

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN HARÇ NUMUNELERİNİN DAYANIM ve
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arda IŞIK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA

Haziran 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN HARÇ NUMUNELERİNİN DAYANIM ve
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Arda IŞIK
(506051403)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA

Haziran 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506051403 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Arda IŞIK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN HARÇ NUMUNELERİNİN DAYANIM ve DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üy. Mehmet Şeref SÖNMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **04 Haziran 2018**





Kıymetli Eşime,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamda değerli vaktini bana ayırarak, bilgi ve tecrübelerini paylaştıkları için pek kıymetli hocalarım Prof. Dr. M. Ercan AÇMA ve Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarım sırasında desteğini benden esirgemeyen Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarına ve çalışanlarına gönülden teşekkür ederim.

Mayıs 2018

Arda Işık
Fizik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.1.1 Dayanım testleri	3
1.1.2 Klorür geçirimsizliği dayanıklılık (durabilite) testleri	3
1.1.3 Karbonatlaşma direnci dayanıklılık (durabilite) testleri	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Çimento ve Beton	7
2.2 Bazı Bağlayıcı Çeşitleri ve Özellikleri	9
2.2.1 Zeolit	10
2.2.2 Yüksek fırın cürufu	14
2.2.3 Bor mineralleri, boraks ve borik asit atıkları	20
2.3 Türkiye ve Dünya’da Hazır Beton	25
2.4 Beton/Harç Numunelerinin Dayanım ve Dayanıklılık (Durabilite) Deneyleri	28
2.4.1 Beton/Harç numunelerinin basınç dayanım deneyi	28
2.4.2 Beton/Harç numunelerinin dayanıklılık (durabilite) deneyi	28
2.4.2.1 NT BUILD 492 Beton/Harç numunelerinin klorür migrasyon katsayısının tayini deneyi	29
2.4.2.2 ASTM C1202-12 Beton/Harç numunelerinin klorür iyonu geçişine karşı direnci deneyi	36
2.4.2.3 EN 13295 Beton/Harç numunelerinin karbonatlaşma direncinin tayini deneyi	38
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
3.1 Hammadde Uygunluk Deney Sonuçları	43
3.2 Karışım ve Dizayn Çalışması	45
3.3 Eğilme ve Basma Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	49
3.4 Klorür Geçirimsizliği Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları	57
3.5 Karbonatlaşma Direnci Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları	66
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	85

KISALTMALAR

GGBS	: Ground Granulated Blast Furnace Slag
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
TS	: Türk Standardı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
NT	: Nordtest
EN	: European Norm
CEM	: Cement
SEM	: Scanning Electron Microscope
DTA	: Differential Thermal Analysis
TGA	: Thermogravimetric Analysis
XRD	: X-Ray Diffraction
DC	: Direct Current
THBB	: Türkiye Hazır Beton Birliği



SEMBOLLER

I	: Akım şiddeti
U	: Uygulanan gerilim
D_{nssm}	: Migrasyon katsayısı
V	: Volt
Ø	: Çap
Q	: Yük miktarı
ppm	: Milyonda bir
pH	: Asitlik bazlık derecesi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Toz halindeki bazı bağlayıcı maddelerin sınıflandırılması.	8
Çizelge 2.2 : DC akım-gerilim-deney süresi tablosu.....	33
Çizelge 2.3 : Yük değeri (coulombs) ile beton/harç test numunesinin klorür iyonu geçirimsizliği arasındaki ilişki.	38
Çizelge 3.1 : Kullanılan hammaddelerin kimyasal içerik analizi sonuçları	44
Çizelge 3.2 : Numune karışım oranları.....	47
Çizelge 3.3 : Eğilme ve basma basınç dayanımı deney sonuçları	50
Çizelge 3.4 : NT BUILD 492 deneyi ölçüm verileri.	58
Çizelge 3.5 : ASTM C1202-12 deneyi ölçüm verileri.....	59
Çizelge 3.6 : Numunelerin klorür geçirimsizliği deney sonuçları.	62
Çizelge 3.7 : Numunelerin karbonatlaşma direnci deneyi sonuçları.	68



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Donatı korozyonu hasarı...	6
Şekil 2.2	: Çimento üretim prosesi...	9
Şekil 2.3	: Döner fırın içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar...	9
Şekil 2.4	: Zeolit minerali.	11
Şekil 2.5	: Avrupa’da Thurament ile inşa edilen önemli yapılar.	15
Şekil 2.6	: Demir üretiminde kullanılan yüksek fırın.	15
Şekil 2.7	: Karabük Kardemir Demir Çelik Fabrikası stok sahasında yüksek fırın cürufu	17
Şekil 2.8	: Öğütülmüş borjips atığı.	22
Şekil 2.9	: Türkiye’de 2006 – 2014 yılları arasında gerçekleştirilen hazır beton üretimi	27
Şekil 2.10	: Avrupa bölgesinde 2006 – 2013 yılları arasında gerçekleştirilen hazır beton üretimi.	27
Şekil 2.11	: NT BUILD 492 deneyi test numunelerinin hazırlanması.	30
Şekil 2.12	: Numune vakum işlemi deney sistemi.	30
Şekil 2.13	: Test numunelerinin silikon kauçuk aparatlara yerleştirilmesi.	31
Şekil 2.14	: Silikon kauçuk aparatların deney havuzlarına yerleştirilme şekli.	32
Şekil 2.15	: DC güç kaynakları.	32
Şekil 2.16	: NT BUILD 492 deney düzeneği havuzları.	33
Şekil 2.17	: Numune yarma aparatı	34
Şekil 2.18	: Klorür migrasyonuna maruz kalmış beton numune görseli .	34
Şekil 2.19	: Klorür migrasyon derinliği ölçüm yöntemi.	35
Şekil 2.20	: ASTM C1202-12 deney ekipmanı.	36
Şekil 2.21	: ASTM C1202-12 deney düzeneği.	37
Şekil 2.22	: CO ₂ gaz konsantrasyonu ölçüm ve akış kontrol sistemi	40
Şekil 2.23	: Hızlı karbonatlaşma deney düzeneği.	40
Şekil 2.24	: 5 ölçüm ile gerçekleştirilen karbonatlaşma derinliği ölçüm yöntemi.	41
Şekil 2.25	: Geniş kenar etkisi ile 3 ölçüm ile gerçekleştirilen karbonatlaşma derinliği ölçüm yöntemi.	42
Şekil 3.1	: Numune kür havuzu ve hazırlanan numunelerden örnekler.	48
Şekil 3.2	: Basınç dayanımı ve karbonatlaşma direnci deneyleri için hazırlanan kontrol ve test numuneleri.	48
Şekil 3.3	: NT BUILD 492 klorür geçirimsizliği test numuneleri.	49
Şekil 3.4	: Çimento eğilme ve basma basınç dayanımı test makinası.	49
Şekil 3.5	: 28 günlük eğilme basınç dayanımı deney sonuçları.	51
Şekil 3.6	: 90 günlük eğilme basınç dayanımı deney sonuçları.	52
Şekil 3.7	: 28 günlük basma basınç dayanımı deney sonuçları.	52
Şekil 3.8	: 90 günlük basma basınç dayanımı deney sonuçları.	53
Şekil 3.9	: Karbonatlaşmamış ve karbonatlaşmış numune eğilme basınç dayanımı karşılaştırması.	55

Şekil 3.10 : Karbonatlaşmamış ve karbonatlaşmış numune basma basınç dayanımı karşılaştırması.....	57
Şekil 3.11 : NT BUILD 492 deney numune görselleri.....	60
Şekil 3.12 : ASTM C1202-12 deneyi numune akım-zaman grafiği.....	61
Şekil 3.13 : Harç numunelerinin klorür geçirimsizlik performansı deney sonuçları..	63
Şekil 3.14 : Harç numunelerinin klorür geçirimsizlik değişimi deney sonuçları..	64
Şekil 3.15 : NT BUILD 492 ve ASTM C1202-12 deney sonuçları arasındaki korelasyon.....	65
Şekil 3.16 : NT BUILD 492 ve ASTM C1202-12 deney sonuçlarının logaritmik kıyaslaması.....	66
Şekil 3.17 : A, B, C, D, E, F, G, H, I ve J kodlu numunelerin karbonatlaşma direnci görselleri.....	69
Şekil 3.18 : K, L ve M kodlu numunelerin karbonatlaşma direnci görselleri.....	69
Şekil 3.19 : Kontrol ve test numunelerinin karbonatlaşma direncinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 3.20 : Kontrol numunesine göre test numuneleri karbonatlaşma oranındaki değişim.....	71
Şekil 4.1 : Basma basınç dayanımı ve dayanıklılık deney sonuçları.....	75

FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN HARÇ NUMUNELERİNİN DAYANIM ve DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Türkiye, yılda 120 milyon metreküpe yaklaşan beton üretimi ile Avrupa’da en çok beton üretimi yapan birinci, dünyada ise üçüncü ülke konumundadır. En önemli yapı malzemelerinin başında gelen betonun servis ömrü boyunca işlevini yerine getirebilmesine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilmektedir. Ülkemizde özellikle son yıllarda gelişen beton üretim teknolojileri ile birlikte üretilen betonun basınç dayanımının (yük taşıma kapasitesi) yanında durabilitesi (kalıcılık, dayanıklılık) de büyük önem kazanmıştır. Betonun günümüzde yapı elemanı olarak kullanım şekli olan betonarme ise betonun demir donatı ile biraraya gelmesi sonucu oluşan kompozit bir malzemedir ve donatı, betona üstün özellikler kazandırmaktadır. Betonun basınç dayanımındaki artış betonun birçok özelliği gibi durabilitesini de olumlu olarak etkilemektedir. Ancak yeterli basınç dayanımını sağlayan betonarme bir eleman, tasarım açısından yeterli durabilite özelliklerine sahip değil ise kısa sürede kullanılamaz hale gelebilir ya da uzun vadede ilk üretim maliyetine varan bakım ve onarım masrafları doğurabilir. Örneğin 1999 yılında gerçekleşen Marmara depreminde yıkılan birçok binada donatı korozyonu nedeniyle donatıların neredeyse sadece izinin kaldığı gözlemlenmiştir. En az bakım ve onarım gerektirecek şekilde dizayn edilen betonarme yapılar, başlangıç gideri nispeten az olan fakat sık sık bakım gerektirecek yapılara göre çok daha ekonomiktir.

Betonun bozulmasına yol açan etmenler fiziksel, mekanik ve kimyasal kökenli olabilmektedir. Fiziksel ve mekanik etmenlere donma-çözülme, darbe, aşınma, erozyon ve oyulma örnek olarak gösterilebilir. Kimyasal etmenlere ise alkali-agrega reaksiyonları, donatı korozyonu, karbonatlaşma, sülfat etkisi örnek verilebilir. Doğru tasarlanmış ve geçirimsiz bir beton, içerisinde yer alan donatıyı korozyondan koruyarak yapının dayanıklılığını istenen düzeyde tutar. Ancak betonun yeterli geçirimsizliğe sahip olmamasından dolayı zararlı iyonların betonun içerisine difüzyonu ya da karbonatlaşma ile betonun zamanla alkalinitesini kaybetmesi sonucu donatı korozyonu gerçekleşmektedir. Günümüzde donatı korozyonu betonarme yapılarda servis ömrünü belirleyen en önemli faktörlerin başında kabul edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, doğal zeolit minerali ve başka sanayi kollarının atık malzemesi konumundaki öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve borjips atığının tek başına ve belirli karışım oranlarında kombine şekilde harç numuneleri üretiminde kullanılmasının numunelerin basınç dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi araştırılacaktır.

Harç numunelerinin hazırlanması ve basınç dayanımı testleri TS EN 933-1 standardına göre gerçekleştirilecektir. Harç numunelerinin klorür iyon geçirimsizliği ve karbonatlaşma direnci üzerine durabilite deneyleri yapılacaktır. Klorür iyon geçirimsizliği testleri ASTM C1202-12 ve NT BUILD 492 standartlarına göre, karbonatlaşma direnci testleri ise EN 13295 standardına göre gerçekleştirilecektir.

Çalışma sonucunda doğal zeolit mineralinin belirli oranlarda harç numuneleri içerisinde kullanılmasının, özellikle dayanım ve durabilite özelliklerine kayda değer bir olumsuz etkisinin olmadığı söylenebilmektedir. Başka sanayi kollarının atık malzemesi durumundaki yüksek fırın cürufu (YFC) ve borjips atığının ise durabilite

özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde üretim amacına yönelik olarak belirli oranlarda harç numuneleri içerisinde kullanılabileceği görülmüştür. Bu çalışmanın deneyleri gerçekleştirilen atık malzemelerin beton üretiminde çimento yerine ikame edilerek kullanılabilmesi yönüyle, çevre duyarlılığının büyük önem kazandığı günümüzde atık malzemelerin bertarafına katkı sağlayacağı ve üretim prosesi sırasında yüksek oranda karbondioksit emisyonuna sebebiyet veren çimentoya olan ihtiyacı azaltacağı düşünülmektedir.



INVESTIGATION OF THE STRENGTH AND DURABILITY CHARACTERISTICS OF MORTAR SAMPLES BY USING DIFFERENT MINERAL ADDITIVES

SUMMARY

Turkey is the first concrete producer in Europe with the production of concrete approaching 120 million meters per year and the third country in the world. Concrete is one of the most important building materials and the ability of concrete to function during its service life is called durability or permanence. Durability has gained importance in addition to pressure resistance (load bearing capacity) of concrete produced in our country, especially with concrete production technologies developed in recent years. The reinforced concrete, which is used as a building element form of concrete, is a composite material which is formed as a result of coming up with the iron reinforcement of the concrete and the reinforcement gives superior properties to the concrete. The increase in the compressive strength of concrete also affects the durability like many properties of concrete. However, if a reinforced concrete element that provides sufficient pressure resistance can not be used in a short period of time if it does not have sufficient durability characteristics in terms of design, it may result in maintenance and repair costs reaching the initial production cost in the long run. For example, in the Marmara earthquake that took place in 1999, it has been observed that in many buildings destroyed due to reinforcement corrosion, almost all of the equipment was left alone. Reinforced concrete structures designed to require minimal maintenance and repair are much more economical than structures that have relatively little initial start-up but require frequent maintenance.

The factors that lead to the deterioration of concrete can be of physical, mechanical and chemical origin. Examples of physical and mechanical factors include freeze-thaw, impact, abrasion, erosion and scraping. Chemical agents include alkali-aggregate reactions, reinforcement corrosion, carbonation, sulphate effect. A properly designed and impermeable concrete keeps the durability of the structure at the desired level by protecting the fixture contained therein from corrosion. However, since the concrete does not have sufficient impermeability, the corrosion of the concrete occurs due to the diffusion of harmful ions into the concrete or the alkalinity of the concrete with time. At present, reinforcement corrosion is accepted as one of the most important factors determining service life in reinforced concrete structures.

In this thesis study, the effects of zeolite mineral and other industrial wastes on the compression strength and buoyancy properties of pulverized blast furnace slag (GGBS) and the use of boric acid slag alone and in combination with certain mixture ratios in the production of mortar samples will be investigated.

Preparation of mortar specimens and compressive strength tests shall be carried out according to TS EN 933-1 standard. Drainage tests shall be carried out on the chloride ion permeability and carbonation resistance of the mortar samples. Chloride ion permeability tests will be performed according to ASTM C1202-12 and NT BUILD 492 standards, and carbonation resistance tests will be conducted according to EN 13295 standard.

As a result of the study, the use of natural zeolite mineral in mortar specimens at certain ratios was found to have no significant negative effect on strength and buoyancy properties. It has been observed that blast furnace slag (GGBS), which is waste material of other industries, and borjips wastes are evaluated together with their durability properties, can be used in mortar specimens for production purposes at certain rates. This work will contribute to the disposal of waste materials and reduce the need for cement which causes carbon dioxide emissions in high production during the production process, since the waste materials can be used instead of cement in the production of concrete.



1. GİRİŞ

Beton diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında daha kolay şekil verilebilir olması, ekonomik ve dayanıklı olması, üretiminde daha az enerji tüketilmesi, her yerde üretilebilir ve estetik olması özellikleri ile en çok kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir [1]. Günümüzde çoğu yapı tasarımı yapılırken malzemelerin öncelikli olarak dayanım ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Ancak son yıllarda özellikle şiddetli çevresel etki şartlarına maruz kalacak yapıların tasarım aşamasında yapının servis ömrüne göre projelendirme yapılmaktadır. Bu aşamada beton elemanlarının yük taşıma kapasitesini ifade eden dayanım yanında dayanıklılık özelliklerinin de büyük önem kazandığı görülmektedir. Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan güvenli bir şekilde yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilir [2].

1970’li yılların ortalarına kadar betonarme yapıların çok dayanıklı, uzun ömürlü bir yapı türü olduğuna inanılmakta idi. Bu inanışın temelinde betonun zamanla dayanımının artması ve donatı çeliğinin beton pas payı tabakası tarafından korozyona karşı korunması yatmaktadır. Gerçekten beton üretim teknolojisine uygun projelendirilmiş, mühendislik hizmeti alarak üretilmiş, geçirimsiz, yalıtımlı ve korunmuş yapılar için bu kavram doğrudur. Ancak Avrupa’da özellikle 2. Dünya savaşıdan sonra yapılan çok sayıda sanat yapısı, ABD’de çok sayıda köprü önemli durabilite sorunları yaşamış ve yaşamaktadır. Ülkemizde ise özellikle Marmara depreminden sonra zarar gören ve göçen birçok binada donatıların korozyon nedeniyle neredeyse sadece izlerinin kaldığı gözlenmiştir [2].

Betonun dayanıklılığı, boşluk yapısının özellikleriyle yakından ilgilidir. Beton için zararlı olabilecek maddelerin betonla etkileşimi ve betona tesir etmesi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir. Bu nedenle betonun geçirimsizliği, dayanıklılığını etkileyen en önemli parametre olarak ortaya çıkar. Betonun geçirimsizlik özellikleri boşluk oranına ve boşlukların birbirleriyle bağlantılı olup olmamasına bağlıdır. Boşluk miktarı ve boşlukların birbirleri ile olan bağlantıları

arttıkça çeşitli zararlı maddelerin, iyonlar ve suyun beton içine girmesi ve taşınımı kolaylaşır. Bunun sonucunda beton daha kolay hasar görür, dayanıklılık olumsuz yönde etkilenir [3].

1.1 Tezin Amacı

Beton günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Türkiye, Avrupa’da en çok beton üretimi yapan birinci ülke konumundadır. Ülkemiz deprem kuşağında yer aldığı için kalitesiz yapı malzemeleri ile üretilen mevcut yapı stoğunun standartlara uygun yapı malzemeleri ile yenilenmesi kaçınılmazdır. Bu amaçla ülkemizde özellikle İstanbul gibi kentleşmenin yoğun olduğu büyük şehirlerde kentsel dönüşüm projeleri hayata geçirilmiştir. Bu durum yapıların taşıyıcı elemanlarının başında gelen betona olan ihtiyacı oldukça arttırmıştır. Günümüzde beton konusunda yeni üretim teknikleri ile betonarme elemanların yük taşıma kapasitesi yanında uzun ömürlü olması da gerekmektedir. Özellikle büyük şehirlerde beton üretiminde kullanılan kaliteli hammadde kaynaklarının kısıtlı olması ve üretim esnasında harcanan enerjiden dolayı uzun ömürlü yapıları inşa edilebilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Ayrıca uzun ömürlü yapıların inşa edilememesinden kaynaklanacak yenileme maliyetleri yanında inşaat moloz artıklarının da bertaraf edilmesi ihtiyacı çok ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı servis ömrü boyunca dayanım özelliklerini koruyabilen uzun ömürlü yapılar inşa edilebilmesi özellikle kentleşmesi devam eden Türkiye için çok büyük önem taşımaktadır.

Beton üretiminde en önemli malzeme bağlayıcı özellik taşıyan çimentodur. Doğaya karşı olan duyarlılığın arttığı günümüzde çimento üretim prosesi yüksek oranda karbondioksit emisyonu ile çevreye büyük zarar vermektedir. Bu yüzden özellikle son yıllarda farklı sanayi kollarının hidrolik bağlayıcı özellik taşıyan atık malzemelerinin beton üretiminde çimento yerine kullanılması çimentoya olan ihtiyacı azaltmaktadır. Bu şekilde hem atık bertarafı sağlanmakta hem de çimento üretimi kaynaklı karbondioksit emisyonu sınırlandırılmaktadır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemelerin beton içerisinde çimento yerine kullanılmasının atık yönetimi yanında betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine pozitif katkılar sağladığı da bilinmektedir. Günümüzde beton sektöründe yaygın olarak kullanılan cüruf, uçucu kül gibi malzemelere alternatif olarak kullanılabilecek ve betona farklı

özellikler kazandırabilecek atık malzemeler üzerinde deneysel çalışmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan çalışmalarda yapı elemanlarının hem dayanım hem de dayanıklılık özellikleri muhakkak birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada farklı endüstri kollarının atık malzemesi konumundaki yüksek fırın cürufu, borjips atığı ve doğal minerallerden olan zeolit katkılı harç numunelerinin dayanım ve durabilite (dayanıklılık) özellikleri üzerine deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmada referans değerlendirme numunesi olarak üretimi gerçekleştirilen kontrol numuneleri, herhangi bir katkı kullanılmadan doğrudan standard Portland çimentosu CEM I 42,5R ile hazırlanmıştır.

1.1.1 Dayanım testleri

Taşıyıcı yapı elemanlarının en önemli özelliklerinin başında basınç dayanımı gelmektedir. Basınç dayanımı malzemenin birim alanda taşıdığı yük kapasitesini ifade eden bir fiziksel büyüklüktür. Bu çalışmada hazırlanan harç numunelerinde dayanım testleri, çimento test cihazında basınç altında mukavemet tayini yolu ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin dayanım testleri eğilme ve basma dayanımı olmak üzere iki farklı çalışma ile yapılmıştır. Hazırlanan kontrol ve test numunelerine TS EN 196-1 Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini standardına göre eğilme ve basma basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır [4].

1.1.2 Klorür geçirimsizliği dayanıklılık (durabilite) testleri

Taşıyıcı yapı elemanlarının gerekli dayanım özelliklerini ve performanslarını istenilen süreler boyunca yerine getirebilmesi ancak yeterli durabilite özelliklerini taşımaları sayesinde mümkün olabilmektedir. En yaygın yapı malzemelerinin başında gelen betonarme, beton ve demir donatının biraraya gelmesi ile oluşan kompozit bir malzemedir. Demir donatının korozyondan korunması ancak geçirimsiz bir beton pas payı ile mümkün olabilmektedir. Demir metalinin korozyonuna sebep olan iyonların başında klorür gelmektedir. Hazırlanan betonarme yapı elemanlarının yeterli klorür geçirimsizliğine sahip olması, yapının iskeleti özelliğini taşıyan demir donatının korozyondan korunabilmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada hazırlanan kontrol ve test numunelerinin klorür geçirimsizliği durabilite özellikleri, NT BUILD 492 Beton/Harç Numunelerinin Klorür Migrasyon Katsayısının Tespiti ve ASTM C1202-12 Beton/Harç Numunelerinin Klorür İyonu Geçişine Karşı Direnci deneyleri gerçekleştirilerek tespit edilmiştir [5, 6].

Standardlara uygun şekilde çalışan her iki deney düzeneğinin kurulumu tarafımdan Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. NT BUILD 492 deneyinde Türkiye’de TÜRKAİ’tan (Türk Akreditasyon Kurumu) akredite şekilde hizmet sunan tek laboratuvar Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarıdır. ASTM C1202-12 deney düzeneğinin kurulumu çalışması ise proje koordinatörlüğünü yürüttüğüm Yıldız Teknik Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi (Teknopark) Ar-Ge Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

1.1.3 Karbonatlaşma direnci dayanıklılık (durabilite) testleri

Beton, bazık özellik taşıması itibarı ile içerisinde yer alan demir donatıyı korozyandan koruyabilmektedir. Ancak zaman içerisinde atmosferde yer alan karbondioksit gazının betonun gözenek yapısından içeriye girmesi demir donatıya zarar verebilecek bir dizi kimyasal reaksiyonun başlamasına sebebiyet vermektedir. Betonun karbonatlaşması adı verilen bu kimyasal olay betonarme yapı elemanlarının durabilitesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada hazırlanan kontrol ve test numunelerinin karbonatlaşma direnci, EN 13295 Beton/Harç Numunelerinin Karbonatlaşma Direncinin Tayini deneyi gerçekleştirilerek tespit edilmiştir [7, 8]. EN 13295 deney düzeneğinin kurulumu çalışması proje koordinatörlüğünü yürüttüğüm Yıldız Teknik Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi (Teknopark) Ar-Ge Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Betonarme yapı elemanlarının durabilite özellikleri son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Günümüzde en önemli yapı unsurlarının başında gelen betonarmenin yeterli dayanım özellikleri sağlayabilmesi ancak içerisindeki demir donatıyı uzun yıllar korozyona karşı etkin bir şekilde koruyabilmesi ile mümkün olacaktır. Normalde betonarme yapı elemanlarının geçirimsiz paspayı ve betonun yüksek pH değeri ile gösterdiği bazik yapı, betonarme içerisindeki demir donatıyı korozyondan korumaktadır. Ancak yapılan incelemeler sonucunda, ülkemizde özellikle hazır betonun yaygınlaşmaya başlamasından önceki süreçlerde üretilmiş niteliksiz pek çok betonarme yapının da bulunduğu bilinmektedir. Özellikle ülkemizde gerçekleşen büyük depremlerden sonra bilim adamları tarafından yapılan araştırmalarda, binaların taşıyıcı betonarme elemanlarında korozyona bağlı ciddi donatı kayıplarının yaşandığı hatta bazı numunelerde donatının korozyon ile tamamen kaybolarak sadece izinin kaldığı durumlar ile karşılaşmıştır. Bu yapılarda genellikle klorür içeriği standartlara göre yüksek deniz kumunun gerekli işlemler yapılmadan beton üretiminde kullanıldığı ve bu durumun da ilerleyen zamanlarda korozyon kaynaklı ciddi donatı hasarlarına sebebiyet verdiği görülmüştür. Bu tip binalardan alınan beton karot numunelerde gözlemlenen deniz kabukları da bu gerçeği doğrular niteliktedir. Bu tip yapılarda taşıyıcı elemanlar olan kolon ve kirişlerdeki donatılarda, korozyona bağlı kesit daralması ve hacimsel genişmeden kaynaklı betonun paspayı tabakasında zararlar tespit edilmektedir. Deprem bölgesinde yer alan ülkemizde üretilecek betonarme yapılardaki donatı korozyonunun engellenmesi ancak beton üretimi sırasında standartlara uygun hammaddelerin kullanımı ve yeterli kalınlıkta geçirimsiz paspayı imalatı ile mümkün olabilecektir. Şekil 2.1’de donatı korozyonu sonucunda ciddi donatı ve paspayı hasarı gören bir betonarme kolon elemanına ait görsel yer almaktadır.



Şekil 2.1 : Donatı korozyonu hasarı.

Betonarme yapıların kullanım ömrünü belirleyen parametrelerin başında donatı korozyonu geldiğinden dolayı özellikle üretim aşamasında betona katılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi atık malzemelerin fiziksel olarak betona sağladığı avantajların yanında durabilite özellikleri üzerindeki etkisi de önemli bir araştırma alanı durumundadır. Özellikle son yıllarda inşası gerçekleştirilen İstanbul-İzmir Otoyolu Projesi İzmit Körfez Geçiş Köprüsü ve İstanbul 3. Boğaz Köprüsü gibi büyük altyapı projelerinde üretilen betonarme elemanlarda, donatı korozyonunun başlıca sebeplerinden klorür geçirimsizliği konusunda yüksek performans artışı gösteren yüksek fırın cürufunun büyük oranlarda çimento ile ikame edildiği yani yer değiştirildiği görülmüştür. Yapılan literatür araştırmalarında cürufun beton içerisinde kullanımının, klorür geçirimsizliği konusundaki yüksek performansına karşılık karbonatlaşma direncini ciddi oranda düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca ülkemizde standartlara tam uygun otomasyona bağlı olarak çalışabilen karbonatlaşma deney düzeneğinin varlığı görülememiştir. Bu sebeple Türkiye Hazır Beton Üreticileri Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarında tarafımdan deney düzeneğinin kurulumu projelendirilmesi yapılmış olup çalışmalar tamamlanmıştır. Standartlara tam uygun çalışabilecek deney düzeneği hazır hale getirilmiş olup, deneme testlerindeki ortam

şartlandırması kayıtlarına göre düzeneğin oldukça stabil ve başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Kurulumu tarafımdan gerçekleştirilen bu düzenek sayesinde özellikle farklı oranlarda cüruf içeren numunelerin karbonatlaşma direnci konusunda bol miktarda deney yapılabilcek olup, çok sayıda deneysel veriye ulaşılabilecektir. Ülkemize bu alanda ciddi katma değer sağlandığı düşünülmektedir. Ayrıca literatürde borjips atık malzemesi ve doğal zeolit mineralinin kullanıldığı harç numunelerinin karbonatlaşma direnci üzerine yeterli sayıda akademik çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu  alışma, özellikle cüruf gibi klorür geçirimsizliği direnci ve karbonatlaşma direnci konusunda farklı karakteristik gösterebilecek beton mineral katkıları üzerinde çok sayıda deney yapılabilmesi yönü ile  zg n ve ayırd edici bir özellik taşımaktadır. Literatür araştırmasında bağlayıcı malzemeler ve hazır betonun tarihçesi, Türkiye’de ve Dünya’da beton kullanımı, beton üretim teknikleri hakkında derleme yapılmıştır.

2.1 Çimento ve Beton

İngiltere’nin Leeds kentinde duvarcılık yapmakta olan Joseph Aspdin 1824 yılında Portland  imentosunu icat edene kadar yapı üretiminde bağlayıcı malzemeler olarak; toprak, toprak-kireçtaşı karışımlar, değişik kireç ve al ılar, pişmiş kil tozları ve diğer doğal malzemeler kullanılmıştır. Geçmişe baktığımız zaman Mısır Piramitleri,  in Seddi ve farklı zamanlarda inşa edilen diğer tarihi yapılar incelendiğinde dönemin özelliklerini simgeleyen değişik bağlayıcı malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Günümüzde Portland  imentosu ile üretilen beton, yüksek dayanım ve düşük geçirimsizlik özelliklerine sahip olmasına rağmen değişik  evre koşullarına karşı fazla dayanıklı değildir. Ancak geçmiş yıllarda kullanılan bağlayıcıların günümüz bağlayıcılarına göre daha düşük dayanım özellikleri göstermelerine rağmen olumsuz  evre şartlarına karşı daha yüksek mukavemet gösterdiği görülmektedir. Tarihi yapılarda kullanılan bu bağlayıcı malzemelerin iç yapısı incelendiğinde, yüksek boşluk yapısı ve karbonatlaşma reaksiyonu dikkat çekmektedir [9, 10].

Bağlayıcı malzemelerin farklı kökenleri olabilmektedir. Doğal olarak bağlayıcı niteliği bulunan veya üretim prosesi sonucunda elde edilen bağlayıcılar bulunabildiği gibi değişik atıklar da bağlayıcı özellik taşıyabilmektedir. Bağlayıcı malzemeler genelde toz ve sıvı hal olmak üzere iki sınıfa ayrılmakla birlikte toz halindeki bazı

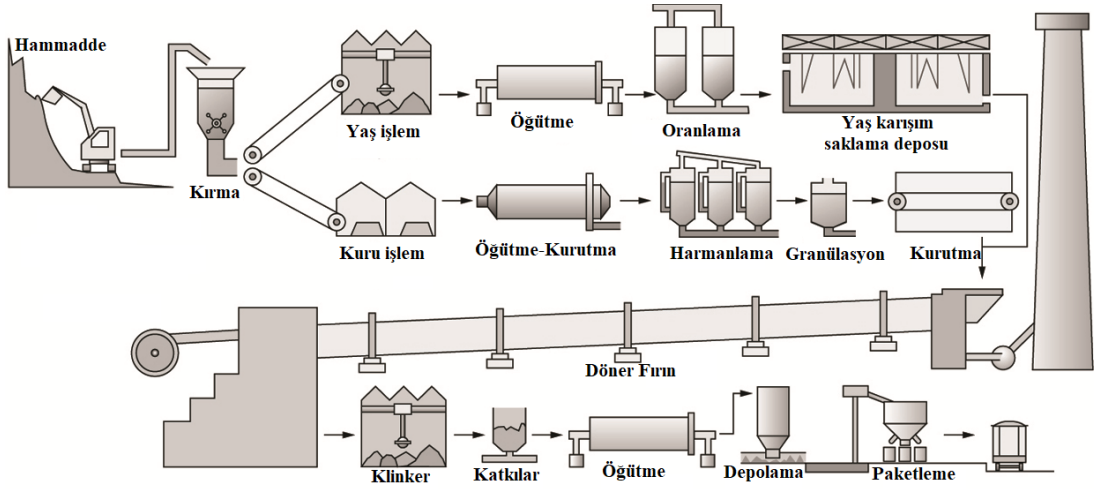
bağlayıcı maddeler elde ediliş yöntemlerine göre Çizelge 2.1’de gösterildiği şekilde sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.1 : Toz halindeki bazı bağlayıcı maddelerin sınıflandırılması [10].

Doğal Bağlayıcılar	Yapay Bağlayıcılar	Endüstriyel ve Çeşitli Atık Türü Bağlayıcılar
Volkanik tüfler	Kireç	Uçucu kül
Tras	Su kireci	Silika tozu
Zeolit	Pişmiş kil	Yüksek fırın cürufu
Diatomit	Alçı	Pirinç kabuğu külü
Doğal topraklar	Çimento	Borjips atığı

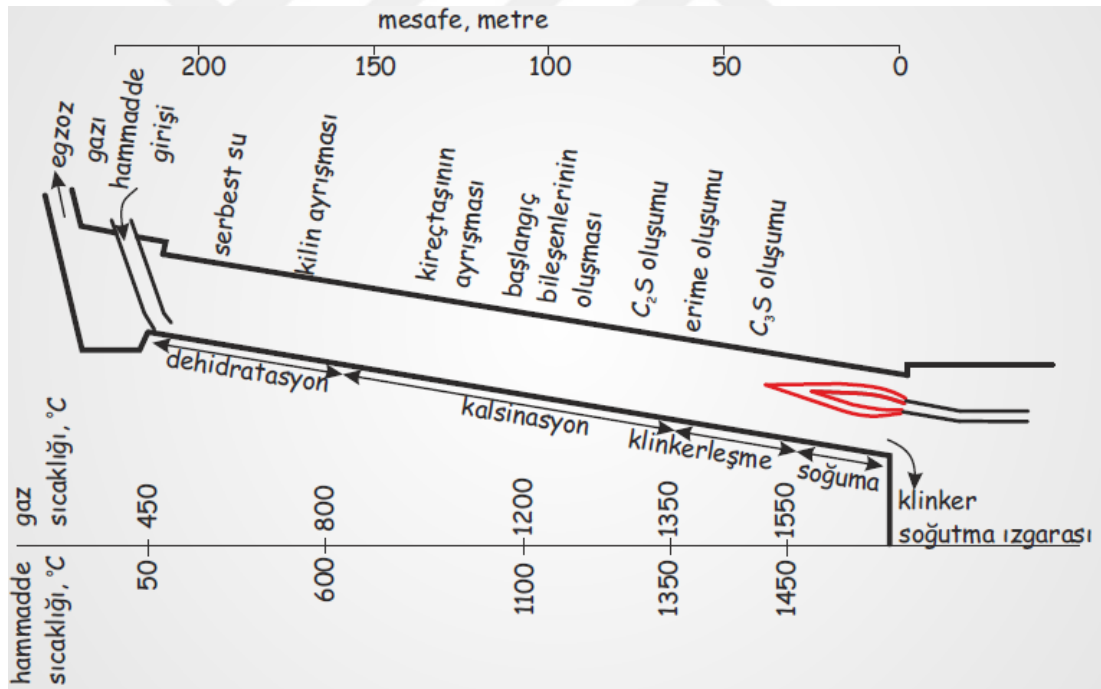
Bazı doğal ve endüstriyel atık türü malzemelerin kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmamasına rağmen kireç ve çimento gibi başka bir bağlayıcı malzeme ile birlikte kullanıldıklarında bağlayıcı özellik kazandıkları görülmektedir. Bu tür bağlayıcı malzemeler puzolan olarak adlandırılmaktadırlar.

Portland çimentosunun yapı taşları kalker ve kildir. Portland çimentosu üretim prosesine baktığımız zaman öncelikle uygun miktarlarda kireç (CaO), silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içeren hammaddeler belirli oranlarda birbirleriyle karıştırılırlar. Daha sonra bu karışım döner fırınlarda $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ veya $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar pişirilir. Fırından çıkarılan gri renkteki fındık veya ceviz büyüklüğündeki malzemeye klinker adı verilmektedir. Klinker öncelikle soğutulur ve daha sonra öğütülür. Öğütme işlemi sırasında çimentonun su ile hidrolik reaksiyonu sonucunda gerçekleşen sertleşme yani priz süresini ayarlamak amacı ile % 3 - % 5 oranlarında alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ilave edilmektedir. Öğütme işlemi tamamlanmış ve tane boyutu $90\text{ }\mu\text{m}$ altına düşürülmüş toz malzeme, bağlayıcı özellik kazanmış olan çimentodur [11]. Çimentonun bağlayıcı özelliği sayesinde farklı boyutlardaki taneli mineral malzemeler olan agregaların biraraya gelmesi sonucunda beton oluşmaktadır.



Şekil 2.2 : Çimento üretim prosesi [38].

Şekil 2.2’de çimento üretim prosesinin ana hatları şematik olarak gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 2.3’de kuru yöntem döner fırın içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar görülmektedir.



Şekil 2.3 : Döner fırın içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar [39].

2.2 Bazı Bağlayıcı Çeşitleri ve Özellikleri

Günümüzde çimento sektörü ihtiyaçlar ile doğru orantılı olarak her geçen gün gelişmektedir. Çimento üretim süreci ekolojik olarak zararlıdır ve yüksek oranda enerji sarfiyatına sebep olmaktadır. Çimento üretimi, ancak yüksek sıcaklıklarda

gerçekleşebilen reaksiyonlardan dolayı ciddi oranlarda karbonadioksit emisyonuna sebep olmaktadır. Hem enerji sarfiyatını hem de ekolojik zararın boyutunu azaltmak amacıyla hidrolik çimentolara puzolan katılmaktadır. Bunun yanında beton üretimi sırasında da çimentoya benzer bağlayıcı özellik gösterebilen doğal mineraller ve atık türü çeşitli mineral katkıları kullanılabilir. Beton katkı malzemesi olarak kullanılabilen puzolanların avantajları arasında çimento tasarrufu sağlanması, işlenebilirlik kabiliyetinin artması, düşük hidratasyon ısı ve çatlamlara sebebiyet veren ısı gelişiminde azalma, geçirimsizliğin ve dış etkenlere karşı dayanıklılığın artması gibi bazı özellikler gösterilebilir. Aşağıda bu tez çalışmasında kullanılan doğal mineral katkı ve başka sanayi kollarının atık malzemelerinden oluşan mineral katılara örnekler verilmektedir.

2.2.1 Zeolit

Zeolit, yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren doğal bir mineraldir. Bu bileşikler Ca(OH)_2 ile birleşerek puzolanik reaksiyon olarak bilinen kalsiyum silikatları oluştururlar [12]. 1756 yılında Cronstedt tarafından ısıtıldıkları zaman yapılarında bulunan suyu açığa çıkarmalarından dolayı “kaynayan taş” olarak adlandırılan zeolitler, alkali ve toprak alkali kristal yapıya sahip sulu alüminyum silikatlar olarak tanımlanmaktadır. Zeolitlerin yaklaşık 50 adet doğal ve 150 adet sentetik çeşidi mevcuttur. Doğal bir zeolit minerali olan klinoptilolit yüksek absorpsiyon kapasitesi, katyon değişim özelliği, kataliz ve dehidrasyon kapasitesi ile endüstride en çok tercih edilen zeolit minerallerinin başında gelmektedir. Klinoptilolit kimyasal formülü $(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{2.5})(\text{Ca}_{1.0}\text{Mg}_{0.5})(\text{Al}_6\text{Si}_{30})\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir [40].

Zeolit minerali yüksek iyon değişim kapasitesi ve silis bileşimine sahip olması yanında düşük yoğunluğu ve kristal yapısı bozulmadan dehidratasyona uygun bileşik yapısından dolayı beton içerisinde doğal mineral katkı olarak kullanılabilir. Ayrıca zeolit minerali özgül yüzeyinin normal portland çimentosunun özgül yüzeyinden büyük olması, zeolit beton içerisindeki boşlukları doldurmasını sağlamaktadır. Zeolit çimentodan düşük yoğunluğa sahip olduğu için zeolit katkılı betonlar normal çimento ile üretilen beton elemanlara göre daha hafif olmaktadır. Beton içerisinde çimento yerine doğal bir mineral olan zeolit kullanımı, çimentoya olan ihtiyacı ve bu şekilde çimento üretim prosesinden kaynaklanan enerji sarfiyatını azaltabilecektir. Dünyadaki karbondioksit emisyonunun yaklaşık % 7 oranının

çimento üretim prosesinden kaynaklandığı tahmin edildiğinde zeolit doğal mineralinin çimento yerine kullanılabilecek olması karbondioksit emisyonu ve diğer ekolojik zararların da önüne geçilmesine katkı sağlayacaktır [40, 15]. Şekil 2.4’de zeolit mineraline ait görsel yer almaktadır.



Şekil 2.4 : Zeolit minerali.

İkotun ve diğerleri, zeolit katkılı beton numuneleri üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, zeolit mineralinin beton basınç dayanımına olumlu etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda zeolit katkılı beton numunelerinin basınç dayanımının, erken ve geç yaş için kontrol numunelerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İkotun ve diğerlerine göre zeolitın başka mineral katkılarıyla birlikte kullanılması, basınç dayanımdaki artışı destekleyici yönde tesir etmektedir. Zeolit ile birlikte uçucu kül gibi başka mineral katkıların kullanılmasının basınç dayanımı artışını ciddi oranda desteklediği gözlemlenmiştir. Örneğin % 30 uçucu kül ile birlikte % 0,6 zeolit katkılı test numunelerinin 180 günlük basınç dayanımı sonuçları, kontrol numunelerine göre yaklaşık % 21 daha yüksektir. Ancak uçucu kül kullanılmadan sadece % 0,6 oranında zeolit katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre 180 gün basınç dayanımı sonuçlarındaki artış oranı % 7,5 ile sınırlı kalmıştır [13].

Markiv ve diğerleri, zeolit katkılı beton numunelerinde % 20’ye kadar ikame oranlarında zeolit katkısının basınç dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Daha yüksek oranlarda zeolit katkısının ise test numunelerinin basınç dayanımı sonuçlarında şahit numuneye göre düşmelere neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Markiv ve diğerleri, zeolit mineralinin belirli oranlarda Portland çimentosu ile ikame edilmesi sonucunda basınç dayanımında görülen artışı, zeolitın portland çimentosuna

oranla daha yüksek seviyede silika, alümina ve demir oksit bileşiklerini ihtiva etmesine bağlamaktadır. Yine aynı çalışmada zeolit mineralinin betonun işlenebilirliğini düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Zeolit mineralinin boşluklu yapısından kaynaklanan yüksek oranda su emme özelliği, betonun kıvamını azaltmakta ve dolayısıyla işlenebilirliğini de düşürmektedir. Markiv ve diğerleri yaptıkları deneysel çalışmada beton içerisinde portland çimentosu ile % 10 ikame edilerek kullanılan zeolit mineralinin betonun kıvamını azaltarak işlenebilirliğini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Bu işlenebilirlik kaybı, süper akışkanlaştırıcı bir kimyasal katkı ile telafi edilebilmektedir. Aynı çalışmada zeolit mineralinin uygun akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici kimyasal katkıları ile birlikte beton içerisinde kullanılmasının betonun su geçirimsizliği, donma çözülme direnci, kuruma büzülmesi gibi durabilite özelliklerine olumlu katkılar sağladığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Zeolit minerali çimentodan daha ince bir malzeme olduğu için betonun mikro yapısını iyileştirmiş, bunun sonucunda betonun boşluk oranı azalmıştır. Yapılan çalışmalarda zeolit katkılı test numunelerinin basınç altında su geçirgenliği ve su emme miktarının sadece portland çimentosu ile üretilen kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Zeolit mineralinin beton iç yapısındaki boşlukları doldurması özelliği sayesinde betonun geçirgenliğini azalttığı görülmektedir. Yapılan başka çalışmalarda klinoptilolit türündeki zeolit mineralinin çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan serbest Ca(OH)_2 bileşiğini bağlayarak betonun dayanıklılığını artırıcı yönde tesir ettiği sonucuna varılmıştır. Yapılan pek çok araştırmaya göre zeolit mineralinin, portland çimentosu ile en ideal ikame oranının % 10 - % 15 civarında olduğu görülmüştür. Daha yüksek oranlarda ikame edilmiş numunelerde basınç dayanımında kayıplar yaşandığı gözlemlenmiştir [14].

Najimi ve diğerleri, zeolit mineralini % 15 ve % 30 oranlarında Portland çimentosu ile ikame ederek beton test numuneleri hazırlamışlardır. Kontrol ve test numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarını karşılaştırdıklarında % 15 ikame oranı ile hazırlanan test numunelerinde % 1 gibi kayda değer basınç dayanım kaybı yaşanmazken, % 30 ikame oranı ile hazırlanan test numunelerinin basınç dayanımında yaklaşık % 25 azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Najimi ve diğerlerine göre betonda zeolit katkısı, betonun hidratasyon ısını düşürerek termal çatlamaları engellemekte ve ayrıca betonun klorür iyonu geçirimsizliği, kuruma büzülmesi ve su geçirgenliği gibi dayanıklılık özelliklerini iyileştirici yönde etki

etmektedir. Aynı çalışmada % 15 ikame oranının üzerine çıkıldığında zeolit betonun durabilitesini arttırdığı ancak işlenebilirlik ve basınç dayanımı kaynaklı sorunların zeolit mineralinin çimento ile optimum ikame oranını % 15 ile sınırlandığı sonucuna varmışlardır [15].

Ahmadi ve diğerleri, yapmış olduğu çalışmada % 5 ve % 10 ikame oranı ile hazırlanmış zeolit katkılı beton numunelerinin oksijen permabilitesinin aynı ikame oranlarında silis dumanı ile hazırlanan test numunelerinden düşük olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca aynı çalışmada % 5 ikame oranına sahip zeolit katkılı beton numunelerinin su absorpsiyon değerlerinin de yine aynı ikame oranına sahip silis dumanı ile hazırlanan numunelere oranla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [16].

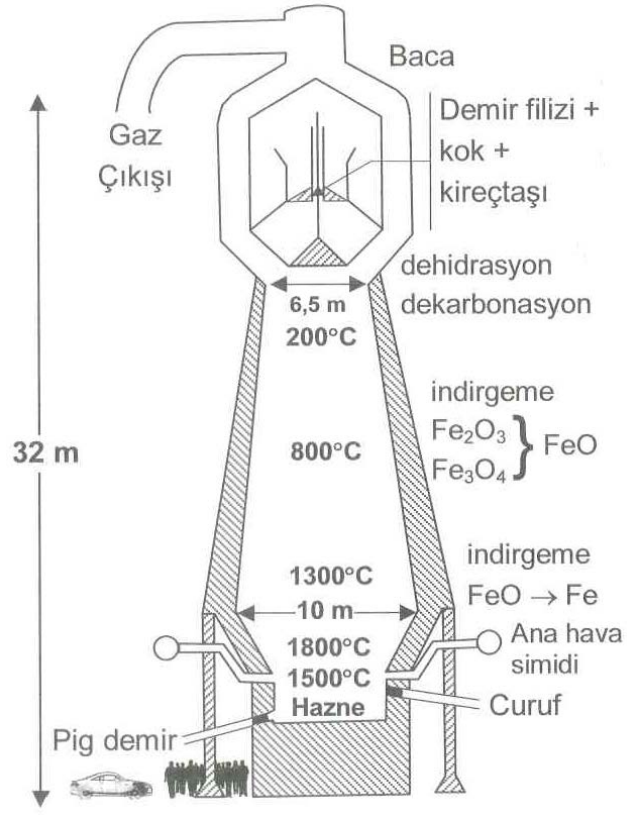
Valipour ve diğerleri, zeolit mineralinin gösterdiği puzolanik aktiviteyi, zeolit Ca(OH)_2 ile birleşerek fazla miktarda C-S-H jelleri oluşturmaya sebep olan yüksek oranda reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine bağlamaktadır. Aynı çalışmada zeolit katkısının, hidratasyonu geciktirerek priz süresini artırdığı ve agrega-çimento pastası arasındaki geçiş bölgesini iç yapıdaki boşluk oranını azaltacak şekilde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Valipour ve diğerleri, zeolit hidratasyon işlemini tamamlamak için uzun süreli kürleme gerektiren doğal bir puzolan olmasına rağmen, % 10 ikame seviyesinde kullanılan zeolit 3 günlük kürlemeden sonra beton dayanıklılığı açısından kabul edilebilir bir performans gösterebileceğini bildirmişlerdir [17].

Bilim'in yapmış olduğu deneysel çalışmalara göre, zeolit minerali olan klinoptilolit içeren harçların karbonatlaşma derinliği, erken yaşlarda kontrol numunelerinden daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu olumsuz etki puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak uzun vadede ortadan kalkmaktadır. Numuneler 90 gün boyunca karbonatlaşmaya maruz kaldıktan sonra, kontrol numunelerinde 9'un altında pH değerine sahip olan tabakanın derinliği 6,75 mm iken, klinoptilolit içeren harçlarda karbonatlaşma derinliği 5,82 mm ile 6,58 mm arasında değişmiştir. Ayrıca, klinoptilolit ile yapılan harçların karbonatlaşmaya karşı direnci, klinoptilolit ikame oranı arttıkça yükselme göstermiş ve karbonatlaşma direnci deneyleri sonunda % 30 klinoptilolit içeren harç numunelerinde minimum karbonatlaşma derinliği verilerine ulaşılmıştır. Bu durum, erken yaşlarda katkısız numunelerdeki çimentonun hidratasyonundan kaynaklı Ca(OH)_2 içeriği daha yüksek iken, zeolit hidratasyonu geciktirmesi sonucunda katkılı numunelerde ileri yaşta meydana gelen Ca(OH)_2 miktarında görülen artışa bağlanmıştır [18].

Ortega ve diğerkleri, doğal zeolit minerali klinoptilolit alkal aktivasyonu ile yüksek basınç dayanımına sahip beton ve harç numuneler üretilebileceğini bildirmişlerdir. Ancak bu durum klinoptilolit fiziksel özelliklerine, örnek hazırlama yöntemine, kür koşullarına, klinoptilolit parçacık boyutuna ve alkal ilavesine bağlıdır. Yüksek mukavemetli numunelerin, düşük Ca / Si oranı matrisi ile çevrelenmiş hidratlanmamış klinoptilolit parçacıkları içerdği bildirilmiştir [19].

2.2.2 Yüksek fırın cürufu

Çeşitli metal endüstri kollarının üretim prosesi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan atık maddelere cüruf adı verilmektedir. Demir ihtiva eden hammaddenin kok kömürü ve kireçtaşı ile birlikte ergitilmesinde kullanılan ve üretim kapasitelerine göre yükseklikleri 30 metre ile 90 metre arasında değişen fırınlara yüksek fırın denilmektedir. Dünyada çelik üretimi yılda yaklaşık 700 milyon ton civarında gerçekleşmekte olup, bu üretim miktarının yaklaşık % 99'u yüksek fırınlardan elde edilmektedir [41]. Türkiye'de çelik üretimi sırasında yılda yaklaşık 300 bin ton yüksek fırın cürufu atık madde olarak açığa çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin genellikle kok kömürü kullanılarak 1500 °C'ye varan yüksek sıcaklıklarda ergitilmesi sırasında oluşmaktadır. Yüksek fırınlarda demir cevherini yabancı maddelerden ayıştırmak ve ergitmeyi de kolaylaştırmak için kireçtaşı kullanılmaktadır. Yüksek fırında gerçekleşen reaksiyonda kok kömüründen gelen karbon ve demirden gelen oksitler karbondioksit ve karbonmonoksit olarak fırının üst kısmında yer alan bacadan dışarı çıkarlar. Fırının alt kısmında eriyik halde demir madeni ile birlikte kireç, kok kömürü külü, silis, alümin ve diğerk maddelerden meydana gelen cüruf adını verdiğimiz atık malzeme kalmaktadır. Demir ve diğerk metal cevheri bileşimindeki safsızlıkların uzaklaştırılması amacıyla fırına ilave edilen kalker veya dolomit ile birlikte cüruf, fırından eriyik fazda ayrılmaktadır. Eriyik haldeki cürufun yoğunluğu eriyik demir madenine göre daha düşük olduğu için altta kalan eriyik demir madeni ve demir üzerinde yüzen cüruf ayrı çıkışlardan yüksek fırın dışına alınmaktadır. 1500 °C sıcaklığındaki eriyik cürufun puzolan olarak kullanılabilmesi için amorf yapıda olması gerekir ve bu yapı ancak hızlı soğutma prosesleri ile elde edilebilmektedir [10].



Şekil 2.5 : Demir üretiminde kullanılan yüksek fırın [10].

Şekil 2.5’de demir üretiminde kullanılmakta olan bir yüksek fırının şeması görülmektedir. Şekil 2.6’da Karabük Kardemir Demir Çelik Fabrikası stok sahasında bekletilen yüksek fırın cürufu görülmektedir.



Şekil 2.6 : Karabük Kardemir Demir Çelik Fabrikası stok sahasında yüksek fırın cürufu [21].

Cüruflar elde edildikleri metal endüstrisi ana ürün tipi ve üretim yöntemlerine bağlı olarak birbirinden farklı kimyasal bileşenlere ve özelliklere sahiptir. Örneğin nikel ve bakır üretim prosesinde ortaya çıkan cüruflar yalnızca puzolanik özellik gösterirken, demir-çelik endüstrisi yüksek fırın cürufları (YFC) kendi başına bağlayıcılık gösterebilmektedir. Cürufun soğutma hızı ve soğutma süresi puzolan özellik kazanmasında belirleyici en önemli etkenlerin başında gelmektedir. Cüruflar soğutma özelliklerine göre havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu, granüle yüksek fırın cürufu ve genleştirilmiş (köpürtülmüş) yüksek fırın cürufu olmak üzere sınıflandırılırlar. Konvansiyonel çelik üretim prosesi ile elde edilen havada soğutulmuş kristal yapıdaki cüruflar ya değerlendirilemeyen atık halinde depolanırlar ya da ancak yol dolgu malzemesi, hafif beton agregası olarak kullanılabilirler. Cürufun havada soğutulması suda soğutulmasına göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Havada yavaş soğutulan yüksek fırın cürufunda camsı özellik yoktur. Cüruf, yavaş soğutulma ile kristal yapıya sahip olur ve bazalt benzeri mekanik özellikleri ile ancak beton agregası olarak kullanılabilir. Modern teknoloji ile demir çelik üretimi yapan tesislerde elde edilen cüruflar ise hızlı soğutma teknikleri ile amorf yapıda olurlar ve bir miktar hidrolik bağlayıcı özelliğe sahip oldukları için çimento katkısı olarak kullanılabilirler. Atık olarak düşünülen ve değerlendirilemeyen cürufların hidrolik bağlayıcı özelliğinin keşfedilmesi ile cüruflar önemli bir çimento ve beton katkısı haline gelmiştir. Öyleki ton başına ücretleri neredeyse çimento ile yarışır bir hal almıştır. Yüksek fırın cüruflarının özellikle beton durabilitesi üzerindeki olumlu etkileri de özel çevresel etki şartlarında beton üretim gerekliliklerinde CEM I standard çimentoya göre daha başarılı bir alternatif sunmaktadır [20, 21].

Yüksek fırın cürufu, su ve kireç karışımının bağlayıcı özellikler gösterdiği tarihte ilk defa 1862 yılında Emil Largens tarafından gözlemlenmiştir. 1865 yılında cüruf-kireç karışımı hidrolik bağlayıcılar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Portland yüksek fırın cürufu çimentosu ise ilk kez 1892 yılında Almanya’da klinker ile granüle yüksek fırın cürufunun öğütülmesi ile elde edilmiştir. Almanya cürufun hidrolik bağlayıcı özelliğinden faydalananarak ürettiği ve “Thurament” adını verdiği ürünü 1923 yılında piyasaya sürmüştür. O yıllarda Thurament, çimento ile % 50 ye varan oranlarda ikame edilmekteydi ve baraj gibi önemli altyapı projelerinde bile Thurament katkılı betonlar kullanılmaktaydı. Şekil 2.7’de 1928 ile 1941 yılları arasında Avrupa’da Thurament ile inşa edilmiş büyük altyapı projeleri

görülebilmektedir. Günümüzde yüksek fırın cürufu daha çok çimento üretim prosesinde çimento fabrikalarında klinker ve alçı taşı ile birlikte öğütülerek cürufli çimento olarak kullanılmaktadır. Bazı büyük altyapı projelerinde öğütülmüş yüksek fırın cürufu doğrudan portland çimentosu ile ikame edilerek de kullanılabilir [21, 22].



Şekil 2.7 : Avrupa’da Thurament ile inşa edilen önemli yapılar [23].

Cürufli çimento ile üretilen beton ve harç numunelerinin hidrasyon mekanizması katkısız portland çimento ile üretilen numuneler ile benzer özellikler göstermektedir. Ancak cüruf katkılı çimento ile üretilmiş olan numunelerin dayanım kazanma hızı özellikle erken yaşlarda portland çimentolu numunelere göre daha düşüktür. 28 günlük basınç dayanım değerleri ve incelik değerleri ($3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) birbirine çok yakın olan katkısız harç numuneleri ile % 65 cüruf katkılı harç numunelerinden katkısız olanların erken yaş, katkılı olanların ise geç yaş dayanımlarının daha yüksek olduğu bilinmektedir [20].

Binici ve diğerleri, % 10 cüruf ikame edilmiş test numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin Portland çimentolu kontrol numunelerine göre yaklaşık % 10 daha düşükken, 180 günlük dayanım sonuçlarında cürufli numune dayanımlarının yaklaşık % 20 oranında yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Aynı çalışmada cürufli ve cürufsuz beton numunelerinin su işleme derinlikleri karşılaştırıldığında % 10 cüruf içeren test numunelerinin permabilitesinin kontrol numunelerine göre yaklaşık % 18 daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Binici ve diğerleri bu durumu ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren beton numunelerinde çimento ve agrega ara yüzeyinin

daha homojen ve yoğun olmasından dolayı beton iç yapısındaki porozitede azalmaya bağlamışlardır [1].

Baradan ve diğerleri, betonun geçirimsizliğini arttırmanın su/çimento oranını düşürmek ile sağlanabileceği gibi özellikle deniz suyundan kaynaklı beton klorür geçirimsizliğinin azaltılması ve geçirimsizlik performansının artırılması konusunda puzolan kullanımının etkin bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Baradan ve diğerleri, cüruf katkılı beton ve harç numunelerinin önemli durabilite parametrelerinden olan klorür geçirimsizliği konusunda katkısız standard Portland çimentolu numunelere göre daha yüksek performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Baradan ve diğerlerine göre, çimentoya yüksek fırın cürufu gibi puzolan özellik taşıyan mineraller eklenmesi, bağlayıcı matrisindeki alüminat oranını ciddi oranda arttırmaktadır. Beton içerisinde doğal yollardan difüzyona uğrayan klorür iyonlarının kimyasal olarak alüminatlı bileşiklere bağlanması klorür iyonlarının beton içerisinde ilerleme mesafesini ciddi oranda düşürmektedir. Ayrıca cürufun klorür iyonlarını kimyasal olarak bağlama özelliğinin camsı fazdaki alüminatlı bileşiklerin hidrasyonundan kaynaklandığı da düşünülmektedir [24].

Aktaş ve diğerleri, yüksek fırın cürufu katkılı test numunelerinde beton içerisindeki C_3A içeriği artışının Friedel tuzu ($Ca_4Al_2(OH)_{12}Cl_2 \cdot 4H_2O$) oluşum kapasitesini arttırdığını ve Friedel tuzunun beton içerisinde klorür iyonu difüzyonunu azalttığını belirtmişlerdir [25].

Dhir ve arkadaşları, çimento-cüruf pastasının klorür iyonlarını yüksek bağlama kapasitesinin cüruftaki yüksek alümina içeriğine bağlı olabileceğini ileri sürmüşlerdir. Çimento pastasının cüruftan kaynaklı yüksek alümina içeriği, daha fazla Friedel tuzu oluşumuna sebep olarak klorür bağlama kapasitesini arttırmaktadır. Ayrıca cüruf katkılı bağlayıcı karışımlarında C-S-H jellerinin miktarı, sıradan Portland çimento karışımlarına göre genellikle daha yüksektir. Bu jel matrisi daha yoğun ve daha az geçirgen bir yapı oluşturmaktadır. Ayrıca C-S-H jelleri, bir miktar klorür iyonlarını yapılarına bağlayarak da bariyer vazifesi görmektedir [26].

Han, çimentonun C_3A oranının artmasının çimento pastasının klorür iyonlarını bağlama yolu ile Friedel tuzu oluşturma kapasitesini arttıracığını ve örnek yüzeyinde oluşan bağlı klorür iyonlarının serbest klorür iyonlarının geçişine izin vermeyeceğini ileri sürmüştür [27].

Lou ve arkadaşları, standard Portland çimentosu ve granüle yüksek fırın cürufu katkılı çimento ile üretilmiş beton numunelerinin boşluk yapısı, klorür difüzyon katsayısı ve klorür bağlama kapasiteleri üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Friedel tuzunun termal analiz (DTA), X ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleri ile mikroyapı analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde beton üretiminde cüruf kullanımının betonun boşluk yapısını iyileştirdiği ve klorür bağlama kapasitesini artırarak klorür difüzyon katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır [28].

Cüruf içeren beton numunelerinin diğer bir önemli durabilite parametresi olan karbonatlaşma direnci konusunda yapılan araştırmalar incelendiğinde klorür iyonu geçirimsizliği performansının aksine bir sonuç ile karşılaşılmaktadır. Betonda yüksek fırın cürufu kullanımının betonarme yapı elemanlarının karbonatlaşma direncini düşürdüğüne dair çok sayıda akademik çalışma mevcuttur.

Işık ve diğerleri, öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren beton numuneleri üzerinde NT BUILD 492 klorür migrasyon katsayısının tespiti, ASTM C1202-12 betonun klorür iyonu geçişine karşı direnci ve EN 13295 betonun karbonatlaşma direnci deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yaklaşık % 40 ikame oranı ile hazırlanan 0,55 su/bağlayıcı oranındaki cüruf katkılı beton test numunelerinin katkısız Portland çimentosu ile hazırlanmış kontrol numunelerine göre her iki standarda göre gerçekleştirilmiş klorür geçirimsizliği değerleri yaklaşık % 50 oranında azalma gösterirken, cüruf katkılı numunelerde karbonatlaşmanın katkısız kontrol numunesine göre yaklaşık % 20 oranında arttığını bildirmişlerdir [22].

Gönen ve Yazıcıoğlu, ferrokrom cürufu katkılı beton numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda betona cüruf katkısının betonun karbonatlaşma direncini düşürdüğünü bildirmişlerdir. Yapılan çalışmaya göre çimento ile % 15 ikame oranındaki cüruf katkısının betondaki karbonatlaşma derinliğine olan etkisi, katkısız referans çimento ile üretilen kontrol numunelerine göre % 30 daha fazladır [29].

Özbay ve diğerleri, çimentonun yüksek fırın cürufu ikamesi ile elde edilen test numunelerinin karbonatlaşma direncinin normal Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunelerine göre daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Portland çimentosunun puzolanlar ile ikame edilmesi sonucunda üretilen test numunelerinin daha az Ca(OH)_2 içeriği sebebi ile karbonatlaşma direncinin düştüğünü

bildirmişlerdir. Puzolan ilavesi sonucunda yüksek pH seviyesinin kaynağı olan Ca(OH)_2 içeriğindeki azalmadan dolayı karbonatlaşmanın mevcut hidroksit içeriğinin daha çabuk tükenmesine sebebiyet vereceğinden puzolan katkılı numunelerde karbonatlaşma reaksiyonunun hızlanacağı düşünülmektedir [30].

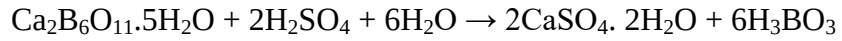
Gruyaert ve diğerleri, yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız beton numunelerinin karbonatlaşma direnci üzerine deneysel çalışmalar yürüterek karbonatlaşma katsayısı hesaplamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda su/çimento oranı 0,5 olan Portland çimentosu ile üretilen bir aylık kürlenmiş kontrol numunelerinin 300 ppm ve 3000 ppm CO_2 konsantrasyonundaki karbonatlaşma derinlikleri ihmal edilebilir seviyededir. Ancak % 50 ikame oranı ile üretilen cüruf katkılı test numunelerinin aynı kür şartları ile 300 ppm CO_2 konsantrasyonunda 1 yıllık süredeki karbonatlaşma derinliği 1 mm iken 50 yıllık sürede yaklaşık 7 mm olarak tahmin edilmiştir. Aynı değerler 3000 ppm CO_2 konsantrasyonu için ise 1 yıllık sürede 300 ppm konsantrasyona göre 3 kat artış ile 3 mm ve 50 yıllık sürede yaklaşık 22 mm olarak tahmin edilmektedir [31]. 300 ppm CO_2 konsantrasyonun şehirleşme ve sanayiden uzak ortamda normal temiz havada ölçülen bir değer olduğu düşünüldüğünde, İstanbul gibi CO_2 emisyonunun oldukça yoğun olduğu büyük şehirlerde en önemli yapı malzemesi olan betondaki karbonatlaşma ve dolayısıyla yapının yaşayacağı dayanıklılık kaybı riski daha net bir şekilde anlaşılmış olacaktır.

Zhang ve diğerleri, iki farklı su/bağlayıcı oranı için farklı ikame oranlarında cüruf içeren beton numuneleri üzerinde karbonatlaşma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. 0,35 su/bağlayıcı oranında üretilen beton numunelerinin bir kısmı % 45, bir kısmı ise % 60 cüruf ikame oranı ile hazırlanmıştır. Yapılan karbonatlaşma derinliği ölçüm sonuçlarına göre numunelerdeki % 15 cüruf ikamesindeki artış oranının, karbonatlaşma derinliğinde yaklaşık % 35 oranında bir artışa sebebiyet verdiği bildirilmiştir [32]. Bu deney sonuçları, beton üretimi sırasında mineral katkı olarak cüruf kullanılmasının betondaki karbonatlaşma derinliğini artırarak, karbonatlaşma direncini düşürdüğünü gösterir niteliktedir.

2.2.3 Bor mineralleri, boraks ve borik asit atıkları

Türkiye, 800 milyon tonu bulan bor kaynakları ile dünya bor rezervinin yaklaşık olarak % 63'üne sahiptir. Türkiye yıllık 1,7 milyon tonu bulan boraks ve bor bileşikleri üretimi ile ABD'den sonra tüm dünyada en büyük bor üreticisidir. Bor

cevheri, farklı bor bileşikleri olan borik asit, boraks ve bor oksit elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ülkemizdeki en önemli bor mineralleri kolemanit, üleksit ve tinkaldir. Tinkal minerali boraks üretiminde kullanılmaktadır ve ekonomik açıdan önemlidir. Boraks üretimi sırasında her yıl yaklaşık 120.000 ton katı atık ortaya çıkmakta olup, atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi ve depolanması oldukça zor ve maliyetlidir [33]. Borik asit bir bor bileşiği olan kolemanitin ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sülfirik asit ile tepkimeye girmesi sonucunda elde edilmektedir.



Bu reaksiyon sonucunda büyük miktarda borjips de oluşmaktadır. Borjips, kolemanitten borik asit üretimi sırasında ortaya çıkan ve içerisinde jips kristalleri, B_2O_3 ve diğer safsızlıkları bulunduran, doğaya doğrudan salındığında çeşitli problemlere sebep olan bir atık malzemedir. Boraks ve borik asit üretim süreçlerinde ortaya çıkan atık malzemeler içerisinde % 20'ye varan oranlarda bor oksit bileşiklerinin (B_2O_3) bulunması, bu tip atıkların güvenli bir şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Boraks atıkları kil minerali ile aynı bileşenleri içermesi nedeniyle hafif bir puzolanik karakter taşımaktadır. Bu nedenlerden dolayı söz konusu atık malzemenin çimento içerisinde kullanılabilirliği konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Bor atıklarının çimento yerine ikame edilerek kullanılabilmesi atık malzemelerin değerlendirilmesi yanında çimentoya olan ihtiyacı azaltarak çimento üretiminden kaynaklı CO_2 emisyonunu da sınırlandıracaktır. Ayrıca çimento üretiminde doğal jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), % 3 - % 5 oranlarında klinker içerisine priz geciktirici olarak katılmaktadır. Klinkere katılan jips, C_3A 'nın ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) su ile reaksiyonunu geciktirerek priz geciktirici vazifesi görmektedir. Aslında doğal jips geciktirici olarak kullanılmasına rağmen bazı ülkelerdeki jips yataklarının yetersiz olmasından dolayı endüstriyel jips de klinkere katkı olarak kullanılabilmektedir. Çimento üretiminde doğal jips yerine bir atık olan borjipsin kullanılması atık bertarafına katkı sağlayacaktır. Şekil 2.8'de öğütülmüş borjips atığına ait görsel yer almaktadır.



Şekil 2.8 : Öğütülmüş borjips atığı.

Literatürde yaklaşık %10 ve %20 oranlarında B_2O_3 ihtiva eden bor endüstrisi atık malzemelerinin farklı oranlarda klinker ve CEM I 42,5R Portland çimentosu ile doğrudan ikame edilmesi metodu ile hazırlanan harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı, çekme dayanımı, priz süresi, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, hacimsel genleşme gibi fiziksel deneylerin gerçekleştirildiği çalışmalar bulunmaktadır.

Binici ve diğerleri, en yaygın bor mineralinin başında gelen kolemanit mineralini doğrudan % 0,25; % 0,5 ve % 0,75 oranlarında çimento ile ikame ederek kullanmışlardır. Çalışmada % 2 ve % 5 ikame oranlarına varan kullanımlarda priz süresinde artış ve % 2 ikame oranı için basınç dayanımında % 30'a varan kayıplar yaşandığından optimum ikame oranının çimento ağırlığının yaklaşık % 1'i civarında olması gerektiğini bildirmişlerdir. Çalışma sonucunda belirlenen ikame oranlarında kullanılan kolemanitin basınç dayanımı, donma-çözülme, aşınma ve su geçirimsizliği gibi betonun birçok fiziksel ve kimyasal özelliklerine olumlu katkılarda bulunduğu bildirilmiştir [1].

Özdemir ve Uğurlu, endüstri ve sanayide geniş kullanım alanı olan ve boraks üretiminde kullanılan bor minerali tinkal atıklarının beton üretiminde kullanılabilmesi konusunda deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Yapılan çalışma, bu atıkların beton içerisinde % 5 ve % 7 ikame oranlarında çimento yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Aynı çalışmada atık içerisindeki B_2O_3 miktarı düştükçe, ikame oranının arttırılmasının olumsuz etkilerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Yaklaşık % 20 oranında B_2O_3 ihtiva eden bor atığının çimento ile % 5 oranında ikame edilmesi durumunda priz süresi dışında çimentonun teknik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmediği gözlemlenmiştir. Bor atığı içerisindeki

B₂O₃ miktarı % 10 civarına düşürüldüğünde ise çimento içerisinde kullanılabilirlik oranı, % 20 B₂O₃ içeren atığa göre yaklaşık % 50 artış göstererek % 7 civarına çıkmaktadır. Bor atıklarının çimento içerisinde ikame edilerek kullanılmasının dikkate değer en büyük dezavantajı, bor atığının içeriğindeki jipsten dolayı çimentonun priz süresini uzatmasıdır. % 2,5 katkı içeriğine kadar priz başlangıcı % 25 - % 30, priz sonu ise % 40 - % 50 oranında artmaktadır. Bu durum yerine göre avantaj veya dezavantaj olabilmektedir. Soğuk bölgelerde beton dökülmesi esnasında betonun korunması amacı ile daha çabuk priz alması istenir. Ayrıca priz almada geçen süre de iş kaybı olarak yansiyacaktır. Ancak mesela sıcak bölgelerdeki beton uygulamalarında ve betonun uzun süre taşınmasının gerekli olduğu durumlarda betonun daha geç priz alması istenir. Ayrıca geç priz alma ile soğuk derz probleminin de önüne geçmek kolaylaşacaktır. Çalışmada bor atığının beton priz süresini geciktirici özelliğinden faydalanarak çimento üretim prosesinde klinkerin doğal jips alçıtaşı yerine bor atıkları ile birlikte öğütülmesinin de ekolojik çevreye zararlı olan bor atıklarının bertarafına katkı sağlayacağı savunulmuştur. Aynı çalışmada bor atıkları içeren numunelerin ultrases geçiş süreleri incelendiğinde yaklaşık % 2 ikame oranlarına kadaratik ilavesinin herhangi bir olumsuz etkisi olmadığı görülmekle birlikte % 7,5 ikame oranında % 9,6 B₂O₃ ihtiva eden atık katkılı test numunelerinin geçiş süresinin yaklaşık % 46 arttığı görülmüştür [33]. Bu durum yüksek ikame oranlarında bor atığı kullanımının beton durabilitesi açısından olumsuz etkileri olabileceği izlenimini uyandırmaktadır.

Demirbaş ve Karşlıoğlu, borik asit üretim prosesi atık çamurunun (borjips atığı) çimentoya eklenmesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada farklı oranlarda B₂O₃ ihtiva eden 4 çeşit borjips atığı kullanılmıştır. Kullanılan atıklar arasında en yüksek B₂O₃ ihtiva edeni ise yaklaşık % 15'dir. Çimento ile en yüksek ikame oranı yaklaşık % 24 olarak ayarlanmıştır. Çalışmada kontrol ve test numunelerinin su/bağlayıcı oranı yaklaşık 0,63 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda % 15 B₂O₃ ihtiva eden borjips atığı katkılı test numunelerinin 28 günlük basınç dayanımının, kontrol numunelerinin ancak % 25'i mertebesine ulaşabildiği görülmüştür. 90 günlük dayanım için ise bu değer ancak % 30'u mertebesine yükselebilmektedir [34].

Sevim ve Tümen, yaklaşık % 1 oranında B₂O₃ ihtiva eden borjips atığının çimento ile ikame edilerek kullanılabilirliği üzerine deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir.

Çalışmanın deneysel verilerine göre % 3 ve % 5 borjips atığı içeren test numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri, atık içermeyen kontrol numuneleri basınç dayanım değerlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre ağırlıkça çimentonun % 5 ile % 10 aralığındaki miktarlarda % 1 oranında B_2O_3 ihtiva eden borjips atığının beton içerisinde kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak borjips atığının çimento içerisinde kullanılması çimentonun özelliklerinde tutarsızlığa sebep olmaktadır. Borjips atığı katkısı ile çimento harcının kıvamı azalmakta ve çimento harcının priz süresi uzamaktadır. Örneğin % 15 borjips atığı-çimento ikamesi içeren harç numunelerinin başlangıç ve bitiş priz süreleri kontrol numunelerine göre sırasıyla yaklaşık % 43 ve % 30 oranında artmıştır. Bu durumun sebebi olarak karışımdaki bor içeriğinin, $Ca(OH)_2$ ve $Mg(OH)_2$ bileşiklerinin çözünürlüğünü arttırması ve hidratasyon reaksiyonunun daha yavaş işlemesine sebebiyet vermesi görülmüştür. Aynı çalışmada borjips atığının çimento üretiminde alçıtaşı yerine priz geciktirici olarak klinker ile birlikte öğütülmesinin uygun olabileceği bildirilmiştir [35].

Boncukçuoğlu ve diğerleri, borjipsi % 2,5; % 5; % 10; % 15; % 25; % 40 ve % 50 oranlarında öğütülmüş klinker ile ikame ederek ürettikleri harç test numuneleri üzerinde deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmada kullanılan borjips atığının B_2O_3 miktarı % 1,5 civarındadır. Klinkere katılan % 5 oranında etüvde kurutulmuş borjips ile hazırlanan harç test numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı, doğal jips ile hazırlanan kontrol numunelerinin basınç dayanımından yaklaşık % 8 daha yüksek sonuç vermiştir. % 5 oranının üzerindeki ikame değerlerinde ise harç numunelerinin basınç dayanımında kayıplar yaşandığı bildirilmiştir. Çalışmadan elde edilen diğer bir sonuç ise borjips atığının priz süresi üzerinde arttırıcı etki göstermesidir. Aynı çalışmada % 2,5 borjips katkılı harç numunelerinin priz süresinin, doğal jips içeren portland çimentolu numunelere göre yaklaşık olarak % 3 daha fazla olduğu bildirilmiştir [36].

Elbeyli ve diğerleri, borjips ve kalsine edilmiş borjipsin Portland çimentosu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kalsinasyon sıcaklığı, yapısal değişim analizinde DTA, TGA ve XRD analiz yöntemleri kullanılmıştır. Borjips ve doğal jipsin % 5 ve % 7 oranlarında klinker ile öğütülmesi ile elde edilen çimento üzerinde kimyasal testler, basınç dayanımı, priz süresi, genleşme ve incelik tayini deneyleri yapılmıştır. Çimento içerisindeki borjips oranının % 5'den % 7'ye artırılmasının priz

süresini uzattığı ve basınç dayanımını düşürdüğü sonucuna varılmıştır. %5 oranında kullanılan borjipsin, basınç dayanımı olarak doğal jips ile benzer nitelik taşıdığı görülmüştür. 190 °C’de kalsine edilmiş borjips atığı kullanılan çimento örneklerinde ise doğal jips ile hazırlanmış çimento örneklerine göre % 25 değerinde bir basınç dayanım artışı gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre kalsine edilmiş borjips atığının çimento üretim prosesinde doğal jips yerine priz geciktirici olarak kullanılmasının atık bertarafı yönü ile de uygun olabileceği bildirilmiştir [37].

Bor endüstrisi malzeme ve atık bileşenlerinin beton içerisinde değerlendirilmesi ile ilgili literatür araştırmasında yapılan deneysel çalışmalarda daha çok test numunelerinin dayanımını etkileyen parametreler ve dayanım özellikleri üzerinde durulduğu gözlemlenmiştir. Boraks ve borik asit atıkları ihtiva eden harç ve beton numunelerinin klorür geçirimsizliği, karbonatlaşma direnci gibi durabilite özellikleri hakkında yeterli sayıda deneysel çalışmanın bulunmadığı görülmüştür.

2.3 Türkiye ve Dünya’da Hazır Beton

Çağımızın yapı dünyasında geniş bir kullanım alanı bulunan beton, üretiminden uygulamaya kadar her aşamada son derece dikkat ve titizlik gerektiren temel bir yapı malzemesidir. Ülkemizde seksenli yıllara kadar şantiyelerde yalnız elle veya ilkel araç ve gereçlerle üretilmekte olan beton, daha sonra giderek artan bir oranda, bilgisayar kontrollü modern santrallerde hazırlanan reçetelere göre “hazır beton” olarak üretilmeye başlanmıştır. Bir yapının taşıyıcı iskeletini oluşturan betonarme uygulamalarında kullanılan betonun standartlara uygun olarak, yüksek kalite ve mukavemet sınıflarında üretilmiş olması ve kuralına uygun olarak işlenmesi, o yapının dayanıklılık ve güvenliği açısından çok önemlidir. Topraklarının tamamına yakını deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde, yapıların üretim aşamalarında uzun ömürlü ve depreme dayanacak şekilde tasarlanıp, inşa edilmesi büyük bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde sık olarak karşılaşılan depremler sebebi ile yeterli mühendislik hizmeti almadan inşa edilmiş yapılar yıkılmakta ve pek çok can kaybına da sebebiyet vermektedir.

1999 Marmara depreminden sonra betonarme yapılar ve beton, Türkiye’de çeşitli çevrelerce eleştirilmiş ve alternatif yapı sistemleri önerilmiştir. Sorunun temelinde yatan gerçek ise standartlara uygun olmayan kalitesiz yapı malzemelerinin

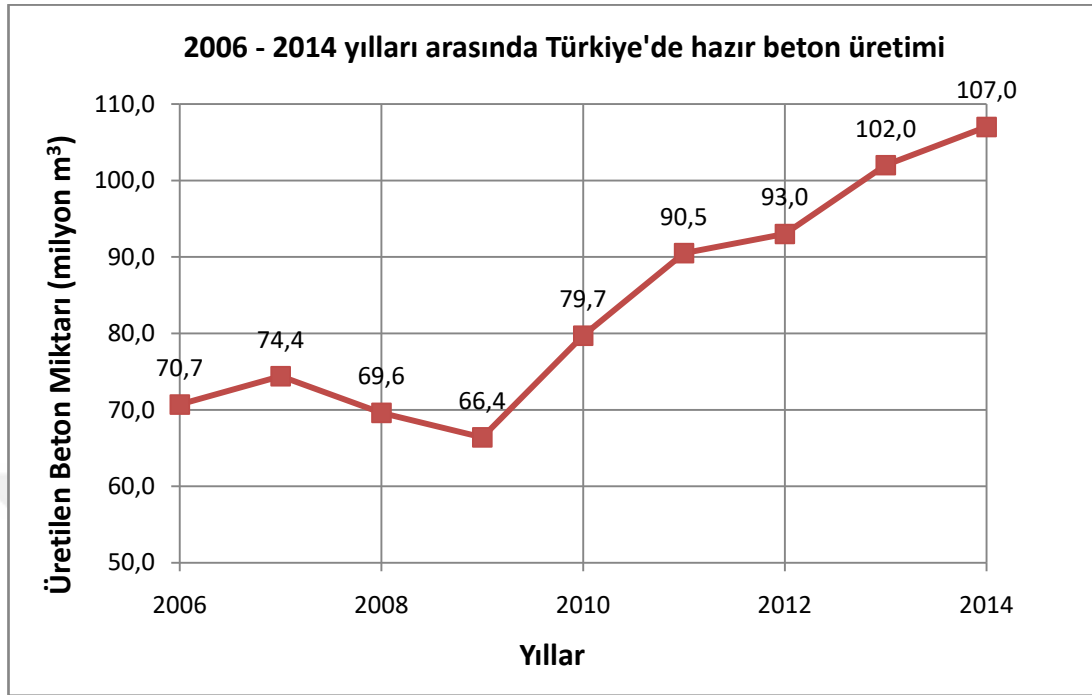
kullanılmış olmasıdır. Kaliteli inşaat mühendisliği hizmeti alan ve standartlara uygun betonun kullanıldığı birçok betonarme binanın sorunlu zeminlerde bile hasarsız ayakta kaldığı görülmüştür.

Günümüzde konut başta olmak üzere yol, tünel, köprü, baraj gibi birçok yapı için beton vazgeçilmez bir yapı malzemesidir. Bu durumun sebebi; betonun ucuzluğu, temin kolaylığı, üstün mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve istenen forma sokulabilmesi gibi ayırd edici özellikleridir. Betonun büyük şehirlerdeki alt yapılarda ve kanalizasyon sistemlerinde kullanımına başlanması, hijyen sağlaması yönü ile 18. ve 19. Yüzyıllarda Avrupa’da görülen salgın hastalıkların ortadan kaldırılmasına büyük katkı sağlamıştır. Ayrıca betonun yanmaz bir malzeme olması ve yüksek sıcaklıklara belirli süre dayanıklılık göstermesi nedeniyle yangın sonucunda ortaya çıkan can kayıpları büyük ölçüde önlenabilmektedir.

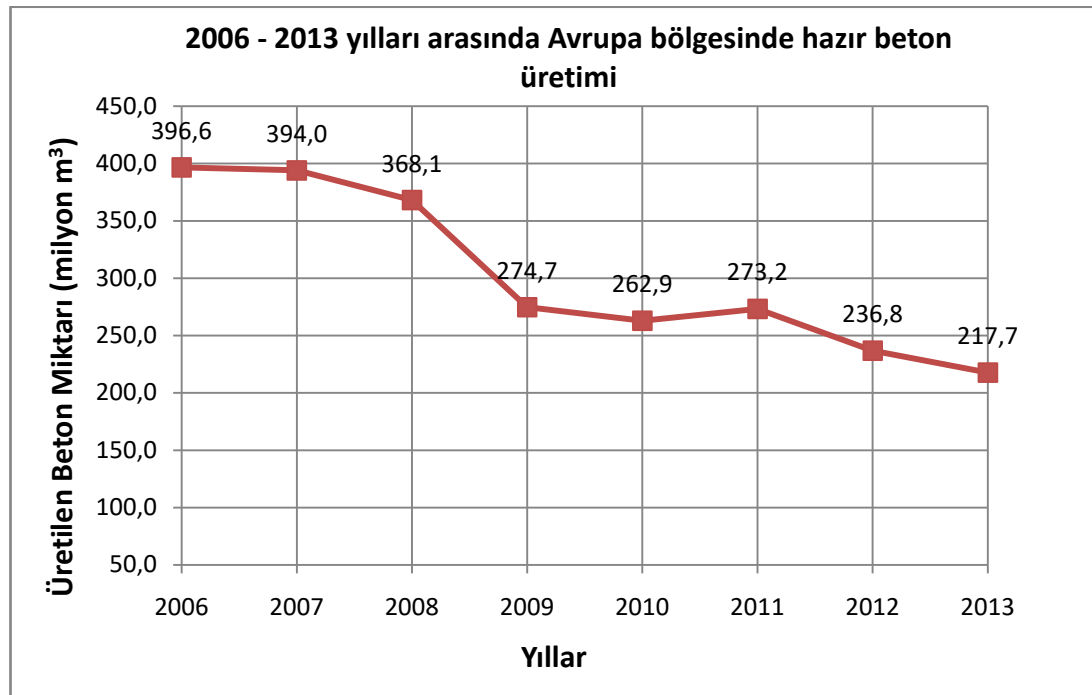
Günümüzde hazır beton üretimi tam otomasyona bağlı modern tesislerde gerçekleştirilmektedir. Mühendislik hesaplamaları ile inşası gerçekleştirilecek yapıya uygun beton sınıfı ve özellikleri tespit edilmekte ve modern üretim tesislerinde dışarıdan herhangi bir müdahalede bulunmadan beton üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen betonun taşıma esnasında özelliklerini koruyabilmesi için tasarlanmış mikser adı verilen araçlara aktarımı yapılmakta ve kullanılacağı inşaat sahasına gönderimi sağlanmaktadır. Hazır beton sektöründe gelişen makine teknolojileri sayesinde beton pompaları vasıtası ile betonun metrelerce yükseğe basılması ve kalıplara yerleştirilmesi sağlanabilmektedir.

Hazır betonun sağlamış olduğu avantajlar özellikle son yıllarda üretiminin ciddi oranlarda artmasını sebep olmuştur. Şekil 2.9’da Türkiye’de 2006 – 2014 yılları arasında gerçekleştirilen hazır beton üretiminin yıllara göre dağılımı görülmektedir. 2006 ile 2009 yılları arasında üretim miktarında ciddi bir artış görülmez iken 2009 yılından itibaren üretimde artış trendi başlamış olup, 2014 yılına gelindiğinde yıllık üretimin 2009 yılına göre yaklaşık % 60 oranında arttığı görülmektedir. Şekil 2.10’da ise 2006 – 2013 yılları arasında Avrupa bölgesinde gerçekleştirilen hazır beton üretiminin yıllara göre dağılımı görülmektedir. Avrupa bölgesinde gerçekleştirilen beton üretimi incelendiğinde Türkiye’nin aksine üretim trendinin azalma yönünde gerçekleştiği görülmektedir. 2006 yılındaki üretim miktarının 2013 yılına gelindiğinde yaklaşık % 46 oranında düştüğü görülmektedir. Verilere göre dikkat

çekici bir diğer husus ile 2013 yılında tüm Avrupa bölgesinde üretilen hazır beton miktarının neredeyse yarısına Türkiye tek başına ulaşmıştır [42].



Şekil 2.9 : Türkiye’de 2006 – 2014 yılları arasında gerçekleştirilen hazır beton üretimi [42].



Şekil 2.10 : Avrupa bölgesinde 2006 – 2013 yılları arasında gerçekleştirilen hazır beton üretimi [42].

Türkiye'nin deprem bölgesinde yer alması standartları sağlamayan ve gerekli mühendislik hizmetini almamış mevcut yapı stoğunu yenilemesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla özellikle ömrünü tamamlamış çok sayıda betonarme yapının bulunduğu İstanbul gibi büyük şehirlerde kentsel dönüşüm projeleri hayata geçirilmektedir. Günümüzde kaynakların ekonomik kullanılması bir zorunluluk haline geldiği için betonarme yapıların gerekli dayanım ve dayanıklılık şartlarını sağlayacak şekilde uzun ömürlü üretilmesi gerekmektedir. Uzun ömürlü betonarme elemanların üretilmesi ise ancak beton konusunda yapılacak ileri düzey deneysel araştırmalar ile mümkün olabilmektedir. Bu tez çalışmasında çeşitli mineral katkıları ihtiva eden harç numunelerinin dayanım özellikleri ve klorür geçirimsizliği, karbonatlaşma direnci gibi önemli dayanıklılık parametreleri üzerine deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

2.4 Beton/Harç Numunelerinin Dayanım ve Dayanıklılık (Durabilite) Deneyleri

Beton/harç elemanların en önemli iki performans kriteri yük taşıma kapasitesi yani basınç dayanımı ve dayanıklılık yani durabilitedir. Betonun basınç dayanım mukavemeti ve durabilite özellikleri, çeşitli uluslararası standard ve uluslararası kabul görmüş rehber dökümanlara uygun şekilde gerçekleştirilen testler vasıtası ile belirlenmektedir.

2.4.1 Beton/harç numunelerinin basınç dayanım deneyi

Beton test numunelerinin basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini standardına göre gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında basınç dayanımı çimento harç numuneleri üzerinden tayin edilmiştir. Çimento harç numunelerinin basınç dayanımı deneyi ise TS EN 196-1 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini standardına göre gerçekleştirilmektedir.

2.4.2 Beton/harç numunelerinin dayanıklılık (durabilite) deneyi

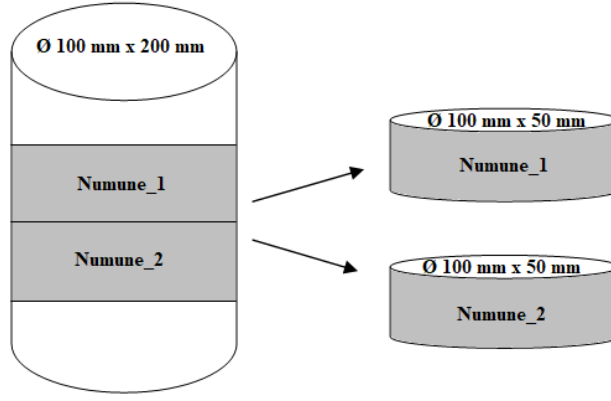
Betonarme yapı elemanlarının önemli dayanıklılık deneylerinin başında klorür geçirimsizliği, karbonatlaşma direnci, donma-çözülme direnci, kimyasal nedenler ile bozulma deneyleri gelmektedir. Bu tez çalışmasında hazırlanan çimento harç

numunelerinin NT BUILD 492 ve ASTM C1202-12 standartlarına göre hızlı klorür geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır. Numunelerin karbonatlaşma direnci deneyleri ise EN 13295 standardına göre hazırlanmış iklimlendirme ve şartlandırma kabini içerisinde gerçekleştirilmektedir.

2.4.2.1 NT BUILD 492 Beton/harç numunelerinin klorür migrasyon katsayısının tayini deneyi

Klorür migrasyon katsayısının tespiti deneyi, klorür iyonlarının beton içerisinde uzun zamanda katedeceği mesafenin elektriksel çekim kuvveti vasıtasıyla hızlandırılması ve derinlik ölçümü ile geçirimsizlik katsayısı hesaplama prensibine dayanmaktadır. Difüzyon bir maddenin doğal yollarla yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru hareket etmesidir. NT BUILD 492 klorür migrasyon deneyinde ise elektriksel kuvvet etkisi ile klorür iyonlarının hareketi hızlandırılarak iyon göçü sağlanmaktadır. Deney bu yönü ile bir hızlı yaşlandırma testidir. Testi gerçekleştirilen beton numunesinin klorür iyon geçirimsizliği ne kadar yüksekse migrasyon katsayısı da o kadar büyük olmaktadır. Hazırlanan farklı beton karışımlarının klorür geçirimsizliği konusunda uzun yıllar içerisinde göstereceği performans, bu deney sayesinde en fazla 96 saat gibi kısa bir sürede yüksek doğrulukta tahmin edilebilmektedir.

Deney eş zamanlı 3 paralel gerçekleştirilmekte olup, deneysel çalışmalarda 3 adet Ø 100 mm x 200 mm silindir beton/harç test numunesi kullanılmaktadır. Beton ya da harç numunelerinin üretim dizaynı belirlenmesi ve numune hazırlama aşamalarından sonra numunelerin su ile kürleme havuzunda kesilebilmek için yeterli prize ulaşması beklenilmektedir. Yeterli prize ulaşan numuneler Şekil 2.11 görülen şekilde su soğutmalı testere vasıtasıyla kesilerek test numuneleri hazırlanmaktadır.



Şekil 2.11 : NT BUILD 492 deneyi test numunelerinin hazırlanması.

Her bir standard Ø 100 mm x 200 mm olan silindir beton/harç numunesinden 2 adet Ø 50 mm x 100 mm silindir disk şeklinde test numunesi elde edilmektedir. Test numunelerinden biri normal prosedüre uygun olarak 28 günlük olduğunda deneyde kullanılırken diğeri duruma göre 56, 90 veya daha ileri yaş deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere kür havuzunda bekletilebilmektedir. Kesim işleminden sonra su kürleme havuzunda 28 gününü tamamlayan test numunesi, standardda anlatıldığı şekilde vakum prosedürü uygulanmak üzere Şekil 2.12’de görülmekte olan vakum sistemine alınmaktadır.



Şekil 2.12 : Numune vakum işlemi deney sistemi.

Deneyi gerçekleştirilecek olan test numuneleri vakum kutusu içerisine kesim yüzeyleri açıkta kalacak şekilde yan vaziyette yerleştirilir. Vakum kutusu sıkıca kapatılır. Vakum pompası çalıştırılır. Vakum metre vasıtası ile kutu içerisindeki vakum oranı kontrol edilerek kutu içerisindeki vakum basıncı 10 – 50 mbar (1 – 5

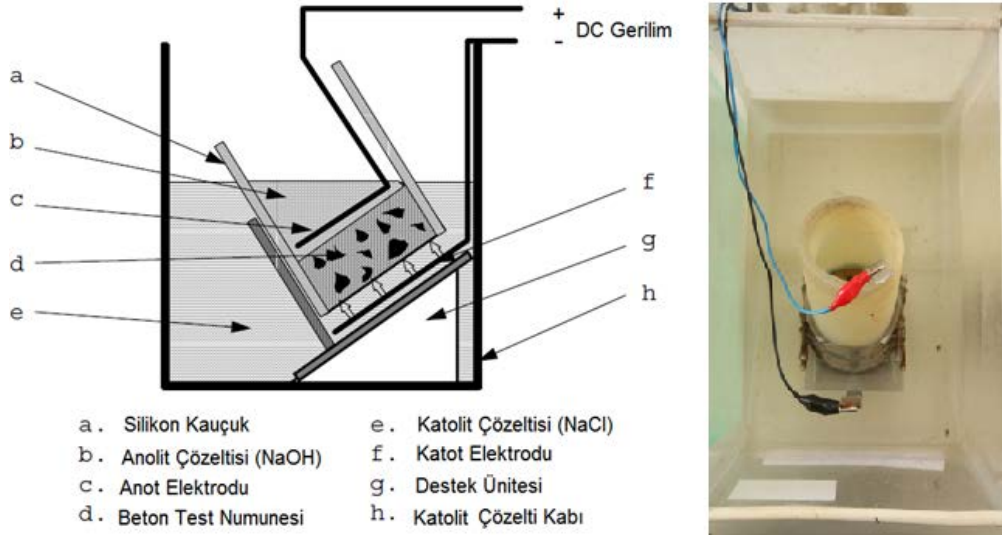
kPa) arasında kalacak şekilde 3 saat boyunca işleme devam edilir. 3 saatlik sürenin sonunda vakum pompası çalışır vaziyette iken sistem üzerinde yer alan gösterge yardımı ile numunelerin tamamı çözelti içerisinde kalacak şekilde yeterli miktarda doymuş kireç çözeltisi vakum kutusu içerisine emdirilir. Bu şekilde 1 saat daha vakum pompası çalıştırılarak kutu içerisinde vakum miktarı muhafaza edilir. 1 saatlik sürenin sonunda vakum pompası kapatılır, kutunun tahliye musluğu açılarak numunelerin normal atmosfer basıncına dönmesi sağlanır. Vakum kutusunun kapağı açılır. Numuneler kutu içerisine emdirilen saf su ile hazırlanan doymuş kireç çözeltisinde tamamen gömülü kalacak şekilde 18 ± 2 saat boyunca vakum kutusu içerisinde bekletilir.

Vakum kutusunda doymuş kireç çözeltisindeki 18 ± 2 saat boyunca bekleme süresinin sonunda test numuneleri çözelti içerisinden çıkartılırlar. Numuneler kuru bir havlu vasıtası ile kurularak Şekil 2.13’de gözüktüğü şekilde özel hazırlanan silikon kauçuk deney aparatlarının içerisine yine özel hazırlanan paslanmaz çelik çift taraflı sanayi tipi kelepçeler yardımı ile yerleştirilirler. Bu işlemde önce deneyde tam sızdırmazlığı sağlamak amacıyla numune dış çeperlerine kauçuk bant uygulaması yapılmaktadır. Numuneler 150 mm uzunluğundaki silikon kauçuk aparatlar içerisine, Ø 100 mm x 200 mm silindirden orta kesim yüzeyi altta kalacak şekilde yerleştirildikten sonra test numunesi kauçuk aparat içerisinde 2 adet kelepçe ile sıkıca sabitlenir.



Şekil 2.13 : Test numunelerinin silikon kauçuk aparatlara yerleştirilmesi.

Numuneler kauçuk aparatlara yerleştirildikten sonra üst tarafta kalan boş kısma 300 ml kadar 0,3 M NaOH çözeltisi doldurulur. Numuneler Şekil 2.14’de görülen vaziyette içerisinde yaklaşık olarak 12 kg kadar % 10 konsantrasyonunda NaCl çözeltisi bulunan deney havuzlarına yerleştirilirler.



Şekil 2.14 : Silikon kauçuk aparatların deney havuzlarına yerleştirilme şekli [5].

Test numunelerinin anot ve katot bağlantıları yapıldıktan sonra Şekil 2.15’de görülen DC güç kaynakları vasıtası ile Çizelge 2.2’deki DC akım-gerilim-deney süresi tablosuna uygun olarak deneye başlanır. Şekil 2.16’da 3 paralel şekilde yürütülen NT BUILD 492 deney düzeneği havuzları görülmektedir.



Şekil 2.15 : DC Güç kaynakları.

Çizelge 2.2 : DC akım-gerilim-deney süresi tablosu [5].

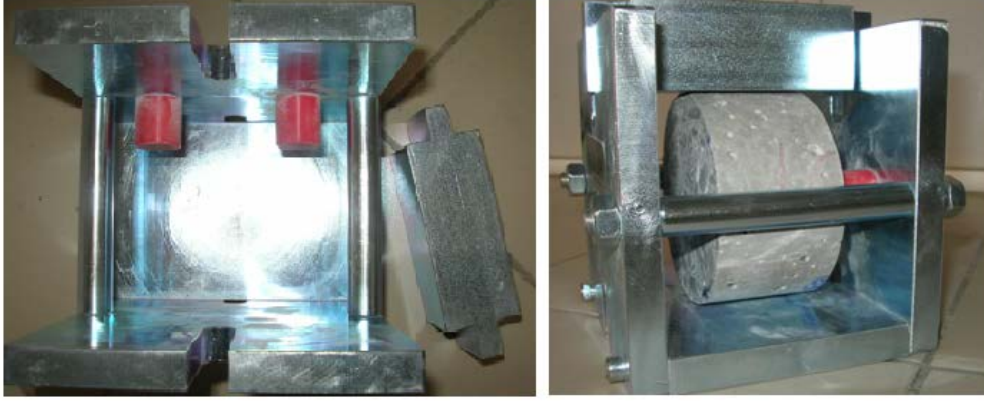
Başlangıç Akımı I_{30V} (mA)	Uygulanan Gerilim U (Volt)	Ayardan Sonra Okunan Akım I_0 (mA)	Test süresi t (saat)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6



Şekil 2.16 : NT BUILD 492 deney düzeneği havuzları.

Belirtilen deney süresinin sonunda test numuneleri havuzlardan dışarıya alınarak silikon kauçuk aparatlardan çıkartılır. Numuneler musluk suyu ile yıkanır ve bir havlu yardımı ile kurulur. Daha sonra numuneler özel olarak imal edilen Şekil 2.17’de görülen numune yarma aparatı yardımıyla beton test makinesinde ortadan

iki parçaya ayrılırlar. Ortadan iki parçaya yarılan taze numune yüzeylerine 0,1 M AgNO_3 çözeltisi püskürtülür ve numuneler çeker ocak içerisinde kurumaya bırakılır. Kuruyan numunelerde klorür iyonlarının beton içerisinde nüfus ettiği derinlik, beyaz bir bölge halinde görsel olarak kendini belli etmeye başlar.



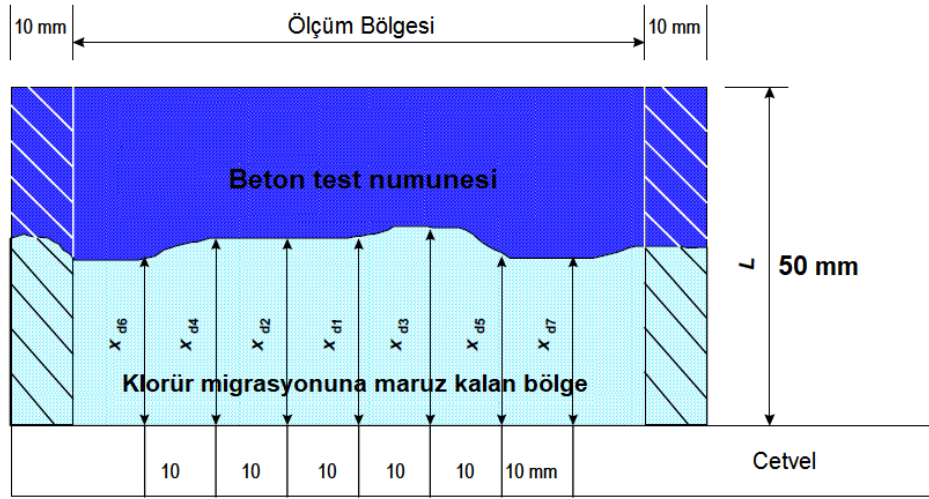
Şekil 2.17 : Numune yarma aparatı.

Şekil 2.18’de klorür iyonlarının numune içerisinde katettiği mesafeyi anlatan bir beton numune görseli görülmektedir.



Şekil 2.18 : Klorür migrasyonuna maruz kalmış beton numune görseli.

Kurumanın tamamlanmasından sonra kumpas yardımı ile Şekil 2.19’de görülen 7 farklı noktadan, klorür migrasyon derinliği ölçüm sonuçları milimetre cinsinden okunarak kayıt altına alınır.



Şekil 2.19 : Klorür migrasyon derinliği ölçüm yöntemi [5].

Kumpas ile yapılan migrasyon derinliği ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel hesaplamalar sonucunda deneyi gerçekleştirilen beton ya da harç numunesinin klorür migrasyon katsayısı m^2/s cinsinden bulunmuş olmaktadır. Klorür migrasyon katsayısı hesaplamasında kullanılan parametreler ve hesaplama formülü aşağıda görülmektedir.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} (x_d - 0,0238\sqrt{\frac{(273 + T)L}{U - 2} x_d})$$

Formüldeki ifadeler ise,

D_{nssm} : Migrasyon katsayısı, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

U : Uygulanan gerilim, Volt

T : Anolit çözeltisinin deney başlangıcı ve sonundaki sıcaklık ortalaması, $^{\circ}\text{C}$

L : Deney numunelerinin kalınlığı, mm

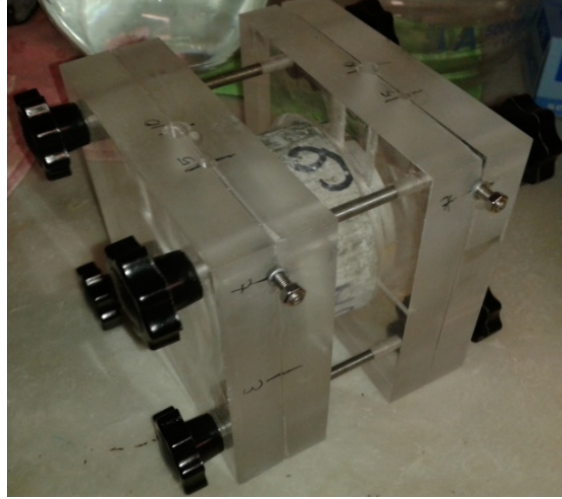
x_d : Deney numuneleri içersine klorür migrasyonu ortalama derinliği, mm

t : Deney süresi, saat

Hesaplanan klorür migrasyon katsayısı çeşitli simülasyon programlarında kullanılarak klorür iyonlarının yıllar içerisinde betonda ilerleme mesafesi yüksek doğrulukta tahmin edilebilmekte ve yapının inşa edileceği çevresel şartlara uygun, klorür difüzyonunu minimize edecek uygun beton tasarımları üzerinde çalışılabilmektedir.

2.4.2.2 ASTM C1202-12 Beton/harç numunelerinin klorür iyonu geçişine karşı direnci deneyi

Betonun klorür iyonu geçişine karşı direnci deneyi, beton/harç numunelerinin klorür iyonlarının geçişine karşı gösterdiği elektriksel direncin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Deney, NT BUILD 492 deneyinde olduğu gibi eş zamanlı 3 paralel gerçekleştirilmekte olup, deneysel çalışmalarda da aynı şekilde 3 adet Ø 100 mm x 200 mm silindir beton/harç test numunesi kullanılmaktadır. NT BUILD 492 deneyinden farklı olarak test numuneleri beton silindir numunelerin dolum yönünden 50 mm ± 3 mm kesilerek hazırlanmaktadır. Vakum işlemi de benzer özellikler taşımak ile birlikte en büyük fark, vakum işleminden önce test numunelerinin dış yan çeperlerine epoksi uygulaması yapılması ve 3 saatlik vakum işleminin sonunda vakum kutusu içerisine doymuş kireç çözeltisi yerine musluk suyu çekilmesidir. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra test numunelerinin kurumasına izin verilmeden numuneler Şekil 2.20’de görülen test ekipmanının içerisine yerleştirilir ve çözelti tam sızdırmazlığını sağlamak amacı ile özel hızlı kuruyan çekomastik uygulaması yapılmaktadır.



Şekil 2.20 : ASTM C1202-12 Deney ekipmanı.

Test numuneleri 3 paralel şekilde deney ekipmanının içerisine yerleştirildikten sonra Şekil 2.20’de görülen başlıkların içerisine 0,3 M NaOH çözeltisi ve % 3 NaCl çözeltisi dökülerek başlıklar belirtilen çözeltiler ile doldurulur. DC güç kaynağının negatif kutbu NaCl çözeltisi bulunan başlığa, pozitif kutbu ise NaOH çözeltisi bulunan başlığı kablo vasıtası ile bağlanır. DC güç kaynağı 60 V gerilime ayarlanır deney başlangıcı DC akım şiddeti ölçülür. Daha sonra 6 saat boyunca her yarım

saatte bir deney hücrelerinden geçen DC akım şiddeti ölçülerek deney tamamlanır. Deney düzeneğinde DC akım şiddeti okumaları elektriksel devreye seri bağlanan ampermetreler vasıtası ile yapılmaktadır. Deney başlangıcında, 6 saatlik deney periyodunun her yarım saatinde ve deney sonunda yapılan tüm akım şiddeti ölçümleri video kaydı olarak tutulmaktadır. Şekil 2.21’de 3 paralel gerçekleştirilen ASTM C1202-12 deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.21 : ASTM C1202-12 Deney düzeneği.

Deney sonunda 6 saat süresince kayıt altına alınan DC akım şiddeti değerleri aşağıda görülen formülde kullanılarak deneyi gerçekleştirilen test numunesinin coulombs cinsinden klorür iyonu geçişine karşı direnci tespit edilmektedir.

$$Q = 900 (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + 2 \cdot I_{90} + 2 \cdot I_{120} \dots + 2 \cdot I_{300} + 2 \cdot I_{330} + 2 \cdot I_{360})$$

Q : Geçen yük miktarı

I_0 : 60 V gerilim uygulandıktan hemen sonra okunan ilk akım şiddeti değeri, Amper

I_t : 60 V gerilim uygulandıktan sonra “t” süresindeki akım şiddeti değeri, Amper

Hesaplanan coulombs yük değeri ne kadar büyük ise numuneden geçen elektriksel akım şiddetinin de aynı oranda büyük olduğu anlaşılmaktadır. Elektriksel akım şiddeti dolayısıyla hesaplanan coulombs yük değeri arttıkça beton/harç test numunesinin klorür iyonu geçişine karşı gösterdiği direnç azalmaktadır. Çizelge 2.3’de hesaplanan coulombs yük değeri ile beton/harç test numunesi klorür iyonu geçirimsizliği arasındaki ilişkiyi gösterir tablo görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Yük değeri (coulombs) ile beton/harç test numunesinin klorür iyonu geçirimsizliği arasındaki ilişki [6].

Hesaplanan Yük Değeri (coulombs)	Klorür İyonu Geçirimsizliği
> 4000	Yüksek
2000 - 4000	Orta
1000 - 2000	Düşük
100 - 1000	Çok Düşük
< 100	İhmal edilebilir seviyede

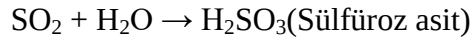
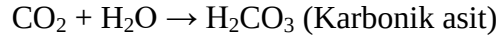
2.4.2.3 EN 13295 Beton/harç numunelerinin karbonatlaşma direncinin tayini deneyi

Beton, normal şartlar altında yüksek pH değeri ile betonarme yapının çok önemli bir elemanı olan donatı çeliğini korozyondan koruyucu etki göstermektedir. Normal atmosfer şartlarında açık havadaki CO₂ konsantrasyonu yaklaşık % 0,03 (300 ppm) mertebesinde. Atmosferde bulunan karbondioksit gazının betonun içerisine difüzyonu, kimyasal reaksiyon sonucu betonun pH değerini düşürür ve betonarme yapıdaki donatının korozyona uğrayarak yok olmasına sebep olur. Bu olay betonarme yapıların servis ömrünü belirleyen önemli faktörlerden biridir. Ülkemizde yaşanan depremlerden sonra yapılan araştırmalarda zarar gören betonarme yapılarda donatının ciddi oranda korozyona uğradığı tespit edilmiştir. Özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde karbondioksit gazının atmosferdeki oranının normal değerlerin üzerinde seyrettiği düşünüldüğünde betonarmenin karbonatlaşma hasarının ciddiyeti daha iyi anlaşılmaktadır. Üretilen betonun karbondioksit gazı geçirgenliği ne kadar düşük olursa betonarme yapının çevresel etkilerden zarar görme olasılığı o kadar düşük olacaktır. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi sayesinde betonarme yapıda uzun yıllar içerisinde gerçekleşecek karbonatlaşma zararı önceden tahmin edilebilmekte ve karbonatlaşma direnci yüksek beton tasarımları üzerinde çalışılabilmektedir.

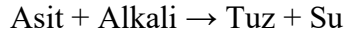
Atmosferde asit oluşturan gazlar vardır. Bu gazların başında CO₂ ve SO₂ gelmektedir. Karbonatlaşma reaksiyonu 3 aşamada gerçekleşmektedir.

1. Aşama: Atmosferdeki gazların betonun gözenek sistemine işlemesi

2. Aşama: Gazların gözenek suyu ile oluşturduğu reaksiyon



3. Aşama: Oluşan asitlerin gözenek suyu içinde çözünmüş olan çimentonun alkali bileşenleri ile reaksiyona girerek bunları nötr hale getirmesi



En önemli reaksiyon ise basitleştirilmiş olarak aşağıda belirtilmiştir:



pH değerinin 9,5'un altına düşmesi halinde beton, betonarme çeliğini koruma etkinliğini kaybeder. Yukarıdaki reaksiyon sonucu betonun pH değerinin 8,3 civarına düşmesi, betonun donatı çeliğini koruma etkinliğini tamamen kaybettiğini göstermektedir. Betonun dizayn aşamasında karbonatlaşma oranının belirlenmesinde yapılan testlerin başında EN 13295 Betonun Karbonatlaşma Direncinin Tayini deneyi gelmektedir.

Hızlı karbonatlaşma deney düzeneği % 1 (10.000 ppm) CO₂ konsantrasyonu; 21,0 °C ± 2,0 °C sıcaklık ve % 60 ± % 10 bağıl nem ortamının 56 gün boyunca kesintisiz olarak sağlandığı kapalı çevrim bir test kabininden oluşmaktadır. Hızlı karbonatlaşma deney düzeneğindeki serbest CO₂ gaz bileşiğinin ortamdaki konsantrasyonu beton ile reaksiyon sonucunda düşer. Konsantrasyonun % 1 değerinde tutulabilmesi için ortamdaki değerin ölçülmesi ve ortama 56 gün boyunca otomatik olarak gaz şarjı yapılması gerekmektedir. Ayrıca CO₂ gazının beton gözenek suyundaki Ca(OH)₂ ile reaksiyonu sonucunda açığa su çıkmaktadır. Bu durum kabin içerisindeki nem oranının deney süresince hızlı bir şekilde artmasına sebebiyet vermektedir. Deneyin bağıl nem toleransı en fazla % 70 olduğu için açığa çıkan nemin deney kabininden uzaklaştırılması gerekmektedir. Aynı şekilde 21,0 °C ± 2,0 °C sıcaklık şartlarının 56 gün boyunca kesintisiz olarak sağlanabilmesi için otomatik olarak ısıtma ve soğutma yapılabilmesi gerekmektedir.

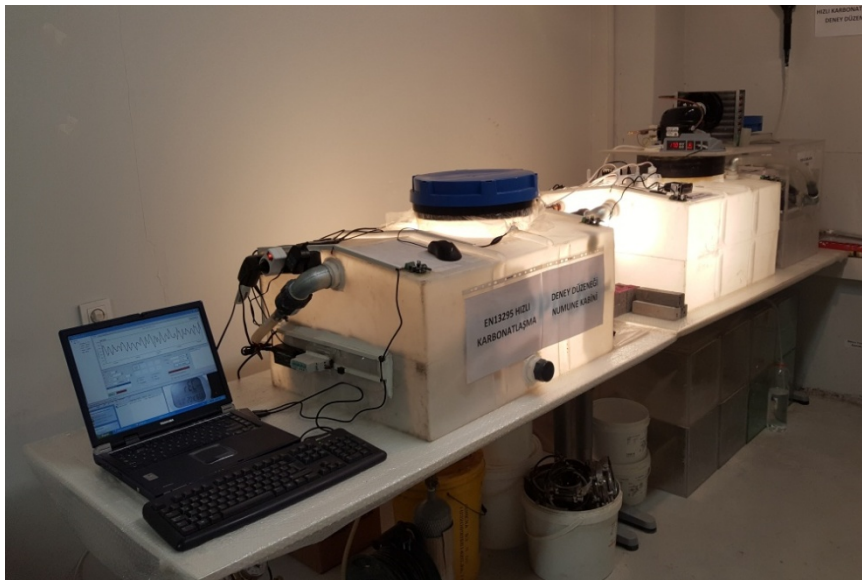
Hızlı karbonatlaşma deney düzeneğinde ortam CO₂ konsantrasyonu, özel olarak ithal edilen gaz ölçüm ve akış kontrol cihazı ile 56 gün boyunca otomatik olarak izlenmektedir. Ayrıca nem oranındaki artış ise özel nem alma cihazı sayesinde aynı şekilde 56 gün boyunca otomatik olarak kontrol altında tutulmaktadır. Sistem,

ortamdaki sıcaklık değişimine göre tam otomatik olarak ısıtma veya soğutma yapabilmektedir. Şekil 2.22’de deneysel çalışma amacı ile özel olarak USA’dan ithal edilen CO₂ gaz konsantrasyonu ölçüm ve akış kontrol sistemi görölmektedir.



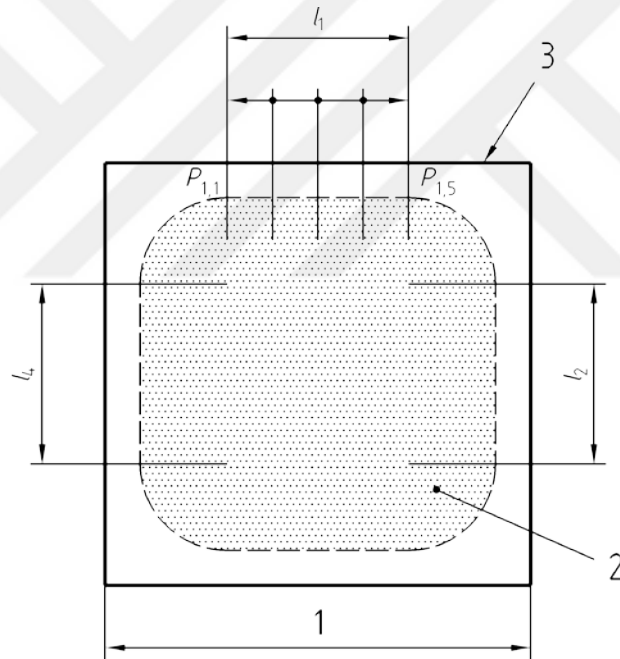
Şekil 2.22 : CO₂ gaz konsantrasyonu ölçüm ve akış kontrol sistemi.

Şekil 2.23’de ise beton/harç test numunelerinin hızlı karbonatlaşma deneylerinde kullanılmak üzere Yıldız Teknik Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesinde (Teknopark) faaliyet gösteren Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) Yapı Malzemeleri Laboratuvarında Ar-Ge proje çalışması olarak kurulumu gerçekleştirilen deney düzeneği görölmektedir. Düzeneğin sahip olduğu özellikleri ile Türkiye’de benzeri bulunmamaktadır.



Şekil 2.23 : Hızlı karbonatlaşma deney düzeneği.

EN 13295 standardına göre karbonatlaşma direnci deneyi 40 mm x 40 mm x 160 mm veya 100 mm x 100 mm x 400 mm prizma test numunelerine gerçekleştirilmektedir. Deneyler 28 günlük su kürlenmesi ve en az 14 günlük kurutma işlemine tabi tutulmuş numuneler üzerinde 2 paralel gerçekleştirilmektedir. Kurutma işlemi $21,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\% 60 \text{ RH} \pm \% 10 \text{ RH}$ bağıl nem olacak şekilde standard laboratuvar şartlarında yapılmaktadır. Deney standardına göre 14 günden az olmayacak kurutma sürecinin sonunda, numunelerin 24 saat içerisindeki en büyük kütle kaybı $\% 0,2$ olmalıdır. Eğer 14 gün sonunda numunelerde yeterli kuruma sağlanamaz ise 24 saatte en fazla $\% 0,2$ kütle kaybı olacak şekilde kurutma işlemine devam edilmektedir. Kurutma işleminin sonunda tüm numuneler $\% 1$ (10.000 ppm) CO_2 konsantrasyonu; $21,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\% 60 \pm \% 10$ bağıl nem ortamının kesintisiz olarak sağlandığı özel test kabininde 56 gün boyunca bekletilmektedir.



Şekil 2.24 : 5 ölçüm ile gerçekleştirilen karbonatlaşma derinliği ölçüm yöntemi [7].

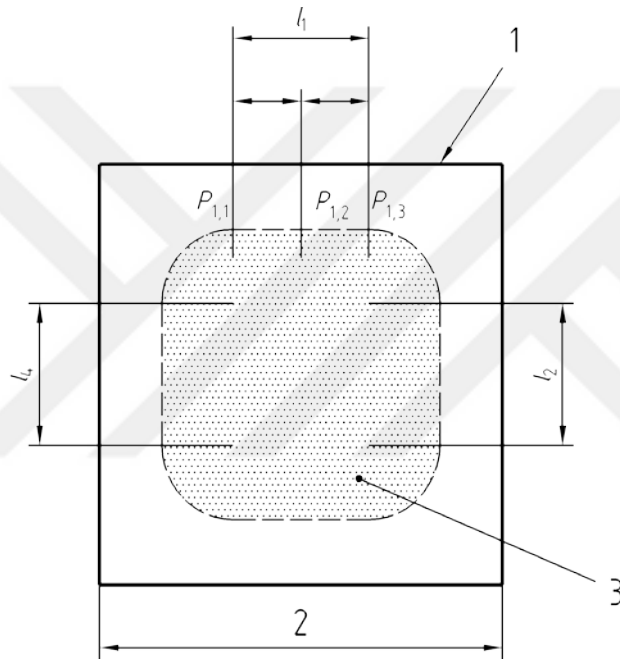
$$l \geq 30 \text{ mm}, d_{k,1} = \frac{\sum(p_{1,1-5})}{5}$$

1: Prizma yan ayırıtı

2: Fenolftalein çözeltisi etkisi ile pembe renk alan bölge

3: Prizma uzun ayırıtı

Bu sürenin sonunda numuneler kabin içerisinde alınarak özel yarma aparatı yardımı ile ortadan iki parçaya ayrılmakta ve taze yarılmış yüzeylere, 1 g fenolftalein asit-baz indikatörünün 70 ml etanol ve 30 ml saf su içerisinde çözülmesi ile elde edilen çözelti püskürtülmektedir. Fenolftalein çözeltisi etkisi ile pH değeri 12-13 mertebesinde kalan bölgeler pembe renk alırken, pH değerinde düşme olan bölgelerde renk değişikliği gözlemlenmez. Çözelti uygulamasını takip eden (60 ± 5) dakikalık bekleme süresinin sonunda, Şekil 2.24 ve Şekil 2.25’de gösterilen ölçme metotlarına uygun olarak kumpas ve cetvel yardımı ile karbonatlaşma derinliği mm cinsinden sayısal olarak tespit edilmektedir.



Şekil 2.25 : Geniş kenar etkisi ile 3 ölçüm ile gerçekleştirilen karbonatlaşma derinliği ölçüm yöntemi [7].

$$20 \leq l < 30 \text{ mm}, d_{k,1} = \frac{\Sigma(p_{1,1-3})}{3}$$

1: Prizma yan ayrıtı

2: Fenolftalein çözeltisi etkisi ile pembe renk alan bölge

3: Prizma uzun ayrıtı

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Hammadde Uygunluk Deney Sonuçları

Deneysel çalışmalarda farklı mineral katkılı harç numunelerinin dayanım ve dayanıklılık (durabilite) özellikleri üzerine araştırmalar yürütülmüştür.

Çalışmada kullanılan öğütülmüş klinker ve CEM I 42,5R çimento Akçansa Çimento San. ve Tic. A.Ş. İstanbul Büyükçekmece Fabrikasından temin edilmiştir. Çalışmada doğal mineral katkı olarak zeolit kullanılmıştır. Zeolit minerali, Rota Madencilik A.Ş. firmasının Manisa Gördes'te yer alan işletmesinden temin edilmiştir. Çalışmada 90 µm inceliğinde zeolit kullanılmıştır. Diğer kullanılan mineral katkıları ise başka sanayi kollarının atık malzemesi olan yüksek fırın cürufu ve borjips atığıdır. Yüksek fırın cürufu, Bolu Çimento'ya ait Ereğli cürufudur. Borjips atığı ise Eti Maden İşletmelerinin Bandırma Bor ve Asit Fabrikasından temin edilmiştir. Borik asit üretim atığı yaş haldeki çamurun etüv yardımıyla kurutulması sonucunda elde edilen katı parçalar çeneli kırıcı vasıtası ile öğütülmüştür. Daha sonra gerçekleştirilen eleme işlemi ile 250 µm elek altı borjips atığı, deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de çalışmada kullanılan hammaddelerin kimyasal içerikleri görülmektedir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan hammaddelerin kimyasal içerik analizi sonuçları.

Bileşenler (%)	CEM I 42,5R Portland Çimento	Öğütülmüş Klinker	Yüksek Fırın Cürufu	Zeolit	Borjips Atığı
Al ₂ O ₃	4,43	5,00	10,29	10,74	-
SiO ₂	19,80	20,70	45,06	78,01	4,10
CaO	63,70	64,90	38,00	3,35	45,10
MgO	1,08	1,20	5,93	1,35	-
Fe ₂ O ₃	3,20	3,70	0,63	1,41	0,99
Na ₂ O	0,50	0,30	-	2,26	-
K ₂ O	-	0,80	-	2,32	-
SO ₃	-	-	-	-	48,70
B ₂ O ₃	-	-	-	-	1,10

CEM I 42,5R çimento ve öğütülmüş klinkerin kimyasal içerik analizi Akçansa Çimento ve San. Tic. A.Ş. İstanbul Büyükçekmece Fabrikasında XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yüksek fırın cürufu ve zeolit kimyasal içerik analizleri, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Kimya Metalurji Fakültesi Kimyasal Analiz Laboratuvarında yaş analiz yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Borjips atığı içerik analizi ise Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Kimya Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir. Kimyasal yaş analiz çalışmasında numuneler başta Na₂CO₃ ile yüksek sıcaklıkta eritilmiştir ve sonrasında HCl –su karışımıyla çözeltiye alınmıştır. Daha sonra Perkin Elmer AAnalyst800 model atomik absorbsiyon cihazında elemental analizi yapılmıştır. Na ve K tespitinde ise numuneler HClO₄, HF ve HNO₃ karışımıyla çözeltiye alınıp aynı şekilde atomik absorbsiyon cihazında elemental analiz yapılmıştır.

3.2 Karışım ve Dizayn Çalışması

Kontrol numunesi TS EN 196-1 standardına uygun olarak CEM I 42,5R Portland çimentosu ile hazırlanmıştır. Test numuneleri mineral katkılarının ikame oranlarının belirlenmesinde sektördeki genel kullanım oranları ve literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgiler dikkate alınmıştır. Tüm kontrol ve test numuneleri eşit su / bağlayıcı oranında herhangi bir kimyasal katkı kullanılmadan hazırlanmıştır. Hazır beton sektöründe cürufun halihazırda yüksek oranlarda kullanılmasından dolayı yüksek fırın cürufu için % 40, % 50 ve % 60 olmak üzere 3 farklı ikame oranı belirlenmiştir. Yapılan literatür araştırmasından elde edilen verilere göre borjips atığı ve zeolit mineralinin beton içerisinde akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı herhangi bir kimyasal katkı olmaksızın kullanılması numunelerde kıvam kaybı, priz süresinin uzaması ve ciddi işlenebilirlik sorunlarına yol açmaktadır. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmadan borjips atığı ve zeolit minerali ile yapılan % 7 ikame oranı üzerindeki deneme karışımlarında kıvam kaybından kaynaklanan ciddi numune işlenebilirlik ve yerleştirme problemleri ile karşılaşmıştır. Yapılacak deneysel çalışmalarda tüm numuneler eşit su / bağlayıcı oranında herhangi bir kimyasal katkı kullanılmadan hazırlanacağı için borjips atığı ve zeolit minerali maksimum ikame oranı bu tez çalışmasında % 7 ile sınırlandırılmıştır. Bu sebeplerden dolayı borjips atığı ve zeolit minerali için yapılan literatür araştırmalarından da yola çıkılarak % 3, % 5 ve % 7 olmak üzere 3 farklı ikame oranı belirlenmiştir.

Dayanım ve karbonatlaşma direnci deneyleri için 40 mm x 40 mm x 160 mm ayrıtlarında her bir karışım için 3'er adet prizma kontrol ve test harç numuneleri hazırlanmıştır. Dayanım ve karbonatlaşma direnci test numuneleri hazırlanırken Limak Trakya Çimento Pınarhisar Fabrikasından temin edilen TS EN 196-1 standardına uygun standard kum ve Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) Yapı Malzemeleri Laboratuvarına ait numune kalıpları ve çimento mikseri cihazı kullanılmıştır. Klorür migrasyon katsayısı tespiti ve klorür iyonu geçişi direnci deneysel çalışmaları için 3'er adet Ø 100 mm x 200 mm silindir kontrol ve test numuneleri hazırlanırken Kumsay Madencilik Çorlu'dan temin edilen kum kullanılmıştır. Hazırlanan silindir test numunelerinin kesme işlemleri su soğutmalı testere ile yapılmıştır.

Zeolit ve yüksek fırın cürufu mineral katkılarının kullanımı, doğrudan CEM I 42,5R Portland çimentosu ile ikame yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Borjips atığı, literatür araştırmasından elde edilen veriler ışığında priz alma süresinden kaynaklı dezavantajlarından dolayı alçıtaşı içermeyen öğütülmüş klinker ile ikame edilerek kullanılmıştır. Zeolit, yüksek fırın cürufu ve borjips atığını birlikte içeren test numunelerinde de aynı şekilde ikame edilen bağlayıcı öğütülmüş klinkerdir. Hazırlanan dayanım ve klorür geçirimsizliği test numuneleri $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında kür havuzunda en az 28 gün boyunca kürlenmiştir. Karbonatlaşma direnci test numuneleri ise aynı şekilde 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra en az 14 gün laboratuvar ortam şartlarında kurutmaya tabi tutulmuştur. Çizelge 3.2’de hazırlanan test numunelerinin karışım oranları görülmektedir.



Çizelge 3.2 : Numune karışım oranları.

Harç Numune Bilgileri		Harç Numune Bileşenleri						
İçerik	Numune Kodu	Su (g)	CEM I 42,5R Çimento (g)	Öğütülmüş Klinker (g)	Yüksek Fırın Cürufu (g)	Borjips Atığı (g)	Zeolit (g)	Kum (g)
Kontrol Numunesi	A	450	900	0	0	0	0	2700
	B	450	540	0	360	0	0	2700
% 40, %50 ve % 60 cüruf ikamesi	C	450	450	0	450	0	0	2700
	D	450	360	0	540	0	0	2700
% 3, %5 ve % 7 borjips atığı ikamesi	E	450	0	873	0	27	0	2700
	F	450	0	845	0	45	0	2700
	G	450	0	837	0	63	0	2700
% 3, %5 ve % 7 zeolit ikamesi	H	450	873	0	0	0	27	2700
	I	450	845	0	0	0	45	2700
	J	450	837	0	0	0	63	2700
% 40, %50 ve % 60 cüruf; %3, %5 ve %7 borjips atığı ve zeolit ikamesi	K	450	0	486	360	27	27	2700
	L	450	0	360	450	45	45	2700
	M	450	0	234	540	63	63	2700

Şekil 3.1’de hazırlanan harç kontrol ve test numunelerini kürlenmesinde kullanılan kür havuzu görülmektedir.



Şekil 3.1 : Numune kür havuzu ve hazırlanan numunelerden örnekler.

Şekil 3.2’de dayanım ve karbonatlaşma direnci testleri için hazırlanan numunelere ait görseller görülmektedir. Şekil 3.3’de NT BUILD 492 klorür migrasyon katsayısı testi gerçekleştirilen numunelere ait görseller yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Basınç dayanımı ve karbonatlaşma direnci deneyleri için hazırlanan kontrol ve test numuneleri.



Şekil 3.3 : NT BUILD 492 klorür migrasyon katsayısı test numuneleri.

3.3 Eğilme ve Basma Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Hazırlanan 40 mm x 40 mm x 160 mm ayrıtlarındaki kontrol ve test numuneleri, çimento eğilme ve basma basınç dayanımı cihazında teste tabi tutulmuş ve numunelerin eğilme ve basma basınç dayanımı belirlenmiştir. Eğilme ve basma basınç dayanım testleri 28 günlük ve 90 günlük numunelere uygulanmıştır. Ayrıca karbonatlaşma direnci deneyine tabi tutulan numunelere de eğilme ve basma basınç dayanımı testi uygulanmış olup, numunelerdeki karbonatlaşma reaksiyonunun eğilme ve basma basınç dayanımına etkisi üzerine deneysel verilere ulaşılmıştır. Şekil 3.4’de eğilme ve basma basınç dayanımı testlerinin gerçekleştirildiği malzeme test makinası görülmektedir.



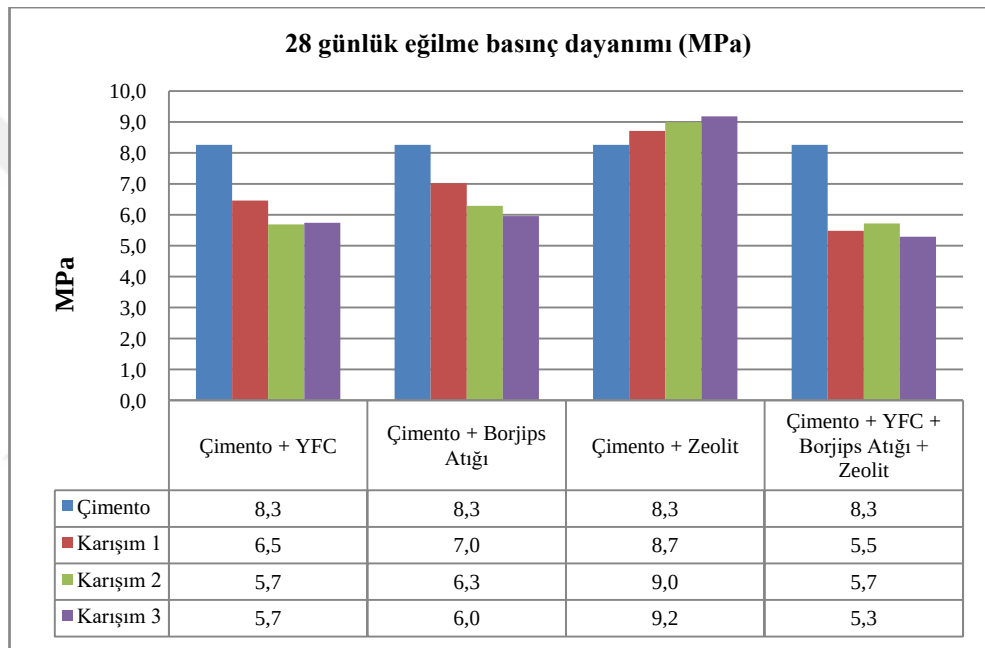
Şekil 3.4 : Çimento eğilme ve basma basınç dayanımı test makinası.

Numunelerin eğilme ve basma basınç dayanımı test sonuçları Çizelge 3.3’de toplu olarak görülmektedir.

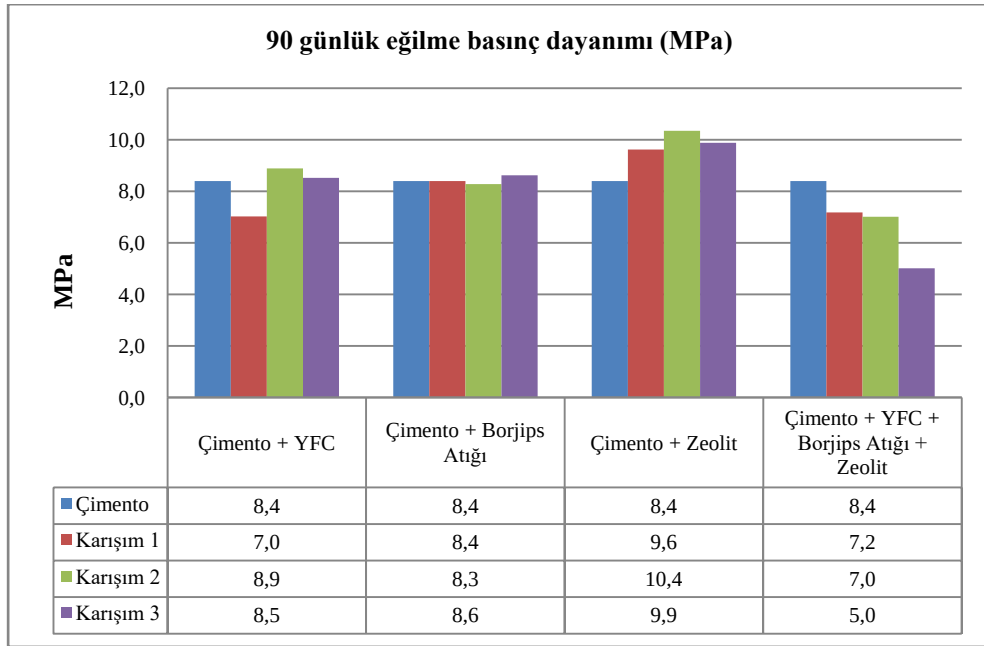
Çizelge 3.3 : Eğilme ve basma basınç dayanımı deney sonuçları.

Harç Numune Bilgileri		Eğilme Dayanımı (MPa)		Basma Dayanımı (MPa)		Karbonatlaşma Sonrası Dayanım (MPa)	
İçerik	Numune Kodu	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün	Eğilme Dayanımı	Basma Dayanımı
Kontrol Numunesi	A	8,3	8,4	62,9	66,1	8,3	73,5
	B	6,5	7,0	47,6	58,1	6,4	61,4
% 40, %50 ve % 60 cüruf ikamesi	C	5,7	8,9	38,7	54,6	6,2	53,5
	D	5,7	8,5	34,3	52,8	6,9	48,5
	E	7,0	8,4	43,7	47,8	8,1	51,9
% 3, %5 ve % 7 borjips atığı ikamesi	F	6,3	8,3	39,7	47,0	7,2	51,2
	G	6,0	8,6	31,5	45,9	8,1	49,0
	H	8,7	9,6	59,2	66,3	9,3	77,9
% 3, %5 ve % 7 zeolit ikamesi	I	9,0	10,4	61,5	65,0	9,8	78,8
	J	9,2	9,9	62,9	66,9	8,3	78,7
	K	5,5	7,2	38,6	53,5	7,1	50,0
% 40, %50 ve % 60 cüruf; %3, %5 ve %7 borjips atığı ve zeolit ikamesi	L	5,7	7,0	33,5	44,7	6,9	38,1
	M	5,3	5,0	26,5	33,6	4,1	25,5

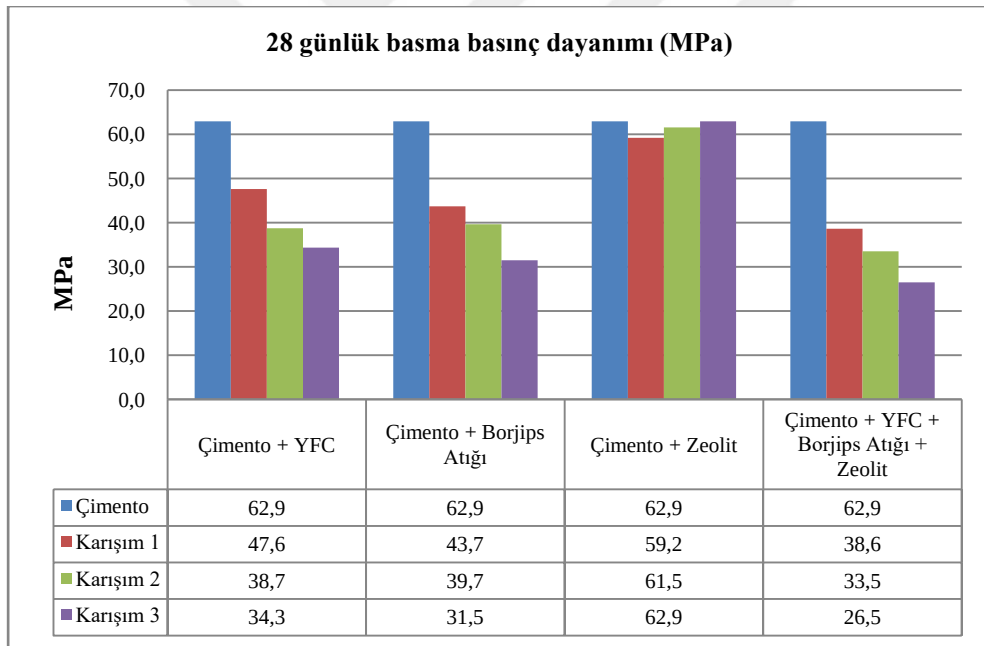
28 ve 90 günlük eğilme ve basma basınç dayanım sonuçlarından elde edilen veriler ile Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görülen grafikler oluşturulmuştur. Grafiklerde çimento ile gösterilen sütunlar CEM I 42,5R standard Portland çimento ile hazırlanan kontrol numunelerini göstermektedir. Karışım 1, Karışım 2 ve Karışım 3 ile gösterilen sütunlar ise sırasıyla cüruf için %40, %50, %60; borjips atığı ve zeolit minerali için ayrı ayrı %3, %5, %7 ve cüruf, borjips atığı ve zeolit mineral katkılarının birlikte karışımı için %40, %3, %3; %50, %5, % 5 ve %60, %7, %7 ikame oranları ile hazırlanan test numunelerini ifade etmektedir. Borjips atığı katkılı numunelerde alçıtaşı içeren çimento yerine öğütülmüş klinker kullanılmıştır.



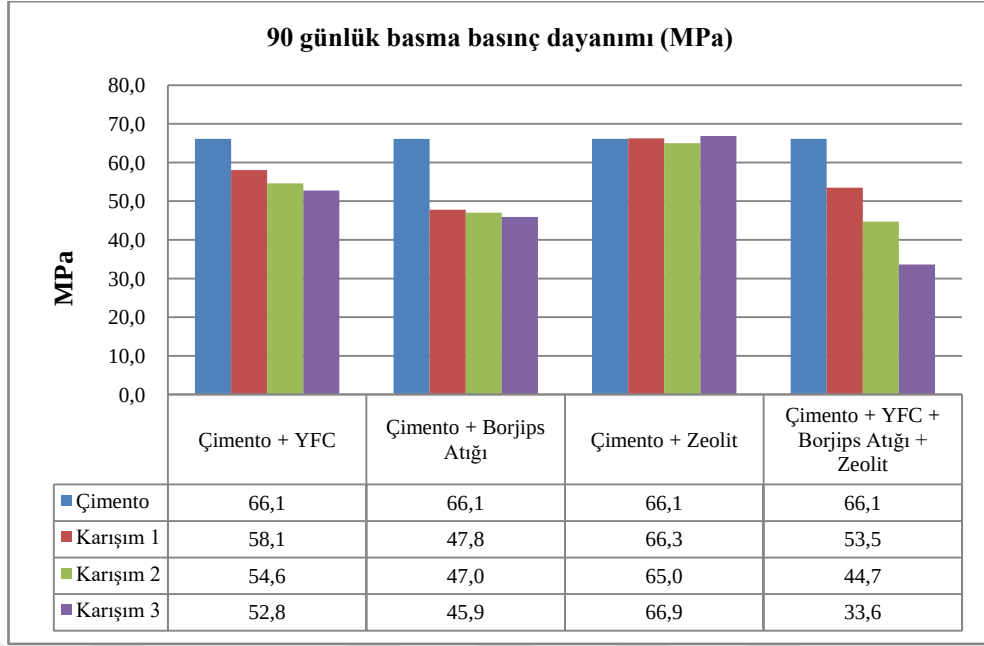
Şekil 3.5 : 28 günlük eğilme basınç dayanımı deney sonuçları.



Şekil 3.6 : 90 günlük eğilme basınç dayanımı deney sonuçları.



Şekil 3.7 : 28 günlük basma basınç dayanımı deney sonuçları.



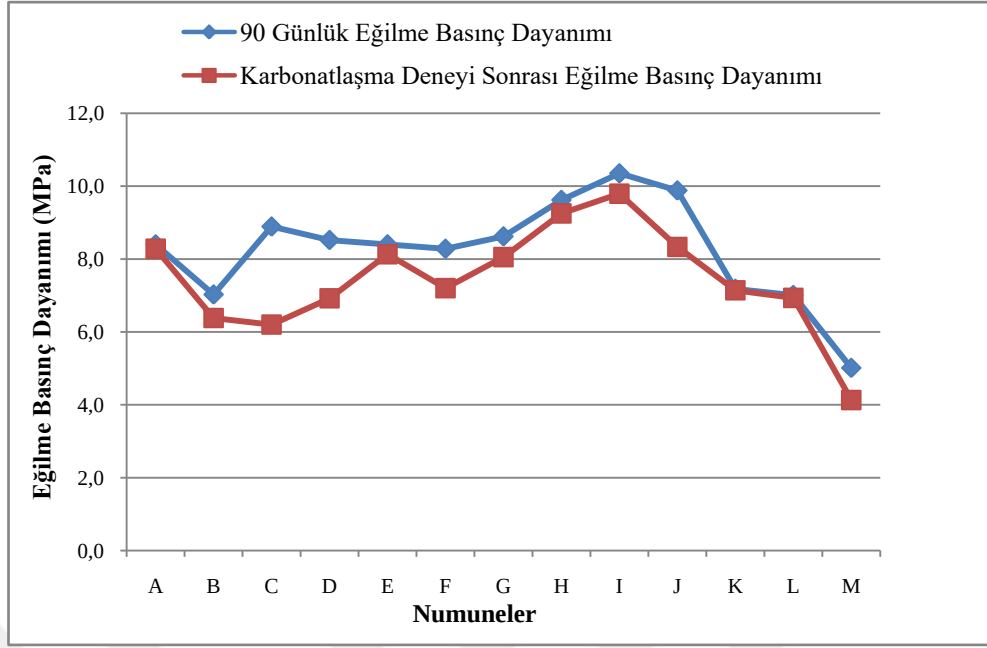
Şekil 3.8 : 90 günlük basma basınç dayanımı deney sonuçları.

28 günlük eğilme basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde zeolit ikamesi ile hazırlanan test numuneleri hariç tüm serilerde eğilme dayanımının kontrol numunesine göre azaldığı görülmüştür. Zeolit ile hazırlanan test numunelerinde % 7 ikame oranı için % 11'e varan bir artış görülürken, yüksek fırın cürufu ile hazırlanan test numunelerinde % 60 ikame oranı için % 31, borjips atığı ile hazırlanan test numunelerinde %7 ikame oranı için % 28 ve üç mineral katkının karışımı ile hazırlanan test numunelerinde % 60 + % 7 + % 7 ikame oranı için % 36'ya varan bir düşüş görülmüştür.

90 günlük eğilme basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde ise üç mineral katkının karışımı ile hazırlanan test numuneleri hariç neredeyse tüm serilerde eğilme dayanımının kontrol numunesine yakın ya da daha yüksek sonuç verdiği gözlemlenmiştir. 28 günlük eğilme basınç dayanımı sonuçlarından da beklendiği üzere zeolit ikamesi ile hazırlanan test numunelerinin kontrol numunesine göre eğilme dayanım artış oranı yükselmiştir. 28 günde % 11 yükselme gösteren % 7 zeolit ikame oranına sahip numunedeki artış % 18'e çıkarken, 28 günde % 9 yükselme gösteren % 5 zeolit ikame oranlı numunedeki artış % 23 mertebelerine ulaşmıştır. Cüruf ve borjips atığı ihtiva eden test numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımında yaklaşık % 30 düşme görülürken, 90 günlük eğilme dayanımında aynı numunelerin kontrol numunesi ile benzer eğilme dayanım performansı gösterdiği

görülmüştür. Bu durum her iki serinin de geç yaştaki eğilme dayanım performansının, katkısız olarak hazırlanan kontrol numuneleri ile neredeyse eşdeğer olduğunu göstermektedir. Ancak 3 mineral katkıyı birlikte içeren test numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımı için aynı durum söz konusu değildir. Karışım 1 ve Karışım 2'nin 28 günlük eğilme dayanım performansı kontrol numunesine göre, sırasıyla % 34 ve % 31 azalma gösterirken aynı numunelerin 90 günlük dayanım performansları için bu değerler sırasıyla % 15 ve % 17 olarak gerçekleşmiştir. Karışım 3'ün 90 günlük eğilme dayanımı ise kontrol numunesine göre % 40 oranında azalma göstermiştir. Bu durum, 3 mineral katkıyı birlikte içeren Karışım 1 ve Karışım 2 test numunelerinin kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında 90 günlük eğilme dayanım performansının, 28 günlük dayanım performansına göre 2 misli artış gösterdiği şeklinde yorumlanabilir. Ancak Karışım 1 ve Karışım 2 numunelerinin 28 gün ile 90 gün arasındaki eğilme dayanım performans artışından Karışım 3 numunesi için bahsetmek pek mümkün değildir. En yüksek ikame oranlarını içeren Karışım 3 numunesinin kontrol numunesine göre 28 gündeki eğilme dayanım kaybı % 36 iken bu değer 90 günde % 40'a çıkmıştır. Bu sonuç, düşük ikame oranlarında mineral katkı kullanımının ileri yaşlarda kontrol numunesine yaklaşan eğilme dayanım performansları verebileceği, ancak yüksek ikame oranlarında mineral katkı kullanımının ileri yaşlarda dahikontrol numunesine göre % 50'ye varan performans kayıplarına sebep olabileceği şeklinde yorumlanabilir.

Karbonatlaşma deneyi gerçekleştirilen test numunelerine aynı zamanda eğilme ve basma basınç dayanımı deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kürlemesi yapılan 90 günlük eğilme ve basma basınç dayanımı numuneleri ile birlikte yürütülmüştür. Karbonatlaşma deneyi gerçekleştirilen numunelerin 28 gün kürlemesinden sonra 14 gün kurutma işlemi ve 56 gün süren karbonatlaşma deneyi düşünüldüğünde karbonatlaşma deney numunelerinin eğilme ve basma basınç dayanımı deneyleri, numuneler 98 günlük iken gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere kürlemesi yapılan karbonatlaşmamış test numunelerinin eğilme dayanımı, karbonatlaşmış deney numunelerinin eğilme dayanımına göre daha yüksek seyretmiştir. Bu durum, karbonatlaşma reaksiyonunun numune eğilme dayanım performansını olumsuz olarak etkilediği şeklinde yorumlanabilir.



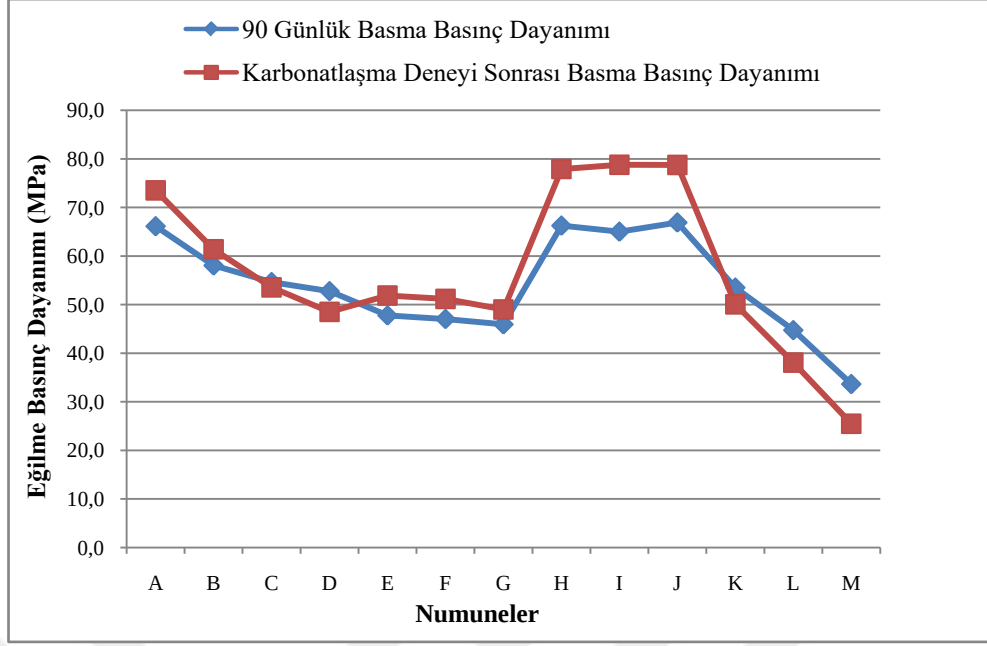
Şekil 3.9 : Karbonatlaşmamış ve karbonatlaşmış numune eğilme basınç dayanımı karşılaştırması.

28 günlük basma basınç dayanımına ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde % 7 zeolit ikamesi ile hazırlanan test numuneleri hariç tüm serilerde basma dayanımının kontrol numunesine göre azaldığı görülmüştür. % 60 cüruf ikame edilen test numunelerinde % 45, % 7 borjips atığı ikame edilen test numunelerinde % 50 ve üç mineral katkının karışımı ile hazırlanan test numunelerinde % 60 + % 7 + % 7 ikame oranı için % 58'e varan performans kaybı gözlemlenmiştir. Zeolit ile hazırlanan test numunelerinde % 7 ikame oranı için kontrol numunesine denk bir basma dayanımı gözlemlenirken, % 3 ve % 5 zeolit ikamesi için kontrol numunesine göre sırasıyla % 6 ve % 2 gibi ihmal edilebilir bir dayanım kaybı görülmüştür. Bu durum, zeolit katkısı ile hazırlanan test numunelerinin, kontrol numunelerine oldukça yakın dayanım göstererek katkılı diğer numuneler ile karşılaştırıldığında 28 günlük basma basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek performansı gösterdiği şeklinde yorumlanabilir. Oransal olarak eğilme basınç dayanımı sonuçlarına benzer özellikler görülmekle birlikte özellikle borjips atığı ve 3 mineral katkıyı en yüksek oranda birlikte ihtiva eden Karışım 3 test numuneleri basma dayanım sonuçlarındaki katkısız kontrol numunesine göre performans kaybı, eğilme dayanımı sonuçları ile karşılaştırıldığında yaklaşık % 20 daha fazla gerçekleşmiştir.

90 günlük basma basınç dayanımına ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde ise zeolit ikamesi ile hazırlanan test numunelerinin basma dayanımının, 28 günlük sonuçlar ile benzer özellik göstererek tüm serilerde kontrol numunelerine neredeyse eşdeğer çıktığı görülmüştür. 28 günlük basma dayanım sonuçlarına benzer şekilde zeolit ikameli numuneler hariç diğer tüm serilerde basma dayanımında azalma görülmektedir. % 60 cüruf ihtiva eden numunelerin kontrol numunesine göre 90 günlük basma dayanımındaki performans kaybı yaklaşık % 20 seviyelerinde gerçekleşirken, % 7 borjips atığı içeren numuneler için bu oran % 31 ve 3 mineral katkıyı birlikte en yüksek oranda ihtiva eden Karışım 3 test numuneleri için ise % 50'ye varan bir dayanım kaybı şeklinde kendini gösterdiği gözlemlenmiştir.

28 ve 90 günlük eğilme ve basma basınç dayanım sonuçları birlikte değerlendirildiğinde zeolit ikameli numune basma dayanım sonuçları kontrol numunesi dayanım sonuçlarına benzer özellikler gösterirken diğer tüm serilerde farklı oranlarda basma dayanım düşüşleri yaşanmıştır. Zeolit ikamesinden sonra kontrol numunesine en yakın performansı cüruf katkılı numuneler, en uzak performansı ise sırasıyla borjips atığı ve 3 mineral katkıyı birlikte ihtiva eden numuneler göstermektedir. Benzer durum 28 günlük eğilme dayanımı numunelerinde de görülmekle birlikte 90 günlük basma dayanımı sonuçlarından farklı olarak 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında 3 mineral katkılı numuneler hariç diğer tüm karışımlarda kontrol numunesine yakın performanslar gözlemlenmiştir.

Karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış numunelerin dayanım özellikleri konusunda eğilme dayanımı alanında yapılan çalışmanın aynısı basma dayanımı alanında da yapılmış olup, Şekil 3.10'da ölçüm sonuçlarına yer verilmiştir. Bu çalışmada dikkat çeken zeolit katkılı seriler hariç diğer tüm numunelerde eğilme dayanımı çalışmasına benzer sonuçlar gözlemlenirken karbonatlaşmış zeolit katkılı 3 seride de basma dayanımında karbonatlaşmamış numunelere göre % 20'ye yaklaşan bir dayanım artışı gözlemlenmiştir. Karbonatlaşmış zeolit katkılı test numunelerin eğilme basınç dayanımı performansının aksine basma basınç dayanımında gözlemlenen % 20'ye yaklaşan performans artışı dikkat çekici olarak yorumlanmaktadır.



Şekil 3.10 : Karbonatlaşmamış ve karbonatlaşmış numune basma basınç dayanımı karşılaştırması.

3.4 Klorür Geçirirliği Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları

Hazırlanan Ø 100 mm x 200 mm silindir test numunelerine NT BUILD 492 beton/harç numunelerinin klorür migrasyon katsayısının tespiti ve ASTM C 1202-12 beton/harç numunelerinin klorür iyonu geçişine karşı direnci klorür geçirirliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 28 günlük kürlemesi yapılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. NT BUILD 492 deneyinde klorür migrasyon katsayısının ve ASTM C1202-12 deneyinde coulombs yük değerinin artması numunelerin geçirirliliğinin de artması dolayısıyla geçirimsizlik performansının düşmesi anlamına gelmektedir. Migrasyon katsayısı ve coulombs yük değeri büyük olan numunenin klorür geçirirliği daha fazla, küçük olan numunenin ise klorür geçirirliği daha azdır. Çizelge 3.4’de NT BUILD 492, Çizelge 3.5’de ASTM C1202-12 deneylerinin ölçüm verileri toplu halde görülmektedir.

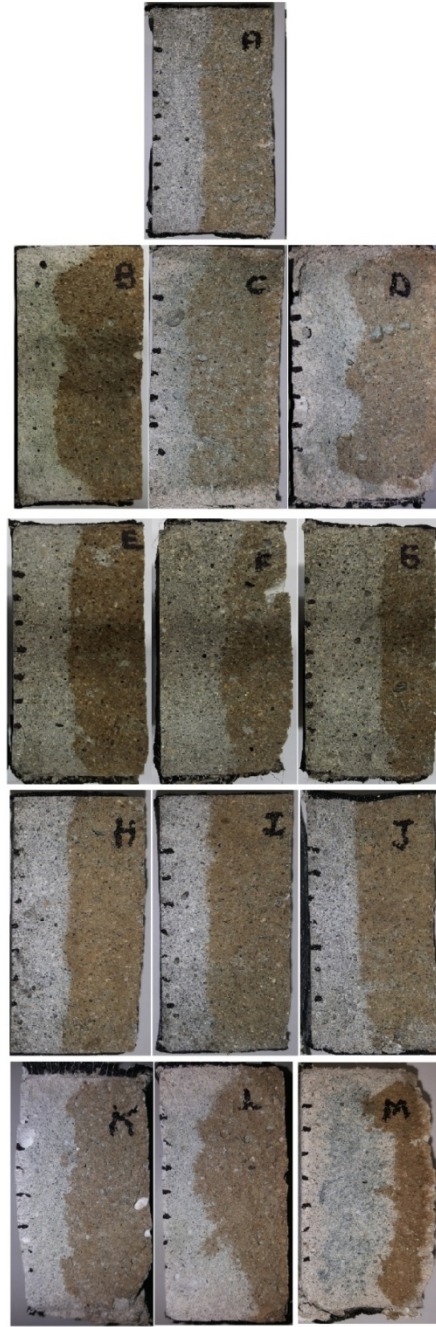
Çizelge 3.4 : NT BUILD 492 deneyi ölçüm verileri.

Deney Parametre Ölçümleri	Numune Kodları												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Numune Kalınlığı (mm)	47,57	47,15	47,75	47,70	46,99	44,51	47,56	47,96	47,63	47,07	47,66	47,37	48,15
Anolit (NaOH) Çözetisi Deney Başlangıç Sıcaklığı (°C)	21,8	22,2	22,0	21,8	21,8	21,8	21,9	20,3	20,4	20,4	21,0	21,1	21,2
30 Volt Gerilimde Ölçülen Akım (mA)	149,2	67,5	47,3	37,6	140,4	138,7	101,4	162,1	141,5	147,7	40,4	25,9	14,2
Ayarlanan Gerilim (Volt)	15	25	30	35	15	15	20	15	15	15	30	40	60
Test Süresi (saat)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	48
Anolit (NaOH) Çözetisi Deney Bitiş Sıcaklığı (°C)	21,1	21,5	21,5	22,2	21,3	22,1	21,9	20,8	20,7	20,5	21,0	21,0	21,5
Bitiş Akımı (mA)	67,2	57,4	54,3	55,6	66,3	62,5	81,8	72,2	64,8	71,6	43,7	41,7	31,2
Penetrasyon Derinliği Ölçümleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
X _{d1} (mm)	19,60	16,06	15,19	15,22	19,62	21,89	27,24	20,30	18,04	18,10	16,74	17,38	35,60
X _{d2} (mm)	20,13	16,59	15,93	19,61	20,55	20,98	27,02	21,63	18,53	18,04	18,25	12,98	44,08
X _{d3} (mm)	20,48	17,21	13,84	-	20,64	22,11	26,88	20,66	17,31	17,63	18,12	20,64	44,68
X _{d4} (mm)	19,77	14,41	13,90	19,31	20,99	20,93	26,84	21,40	17,69	17,97	20,28	17,44	40,43
X _{d5} (mm)	20,17	16,88	16,54	-	20,55	21,84	27,41	22,38	16,91	17,92	19,16	15,54	43,98
X _{d6} (mm)	20,93	14,78	14,92	18,42	21,20	22,96	27,05	20,52	19,28	17,89	18,50	13,94	41,51
X _{d7} (mm)	19,65	13,90	14,61	13,14	22,87	21,91	29,89	20,40	17,23	18,76	16,19	-	39,34
X _{ortalama} (mm)	20,10	15,69	14,99	17,14	20,92	21,80	27,48	21,04	17,86	18,04	18,18	16,32	41,37
Ortalama Klorür Migrasyon Katsayıları	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
D _{nssm} (klorür migrasyon katsayısı x 10 ⁻¹² m ² /s)	17,81	8,05	6,47	6,41	18,41	18,37	18,62	18,82	15,59	15,61	7,93	5,29	4,74

Çizelge 3.5 :ASTM C1202-12 deneyi ölçüm verileri.

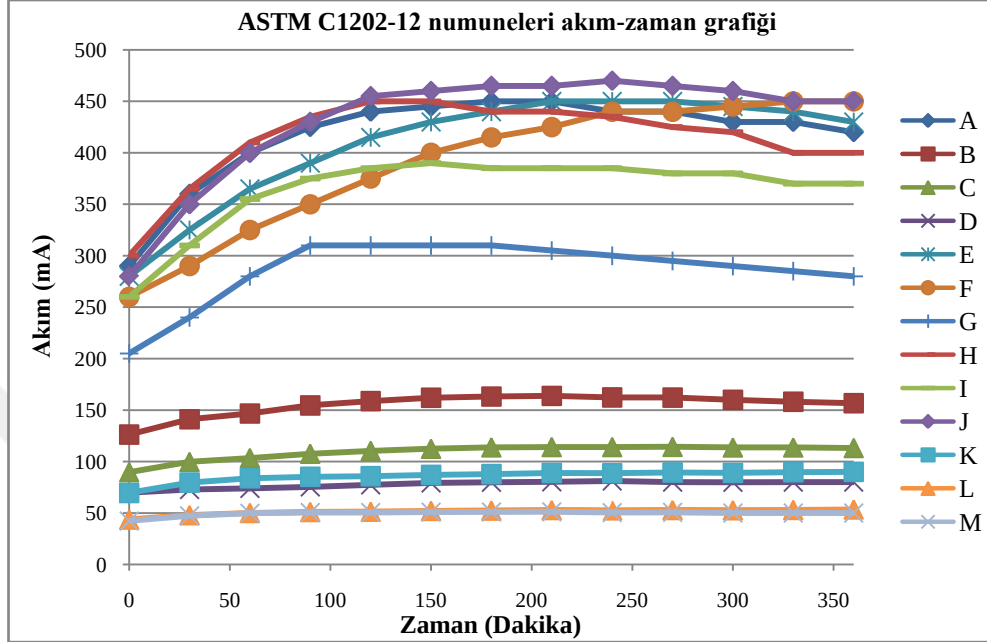
Deney Parametre Ölçümleri	Numune Kodları												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Numune Çapı (mm)	100,06	100,07	100,06	100,06	100,07	100,08	100,05	100,06	100,07	100,08	100,07	100,11	100,12
I₀ (mA)	290,0	126,2	89,7	69,8	280,0	260,0	205,0	300,0	260,0	280,0	69,5	43,7	42,3
I₃₀ (mA)	360,0	141,1	99,7	72,8	325,0	290,0	240,0	365,0	310,0	350,0	79,6	47,9	47,3
I₆₀ (mA)	400,0	146,7	103,4	73,9	365,0	325,0	280,0	410,0	355,0	400,0	83,8	50,0	49,8
I₉₀ (mA)	425,0	154,6	107,6	75,4	390,0	350,0	310,0	435,0	375,0	430,0	85,2	51,0	50,5
I₁₂₀ (mA)	440,0	158,7	110,4	77,4	415,0	375,0	310,0	450,0	385,0	455,0	85,8	51,3	50,5
I₁₅₀ (mA)	445,0	162,0	112,5	79,2	430,0	400,0	310,0	450,0	390,0	460,0	87,0	52,0	50,9
I₁₈₀ (mA)	450,0	163,2	113,8	79,9	440,0	415,0	310,0	440,0	385,0	465,0	87,8	52,4	51,0
I₂₁₀ (mA)	450,0	163,8	114,1	80,3	450,0	425,0	305,0	440,0	385,0	465,0	88,9	52,9	51,2
I₂₄₀ (mA)	440,0	162,3	114,1	81,1	450,0	440,0	300,0	435,0	385,0	470,0	88,7	52,6	50,4
I₂₇₀ (mA)	440,0	162,2	114,3	80,0	450,0	440,0	295,0	425,0	380,0	465,0	89,4	52,9	50,6
I₃₀₀ (mA)	430,0	160,0	113,7	79,9	445,0	445,0	290,0	420,0	380,0	460,0	89,0	52,7	50,0
I₃₃₀ (mA)	430,0	158,1	113,7	80,0	440,0	450,0	285,0	400,0	370,0	450,0	89,6	53,0	50,0
I₃₆₀ (mA)	420,0	156,7	113,2	80,0	430,0	450,0	280,0	400,0	370,0	450,0	90,0	53,4	50,0
I_{ortalama} (A)	0,4169	0,1550	0,1092	0,0777	0,4085	0,3896	0,2862	0,4131	0,3638	0,4308	0,0857	0,0512	0,0496
Ortalama Geçen Yük Miktarı	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Qs (coulombs)	8218,2	3040,3	2139,7	1516,8	8038,1	7639,2	5643,6	8145,2	7162,1	8490,7	1680,6	1002,7	972,0

Şekil 3.11’de NT BUILD 492 deneyinde Ø 50 mm x 100 mm silindir disk harç numunelerinin yarma aparatı ile yarıldıktan sonra yüzeylerine AgNO₃ çözeltisi püskürtülmesi ile oluşan numune görselleri görülmektedir. AgNO₃ çözeltisi, klorür iyonları ile reaksiyona girerek şekilde görülmekte olan beyaz tabakayı oluşturmaktadır. Bu beyaz tabaka klorür iyonlarının numune içerisinde katettiği mesafeyi bir başka deyişle harç numunelerindeki klorür deformasyonunu ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3.11 : NT BUILD 492 deney numune görselleri.

Klorür iyonlarının numuneler içerisinde katettiği mesafe kumpas ve cetvel yardımıyla ölçülmüştür. Klorür migrasyon katsayısı hesaplama formülü kullanılarak, migrasyon değeri D_{nssm} hesaplanmıştır. Şekil 3.12’de ASTM C1202-12 deneyinde numunelerin akım-zaman değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.12 : ASTM C1202-12 deneyi numune akım-zaman grafiği.

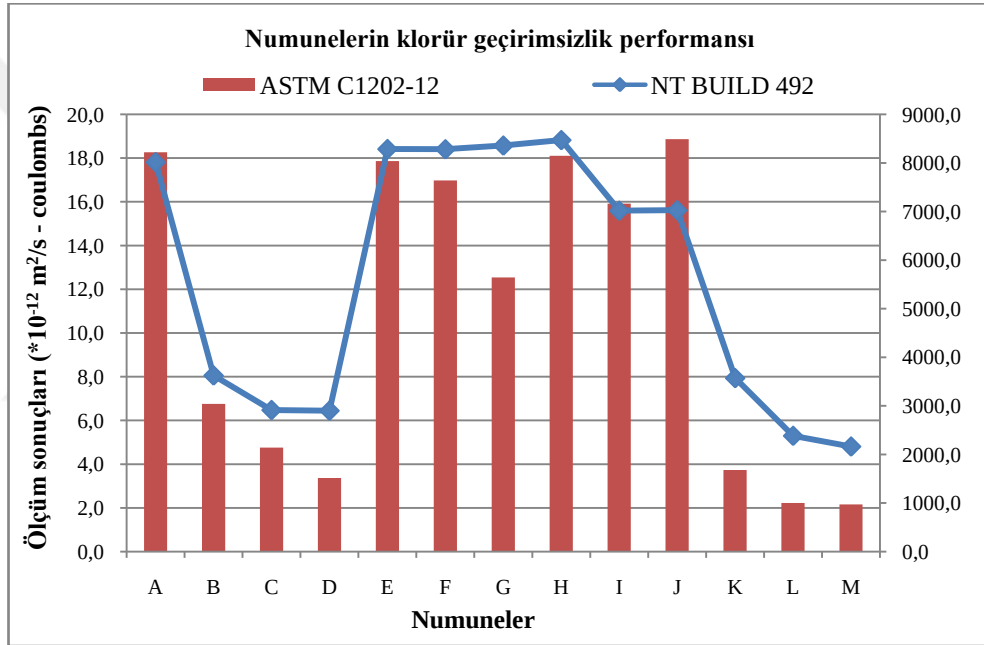
ASTM C1202-12 deneyi akım zaman grafiği incelendiğinde B, C, D, K, L ve M kodu ile gösterilen yüksek fırın cürufu katkılı numunelerin yaklaşık 150 mA ve altındaki akım değerlerinin geçişine izin verdiği görülmektedir. Yaklaşık 300 mA akım geçişine izin veren % 7 borjips atığı içeren G kodlu numune hariç diğertüm numunelerin ortalama 300 mA ve üstünde akım değerlerinin geçişine izin verdiği görülmektedir. Numuneden geçen coulombs yük değeri akım şiddeti ile doğru orantılı olarak arttığı için akım geçişi yüksek olan numunelerin geçirimsizliği de yüksek demektir. Şekil 3.12’den elde edilen diğer bir sonuç ise numune içeriğindeki cüruf miktarı arttıkça klorür geçirimsizliği de artmaktadır. Ayrıca cüruf, borjips atığı ve zeolit minerallerini birlikte ihtiva eden K, L ve M kodlu test numunelerinin klorür geçirimsizliğinin, sadece cüruf içeren B, C ve D kodlu test numunelerine göre daha yüksek olduğunu söylemek mümkündür. % 60 cüruf ikamesi ile hazırlanan D kodlu test numunesinin geçirimsizlik performansı, % 40 cüruf, % 3 borjips atığı ve % 3 zeolit ikamesi ile hazırlanan K kodlu numune ile benzerlik göstermektedir. Ancak aralarında % 10 cüruf, % 2 borjips atığı ve % 2 zeolit ikamesi olmak üzere toplamda

% 14 mineral katkı içeriği farkı olan M kodlu numunenin L kodlu numuneye göre geçirimsizlik performansı sadece % 3 artış göstermiştir. Çizelge 3.6'da numunelerin klorür geçirimliliği deney sonuçları toplu olarak görülmektedir.

Çizelge 3.6 : Numunelerin klorür geçirimliliği deney sonuçları.

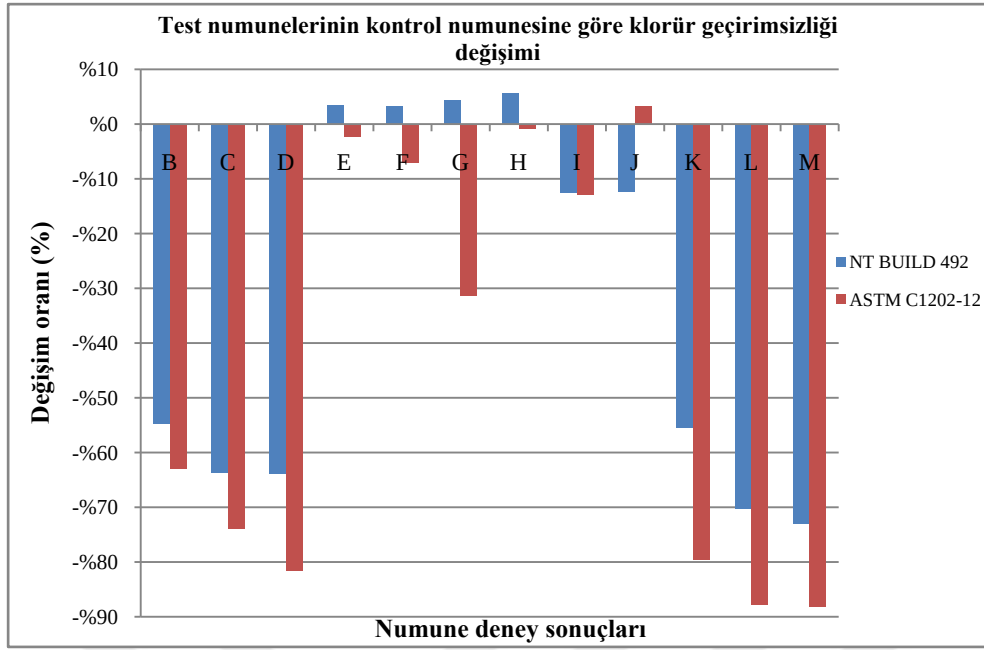
Harç Numune Bilgileri		Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları	
İçerik	Numune Kodu	NT BUILD 492 Migrasyon Katsayısı (*10 ⁻¹² m ² /s)	ASTM C1202-12 Yük Miktarı (coulombs)
Kontrol Numunesi	A	17,8	8218,2
	B	8,1	3040,3
	C	6,5	2139,7
	D	6,4	1516,8
% 40, %50 ve % 60 cüruf ikamesi	E	18,4	8038,1
	F	18,4	7639,2
	G	18,6	5643,6
% 3, %5 ve % 7 borjips atığı ikamesi	H	18,8	8145,2
	I	15,6	7162,1
	J	15,6	8490,7
% 3, %5 ve % 7 zeolit ikamesi	K	7,9	1680,6
	L	5,3	1002,7
	M	4,7	972,0

Hazırlanan kontrol ve test numunelerinin klorür geçirimsizliği deney sonuçları incelendiğinde en yüksek geçirimsizlik performansının yüksek fırın cürufu ihtiva eden numunelere ait olduğu görülmüştür. Bu durum literatür çalışmasına da uygundur. Cüruf ilavesi ile hazırlanan test numunelerindeki C₃A oranının artması, çimento pastasının klorür iyonlarını bağlama yolu ile Friedel tuzu oluşturma kapasitesini arttıracaktır. Ayrıca numune yüzeyinde oluşan bağlı klorür iyonları, serbest klorür iyonlarının geçişine izin vermeyecektir. Yapılan deneysel çalışmalar da cüruf içeren numunelerin klorür geçirimsizliği performansını doğrular niteliktedir. Şekil 3.13’de farklı mineral katkıların klorür geçirimsizlik performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13 : Harç numunelerinin klorür geçirimsizlik performansı deney sonuçları.

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi yüksek fırın cürufu ihtiva eden test numunelerinin klorür geçirimsizliği performansı kontrol numunesi ve diğer test numunelerine göre yüksektir. Cüruf içermeyen kontrol ve test numunelerinin klorür geçirimsizliği performansı benzer bir karakteristik göstermektedir. Şekil 3.14’de test numunelerinin A kod numarası ile gösterilen kontrol numunesine göre klorür geçirimsizliği yüzde değişim performansı görülmektedir.



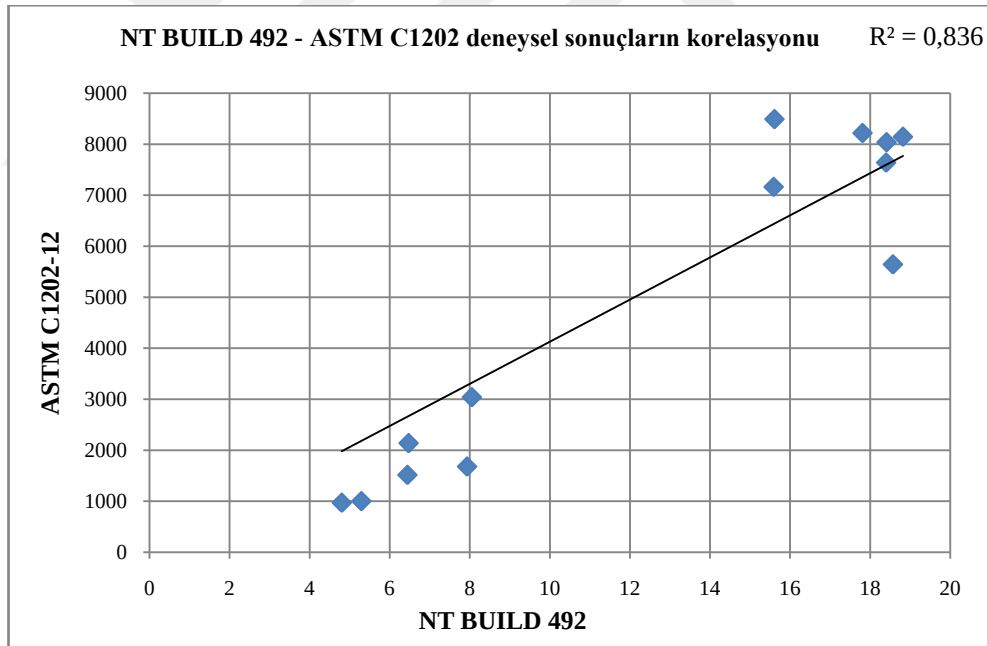
Şekil 3.14 : Harç numunelerinin klorür geçirimsizlik değişimi deney sonuçları.

Şekil 3.14 incelendiğinde sadece cüruf içeren B, C ve D kodlu test numunelerinde kontrol numunesine göre yaklaşık % 80'e varan klorür geçirimsizliği performans artışı gözlemlenmiştir. Bu serideki numunelerde en yüksek geçirimsizlik performansı % 60 ikame oranı ile cüruf içeren D kodlu test numunelerine aittir. Benzer ölçüm sonuçlarına cüruf, borjips atığı ve zeolit minerallerini kombine şekilde içeren K, L ve M kodlu test numunelerinde de ulaşılmıştır. Bu serideki numunelerde en yüksek geçirimsizlik ise % 90'a yaklaşan performans artışı ile M ve L kodlu numunelerde gözlemlenmiştir. Bu gruptaki tüm serilerde ASTM C1202-12 deneysel çalışmasında, NT BUILD 492 deneysel çalışmasına göre daha yüksek geçirimsizlik performans verilerine ulaşılmıştır.

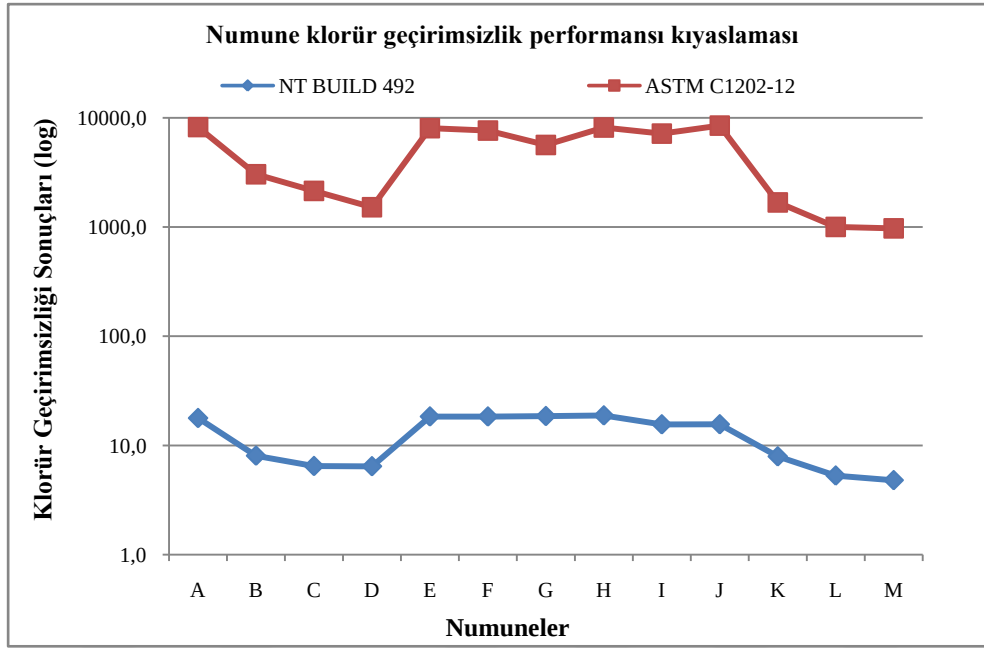
Borjips atığı ile hazırlanan E, F ve G kodlu numuneler ve zeolit ikamesi ile hazırlanan H, I ve J kodlu numunelerde klorür geçirimsizliğinde her iki deney için de belirgin bir performans artışı gözlemlenememiştir. Borjips atığı içeren E, F ve G kodlu test numunelerinde ASTM C 1202-12 standardına göre geçirimsizlik performansı artış yönünde olmakla birlikte G kodlu numune hariç kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. % 7 ikame oranında borjips atığı içeren G kodlu test numunelerinin ASTM C1202-12 standardına göre gerçekleştirilen klorür geçirimsizliği performansının kontrol numunesine göre yaklaşık % 30 artış gösterdiği görülmekle birlikte NT BUILD 492 deneyinde benzer performans görülemedi aksine kontrol numunesine göre yaklaşık % 4 oranında geçirimsizliğin arttığı

gözlemlenmiştir. Borjips atığı içeren E, F ve G kodlu numunelerin NT BUILD 492 standardına göre geçirimsizlik değişim performansı belirgin bir karakteristik taşımamak ile birlikte kontrol numunesine göre daha düşük performans gösterdiği söylenebilmektedir. Zeolit minerali içeren H, I ve J kodlu numunelerden I kodlu numune hariç her iki deney standardına göre belirgin bir performans verisinden bahsetmek mümkün değildir. Sadece % 5 zeolit içeren I kodlu numunelerde her iki standarda göre yapılan deneylerde, kontrol numunesine göre yaklaşık % 10'luk bir klorür geçirimsizlik performans artışı gözlemlendiği söylenebilir.

Beton ve harç numunelerinin klorür geçirimsizlik performansı hakkında fikir veren uluslararası kabul görmüş NT BUILD 492 ve ASTM C1202-12 deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde her iki metot ölçüm sonuçları arasında Şekil 3.15'de görülmekte olan korelasyon verilerine ulaşılmıştır. Ayrıca Şekil 3.16'da iki standarda göre gerçekleştirilen deney sonuçlarının birbirleri ile kıyaslaması logaritmik olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15 : NT BUILD 492 ve ASTM C1202-12 deney sonuçları arasındaki korelasyon.



Şekil 3.16 : NT BUILD 492 ve ASTM C1202-12 deney sonuçlarının logaritmik kıyaslaması.

3.5 Karbonatlaşma Direnci Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları

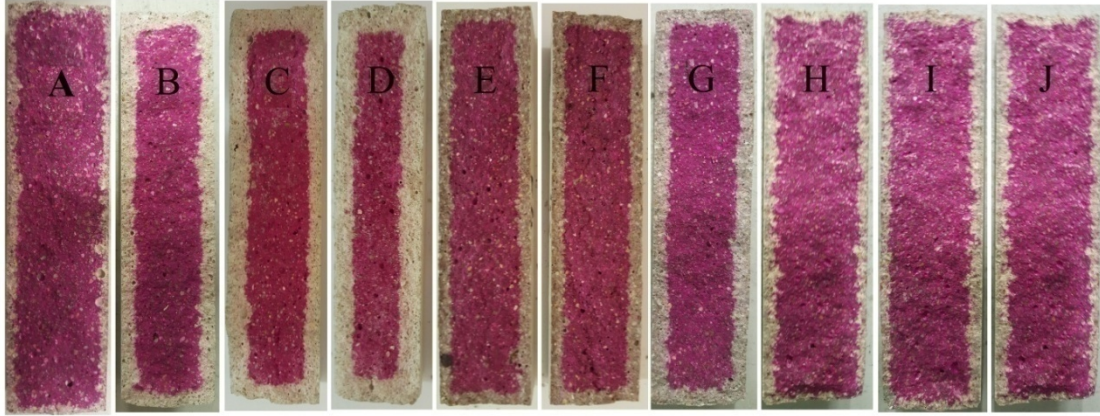
Hazırlanan 40 mm x 40 mm x 160 mm prizma test numunelerine EN 13295 standardına göre karbonatlaşma direnci deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler 28 günlük su kürlemesi ve 14 günlük kurutma işlemine tabi tutulmuş numuneler üzerinde 2 paralel gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve % 60 RH $\pm$ % 10 RH bağıl nem olacak şekilde standard laboratuvar şartlarında yapılmıştır. 14 gün süren kurutma işlemi sonunda 24 saatte olması gereken en büyük % 0,2 kütle kaybı şartı kontrol edilmiştir. Yeterli kurutma işleminin sonunda tüm numuneler % 1 (10.000 ppm) CO₂ gaz konsantrasyonu; $21,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve 60 ± 10 bağıl nem ortamının kesintisiz olarak sağlandığı özel test kabininde 56 gün boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler kabin içerisinden alınarak özel yarma aparatı yardımı ile ortadan iki parçaya ayrılmış ve taze yarılmış yüzeylere, fenolftalein çözeltisi püskürtülmüştür. Asit baz indikatörü olan fenolftalein çözeltisi etkisi ile pH değerinin 12-13 civarında olduğu bölgeler pembe renk alırken karbonatlaşma reaksiyonu etkisi ile pH düşüşü gerçekleşen bölgelerde renk değişikliği yaşanmaz. Dış yüzeyden numune içerisine doğru renk değişikliği olmayan kısım karbonatlaşma reaksiyonunun gerçekleştiği bölgeyi göstermektedir. Karbonatlaşma reaksiyonunun tespit edilmesi amacı ile fenolftalein uygulamasından 60 dakika sonra kumpas ve cetvel yardımı ile numuneler içerisindeki karbonatlaşmış

bölgenin derinliği ölçölmüştür. Çizelge 3.7’de karbonatlaşma direnci deneyi gerçekleştirilen numunelere ait ölçüm sonuçları yer almaktadır. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de hızlı karbonatlaşma deneyi sonucunda karbonatlaşmış numune görselleri yer almaktadır.

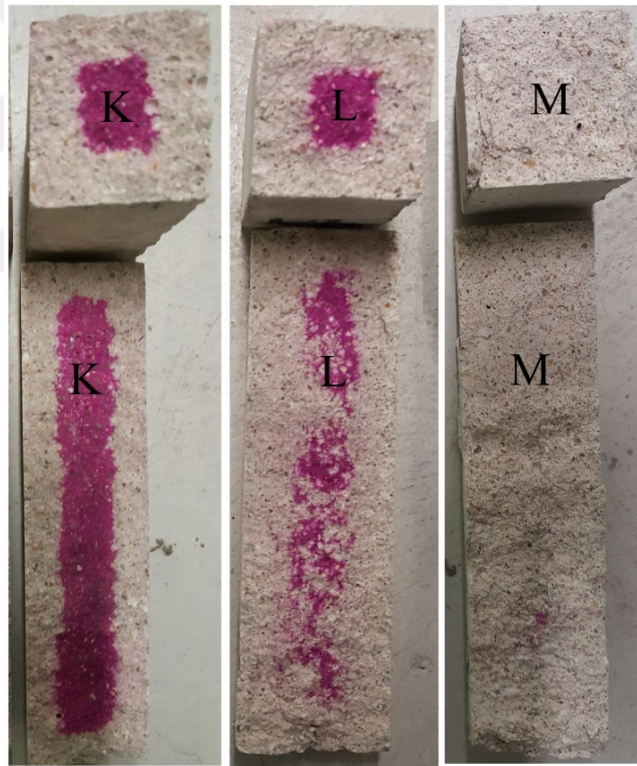


Çizelge 3.7 : Numunelerin karbonatlaşma direnci deneyi sonuçları.

Numune Kodu	Kurutma Sonu İlk Tartım (g)	Kurutma Sonu İkinci Tartım (g)	24 saatte Kütlece Değişim (%)	Karbonatlaşma Derinliği Ölçüm Sonuçları (mm)													Ortalama Karbonatlaşma Derinliği (mm)	Numune Ortalama Karbonatlaşma Derinliği (mm)
A1	582,5	582,5	0,00	3,19	3,65	3,43	3,20	2,37	3,65	3,24	3,14	3,27	3,29	3,26	3,28	3,25	3,16	
A2	563,0	562,9	-0,02	3,05	3,28	2,95	3,36	2,82	3,02	2,98	3,24	3,04	3,05	3,09	3,10	3,08		
B1	567,3	567,0	-0,05	4,98	5,77	5,32	5,46	5,66	5,64	5,24	5,38	5,34	5,48	5,55	5,78	5,47	5,37	
B2	576,9	576,6	-0,05	5,02	5,34	5,45	4,92	5,21	5,68	4,99	5,61	5,35	5,42	5,21	5,08	5,27		
C1	566,4	565,8	-0,11	6,34	7,28	7,64	6,77	7,79	6,85	7,21	6,85	7,05	7,01	7,25	7,33	7,11	7,23	
C2	574,0	573,5	-0,09	6,89	6,24	7,05	7,49	7,93	8,52	7,71	7,69	7,15	7,21	7,25	7,10	7,35		
D1	577,1	576,6	-0,09	9,27	9,31	8,76	8,54	9,77	9,05	8,99	9,11	9,05	9,18	9,14	9,21	9,12	9,41	
D2	559,8	559,2	-0,11	9,43	9,66	10,11	9,74	9,97	9,27	9,51	9,56	9,77	9,61	9,78	9,95	9,70		
E1	592,8	592,4	-0,07	5,36	4,46	5,01	5,32	4,91	3,72	4,28	3,99	4,85	4,92	5,21	5,58	4,80	4,94	
E2	582,9	582,4	-0,09	5,50	5,05	5,24	5,12	5,10	4,49	4,85	4,90	5,15	5,21	5,11	5,24	5,08		
F1	574,1	573,4	-0,12	5,12	4,68	4,67	5,29	4,75	5,59	4,88	5,05	4,95	5,04	5,15	5,11	5,02	5,26	
F2	586,8	586,1	-0,12	5,46	4,94	5,48	6,25	5,26	5,59	5,45	5,64	5,28	5,42	5,54	5,68	5,50		
G1	575,4	574,7	-0,12	6,44	5,76	5,53	4,54	4,77	4,90	4,85	4,84	5,28	5,55	5,64	5,72	5,32	5,58	
G2	578,1	577,9	-0,03	5,67	5,77	6,46	5,87	5,59	5,62	6,11	5,88	6,05	5,59	5,75	5,62	5,83		
H1	584,5	584,4	-0,02	4,40	3,50	3,61	3,81	3,62	3,75	3,84	3,62	3,59	3,88	3,79	3,89	3,78	3,70	
H2	582,2	582,0	-0,03	3,95	3,35	3,52	3,64	3,57	3,69	3,95	3,71	3,82	3,64	3,28	3,34	3,62		
I1	582,0	581,7	-0,05	3,41	3,92	3,15	3,54	3,68	3,59	3,48	3,68	3,50	3,35	3,68	3,67	3,55	3,65	
I2	582,2	581,9	-0,05	3,65	3,71	3,57	3,81	3,79	3,89	3,74	3,85	3,64	3,88	3,69	3,62	3,74		
J1	583,1	583,0	-0,02	4,61	4,80	4,31	4,32	4,09	4,25	4,25	4,54	4,41	4,32	4,48	4,45	4,40	4,16	
J2	578,9	578,9	0,00	4,38	3,87	3,78	4,27	3,70	3,46	3,70	3,88	4,11	4,19	3,84	3,78	3,91		
K1	579,6	579,4	-0,03	10,01	10,95	9,92	12,30	10,24	10,28	11,34	11,45	10,15	10,41	10,24	10,11	10,62	10,68	
K2	577,0	577,0	0,00	10,67	10,41	10,69	10,30	10,97	11,39	11,12	11,05	10,78	10,70	10,41	10,34	10,74		
L1	579,7	579,5	-0,03	13,09	11,15	12,76	11,86	11,88	11,95	12,12	12,15	12,24	12,08	12,31	11,88	12,12	12,05	
L2	579,0	578,8	-0,03	11,24	12,05	11,87	11,55	12,24	12,89	12,05	11,87	11,90	12,05	12,02	11,95	11,97		
M1	570,1	569,9	-0,04	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
M2	562,4	562,1	-0,05	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00		



Şekil 3.17 : A, B, C, D, E, F, G, H, I ve J kodlu numunelerin karbonatlaşma direnci görselleri.



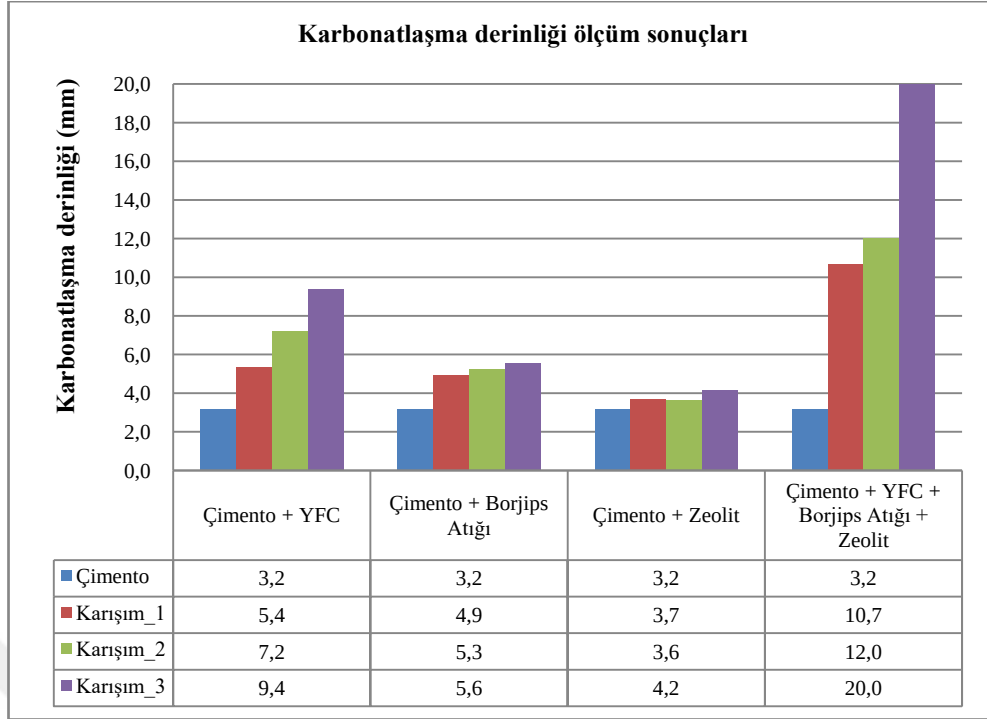
Şekil 3.18 : K, L ve M kodlu numunelerin karbonatlaşma direnci görselleri.

Numunelerin karbonatlaşma direnci ölçüm sonuçları incelendiğinde en düşük karbonatlaşmanın CEM I 42,5R Portland çimentosu ile hazırlanan kontrol numunelerine ait olduğu görülmektedir. Bu durum, çimento ile farklı oranlarda ikame edilerek kullanılan yüksek fırın cürufu, borjips atığı ve zeolitin, harç numunelerinin karbonatlaşma miktarını arttırdığı diğer bir deyişle numunelerin

karbonatlaşma direncini düşürdüğü şeklinde de yorumlanabilir. Ayrıca neredeyse tüm test numunelerinde kullanılan mineral katkıların ikame oranları arttırıldıkça karbonatlaşma direncinin düştüğü görülmektedir.

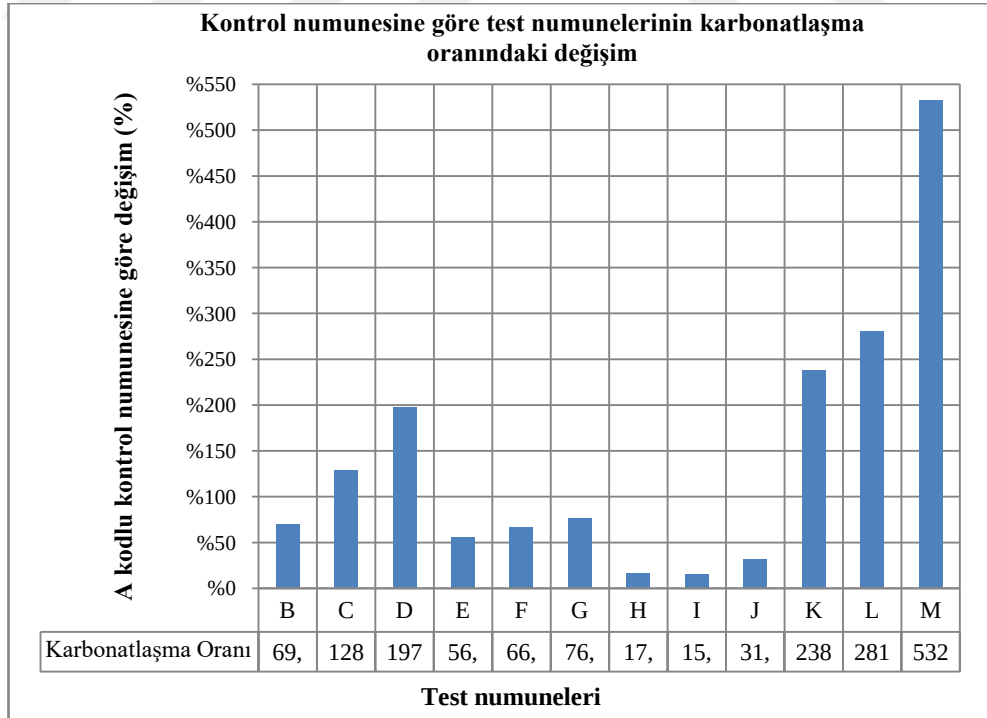
Sonuçlar incelendiğinde yüksek karbonatlaşma direnci gösteren katkısız kontrol numunelerine en yakın performansı zeolit katkılı test numuneleri göstermiştir. Zeolit katkısının % 7 ikame miktarı için karbonatlaşmadaki artış yaklaşık % 31 olurken aynı değer borjips atığı içeren numunelerde % 75'e ulaşmıştır. Bu durum borjips atığının zeolit mineraline göre karbonatlaşma direncini daha fazla düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir. Kontrol numunelerine göre karbonatlaşma miktarı en yüksek ve dolayısıyla karbonatlaşma direnci en düşük test numuneleri ise cüruf, borjips atığı ve zeolit mineralini farklı oranlarda birlikte ihtiva K, L ve M kod numaralı numunelerdir. Şekil 3.19'de de görüldüğü üzere yüksek fırın cürufu içeren test numunelerinde, çimento ile ikame edilen cüruf miktarı arttıkça karbonatlaşmanın da belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Aynı durumun borjips atığı ve zeolit katkılı test numuneleri için de geçerli olduğunu söylemek pek mümkün değildir. Borjips atığı ve zeolit ikamesi içeren test numunelerinin karbonatlaşma direnci, çimento ile üretilen katkısız kontrol numunelerine göre daha düşük olmakla birlikte ikame oranlarındaki artışa göre karbonatlaşma direncindeki değişim cüruf test numuneleri ile karşılaştırıldığında çok daha küçük gerçekleşmiştir.

Cüruf, borjips atığı ve zeoliti mineralini birlikte içeren test numunelerinin ikame oranına göre karbonatlaşma direncindeki değişim miktarı Şekil 3.19'de de görüldüğü üzere özellikle en büyük ikame oranlarını içeren M kodlu numunede (Karışım 3) oldukça belirgin bir hal almıştır. M kodlu test numunesinin karbonatlaşma miktarının çimento ile hazırlanan kontrol numunesine göre 5 kattan daha fazla arttığı görülmektedir. Hazırlanan test numunelerindeki çimento içeriği azaldıkça karbonatlaşma miktarının da arttığı söylenebilir. Öyle ki en yüksek karbonatlaşma, % 60 cüruf, % 7 borjips atığı ve % 7 zeolit ikame oranı ile içeriğindeki çimento miktarı % 26'ya kadar düşürülen M kodlu numunede görülmüştür. Şekil 3.18'de de görüldüğü üzere M kodlu test numunesi (Karışım 3) tüm iç kesit alanı boyunca tamamen karbonatlaşmıştır. Performans olarak değerlendirildiğinde zeolit katkılı harç numunelerinin tüm karışım oranlarında CEM I 42,5R Portland çimentosu ile hazırlanan kontrol numunelerine en yakın karbonatlaşma direnci performansını gösterdiği söylenebilmektedir.



Şekil 3.19 : Kontrol ve test numunelerinin karbonatlaşma direncinin karşılaştırılması.

Şekil 3.20’de mineral katkı içeren test numunelerinin karbonatlaşma miktarının kontrol numunesine göre yüzde olarak değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.20 : Kontrol numunesine göre test numuneleri karbonatlaşma oranındaki değişim

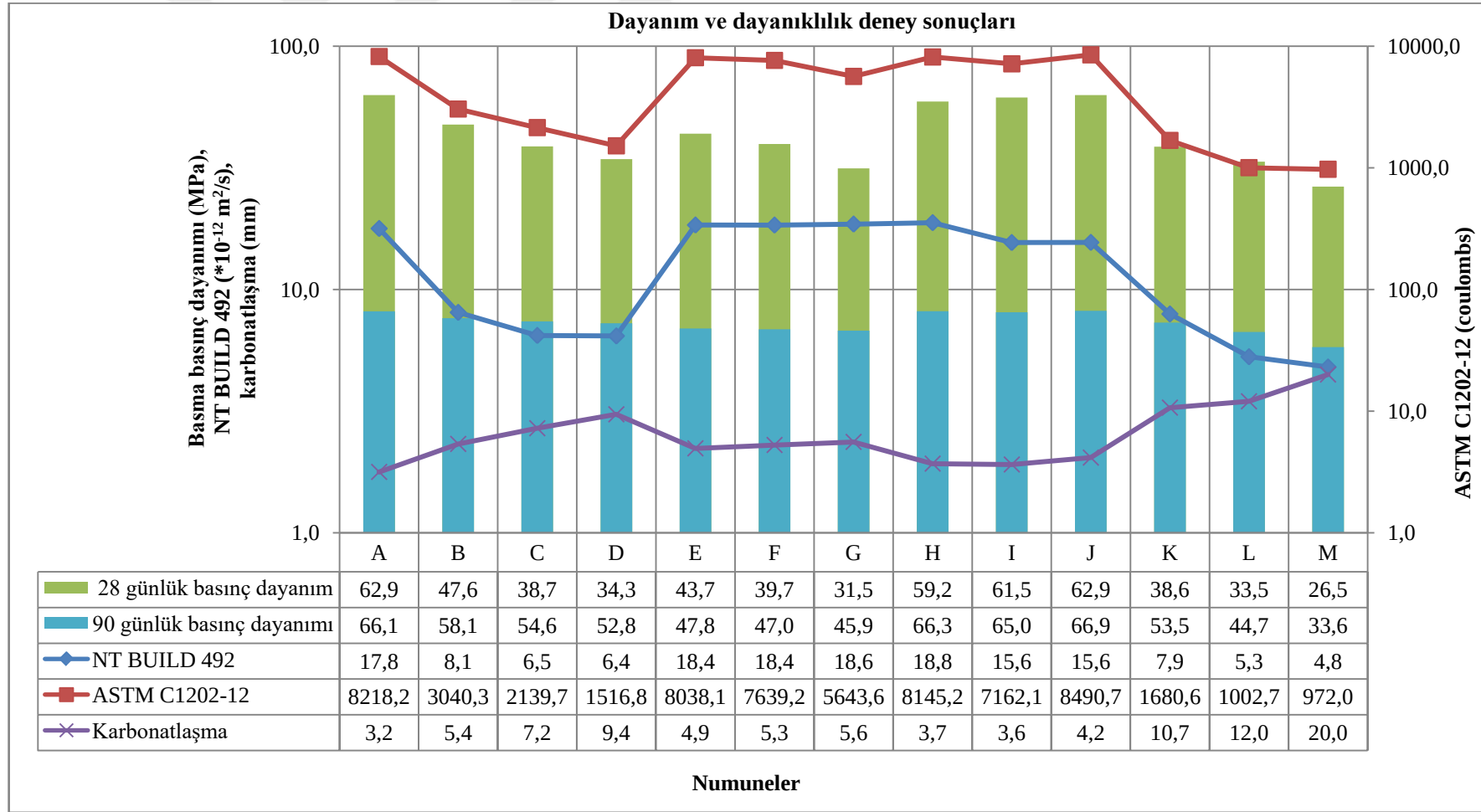
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüz en önemli yapı malzemelerinin başında gelen beton elemanların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi amacı ile farklı mineral katkılı harç numuneleri üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Günümüzde inşa edilen tüm yapılarda dayanım ve dayanıklılık birlikte sağlanması gereken çok önemli iki bileşendir. Bazı mineral katkıların deneyleri gerçekleştirilen harç numunelerinin dayanım ve klorür geçirimsizliği gibi dayanıklılık performansına olumlu katkıları olurken aynı malzemelerin diğer bir dayanıklılık deneyi olan karbonatlaşma direnci konusunda oldukça düşük bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu konuda önemli olan inşa edilecek yapının bulunduğu ortam ve çevresel etki şartlarına göre birincil risk faktörünün belirlenmesi ve öncelikli olarak bu risk faktörüne yönelik beton reçete ve dizayn çalışmalarının yapılmasıdır. Örneğin deniz içerisinde inşa edilecek bir köprünün betonarme elemanı için öncelikli risk klorür geçirimsizliğidir ve üretilecek betonun dizayn aşamasında klorür geçirimsizliği performansını yükseltecek tedbirler alınması kaçınılmazdır. Mesela karada inşa edilen bir tünel yapısında içerisinden geçen motorlu taşıtlardan dolayı ortamdaki CO₂ konsantrasyonunda ciddi bir artış söz konusu olacaktır. Böyle bir durumda betonarme elemanların karbonatlaşması ve donatı korozyonuna açık hale gelmesi öncelikli risk olacak ve karayolu tüneli için üretilecek betonun karbonatlaşma direnci de büyük önem kazanacaktır. Eğer inşa edilecek tünel su altında olacak ise bu sefer hem betonun klorür geçirimsizliği hem de karbonatlaşma direnci birlikte önem kazanacak ve en yüksek risk faktörüne uygun optimum beton üretim reçetesinin hazırlanması kaçınılmaz olacaktır.

Dayanım betonun yük taşıma kapasitesini ifade ettiğinden dolayı genel olarak deneysel çalışmalarda yüksek dayanım deneysel verileri olumlu karşılanmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen dayanıklılık deneyleri betonarme yapıdaki donatı korozyonunun başlıca sebeplerinden olan klorür geçirimsizliği ve karbonatlaşma reaksiyonu ile ilgilidir. Dayanıklılık, betonarme yapının sağlam donatı ile birlikte yeterli dayanım özelliklerini koruyabildiği ömrünü ifade ettiği için bu sefer düşük klorür geçirimsizliği ve düşük karbonatlaşma miktarı deneysel verileri olumlu

karşılanmaktadır. Şekil 4.1’de gerçekleştirilen 28 ve 90 günlük basma basınç dayanımı ve dayanıklılık deneysel çalışmalarına ait veriler birlikte görülmektedir.





Şekil 4.1 : Basma basınç dayanımı ve dayanıklılık deney sonuçları.

Basınç dayanımı deney sonuçları değerlendirildiğinde kontrol numunesine 28 günlük basma basınç dayanımı olarak en yakın performansı H, I ve J kodlu zeolit katkı test numuneleri göstermiştir. 28 günlük basma basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde en düşük performansın ise yüksek fırın cürufu, borjips atığı ve zeolit mineralini farklı oranlarda birlikte içeren K, L ve M kodlu test numunelerine ait olduğunu söylemek mümkündür. 90 günlük basma basınç dayanımı sonuçları ikame edilen mineral katkı performansı göz önüne alınarak değerlendirildiğinde 28 günlük dayanım sonuçları ile benzerlik göstermiş ve aynı şekilde en yüksek performansın zeolit katkı test numunelerine ait olduğu görülmüştür. 28 günlük ve 90 günlük eğilme basınç dayanımı deney sonuçları değerlendirildiğinde kontrol numunesine göre daha yüksek performans gösteren zeolit katkı test numuneleri hariç diğer tüm numunelerde eğilme dayanımında düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. Karbonatlaşma reaksiyonu sonrasında karbonatlaşmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen 90 günlük basma dayanımı sonuçlarına göre özellikle zeolit katkı test numunelerinde katkısız kontrol numunelerine göre yaklaşık % 20'ye varan bir basınç dayanım artışı gözlemlenmesi dikkat çekicidir. Eğilme ve basma basınç dayanımı deney sonuçlarında gözlemlenen zeolit mineral katkısının göstermiş olduğu yüksek performans literatür çalışmaları ile tutarlı olarak değerlendirilmiştir.

NT BUILD 492 ve ASTM C 1202-12 klorür geçirimsizliği deneyleri birlikte değerlendirildiğinde Şekil 4.1'de de görüleceği üzere farklı ölçüm skalalarında olmalarına rağmen benzer bir karakteristik göstermiştir. Klorür geçirimsizliği konusunda en yüksek performans cüruf katkı test numunelerinde gözlemlenmiş olup geçirimsizliğin cüruf ikame oranı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında her iki standarda göre en yüksek klorür geçirimsizliği performansının % 60 cüruf, % 7 borjips atığı ve % 7 zeolit olmak üzere en yüksek toplam mineral katkıyı ihtiva eden M kodlu test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Borjips atığı ve zeolit katkı test numunelerinin klorür geçirimsizliği performansı her iki standarda göre yapılan deneyler sonucunda, kontrol numunesi ile kıyaslandığında kayda değer bir performans artışı göstermediği gözlemlenmemiştir. Borjips katkı test numunelerinin ASTM C1202-12 standardına göre yapılan klorür geçirimsizliği test sonuçları ikame oranındaki artışa göre değerlendirildiğinde kontrol numunesine göre sırasıyla % 5 ve % 30 oranında performans artışı gösterirken aynı numunelerin NT BUILD 492 standardına göre

klorür geçirimsizliği performansında ikame oranı artışına göre değişim görülmemesi dikkat çekicidir. Borjips atığı ve zeolit katkılı test numunelerinin her iki standarda göre yapılan klorür geçirimsizliği test sonuçları deney ölçüm belirsizliği de göz önüne alınarak birlikte değerlendirildiğinde her iki katkının da klorür geçirimsizliği konusunda başarısız performans sergilediği söylenebilmektedir. Her iki deneyin ölçüm sonuçları özellikle sadece borjips atığı ve zeolit katkılı test numuneleri için birbirleri ile açıklanabilir şekilde tutarlı olarak tespit edilememiştir. Klorür geçirimsizlik performansını yetersiz numune yerleştirme ve işlenebilirlik kaynaklı numune iç boşluk yapısının olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada herhangi bir kimyasal akışkanlaştırıcı katkı kullanılmadan eşit su / bağlayıcı prensibine göre çalışıldığından özellikle borjips atığı ve zeolit katkılı test numunelerinde kıvam kaybından kaynaklanan yerleştirme hatalarının daha çok olabileceği düşünülmektedir. Numune iç yapısında boşluklara ve dolayısıyla geçirimsizlik kaybına sebebiyet verebilecek bu durumun sadece borjips atığı ve zeolit katkılı test numunelerinin geçirimsizlik performansını daha çok etkileyebileceği düşünülmektedir. Ancak her iki standarda göre gerçekleştirilen test sonuçlarına göre en yüksek klorür geçirimsizlik performansı tüm mineral katkıları en yüksek oranda birlikte içeren M kodlu test numunesine aittir. Bu durum öncelikle literatür araştırmalarında da belirtilen Friedel tuzu oluşturma kapasitesi ile yüksek klorür geçirimsizliği performansı sunancürufun % 60 ikame oranında varlığı ile açıklanabilir. Ayrıca M kodlu test numunesinde Friedel tuzunun klor bağlama kapasitesine ek olarak borjips atığı ve zeolit mineralinin de numune iç yapısında boşluk azaltıcı etki göstermesinin sadece cüruf içeren D kodlu test numunesine göre % 25'e varan daha yüksek geçirimsizlik performansına tesir etmiş olabileceği düşünülmektedir.

Numunelerin karbonatlaşma direnci deney sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek karbonatlaşma direncinin dolayısıyla en düşük karbonatlaşmanın gözlemlendiği numune herhangi bir katkı içermeyen A kodlu kontrol numunesidir. Yüksek fırın cürufu içeren tüm test numunelerinin karbonatlaşma miktarı numune içerisindeki cüruf miktarı arttıkça artmaktadır. Karbonatlaşmanın en yüksek gözlemlendiği numune % 60 cüruf, % 7 borjips atığı ve % 7 zeolit ile toplam % 74 oranında çimento ikamesinin yapıldığı M kodlu test numunesidir. M kodlu test numunesi tüm iç kesiti boyunca karbonatlaşma reaksiyonuna maruz kalmış ve karbonatlaşma

tamamlanmıştır. Ayrıca borjips atığı ve zeolit içeren test numunelerinin de cüruf ile benzer şekilde ikame oranları arttırıldıkça karbonatlaşma miktarı da artmaktadır. Bu değişimin en yüksek ikame oranları için cüruf katkılı numunelerde % 200, borjips atığı katkılı numunelerde % 75, zeolit katkılı numunelerde % 30 ve tüm mineral katkıları birlikte içeren numunelerde ise % 530'a vardığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç numunenin ihtiva ettiği CEM I çimento içeriği azaldıkça karbonatlaşmanın da arttığı yönünde yorumlanabilir. % 7 ikame oranı için % 30 karbonatlaşma artışı gösteren zeolit mineralinin bu çalışmada çalışılan diğer katkılara göre değerlendirildiğinde karbonatlaşma direnci konusunda en yüksek performansı gösteren mineral katkı olduğu söylenebilir. En yüksek ikame oranlarına göre değerlendirildiğinde J kodlu zeolit katkılı test numunesinin G kodlu borjips atığı katkılı test numunesine göre % 45 daha başarılı performans gösterdiği söylenebilir.

Bu çalışma endüstriyel atık durumundaki yüksek fırın cürufu ve borjipsin belirli oranlarda beton içerisinde kullanılabileceğini göstermektedir. Yüksek fırın cürufu günümüzde CEM I çimentoya yaklaşan yüksek hidrolik bağlayıcı özelliği, ileri yaş dayanım performansı ve CEM I çimentodan farklı olarak yüksek klorür geçirimsizlik performansı ile halihazırda hazır beton sektöründe yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak cüruf katkılı beton numunelerinin karbonatlaşma direncinin düşük olması dikkat edilmesi gereken bir konudur. Borjips atığının betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde yarattığı performans kayıplarına rağmen uygun akışkanlaştırıcı bir kimyasal katkı ile beton içerisinde belirli oranlarda çimento yerine kullanılarak yüksek dayanım gerektirmeyen yapı elemanlarında değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Zeolit doğal mineralinin ise beton içerisinde özellikle uygun bir akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile belirli ikame oranlarında neredeyse çimentoya eşdeğer dayanım ve karbonatlaşma direnci özellikleri ile taşıyıcı yapı elemanlarında dahi kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca farklı mineral katkıların betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi değerlendirilerek çimento ile yüksek ikame oranlarında birlikte de kullanılabileceği düşünülmektedir. Örneğin öncelikli çevresel risk faktörünün klorür difüzyonu olduğu ve yüksek klorür geçirimsizliğinin istendiği taşıyıcı olmayan bir yapı elemanında çimento ile yüksek ikame oranlarında farklı mineral katkıların birlikte kullanılabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak yapılan tüm deneysel çalışmalar göz önüne alındığında betonarme yapıların üretiminde dayanım ve dayanıklılık birlikte değerlendirilmelidir. Yapının taşıyacağı yük yanında hammadde kaynaklarının verimli kullanımı ve atık bertarafının önem kazandığı günümüzde uzun ömürlü yapıların inşa edilmesi zorunluluğu da kaçınılmaz bir gerçektir. Örneğin yüksek yük taşıma kapasitesine sahip ancak çok kısa bir sürede güvenilir olarak kullanılamaz hale gelecek bir köprü, tünel yapısı geçerli bir anlam ifade etmemektedir. Bu yüzden inşaat projesinin yeterli dayanım ve mevcut çevresel risk faktörlerine göre yeterli dayanıklılık özelliklerini taşıyacak optimum beton dizayn çalışmasının yapılması zorunludur. Örneğin karbonatlaşmanın birincil risk faktörü olduğu bir inşaat projesinde yüksek fırın cürufu çimento ikamesi betonarmeyi donatı korozyonuna karşı daha fazla korumasız bırakırken aynı durum bir deniz yapısındaki betonarme eleman için tam tersidir. İnşaat projelerinde mevcut çevresel risklere göre betonun dizayn edilmesi betonarmenin durabilitesi açısından hayati önem taşımaktadır.

Bu çalışmada kimyasal katkı kullanılmadan eşit su / bağlayıcı oranında yüksek fırın cürufu, borjips atığı, zeolitin tek başına ve birlikte çimento ile ikame edilerek kullanılmasının numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Özellikle borjips atığı ve zeolit katkılı test numunelerinde kıvam kaybından kaynaklanan işlenebilirlik yetersizliğinden dolayı ikame oranları % 7 ile sınırlandırılmıştır. İlerleyen deneysel çalışmalarda akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanarak mineral katkıların daha yüksek ikame oranlarında kullanıldığı eşit kıvamda hazırlanan harç numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi önerilmektedir.



5. KAYNAKLAR

- [1] Binici, H. & Sevinç, A. H. & Durgun M. Y. (2010).Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi* 13(1), (pp.01-13).Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Kahramanmaraş, Temmuz 20.
- [2] Baradan, B. & Aydın, S. (2013).Betonun dürabilitesi (dayanıklılık, kalıcılık),Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir, *Türkiye Hazır Beton Birliği Dergisi*, (pp.54-68). Kasım - Aralık.
- [3] Özbora, A. A. & Kiremitçi, C. A. & Akkaya, Y. & Taşdemir, M. A. (2011).Mineral katkılı betonların geçirimsizlik özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, (pp.64-75),*Beton 2011 Kongresi, Türkiye Hazır Beton Birliği*, Ekim.
- [4] TS EN (2016). *Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini* (TS EN 196-1).
- [5] NT (1999). *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments* (NT BUILD 492).
- [6] ASTM (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* (ASTM C1202-12).
- [7] EN (2004). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance to carbonation* (EN 13295).
- [8] TS EN (2012). *Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler - Deney yöntemleri – Sertleşmiş betonda karbonatlaşma derinliğinin fenolftaleyn yöntemi ile tayini* (TS EN 14630).
- [9] Erdoğan, S. T. & Erdoğan, T. Y. (2005). Portland çimentosunun Joseph Aspdin tarafından icadı ve çimento üretiminde Aspdin ailesinin rolü, Teksas Austin Üniversitesi ABD, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Ankara, Mart.
- [10] Baradan, B. & Yazıcı, H. & Aydın, S. (2012). Beton, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334*, (pp.08-09). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İzmir, Ocak.
- [11] Özkul, H. & Taşdemir, M. A. & Tokyay, M. & Uyan, M. (2004). Her Yönüyle Beton, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, (pp.16), Aralık.
- [12] Sevim, U. K. & Okumuş, N. (2011). Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 26(2), (pp.57-63), Aralık.

- [13] **Ikotun, B. D. & Ekolu, S.** (2010). Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties, *Construction and Building Materials* 24, (pp.749-757), School of Civil and Environmental Engineering, University of the Witwatersrand, Private Bag X3, WITS 2050, Johannesburg, South Africa, 23 October 2009.
- [14] **Markiv, T. & Sobol, K. & Franus, M. & Franus, W.** (2016). Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite, *Archives of civil and mechanical engineering* 16, (pp.554-562), Department of Civil and Environmental Engineering, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 25 March 2016.
- [15] **Najimi, M. & Sobhani, J. & Ahmadi, B. & Shekarchi, M.** (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials* 35, (pp.1023-1033), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada-Las Vegas, USA, 25 April 2012.
- [16] **Ahmadi, B. & Shekarchi, M.** (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement & Concrete Composites* 32, (pp.134-141), Construction Materials Institute, Department of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, 20 October 2009.
- [17] **Valipour, M. & Pargar, F. & Shekarchi, M. & Khani, S.** (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials* 41, (pp.879-888), Construction Materials Institute (CMI), School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, 22 November 2012.
- [18] **Bilim, C.** (2011). Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, *Construction and Building Materials* 25, (pp.3175-3180), Mersin University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Mersin, Turkey, 25 February 2011.
- [19] **Ortega, E. A. & Cheeseman, C. & Knight, J. & Loizidou, M.** (2000). Properties of alkali-activated clinoptilolite, *Cement and Concrete Research* 30, (pp.1641-1646), Department of Civil and Environmental Engineering, Centre for Environmental Control and Waste Management, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London SW7 2BU, UK, 2 June 2000.
- [20] **Tokyay, M. & Erdoğan, K.** (2009). Cürufklar ve cürufllu çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu TÇMB / AR-GE / Y97.2*, (pp.11, 28), Ankara, Temmuz.
- [21] **Dal, M. & Kılınc, C. & Eren, E. & Işık, A.** (2013). Beton teknolojisi ve beton teknolojisi laboratuvarı, *Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi ISBN 978-605-86645-1-7*, (pp.71-74), İstanbul, Nisan.

- [22] Işık, A. & Kılınç, C. & Eren, E. & Şahin, Y. & Aktaş, G. (2017). Mineral, kimyasal katkı ve yüzey kaplaması uygulanmış betonların dırabilite özelliklerinin çevresel etki sınıfları açısından değerlendirilmesi, *Beton 2017 Hazır Beton Kongresi*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Nisan.
- [23] Aktaş, G. (2017). Mineral, kimyasal katkı ve yüzey kaplaması uygulanmış betonların dırabilite özelliklerinin çevresel etki sınıfları açısından değerlendirilmesi, *Beton 2017 Hazır Beton Kongresi Sunumu*, (pp.5), Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Nisan.
- [24] Baradan, B. & Yazıcı, H. & Ün, H. (2010). Kalıcılık (Durabilite), *Türkiye Hazır Beton Birliği ISBN 975-92122-2-6*, (pp.175-192), İstanbul, Eylül.
- [25] Aktaş, G. & Işık, A. & Kılınç, C. & Akakın, T. & Satılmış, S. (2015). Examination of chloride diffusion of different concrete mix designs with different binder combinations and water to binder ratios over time, *XVII. European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO) Congress*, Turkish Ready Mixed Concrete Association (TRMCA), İstanbul, 4-5 June 2015.
- [26] Dhir, R. K. & El-Mohr, M. A. K. & Dyer, T. D. (1996). Chloride binding in GGBS Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 12, (pp.1767-1773), Concrete Technology Unit Department of Civil Engineering, University of Dundee, Scotland, 10 October 1996.
- [27] Han, S. H. (2007) Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure, *Construction and Building Materials* 21 (2007), (pp. 370-378), Coastal and Harbour Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, 1270 Sadong Ansan, Republic of Korea, 10 August 2005.
- [28] Lou, R. & Cai, Y. & Wang, C. & Huang, X. (2003). Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (2003), (pp.1-7), Transportation College of Southeast University, Nanjing 210096, China, 10 December 2001.
- [29] Gönen, T. & Yazıcıoğlu, S. (2005). Betonda hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi ve aparatı, *Politeknik Dergisi Cilt:8 Sayı:2*, (pp.233-237), Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü 23119 Merkez, Elazığ, 2005.
- [30] Özbay, E. & Erdemir, M. & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review, *Construction and Building Materials* 105, (pp. 423-434), Civil Engineering Department, Iskenderun Technical University, Iskenderun, Turkey, 22 December 2015.
- [31] Gruyaert, E. & Van den Heede, P. & De Belie, N. (2013). Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure, *Cement and Concrete Composites* 35, (pp.39-48), Magel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, Department of Structural

Engineering, Technologiepark Zwijnaarde 904, B-9052 Ghent, Belgium, 27 August 2012.

- [32] Zhang, X. & Zhou, X. & Zhou, H. & Gao, K. & Wang, Z. (2013). Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability, *Applied Clay Science*, (pp.36-40), Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China, 22 February 2013.
- [33] Özdemir, M. & Uğurlu, A. (2007). Boraks üretiminde ortaya çıkan atık malzemenin çimentoda değerlendirilmesi, *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, (pp.319-329), 13-15.04.2007.
- [34] Demirbaş, A. & Karshoğlu, S. (1995). The effect of boric acid sludges containing borogypsum on properties of cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No.7, (pp.1381-1384), Technical University of the Black Sea, Department of Chemistry, 61080 Trabzon, Turkey, 21 June 1995.
- [35] Sevim, U. K. & Tümen, Y. (2013). Strength and fresh properties of borogypsum concrete, *Construction and Building Materials* 48, (pp.342-347), Engineering Faculty, Mustafa Kemal University, 31200 Iskenderun-Hatay, Turkey, 17 June 2013.
- [36] Boncukçuoğlu, R. & Yılmaz, M. T. & Kocakerim, M. M. & Tosunoğlu, V. (2002). Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production, *Cement and Concrete Research* 32, (pp.471-475), Ataturk University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 25240 Erzurum, Turkey, 15 October 2001.
- [37] Elbeyli, İ. Y. & Derun, E. M. & Gülen, J. & Pişken, S. (2003). Thermal analysis of borogypsum and its effects on the physical properties of Portland cement, *Cement and Concrete Research* 33, (pp.1729-1735), Department of Chemical Engineering, Chemical– Metallurgical Faculty, Yıldız Technical University, 34210, Topkapı, Istanbul, Turkey, 3 April 2003.
- [38] Url-1 <<http://www.iloencyclopaedia.org/component/k2/153-tools-equipment-and-materials/cement-and-concrete>>, erişim tarihi 10.03.2018.
- [39] Url-2 <<http://eng.harran.edu.tr/~pturgut/cemprodkind.pdf>>, erişim tarihi 10.03.2018.
- [40] Url-3 <<http://www.gordeszeolite.com/zeoli%CC%87t-kli%CC%87nopti%CC%87loli%CC%87t>>, erişim tarihi 10.03.2018.
- [41] Url-4 <<https://muratsezik.wordpress.com/2015/06/25/yuksek-firinlar/>>, erişim tarihi 10.03.2018.
- [42] Url-5 <<http://www.thbb.org/sektor/istatistikler/>>, erişim tarihi 10.03.2018.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Arda IŞIK
Doğum Tarihi ve Yeri : 04.09.1980 / İstanbul
E-posta : arda.isik@thbb.org

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2006 – 2007 Winart Home Elegance firmasında Üretim Mühendisi
- 2007 – Halen Türkiye Hazır Beton Birliği İktisadi İşletmesi Kalibrasyon Laboratuvarı Müdürü, Deney Laboratuvarı Teknik Uzman
- 2016 – Halen Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) Boyutsal Kalibrasyon Alanı Teknik Uzman

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Işık, A. & Kılınç, C. & Eren, E. & Şahin, Y. & Aktaş, G. (2017). Mineral, kimyasal katkı ve yüzey kaplaması uygulanmış betonların dürabilite özelliklerinin çevresel etki sınıfları açısından değerlendirilmesi, *Beton 2017 Hazır Beton Kongresi*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Nisan.

Işık, A. (2016). Türkiye Hazır Beton Birliği İktisadi İşletmesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı beton dürabilite test düzenekleri, *Beton 2016 Kongresi*, Türkiye Hazır Beton Birliği, Ankara, 11-13 Şubat 2016.

- Aktaş, G. & Işık, A. & Kılınç, C. & Akakın, T. & Satılmış, S. (2015).** Examination of chloride diffusion of different concrete mix designs with different binder combinations and water to binder ratios over time, *XVII. European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO) Congress*, Turkish Ready Mixed Concrete Association (TRMCA), Istanbul, 4-5 June 2015.
- Dal, M. & Kılınç, C. & Eren, E. & Işık, A. (2013).**Beton teknolojisi ve beton teknolojisi laboratuvarı, *Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi ISBN 978-605-86645-1-7*, (pp.71-74), İstanbul, Nisan.
- Akakın, T. & Kılınç, C. & Işık, A. & Zengin, H. (2013).** Hazır beton sektörü ve hazır beton sektöründeki gelişmeler, *Beton 2013 Kongresi*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Şubat.
- Yılmaz, Y. & Işık, A. & Kılınç, C. & Eren, E. (2013).** Hazır beton sektöründe sürdürülebilir üretim, *Beton 2013 Kongresi*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Şubat.