

Kalker ve kil karışımının pişirilmesiyle meydana gelen “klinker” malzemesinin alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen malzemedir (Erdoğan, 2003).

Çimento ve suyun bir araya gelmesi durumunda kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon) başlayıp uygun nemlilik ve sıcaklık durumunda devam etmektedir. Çimento hamurunun hangi hızla sertleşeceği ve hangi hızla dayanım kazanacağı çimento ana bileşenleri ve su arasındaki hidratasyona bağlıdır. Çalışmada kullanılan çimento TRAÇİM Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.’nin ürünü olan CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik analizi Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Portland çimentosunun kimyasal analiz sonuçları (Traçim Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş, Çimento Kalite Raporu)

KİMYASAL ANALİZ	Standartlar	Analiz Sonuçları
TEST METODU TS EN 196-2		
Çözünmez Kalıntı		0,18
SiO ₂	≤5,0	19,64
Al ₂ O ₃		4,75
Fe ₂ O ₃		3,11
CaO		64,42
MgO		0,91
SO ₃	≤4,0	3,15
Kızdırma Kaybı	≤5,0	1,91
Cl	≤0,1	0,02
Na ₂ O		0,35
K ₂ O		0,84
Tayin Edilemeyen	≤2,0	0,90
S. CAO		1,3
MİNERALOJİK BİLEŞİM	C3S	61,79
	C2S	9,70
	C3A	7,33
	C4AF	9,46

Tablo 3.2. Portland çimentosunun fiziksel ve mekanik analiz sonuçları (Traçim Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş., Çimento Kalite Raporu)

FİZİKSEL ANALİZ		Standartlar	Analiz Sonuçları
TEST METODU TS EN 196-2			
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)			3,1
Priz Süresi	Başlama(dk.)	≥60	205
	Bitiş(dk.)		265
Hacim Genleşmesi		≤10	2
İncelik	ÖzgülYüzey-Blaine (cm ² /gr)		4128
	32 µm elek kalıntısı (%)		3,6
	64 µm elek kalıntısı (%)		0,1
2 günlük basınç dayanımı		≥20,0 MPa	42,5
7 günlük basınç dayanımı		-	49,8
28 günlük basınç dayanımı		≥42,5 ≤62,5 MPa	56,1

3.1.2. Zeolit

Çalışmada çimento yerine belirli oranlarda ikame malzemesi olarak kullanılan zeolit Ege Zeolit Sanayi tarafından Balıkesir-Bigadiç bölgesinden temin edilmiştir. Bu zeolit yüksek ticari önemi olan ve endüstride en yaygın kullanılan zeolit türüdür (Bilgin, 2018). Zeolitin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.3'te verilmektedir. Zeolit grubu mineralleri Hölantin-Klinoptilolit olup amorf bir malzemedir. X- ışını kırınımı (XRD Analizleri) Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğünde (MTA) yapılmış olup CHUNG 1974 yöntemi kullanılarak numunelerin mineral değişimleri hesaplanmıştır. Mineralojik-Petrografik incelemeleri sonucunda örnek zeolitin tamamen zeolitleşmiş volkan camından oluştuğuna ve yer yer mangan boyamalarına rastlandığı belirtilmektedir.

Tablo 3.3. Zeolitin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları (Ege Zeolit Sanayi, 2019)

Fiziksel özellikleri			
Toz yoğunluğu		1,42 g/cm ³	
Katı yoğunluğu		2,143	
Dökülme (kullanım) yoğunluğu		0,54	
Sertlik		3,5-4,0 mohs	
Spesifik yüzey		14,500 cm ² /g	
Renk		Fildişi rengi	
Akışkanlaşma sıcaklığı		1506 ° C	
Kimyasal özellikleri			
CaO	% 2,98	K ₂ O	% 4,37
MgO	% 1,46	K. K	% 8,17
SiO ₂	% 70,14	Na ₂ O (ppm)	% 354
TiO ₂	% 0,097	Asitte B (ppm)	% 131,13
Al ₂ O ₃	% 11,46	Suda B (ppm)	% 8
Fe ₂ O ₃	% 0,85		

3.1.3. Katkı Maddesi

Bu çalışmada kullanılan Basf'ın Master Glenium SKY 608, polikarboksilik eter esaslı ikinci nesil süper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir. Bu ürünün kendine has yapısı çimento tanecikleri üzerinde geciken adsorbsiyonuna izin verirken işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan süre boyunca etkin bir biçimde birbirinden uzak tutarak dağıtır. Böylece priz süresinde gecikme yaşanmadan ve işlenebilirlik kaybı olmadan EN 206-1 standartına uygun olarak düşük su/bağlayıcı oranına sahip beton üretimini mümkün kılmıştır (BASF Ürün Kılavuzu).

Moleküler yapısı erken dayanım gelişimine katkı sağlamaktadır. MasterGlenium SKY 608 molekülleri çimento tanecikleri üzerinde ani hidratasyona sebep olan boşluklar bırakır. Bu boşluklar sayesinde beton erken yüksek dayanıma ulaşır. Teknik bilgi notunda belirtildiği gibi karışım suyunun %80 eklendikten sonra (tüm katı bileşenler ıslandıktan sonra) geri kalan karışım suyuna katkı ilave edilerek kullanılmıştır (BASF Ürün Kılavuzu). Kullanılan süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Süper akışkanlaştırıcı beton katkısı (BASF Ürün Kılavuzu)

Teknik Özellikler	
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüşü	Kahverengi-Sıvı
Özgül ağırlık	1.069-1.109 kg/lt
pH değeri	5-7
Alkali İçeriği (%)	≤3.00(Kütlece)
Klor İyon İçeriği(%)	≤0.10 (Kütlece)
Korozyon davranışı	Sadece EN 934-1:2008, EK A.1 standartına uygun bileşenleri içerir.
Tehlikeli Maddeler	Tamamen EN 934-2 Ek-AZ'ye uygundur.

3.1.4. Agregalar

Beton üretiminde en pahalı malzeme çimento olduğundan hedeflenen beton kalitesine ulaşmak kaydıyla betonda uygun miktarda agrega kullanılması beton maliyetini düşürmektedir. Aynı zamanda betonun özelliklerini iyileştirmektedir. Zamanla kuruyarak büzülme isteyen betonun önüne agregalar çıkarak büzülme bir nebze engellerken çatlak oluşumunu engellemektedir. Kullanılan agregaların dayanımının fazla olması aynı zamanda üretilen betonun dayanımının fazla olmasına sağlamaktadır. Dayanıklı ve sert agregalar çevreden gelebilecek yıpratıcı faktörlere karşı korurken aşınmaya karşı direnç kazandırmaktadır. Çalışmadaki agregalar Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan agregalar

Beton üretiminde agregaların farklı özellikleri incelenmektedir. Agregaların bu özellikleri üretilen betonun özelliklerini etkilerken beton içerisinde yer alacak malzeme oranlarının hesaplanabilmesini olanak sağlar. Bu agregalar üzerinde elek analizi, özgül Ağırlık, su emme, metilen mavisi deneyi, kil topakları deneyi, magnezyum sülfat don deneyi ve yassılık indeksi deneyleri Kuzey Marmara Otoyolu Silivri Şantiyesi Lab.'ında yapılmıştır.

3.1.5. Kum

Çalışmada kullanılan kumun tane büyüklüğü dağılımı Tablo 3.5'te verilirken, görünümü Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Kumun tane büyüklüğü dağılımı

ELEK (mm)	GEÇEN (%)
8	100
4	99,3
2	92,3
1	83,5
0,5	70,1
0,25	24,9
0,15	7,9
0,063	2,4



Şekil 3.2. Kullanılan kum

3.1.6. Su

Betonu oluşturan ana malzemelerden biri sudur. Beton üretiminde karışım suyunun iki temel görevi vardır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonu sağlamak ve beton üretimi sırasında çimento taneciklerinin ve agrega tanelerinin yüzeyini ıslatarak istenen işlenebilirliği sağlamaktır. Karışım suyunun miktarı ve kalitesi hem taze beton üzerinde hem de sertleşmiş beton üzerinde ayrı ayrı etkileri olmaktadır. Taze betonda çimento ve su arasındaki hidratasyonunun ne ölçüde gerçekleşeceğini ve hidratasyon hızını etkiler. Böylece taze betonun priz süresini etkilerken sertleşmiş betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkiler. Kullanılacak olan karışım suyu miktarının gerekli olan miktardan az kullanıldığı takdirde istenen işlenebilirlik yakalanmamaktadır ve yeterli hidratasyon sağlanamamaktadır. Karışım suyunun fazla kullanılması durumunda betonun yapısındaki boşluk oranı artarken bu durum betonun dayanımını ve dayanıklılığını azaltmaktadır (Erdoğan, 2003).

Bu çalışmada kullanılan su İstanbul ilinin Silivri ilçesinin şebeke suyudur. Büyükçekmece İçme suyu Arıtma Tesisleri Silivri ve Silivri İlçelerini beslemektedir. Haziran 2019 tarihinde yapılan beton üretimlerinde kullanılan şebeke suyunun analiz raporu Tablo 3.6’te verilmektedir.

Tablo 3.6. İstanbul ilinin B. Çekmece ilçesinin haziran ayı raporu (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi) (İSKİ, 2019)

Birincil Standartlar	Türk Standartı (TS266, 2005)	B.Çekmece
Aüminyum	0,200	0,09
Arsenik	0,01	<0,002
Bor	1,0	0,07
Nikel	0,02	<0,002
Baryum	-	0,05
Kadmiyum	0,005	<0,002
Krom Bromür	0,05	<0,002
Florür	-	0,03
Siyanür	1,5	0,18
Kurşun	0,05	<0,03
Civa	0,010	<0,002
Nitrat	0,001	<0,0002
Selenyum	50	50
Gümüş	0,01	0,01
Antimon	-	-
Berilyum	0,005	<0,005
	-	<0,002

3.2. Yöntem

Bu çalışmada Balıkesir-Bigadiç'ten bölgesinden elde edilen doğal zeolit (höladit-klinoptilolit) ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında Portland çimentosu ile ikame edilerek kullanılmıştır. Bağlayıcı miktarı, kimyasal katkı oranı ve su/çimento oranı tüm numuneler için sabit tutulup aynı ortamda kür koşullarına tabi tutulmuşlardır. Bir m³ beton ve harç için malzeme miktarları sırasıyla Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de gösterilmiştir. gösterilmiştir. Bağlayıcı miktarı sabit olup 470 kg/m³'dir. Su/bağlayıcı oranı 0.37 olup tüm karışımlarda sabittir.

Tablo 3.7. 1 m³ beton için malzeme miktarları

Karışımlar	Su	Çimento	Zeolit	Katkı Maddesi	Kum (0-2)	Agr. (0-4)	Agr. (4-12)	Agr. (12-20)
%0	190	470,0	0	6,11	482,8	474,0	551,1	250,3
%5	190	446,5	23,5	6,11	480,6	471,8	548,5	249,1
%10	190	423,0	47,0	6,11	478,3	469,5	545,9	247,9
%15	190	399,5	70,5	6,11	476,0	467,3	543,3	246,8
%20	190	376,0	94,0	6,11	473,8	465,1	540,7	245,6

Tablo 3.8. 1 m³ harç için malzeme miktarları

Karışımlar	Su	Çimento	Zeolit	Katkı Maddesi	Kum (0-2)	Agr. (0-4)
%0	197	470	0	6,11	879	855
%5	197	446,5	23,5	6,11	875	851
%10	196	423	47	6,11	871	847
%15	196	399,5	70,5	6,11	867	843
%20	196	376	94	6,11	863	839

Taze betonda yayılma, sıkışık birim ağırlık deneyleri yapılırken, sertleşmiş betonda su emme, DKY birim ağırlık, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, donma çözünme dayanıklılığı ve çimento harcında sülfata karşı dayanıklılık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kontrol numunelerle kıyaslandığı gibi farklı oranlardaki diğer beton numuneleriyle kıyaslamaları yapılmıştır. Bu çalışmada yayılma, sıkışık birim ağırlık, su emme ve basınç dayanımı testleri Kuzey Marmara Otoyolu Projesi (Avrupa Kesimi) Silivri Şantiyesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Betonun donma çözünme

dayanıklılığı deneyi ve sülfata karşı dayanıklılık deneyleri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik B Fakültesi, Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Yayılma deneyi

Kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) performansı ile taze beton özellikleri arasında önemli bir bağ vardır. İşlenebilirlik ve reoloji KYB'nin kullanım performansını etkilemektedir. Bu deneydeki betonların taze haldeki işlenebilirlik tayini TS EN 12350-8'de Kendiliğinden yerleşen beton- Çökme yayılma deneyi metoduna göre belirlenmiştir. Deney çökme hunisi ve 80 cm x 80 cm boyutlarında bir tabla ile yapılmaktadır. Tamamen düz bir yüzeye yerleştirilen yayılma tablası nemlendirildikten sonra tam orta noktasına çökme hunisi yerleştirilmiştir. Kullanılan aparatların nemli olmasına dikkat edildi. Harç numuneleri betoniyerde hazırlandıktan sonra herhangi bir müdahalede bulunmadan tek işlemle KYB koninin içine doldurulmuştur. Daha sonra koni tablaya dik olacak şekilde alındı. Betonun yayılma hareketi durduktan sonra çapı birbirine dik olan iki farklı noktadan ölçülüp ortalama değer alınmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Betonda yayılma deneyi

Sülfata karşı dayanıklılık deneyi için hazırlanan çimento harçlarının işlenebilirlik tayini için ASTM C230'da belirtilen yayılma tablası deney metoduna göre belirlenmiştir. Kullanılan aparatların nemli olmasına dikkat edilmiştir. Harç

numuneleri mikserde hazırlandıktan sonra yayılma tablası konisine tek seferde yerleştirilmiştir. Harcın üstü düzeltilip tabla temizliğine dikkat edildikten sonra zaman kaybetmeden koni çekilip, 25 düşüş yaptırılan harçların çapları iki farklı noktadan ölçülmüştür. Yayılma değeri bu iki değer aritmetik ortalaması olarak belirtilmiştir. Şekil 3.4'te yayılma tablası deneyi verilmektedir.



Şekil 3.4. Yayılma tablası deneyi

3.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Hazırlanan deney numunelerinin basınç dayanımı tayini TS EN 12390-4 belirtilen metoda göre yapılmıştır. Basınç dayanımı tayini için 3, 7, 28 ve 90 günlük kırımların her biri için 3 numune hazırlanırken toplamda 12 adet 10x20 cm silindir numune hazırlanmıştır. Deney U test otomatik basınç deneyi preslerinde yapıldı. Parametreler cihaza tanındı ve otomatik sabit hızda kırım işlemleri yapıldı. Numunelere uygulanan gerilmenin üniform dağılması için numunenin alt ve üst tablaya temas eden yüzeylerine disk yerleştirilmiştir. Şekil 3.5 'te gösterilen şekilde 10x20'lik silindir numuneler pres makinasına yerleştirilip basınç dayanımı tayini yapılmıştır. Gerilme MPa cinsinden olup kuvvetin (N cinsinden) numunenin alanına (mm^2 cinsinden) bölünmesiyle elde edilmiştir. Aynı seri ve aynı yaştaki 3 numunenin deney sonucundaki değerlerin aritmetik ortalaması alınıp o yaştaki basınç dayanımı tayin edilmiştir. Şekil 3.6'te kırımı tamamlanan numunenin sonuç ekranı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Basınç dayanımı deneyi



Şekil 3.6. Basınç dayanımı deney sonucu

3.2.3. Birim ağırlık ve su emme deneyleri

Taze betonda birim ağırlık deneyi için KYB önceden ağırlığı bilinen 3 tane 10x20 kalıplara doldurulmuştur. Ardından betonun kalıplara döküldükten sonra kap ve taze beton ağırlığı ölçülmüştür. Kap hacmi bütün numunelerde sabit olup 10x20'lik silindirik kap hacmi hesaplanmıştır. Kap ağırlığı + numune ağırlığı değerinden kap ağırlığı çıkarılıp, kap hacmine bölünerek taze betonun birim ağırlık değerine ulaşılmıştır.

Su emme deneyi için her seriden 3 adet 10x20'lik silindir numuneler hazırlanmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp numuneler kür havuzuna konulmuştur. 27 gün bekletilip, 28 gün bitiminde havuzdan çıkarılan numunelerin yüzeyi havlu ile kurularak doygun kuru yüzey (DYK) ağırlığı bulunmuştur. Sonrasında numuneler önceden 105 °C sıcaklığa getirilen etüvde 24 saat boyunca bekletilip, çıkarılmıştır. Oda sıcaklığına gelen numuneler tekrar tartılarak kuru ağırlığı bulunur. DYK değerinden sertleşmiş betonun birim ağırlık değeri bulunmuştur. Doymun kuru yüzey ağırlığından kuru ağırlık değeri çıkarılıp, kuru ağırlığına bölünerek yüzde cinsinden değeri alınmaktadır. 3 numune için elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması o serinin yüzde cinsinden su emmesini ifade etmektedir.

3.2.4. Donma-çözünme deneyi

Bu test yönteminde beton numunelerin donma çözünme döngüleri sonrasında betonun direncinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu test yöntemi ASTM C666'da belirtilen metoda göre yapılmıştır. Her seriden 6 adet beton numunesi bu deney için hazırlanmıştır. Prosedür A'ya göre hem donma ve çözünme döngüleri suda gerçekleşirken, Prosedür B'de donma havada çözünme suda gerçekleşir. Her iki prosedür de betonun donma çözünme döngülerine olan direncini belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Kocaeli Üniversitesi Laboratuvarındaki cihaz Prosedür B'ye uygunluğu nedeniyle bu prosedür uygulanmıştır. Prosedür B'de istenilen numune boyutlarına dikkat edilmiştir. Bütün numuneler 27 gün kür havuzunda bekletilip 28 gün sonunda havuzdan çıkarılmıştır. Aynı gün tüm numunelerin teste tabi tutulabilmesi için, laboratuvar ortamında tüm numunelerin 28 gün kür süresini doldurması beklenmiştir. Standartta belirtildiği gibi test numunelerinin doymun olması için kullanımdan önce numuneler 48 saat kür havuzda bekletilmiştir. Sertleşmiş betonun donma çözünmeye karşı gösterdiği direnç birçok sebebe bağılı olarak değişebileceği gibi en önemli iki faktör betonun boşluk oranı ve doymunluk derecesidir Dolayısıyla deney numunelerinin doymun olması testin etkinliğini arttırmaktadır (Baradan, 2015).

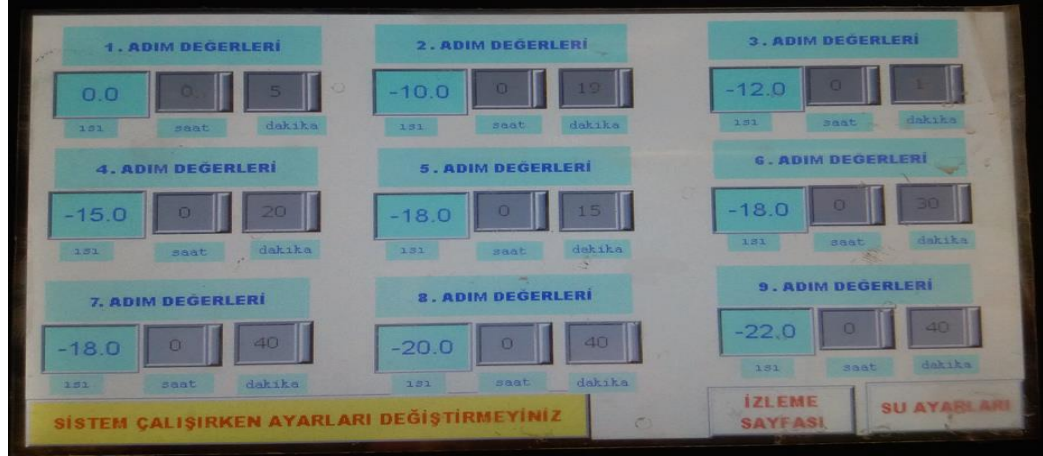
Standartta soğutma periyodunun sonunda numunelerin merkez sıcaklığının -18 ± 2 , çözünme periyodu sonrasında numunelerin merkez sıcaklığının 4 ± 2 olması istenmektedir. Numunelerin merkez sıcaklığını belirlenebilmesi için referans numune,

zeolitsiz beton karışım hesaplarına göre hazırlanmıştır. Referans numunenin dökümü sırasında tam merkeze gelecek şekilde termokulp (thermocouple) aparatı yerleştirilip oynamaması için desteklenmiştir. Test gününe kadar kür edilip doygun halde teste tabi tutulmuştur. Referans numune cihazın ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler donma çözünme cihazına yerleştirilirken altlı üstlü ızgara üzerine gelecek şekilde birbirlerine ve cihaza temas etmemelerine özen gösterilmiştir. Yerleştirilen numunelerin üzerindeki etiketlerin okunamaması veya aşınması durumuna karşı yerleşim şeması çizilmiştir. Şekil 3.7’de numunelerin donma çözünme cihazına yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Donma çözünme test cihazına numunelerin yerleşimi

Referans numunesinin merkez sıcaklığı istenen sıcaklıklara getirebilmek için birkaç deneme döngüsü yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda cihazın hangi sıcaklıkta ne kadar süre beklemesi gerektiği netleştirilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda Prosedür B’ye göre çözülme süresi donma süresinin %20’sinden az olmamasına dikkat edilmiştir. Toplamda donma süresi 210 dakika iken, çözünme süresi 50 dk.’dır. 4 deneme sonrası merkez sıcaklığının -17 °C sıcaklığa getiren ayarlamalar Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Donma çözünme test cihazı ayarlaması

Betonların ultrases dalga hızını tayin etmek için, Sakarya Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarındaki ultrason cihazı kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde betonun nem içeriği ölçümler arasında farklılıklara sebep olabileceğinden kür havuzundan çıkarılan numunelerin yüzeyi havlu yardımıyla kurutulup ölçüme başlanmıştır. Direk okuma yöntemiyle alıcı ve verici test edilecek beton numunesinin birbirine paralel iki yüzeylerine yerleştirilerek ses dalgasının geçiş süresi ölçülmüştür. Alıcı ve vericinin yerleştirildiği yüzeyde boşluk kalmaması ve tam temasın sağlanabilmesi için jel kullanılmıştır. Aynı zamanda sensörlerin karşılıklı paralel kenarların orta noktasında olmaları gerekmektedir. Aksi takdirde ölçümler arasında büyük farklılıkların ortaya çıktığı görülmüştür. Cihaz ölçümlerinin doğruluğunun teyit edilebilmesi için referans çubuğu ölçümleri sık sık tekrarlanmıştır. Bu test cihazıyla yapılan ölçümlerin değerinde döngülerden önce ve sonra ciddi farklılıkların ortaya çıkmayacağı tahmin edildiğinden ölçümler sırasında büyük titizlik ve hassasiyet göstermek gerekmektedir. Aynı zamanda teste başlamadan önce ve sonra tüm numunelerin doygun halde ağırlıkları ölçülmüştür. Bu değerlerden 200 döngü sonra meydana gelen % ağırlık kaybı değerine ulaşılmıştır. Şekil 3.9'da Donma çözünme döngülerine başlanmadan önce ve 200 döngü bittikten sonra tüm beton numunelerin ultrason test cihazı ile ölçümleri gösterilmiştir. Bu ölçülen değerlerle döngülerden sonra meydana gelen % ultrases geçiş hızı kaybı değerine ulaşılmıştır.



Şekil 3.9. Beton numunelerinin ultrason cihazı ile ölçümü

Donma çözünme döngüleri her gün izleme sayfasından takip edilmiştir. Döngüler ara verilmeksizin haftalık periyotlarda yenilenmiştir. Uzun periyotlarda döngü girilmemesinin sebebi cihazın arıza vermesi durumunda beton numunelere gelebilecek olan zararların önüne geçmek amaçlanmıştır. Test süresi 200 döngü ile sınırlandırmak durumunda kalınmıştır. Bu deney yönteminde uzunluk değişimi adına bir çalışma yapılmamıştır.

3.2.5. Sülfata karşı dayanıklılık deneyi

Bu çalışmada hazırlanan çimento harçlarının sülfata karşı dayanıklılığın tayini için ASTM C1012’de belirtilen metoda göre yapılmıştır. Bu deney yöntemi bir sülfat çözeltisine batırılan harç çubuklarının uzunluk değişimi tayin etmek amaçlanmıştır. Bu deney metodunda Mikser, küp kalıplar, çubuk kalıplar, komperatör, konteynerlar (çubuk barların içine daldırıldığı, korozyon oluşumuna dayanıklı ve buharlaşmayı önlemek için kapalı plastik kaplar) ve kür tankı kullanılmıştır.

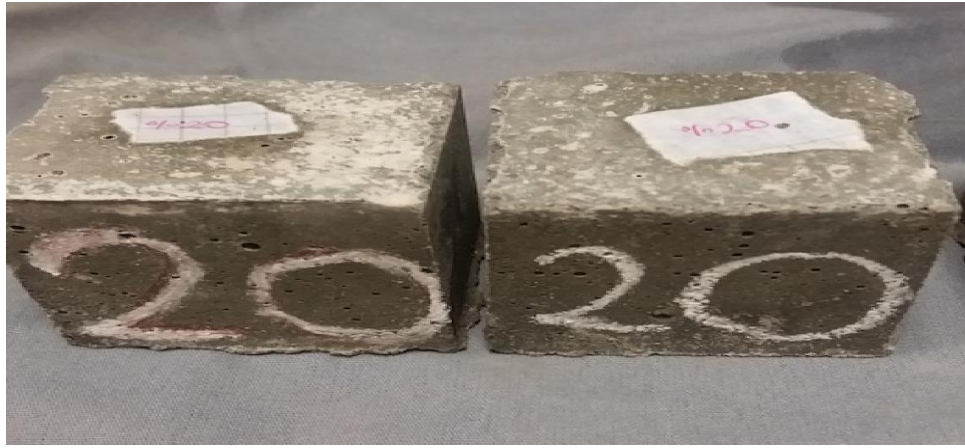
3.2.5.1. Harçların hazırlanması

Küp ve çubuk kalıplar gerekliklerine uygun şekilde kullanılmıştır. Her seri için 6 adet 5x5x5’lik küp ve 5 adet 25x25x285’lik çubuk numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3.10’da deney için hazırlanan harç çubuklarını gösterilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin küp olanların 2 tanesi kırılıp basınç dayanımını ölçülmüştür. Ortalama 20

MPa ulaşması durumunda çubuk numuneler sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine yerleştirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde kür havuzunda bekletilip bir sonraki kırım, ilk kırım referans alınarak bir süre sonra tekrarlanır ve küp numunelerin 20 MPa ulaşması beklenir. Şekil 3.11'de harç çubukların basınç dayanımının 20 MPa ulaşmasının teyidi için hazırlanan küp numuneler gösterilmiştir. %20 zeolit katkılı küp numuneler 4 günde 20 MPa ulaşırken, %15, %10 katkılı harçlar 3 günde ve %5, %0 katkılı harçlar 2 günde ulaşmıştır.



Şekil 3.10. Sülfata karşı dayanıklılık deneyi için hazırlanan harç çubuklar



Şekil 3.11. Sülfata karşı dayanıklılık deneyi için hazırlanan küp numuneler

3.2.5.2. Çözeltinin hazırlanması

ASTM C 1012 standardında bu test yöntemi için her m^3 için (50 g/l) 352 mol Na_2SO_4 içermesi gerektiği belirtilmiştir. Öncelikli olarak gerekli çözelti miktarı belirlenip yeterince Na_2SO_4 İmer Kimya'dan tedarik edilmiştir.

Standartta belirtildiği gibi çözelti hazırlanmasında saf su kullanılmıştır. Gerekli olan çözelti miktarı 1 çubuğun hacminin $4.0 \pm 0,5$ kadarıdır. Gerekli olan çözelti miktarı şöyle hesaplanmıştır; Bir çubuğun hacmi $25 \times 25 \times 285 = 178$ ml olup, bir çubuk için gerekli çözelti miktarı $\min 178 \times (3,5) = 625$ ml, $\max. (178 \times 4,5) = 800$ ml'dir. Bu durumda %0, %5, %10, %15 ve %20 her seriden 5 olmak üzere toplam 25 harç çubuğumuz vardır. Bu durumda çözelti miktarı $\min 15,6$ litre ve $\max. 20$ litre arasında olmalıdır. Çözelti miktarı 16 litrede sabit tutulmuştur. Litre başına 50 g. susuz Na_2SO_4 gerektiğinden 16 litre için 800 g. gerekmektedir. Çözelti ayda bir değiştirilmiştir. Hazırlanan çözeltinin ilk pH değeri ölçülmüştür.

Çözelti Kocaeli Üniversitesi'nin Kimya Mühendisliği Katalizör Araştırma ve Geliştirme Lab. (KARGEL)'inde hazırlanmıştır. Ancak çalışmada sulu sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kullanıldı. Dolayısıyla hazırlanması istenen çözeltinin mol sayısı belirlenmiştir.

Standartta her litre için 50 g. susuz sodyum sülfat kullanılması istenmiştir. Sodyum sülfat'ın (Na_2SO_4) molekül ağırlığı 142,04 g/mol'dür. 1 litre için gerekli mol sayısını Denklem (3.1)'de hesaplanmıştır;

$$n = m/MA \quad (3.1)$$

n: Hazırlanması istenen maddenin mol sayısı, mol

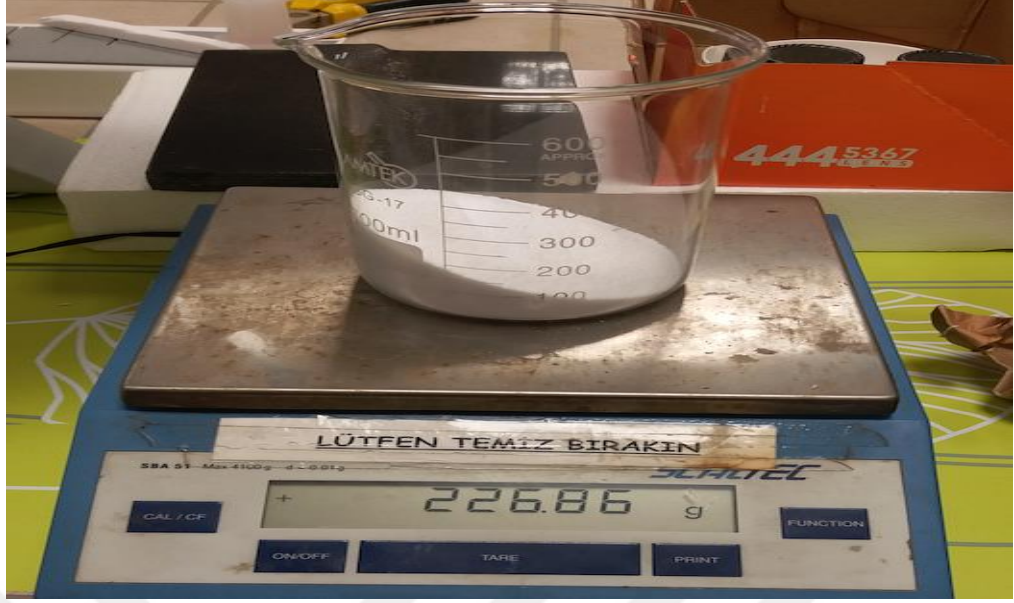
m: Hazırlanmak istenen maddeden alınması gereken miktar, kg.-g.

MA: Molü hazırlanacak olan maddenin molekül ağırlığı, kg.-g.

$50 \text{ g.} \div 142,04 \text{ g/mol} = 0,352$ mol (Bu durumda 1 litre için istenen mol sayısı).

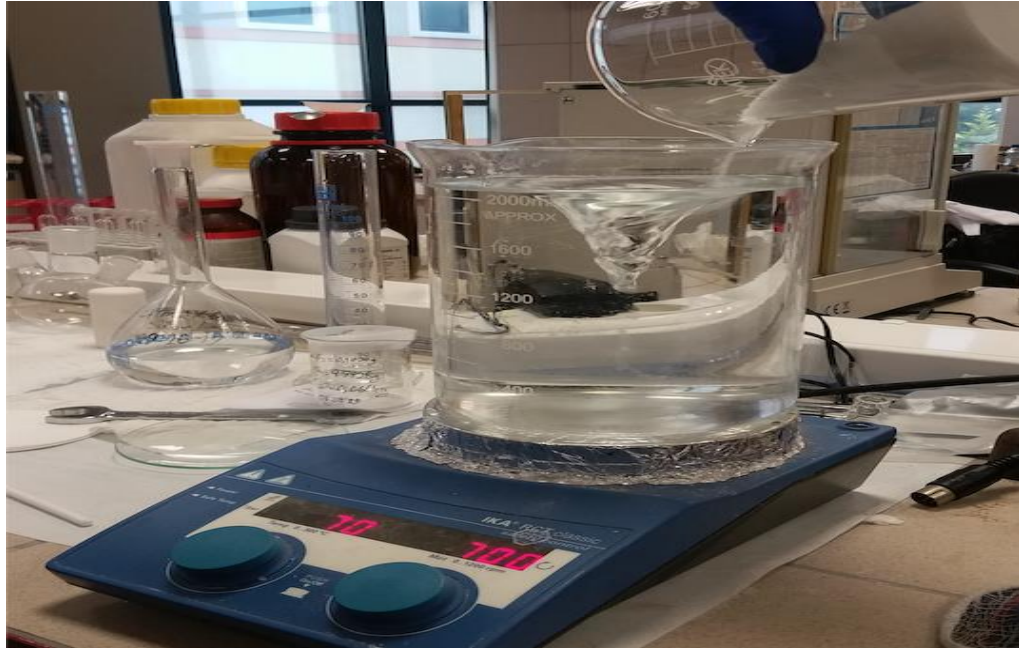
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'nin molekül ağırlığı ise 322,2 g/mol'dür. Bu durumda eşitliğimiz;

$0,352 = m/322,2$ 'dir. Bu bağıntıdan m değeri 113,41 g. bulunmaktadır. 16 litre çözelti hazırlayabilmek için $16 \times 113,41$ g., yani 1,81 kg. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ kullanılmıştır. Ancak hem kolaylık hem kontrollü olması açısından çözelti 2'şer litreler halinde hazırlanmıştır. 2 litre için gerekli olan $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ miktarı ise 226,8 g.'dır. Şekil 3.12'de çözelti için gerekli malzeme miktarı tartımı gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Sülfat deneyi için sodyum sülfat çözeltisinin tartımı

Çözelti hazırlanırken Na_2SO_4 'in üstüne suyun eklenmesiyle sodyum sülfatın tamamen kristalleştiği görülmüştür. Dolayısıyla Na_2SO_4 suyun içine azar azar dökülerek ve silindirik manyetik balık yardımıyla karıştırılarak Na_2SO_4 'ün çözülmesi sağlanmıştır. Tamamen saydam hale gelene kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Şekil 3.13'te sodyum sülfat çözeltisinin hazırlanışı gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Sülfat deneyi için sodyum sülfat çözeltisinin hazırlanışı

Bu şekilde devam ederek 16 litre çözelti hazırlanmıştır. Sonrasında hazırlanan çözeltinin ilk pH değeri 7,2 olarak ölçülmüştür. Kullanımdan önce ve belli periyotlarda kristalleşmenin önüne geçebilmek için çözelti karıştırılmıştır.

3.2.5.3. Harç çubuklarının ölçümü ve çözeltiliye yerleştirilmesi

Her seriden hazırlanan küp numunelerin 20 MPa ulaşması durumunda çubuklar çözeltiliye hazır hale gelmiştir. Komperatör ölçümleri yapılmadan önce her defasında aynı açıdan ölçülebilmesi için çubuklara yön çizilmiştir. Çözeltiye girmeden önce bütün çubukların önce metre ile ölçümleri yapıldı ardından komperatör yardımıyla ölçümler yapılmıştır. Komperatörün ölçümler sırasında aynı konumda olmasına dikkat edilmiştir. Çözeltiye girdikten sonra haftalık ölçümler yapıldı. Bu ölçümlerde komperatörün tabanında bulunan delik su ve kum toplamaya meyillidir. Dolayısıyla her bir çubuğun ölçümünden sonra delik temizlenmiştir. Çubukların ölçümü yapılırken çözeltiliden çıkarılıp bacakları kurutulduktan sonra ölçümü yapıp çözeltiliye geri bırakılmıştır. Şekil 3.14’te harç çubukların ölçümleri gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Harç çubuklarının komperatör yardımıyla ölçülmesi

Çözelti hazırlandıktan sonra pH değeri ölçülmüştür. Şekil 3.15’te pH metre ile çözeltinin pH değeri ölçülmektedir.



Şekil 3.15. Sodyum sülfat çözeltisinin pH değerinin ölçülmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kıvam Deneyi Sonuçları

Betonların kıvam deneyi sonucunda yayılma çapı Tablo 4.1’de gösterilirken, sülfata karşı dayanıklılık testi için hazırlanan çimento harçlarının yayılması 20-24 cm arasında değişmiştir.

Tablo 4.1. Kıvam deneyi sonuçları

Zeolit Miktarı (%)	Yayılma Çapı (mm)	TS EN 206-1’e göre sınıflandırma
%0	757	SF2
%5	732	SF2
%10	722	SF2
%15	715	SF2
%20	527	SF1

Yapılan ölçümlerde betonda zeolit katkısı ile birlikte yayılma düşmüştür. %15 katkı oranına kadar yayılma değerinde ciddi bir farklılık yaşanmazken, %20 oranında zeolit katkısı işlenebilirliği ciddi oranda düşürmüştür.

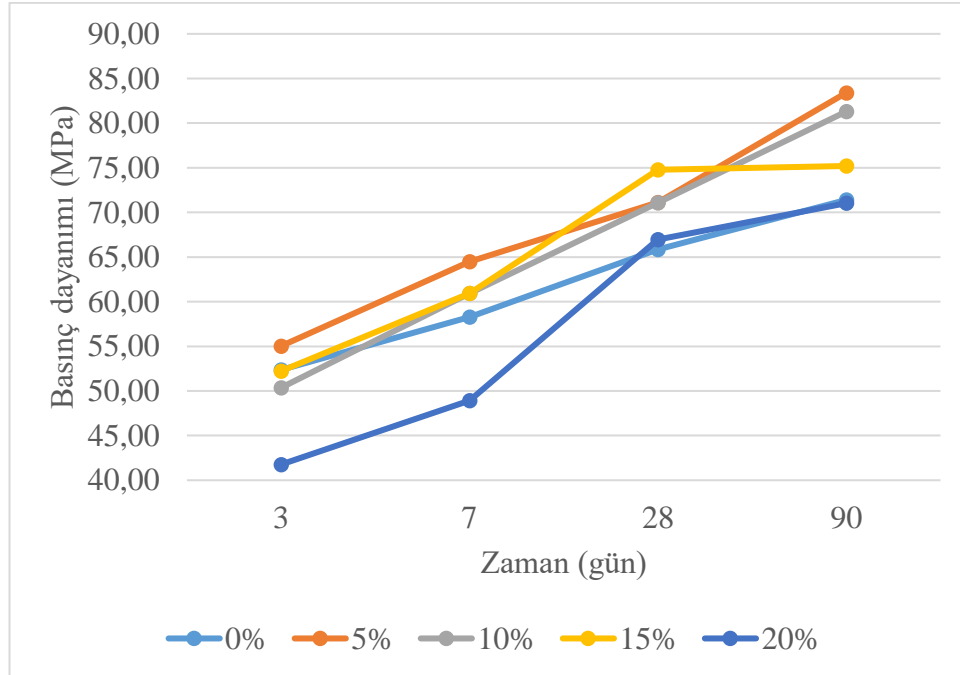
4.2. Basınç Dayanımı Sonuçları

Laboratuvar ortamında 3, 7, 28 ve 90 gün bekletilen %0, %5, %10, %15 ve %20 oranındaki betonların basınç dayanımı Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sonuçları

Zeolit Miktarı (%)	3 Günlük (MPa)	7 Günlük (MPa)	28 Günlük (MPa)	90 Günlük (MPa)
%0	52,37	58,30	65,87	71,40
%5	55,03	64,50	71,13	83,40
%10	50,37	60,93	71,10	81,30
%15	52,23	60,93	74,77	75,20
%20	41,77	48,53	66,97	71,03

- 3 günlük basınç dayanımı sonuçlarında %5 oranında zeolit kullanımı kontrol numuneye kıyasla basınç dayanımını %5,1 artırırken, %20 oranında zeolit kullanımı kontrol numuneye kıyasla basınç dayanımını %20 düşürmüştür. Erken dayanım kazanmada %15'e kadar katkı kullanımı basınç dayanımını kontrol betonuna kıyasla iyi ya da daha iyi sonuçlar vermiştir.
- 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarında %5 oranında zeolit kullanımı kontrol numuneye kıyasla %10,6 oranında artırırken, %10 ve %15 oranında zeolit kullanımında bu oran %4,5 olmaktadır. %20 oranında zeolit kullanımı basınç dayanımını %16,7 oranında azaltmıştır.
- 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarını kontrol numuneye kıyaslayacak olursak %5, %10 ve %15 oranında zeolit kullanımı sırasıyla basınç dayanımını sırasıyla %8, %7,9 ve %13,5 oranlarında artırırken, %20 oranında kullanımı %1,7 oranında dayanımı arttırmıştır.
- 90 günlük basınç dayanımı sonuçları %5, %10 ve %15 oranında zeolit kullanımı kontrol numuneye kıyasla sırasıyla %16,8, %13,9 ve %5,3 oranında dayanımı artırırken bu durum %20 oranında katkı kullanımında basınç dayanımı neredeyse kontrol betonuna eşdeğerdir. Şekil 4.1'de bütün numunelerin 3,7,28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları

- 3 ve 7 günlük kısa süreli kür koşullarında betonların şahit numuneye kıyasla beton basınç dayanımı sonuçlarında zeolit kullanımının %5, %10 ve %15 oranları çok az bir artışa sebep olurken, %20 oranında zeolit kullanımı ortalama %18 oranında bir azalmaya sebep olmuştur. Zeolit eklenmesi basınç dayanımı gelişimini geçiktirir (Kocak, 2013). 28 ve 90 günlük uzun süreli kür koşullarında ise basınç dayanımı sonuçları doğrultusunda %5, %10, %15 oranında zeolit kullanımı şahit numuneye kıyasla sırasıyla ortalama %12,4, %10,6 ve %8,7 oranında artışa sebep olurken, %20 oranında zeolit kullanımı çok az bir farklılığa sebep olmuştur. Kısa süreli kür koşullarında %20 oranında zeolit ikamesi yapılan betonların dayanımları kontrol numuneden az iken uzun dönemli kür koşullarında %20 zeolit ikameli betonların dayanımları kontrol numuneye çok yakın değerdedir.

Sonuç olarak uygun bir zeolitin belli oranda kullanılması durumunda basınç dayanımını arttırdığı doğrulanmaktadır (Ahmadi, 2010, Bideci, 2013, Bilim, 2011, Canpolat, 2002, Chan,1999, Feng ve ark. 1990, İkotun, 2010, Koçak, 2015, Mohseni, 2017, Sevim, 2011, Yıldız, 2010, Yılmaz, 2007). Uygun oranlarda kullanılan zeolit betonun gözenekliliğini azaltırken, bu oranın artması durumunda betonun gözenekliliği de artmaktadır (Poon ve ark., 1999). Karışımların basınç dayanımı sonuçları zeolitin puzolanik etkisinin uzun süreli kür koşullarında daha etkili olduğunu göstermektedir (Aruntaş, 2014, Bideci, 2013, Koçak, 2013, Yılmaz, 2007). Bu durum puzolanlardan beklenen davranışla uyumaktadır (Aruntaş, 2014). Zeolitin betonun dayanımı arttırması içindeki aktif silisin $Ca(OH)_2$ ve su ile reaksiyona girerek yeni CSH jellerinin oluşmasına bağlanmaktadır (Erdoğan, 2003). Yani bu reaksiyon sonucunda portlandit ($Ca(OH)_2$) miktarı azalır, kalsiyum hidrat (CSH) miktarı artar (Massazza,1993).

4.3. Birim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri Sonuçları

Hazırlanan betonların taze beton birim ağırlıkları Tablo 4.3' de verilmektedir. Kontrol numunelerin birim ağırlık değeri $2,493 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edilmiştir.

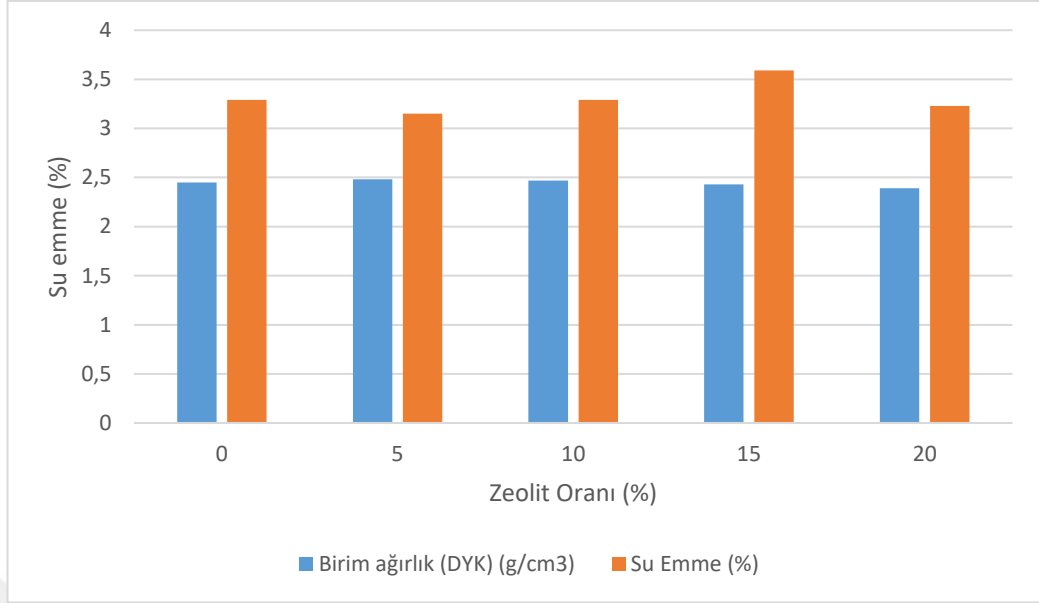
Tablo 4.3. Karışımların taze beton birim ağırlıkları

Zeolit Miktarı (%)	Birim Ağırlık (g/cm ³)
%0	2,493
%5	2,470
%10	2,486
%15	2,418
%20	2,398

Genel olarak kontrol numune ile kıyaslanacak olursa zeolit kullanımı taze betonda birim ağırlık değerinin düşmesine sebep olmuştur (Akgün, 2016, Bilim, 2011, Kılınçarslan, 2008). Bu durum literatürde mevcut çalışmalarla örtüşmektedir. Ancak zeolit miktarının artmasına orantılı olarak birim ağırlık değerinin düştüğü söylenemez. En yüksek birim ağırlık değeri zeolitsiz betonda gözlenirken, %0, %5 ve %15 katkı oranlarında birim ağırlık değeri birbirine yakın değerler verdiğini görüyoruz. %20 oranında zeolit kullanımı durumunda birim ağırlık değeri önemli miktarda düşürmüş ve en düşük birim ağırlık değerini almıştır. Hazırlanan tüm karışımların sertleşmiş betonların % cinsinden doymun kuru yüzey birim ağırlıkları ve su emme değerleri Tablo 4.4'te ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Karışımların DYK birim ağırlık ve su emme değerleri sonuçları

Zeolit Miktarı (%)	DYK Birim Ağırlık (g/cm ³)	Su Emme (%)
%0	2,448	3,29
%5	2,481	3,15
%10	2,467	3,29
%15	2,428	3,59
%20	2,393	3,23



Şekil 4.2. Karışımların DYK birim ağırlık ve su emme değerleri sonuçları

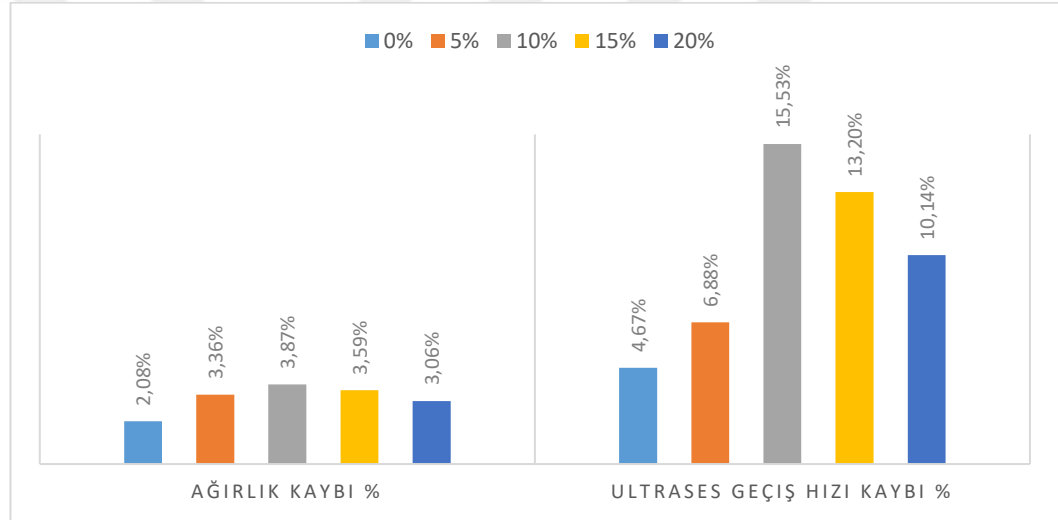
Sertleşmiş betonda artan zeolit ilavesi ile birlikte betonun birim ağırlık değeri düşmüştür. Su emme sonuçlarına göre kontrol numunenin su emme değeri %3,19 iken %5 oranında zeolit ilavesi %0,14 oranında su emmeyi azaltırken, %10 oranında zeolitli betonların su emme değeri kontrol numuneye eşdeğerdir. %15 oranında zeolit ilavesi ise %0,3 oranında su emme değerini arttırmış ve %20 oranında zeolit ilavesi su emme değerini 0,06 oranında azaltmıştır. Görüldüğü gibi su emme değerlerinde belirli bir düzen yoktur. Ancak mevcut durum %15'e kadar zeolit katkısının giderek su emmeyi arttırdığını, %20'de ise oran artışından kaynaklı optimum bir değere gelerek, zeolitin su emmeyi azaltmış olduğunu göstermiştir.

4.4. Donma Çözünme Deneç Sonuçları

Döngüler başmadan ve 200 donma çözünme döngüleri sonrası tüm karışımların ağırlık ve ultrases geçiş hızı değerleri ölçüldü. Bu değerlerden % cinsinden ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı değerlerine ulaşıldı. Tüm karışımların ağırlık ve ultrases geçiş hızı kayıpları Tablo 4.5'te ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.5. 200 döngü sonrası karışımların ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı sonuçları

Zeolit Miktarı (%)	İlk Ağırlık (g.)	İlk Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Son Ağırlık (g.)	Son Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Ağırlık Kaybı (%)	Ultrases Geçiş Hızı Kaybı (%)
%0	3845	4586	3765	4372	2,09	4,66
%5	3897	4594	3766	4278	3,37	6,89
%10	3874	4519	3725	3817	3,86	15,54
%15	3813	4546	3677	3946	3,58	13,20
%20	3758	4410	3644	3963	3,05	10,14



Şekil 4.3. 200 döngü sonrası karışımların ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı sonuçları

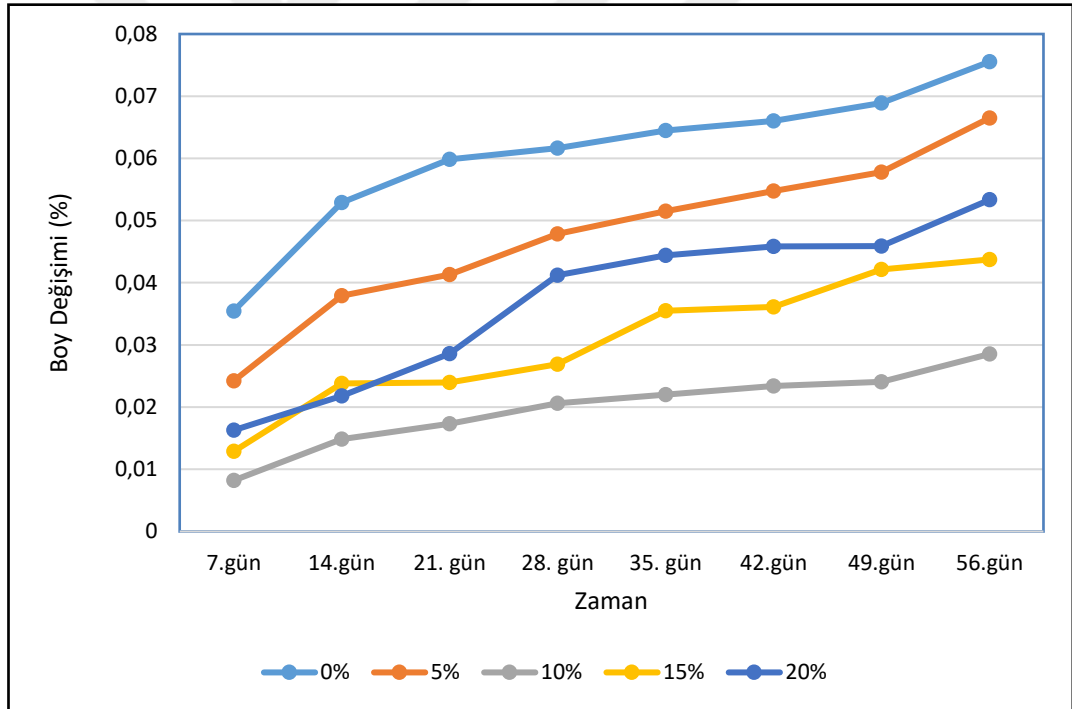
Donma çözünmeye karşı en yüksek direnci zeolitsiz numuneler gösterirken zeolit miktarının artmasıyla direnç düşmüştür. Zeolit katkılı betonlardan %10 zeolit katkılı beton en yüksek ağırlık ve ultrases geçiş hızı kaybını yaşamıştır. Donma çözünme döngüleri sonrasında katkılı, katkısız betonlarda hem ağırlıkta hem de ultrases geçiş hızında düşüş gözlenmiştir. 200 döngü sonucunda ultrases geçiş hızı değerlerine göre üretilen tüm beton örneklerinin kalitesinin whitehurst tarafından yapılan değerlendirmeye göre (3500-4500 m/s) iyi olarak tarif edilen beton sınıfında olduğu görülmektedir (Erdoğan, 2003). Sonuç olarak Balıkesir-Bigadiç yöresinden elde edilen zeoliti mineralinin betonun donma-çözünmeye karşı direncini düşürdüğü sonucuna varılmaktadır.

4.5. Sülfata Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları

Betonların %5 konsantrasyonlu sülfat çözeltisine karşı direncini tayin etmek için yapılan deney sonuçları Tablo 4.6 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.6. Sülfata karşı dayanıklılık test sonuçları

Zaman	%0	%5	%10	%15	%20
7.gün	0,03546	0,02421	0,0082	0,01287	0,01628
14.gün	0,0529	0,03789	0,01483	0,0238	0,02182
21.gün	0,05984	0,04133	0,01731	0,02398	0,0286
28.gün	0,06164	0,04786	0,02059	0,02691	0,04119
35.gün	0,0645	0,05151	0,02199	0,0355	0,04439
42.gün	0,06604	0,05474	0,0234	0,03612	0,04586
49.gün	0,0689	0,05779	0,02405	0,04214	0,04589
56.gün	0,07554	0,06649	0,02853	0,04375	0,05333



Şekil 4.4. Sülfata karşı dayanıklılık test sonuçları

Betonların %5 konsantrasyonlu sülfat çözeltisine karşı direncini tayin etmek için yapılan 56 günlük deney sonucunda zeolit katkıli betonların tümü zeolitsiz kontrol betonuna kıyasla sülfata karşı direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm numunelerin direnci zamanla düşmüştür. En yüksek direnci %10 zeolit katkıli betonlar gösterirken, en düşük direnci zeolitsiz betonlar göstermiştir. Zeolit ikameli

karışımlarda 56. güne kadar parçalanma, dökülme, çatlama veya yumuşama gözlenmemiştir. Zeolitin sertleşmiş çimento harçlarında oluşturduğu iyileştirme literatürde verilen sonuçları desteklemektedir.

4.6. Maliyet Hesabı

Maliyet hesabı yapabilmek için çalışmada kullanılan malzemelerin 2019 yılı ortalama piyasa fiyatları baz alındı. TRAÇİM CEM I 42,5 R Portland çimentosunun 270 TL/ton, zeolit 1000 TL/ton, doğal kum 40 TL/ton, kırma kum 35 TL/ton, kırmataş 1 (5-12 mm) 35 TL/ton, kırmataş 2 (12-20 mm) 35 TL/ton, kimyasal katkı 0,5 dolar/l, karışım suyu 5 TL/ton olarak belirlendi (1 dolar=5,82 TL). Her karışım için kullanılan malzeme miktarlarına göre 1 m³ beton için maliyet hesabı yapıldı ve Tablo 4.7. gösterilmiştir.

Tablo 4.7. 1 m³ beton için maliyet hesabı

Zeolit Katkısı	Su	Çimento	Zeolit	K. katkı	Kum (0-2)	Agr. (0-5)	Agr. (5-12)	Agr. (12-20)	TOPLAM	Ek maliyet %
0%	0,95	126,90	0,00	17,78	19,31	16,59	19,29	8,76	₺209,58	0
5%	0,95	120,56	23,50	17,78	19,22	16,51	19,20	8,72	₺226,44	8,04
10%	0,95	114,21	47,00	17,78	19,13	16,43	19,11	8,68	₺243,29	16,08
15%	0,95	107,87	70,50	17,78	19,04	16,36	19,02	8,64	₺260,14	24,12
20%	0,95	101,52	94,00	17,78	18,95	16,28	18,92	8,60	₺277,00	32,17

Karışımların su/bağlayıcı ve kimyasal katkı oranları bütün karışımlar için sabit alındı. Maliyet hesabı sonuçlarına göre Portland çimentosu ile hazırlanan 1 m³ betonun fiyatı 209,58 TL iken, %5 zeolit katkılı betonun 226,44 TL, %10 zeolit katkılı betonun 243,29 TL, %15 zeolit katkılı betonun 260,14 TL ve %20 zeolit katkılı betonun 277 TL olarak hesaplanmıştır. Zeolitin birim fiyatının yüksek olması nedeniyle zeolit miktarı arttıkça fiyat artmıştır. Ancak zamanla zeolitin araştırılması ve kullanılmasına bağlı olarak fiyatının düşmesi mümkün olabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yapılan deneyler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. En yüksek yayılma çapı kontrol betonunda görülürken, zeolit katkı miktarı arttıkça yayılma çapı düşmüştür. %5, %10 ve %15 zeolit katkılı betonların yayılma çapı sonuçları birbirine yakınken, %20 oranında zeolit kullanımı işlenebilirliği ciddi oranda düşürmüştür.
2. 3 ve 7 günlük erken kür koşullarında %15'e kadar katkı kullanımı betonun basınç dayanımı kontrol betonuna kıyasla iyi ya da daha iyi sonuçlar verirken, %20 oranında zeolit kullanımı kontrol betonuna kıyasla basınç dayanımı %16-20 oranında düşürmüştür.
3. 28 ve 90 günlük uzun kür koşullarında %5, %10 ve %15 oranlarında zeolit katkılı betonların dayanımı kontrol betonuna kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Hem 28 günlük hem de 90 günlük sonuçlarında %20 zeolit katkılı betonların dayanımı kontrol betonuna nerdeyse eşdeğer sonuçlar vermiştir. Ortaya çıkan bu durum zeolitün puzolanik etkisinin uzun süreli kür koşullarında daha etkili olduğunu göstermektedir. 90 gün sonunda ise en yüksek dayanımı %5 zeolit katkılı betonlar vermiştir.
4. Sonuç olarak uygun bir zeolitün belli oranda kullanılması durumunda basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir.
5. Taze betonda birim ağırlık değeri tüm zeolit katkılı betonlarda kontrol betonuna kıyasla daha düşükken, %20 zeolit katkılı betonun birim ağırlık değeri en düşüktür. Sertleşmiş betonda zeolit ilavesi ile birlikte birim ağırlık değeri düşmüştür.
6. Su emme %5 zeolit kullanımında en düşük sonucu verirken, %15 zeolit kullanımında en yüksek değeri almıştır. Zeolitün artışı %15'ten sonra su emmeyi arttırmamıştır.
7. Donma-çözünmeye karşı en yüksek direnci zeolitsiz numuneler gösterirken zeolit miktarının artmasıyla direnç düşmüştür. Zeolit katkılı betonlardan %10 zeolit katkılı beton en yüksek ağırlık ve ultases geçiş hızı kaybını yaşamıştır. Sonuç olarak

Balıkesir-Bigadiç yöresinden elde edilen zeolit mineralinin betonun donma-çözünmeye karşı direncini düşürdüğü sonucuna varılmaktadır.

8. Sülfata karşı dayanıklılığı tayin etmek için hazırlanan %5 konsantrasyonlu sülfat çözeltisinde yapılan 56 günlük deney sonucunda zeolit katkılı betonların tümü zolitsiz kontrol betonuna kıyasla sülfata karşı direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek direnci %10 zeolit katkılı betonlar gösterirken, en düşük direnci zeolitsiz betonlar göstermiştir. Zeolit ikameli karışımlarda 56. güne kadar parçalanma, dökülme, çatlama veya yumuşama gözlenmemiştir. Zeolitin sertleşmiş çimento harçlarında oluşturduğu iyileştirme literatürde verilen sonuçları desteklemektedir.
9. Zeolit kullanımı %32,17'ye kadar maliyeti arttırmaktadır. Her %5 Zeolit artışı için yaklaşık %8'lik bir ek maliyet gelmektedir.

Sonuç olarak çimento ikame malzemesi olarak uygun kalitede zeolitin uygun oranlarda kullanılabilmesi sonucuna varılmaktadır. Ancak zeolitin karakterizasyonun iyi belirlenebilmesi gerekmektedir. Ayrıca iyi karakterizasyon yapılmış olan zeolitin kullanımının özendirilmesi ve daha yüksek oranda kullanılması ülkemizde yüksek rezerve sahip bu malzemenin değerlendirilmesini sağlayacaktır. Kullanımın artması maliyetlerin de düşmesine neden olacaktır.

KAYNAKLAR

Ahmadi B., Shekarchi M., Use of Natural Zeolite as a Supplementary Cementitious Material, *Cement & Concrete Composites*, 2010, **32**, 134-141.

Akgün Y., Yazıcıoğlu Ö. F., İki Farklı Zeolit Katkısının Çimento Harç Aşınma Dayanımına Etkisi, *Ordu Üniversitesi Bilim Teknik Dergisi*, 2016, **6**(1), 94-104.

Aruntaş H. S., Beycioğlu A., Puzolanik Zeolit (Klinoptilolit) Katkılı Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2014, **1**(2), 57-67.

ASTM C1012-04, Standart Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States, 2004.

ASTM C230/C230-14, Standart Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States, 2014.

ASTM C666/C 666-03, Standart Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States, 2003.

Baradan B., Yazıcı H., Aydın S., *Beton*. Birleşik Matbaacılık, İzmir, 2015.

Bilim C., Çimento Harçlarında İkame Malzemesi Olarak Zeolit ve Silis Dumani Kullanımı, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2011, **27**(4), 339-345.

Bilgin Ö., Kantarcı S., Bigadiç (Balıkesir, Türkiye) Civarında Gözlenen Höylandit/Klinoptilolit Zeolit Oluşumlarının Teknolojik Özelliklerinin Araştırılması, *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2018, **20**(1), 589-601.

Breck D. W., *Zeolite Molecular Sieves: Structure Chemistry and Use*, New York, USA, 1974.

Canpolat F., Yılmaz K., Doğal Zeolit ve Ucucu Kül Katkılı ve Katkısız Harçların Sülfat Dayanıklılığı, *Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 2002, **XVI**(2).

Chan S. Y. N. , Ji X., Comparative Study of the Initial Surface Absorption and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite, Silica Fume and PFA Concretes, *Cement & Concrete Composites*, 1999, **21**, 293-300.

Daskiran E.G. , Daskiran M.M. , Effectiveness of Natural Zeolite in Mitigating Alkali Silica Reaction Expansions, *World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 2015, **9**(9).

Dayı M., Aruntaş H.Y., Çavuş M., Şimşek O., Zeolit, Ucucu Kül ve Atık Cam Malzemelerin Portland Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2013, **28**(3), 491-499.

Dursun S., Pala A., Lead Pollution Removal from Water Using a Natural Zeolite, *Journal of International Environmental Application and Science*, 2007, **7**(1), 11-9.

DPT, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri II (Mika-Zeolit-Lületaşı) Çalışma Grubu Raporu, *DPT*, 56-70, 2001.

Erdoğan T.Y, *Beton*, 1. Baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 116-117, 2003.

Erdoğan K., Tokyay M., Türker P., Traslara ve Traslı Çimentolar, TÇMB, AR-GE, Y99-2, Ankara, 2007.

Esenli F., Uz B., Kumbasar I., Şile Bölgesi (İstanbul) Üst Kretase Volkaniklerinde Mordenit Türü Zeolit Oluşumu, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 1998, **40**(1), 49-56.

Feng N. Q., Li Z., G., Zang X.W., High-Strength and Flowing Concrete with a Zeolite Mineral Admixture, *Cement and Aggregates*, ASTM, 1990, **12**, 61-69.

Janotka I., Krajci L., Dzivak M., Properties and Utilization of Zeolite-Blended Portland Cements, *Clays and Clay Minerals*, 2003, **51**(6), 316-324.

Gerengi H., Kurtay M., Durgun H., Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 1 m HCL Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu, *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara-Turkey, 28-30 May. 2015.

Gottardi G., Galli E., Natural Zeolites, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1985.

Gökçe H.S., Taban S., Şimşek O., Zeolitik Tüf İkamelinin Farklı Agregalar Üzerinde Alkali-Silika Reaksiyonu Etkilerinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi*, 2010, **25**(4), 803-809.

Gülen J., Zorbay F., Arslan S., Zeolitler ve Kullanım Alanları, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2012, **2**(1), 63-68.

İkotun B.D., Ekelu S., Strength and Durability Effect of Modified Zeolite Additive on Concrete Properties, *Construction and Building Materials*, 2010, **24**, 749-757.

Janotka I., Krajci L., Dzivak M., Properties and Utilization of Zeolite-Blended Portland Cements, *Clays and Clay Minerals*, 2003, **51**(6), 616-624.

Jo B., Choi J., Yoon K., Park J., Material Characteristics of Zeolite Cement Mortar, *Construction and Building Materials*, 2012, **36**, 1059-1065.

Karakurt C., Topçu İ. B., Effect of Blended Cements Produced with Natural Zeolite and Industrial By-Products on Alkali-Silica Reaction and Sulfate Resistabce of Concrete, *Construction and Building Materials*, 2011, **25**, 1789-1795.

Kılınç C., Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, Hazır Beton, 2012.

Kılınçarslan Ş., Zeolit İçeren Betonların Termomekanik Özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2007, **11**(3), 262-267.

Koçak Y., Savaş M., Zeolit İkameli Betonların MgSO₄ Etkisine Karşı Performansı, *2nd International Sustainable Buildins Symposium*, Ankara, Türkiye, 28-30 May 2015.

Kocak Y., Tascı E., Kaya U., The Effect of Using on the Properties and Hydration Characteristics of Blended Cements, *Construction and Building Materials*, 2013, **47**, 720-727.

Köktürk U., Zeolit Madenciliği ve Çevre Sağlığına Etkileri, *Endüstriyel Hammadeler Sempozyumu*, İzmir-Türkiye, 21-22 Nisan 1995.

Küçükyıldırım E., Uzal B., Characterictcs of Calsined Natural Zeolites for Use in High-Performance Pozzolan Blended Cements, *Construction and Building Materials*, 2014, **74**, 229-234.

Malolepszy J., Grabowska E., Sulphate Attack Resistance of Cement with Zeolite Additive, *Procedia Engineering*, 2015, **108**, 170-176.

Massazza F., Pozzolanlic Cement, *Cement and Concrete Composites*, 1993, **15**, 185-214.

Meier W., Olson D., Baerlocher C., Atlas of Zeolite Structure Types, *Zeolites*, 1996, **17**(1-2), 1-229.

Mertens G., Snellings R., Van Balen K., Bicer-Simsir B., Verlooy P., Elsen J., Pozzolanlic Reactions of Common Natural Zeolites with Lime and Parameters Effecting Their Reactivity, *Cement and Concrete Research*, 2009, **39**, 233-240.

Mishra G., L Box Test on Self Compacting Concrete, <https://theconstructor.org/practical-guide/l-box-test-on-self-compacting-concrete/6038/> (Ziyaret Tarihi: 04 01 2020).

Mohseni E., Tang W., Cui H., Chloride Diffusion and Acid Resistance of Concrete Containing Zeolite and Tuff as Partial Replacements of Cement and Sand, *MDPI*, DOI:10.3390/ma10040372.

Naiqian F., Tingyu H., Mechanism of Natural Zeolite Powder in Preventing Alkali-Silica Reaction in Concrete, *Advances in Cement Research*, 1998, **10**(3), 101-108.

- Najimi M., Sobhani j., Ahmadi B., Shekarchi M., An Experimental Study on Durability Properties of Concrete Containing Zeolite as a Highly Reactive Natural Pozzolan, *Construction and Building Materials*, 2012, **35**, 1023-1033.
- Narasimhulu K., Gettu R., Babu G., Beneficiation of Natural Zeolite though Flash Calsination for Its Use as a Mineral Admixture in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000800.
- Owsiak Z., Czapik P., Interfacial Transition Zone of Cement Paste-Reavtive Aggregate in Cement-Zeolite Mortars, *Bullet in of Tje Polish Academy Of Sciences Technical Sciences*, DOI:10.1515/bpasts-2015-0004
- Oymael S., Examination of the Internal Structure of Zeolite-Blended Cements, *Trakya Üniversitesei J Sci.*, 2010, **11**(1), 29-39.
- Özen S., Göncüoğlu M. C., Liguori B., Gennaro B., Cappelletti P., Gatta G.D. Lucolano F., A Comprehesive Evaluation of Sedimentary Zeolites From Turkey as Pozzolanic Adition of Cement and Lime- Based Binders, *Construction and Building Materials*, 2016, **16**, 46-61.
- Poon C.S, Lam L., Kou S. C., Lin Z. S., A Study on The Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes, *Construction and Building Materials*, 1999, **13**, 427-432.
- Perraki T., Kakali G., Kontoleon F., The Effect of Natural Zeolites on The Early Hydration of Portland Cement, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2003, **61**, 205-212.
- Quanlin N., Naiqian F., Effect of Modified Zeolite on The Expansion of Alkaline Silica Reaction, *Cement and Concrete Research*, 2005, **35**, 1784-1788.
- Sallı Bideci Ö., Bideci A., Oymael S., Zeolitik Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi, *SDU Internatinal Technologic Science*, 2013, **5**(3), 70-76.
- Sarikaya H., Şengün N., Zeolit Katkılı Betonların Elastisite Modülünün Tahmin Edilmesi, *E-Journal of New World Sciences Academy*, 2009, **4**(4), 483-494.
- Sedlmajer M., Zach J., Hroudova P., Rovnanikova P., Possibilities of Utilization Zeolite in Concrete, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil Environmental Engineering*, 2015, **9**(5).
- Seraj S., Ferron R., Juenger M., Calcining Natural Zeolites to Improve Their Effect on Cementitious, *Cement and Concrete Research*, 2016, **85**, 102-110.
- Sevim U. K, Okumuş N., Zeolit ve Silika Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Geçirimsilik Özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Mühendisik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2011, **26**(2), 57-63.
- Skarendahl A., Petersson Ö., *Self Compacting Concrete*, State-of-Art of Rilem Technical Comitte,174-SCC, 2000.

Soylu M., Gökkuş Ö., Türkiye’deki Doğal Zeolitler ve İyon Değişimi Uygulamaları, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2017, **6**(1), 11-20.

Şahmaran M., Özkan N., Keskin S.B., Uzal B., Yaman İ.Ö., Erdem T.K., Evaluation of Natural Zeolite as a Viscosity-Modifying Agent for Cement-Based Grouts, *Cement and Concrete Reserch*, 2008, **38**, 930-937.

Şişman C. B., Kocaman İ., Gezer E., Doğal Zeolitten Üretilen Hafif Betonun Tarımsal Yapılarda Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2008, **5**(2).

Taban S., Şimşek O., Zeolitik Tüf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerie Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2009, **24**(1), 145-153.

Topçu İ.B., Bilir T., Baylavlı H., Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 2008, **XXI**(1).

Tran Y.T., Lee J., Kumar P., Kim K.H., Lee S.S., Natural Zeolite and its Application in Concrete Composite Production, *Composites Part B*, 2019, **165**, 354-364.

TS EN 12390-4, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 4: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımı- Deney Makinelerinin Özellikleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12350-8, Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 8: Kendiliğinden Yerleşen Beton-Çökme Yayılma Deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2011.

Uzal B., Turanlı L., Blended Cements Containing High Volume of Natural Zeolites: Properties Hydration and Paste Microstructure, *Cement & Concrete Composites*, 2012, **34**, 101-109.

Uzal B., Turanlı L., Yücel H., Göncüoğlu M.C., Çulfaz A., Pozzolanic Activity of Clinoptilolite: Acomparative Study with Silica Fume, Fly Ash and A non-Zeolitic Natural Pozzolan, *Cement And Concrete Research*, 2010, **40**, 398-404.

Virta, R.L., Zeolites, *US Geological Survey Minerals Yearbook*, 2002, **84**, 1-4.

Yılmaz B., Uçar A., Öteyaka B., Uz V., Properties of Zeolitic Tuff (Clinoptilolite) Blended Portland Cement, *Building and Environment*, 2007, **42**, 3808-3815.

Yıldız K., Dorum A., Koçak Y., Pomza Zeolit ve CEM I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik ve Termal Uyumunun Yüksak Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2010, **25**(4), 867-879.

Yıldız K., Pomza ve Zeolit Katkılı Betonun Yol Kaplamalarında Kullanılabilirliği ve NaCl Etkisinin Araştırılması, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2012, **1**(1), 69-79.

Zhang J., Ding, X., Wang Q., Zheng X., Effective Solution for Low Shrinkage and Low Permeability of Normal Strength Concrete Using Calcined Zeolite Particles, *Construction and Building Materials*, 2018, **160**, 57-65.

Zeolyst International, Zeolite FAQ's , <http://zeolyst.com/html/faq.asp> (Ziyaret tarihi:11 01 2020).





Ek-A



Şekil A.1. Kür havuzunda bekletilen silindir numuneler



Şekil A.2. Donma çözünme testi için hazırlanan referans numunenin merkez sıcaklığı



Şekil A.3. Donma çözünme testi için hazırlanan referans numunenin gösterimi

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Geçer Ş., Yıldırım S.T., Kendiliğinden Yerleşen Betonda Çimento İkame Malzemesi Olarak Zeolitin Kullanılabilirliği, *5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Zeytinburnu-İstanbul, 21-22 Aralık 2019.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Mardin-Midyat'ta doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Midyat'ta tamamladı. 2011 senesinde Kocaeli Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisi Bölümü'nde İngilizce hazırlık sınıfı ile birlikte 2016 senesinde İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2017-2020 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

