T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOR KAPLI HAFİF AGREGALI BETONLARIN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Özlem SALLI BİDECİ

DOKTORA TEZİ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

Prof. Dr. Sabit OYMAEL

2013

EDİRNE

BOR KAPLI HAFİF AGREGALI BETONLARIN

FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Özlem SALLI BİDECİ

DOKTORA TEZİ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

2013

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABUL ve ONAY SAYFASI

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……
Prof.Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

……
Prof.Dr.H. Burcu ÖZGÜVEN
Mimarlık Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

……
Prof.Dr.Sabit OYMAEL
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Mimarlık Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad):	İmza
Prof.Dr.Sabit OYMAEL	……
Prof.Dr. Ali Haydar GÜLTEKİN	……
DoçDr.Serkan SUBAŞI	……
Yrd.Doç.Dr.Hasan YILDIRIM	……
Yrd.Doç.Dr. Cevdet Emin EKİNCİ	……

Tarih: 06 / 06 / 2013

TEZ DOĞRULUK BEYANI
T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

06 / 06 / 2013
Özlem SALLI BİDECİ

Doktora Tezi

Bor Kaplı Hafif Agregalı Betonların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Araştırılması

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Mimarlık Anabilim Dalı

ÖZET

Bor ve pomza madenleri farklı endüstriyel alanlarda kullanılabilmektedir. Türkiye dünya bor rezervinin %72'sine, pomza rezervinin ise %45'ine sahiptir. Bu çalışmada, kolemanitin çimento ile belirli oranlarda (%0, %7.5, %12.5, %17.5) ikame edilmesiyle elde edilen karışımın pomza yüzeyine kaplanması söz konusudur. Üzeri kaplı olan hafif agregalar üzerinde ve söz konusu agregalarla üretilen betonlar üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Agrega deneylerinden olmak üzere, özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık, su emme, agrega darbe katsayısı, agrega kırılma katsayısını bulma ve ince kesit analizi gibi çalışmalar yapılmıştır. Beton deneylerinde ise, kuru birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme, kılcal su emme, aşınma, ultrases geçiş hızı, basınç altında su işleme derinliği, hızlı klorür geçirimliliği, sülfatlara dayanım gibi deneylerle SEM (scanning electron microscope) analizleri yapılmıştır.

Araştırma sonuçlarına göre; pomza agregaların kaplanmasıyla agregada basınç dayanımının arttığı, su emmenin %50 azaldığı ve bu agregalarla üretilen beton numunelerinde basınç dayanımlarının artarak ultrases geçiş hızına, basınç altında su işleme derinliğine, sülfat dayanımına, hızlı klor geçirimliliğine olumlu katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Genel olarak %12.5 oranında kolemanitli çimentolarla kaplı agregalarla üretilen beton numunelerinin basınçlı su geçirimliliği ile hızlı klorür geçirimliliği azalırken; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve sülfat dayanımının arttığı belirlenmiştir. Böylece kolemanitli çimentolarla kaplı hafif agregalı betonların yapılarda taşıyıcı özel hafif beton olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Yıl :2013

Sayfa :101

Anahtar Kelimeler :Pomza, Kolemanit, Basınç Dayanımı, SEM Analizi, Sülfat Dayanımı

Graduate Thesis

Investigation of The Physical and Chemical Properties of Boron-Coated Ligthweigth Aggregate Concrete

Trakya University Institute of Natural Science

Architecture Department

ABSTRACT

Boron and pumice mines are used in different industrial areas. Turkey has the 72 % of the earth's boron reserves and 45 % of pumice reserves. In this study, the mixture of colemanite and cement at specific proportions (0%, 7.5%, 12.5%, 17.5%) are covered onto pumice surface. A series of experimental studies are made on covered light aggregates and the concretes generated with them. Specific weight, bulk density, water absorption, aggregate blow coefficient, aggregate refraction coefficient and thin section analyses are made on these aggregates. Dry unit weight, compression strength, tensile splitting strength, water absorption rate, capillary absorption, abrasion, ultrasonic pulse velocity, depth of penetration of water under pressure, fast chloride permeability, sulphate strength test and SEM analyses are implemented on the generated light concrete samples are on concrete experiments.

Accordingly, after the covering of pumice aggregates, it has been concluded that compressive strength of the aggregates increases, water absorption decreases by 50% and by increasing the compression strength of the concrete samples generated with these aggregates has been defined to have positive contributions to ultra sound transmission rate, depth of penetration of water under pressure, sulphate resistance and fast chloride permeability. In general, of the concrete samples generated with the aggregates covered with 12.5% colemanited cements; compressive water permeability and fast chloride permeability decreases while compressive strength, splitting tensile strength and sulphate resistance increases. Thus, it has been defined that light aggregated concretes covered with colemanited cements could be used as supporting special light concrete.

Year :2013

Pages :101

Key Words :Pumice, Colemanite, Compressive Strength, SEM Analysis, Sulfate Strength

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam süresince bilgisinden yaralandığım, desteğini yanında hissettiğim, çalışmalarımın her aşamasında öneri ve eleştirileri ile beni yönlendiren danışmanım Prof.Dr. Sabit OYMAEL'e teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Öğretim Üyesi Prof.Dr.Ali Haydar GÜLTEKİN'e, İnşaat Fakültesi Öğretim Üyesi Yrd.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM' a, Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Doç.Dr. Serkan SUBAŞI'na desteklerinden ve çalışmalarımın bir bölümünde, laboratuarlarını kullanmama izin verdiklerden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından, TÜBAP 2010/167 nolu ve "Bor Kaplı Hafif Agregalı Betonların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı proje ile desteklenmiştir.

Desteği, sevgisi ve bilgisiyle her an yanımda olan eşim sevgili Yrd.Doç.Dr. Alper BİDECİ'ye, akademik yaşantım boyunca sabırla çalışmalarımın bitmesini bekleyen canım yavrum Kerem BİDECİ'ye, hiçbir konuda desteğini esirgemeyerek beni yetiştiren, bu günlere gelmemi sağlayan sevgili annem Mualla ve babam Mehmet SALLI'ya minnettar olduğumu belirterek teşekkürlerimi sunarım.

Özlem SALLI BİDECİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET..... iii
ABSTRACT..... iv
ÖNSÖZ..... v
İÇİNDEKİLER..... vi
SİMGELER DİZİNİ..... ix
ŞEKİLLER LİSTESİ..... x
TABLOLAR LİSTESİ..... xii
BÖLÜM 1
GİRİŞ..... 1
BÖLÜM 2
KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI..... 4
2.1. Pomza İle İlgili Yapılan Çalışmalar..... 4
2.2. Bor İle İlgili Yapılan Çalışmalar..... 10
2.3. Durabilite İle İlgili Yapılan Çalışmalar..... 14
2.4. Pomza Agregaları..... 17
2.4.1. Fiziksel ve kimyasal özellikleri 17
2.4.2. Pomzanın oluşumu..... 19
2.4.3. Pomzanın kullanım alanları..... 20
2.4.4. Dünya'da ve Türkiye'de pomza rezervleri 21
2.5. Bor..... 22
2.5.1. Bor elementi ve mineralleri 23
2.5.2. Borun oluşumu 25
2.5.3. Borun kullanım alanları..... 27
2.5.4. Dünya'da bor rezervleri..... 27
2.5.5. Türkiye'de bor rezervleri..... 28
2.6. Hafif Beton 29
2.6.1. Hafif beton tanımı 29
2.7. Betonda Kalıcılık (Durabilite)..... 31
2.7.1. Betonda kalıcılığa etki eden faktörler..... 32
2.7.1.1. Sülfat reaksiyonları..... 32

2.7.1.2. Klorür reaksiyonları ……..... 33
2.7.1.3. Geçirimlilik (Permeabilite)……..... 34
2.7.1.4. Aşınma ……..... 35
BÖLÜM 3
MALZEME VE YÖNTEM……..……. 37
3.1. Materyal……... 37
3.1.1. Agregalar…… 37
3.1.1.1. Kaplanmamış pomza agregası ……..... 37
3.1.1.2. Çimento kaplı pomza agregası ……..... 39
3.1.1.3. Çimento+kolemanit kaplı pomza agregası…… 39
3.1.1.4. Doğal agrega (kum) (0/4mm)…… 39
3.1.2. Çimento…….. 40
3.1.3. Kolemanit……..……..……... 41
3.1.4. Su……...…..... 42
3.1.5. Çimento ve çimento+kolemanit kaplı agregaların üretimi…… 42
3.2. Metod**……...** 46
BÖLÜM 4
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 47
4.1. Hafif Beton Karışım Oranları...……..... 47
4.2. Kaplanmış ve Kaplanmamış Agregaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri……..……...……...… 48
4.3. Agrega Deneyleri……....…….....….. 52
4.3.1. Tane büyüklüğü dağılımı……..……..... 52
4.3.2. Özgül ağırlık……....……...….... 53
4.3.3. Gevşek birim ağırlık ……..……..……... 54
4.3.4. Su emme oranı...……..……..……...…… 55
4.3.5. Agrega darbe katsayısı (Impact value)……..……. 57
4.3.6. Agrega kırılma katsayısı (Crushing value)……..….. 58
4.4. Taze Beton Deneyleri…….. 60
4.4.1. Çökme (Slump)……..……..……..... 60
4.4.2. Birim ağırlık……..……..……... 61
4.5.Sertleşmiş Beton Deneyleri..……..……...….... 62

4.5.1. Kuru birim ağırlık……..……...…..... 62
4.5.2. Basınç dayanımı……..……... 63
4.5.3. Yarmada çekme dayanımı.……..….. 66
4.5.4. Su emme oranı...……...……. 69
4.5.5. Kılcal su emme……..……. 71
4.5.6. Aşınma (Böhme metodu).…….. 74
4.5.7. Ultrases geçiş hızı…….……. 78
4.5.8. Basınç altında su işleme derinliği…….……. 81
4.5.9. Sülfat tayini…..…….. 85
4.5.10. Hızlı klorür geçirimliliği (Penetrasyon)…….…….. 88
4.5.11. SEM analizleri……..…….. 91
BÖLÜM 5
SONUÇ VE ÖNERİLER……..…...…….. 98
5.1. Sonuçlar……... 98
5.2. Öneriler…… 101
KAYNAKLAR
ÖZGEÇMİŞ

SİMGELER DİZİNİ

ACI : American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)

ASTM : The American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme ve Deneyleri Birliği)

B : Taze betonun birim ağırlığı, kg/m^3

Bg : Gevşek birim ağırlık, kg/m^3

BS : İngiliz Standardı

C-S-H : Kalsiyum-Silikat-Hidrat

dk. : Dakika

DPT : Devlet Planlama Teşkilatı

Eş. : Eşitlik

Fc : Basınç dayanımı, MPa

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı, MPa

LC : Hafif beton dayanım sınıfı

Lim. : Limit

M : Pomza agregaların su emme yüzdesi

max. : Maksimum

min. : Minimum

MTA : Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü

δ_p : Doğal puzolan yoğunluğu

δ_k : Sönmüş kireç yoğunluğu

S/Ç : Su/Çimento

SEM : Scanning Electron Microscobe

Sk : Sertleşmiş betonun kuru birim ağırlığı

sn : Saniye

t : Zaman (saat)

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

V : Ultrasonik ses geçiş hızı, km/sn

Wf : Niha-i ölçme zamanındaki su emme oranı

δ : Özgül ağırlık, g/cm^3

Q : Kılcal yolla emilen su miktarı, %

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Deney akış şeması ……...…….	3
Şekil 2.1	Türkiye önemli perlit-pomza yatakları…….....……	22
Şekil 2.2	Bor yataklarının oluşumu……..	26
Şekil 2.3	Çeşitli bor ürünlerinin tüketim alanları……	27
Şekil 3.1	Nevşehir ili maden haritası……..…….....	38
Şekil 3.2	Leblebi şekeri kaplama makinesi…….....	42
Şekil 3.3.	Agrega kaplama aşamalarına ait resimler…….....	45
Şekil 4.1	Kontrol agregası tek nikol çekim…….....	50
Şekil 4.2	Kontrol agregası çift nikol çekim…….....	50
Şekil 4.3	0-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim…..……	50
Şekil 4.4	0-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim…….……	50
Şekil 4.5	7.5-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim……...……	51
Şekil 4.6	7.5-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim……..……	51
Şekil 4.7	12.5-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim…….……	51
Şekil 4.8	12.5-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim……	51
Şekil 4.9	17.5-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim…….……	52
Şekil 4.10	17.5-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim……	52
Şekil 4.11	Karışım granülometri eğrisi……..	53
Şekil 4.12	Agrega darbe katsayısı deneyi……..	57
Şekil 4.13	Agrega kırılma katsayısı deneyi……..	59
Şekil 4.14	Deneyde kullanılan tek eksenli basınç test cihazı…….	64
Şekil 4.15	Beton numunelerin basınç dayanımları grafiği…….....	64
Şekil 4.16	TS EN 12390-3'e göre silindir numunelerin kırılma şekilleri……..	65
Şekil 4.17	Yarmada çekme deneyi sonucu numune görüntüleri……	67
Şekil 4.18	Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları grafiği…….....	67
Şekil 4.19	Yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi…….....	69
Şekil 4.20	Beton numunelerin su emme grafiği…….....	70
Şekil 4.21	Kılcal su emme deneyi……..	72
Şekil 4.22	Beton numunelerde 28 günlük kılcal su emme grafiği…….....	73
Şekil 4.23	Beton numunelerde 90 günlük kılcal su emme grafiği…….....	73

Şekil 4.24	Böhme aşındırma cihazı ve deney numunesi……	75
Şekil 4.25	Beton numunelerde 28 ve 90 günlük aşınma kaybı ilişkisi……..	76
Şekil 4.26	Beton numunelerde 28 günlük aşınma kaybı ile basınç dayanımı ilişkisi……	77
Şekil 4.27	Beton numunelerde 90 günlük aşınma kaybı ile basınç dayanımı ilişkisi……	77
Şekil 4.28	Ultrases hızı ölçümü……..	78
Şekil 4.29	Beton numunelerde ultrases geçiş hızı…….....	79
Şekil 4.30	Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı ilişkisi…….....	80
Şekil 4.31	Basınç altında su işleme derinliği deneyi…….....	81
Şekil 4.32	28 ve 90 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği.....	82
Şekil 4.33	28 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı ilişkisi…….	84
Şekil 4.34	90 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı ilişkisi…….....	84
Şekil 4.35	Numunelerin çözelti içinde kürü……...	85
Şekil 4.36	$NaSO_4$ içerisindeki 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı……	86
Şekil 4.37	$MgSO_4$ içerisindeki 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı…….....	86
Şekil 4.38	Hızlı klorür direnci……	88
Şekil 4.39	Hızlı klorür geçirimliliği deney aşamaları……	89
Şekil 4.40	90 günlük hızlı klorür geçirimliliği……...	90
Şekil 4.41	Kontrol numunelerinin SEM görünümü……...	92
Şekil 4.42	0-CLM numunelerinin SEM görünümü……..…….....	93
Şekil 4.43	7.5-CLM numunelerinin SEM görünümü…….....	94
Şekil 4.44	12.5-CLM numunelerinin SEM görünümü……..…….....	95
Şekil 4.45	17.5-CLM numunelerinin SEM görünümü……..…….....	96

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1	Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel fiziksel özellikleri……..	18
Tablo 2.2	Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel kimyasal özellikleri……..	19
Tablo 2.3	2010 ve 2011 yıllarına ait tahmini pomza madeni üretimi……..	21
Tablo 2.4	Türkiye pomza rezerv dağılımı…….	22
Tablo 2.5	Bor elementinin fiziksel özellikleri……..	24
Tablo 2.6	Bor mineralleri……..	25
Tablo 2.7	Dünya bor rezervleri…….	28
Tablo 2.8	Mineral bazında bor rezerv miktarları……..	28
Tablo 2.9	Hafif beton için beton dayanım sınıfları……..	31
Tablo 3.1	Pomza agregaların kimyasal analizi ve diğer çalışma sonuçlarıyla kıyaslanması…….....	39
Tablo 3.2	Doğal agreganın (0/4mm) fiziksel ve kimyasal özellikleri……..	40
Tablo 3.3	CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel analizi……	40
Tablo 3.4	İşletmeden alınan kolemanitin kimyasal analiz ……..…….	41
Tablo 3.5	Kolemanitin fiziksel analiz sonuçları……	41
Tablo 3.6	Leblebi şekeri kaplama makinesi teknik özellikleri……..	42
Tablo 3.7	Çimento+kolemanit çözeltisi karışım oranları…….……	44
Tablo 4.1	Beton karışım oranları……..	48
Tablo 4.2	Özgül ağırlık değerleri…….	54
Tablo 4.3	Gevşek birim ağırlık……..	55
Tablo 4.4	Agrega su emme oranı……..	56
Tablo 4.5	Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesi…….	58
Tablo 4.6	Agrega kırılma katsayısı ufalanma yüzdesi……..	60
Tablo 4.7	Çökme sınıfları……..	60
Tablo 4.8	Taze betonların birim ağırlık deney sonuçları……..	61
Tablo 4.9	Kuru birim ağırlık deney sonuçları……..	62
Tablo 4.10	Hafif betonun birim hacim kütlesine göre sınıflandırılması…….	63
Tablo 4.11	Beton numunelerin basınç dayanımları…….	64
Tablo 4.12	Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları……..	67
Tablo 4.13	Beton numunelerde su emme ağırlıkları……..	70

Tablo 4.14	Kılcal su emme katsayıları……	72
Tablo 4.15	Beton numunelerin aşınma kaybı değeri……...	75
Tablo 4.16	Beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı değerleri	79
Tablo 4.17	Ultrases geçiş hızı test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi……...	80
Tablo 4.18	28 ve 90 günlük basınç altında su işleme derinliği değerleri……	82
Tablo 4.19	Zararlı etki derecesine göre izin verilebilecek en büyük S/Ç oranı ve su işleme derinliği değerleri…….	83
Tablo 4.20	Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler…….	85
Tablo 4.21	$NaSO_4$ ve $MgSO_4$ çözeltileri kürü sonrası basınç dayanımları (MPa)…….....	86
Tablo 4.22	Hızlı klor iyon geçirimlilik deney sonuçlarına göre betonun iyon geçirimliliği yönünden değerlendirilmesi…….	89
Tablo 4.23	90 günlük hızlı klorür geçirimliliği değerleri……	90

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Madenler, maden ürünlerinin diğer üretim sektörlerini besleyen temel girdi olarak etken bir rol oynaması sebebiyle, ülkelerin ekonomik kalkınmalarında son derece önemli bir yere sahiptir. Gelişmiş ülkelerde sahip olunan maden kaynaklarıyla, bu kaynakların ülke ekonomisine kazandırılması ve değerlendirilmesi arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur [1].

İnşaat sektöründe son yıllarda görülen büyük ivmelenme, kullanılacak yapı malzemelerinin teknik yönden üstün parametre ve değerlere sahip olmalarının gerekliliği, birçok yeni yapı malzemelerinin kullanımına ve uygulanmasına zemin hazırlamaktadır [2]. Özellikle günümüzde yaşanan fosil enerji kaynaklarının hızlı tüketimi, sera gazının sebep olduğu hava kirliliği, enerji kullanım miktarının en aza indirilme çabası, üretilen malzemelerin doğru ve yerinde kullanılmaması gibi sebeplerle ortaya çıkan sürdürülebilirlik kavramı bu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine hız kazandırmaktadır. Pomza ve bor madeni de araştırmalarda bu yönleriyle ön plana çıkmaktadır.

Pomza; inşaat sektöründe düşük birim ağırlık, yanma ve yangına karşı direnç, enerji sarfiyatının azaltılması, ısı kaybı ve gürültü kirliliğinin azalması amacıyla da ısı ve ses yalıtımında kullanılmaktadır. Dünya rezervinde büyük paya sahip olduğumuz, bilim ve teknoloji alanında stratejik bir öneme sahip bor madeni de inşaat sektöründe kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Yangına karşı direnç, aşınma dayanımı, malzeme üretimin aşamasında enerji tasarrufu gibi özellikleriyle ilave edildiği malzemeye enerji ve dayanım açısından olumlu özellikler kazandırmaktadır.

Sağladığı tüm bu olumlu özellikler ve aynı zamanda sürdürülebilir bir kaynak potansiyeliyle pomza ve bor hammaddesiyle yapı malzemeleri üretimi yakın gelecekte hız kazanacaktır.

Araştırmada, şu ana kadar fazla çalışma alanı bulunmayan kaplanmış agregalara ve özelliklerine yönelik çalışma yapılmıştır. Pomza agregası çimento, çimento+ kolemanit hammaddesiyle kaplanarak fiziksel ve mekanik özellikleri ve bu agregalarla hazırlanmış beton numunelerinin kimyasal, fiziksel, mekanik özellikleri incelenmiştir. Literatür taraması ve deneysel çalışmalara dayalı araştırmada, deneyler TS EN ve ASTM standartları esas alınarak yapılmıştır.

Yapılan bu tez çalışmasında amaç ve yenilikler şunlardır:

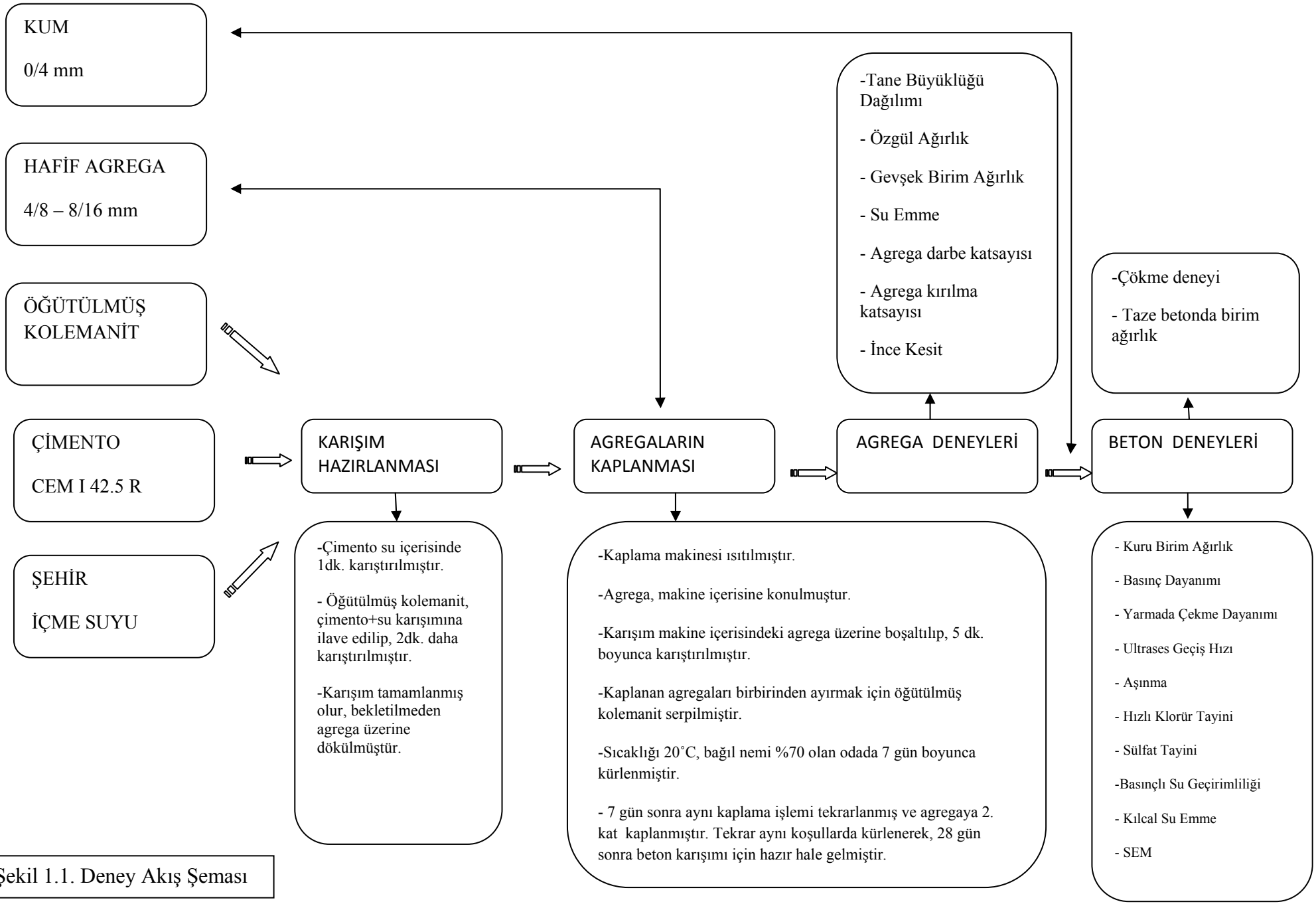
Amaçlar;

- Pomza hammaddesinin kullanım alanının artırılması,
- Bor (kolemanit) hammaddesinin kullanım alanın artırılması,
- Pomza agregasıyla beton üretiminin özendirilmesi,
- Çimento+kolemanit kaplı yeni hafif bir agrega türünün elde edilmesi,
- Elde edilen yeni agrega türüyle durabilitesi yüksek, su emmesi düşük, aşınmaya dayanıklı yeni bir hafif beton türünün elde edilmesi.

Yenilikler;

- Pomza agregasının kaplanarak yeni bir agrega türünün oluşturulması,
- Literatüre, kaplanmış pomza agregasıyla üretilen beton konusunda özgün bir çalışma yaparak katkıda bulunulması,
- Çimento+kolemanit kaplı pomza agregasının betonda aderansı hakkında bilgi sahibi olunması,
- Hangi oranlarda bor katkısının çimentoya katılabileceğinin ve betonda dayanımın artmasına sebep olabileceğinin belirlenmesi,
- Elde edilen yeni agrega türüyle hafif, su emmesi düşük, durabilitesi yüksek, aşınmaya dayanıklı yeni bir beton türünün elde edilmesi.

Çalışmanın deney akışı algoritması Şekil 1.1'de verilmiştir. Çalışmaların sonucunda en uygun değerlerin emniyetli olarak %12.5 kolemanit katkılı CEM I 42.5 R çimentosu ile kaplı agregalarla yüksek taşıyıcı özel hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.1. Deney Akış Şeması

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kuramsal temeller ve kaynak araştırması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde "pomza ve hafif beton", ikinci bölümde "bor" ve üçüncü bölümde "durabilite (dayanıklılık)" ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Pomza İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Topçu (1988), betonu oluşturan fazların özellik, cins ve miktarlarının silindir basınç mukavemetine etkisini incelemiştir. Deneyde su/çimento oranı artışının beton serilerine oldukça etkili olduğunu belirlemiştir. Bu etkinin silindir basınç mukavemetinde 0.20'lik su/çimento oranı artışına karşılık normal betonlarda 0.35, hafif betonlarda ise 0.70'lere varan düşüşler halinde olduğunu böylece su/çimento oranı artışının hafif betonlarda normal betonlara göre yaklaşık iki katı daha fazla etkili olduğunu ifade etmiştir [3].

Yıldırım (1989), pomza taşı ile yarı hafif beton üreterek, az tekrarlı yükler altındaki davranışına çimento hamuru miktarı ile yapısının ve hafif agrega boyutunun etkisini araştırmıştır. Çalışma sonuçlarına dayanarak az tekrarlı yüklemede hasar hızının düşük olabilmesi için toplam agrega konsantrasyonun yüksek, çimento hamuru kompasitesinin düşük ve ortalama hafif agrega boyutunun küçük olması gerektiğini ifade etmiştir [4].

Yıldırım (1995), normal ve hafif agregalı betonlarda agrega hacim konsantrasyonunun betonun kısa süreli elastik ve elastik olmayan mekanik davranışına etkisini araştırmıştır. Üretilen betonlarda en büyük agrega boyutu, granülometri ve su/çimento oranını sabit tutarak agrega hacim konsantrasyonunu değiştirmiştir. Sertleşmiş betonların elastisite modüllerini iki fazlı bir kompozit malzeme modeli

yardımıyla hesaplayarak ve elde edilen sonuçların deneysel değerlere yakın olduğunu bulmuştur. Yıldırım çalışmada; agrega konsantrasyonundaki artışın, normal çakıllı ve pomza taşı agregalı hafif betonlarda, süreksizlik sınırındaki poisson oranını düşürdüğünü, kırmataşlı normal betonlarda ise bu oranın bir minimumdan geçtikten sonra arttığını belirtmiştir [5].

Müler ve Linsel (2000), agrega taneciklerinin üzerini özel bir kaplama yöntemi uygulayarak ince çimento tabakasıyla kaplamış, böylece hafif betonun bazı teknik özelliklerini iyileştirmişlerdir. Üzeri kaplı agregaların su emme özellikleri azalırken, mukavemetlerinin artığı belirlenmiştir. Araştırmanın sonucunda basınç dayanımı 90 MPa'dan yüksek, birim hacim ağırlığı 2000kg/m^3'ten düşük yüksek dayanımlı yeni bir hafif beton üretilebileceğini göstermişlerdir [6].

Uğur (2003), belirli bir gözeneklilik derecesine sahip doğal hafif agrega türlerinin (özellikle volkanik cüruf ve perlitik pomza oluşumlarından) elde edilen hafif beton karışımı içerisinde kırmataş agrega olarak kullanımında etken parametreleri irdelemiştir. Düşük birim hacim ağırlık değerine sahip ve kuru karışım olarak değerlendirilen hafif betonların, normal betonlara nazaran daha yüksek oranda yalıtım özelliğine sahip olduğunu, karışım içerisinde daha yüksek oranda çimento kullanımının gerektiğini, bu nedenle artan çimento kullanımının daha yüksek maliyet oluşturan hafif agregaya ilaveten ek bir maliyet oluşturduğunu belirtmiştir. Tüm bu belirtilen hususların yanı sıra, maliyetlerin oluşturulması aşamasında kullanılan malzemenin ekonomiklik düzeyinin belirlenmesinden daha öncelikli olarak hafif betonun kullanıldığı yapının temel tasarım maliyetinin dikkate alınmasının daha uygun olacağını ifade etmiştir [7].

Tolğay vd. (2004), Nevşehir pomza agregasının beton agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Hazırlanan beton örnekleri üzerinde yapılan birim hacim ağırlık, basınç ve çekme dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre, bölgede çıkarılan asidik pomzanın yüksek dayanım ve düşük yoğunluktan dolayı hafif beton yapımında agrega olarak kullanılabilirliğinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir [8].

Hiçyılmaz ve Altun (2005), araştırmalarında pomzanın alternatif yapı malzemesi olarak sunduğu avantajlar ile olabilecek olumsuzluklara değinmişlerdir. Pomzanın yüksek silis içeriği, gözenekli yapısından ileri gelen düşük yoğunluğu, üstün yalıtkan özelliği, ekonomikliği gibi sebeplerle çimento dolgusu, hafif beton agregası, yalıtkan yapı elemanlarının eldesi veya izolasyon gibi alanlarda yapı için çok önemli

alternatif hammadde olduğunu belirtmişlerdir. Amaca yönelik üretim veya kullanım koşullarının yüksek alkali içeriği veya mukavemete olan etkileri gibi olumsuz faktörler göz önüne alındığında, pomzadan bugünkünden çok daha fazla yararlanılmasının mümkün olabileceğini vurgulamışlardır [9].

Ceylan (2005), farklı pomza türlerinden değişik çimento oranlarında elde edilmiş hafif beton örneklerinin belirli bir sıcaklık etkisindeki karakteristiğini incelemiştir. Nevşehir-Göre, Kayseri-Talas pomzaları ve İzmir- Menderes perlitik pomzasının hafif beton agregası olarak kullanılabilir olduğunu belirlemiştir. Hafif beton numunelerinin 28 günlük doğal ortam kürlemesi sonucunda, yapılan tek eksenli basınç dayanım sonuçlarına göre, en yüksek dayanım değerinin 0/4 mm boyutlu Kayseri-Talas pomzasından %60, 4/8 mm boyutlu, Nevşehir-Göre pomzasından % 40 oranında karıştırılıp hacimce %10 oranında portland çimentosu ile 40.55 kg/cm^2 elde edildiğini tespit etmiştir [10].

Sancak ve Şimşek (2005), Isparta bims agregasının betonarme betonunda kullanılabilirliği üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada hafif betonlarda (HB), silis dumanı (SD) ve süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanımının birim ağırlık ve basınç dayanımlarına normal betonla (NB) karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. 12 farklı beton karışımı hazırlayarak, SD mineralini katkı olarak %0, %5 ve %10 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirerek kullanmışlardır. SA katkıyı ise betona, çimento ağırlığının %2'si oranında katmışlardır. Çalışma sonucunda HB'ların birim ağırlıklarının, NB'lara göre %23 daha düşük olduğunu, HB'ların basınç dayanımlarının, SD veya SA katkıya bağlı olarak, NB'ların %48'i ile %65'i arasında değiştiğini belirtmişlerdir [11].

Ünal vd. (2005), pomza ve diyatomitle üretilen hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmada; karışımları 275 kg/m^3 çimento dozajında ve 0.15 su/çimento oranında olmak üzere 4 farklı seri halinde 100x100x100 mm'lik küp numuneler üretmişlerdir. Üretilen seriler arasında en iyi basınç dayanımı iri pomzanın %30 oranında kullanıldığı karışımlardan elde edildiğini, 7–56 günlük numunelerin dayanımlarının 3.5–8 MPa arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Pomzanın kullanılmasıyla numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin diyatomitle üretilmiş serilere göre arttığını, ancak pomza oranının artması birim hacim ağırlık üzerinde önemli etki yapmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca pomzanın kullanıldığı numunelerde

kontrol serilerine göre su emme değerlerinde % 40–15 oranında bir azalma elde edildiği, sonuç olarak iri pomza agregasının diyatomitin yerine kullanılarak üretilen hafif betonların diyatomitle üretilen hafif betonlara göre daha yüksek basınç dayanımına ve daha düşük su emme değerlerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir [12].

Topçu vd. (2005), Kayseri yöresinden sağlanan bims kumu ve agregası üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. 450 kg/m^3 dozajlı hafif betonun birim hacim ağırlığını 14.97 kN/m^3 ve ortalama dayanımını 22.1 MPa; 400 kg/m^3 dozajlı hafif betonun birim hacim ağırlığını 15.05 kN/m^3 ve ortalama dayanımını 21.5 MPa; 350 kg/m^3 dozajlı hafif betonun birim hacim ağırlığını 14.45 kN/m^3 ve ortalama dayanımını 14.5 MPa olduğunu belirlemişlerdir. Yöresel bir hafif agrega ile üretilen hafif betondan dayanım olarak C20 sınıfına giren taşıyıcı hafif beton üretmişlerdir. Taşıyıcı hafif betonda elastikiyet modülünü ortalama 10000 Mpa değerinde bulmuşlardır. Normal ağırlıklı (C20) beton sınıfında bu değerin 28000 MPa civarında olduğu belirtilerek birim boy değişiminin daha fazla olacağı sonucuna varmışlardır. Ayrıca hafif beton E-modülünün düşük değerlerde bulunmasından dolayı boy değişimlerinin fazla olacağı için az katlı yapılarda kullanılmasını önermişlerdir [13].

Ceylan ve Saraç (2005), araştırmalarında; Kayseri-Talas pomzasını 0/4 mm, 4/8 mm ve 8/16 mm aralığında gruplandırmış, sekiz ayrı karışım grubu belirleyerek her karışım grubunu %6, %8 ve %10 olmak üzere üç ayrı çimento oranında dökmüşlerdir. En yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri 977 kg/m^3 olup, %70 0/4 mm, %30 4/8 mm boyutlu, hacimce %10 çimento oranlı karışımdan elde etmişlerdir. En düşük su emme oranını, %30 olarak belirlemişlerdir. Tek eksenli basınç dayanım değerleri incelediklerinde en yüksek dayanım değerinin 38 kg/cm^2 olup, %70 0/4 mm, % 30 4/8 mm boyutlu, hacimce %10 çimento oranlı ve %60 0/4 mm, %40 4/8 mm boyutlu, hacimce %8 çimento oranlı karışımlardan elde edildiğini belirtmişlerdir [14].

Gündüz vd. (2006), yaptıkları çalışmada; bims beton örneklerinin birim ağırlık değerlerinin, kür süresine bağlı olarak düştüğünü, taze bims beton harcının, doğal ortam kürleme sürecinde giderek bünyesinden karısım suyunu atması (nem atımı) sebebiyle, kuru bir duruma geldiğini ifade etmişlerdir. Kontrol bims beton örneklerinde süreye bağlı bu nem atımının, 7, 14 ve 28. günlerde sırasıyla %4.71, %7.51 ve %12.74 olarak gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Ayrıca bims beton örneklerinin basınç dayanım

değerlerinin, birim ağırlığın tersine kür süresine bağımlı olarak arttığını belirtmişlerdir [15].

Başpınar ve Gündüz (2006), Hasandağ ve Göllü volkanizmasına ait Nevşehir Yöresinde gelişen pomza oluşumlarının minerolojik ve petrografik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaya göre, pomza kayacı cam matriksten oluşmuştur ve kayaç içersinde hemen hemen hiç kristal gözlenmemektedir. Nadiren gözlenen mineraller ise fenokristaller seklinde ve kayaç içersinde gözlenen bu fenokristallerin piroksen mineralleri ile plajioklas olduğunu belirtmişlerdir. Kayacın oldukça poroz yapıya sahip olduğunu, gözeneklerin boyutlarının genellikle küçük-orta boyutta olup yer yer iri büyüklükte gözenekler bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Kayaç içersindeki bu boşlukların belirli bir sekle sahip olmayıp, gözenek yapılarının birbirleriyle geçişsiz ve kapalı gözenekler seklinde olduğu ayrıca kayaç içersinde gazların soğuma hızına bağlı olarak yer yer lifsel akma yapısı gözlendiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca Nevşehir yöresine ait pomza serilerinin riyolitik kökenli olup kalkalkalen nitelik taşıdığı belirtmişlerdir [16].

Türkel ve Kadiroğlu (2007), Kayseri bölgesine ait pomza agregası kullanarak taşıyıcı amaçlı hafif betonlar üretmişlerdir. Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı ve mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanmışlardır. Çalışma sonucunda üretilen numunelerin TS-EN 206-1 standardında hafif betonlar için belirtilen LC 20/22 ve LC 25/28 dayanım sınıfını sağladığını belirlemişlerdir [17].

Coşkun ve Tanyıldızı (2007), araştırmalarında pomza taşı ve silis dumanı kullanarak elde ettikleri taşıyıcı hafif betonda; basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliği arasındaki ilişkiye kür şartlarının etkisini incelemişlerdir. Mineral katkı olarak çimento ağırlığının %10'u oranında silis dumanı katıldığı, numunelerin hazırlanmasında maksimum tane çapı (dmax) 16mm olan pomza taşı kullanıldığı belirtmişlerdir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, en yüksek ultrasonik ses geçirgenliği (28 gün 4.21 km/sn) ve basınç dayanımı değerleri (28 gün 30.94 MPa) ile suda kür edilen numunelerden elde edildiğini bildirmişlerdir [18].

Ulusu (2007), farklı hafif agrega, granülometri ve dozaj kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği araştırmıştır. Ürettiği betonların küp basınç dayanımlarının 60-110 MPa ve çekme dayanımlarının 4-11 MPa arasında değiştiğini belirtmiştir. Aynı zamanda yüksek dayanımlı hafif betonlarda kırılmanın iri agregaların

kesilmesiyle oluştuğu ve bu nedenden dolayı kırılmanın normal betonlara göre daha gevrek olduğunu ifade etmiştir [19].

Subaşı (2009), genleştirilmiş kil agregası ile farklı çimento dozajlarında taşıyıcı hafif beton üretim olanakları ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, genleştirilmiş kil agregası ile 1.7 kg/m^3 gibi düşük bir yoğunluğa sahip basınç dayanımı 41.27 MPa olan taşıyıcı hafif beton elde etmenin mümkün olduğunu belirtmiştir [20].

Gökçe ve Can (2009), pomza agregasının farklı zamanlardaki su emme miktarlarının, ilave su olarak kullanıldığı karışımlarda taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada; 10 dakikalık su emme oranı kadar su eklenen karışımların basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, beton test çekici ve yarmada çekme dayanımı değerlerinin referans numuneye göre yüksek çıktığını ayrıca bu numunelerin basınç dayanımı, yüzey sertliği değerlerinin yüksek olmasıyla ilişkili olarak aşınma kaybının en az çıktığını gözlemlemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına istinaden, yüksek su emme oranına sahip agregalarla yapılacak olan beton karışımlarında, ilave su oranları belirlenirken, beton kalıba yerleştirilinceye kadar geçen süredeki agreganın emeceği su miktarının karışım hesabında göze önüne alınması uygun olacağını vurgulamışlardır [21].

Gönen ve Yazıcıoğlu (2010), bazaltik pomza agregası ile kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmişlerdir. Araştırmalarında, numunelerin bulundukları kür ortamının basınç dayanımını etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrına pomzanın yüksek nem tutabilme kabiliyetinin kuru ortamda bekleme durumunda hidratasyonunun devamını sağladığı, özellikle sıcak havalarda beton dökümünde veya kütle beton imalinde pomza agregasının tamamen ya da kısmen kullanılması durumunda iç kürleme yaparak betonun dayanımına katkı sağlayabileceğini sonucuna varmışlardır [22].

Binici vd. (2011), pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların dayanımı ve sülfat direnci konulu çalışmalarında, katkı miktarı ve çeşidinin harçlara mekanik, fiziksel ve kimyasal etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın bir bölümünde harç karışımına çimento ve Rilem-Cembureau standart kumu yerine ağırlıkça %0.25, %0.5, %0.75 oranlarında kolemanit ikame edilmiştir. Katkı oranı arttıkça 28 ve 180 günlük basınç dayanım değerlerinin diğer katkılara göre arttığı ve sülfatlı ortamdan kaynaklanan kütle kaybının azaldığını tespit etmişlerdir [23].

Gesoğlu vd. (2011), çalışmalarında soğuk peletleme yöntemi (suni agrega üretim metodu) ile üretilen uçucu küllü hafif agregalı taşıyıcı betonlarda, beton ile donatı çeliği arasındaki aderans davranışını incelemişlerdir. Deney sonucunda beton içerisindeki hafif agrega oranının artmasıyla basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada-çekme dayanımında azalma meydana geldiğini ve basınç dayanımının artması ile aderans dayanımının arttığını belirtmişlerdir [24].

Bideci (2011), polimer kaplı pomzalarla ürettiği hafif betonlarda su emme oranlarının kaplanmayan pomzalarla üretilen hafif betonlara göre oldukça azaldığını, bu durumun pomzaları kaplayan polimerin agregalara su geçişini engellemesinin sonucu olduğunu belirtmiştir [25].

2.2. Bor İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Volkman ve Bussolini (1992), ince parçacık borlu ürünlerin beton üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Betondaki ince parçacık borlu katkıların, betonun sertleşme ve basınç dayanımı özelliklerini yavaşlattığının bilindiğini, genellikle no:30 eleğin üzerindeki borlu katkıların beton karışımı kalite malzemesi olarak ele alındığını ifade etmişlerdir. Bunu daha ince parçacıkların çözünür olup betonun sertleşme özellikleriyle çakışmasıyla açıklamışlardır. Ancak daha ince parçacıkların borun beton matrisinin içine daha iyi yayılmasını sağlayarak daha iyi bir nötron soğurma karışımı yaptığını belirtmişlerdir. Çalışmada bir beton karışımına katılabilen ince parçacık kolemanit ve bor camı hamurunun miktarını tespit etmişlerdir. Çalışmaya göre;

1. %41.0 B_2O_3 ile ince parçacık kolemanit (80% No.200 elekten geçen), 428.4 N/m^3 (73.6 lb/yd^3) dozajında 28 günlük kürde %99 basınç dayanımına erişecektir.
2. %51.0 B_2O_3 ile kum boyutundaki bor cam hamuru (100% No.30 elekten geçen ama sadece %6'sı No.200'den geçen), 428.4 N/m^3 (73.6 lb/yd^3) dozajında 28 günlük kürde %83 basınç dayanımına erişecektir.
3. %60.0 B_2O_3 ile ince parçacık bor cam hamuru (100% No.200 elekten geçen), 213,6 N/m^3 (36.7 kg/yd^3) dozajında 28 günlük kürde %80 basınç dayanımına erişecektir [26].

Yalçın (1996), kolemanit katkısının betonun fiziksel özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Deneylerin sonucunda, %5'ten fazla kolemanit içeren çimentoların priz süresi ve dayanım bakımından standart dışında kaldığını, %2 kolemanit katkılı çimentoların priz süresini geciktirdiği ve basınç dayanımında %28'e varan değerlerde azalmaya neden olduğu bununla beraber inhibitör olarak optimum kolemanit katkısının çimento ağırlığının %1 civarında olduğunu belirtmiştir [27].

Kula (2000), kolemanit konsantratör atığı, tinkal konsantratör atığı, uçucu kül ve taban külünü önce belirli oranlarda çimento klinkerine katmış, daha sonra değişik oranlarda kolemanit konsantratör atığı-uçucu kül, kolemanit konsantratör atığı-taban külü, tinkal konsantratör atığı-uçucu kül, tinkal konsantratör atığı taban külü varyasyonlarını katkı maddesi olarak denemiştir. Çalışmada, kolemanit konsantratör atığının katkı yüzdesi arttıkça (%1, %3, %5, %7, %9) dayanımların düştüğü ve tinkal konsantratör atığını çimentoda %1, %3, %5'e kadar kullanılabileceğini belirtmiştir [28].

Demir ve Orhan (2002), bor atıklarının yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi konulu çalışmalarında, bor atığı malzemesinin (tinkal konsantratör atığı) pomza kumu ile karışımı yapılarak hafif yapı bloğu üretilmesini araştırmışlardır. Pomzanın bor atığı ile ağırlıkça %50 oranında karışım yapılarak 900ºC sıcaklıkta pişirilmesi ile porozitesi yüksek, birim hacim ağırlığı düşük (hafif) bir malzeme üretilebileceğini belirlemişlerdir [29].

Targan vd. (2002), çimento üretiminde enerji tasarrufu sağlanması ve atık maddelerin çevreye verebilecekleri olumsuz etkilerin giderilmesi amacıyla, Kula cürufu-kolemanit konsantratör atığı ve betonit-kolemanit konsantratör atığı varyasyonlarını katkı maddesi olarak denemişlerdir. Çalışmada, çimento karışımlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin Türk Standartlarıyla uyum içinde olduğunu, kullanılan katkıların çimento üretiminde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [30].

Topçu vd. (2006), tinkal üretimi sırasında ortaya çıkan bor atıklarının (B_2O_3 oranı %9.63) çimento yerine kullanılması (çimento yerine ağırlıkça %0, %3, %7, %10 oranlarında) ile üretilen harçların yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılıklarını incelemişlerdir. Çalışmada atıklar çimento boyutunda öğütülerek CEM I 42.5 R çimentosuna katılmış ve 40×40×160mm boyutlarında standart harç numuneleri üretmişlerdir. Hazırlanan harç serisi 3 saat süre ile 20˚C, 150˚C, 300˚C, 400˚C, 600˚C ve 900˚C sıcaklıklarda tutulmuş sonrasında havada soğumaya bırakılmıştır.

Numunelerde sıcaklığın artmasına paralel olarak basınç dayanımlarında azalmalar gözlenmiştir. 150˚C'de %0 ve %3 bor atığı katkılı harçların basınç dayanımları artarken (44MPa, 42MPa) %7 ve %10 (20MPa, 17Mpa) bor atığı katkılı harçlarınki azalmıştır. 900˚C'de CSH yapısının tamamen dağılmasından dolayı çok küçük basınç dayanımları elde etmişlerdir. Sonuç olarak, yüksek sıcaklığın zararlı etkilerine karşı %3 ve daha düşük oranlarda bor atığı kullanımını önermişlerdir [31].

Sağlık vd. (2009), borlu aktif belit (BAB) çimentosu ve DSİ projelerinde uygulanabilirliğini konulu çalışmalarında, BAB ve normal Portland çimentoları ile yapılan farklı dozajlardaki beton numuneler üzerinde su geçirgenliği ve klorür penetrasyonu araştırmışlardır. BAB çimentosu ile üretilen betonların geçirgenliklerinin normal Portland çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerine göre çok daha düşük seviyede ve klorür penetrasyonlarının da normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir [32].

Zeybek vd. (2006), kolemanit konsantratör atığını değişik oranlarda (%3,%5, %7) portland çimentosuna ilave etmişlerdir. Numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının kontrol numunesi değerlerine göre biraz düşük, 7 ve 28 günlük dayanımlarının ise hemen hemen aynı olduğunu ve değerlerin Türk Standartları ile uyum gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yine aynı çalışmada 40×40×160mm ebatlarındaki numunelerin nötron tutma kapasitelerini incelediklerinde, normal portland çimentosuyla hazırlanan bir numune, nötronları 4cm kalınlıkta yaklaşık %58'ini tutabilirken %7 bor atığı katkılı çimento ile hazırlanan numunelerin nötron tutma kapasitesinin %76.2 olduğunu belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda bu çimentoları, nötronların sebep olduğu radyasyon tehlikesi göz önüne alınarak endüstride ve deneysel araştırmalarda kullanılabilir bir zırh malzemesi olduğu sonucuna varmışlardır [33].

Sağlık vd. (2008), laboratuarda yapılan ön deneylerde BAB (Borlu Aktif Belit) çimentosu ile birlikte bir priz hızlandırıcı ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılarak 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı yönünden incelemesini yapmışlardır. Priz hızlandırıcı ile 1, 3 ve 7 günde sırasıyla 5.0 MPa, 18.0 MPa, ve 29.0 MPa basınç dayanımları elde edilirken süper akışkanlaştırıcı ile sırasıyla 8.8 MPa, 31.2 MPa ve 54.2 MPa basınç dayanımları elde etmişlerdir. Daha yüksek erken dayanım değerlerinin gerekli olduğu durumlarda çimentonun incelik değerinin bir miktar daha (4000 veya 4300 cm^2/g mertebesinde) artırılması ile kullanılabilmesinin mümkün gözüktüğünü

belirtmişlerdir. BAB çimentosu ile üretilen betonda elde edilen deney sonuçları da çimentoda elde edilenler ile paralellik göstermiştir. Özellikle, durabilite yönünden yapılan su geçirgenliği, klorür penetrasyonu ve ultrasonik dinamik elastisite modülü gibi deney sonuçları bu çimento ile yapılan betonun normal portland çimentosu ile yapılana göre daha dayanıklı olduğunu ifade etmişlerdir [34].

Aydın (2009), kolemanit atığının endüstriye kazandırılması amacıyla öğütülmüş kolemanit atığı (B_2O_3 oranı %24.25) katkılı beton numuneleri üretmiştir. Çalışmada kolemanit atığının karışım oranları betonlarda %0, %3, %5, 10, %15 çimentonun yerini alması şeklindedir. Deney sonucunda 400 dozlu, 0.50 S/Ç oranına sahip numunelerin 180 günlük basınç dayanımlarının, şahit numuneden daha yüksek çıktığını belirtmiştir. Ayrıca 0.50 S/Ç oranına sahip numunelerin, 0.60 S/Ç oranına sahip numunelere göre çok daha yüksek basınç dayanımı geliştirdiklerini bildirmiştir [35]

Çimento ve Beton Dünyası (2012), Ordu-Ulubey karayolunun 6. kilometresine döşenen 1 km'lik bor karışımlı beton yolun, 5 yıl boyunca yağmurlu, sert geçen Karadeniz ikliminde ve üzerinden geçen ağır vasıtalara rağmen aşınma göstermediği, aynı güzergahta 5 yıl içerisinde iki kez asfalt çalışması yapıldığı belirtilmiştir [36].

Çalık vd. (2009), nükleer enerji santralleri gibi nötronun fazla olduğu durumlarda foton gibi radyasyonlardan daha tehlikeli olan nötron kaynaklı radyasyonun zırhlanmasının önemli ve zor olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında demir esaslı malzemelerin borla kaplanarak radyasyona karşı zırh olarak kullanılabilirliğini araştırmışlar ve çelik numuneleri borlayarak malzemenin radyasyon soğurma özelliklerinin artmakta olduğunu bulmuşlardır [37].

Özder vd. (2006), kolemaniti belirli oranlarda sır reçetesinde kullanarak, sırda ergitici olarak kullanmışlardır. Düşük sıcaklıklarda ergimeyi kolaylaştıran kolemanitin ham sır yapımına olanak sağladığını belirtmişlerdir [38].

Aygün vd. (2008), Tinkal ore malzemesinin çözünmemiş kısmı olan trommel sieve waste (TSW)'nin değerlendirilmesini amaçlamış, seramik yapıştırıcı ve derz dolgu gibi farklı yapı malzemelerinde kullanmışlardır. Elde edilen malzemelerin radyasyon soğurma etkilerini incelemişledir. Çalışmada 45µm elekten geçirilen TSW (B_2O_3 oranı %5.20) %25, %50, %75, %100 oranlarındaki numunelerle katkılandırarak pelletler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda TSW'nin numunelerin radyoaktif geçirgenliğini

azatlığını, radyasyondan korunma amacıyla farklı yapı malzemelerinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [39].

Pekkan vd. (2008), hızlı pişirim duvar karosu cam-seramik sistemlerinde zirkonun azaltılmasını amaçlayan reçete düzenlemeleri çalışmalarında, bor oksidin etkilerini incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda olgunlaşan cam-seramik sistemlerine belli bir dereceye kadar bor oksit ilavesi, duvar karosu pişirim sıcaklığında sırların kolay olgunlaşmasına ve opak sırlarda parlaklığın artmasına yardımcı olduğunu belirlemişlerdir. Geliştirilen sır sistemlerinde istenilen özelliklerin eldesi açısından miktarını optimum seviyede (B_2O_3 miktarı ağırlıkça %10-12) tutulması gerektiğini belirtmişlerdir [40].

2.3. Durabilite (Dayanıklılık) İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Postacıoğlu (1987), aşınma etkileri altında kalacak olan bir betonda çimento dozajının 400kg dolaylarında olması ve bu değerin hiçbir zaman 350 kg'ın altına düşmemesi gerektiğini belirtmiştir. Nedenini çimento miktarının bütün agrega tanelerini kaplayarak iri taneler ile harç fazı arasında kuvvetli bir aderans meydana getirmesi gerektiğiyle açıklamıştır [41].

Chia ve Zhang (2002), silis dumanı katkılı ve katkısız yüksek dayanımlı hafif beton üreterek, su geçirimliliği değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda silis dumanı katkısı olmayan betonlarda su geçirimliliği 54.63 mm iken, silis dumanı katkılılarda 11.80 mm'ye düştüğünü ifade etmişlerdir [42].

Erdoğdu ve Karataş (2003), yaptıkları çalışmada sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin ağırlıklarında meydana gelen değişimin ihmal edilebilir düzeyde iken; magnezyum sülfat çözeltisindekilerin ağırlık artışı sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılanlara göre iki kat olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca deniz suyunun sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinin ağırlık artışı açısından yarattığı etkilerin toplamı kadar bir etki oluşturduğunu belirtmişlerdir [43].

Binici ve Görür (2005), deniz suyu etkisinin yarattığı aşınmaya dayanıklı beton üretimi konulu çalışmalarında, bazik karakterli pomza ve yüksek fırın cürufu ile ince agregayı %40, %60, %80 oranlarında yer değiştirerek beton üretmişlerdir. Üretilen beton numunelerin aşınma, permeabilite ve deniz suyuna karşı dayanımlarını incelemişlerdir. Deney sonucunda, pomza ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların

durabilitesinin kontrol numunesinden yüksek olduğu, kontrol örneği permeabilite değerinin bütün numunelerden büyük çıktığını belirlemişlerdir. Bileşiminde %40 pomza + %40 yüksek fırın cürufu katkılı beton numunenin permeabilite değeri yüksek bulunurken basınç dayanımının en az bulunduğu, genellikle katkı oranı arttıkça permeabilite değerlerinin azaldığını ifade etmişlerdir. Eşit katkılı numunelerin permeabilite değerleri diğerlerinden az olduğu, bu sonuçlar ışığında, pomza ve yüksek fırın cürufunun eşit oranda katılarak az geçirimli beton üretilebileceği sonucuna varmışlardır [44].

Özkul vd. (2006), çalışmalarında donatı korozyonunun oluşumunda temel belirleyici unsur olan geçirimsizliği, iki farklı puzolan (uçucu kül ve silis dumanı) içeren betonlarda bileşime bağlı olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda havada saklanan betonların hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları üzerinde en etkili bileşenin su/bağlayıcı oranı, suda kür edilen aynı betonlarda ise uçucukül/bağlayıcı oranı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu puzolanik etkinin ortaya çıkabilmesi için yeterli kür koşullarının gerekliliği ile açıklamışlardır [45].

Şahmaran vd. (2005), S/Ç oranı ile bağlantılı olarak geçirimliliğin ve farklı oranlarda kullanılan değişik mineral katkıların, çimento harçlarının sülfat hücumuna karşı direncine olan etkileri konulu araştırmalarında, çimentonun kimyasal kompozisyonunun; sülfat hücumunun betona vereceği hasarları azaltmada, S/Ç oranından daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [46].

Erdoğdu vd. (2007), betonda gözenekliğin artmasının kesin olarak geçirgenliğin de artması anlamına gelmediğini, esas olarak doğal puzolan kullanımıyla gözenekliliğin bir miktar arttığını, fakat bu gözeneklerin puzolanik tepkimeler neticesinde zamanla birbirinden kopması nedeniyle geçirgenliğin azalabileceği şeklinde ifade etmişlerdir. Bu olumlu etkinin elde edilebilmesinin uygun kalitede puzolanın uygun miktarlarda kullanımıyla mümkün olduğunu belirtmişlerdir [47].

Oymael vd. (2007), bileşiminde puzolan bulunan çimento harç numunelerini %0, %5, %10'luk $NaSO_4$ ile $MgSO_4$ çözeltilerinde 14 ve 28 gün sürelerle saklamışlardır. Sonrasında elde edilen fiziksel, kimyasal değişimleri suda saklananlarla karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda katkılı çimento ile üretilen numunelerin, $NaSO_4$ ve $MgSO_4$ çözeltilerinde 28 gün saklanmaları sonucu, su ortamında saklananlardan daha az etrengitte meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Ayrıca $MgSO_4$ çözeltisinin $NaSO_4$ çözeltisinden daha zararlı olduğunu, kullanılan çimentonun hidratasyon ürünlerindeki miktar ve özelliklerindeki farklılığın sülfatlı ortamlardaki etkinin yön ve şiddetini ortaya koyduğunu vurgulamışlardır [48].

Güneyisi vd. (2007), çalışmada sülfat etkisinin irdelenmesi amacıyla her bir numune grubunu başlangıç kürüne tabi tuttuktan sonra üç eşit gruba bölmüştür. Birinci grubu (deney zamanına kadar) su içine (Kontrol), ikinci grubu ağırlıkça %10 $NaSO_4$ çözeltisine, üçüncü gruptakileri yine aynı çözeltide ancak 10 günlük aralıklarla ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakmışladır. Islanma-kuruma çevirimine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma sürekli sülfat etkisindeki numunelerinkinden genellikle daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumu Mehta ve Monterio (1993) [49] çalışmasından da yaralanarak ıslanma-kuruma çevrimi sürecindeki tekrarlı kristalleşmelerin boşluklardaki çeper basıncını sürekli artırması sonucunda betonun içyapısının daha çok zarar görmesiyle açıklamışlardır. Böylece sülfatın kimyasal etkisinin yanı sıra fiziksel etkisinin de beton dayanıklılığı üzerinde önemli rol oynadığını belirtmişledir [50].

Durmuş (2008), farklı beton sınıflarında su işleme derinliğini araştırmıştır. Çalışmada 90 günlük örneklerde su işleme derinliğinin, agrega-hamur ara yüzeylerinin etkinsinin artması sonucu azaldığını belirtmiştir [51].

Mirza (2009), yaptığı çalışmada çimentonun ağırlıkça %10'u oranında silis dumanı ilavesi ve ince hafif agrega yerine % 0, %25, %50 ve %75 oranlarında kum ile hafif agregalı beton üretmiştir. Hafif betonların klor geçirimliliğinin kum kullanımının artmasıyla azaldığını ve bütün beton tiplerinde 28 günlük betonların klor geçirimliliklerinin 360 günlük betonlara göre azda olsa azaldığını gözlemlemiştir [52].

Kılınçarslan vd. (2010), yaptıkları deneysel çalışmalarında $MgSO_4$ etkisinin $NaSO_4$' a göre daha fazla basınç dayanımını etkilediğini ve betonu tahrip ettiğini gözlemlemişlerdir. Betonların sülfata karşı direncini kıran ana etkenin de kullanılan çimento tipi olduğu vurgulanmıştır [53].

Uluöz vd. (2011), betonda tek başına mineral katkılı çimentoların kullanımı veya belirli oranlarda mineral katkıların portland çimentosu ile birlikte kullanılmasıyla betonda ileri yaşlarda dayanımı (90 günde %25-30 artış) ve daha az geçirimli betonlar elde edilerek betonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını arttırdığını bildirmişlerdir [54].

Assas (2012), yaptığı çalışmada ince hafif agrega yerine % 0, %25, %50 ve %75 oranlarında kum ve çimentonun ağırlıkça %10'u oranında silis dumanı ilave ederek hafif agregalı beton üretmiştir. Çalışma sonucunda, karışımların kum içeriğinin artmasıyla yoğunluklarının %30, beton basınç dayanımlarının %27 oranında arttığını ifade etmiştir. Ayrıca silis dumanı içeren bütün hafif agregalı betonlarda düşük klor geçirimliliği (< 2000 C) olduğunu gözlemlemiştir [55].

2.4. Pomza Agregaları

2.4.1. Fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bims taşı, teknik termolojide "doğal hafif agrega" olarak nitelendirilmekte olup, "pomza taşı" olarak da adlandırılmaktadır. Bims taşının kırma, eleme ve boyutlandırma ile elde edilmiş farklı tane boyutlarındaki malzeme haline "bims agregası" (pomza agregası) adı verilmektedir [56]. TS 10088 EN 932-3 standardı pomzayı genellikle riyolitik bileşenli, aşırı derecede boşluklu, camsı lav ve genellikle su yüzeyinde yüzecek kadar hafif olarak tanımlamaktadır [57].

Pomza (ponza) terimi İtalyanca bir sözcüktür. Farklı dillerde değişik adlandırmaları vardır. Örneğin Fransızca'da ponce, İngilizce'de (iri tanelisine) pumice, (ince tanelisine) pumicite, Almanca'da (iri tanelisine) bims, (ince tanelisine) bimstein denilmektedir. Dilimizde ise süngertaşı, köpüktaşı, nasırtaşı, hışırtaşı, küvek, kisir gibi pek çok adla anılmaktadır [58].

Pomza, volkanik faaliyetler esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi aniden terk etmesi sonucu, oldukça gözenekli bir yapı içeren volkanik kökenli bir kayaçtır [59]. Diğer kayaçlara göre pomzalar gözenekli yapılarından dolayı düşük yoğunluk ve yüksek poroziteye sahiptirler [60]. Gözenekleri birbirleriyle bağlantısız olup, bu özelliğinden dolayı ısı ve ses iletkenliği oldukça düşüktür. İçerdiği gözenekler gözle görülebilecek boyutlardan, mikroskobik boyutlara kadar sayısız olup, her biri diğerinden camsı bir zarla yalıtılmıştır [59]. Ortalama ergime noktası 1343˚C'dir. 760˚C'nin altında herhangi bir hacim değişikliğine uğramaz. Bu sıcaklıkta dış yüzeydeki lifler buruşur, çekilir [61].

Pomza taşının yapısında bulunan SiO_2, agrega kompozisyonunun asidik ve/veya bazik karakteristik gösterdiğini sembolize etmektedir. Kayacın içerdiği SiO_2 oranı kayaca asidik özellik kazandırdığı gibi abrasif özellikte kazandırmaktadır. Aynı

zamanda, kayaç bünyesindeki SiO_2 oranı arttıkça, kayacın asidiklik özelliği artmakta ve kayacın agrega dayanımı daha yüksek olmaktadır. Kayacın kimyasal bileşiminde bulunan Al_2O_3 oranının yüksek olması ise ateşe ve yüksek ısıya dayanım özelliği kazandırır. İnşaat sektörü açısından pomza taşının asidik karakterde olması Fe_2O_3 oranının düşük, Al_2O_3 oranının ise yüksek olması istenilmektedir [16].

Pomza genellikle doğal düşük yoğunluklu agregalar içerisinde en çok kullanılanıdır. Yoğunlukları 480-880 kg/m^3 arasındadır [62]. Pomza agregalarda, özgül kütle kuru kütlenin hacmine oranı (gözenek hacmi hariç) olarak değerlendirilen bir fiziksel özellik olup, pomza taşı oluşumlarında özgül ağırlık genellikle 2.1 gr/cm^3'ün üzerindedir. Agrega hacim kütlesi, pomza agregada kuru kütlenin tüm hacmine oranı olarak nitelendirilen bir büyüklük olup, yatağa ve tane iriliğine göre değişim gösterir. Pomza agregasının tane iriliği arttıkça, hacim kütle değeri düşmektedir. Diğer taraftan, tane boyutu arttıkça agregadaki gözenek oranı da artmaktadır. Pomza oluşumlarında genellikle görülen bir olgu, pomza taşının gözenek yüzdesi volkan bacasından uzaklaştıkça artar. Gözenek oranının artması ve buna bağlı olarak düşük birim hacim kütle değerine sahip olması, pomza taşının yalıtım amaçlı dökme malzemesi olarak kullanılmasını da sağlamıştır. Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de ve kimyasal özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir [56].

Tablo 2.1. Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Renk	Açık griden, kirli beyaza
Kristal Şekli	Amorf
Kristal Suyu	Yok
Sertlik (MOHS)	5.5-6.0
Kuru Birim Hacim Ağırlığı g/cm^3	0.32-0.97
Gerçek Özgül Ağırlığı g/cm^3	2.15-2.65
Porozite (%)	45-90
Rötre (mm/m)	<1
Isı iletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.08-0.20
Isınma Isısı (cal/gr.˚C)	0.24-0.28
Ses Yalıtımı (dB)	40-55
Su Emme (ağırlıkça)%	30-70
Buhar Difüzyon Katsayısı	5-10

Tablo 2.2. Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
pH	7-7.3
Radyoaktivite	Yok
Suda Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça) %	≤ 0.15
Asitte Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça) %	≤ 2.9
Uçucu Madde (Ağırlıkça) %	Yok
Asitlerle Etkileşim*	İnert
Alevlenme Derecesi (˚C)	Yok
Ergime Derecesi (˚C)	>900
* Pomza sadece hidroflorik asit ile etkileşerek toksik silikon tetraflorit gazı çıkarır.	
Kimyasal Bileşenler	
SiO_2	52.0-75.0
Al_2O_3	11.0-17.0
Fe_2O_3	0.5-5.0
CaO	1.0-8.0
MgO	0.5-3.0
K_2O	3.0-9.0
Na_2O	
SO_3	<1.0
Kızdırma Kaybı	1.0-3.0

2.4.2. Pomzanın oluşumu

Volkanik oluşumlarda asidik magma bazik magmaya nazaran daha viskoz olup yüksek miktarda silis içerir. Bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda asidik magma katkı halde bulunur. Bu nedenle volkanik aktivitenin durduğu zamanlarda magma akışı da durarak asidik kayaç ve kütleler oluşur. Bu olay bir volkanın genel aktivite karakteristiğini sergiler. Basıncın artmasıyla asidik malzeme ile birlikte magmadaki erimiş gazlar büyük patlamalar şeklinde bacadan püskürmeye başlar. Ani basınç serbestleşmesi ani genleşmeleri oluşturur. Bu esnada bünyedeki uçucu bileşenlerin ani olarak kaçmasına neden olur. Uçucuları takiben, arkada kalan erimiş küresel parçalar, atmosferle temas eder etmez hızla soğurlar. Böylelikle pomza oluşur ve volkan aktivitesi sonrasında genellikle volkan krateri zamanla bir krater gölü şekline dönüşebilmektedir.

Burada pomza oluşumunu kontrol eden faktörler;

- Püskürme süresi,
- Ara süreler,
- Magmanın ısısı,

- Magmadaki erimiş gaz miktarı,

- Püsküren malzemenin soğuma zamanıdır.

Bu oluşan pomza parçaları volkan bacalarının yakınından itibaren uzaklara doğru hava akımının da etkisiyle, eski yüzey şekline uygun olarak depolanır. Bu durumdaki pomza yatakları oluşmuş olup, zamanla akarsular tarafından taşınarak uygun havzalarda depolanabilir. Bu şekilde oluşan yataklar içinde % 1-3 oranında andezit, traki-andezit, bazalt, obsidyen gibi volkanik kayaç parçaları bulunur. İkincil durumda oluşan pomza yataklarında ise yabancı maddeler daha fazla olabilmektedir. Pomza da taşınma mekaniği, basitleştirilmiş olarak üç ana grupta ele alınabilmektedir.

1. Düşme (Buluttan çökelme) ile yığılma

2. Fırlatma ile yığılma

3. Akma ile yığılma

Düşme ile yığılmada sınıflandırma iyi bir değişim sergilemekte, tane büyüklükleri de dar aralıklarda kalmaktadır. Pomza oluşum tabaka kalınlıkları çok ince olup, cm mertebeleri ile simgelenebilmektedir. Ayrıca, tabaka kalınlıkları tepelerde ve düzlüklerde aynı kalınlığı göstermektedir. Fırlatma ile yığılma şeklinde oluşmuş pomza oluşumlarında ise, bazen düzgün ve yer yer birbiri içine itilmiş tabakalar ve arada bazaltik kayaç sokulumları ve patlama çarpmanın etkisi ile yapıda parçalanma ve sıkışma görülür. Akma ile yığılma şeklinde oluşmuş pomza yataklarında ise, genel olarak masif strüktür, tabakalarda yoğun kötü bir ayrışma ve boyut sınıflandırması yok denilecek kadar az bir olgu izlenebilmektedir. Bu oluşumun en açık göstergesi ise gang mineralleri alt katmanda kalırken, pomzanın ise serbest halde üst katmanda yer almasıdır [63].

2.4.3. Pomzanın kullanım alanları

Pomza, ülkemizde ve dünyada geniş anlamda inşaat sanayinde değerlendirilirken aynı zamanda, tarım sektöründe ve çeşitli sanayi sektörlerinde aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Oldukça hafif aşındırıcı olarak sınıflandırılan pomza gerek doğal, gerek doğal olmayan madeni eşyaları ve yumuşak metalleri (gümüş gibi) cilalamakta kullanılır. Abrazif sanayi dışında pomza; boya, kimya, metal, plastik, cam, mobilya ve elektronik sanayilerinde, seramikte ve tarım sektöründe kullanılmaktadır [64].

2.4.4. Dünya'da ve Türkiye'de pomza rezervleri

Son yıllarda yapılan çalışmalara göre dünyada en az 250 milyon ton ve en fazla 1 milyar ton pomza rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye ve İtalya pomza üretiminde önde gelen ülkelerdendir. Bunları İran, Yunanistan, Suriye ve Şili takip etmektedir. Pomzanın bütün kıtalarda geniş kaynakları vardır. Dünyada 2010 ve 2011 yıllarına ait pomza üretimi Tablo 2.3'te verilmiştir [65].

Ülkemiz, pomza rezervleri açısından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Araştırılmış alanlarda yaklaşık 3 milyar m^3 pomza rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Pomza rezervlerinin İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmış olmasına karşılık, Akdeniz ve Ege bölgelerinde de pomza rezervlerine rastlanılmakta ve üretim faaliyetleri görülmektedir. Dünya pomza rezervleri bakımından önemli bir yere sahip olan Türkiye, 10'a varan renk ve doku kalitesine sahip pomza çeşitleri ile oldukça yüksek dış pazar şansına sahiptir [58, 66].

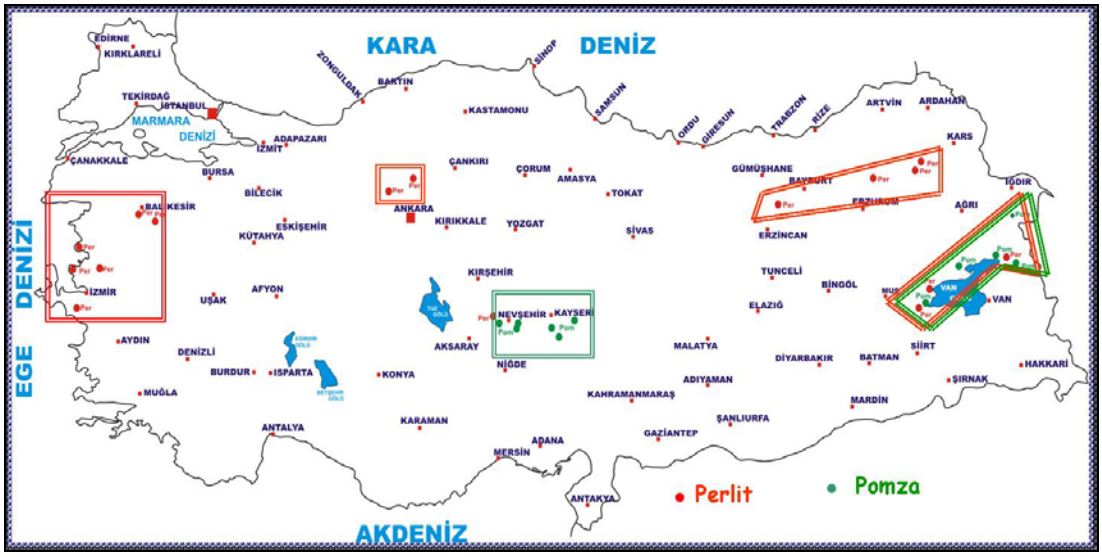
Tablo 2.3. 2010 ve 2011 yıllarına ait tahmini pomza madeni üretimi

Ülkeler	Pomza Üretimi (Bin Ton)	
	2010	2011 Tahmini
ABD	390	380
Cezayir	450	450
Kamerun	600	600
Şili	915	950
Ekvator	680	680
Yunanistan	1.280	1.300
Guatelema	400	400
İran	1.500	1.500
İtalya	3.020	3.000
Yeni Zelanda	160	160
Suudi Arabistan	800	800
İspanya	600	600
Suriye	950	900
Türkiye	4.000	4.100
Diğer Ülkeler	1.570	1.320
Toplam	17.300	17.000

Ülke çapında MTA Genel Müdürlüğü'nce yapılan pomza ile ilgili detaylı jeolojik etüt çalışmalarından elde edilen verilere göre, ülkemizde varlığı bilinen pomza yatakları ve bunların rezerv durumları Tablo 2.4'te [58] ve pomza maden yatakları haritası Şekil 2.1'de [67] verilmiştir.

Tablo 2.4. Türkiye pomza rezerv dağılımı

Yeri	Rezerv Miktarı	Yeri	Rezerv Miktarı
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834	Van-Molla kasım	5.950.000
Derinkuyu	48.660.500	Ağrı-Patnos	27.812.000
Kayseri-Gömeç	13.250.000	Ağrı-Doğubayazıt	26.875.000
Kayseri-Develi	58.500.000	Kars-Iğdır-Kavaktepe	40.156.250
Kayseri-Talas-Tomarza	241.000.000	Kars-Digor	11.718.750
Kayseri-Talas-Tomarza	284.000.000	Kars-Sarıkamış	1.875.000
Bitlis-Tatvan	1.100.000.000	Ankara-Güdül-Tekköy	8.070.000
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000	Isparta-Gölcük	30.983.250



Şekil 2.1. Türkiye önemli perlit-pomza yatakları

2.5. Bor

Bor madeni çok eski zamanlardan beri bilinen ve kullanılan önemli bir madendir. Bor tuzları yaklaşık 4000 yıl önce ilk kez Tibet'de bulunmuştur. Tibet göllerinin sığ kesimlerinden çıkarılarak Himalaya'lar üzerinden Hindistan'a ve oradan da Mezopotamya'ya uzanan yollar kullanılarak ithal edilen bor tuzlarından yararlanılmıştır. Bor madeninin Avrupa'ya Tibet'ten Marko Polo tarafından getirildiği tahmin edilmektedir. Bor adının Arapça Buraq veya Farsça Burah kelimesinden geldiği düşünülmektedir. Ayrıca bazı kaynakçalarda, boraks minerali ile ilgili olarak "boorak", "bayrach" ve "borar" gibi isimler de kullanılmaktadır. Yine günümüzde Boraks yerine Tinkal adı da kullanılmaktadır. "Tinkal" adı da "Uzakdoğu" anlamına gelen "tinkar" sözcüğüyle eş anlamlıdır. Tarihte Bor'u ilk kez Babiller altın elde etmek için

kullanmışlardır. Bunun dışında bor, Çinlilerce seramik ve cam yapımında, Mısırlılarca mumyalamada, Romalılarca cam yapımında, antik çağlarda Etiler ve Sümerliler tarafından altın ve gümüş işlemeciliğinde lehim olarak, yine Eski Yunan ve Romalılarca bor tuzları zemine serpilerek arena temizliğinde kullanılmıştır. 875 yılında ise Araplar ilk kez bor tuzlarından ilaç elde etmişlerdir. Sanayi hammaddesi olarak ilk boraks madenciliği ise 1852 yılında Şili'de başlamıştır [68]. Elementel bor 1808 yılında Fransız kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humpry Davy tarafından bulunmuştur [69]. Türkiye'de bor minerallerinin bulunması ve kullanılması çok eski çağlara kadar gitmektedir. İznik çinilerinin özel renkli glazürlerinde bor bileşiklerinin bulunması bunun açık bir kanıtıdır [68].

2.5.1. Bor elementi ve mineralleri

Bor, element olarak doğada B^{10} ve B^{11} olarak adlandırılan iki ayrı kararlı izotoptan oluşmaktadır. Bu izotopların tabiatta bulunma oranları sırasıyla % 19,1-20,3 ve %79,7-80,9'dir. B^{10} izotopu, çok yüksek termal nötron tutma özelliği gösterir. Böylelikle nükleer malzemeler ve nükleer enerji santrallerinde kullanılabilmektedir. Bor, element olarak çok çeşitli bileşik yapma kapasitesine ve nötronları absorbe etme özelliğine sahip olup bu nedenle sanayinin vazgeçilmez hammaddelerinden bir tanesidir. Metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir [70]. Bor, her türlü jeolojik ortamda oluşan minerallerde bulunur. Bor elementinin çift yönlü özelliği, olağan sayılmayan ender bileşiklerin oluşmasına neden olur. Üç değerli bor (B^{+3}) yüksek iyonik potansiyelinden (i=13.0) dolayı doğada serbest olarak bulunmaz [71]. Bor elementinin fiziksel özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir [69].

Tablo 2.5. Bor elementinin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik		Değeri
Atom numarası		5
Atom ağırlığı		10.811±0.005 veya 0.007
Yoğunluk (kg/m^3)		2.46
Molar hacim (cm^3)		4.39
Ergime noktası		2190+20 ˚C
Kaynama noktası		3660 ˚C
Isıl genleşme katsayısı (25-1050˚C arası, 1˚C için)		5×106-7×106
Knoop sertliği		2100-2580 HK
Mohs sertliği (elmas-15)		11
Vickers sertliği		5000 HV
Entalpi (kj/mol)	Füzyon buharlaşma	50.2 507

Bor yeryüzünde toprak, kayalar, suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Canlıların bu elementin varlığında evrim geçirdiği düşünülmektedir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10-20 ppm olmakla birlikte ABD'nin Batı bölgeleri ve Akdeniz'den Kazakistan'a kadar uzanan yörede yüksek konsantrsayonlarda bulunmaktadır. Deniz suyunda 0.5-9.6 ppm tatlı sularda ise 0.01-1.5 ppm aralığındadır. Yüksek konsatrasyonlarda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijene bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak volkanik ve hidrotermal aktivitesi olan bölgelerinde bulunmaktadır [69].

Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşiklerdir. Doğada yaklaşık 230'dan fazla bor minerali mevcuttur. Ticari öneme sahip olan başlıca mineraller; tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandermit, borasit, szaybelit ve hidroborasit'tir [70]. Bor bileşiklerinin en basitleri bor oksit (B_2O_3) ve borik asit (H_2BO_3) iken kalsiyumla birlikte bulunana kolemanit, kalsiyum-sodyumla bulunana üleksit ve sodyumla bağlı olana "boraks" denir [72]. Bu minerallerin kimyasal formülleri, B_2O_3 içerikleri ve ilgili notlar Tablo 2.6'da verilmektedir [73] . Dünya genelinde sektör tarafından kullanılan boratların %90'ını sodyum bazlı tinkal, kalsiyum bazlı kolemanit ve sodyum+kalsiyum bazlı üleksit oluşturmaktadır [65]. Bu mineraller, öncelikle fiziksel işleme tabi tutularak zenginleştirilir (konsantre bor) daha sonra rafine edilerek çeşitli bor kimyasallarına dönüştürülür. İfade kolaylığı açısından bu ürünlerin tamamı "Bor" olarak adlandırılmaktadır [70].

Tablo 2.6. Bor mineralleri

TİP	MİNERAL	BİLEŞİM	$\%B_2O_3$	NOTLAR
Hidrojen Boratlar	Sasolit	H_3BO_3	56.3	Doğal borik asittir ve sadece İtalya'da bulunmaktadır
Sodyum Boratlar	Tinkal	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	36.5	Tinkal yatakları Eskişehir Kırka'da bulunmaktadır.
	Tinkalkonit	$Na_2B_4O_7.5H_2O$	47.8	Genellikle aksesuar olarak kullanılmaktadır.
	Kernit	$Na_2B_4O_7.4H_2O$	51.0	Kernit yatakları Arjantin'nin Tincalayu ve Blanca bölgelerinde bulunmaktadır.
Sodyum-Kalsiyum Boratlar	Üleksit	$NaCaB_5O_9.8H_2O$	43.0	Üleksit yatakları, Şili, ABD ve Türkiye'de bulunmaktadır.
	Propertit	$NaCaB_3O_9.5H_2O$	49.6	ABD'de Dealt Walley bor yataklarında bulunmaktadır.
Kalsiyum Boratlar	Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$	50.8	En büyük rezerv Türkiye'dedir.
	Pandermit	$CaB_{10}O_{19}.7H_2O$	49.8	Bigadiç ve Kırka bor yataklarında bulunmaktadır.
Kalsiyum Borosilikatlar	Datolit	$CaBSiO_4OH$	24.9	Datolit yatakları esas olarak Rusya'nın Doğu bölgelerinde bulunmaktadır.
Magnezyum Boratlar	Hidroborasit	$CaMgB_6O_{11}.6H_2O$	50.5	Arjantin'de kolemanit ile birlikte hidroborasit oluşumu da bulunmakta ve ağırlıklı olarak seramik sanayinde kullanılmaktadır.
	Aşarit	$MgBO_2OH$	41.4	Bu mineral oluşumu ağırlıklı olarak Kazakistan'da bulunmaktadır.
	Borasit	$Mg_3B_7O_{13}Cl$	62.2	Türkiye'de Emet, Kırka, Bigadiç borat yataklarında oldukça sık görülür. Kolemanit, Üleksit bazen Tünelit ve Veaçit-A ile birlikte rastlanır

2.5.2. Borun oluşumu

Bor konsantrasyonunun olduğu yerlerde genelde yersel bir volkanik aktivite (bor kaynağı olarak), göl gibi bir su kütlesi (bor bileşiklerini çözen) evaporasyon koşulları (çökelme noktasında çözeltiyi konsantre eden), ve üstüne gelen koruyucu tortul tabaka (kolayca çözülebilen bor minerallerini koruyan) yer alır. Doğada ortalama olarak karasal sularda 0.1 ppm, yerkabuğunda 3 ppm, ve deniz suyunda 4.6 ppm oranlarında bulunur [74].

Bor yataklarının oluşumu (Şekil 2.3) aşağıdaki gibi özetlenebilir [75]:

- Bor elementi (B) nadir elementlerden olmasına karşın (yerkabuğunda ortalama 100 ppm), belli yerlerde çok yüksek konsantrasyonlarda bulunur.
- Yüz ellinin üzerinde mineralin değişik jeolojik ortamlarda bor içerdiği bilinmektedir. Bunlar üç gruba ayrılmaktadır:

1- Silikat ve demir oksitlerden yapılı ve sokulumlar ile ilişkili skarn grubu,

2- Denizel evaporitik tortullar içerisinde bulunan magnezyum oksit grubu,

3- Patlamalı volkanik aktivite ve gölsel (playa gölü) tortullar ile ilişkili Na ve Ca borat grubu,

- Aşağıdaki koşullar playa gölü volkano sedimenter istiflerde ekonomik boyutlu borat yataklarının oluşumu için esastır.

-Playa gölü ortamının oluşması,

-Playa gölünde;

1- Andezitten riyolite kadar bileşim sunan volkanitler,

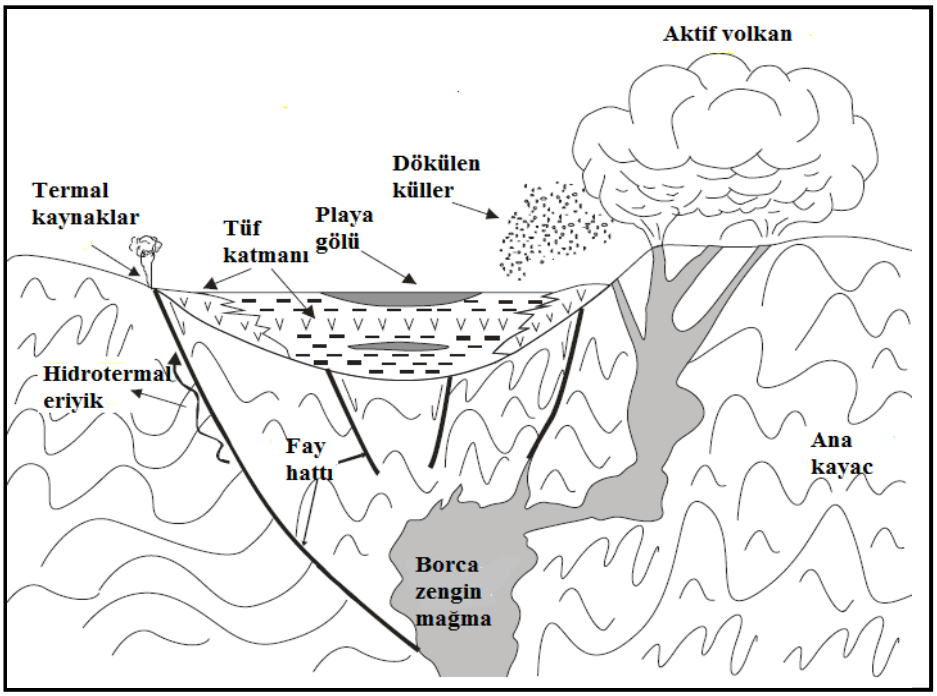
2- Havzaya doğrudan kül yağışı ve

3- Graben fayları boyunca hidrotermal akışkanlardan kaynaklanan bor zenginleşmesi gerçekleşir.

- Volkanizma yakınında termal kaynaklar,

- Kurak ve yarı kurak iklim koşulları gereklidir.

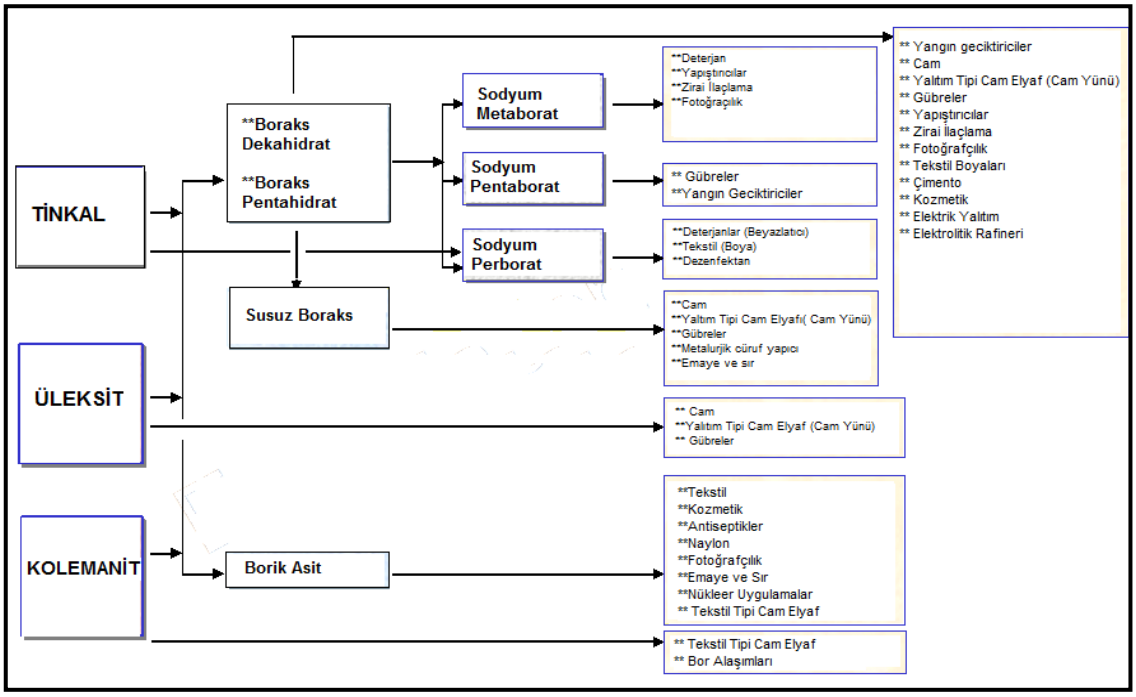
- Göl suyu pH'ı 8.5-11 arasında olmalıdır.



Şekil 2.3. Bor yataklarının oluşumu (Batı Anadolu'da Neojen havzalarındaki bor yataklarının oluşumunu gösteren genelleştirilmiş playa gölü çökelim modeli)

2.5.3. Borun kullanım alanları

Bor nihai kullanım alanı olan sektörlerde çoğunlukla bor kimyasalları şeklinde tüketildiği gibi konsantre bor olarak doğrudan da tüketilebilmektedir. Bor ürünleri pek çok alanda kullanılmaktadır. Bunlar arasında; uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, tarım, otomotiv ve enerji sektörü, metalurji ve inşaat sayılabilir [65, 69, 70]. Tüketilen bor ürünlerinin %90'a yakını cam (yalıtım tipi cam elyafı, tekstil tipi cam elyafı, borosilikat cam), seramik-frit, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 2.2'de, çeşitli bor ürünlerinin tüketim alanlarını gösterilmektedir [70].



Şekil 2.2. Çeşitli bor ürünlerinin tüketim alanları

2.5.4. Dünya'da bor rezervleri

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve ABD'de olup dünya ticari bor rezervleri 4 bölgede toplanmaktadır. Bunlar; ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan "Mojave Çölü", Güney Amerika'da yer alan "And Kemeri", Türkiye'nin de yer aldığı "Güney-Orta Asya Orojenik Kemeri" ve Doğu Rusya'dır [70]. Ayrıca bor sektör raporunda çeşitli kaynaklardan derlenerek oluşturulmuş 2011 dünya toplam bor rezervleri miktarları ve dağılımı Tablo 2.7.'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Dünya bor rezervleri

Ülkeler	Toplam Rezerv (Bin ton B_2O_3)	Dağılım (%)
Türkiye	864.500	72
A.B.D	80.000	7
Rusya	100.000	8
Çin	47.000	4
Arjantin	9.000	1
Bolivya	19.000	2
Şili	41.000	3
Peru	22.000	2
Kazakistan	15.000	1
Sırbistan	6.500	1
İran	1.000	0
TOPLAM	1.205.000	100

2.5.5. Türkiye'de bor rezervleri

Türkiye'de bilinen bor yatakları özellikle Kırka/Eskişehir, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa ve Emet/Kütahya'da bulunmaktadır. Türkiye'de rezerv açısından en çok bulunan bor mineralleri tinkal ($Na_2O.2B_2O_3.10H_2O$) ve kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$)'tir. Türkiye'de önemli tinkal yatakları Kırka'da, kolemanit yatakları ise Emet ve Bigadiç civarında bulunmaktadır. Bunlara ilaveten, Bigadiç'te az miktarda üleksit rezervi mevcut olup Kestelek'te kolemanit yanında zaman zaman üleksit yan ürün olarak elde edilmektedir [70]. Türkiye'deki bor rezerv miktarları mineral bazında Tablo 2.8'de verilmiştir [70, 73].

Tablo 2.8. Mineral bazında bor rezerv miktarları

Cevher	Toplam (Ton)
Emet (Kolemanit)	1.676.958.608
Kırka (Tinkal)	733.829.226
Bigadiç (Kolemanit-Üleksit)	616.470.710
Kestelek (Kolemanit)	5.623.063
Toplam	3.032.861.607

Bor minerallerine özellikle kolemanite ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) yeryüzünün sınırlı bölgelerinde rastlanır. Bu bölgelerden biri de Batı Anadolu'dur. Türkiye'deki kolemanit oluşumlarını başlıca dört bölgede toplamak mümkündür,

- Bursa ili Mustafa Kemalpaşa ilçesi Kestelek mevkii,
- Balıkesir ili Bigadiç ilçesi civarı,
- Kütahya ili Emet ilçesi civarı,

- Eskişehir ili Seyitgazi ilçesi Kırka mevkiinde [76].

Bigadiç borat yatakları Neojen yaşlı playa göl tortullarından yapılı KD-GB uzanımlı bir havza içinde iki farklı zonda yer alırlar. Bölgedeki volkano-sedimanter istif, alttan üste doğru taban volkanitleri, taban kireçtaşı, alt tüf, alt borat, üst tüf, üst borat ve olivinli bazalt birimlerinden oluşur. Bölgedeki Neojen istifi, Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı temel karmaşığı üzerine uyumsuzlukla oturur. Alt ve üst borat yatakları, kurak iklim koşullarında, yerel volkanizmayla bağlantılı olan hidrotermal çözeltiler ve sıcak su kaynakları ile beslenen sahalarda gelişmiş, ayrık veya birbirleriyle bağlantılı olabilen playa göllerinde oluşmuşlardır. Yataklar tüf, tüfit, kil, marn ve kireçtaşları ile ara katkılıdır [77].

Kolemanit minerali monoklinaldir ve birçok yatakta parlak kristaller halinde ve oyuklar içinde yer almaktadır. Beyaz-gri ve yeşilimsi gri gibi tipik renkleri vardır. Sertliği 4-4.5 ve özgül ağırlığı 2.52 olup suda hemen hemen hiç çözünmemesine rağmen asitte çok kolay erimektedir. 25°C'de sudaki çözünürlüğü yaklaşık 0.81 g/l'dir. 400°C'nin üzerinde ısıtıldığı zaman çatırdayarak pudra halinde kavrulmaktadır (dekrepitasyon) [78].

2.6. Hafif Beton

Hafif beton yeni bir teknoloji olmayıp çok eski çağlardan beri bilinmektedir. Bu yüzden hafif beton kullanımıyla ilgili hatırı sayılır sayıda örnek hala varlığını sürdürmektedir. Yapımda pomza, curuf gibi volkanik kaynaklı doğal agregalar kullanıldı. Sümerliler hafif betonu Babil'i inşa ederken M.Ö. 3. yüzyılda kullandılar. Türkiye'de bulunan M.S. 4. yüzyılda inşa edilen Aziz Sofya Katedrali (Ayasofya), M.S. 118-128 yılları arasında yapılan Roma tapınağı Panteon, M.S. 14. yüzyılda yapılan prestijli su kemeri Pont du Gard ve M.S 70-82 yıllarında inşa edilen büyük Roma anfi tiyatrosu Kolezyum gibi muhteşem antik yapıların bazıları hala varlığını sürdürmektedir [79].

2.6.1. Hafif beton tanımı

Normal betona göre bazı farklı özellikleri bulunan hafif beton, genellikle boşluklu, daha düşük birim ağırlığa ve dayanıma, yüksek ısı yalıtımı özelliklerine sahip olan, bununla birlikte normal betonda aynı amaçlarla kullanılabilen betondur [80].

Prensipte, hafif beton ve normal betonun üretimi benzerdir fakat hafif betonda agregalar bakımından hesaba katılması gereken bazı istisnalar vardır. Deneyimlerden, hafif agregaların kullanılmasının zor olmadığı, buna rağmen betonun farklı olduğu ve bazı metodların değiştirilmesi veya modifiye edilmesi gerekir [79].

"ACI, 1983 standardına göre hafif betonlar, yapısal hafif yoğunluktaki agregalarla yapılan, 28 günlük basınç mukavemetleri 15–17 MPa ve 28 günlük kuru birim hacim ağırlığı 1850 kg/m^3 geçmeyen betonlar olarak tanımlanırlar. ACI komisyonu 213. maddesinde birim ağırlık ve mukavemetine bağlı olarak hafif betonlar üç yapıya ayrılır" [81].

Birim ağırlıklarına göre betonların sınıflandırılması şu şekilde yapılır [82]:

— Birim ağırlığı 400–1800 kg/m^3 arasında olanlar hafif betonlar; birim ağırlığı 1800–2000 kg/m^3 arasında olan betonlara yarı hafif betonlar denir. Alman standartlarında çoğunlukla "Hafif Normal Beton" diye geçen taşıyıcı yarı hafif betonların birim ağırlığı 2000–2100 kg/m^3 arasındadır.

— Birim ağırlığı 2200–2500 kg/m^3 arasında olan betonlara normal betonlar denir.

Hafif betonları birim ağırlıkları dışında fonksiyonlarına göre, a. Yalıtım betonları, b. Orta mukavemetli betonlar, c. Taşıyıcı betonlar olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür.

Hafif betonları elde edilişlerine göre üç farklı yöntem vardır [80, 83]:

1. Yöntemde, normal ağırlıklı agrega yerine, tamamen veya kısmen boşluklu hafif agrega kullanılmaktadır. Bu tip hafif betonlar, kullanılan hafif agrega cinsine göre adlandırılırlar. Genleştirilmiş kil ve şist kullanılarak taşıyıcı betonlar, perlit betonu, pomza taşı kullanılarak ses ve ısı yalıtımlı beton veya orta mukavemetli betonlar üretilebilir.

2. Yöntemde, betonda fiziksel veya kimyasal yolla yaklaşık %30-50 geniş boşluklar oluşturulmaktadır. Bu boşlukları hava sürükleyici katkı maddeleriyle elde etmek en yaygın yöntemlerden biridir. Bu tip betonlar gaz betonu, köpük betonu veya hava sürüklenmiş beton olarak adlandırılır.

3. Yöntemde, betonun bileşiminden ince agreganın çıkartılması ve betonda büyük boşluklar oluşturarak hafif beton elde edilmesidir. İri agregalar birbirlerine 1–3

mm kalınlıkta çimento hamurlarıyla bağlıdırlar. Çimento dozajı yaklaşık 70–130 kg/m^3 tür. Bu tip betonlar genellikle kumsuz betonlar olarak adlandırılır.

Hafif betonların TS EN 206–1 standardına göre 28 günlük basınç dayanımı sınıflandırılması Tablo 2.9'da verilmiştir [84].

Tablo 2.9. Hafif beton için beton dayanım sınıfları

Basınç Dayanım Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı ($f_{ck,silindir}$) (N/mm²)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı ($f_{ck,küp}$) (N/mm²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.7. Betonda Kalıcılık (Durabilite)

Yapay bir malzeme olan betonarmenin olumlu özelliklerini sürdürebilmesi kalıcı olmasına bağlıdır. Beton veya betonarme elemanların, bazen işlevleri gereği taşımaları gerekli yükler veya aşırı yüklemenin etkisi dışında da zamanla bozulmaları mümkündür. Betonarme elemanların bazılarının uzun yıllar sonra işlevlerini yerine getiremez duruma geldikleri, bazılarının ise çok kısa sürelerde bozulmaya başladıkları görülmektedir. Yapıların kalıcı olması yalnızca doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve yapımı ile kısıtlı değildir. Aynı zamanda, yapının mantıklı bir zaman süreci içinde "kalıcı" denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması da yavaşlatılmalıdır [85].

Betonun durabilitesi betonun kalitesine bağlı olup performansta bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, betonun bakım ve kürü gibi süreçler ile

çevre koşulları etkilidir. Beton uygun şekilde kür edilmemişse mukavemet yaklaşık %30 düşebilir, ancak durabilite daha da olumsuz etkilenir [86].

2.7.1. Betonda kalıcılığa etki eden faktörler

Yapay bir malzeme olan betonarmenin olumlu özelliklerini sürdürebilmesi kalıcı olmasına bağlıdır. Beton veya betonarme elemanların deprem veya aşırı yüklemenin etkisi dışında da zamanla bozulmaları söz konusudur [87]. Beton veya betonarme elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç veya dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilir [85].

Olumsuz etkileyen bazı kimyasal ve fiziksel olaylar betonda kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve beton yüzeyinde çiçeklenme oluşması, sülfat etkisi, deniz suyunun etkisi, asit etkisi, karbonatlaşma, alkali-agrega reaksiyonu, betonun içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu, donma-çözülme etkisi, beton yüzeyinin pullanması ve aşınmadır [88]. Dayanıklı bir beton, maruz kalacağı iklim şartlarına, kimyevi tesirlere, ıslanma-kurumaya, ateşe (yangına) ve aşınmaya karşı yeterli bir derecede dayanıklılık gösterebilen betondur [89].

2.7.1.1. Sülfat reaksiyonları

Sülfat yüklü ortamlar, betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Doğada sülfat çözeltileri temel olarak yer altı sularında, deniz suyunda ve toprakta bulunur. Sülfat iyonlarının bu kaynaklardan betonun içerisine penetrasyonu basitçe "sülfat etkisi" olarak tanımlanmaktadır. Bu penetrasyon betonda bozulmalara yol açmakta ve genleşme, dayanım kaybı, pullanma ve çatlak oluşumuyla sonuçlanmaktadır [90].

Sülfat korozyonu betonlarda en sık rastlanan bir hasar tipidir [91]. Sülfat etkisi betonda genleşme ve reaksiyonları sonucu çatlakların ilerlemesi ve soyulmaların artması ile belli olmaktadır. Sülfat, toprak, yer altı suyu, tuzlu su, sanayi ve şehir atıkları gibi ortamlardaki bileşenlerdir. Ayrıca harçtaki hidrate kalsiyum alüminat arasındaki çok kere bozulmalara neden olan kimyevi, fiziki veya ikisi birlikte meydana gelen reaksiyondur. Sülfat etkisine karşı beton dayanımı:

- Betonun bulunduğu ortamdaki agresif sülfat miktarına,
- Betonun geçirgenliği dolayısıyla sülfatların nüfuz oranına,

- Çimento içeriğine bağlıdır [89].

Doğada toprak ve yer altı sularında bulunan alkaliler betonda bozulmalara sebep verebilirler. Zararlı etkiler öncelikle sodyum ve magnezyum sülfatlarından kaynaklanmaktadır. Bu sülfatlar çimentodaki hidratasyona uğramış kalsiyum alüminatlarla birleşerek genleşmiş kalsiyum sülfoalüminat kristalleri oluştururlar [92].

Zamana bağlı olarak artan bu genleşme betonun çekme gerilmesi dayanımını geçerek betonun çatlamasına, ufalanarak dökülmesine veya şiddetli pullanarak eriyip ufalanmasına neden olur. Sülfat etkisi betonda önce beyazımsı bir çökelti meydana gelmesine neden olur daha sonra betonun kenar ve köşelerinde bozulmalarla ortaya çıkar. Bundan sonraki aşama pul pul dökülmeler ve çatlayarak betonun bozulup eriyip yok olmasına kadar uzanır. Bu bozulma etkilerinin kısa sürede görüldüğü betonlar nemli ve ortam ısısının yüksek olduğu yerlerdeki ve sık sık ıslanma kuruma olayının meydana geldiği betonlardır [93].

2.7.1.2. Klorür reaksiyonları

Klorür iyonları beton içine çeşitli yollardan girebilir. Bunlar arasında, yapının bulunduğu çevreden (deniz suyu etkisiyle yada kışın kullanılan buz çözücü tuzların etkisiyle) [94], yüksek miktarda klorür içeren agregaların kullanılması, $CaCl_2$ içeren priz hızlandırıcı ya da su azaltıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, klorür içeren mineral katkıların kullanılması, deniz suyunun karma suyu olarak beton üretiminde kullanılması sayılabilir. Klorürlerin beton içine taşınımı kapiler emme, suyla birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleriyle gerçekleşir. Islanma-kuruma bu süreçlerin gelişimini büyük oranda hızlandırır [85].

Klor iyonları betona nüfuz ederek $Ca(OH)_2$ ve C_3A ile reaksiyona girer. $Ca(OH)_2$ reaksiyonu suda çözünebilen $CaCl_2$'i oluşturur. Eğer $CaCl_2$ konsantrasyonu ortamdan daha yüksek ise C_3A ile genleşen çift tuz $C_3A{\cdot}CaCl_2{\cdot}H_2O$ oluşur. Bu da klor iyonlarının nüfuz etmesini kolaylaştıran mikro çatlak oluşumuna sebep olur. Yapılan bir deneyde üç aylık tuz çözeltisine maruz kaldıktan sonra Cl:CaO oranı sabit hale gelir. Ulaşılan seviye deneyde kullanılan sert (agresif) çözeltinin klor içeriğine nispidir. Bunlarda göstermiştir ki, rol oynayan sadece klor değil ayrıca klorların bağlaması ve $Ca(OH)_2$ çözülmesinden sorumlu olan çözeltinin pH'ıdır. pH 13'te $Ca(OH)_2$ çözünmesi

çok küçüktür ve bağlanan klor çok değişkenlik göstermez. pH 11.5'te klor ve kalsiyum iyonlarında eşzamanlı bir çözünme olmuştur [79].

Klor iyonları çok hızlı hareket ederler ve klor içeren su beton ile temas ettiğinde oldukça hızlı korozyona neden olur. Betonun durabilitesi için, yayılma hızı oldukça önemlidir. Klor iyonlarının yayılmasının ölçülmesinde sabit ve hareketli durumda yayılma olmak üzere iki test metodu vardır. Sabit durumda yayılma testinde disk formunda monte edilen numune arasında iki hücre bölmesi kullanılır. Bir gözüne iyonik solüsyon (çoğunlukla NaCl ve), diğer gözüne ise saf su veya doymuş $Ca(OH)_2$ doldurulur. Hareketli durumda yayılma testinde prizmatik veya uzun silidir numunelerin bir yüzeyi hariç, diğer yüzeyleri iyonları geçirmemesi için kaplanır. Böylece kalan yüzey iyonların tek yönlü geçirimliliğine maruz bırakılır. İki metot karşılaştırıldığında, bağlayıcı klorür kapasitesinin elde edilen sonuçlara etki edeceği unutulmamalıdır [95].

Pratikte oksijen, su ve klor iyonlarının etkileşimi karmaşıktır. Farklı klor tuzları farklı hareket ederler. Örneğin $CaCl_2$ daha kolay bir difüzyona ve gözenek çözeltisindeki pH'ın azalmasına izin vererek daha açık bir gözenek yapısı oluşturur. Ancak diğer alkali kloridler (KCl ve NaCl) daha az oranda gözenekliliği artırır. Genel olarak gözenek çözeltisindeki pH'ı arttırır. Ayrıca K ve Na iyonları arasında iyon geçişinin olasılığı vardır. Bu nedenle $CaCl_2$'in, NaCl ve KCl'den daha zararlı olduğu kabul edilir. Klor iyonlarının difüzyon katsayısı katyonlara bağlıdır ve $MgCl_2 > CaCl_2 >$ KCl > NaCl şeklinde sırayla azalır [79].

Betonun bulunduğu ortamın değerlendirilmesi için çevresel etki sınıflaması ve yıpratıcı etkiye karşı dayanıklılığın sağlanması için beton karışımları için getirilen öneriler TS EN 206-1 standardında sunulmuştur. Buna göre klorürlerin sebep olduğu korozyon riski deniz suyundan kaynaklanan ve deniz suyu haricindeki klorürler olarak sınıflandırılmış ve bu ortamda kullanılacak betonun etkinin şiddetine göre S/Ç oranının 0.55-0.45, en az çimento dozajının 300-340 kg/m^3 olması, beton sınıfının ise en az C30/37-C35/45 olarak seçilmesi önerilmektedir [87].

2.7.1.3. Geçirimlilik (Permeabilite)

Betonun dayanıklılık problemleri, betonun geçirimliliği ile başlar. Betonun geçirimsiz olması durumunda, birçok dayanıklılık problemine yol açan su ve zararlı sıvılar beton içerisine nüfuz edemez [89]. Beton dayanımı genel olarak mikro yapıyla

ilişkilidir ama dayanım geliştirmede sorumlu tek faktör değildir. Karışım oranı, kimyasal katkıları tipi, s/ç oranı, gözeneklilik, yoğunluk ve benzeri gibi birtakım diğer faktörler de baskın rol oynarlar [79].

Agrega beton içinde çimento hamuru ile kaplanmış olduğundan ve normalde az boşluk içermesi nedeniyle, betonun geçirimliliği büyük ölçüde çimento hamurunun geçirimliliğine bağlıdır. Geçirimlilik açısından bakıldığında, aynı S/Ç oranında ve diğer şartlarında aynı kalması koşuluyla betonun harçtan, harcında hamurdan daha geçirimli olduğu söylenebilir. Bu durum, beton içinde en zayıf halka olarak nitelendirilen çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin etkisiyle açıklanabilir. Agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde göreceli olarak S/Ç oranının artması ve kılcal çatlaklar oluşması geçirimliliğin artmasına yol açmaktadır. Çimento hamurundaki ve betondaki boşluklar mikro, kapiler ve makro olarak gruplandırılabilir. Kalıcılığı büyük ölçüde etkileyenler kılcal (kapiler) ve makro boyutta olanlardır [85].

Geçirimli betonların içerisine sızan sular ve bu sulardaki yabancı maddeler, betonda bazı kimyasal ve fiziksel olaylara yol açmaktadır [88]:

1. Çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşmuş olan ve sertleşmiş çimento hamurunun yapısında bulunan kalsiyum hidroksit, dışarıdan sızan suların etkisiyle çözünerek yüzeye çıkmaktadır. Böylece betondaki boşluk miktarı artmaktadır. Yüzeye çıkan kalsiyum hidroksitli ve tuzlu suyun buharlaşmasıyla, beton yüzeyinde beyaz lekeler halinde kalsiyum karbonatlar ve tuz birikintileri yer almaktadır.
2. Betonun içerisine sızan sularda bulunan sülfatlar ve asitler, betonun içerisinde genleşme yaratan ürünlerin oluşmasına yol açmaktadır.
3. Beton ortamına sızan su, oksijen ve klor betonun içerisindeki demir donatıların korozyonuna neden olmaktadır.
4. Kapiler boşlukları suyla dolu duruma gelen betonlarda, boşluklardaki suyun donması sonucunda çok büyük genleşmeler oluşmaktadır.

2.7.1.4. Aşınma

Beton yüzeyine sürtünme veya çarpma şeklinde gelen kuvvetler, betonun yüzeyini adeta törpülercesine etki yaratmakta, yüzeyin aşınmasına yol açmaktadırlar.

Aşınma yavaş tempoda yer alan fiziksel ve mekanik bir olaydır [88]. Baraj, sulama kanalı gibi çeşitli hidrolik yapılar, nehir veya deniz içerisinde bulunan köprü ayakları veya liman yapıları ile endüstriyel zemin betonları beton yollar vd. çeşitli aşınma etkilerine maruz kalmaktadır [96].

Betonun aşınmaya karşı dayanıklılığı bilgileri sınırlıdır. Ancak beton yoğunluğu, düşük su/çimento oranı, minimum ince agrega kullanımı, işlenebilme, yerleştirme ve kür aşınmaya karşı dayanıklı beton elde edilebileceğini göstermektedir [92]. Genelde basınç dayanımı yüksek olan betonun aşınmaya karşı dayanıklılığı yüksektir. Ancak beton sınıfı tek parametre olmayıp, yüzeyin aşınmaya karşı dayanıklılığı bazı önlemlerin alınması ile artırılabilir. C30/37 ve üzerindeki bir beton sınıfının tercih edilmesi, çok şiddetli etki durumunda ise beton sınıfının C40/50 ve üzerinde olması tavsiye edilir [85]. Buradan hafif beton agregasının aşınmaya karşı yeterli direncinin olmayacağının sonucuna varmak mantıklı olacaktır. Bu durum, agregaların taş kadar güçlü olmaması gerçeğine dayalıdır. Fakat betonun aşınımı sadece hafif agregalara bağlı olmadığı ayrıca matriksin gücüne ve agregayla çimento karışımı arasındaki bağa da bağlı olduğu için doğru değildir [79]. Ayrıca Baradan vd., betonun aşınmaya dayanıklılığının, beton yüzeyinin birkaç mm derinliğindeki çimento matrisinin boşluk yapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir [85].

Yapılan deneyler sonunda aşınma miktarı 1.2mm'den küçük olan betonları aşınma mukavemeti çok yüksek olan ve 3mm'den fazla aşınan betonları aşınmaya karşı mukavemeti zayıf olan betonlar olarak niteleyebiliriz [89].

BÖLÜM 3

MALZEME VE YÖNTEM

Kolemanit kaplanmış ve kaplanmamış agrega ile üretilen beton numunelerin dayanımı ve kalıcılığa (durabilite) etkisini araştırmak amacıyla kullanılan materyaller, deney öncesi numune hazırlık aşamaları ve numunelere uygulanan metotlar aşağıda açıklanmıştır. Agregalarda; ince kesit, tane büyüklüğü dağılımı, özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık, su emme, darbe ve kırılma katsayısı, taze betonda; çökme (slump) ve birim ağırlık, sertleşmiş betonda; kuru birim ağırlık, su emme, ultrases geçiş hızı, basınç ve yarmada çekme dayanımı, basınçlı su geçirimliliği, kılcal su emme, hızlı klorür penetrasyon direnci, aşınma dayanımı, sülfat tayini deneyleri, ince kesit ve SEM analizleri yapılmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. Agregalar

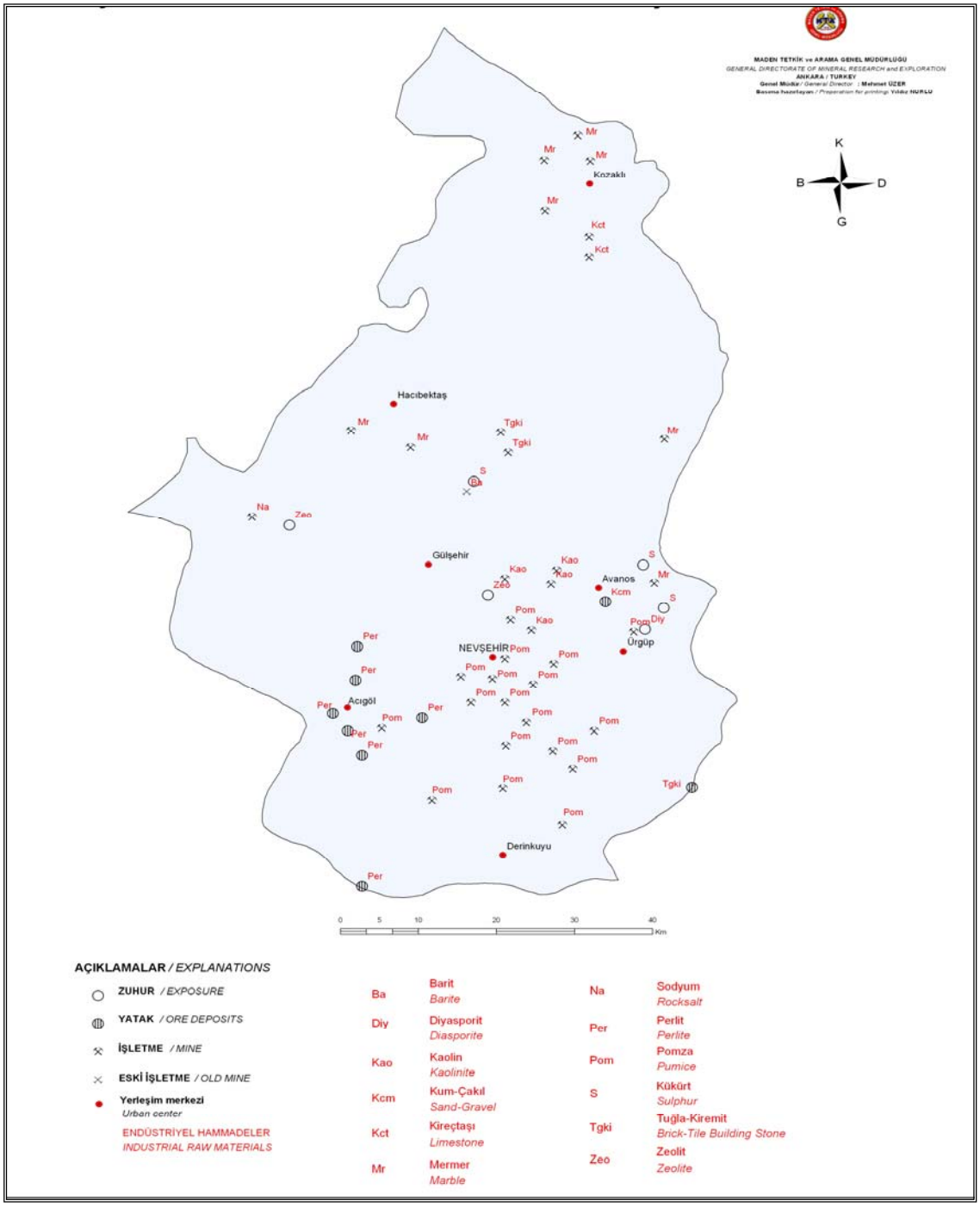
Araştırmada agrega olarak; kaplanmamış, çimento kaplanmış ve çimento+kolemanit kaplanmış olmak üzere üç çeşit pomza agregası ve beton karışımının 0/4 mm'lik agrega grubunu oluşturan doğal kırma kum agregası kullanılmıştır.

3.1.1.1. Kaplanmamış pomza agregası

Bu çalışmada, Nevşehir ili Merkez ilçesi Çardak köyünde bulunan Metaş Madencilik Ltd. Şti' ye ait ocaktan alınan pomza agregası kullanılmıştır. İlin maden haritası Şekil 3.1'de verilmiştir [147]. M.T.A tarafından yapılan çalışmalarda, Çardak köyünde bulunan pomzanın, görünür rezervinin 82.612.500 m^3, muhtemel rezervinin

87.592.000 m^3, mümkün rezervinin 68.445.000 m^3 ve iyi kalitede olduğu belirtilmiştir [67].

Pomzalar, agrega deneyleri ve beton karışımı için tane boyutları 4/8 mm ve 8/16 mm elek aralığında gruplandırılmıştır. Metaş Madencilikten temin edilen pomzaların kimyasal özellikleri [97] Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Nevşehir ili maden haritası

Tablo 3.1. Pomza agregaların kimyasal analizi ve diğer çalışma sonuçlarıyla kıyaslanması

Kimyasal Bileşim	Oranı % [97]	Oranı (%) [56]	Oranı (%) [98]	Oranı (%) [8]
SiO_2	74.10	52.0-75.0	77.7	71.124
Al_2O_3	13.45	11.0-17.0	14.08	15.48
Fe_2O_3	1.40	0.5-5.0	2.08	1.720
CaO	1.17	1.0-8.0	0.67	0.632
MgO	0.35	0.5-3.0	3.9	0.212
K_2O	4.10	3.0-9.0	1.29	0.144 0.380
Na_2O	3.70	-	0.02	
SO_3	-	<1.0	3.49	-
K.Kaybı	1.54	1.0-3.0	4.698	-

3.1.1.2. Çimento kaplı pomza agregası

Çalışmada, üzeri çimento kaplı (0-CLM kodlu) pomza agregası kullanılmıştır. Kaplama uygulaması hakkında geniş bilgi 3.1.5'te verilmiştir.

3.1.1.3. Çimento+kolemanit kaplı pomza agregası

Çalışmada, üzeri çimento+kolemanit kaplı (7.5-CLM, 12.5-CLM, 17.5-CLM kodlu) pomza agregaları kullanılmıştır. Kaplama uygulaması hakkında geniş bilgi 3.1.5'te verilmiştir.

3.1.1.4. Doğal agrega (kum) (0/4mm)

Beton karışımının 0/4 mm'lik tane grubunu oluşturan doğal agrega, Kırklareli ili Tempo İnş. Turz. Mad. San. Tic. A.Ş'den temin edilmiştir. İşletme tarafından verilen agreganın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir [99].

Tablo 3.2. Doğal agreganın (0/4mm) fiziksel ve kimyasal özellikleri

Gevşek Yığın Yoğunluğu	1.59 kg/m^3				
24 saatlik su emme (%)	0.87				
Tane yoğunluğu	2.71 kg/m^3				
Cl (%)	0.0024				
SO_3 (%) lim.%0.1	0.049				
Elek göz açıklığı (mm)	4	2	1	0.250	0.063
Elekten geçen kütlece %	96	-	44	30	18

3.1.2. Çimento

Araştırmada Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası'nın TS EN 197-1'e uygun olarak üretilen CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait kimyasal ve fiziksel analiz, ilgili standard sınır değerleri ile birlikte Tablo 3.3'te verilmiştir [100].

Tablo 3.3. CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel analizi (%)

Kimyasal Analiz			
Bileşenler (%)		CEM I 42.5 R	TS EN 197-1 [117]
CaO		63.92	C+S≥%50
SiO_2		19.55	
Al_2O_3		5.12	-
Fe_2O_3		2.52	-
MgO		1.02	Lim.≤%5
SO_3		2.96	Lim.≤%4
Na_2O		0.27	-
K_2O		0.67	-
Cl^-		0.0089	Lim.≤%0.10
Kızdırma Kaybı		4.08	Lim.≤%5
Çöz. Kalıntı		0.36	Lim.≤%5
Fiziksel Analiz			
Priz süresi (dk.)	Baş.	145	min. 60
	Bit.	195	-
Yoğunluk(g/cm^3)		3.11	-
Özgül Yüzey(cm^2/g)		3912	-
Toplam Hacim Genleşmesi (mm)		1	max.10
40µ Elek Üzeri kalıntı (%)		23.1	-
90µ Elek Üzeri kalıntı (%)		2.4	-
Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	25.9	min. 20
	7 gün	45.1	-
	28 gün	-	min. 42.5 max. 62.5

3.1.3. Kolemanit

Araştırmada Eti Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğünden temin edilen öğütülmüş kolemanit kullanılmıştır [101]. Kolemanitin işletme müdürlüğü tarafından yapılan kimyasal analizi Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. İşletmeden alınan kolemanitin kimyasal analizi

Bileşenler	Oran (%)
B_2O_3	39.85
CaO	27.24
SiO_2	5.60
Al_2O_3	0.15
Fe_2O_3	0.03
MgO	2.84
SO_4	0.31
Na_2O	0.10
As (ppm)	13
SrO	1.04
Nem	24.06

Kolemanit üzerinde TS 25'e göre yapılan puzolanik aktivite deneyinde bulunan 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde kolemanitin sınır değer olan 4 MPa basınç dayanımını karşıladığı belirlenmiştir. Dolayısıyla kolemanitin puzolanik aktivitesi olduğundan bahsedilebilir. TS 25 standardında özgül yüzeyde istenilen en az 4000 $cm^2/g \pm \%25$ değeri kolemanitte 3839 cm^2/g olarak belirlenmiştir. Kolemanitin öğütülerek blaine inceliğinin arttırılmasıyla 7 günlük basınç dayanım değerinin daha yüksek çıkacağı düşünülmektedir. Literatürde incelik değerinin artmasıyla puzolanik aktivite değerinde artış olacağı belirtilmektedir [102, 103].

Tablo 3.5. Kolemanitin fiziksel analiz sonuçları

Yoğunluk(g/cm^3)		2.50
Özgül Yüzey(cm^2/g)		3839
40µ Elek Üzeri kalıntı (%)		21.8
90µ Elek Üzeri kalıntı (%)		0.2
Basınç Dayanımı (MPa)	7 gün	4.1
	28 gün	4.3
	90gün	6.1

3.1.4. Su

Araştırmada Kırklareli şehir içme suyu şebekesinden temin edilen TS EN 1008 standardına uygun su kullanılmıştır [146].

3.1.5. Çimento ve çimento+kolemanit kaplı agregaların üretimi

Çalışmada, kaplanacak pomza agregaları 24 saat süresince 60˚C'de kurutularak kaplanmaya hazır hale getirilmiştir. Kaplama işlemi için leblebi şekeri kaplama makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.2). Makine; komple paslanmaz çelik olup homojen biçimde leblebi şekeri, çıtır leblebi, soslu leblebi ve draje şekeri ürün kaplamasında kullanılmaktadır [104]. Makineye ait teknik özellikler Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Leblebi şekeri kaplama makinesi teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Kazan çapı	800mm
Makine eni	1700mm
Yükseklik	1550mm
Elektrik gücü	1.85kw-2.25KW



Şekil 3.2. Leblebi şekeri kaplama makinesi

Sağlık ve arkadaşları (2009), yaptıkları araştırmada kolemanitin kullanım oranını gerçekte içindeki B_2O_3 tenörüne bağlı olarak değişiklik gösterdiği ve klinker içindeki B_2O_3 miktarının %2.5-%3 arasında olmasının en ideal veya optimum oran olduğunu belirtmişlerdir [32].

Çalışmada, agregaların kaplanması için, çimento ve çimentonun ağırlıkça %7.5, %12.5 ve %17.5 oranlarında yer değiştirmesiyle öğütülmüş kolemanit katılarak karışım hazırlanmıştır. Kodlamada karışıma katılan kolemanite karşılık gelen yüzdeler kullanılmıştır. Bu oranlara göre;

- Kaplanmamış pomza agregaları; **Kontrol,**

-Çimento kaplı pomza agregaları; **0-CLM**,

-%7.5 kolemanit kaplı pomza agregaları; **7.5-CLM,**

-%12.5 kolemanit kaplı pomza agregaları; **12.5-CLM**,

-%17.5 kolemanit kaplı pomza agregaları; **17.5-CLM** olarak kodlanmıştır.

Çalışma öncesinde pomza agregalarına su ile ön emdirilme işlemi uygulandığında, agregaların kaplanmadığı görülmüştür. Bu nedenle etüv kurusu agrega üzerine doğrudan kaplama yapılmıştır. Agregaların kaplanması sürecinde, ön deneyler sonucu belirlenen en uygun kaplama yöntemi aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Hava kurusu agrega tartılmıştır.
- Çimento ve kolemanit tartılmıştır (Şekil 3.3.a-b)
- Kaplama makinesi ısıtılmıştır (yaklaşık 29˚C).
- Agrega, kaplama makinesinin içerisine konulmuştur.
- Tablo 3.7'de belirtilen çimento+kolemanit karışımı hazırlanmıştır (Şekil 3.3.c-d).
- Karışım agrega üzerine dökülerek 5dk. boyunca karıştırılmış ve agregaların üzerinin kaplanması sağlanmıştır (Şekil 3.3.e-f-g).
- Agregaları birbirinden ayırmak amacıyla agregaların üzerine kolemanit (toz) serpilmiştir (Şekil 3.3.h).
- Agregalar ayrılıncaya kadar 5dk boyunca tekrar karıştırılmıştır (Şekil 3.3.ı).
- Birbirinden ayrılan agrega taneleri bir kaba alınmıştır.
- Numuneler zemin üzerine serilerek agrega üzerindeki kaplamanın kuruması sağlanmıştır (Şekil 3.3.i).

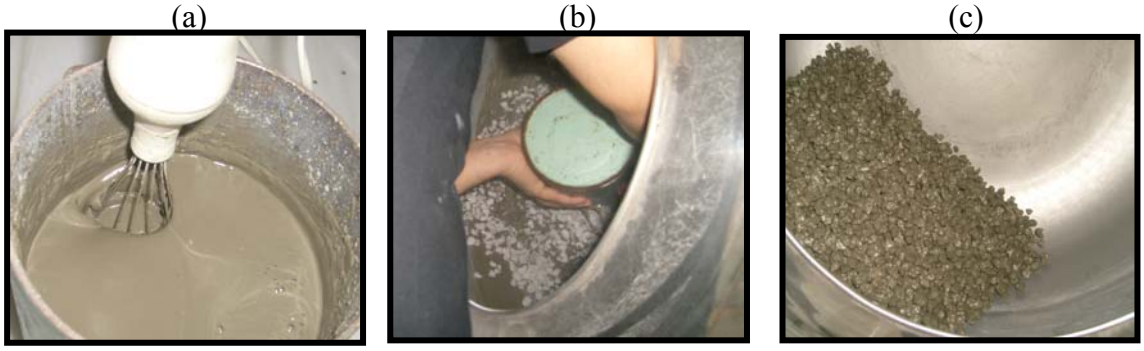
- Agregalara 20˚C sıcaklıkta ve %40 nemli bir ortamda üzerlerine nemli bir bez serilerek 7 gün boyunca kür uygulanmıştır (Şekil 3.3.j).
- Agregalar 7 günlük kür uygulaması sonunda toplanmıştır (Şekil 3.3.k). Kaplanan agregaların; kürden sonraki nem hesaplarında ortalama nem miktarı, iri agregalarda %15, ince agregalarda %16 belirlenmiştir. Ön çalışmalar sonucunda bir kat kaplama yapılan agregaların, ikinci kat kaplama işlemi sırasında suyu emmediği gözlenmiştir. Bu nedenle birinci kat kaplamada kullanılan su miktarı agrega içindeki mevcut nem miktarına göre azaltılarak hesaplanmıştır.
- Kaplamada azaltılan su oranına göre aynı miktarlarda karışımlar hazırlanarak tekrar ikinci kat uygulaması yapılmış ve 7 günlük kür işlemi tekrar edilmiştir.
- Agregalar ikinci kür işleminden sonra toplanarak 28 gün sonunda kullanılmak üzere bir kaba alınmıştır.
- Agregalarda kaplama işlemi bir gün içerisinde tamamlanamadığından agregaların bekleme sürelerinde farklılık gözlenmektedir. Kolemanit katkısının bu yönde pozitif bir etkisi olduğundan agreganın 28 günden fazla bekletilmesi göz ardı edilmiştir.

Tablo 3.7. Çimento+kolemanit çözeltisi karışım oranları

Bileşenler	**KONTROL**		**0-CLM**		**7.5-CLM**		**12.5-CLM**		**17.5-CLM**	
Agrega tane sınıfı (mm)	4-8	8-16	4-8	8-16	4-8	8-16	4-8	8-16	4-8	8-16
Agrega (g)	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
Çimento (g)	-	-	2000	2000	1940	1940	1900	1900	1860	1860
Kolemanit (g)	-	-	-	-	60	60	100	100	140	140
Su (ml)	-	-	1140	1000	1140	1000	1140	1000	1140	1000
Agrega üzeri için kolemanit (g)	-	-	-	-	90	90	150	150	210	210
Agrega üzeri için çimento(g)	-	-	250	250	-	-	-	-	-	-



(a) (b) (c)



(d) (e) (f)



(g) (h) (ı)



(i) (j) (k)

Şekil 3.3.a-k. Agrega kaplama aşamalarına ait resimler

3.2. Metot

Bu çalışma, literatür taraması ve deneysel olarak yapılmıştır. Çalışmaların agrega ve beton deneyleri Kırklareli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi ve Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi malzeme laboratuarlarında, agregaların mineralojik ve petrografik incelemeleri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Fakültesi laboratuarlarında ve beton numunelerin SEM analizleri Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nde yapılmıştır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hafif Beton Karışım Oranları

Bu çalışmada; kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış pomza agregası kullanılarak 400 dozlu numune serileri hazırlanmıştır. TS 2511 taşıyıcı hafif beton standardındaki esaslar dikkate alınarak beton karışım hesabı yapılmıştır ($1m^3$ beton imali için 1.15 m^3 kuru gevşek agrega) [105]. Buna göre toplam agrega hacmindeki kum oranı %50, 4/8 mm elek aralığındaki agrega oranı %30 ve 8/16 mm elek aralığındaki agrega oranı %20 olarak belirlenmiştir. Deney serilerinin karışım oranları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Betonun karılmasında 100 dm^3 hacme sahip yatay eksenli laboratuar tipi mikser kullanılmıştır. Karışımda ince ve iri agrega miksere konularak 2 dakika, çimento eklendikten sonra 2 dakika, karışım suyunun 2/3'ü karışıma ilave edildikten sonra 2 dakika ve geri kalan suyun tamamı karışıma eklendikten sonrada 3 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karıştırma süresi toplam 9 dakikadır. Taze beton homojenliğini kaybetmemesi ve segregasyona uğramaması için kalıplara dikkatlice yerleştirilmiştir. Kalıplara iki aşamada yerleştirilen numuneler, vibrasyon makinesinde 2 dakika süreyle titreşime maruz bırakılarak sıkıştırılmıştır. Numunelerin prizini tamamlaması için sıcaklığı 20˚C ve nemi %70 olan odada üzeri naylon örtüyle örtülerek 24 saat bekletilmiştir. Prizini alan numuneler su sıcaklığı 20±2ºC olan kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilmiştir.

Tablo 4.1. Beton karışım oranları

Bileşenler		Birimi	Karışım Miktarları (400 Doz)				
			KONTROL	0-CLM	7.5-CLM	12.5-CLM	17.5-CLM
Agrega Elek Aralığı (mm)	8 - 16	kg	118.88	169.67	163.99	175.10	167.16
	4 - 8	kg	173.93	278.56	275.75	281.69	268.63
	0 - 4	kg	914.25	914.25	914.25	914.25	914.25
Su		kg	254.53	207.00	205.00	204.00	208.00
Çimento		kg	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00

4.2. Kaplanmış ve Kaplanmamış Agregaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Ersoy ve Helvacı (2011), kayaç yapıcı mineralleri çeşitli özelliklerine göre sınıflandırmışlardır. Kayaç yapıcı ana mineral gruplarından silis grubunda, magmatik kayaçlar içerisinde en çok bulunan silis minerallerinin kuvars (heksagonal), tridimit (ortorombik) ve kristobalittir (tetragonal) olduğunu, asidik bileşimli derinlik ve yüzey kayaçlarında en çok kuvarsa rastlanırken, tridimite yüzey kayaçlarında (örneğin bazı trakitler) rastlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca magmatik petrografi laboratuarı kapsamında incelenecek olan kayaç örneklerinde yalnızca kuvars görülebileceğini ve kuvarsın en belirgin özelliklerinin [106]:

—El örneklerinde genellikle saydam ve grimsi renklerde olup buz görünümüne sahip,

—Dilinim özelliği olmadığından parlak ve düzgün bir yüzey sunamadığını ve bu özellikleri ile feldispatlardan rahatlıkla ayrılabilecek,

—İnce kesit örneklerinde genelde öz şekilsiz, düzensiz çatlaklı, yüzey kayaçlarında bazen kenarlarından itibaren kemirilmiş (körfez yapısı) ve yuvarlatılmış şekillerde,

—Gri-sarı tonlarında girişim rengine sahip ve tek optik (+) eksenli,

—Mikroskop tablası döndürüldüğünde sönmesinin çok ani olduğu,

—Ayrışma sunmadığından paralel nikolde temiz bir yüzey sunması ile feldispatlardan ayırt edilebilecek özellikler olduğunu belirtmişlerdir.

Kimyasal bileşimlerine göre mağmatik kayaçlar asit, nötr, bazik ve ultrabazik kayaçlar şeklinde sınıflandırılırlar. Asit kayaçlar (silisce zengin) aynı zamanda alüminyum, sodyum, potasyumca zengin kayaçlar olmasına karşın çok az kalsiyum,

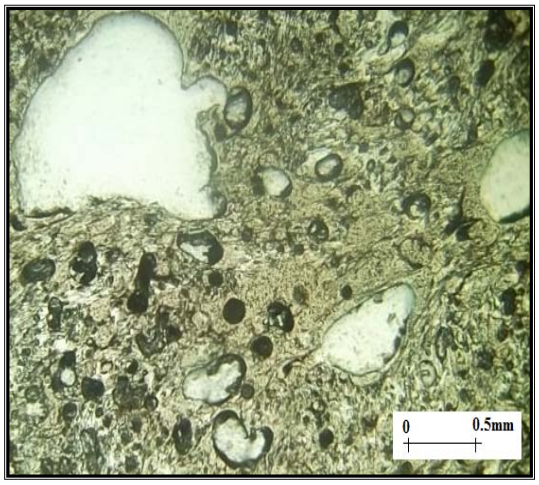
magnezyum ve demir ihtiva ederler [107]. Magmatik kayaçları oluşturan silikat mineralleri ancak X-ışınları ile saptanabilen içyapılarına (structure) göre sınıflandırılırlar. Magmatik kayaçları oluşturan mineraller ve bu minerallerin yerkabuğunu teşkil eden tüm kayaçların bileşimindeki miktarları şu şekildedir: feldispatlar %60, kuvars %12, amfiboller % 8, piroksenler % 8, mika grubu mineralleri % 4, olivin % 3, demir oksit mineralleri % 3 ve diğerleri % 2'dir [106].

Kayaçların petrografik incelenmesi için hazırlanmış ince kesit, polarizan mikroskobunda, içinden geçen ışığın kazandığı özelliklerin belirlenmesi ile tanımlanır. Burada oluşan minerallerin cinsleri, kristal boyutları, mineraller arsındaki dokusal ilişkiler, gözeneklilik, kılcal çatlakların varlığı, çatlak ve damar dolgu tip ve karakterleri ile mineral yönlenmeleri rahatlıkla belirlenebilmektedir [108].

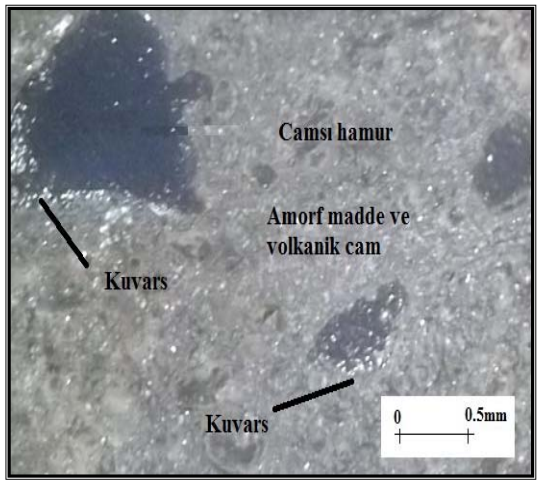
Çalışmada; Nevşehir ili, Merkez ilçesi, Çardak köyünden alınan pomza agregalarının mineralojik-petrografik özellikleri bu bölümde verilmiştir.

- **KONTROL kodlu kaplanmamış pomza agregası**

Pomza agrega numunelerinin mikroskop altındaki ince kesit görüntüleri incelendiğinde; kayacın büyük çoğunluğunu amorf yapıda volkanik camın oluşturduğu gözlenmektedir. Hamuru oluşturan bu volkanik cam, içerisinde bol miktarda opak mineraller (demiroksit-hidroksit) içermektedir. Kayaçta ayrıca opal kalseduan türü SiO_2 bileşikleri gözlenmektedir. Kayaçtaki boşluk miktarı %2-3 civarında olup, gözeneklerin kenarında az da olsa kripto kristalin kuvars mevcuttur. Kayaçta akma dokuları da izlenmektedir. Muhtemel kayaç lav akıntılarına geçiş gösterir. Kayaç dasidik mağma ürünüdür (Şekil 4.1-4.2).



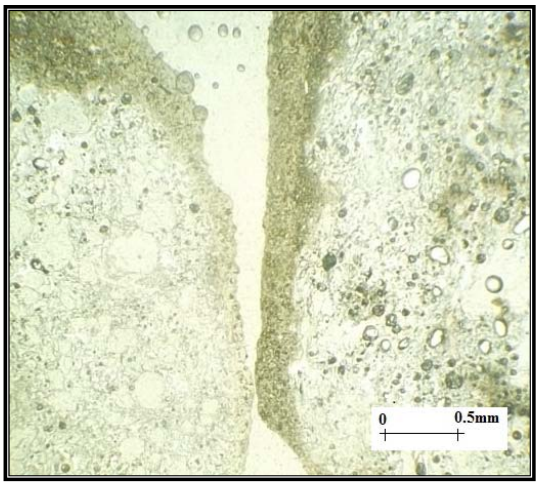
Şekil 4.1. Kontrol agregası tek nikol çekim



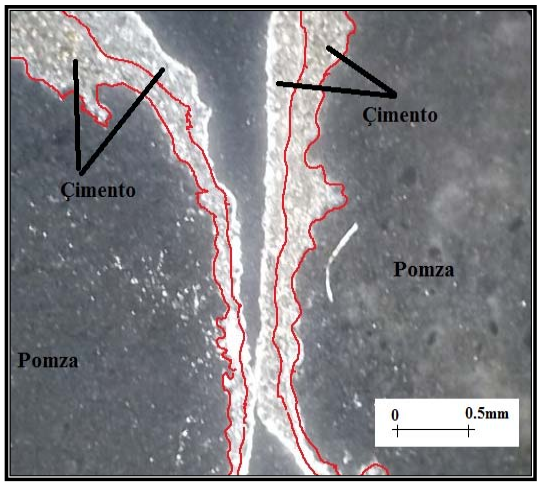
Şekil 4.2. Kontrol agregası çift nikol çekim

- **0-CLM kodlu çimento kaplanmış pomza agregası**

Çimento kaplanmış pomza agregasında ilk kat kaplamanın taneli, ikinci kat kaplamanın daha ince olduğu gözlenmektedir. Kaplama kalınlıklarının kesit hazırlığına bağlı olarak homojen olmama durumu söz konusudur ve kalınlık 0.3-1.8 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.3-4.4).



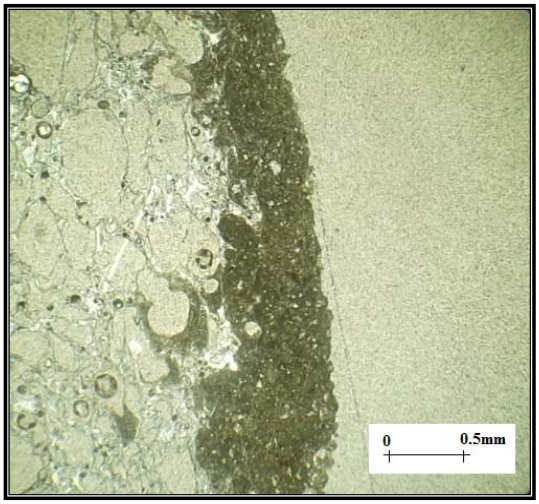
Şekil 4.3. 0-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim



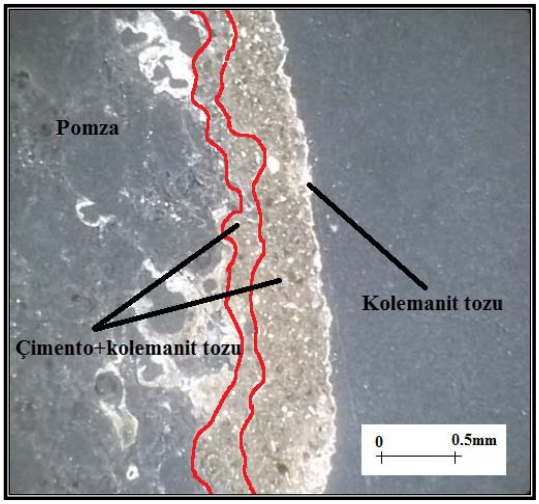
Şekil 4.4. 0-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim

- **7.5-CLM kodlu çimento+kolemanit kaplanmış pomza agregası**

Kaplama kalınlığı 0.6-1.0 mm arasında değişmektedir. Agreganın ince kesit görüntüsü Şekil 4.5-4.6'da verilmiştir.



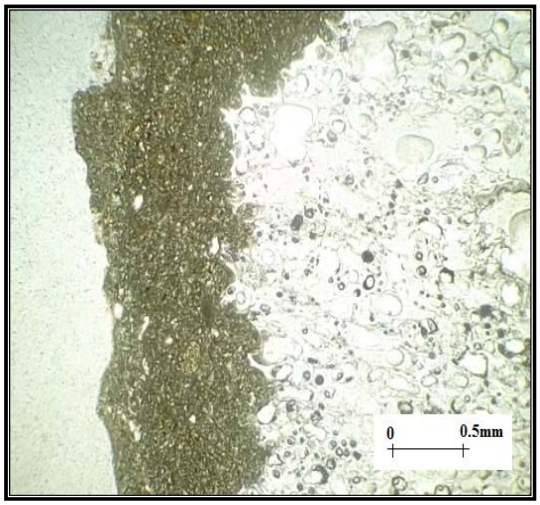
Şekil 4.5. 7.5-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim



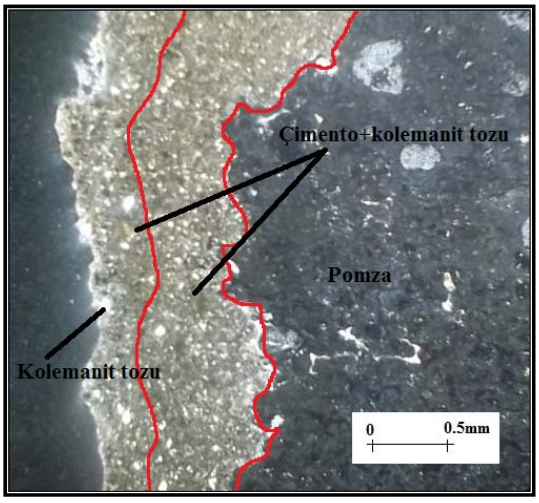
Şekil 4.6. 7.5-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim

- **12.5-CLM kodlu çimento+kolemanit kaplanmış pomza agregası**

Kaplama kalınlığı 0.8-1.2 mm arasında değişmektedir. Agreganın ince kesit görüntüsü Şekil 4.7-4.8'de verilmiştir.



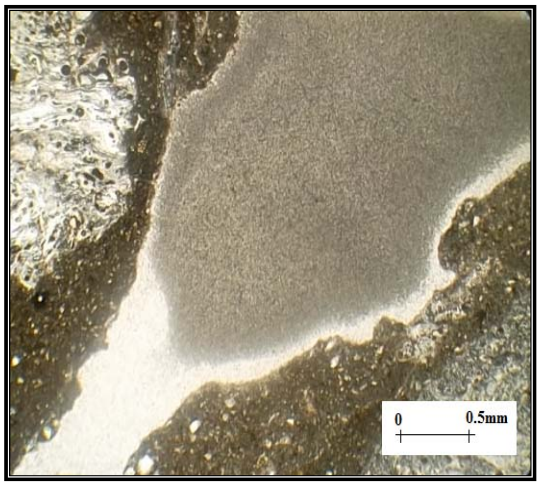
Şekil 4.7. 12.5-CLM kaplı pomza agregası agregası tek nikol çekim



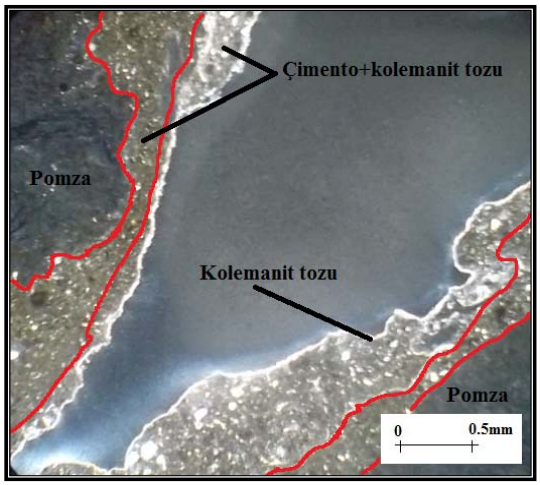
Şekil 4.8. 12.5-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim

- **17.5-CLM kodlu çimento+kolemanit kaplanmış pomza agregası**

Kaplama kalınlığı 0.3-1.0 mm arasında değişmektedir. Agreganın ince kesit görüntüsü Şekil 4.9-4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9. 17.5-CLM kaplı pomza agregası tek nikol çekim



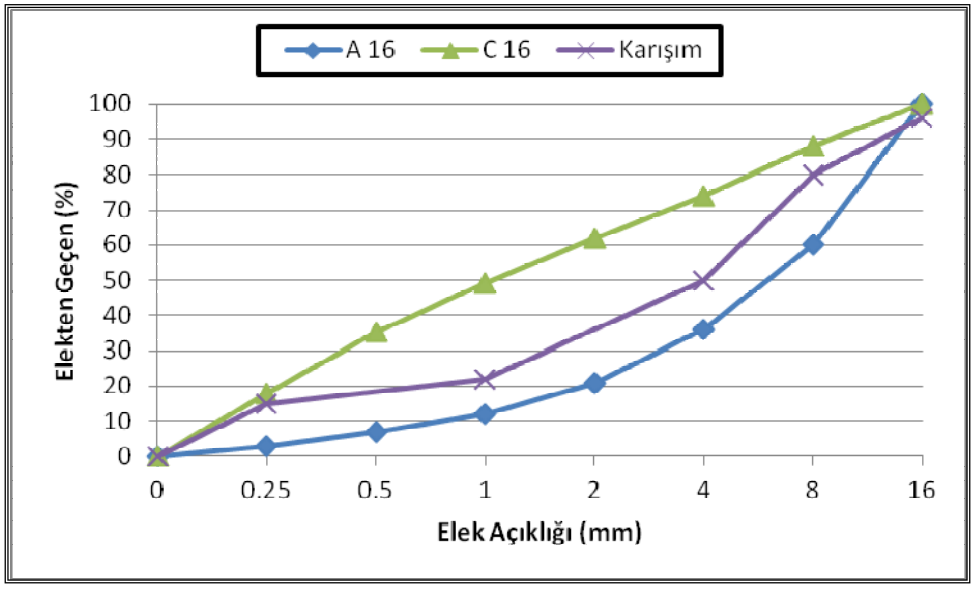
Şekil 4.10. 17.5-CLM kaplı pomza agregası çift nikol çekim

4.3. Agrega Deneyleri

4.3.1. Tane büyüklüğü dağılımı

Ocaktan alınan pomzalar işletmeden yıkanarak getirildiği için yıkama işlemine tabi tutulmamıştır. Agregalar etüvde 60 ºC'de 24 saat kurutulmuştur. Etüv kurusu haline getirilen agregalar TS 3530 EN 933–1 [109] standardına uygun olarak elek analizine tabi tutulmuştur. Çimento ve çimento+kolemanit kaplı agregaların boyut değiştirme ihtimaline karşı, kaplandıktan sonra tekrar elek analizi uygulanarak, agrega granülometrisi TS 706 EN 12620 [110] standardına göre karşılaştırılmış ve karışım granülometri eğrisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Gündüz (2005), tane büyüklüğü dağılımında değerlerin büyük bir çoğunluğunun net olarak tanımlanmadığı veya parametrik değer olarak sınırlandırılmadığı için, çoğu zaman farklı kullanım amaçlarına gidildiğini ifade etmektedir [56].



Şekil 4.11. Karışım granülometri eğrisi

Tane büyüklüğü dağılımı deneyi sonucunda kullanılan pomzanın TS 706 EN 12620 standardına uygun olduğu belirlenmiştir.

4.3.2. Özgül ağırlık

Hafif agregaların kapladığı hacmin hesabında özgül ağırlıklarının kullanılması, agreganın yüksek su emme kapasitesi nedeniyle olanaklı değildir. Özgül ağırlık yerine, nem oranına ve agrega boyutuna bağlı olarak, agreganın su emmesini dikkate alan "özgül ağırlık faktörü" kullanılmaktadır. Özgül ağırlık faktörü, deney sırasında suda kalma süresine de bağlıdır. Bu sürenin 10 dakika olarak sabit alınması, karışım süresine de uygun düşmesi açısından önemlidir [111].

Kaplanmış, kaplanmamış pomza agregası özgül ağırlık faktörü deneyi, agrega ve suyun hacimce yer değiştirme esasına göre yapılmıştır. Deneyde, 500 ml içi su dolu kabın üzerine cam levha kapatılarak ağırlığı (A) belirlenmiştir. Bir miktar su boşaltılan kaba (Pa) ağırlığındaki etüv kurusu agrega konularak üzeri su ile tamamlanmıştır. Hava kabarcığı kalmaması için kabın içerisindeki agrega ince bir çubukla karıştırılmıştır. Su ile tamamen doldurulan kabın üzerine cam levha kapatılmış, agrega ve su dolu kap tartılarak A^1 ağırlığı bulunmuştur. Agregaların özgül ağırlığı Eş. 4.1'e göre hesaplanarak deney sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

$$\delta = Pa / V \ (g/cm^3) \quad (4.1)$$

$$V = Pa + (A - A^1) \ (cm^3)$$

Burada;

δ: Özgül ağırlık (g/cm^3)

V: Agrega hacmi (cm^3)

Pa: Agrega hava kurusu ağırlığı (g)

A: Su dolu kap ağırlığı (g)

A^1: Agrega ve su dolu kap ağırlığı (g)

Tablo 4.2. Özgül ağırlık değerleri

Göz Açıklığı (mm)	**Özgül Ağırlık Değerleri (g/cm^3)**				
	KONTROL	**0-CLM**	**7.5-CLM**	**12.5-CLM**	**17.5-CLM**
0 – 4	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
4 – 8	1.05	1.44	1.44	1.46	1.44
8 – 16	0.96	1.30	1.32	1.34	1.39

Söz konusu tablo incelendiğinde, kaplanmış agregaların özgül ağırlıklarının 0.96–1.46 g/cm^3 arasında olduğu görülmektedir. Bu durumda göz açıklığı 4/8 mm, çimento ve çimento+kolemanit kaplı agregaların özgül ağırlıkları arasında belirgin bir fark olmadığı gözlenmiştir. Kontrol agregalarına göre, 8/16 mm göz açıklığına sahip agregaların özgül ağırlık değerlerinin, çimento+kolemanit kaplaması ile arttığı ve beton üretiminde kullanılacak hafif agregaların özgül ağırlık değeri 2.1 g/cm^3 [56] ile uyum sağladığı ifade edilebilir.

4.3.3. Gevşek birim ağırlık

Gevşek birim ağırlık deneyi için, etüv kurusu durumuna getirilen deney numuneleri, darası alınmış ölçü kabına 5 cm yükseklikten çok olmamak üzere taşarcasına doldurulmuştur. Ölçü kabından taşan agregalar kaptan uzaklaştırılarak yüzeyi el ile düzeltilmiştir. Dolu numune kabı tartılarak ağırlıklar kaydedilmiştir.

TS EN 1097-3'e [112] göre yapılan gevşek birim ağırlık deneyi Eş.4.2'ye göre hesaplanarak deney sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir.

$$\rho_b = (m_2 - m_1) / V \ (kg/m^3) \quad (4.2)$$

Burada;

ρ_b : Gevşek yığın yoğunluğu (kg/m^3)

m_2: Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi (g)

m_1: Boş ölçü kabı kütlesi (g)

V: Ölçü kabının hacmi (dm^3)

Tablo 4.3. Gevşek birim ağırlık

Göz Açıklığı (mm)	**Gevşek Birim Ağırlık Değerleri (kg/m^3)**				
	KONTROL	**0-CLM**	**7.5-CLM**	**12.5-CLM**	**17.5-CLM**
0 – 4	1590	1590	1590	1590	1590
4 – 8	501	688	673	656	640
8 – 16	401	621	613	615	619

Chandra ve Berntsson (2003), tane boyutlarına göre agrega gevşek birim ağırlık değerlerinin 480 – 880 kg/m^3 [79] ve Cengizkan ve Ersoy (1999), Nevşehir pomzasının kuru birim hacim ağırlıklarının 0/7 mm agrega grubu için 670 kg/m^3, 7/15 mm agrega grubu için 575 kg/m^3 arasında olduğunu belirtmişlerdir [111].

Tablo 4.3 incelendiğinde, gevşek birim ağırlıkların 4/8 mm göz açıklığına sahip agregalarda 501- 688 kg/m^3 ve 8/16 mm göz açıklığına sahip agregalarda 401- 621 kg/m^3 olduğu belirlenmiştir. Sonuçların, kaplanmamış 8/16 mm göz açıklığına sahip pomza agregası hariç diğer agregaların literatürde belirtilen 480–880 kg/m^3 [79] değerleri arasında olduğu görülmektedir.

4.3.4. Su emme oranı

Su emme oranı tayini için hazırlanan deney numuneleri piknometrede bulunan suya daldırılarak 24 saat süreyle tutulmuştur. Sudan çıkarılan agregalar kuru bez üzerine aktarılarak üzerindeki su filmlerinin uzaklaştırılması için (direk güneş ve ısı

kaynağından koruyarak) atmosfere maruz bırakılmıştır. Doygun ve yüzeyi kuru deney numunesi bir tepsiye aktarılarak tartılmış (m_1) ve sonrasında 110±5° C'lik etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur (m_2). TS EN 1097-6'ya [113] uygun olarak yapılan su emme oranı tayini Eş. 4.3'e göre hesaplanarak, 10 dk., 30 dk., 60 dk. ve 1440 dakikalık su emme yüzdeleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

$$W_a = [100 \times (m_1 - m_2)] / m_2 \quad (4.3)$$

Burada;

W_a: Su emme oranı (%)

m_1: Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g).

m_2: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g).

Tablo 4.4. Agrega su emme oranı

Süre (dk.)	**Göz Açıklığı (mm)**	**Agrega Su Emme Oranı (%)**				
		KONTROL	**0-CLM**	**7.5-CLM**	**12.5-CLM**	**17.5-CLM**
10	**4-8**	19	11	12	11	12
	8-16	27	12	13	14	13
30	**4-8**	20	11	12	11	12
	8-16	30	13	14	15	14
60	**4-8**	20	12	12	12	13
	8-16	32	13	15	15	15
1140	**4-8**	27	13	14	13	15
	8-16	38	16	17	19	17

Newman ve Owens (2003), pomzaların su emme oranlarının %30-40 arasında olduğunu belirtmiştir [83]. Ayrıca, Gündüz (2005), pomza agregalarında genelde arzu edilen 24 saatlik su emme yüzdelerinin, ince agregada %20, iri agregada %30 civarında bir değer olduğunu ve bu oranların agreganın alındığı yere, granülometrisine ve tane çapına göre artış sağlayabileceğini ifade etmiştir [56].

Agregaların 24 saatlik su emme yüzdeleri incelendiğinde; 4/8 mm göz açıklığına sahip kontrol agregaların su emme oranlarının %27 olduğu görülmektedir. Kontrol agregasına göre su emme yüzde değerleri; 0-CLM agregalarında %48, 7.5-CLM

agregalarında %52, 12.5-CLM agregalarında %48, 17.5-CLM agregalarında %56 azalmıştır. 8/16 mm göz açıklığına sahip agrega grupları incelendiğinde, kontrol agregası su emme değerinin %38 olduğu, buna göre su emme oranının 0-CLM agregalarında %42, 7.5-CLM agregalarında %45, 12.5-CLM agregalarında %50 ve 17.5-CLM agregalarında ise %45 azaldığı görülmüştür.

Agregaların tane çaplarına göre su emme yüzdeleri incelendiğinde; kontrol agregaların tane çapları arttıkça su emme yüzdelerinin arttığı görülmüştür. Ancak agregalar çimento ve çimento+kolemanit kaplandıktan sonra tane çapları arasındaki su emme farkının azaldığı, dolayısıyla agregalar kaplandıktan sonra tane boyutunun su emme üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu görülmüştür. Değerlerin literatürde verilen [56, 83] %30-40 su emme yüzdelerini geçmediği belirlenmiştir.

4.3.5. Agrega darbe katsayısı (Impact value)

Agrega darbe katsayısı, agreganın şok veya darbeye karşı direnci için bağıl bir ölçüdür. Bazı agregalar için yavaş olarak tatbik edilen basma yüküne karşı dirençten farklı değerdedir. Deney için Şekil 4.12'de görülen agrega darbe katsayısı tayini aleti kullanılmıştır. Standart agrega darbe katsayısı deneyi, 14 mm (BS) deney eleğinden geçip 10 mm (BS) deney eleği üzerinde kalan malzemeye uygulanmıştır [114].



Şekil 4.12. Agrega darbe katsayısı deneyi

Deney için kullanılacak kuru agregalar tartılarak (A), iç çapı 102 mm, iç derinliği 50 mm ve yanal yüzey et kalınlığı 6 mm olan çelik silindir kabın içerisine 3 tabakada konulmuş ve her tabaka şişleme çubuğu ile 25 darbe yapılarak sıkıştırılmıştır. Darbe çekicinin yüksekliği agreganın üst yüzeyinden 380 ± 5 mm yukarıda olacak şekilde alet üzerindeki yerine getirilerek kilitlenmiş ve sonrada kap içindeki agrega üzerine birer saniyelik aralıklarla agrega üzerine 15 defa düşürülmüştür. Sıkıştırma işleminin sonucunda, kaptaki malzeme 2.36 mm (BS) elekten elenerek elekten geçen malzemenin ağırlığı tespit edilmiştir (B). Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesi Eş. 4.4'e göre hesaplanarak [114] deney sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

$$\text{Ufalanma yüzdesi} = (B / A) \times 100 \qquad (4.4)$$

Burada;

A: Kuru malzeme kütlesi (g)

B: Ufalanan malzemeyi ayırmak için kullanılan elekten geçen malzemenin kütlesi (g).

Tablo 4.5. Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesi

Göz Açıklığı (mm)	**Agrega Darbe Katsayısı Ufalanma Yüzdesi (%)**				
	KONTROL	**0-CLM**	**7.5-CLM**	**12.5-CLM**	**17.5-CLM**
10 – 14	51.4	40.0	53.2	46.6	49.8

Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesi kontrol numunelerine göre, 0-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM'de sırasıyla %22, %9 ve %3 azalma meydana gelirken, 7.5-CLM numunesinde %4 artmıştır. Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesinin 30'dan büyük çıkması anormal bir sonuç olarak değerlendirilmektedir [114]. Literatürde hafif agregaların darbe katsayısı deneyinde (Impact value) kolaylıkla kırılabileceği belirtilmiştir [79]. Yinede sonuçlara göre, 0-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM kaplamalarının agrega dayanımını arttırdığı belirlenmiştir.

4.3.6. Agrega kırılma katsayısı (Crushing value)

Agrega kırılma değeri (katsayısı) kademeli olarak uygulanan basınç yükü altında agreganın kırılmaya karşı gösterdiği direncin bir bağıl ölçüsünü verir. Deneyde 150

mm iç çaplı, her iki ucu da açık çelik silindir alet kullanılıştır. Aletin altına taban plakası konulmuştur. Deney için kullanılacak kuru agregalar tartılarak (A) çelik silindir içerisine üç tabakada yerleştirilmiş ve her tabaka şişleme çubuğu ile 25 darbe yapılarak sıkıştırılmıştır. Deney silindiri Şekil 4.13'te görüldüğü gibi basınç makinesi çeneleri arasına yerleştirilmiştir. Deney presinin yük artış hızı 10 dakika içinde 400 kN yüke erişecek şekilde ayarlanmıştır. Yük boşaltıldıktan sonra agrega kütlesi temiz bir kap içerisine alınmıştır. Sıkıştırma işleminin sonucunda, kaptaki malzeme 2.36 mm (BS) elekten elenerek, elekten geçen malzemenin ağırlığı tespit edilmiştir (B). Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesi Eş. 4.5'e göre hesaplanarak [114] deney sonuçları ve deney sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.13. Agrega kırılma katsayısı deneyi

$$\text{Ufalanma yüzdesi} = (B / A) \times 100 \quad (4.5)$$

Burada;

A: Kuru malzeme kütlesi (g)

B: Ufalanan malzemeyi ayırmak için kullanılan elekten geçen malzemenin kütlesi (g).

Tablo 4.6. Agrega kırılma katsayısı ufalanma yüzdesi

Göz Açıklığı (mm)	Agrega Kırılma Katsayısı Ufalanma Yüzdesi (%)				
	KONTROL	0-CLM	7.5-CLM	12.5-CLM	17.5-CLM
10 – 14	63.0	67.2	64.3	42.9	49.8

Agrega darbe katsayısı ufalanma yüzdesi kontrol numunelerine göre, 12.5-CLM ve 17.5-CLM'de sırasıyla %32 ve %21 azalma meydana gelirken, 0-CLM ve 7.5-CLM'de sırasıyla %7 ve %2 artış meydana gelmiştir. Agrega kırılma katsayısı ufalanma yüzdesinin 30'dan büyük çıkması anormal bir sonuç olarak değerlendirilmektedir [114]. Çalışmada, agreganın darbe ve kırılma katsayısı ufalanma yüzdesinin azalması, basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

4.4. Taze Beton Deneyleri

4.4.1. Çökme (Slump)

Taze betonda işlenebilirliğin tespiti amacıyla TS EN 12350–2'ye uygun olarak çökme hunisi metodu ile kıvam deneyi yapılmıştır [115]. Taze beton, çökme hunisine üç eşit tabakada ve her tabakası 25 kez şişleme çubuğu ile şişlenerek doldurulmuştur. Doldurulan çökme hunisi yukarıya doğru çekilerek betonun kendi ağırlığı altında yayılması sağlanmıştır. Huni yayılan betonun yanına konularak çökme miktarı belirlenmiştir. TS EN 206-1'e göre çökme sınıfları Tablo 4.7'de verilmiştir [84].

Tablo 4.7. Çökme sınıfları

Sınıf	Çökme Miktarı (mm)
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

Çökme değerleri 20 - 90 mm olarak değişen karışımların çökme sınıfı, TS EN 206-1'e göre [84] S2 (50-90 mm) olarak belirlenmiştir.

4.4.2. Birim ağırlık

Taze betonda birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 standardına uygun olarak yapılmıştır [116]. Deneyde taze beton üç tabaka halinde ölçü kabına yerleştirilmiş ve her tabaka 25'er kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Her sıkıştırma işleminden sonra kalan boşlukların dolması sağlanıncaya kadar kabın dış kenarlarına tokmakla hafifçe vurulmuştur. Ölçü kabı üzerindeki fazla beton, sıyırma cetveli ile tesviye edilerek dolu kap tartılmıştır. Taze betonun yoğunluğu Eş.4.6'ya göre hesaplanarak deney sonuçları Tablo 4.8'de verilmiştir.

$$D = (m_2 - m_1) / V \ (kg/m^3) \quad (4.6)$$

Burada;

D: Taze betonun yoğunluğu (kg/m^3)

m_1: Kabın kütlesi (kg)

m_2: Kabın içerisindeki beton numune ile birlikte toplam kütlesi (kg)

V: Kabın hacmi (m^3)

Tablo 4.8. Taze betonların birim ağırlık deney sonuçları

Karışımlar	Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m^3)
KONTROL	1806
0-CLM	1858
7.5-CLM	1931
12.5-CLM	1957
17.5-CLM	1939

Üretilen taze betonların birim ağırlıklarının 1806 kg/m³ ile 1957 kg/m³ arasında değiştiği görülmüştür. Kaplama yoğunluğunun agrega özgül ağırlığını etkilenmesi sonucu, kontrol numuneleri birim ağırlığının, çimento ve çimento+kolemanit kaplı agregalardan elde edilen taze beton numunelerine göre düşük çıkmasına sebep olmuştur. Kontrol numunelerine göre birim ağırlık; 0-CLM numunelerinde %3, 7.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinde %7 ve 12.5-CLM numunelerinde %8 artmıştır.

4.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.5.1. Kuru birim ağırlık

Kuru birim ağırlık deneyi 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler 48 saat su küründe bekletildikten sonra etüvde 110 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan numuneler hassas terazide tartılarak boyutları kumpasla ölçülmüş ve kuru birim hacim ağırlıkları Eş.4.7'ye göre hesaplanarak deney sonuçları Tablo 4.9'da verilmiştir.

$$Sk = W / V \quad (kg/m^3) \tag{4.7}$$

Burada;

Sk: Sertleşmiş betonun kuru birim ağırlığı (kg/m^3)

W: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg)

V: Numune hacmi (m^3)

Tablo 4.9. Kuru birim ağırlık deney sonuçları

Karışımlar	**Birim Ağırlığı (kg/m^3)**
KONTROL	1664
0-CLM	1898
7.5-CLM	1836
12.5-CLM	1869
17.5-CLM	1887

Hafif betonun birim hacim kütlesine göre sınıflandırılmasında TS EN 206-1 standardında verilen sınıflar uygulanmaktadır (Tablo 4.10) [84]. Hafif betonların kuru birim ağılıkları, Norveç'te 1200–2200 kg/m^3, Amerika ve Avustralya'da en fazla 1800 kg/m^3, Rusya'da 800–200 kg/m^3 ve Avrupa standardında 900–2000 kg/m^3 arasında değişmektedir [83].

Tablo 4.10. Hafif betonun birim hacim kütlesine göre sınıflandırılması

Birim hacim kütlesi sınıfı	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Birim hacim kütle sınırları (aralığı) kg/m^3	≥ 800 ve ≤ 1000	> 1000 ve ≤ 1200	> 1200 ve ≤ 1400	> 1400 ve ≤ 1600	> 1600 ve ≤ 1800	> 1800 ve ≤ 2000

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin birim ağırlık değerleri 1664 ile 1898 kg/m³ arasında değişmektedir. Kuru birim ağırlık deney sonuçları incelendiğinde, en düşük birim ağırlık kontrol numunelerinden, en yüksek birim ağırlık 0-CLM numunelerinden elde edilmiştir. 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinin birim ağırlıklarının kontrol numunelerinden yüksek ve 0-CLM numunelerinden düşük çıkması agrega kaplamasında kullanılan çimento+ kolemanit kaplamasındaki kolemanit miktarı artışının agrega ağırlığını azaltması şeklinde yorumlanmıştır. Elde edilen birim ağırlık değerlerinin literatürde verilen üst sınırı (2000 kg/m³) geçmediği görülmüştür [83, 84].

4.5.2. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyi 100x200 mm boyutlu silindir numunelere TS EN 12390–3 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [118]. Toplam 45 adet numune 7, 28, 90 günlük kür süreleri sonunda kırılmak üzere üretilmiştir. Deneyde 3000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda üniteli ve yükleme hızı ayarlanabilen tek eksenli beton basınç test cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.14). Beton numunelerin basınç dayanımları Eş. 4.8'e göre hesaplanarak, 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçları Tablo 4.11'de, sonuçlara ait grafiksel gösterim Şekil 4.15'te verilmiştir.

$$F_c = F / A_c \qquad (4.8)$$

Burada;

Fc: Basınç dayanımı (MPa)

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N)

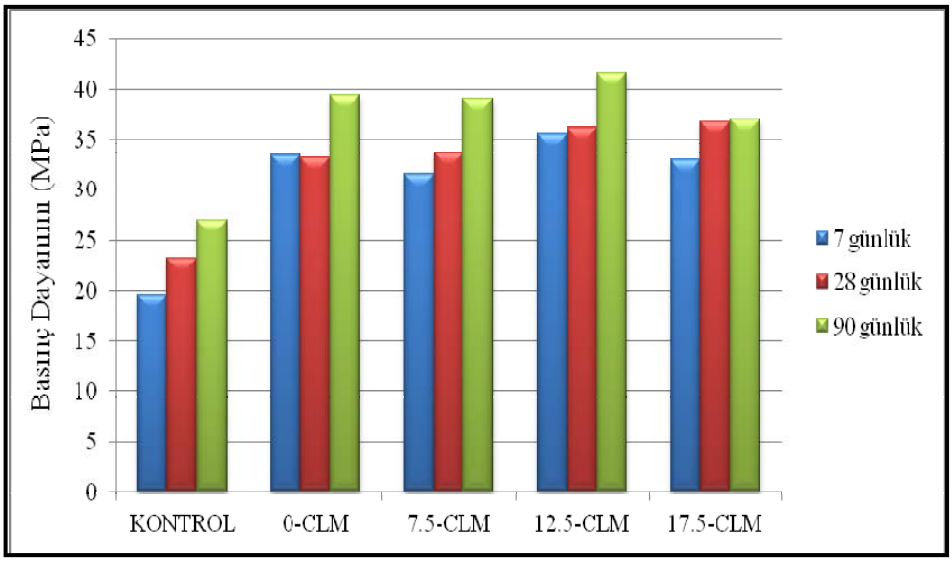
Ac: Numunenin en kesit alanı (mm^2)



Şekil 4.14. Deneyde kullanılan tek eksenli basınç test cihazı

Tablo 4.11. Beton numunelerin basınç dayanımları

Karışımlar	Basınç Dayanımları					
	7 gün		28 gün		90 gün	
	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%
KONTROL	19.5	100	23.2	100	27.1	100
0-CLM	33.4	171	33.2	143	39.5	146
7.5-CLM	31.6	162	33.7	145	39.1	144
12.5-CLM	35.5	182	36.2	156	41.7	154
17.5-CLM	33.0	169	36.8	159	37.0	137

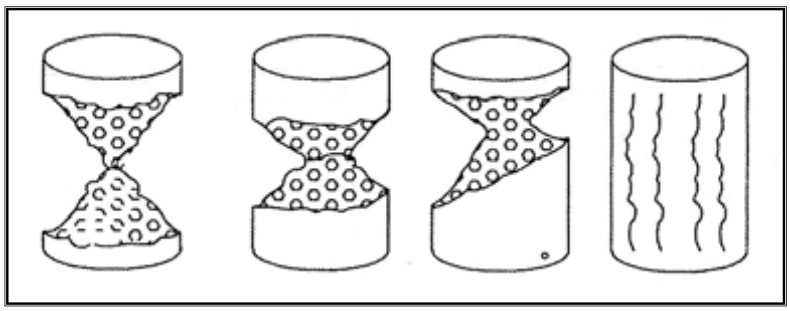


Şekil 4.15. Beton numunelerin basınç dayanımları grafiği

Gönül (2008), kırılma şekillerinin, genel dağılım içerisinde;

- En yüksek dayanıma sahip olan numunelerin; parçalanarak,
- Orta dayanıma sahip olan numunelerin; ikiye ayrılarak, derin bir şekilde fakat parçalanmadan yarılarak veya numuneden parçacıklar koparak,
- Alt dayanımda olanların; dikey doğrultuda çatlayarak hasarın gerçekleştiğini, tüm bu kırılma şekillerin; üretilen beton serilerinin dayanımları, enerji yutma kapasitelerinin de bir göstergesi olduğunu belirtmiştir [119].

TS EN 12390-3 standardında silindir numunelerin kırılma tipine ait örnekler Şekil 4.16'da verilmiştir [118]. TS EN 206-1'e göre, hafif betonların basınç dayanımları silindir numunelerde 8–80 MPa ve küp numunelerde 9–88 MPa arasında değer almaktadır [84].



Şekil 4.16. TS EN 12390-3'e göre silindir numunelerin kırılma şekilleri

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarında en yüksek değer 12.5-CLM (35.5 MPa) ve en düşük değer kontrol (19.5 MPa) numunelerinden elde edilmiştir. 28 ve 90 günlük en yüksek basınç dayanım değerleri 17.5-CLM (36.8MPa) ve 12.5-CLM (41.7 MPa) numunelerinden, en düşük basınç dayanım değerleri ise kontrol (23.2 MPa ve 27.1 MPa) numunelerinden elde edilmiştir.

Kontrol numunelerine göre 7, 28 ve 90 günlük beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. 7 günlük beton numunelerde; 0-CLM'de %71, 7.5-CLM'de %62, 12.5-CLM'de %82 ve 17.5-CLM'de %69, 28 günlük numunelerde 0-CLM'de %43, 7.5-CLM'de %45, 12.5-CLM'de %56 ve 17.5-CLM'de %59, 90 günlük numunelerde ise 0-CLM'de %46, 7.5-CLM'de %44, 12.5-CLM'de %54 ve 17.5-CLM'de %37 artmıştır.

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin basınç dayanımları kendi aralarında da incelenmiştir. 7 günlük numunelere göre; kontrol numunelerinde 28 günde %19, 90 günde %39 artış, 0-CLM numunelerinde 28 günde %1 azalma, 90 günde %18 artış, 7.5-CLM numunelerinde 28 günde %2, 90 günde %18 artış, 17.5-CLM numunelerinde ise 28 günde %12, 90 günde %12 arttığı tespit edilmiştir.

TS EN 206-1'e göre [84], hafif beton kontrol numunelerinin LC 25/28, 0-CLM, 7.5-CLM ve 17.5-CLM hafif beton numunelerinin LC 35/38 ve 12.5-CLM hafif beton numunelerinin ise LC 40/44 dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir.

4.5.3. Yarmada çekme dayanımı

Deney TS EN 12390–6 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır [120]. Her bir deney serisi için 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda kırılmak üzere 100x200mm silindir boyutlarında toplam 45 adet silindir numune hazırlanmıştır. Numunelerin yük uygulama yerlerini belirlemek için, numune boyunca, eksenel düzlemde, çapın her iki tarafına karşılıklı olarak, silindirin yan yüzlerine iki çizgi çizilmiştir. Bu çizgilerin uçları yükleme yerlerinin belirlenebilmesi için, alt ve üst tabanda birleştirilmiştir. Deney numunesi, sabitleme cihazı kullanılarak, makineye tam merkezlenmek suretiyle, sıkıştırma şeritleriyle numunenin yükleme düzleminde üst ve alt kısmı boyunca dikkatlice yerleştirilmiştir. Makinenin alt ve üst yükleme başlıklarının, yükleme esnasında birbirine paralel olması sağlanmıştır. Deney sonucu numune görüntüleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Yarmada çekme dayanımının hesaplanmasında Eş. 4.9 kullanılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.12'de ve grafik gösterimi Şekil 4.18'de verilmiştir.

$$f_{ct} = 2 \times F / (3.14 \times L \times d) \quad (4.9)$$

Burada;

f_{ct}: Yarmada çekme dayanımı (MPa)

F: En büyük yük (N)

L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu (mm),

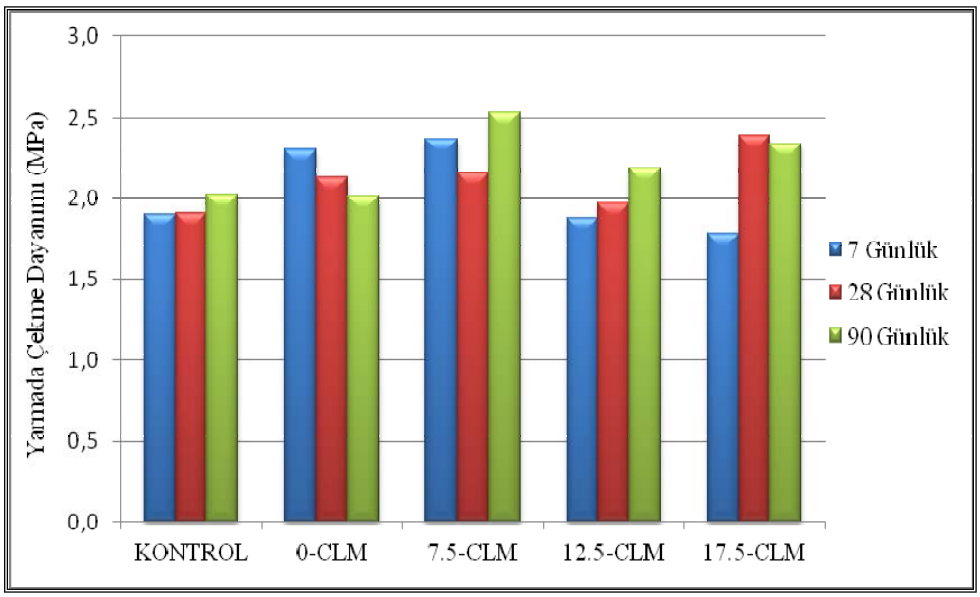
D: Numunenin seçilen en kesit boyutu (mm)



Şekil 4.17. Yarmada çekme deneyi sonucu numune görüntüleri

Tablo 4.12. Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları

Karışımlar	7 günlük				28 günlük				90 günlük			
	Basınç Dayanımı		Yarmada Çekme Day,		Basınç Dayanımı		Yarmada Çekme Day,		Basınç Dayanımı		Yarmada Çekme Day,	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
KONTROL	19,5	100	1,90	100	23,2	100	1,91	100	27,1	100	2,02	100
0-CLM	33,4	171	2,30	121	33,2	146	2,13	112	39,5	146	2,01	99
7,5-CLM	31,6	162	2,37	125	33,7	144	2,16	113	39,1	144	2,53	125
12,5-CLM	35,5	182	1,88	99	36,2	154	1,97	103	41,7	154	2,19	108
17,5-CLM	33,0	169	1,78	94	36,8	137	2,39	125	37,0	137	2,34	116



Şekil 4.18. Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları grafiği

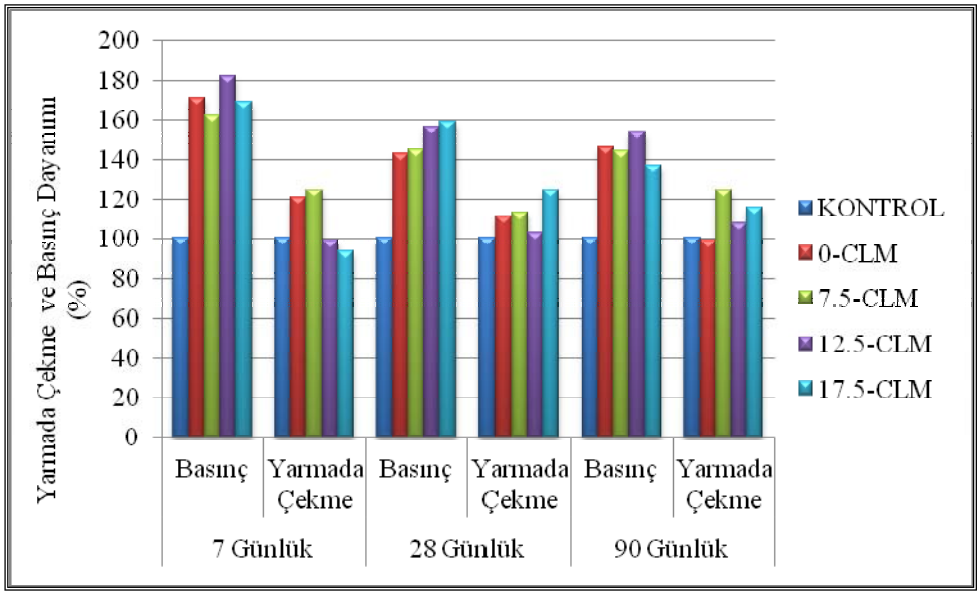
Postacıoğlu (1987), beton üretiminde herhangi bir kusurun işlenmesinin çekme mukavemeti değerinin düşmesine yol açtığı ve bu nedenle çekme mukavemetinin bilinmesinde fayda olduğunu belirtmiştir. Ayrıca betonların çekme mukavemetinin dolaylı ve dolaysız olmak üzere iki türde bulunabildiğini ve dolaylı deneylerin birinin de yarma metodu olduğunu ifade etmiştir [41]. Tamamı hafif agrega ile üretilen hafif betonların yarmada çekme dayanımları 2.0–2.2 MPa arasında değişmektedir [121]. Hossain (2004), pomza agregası ile elde ettiği hafif betonların yarmada çekme dayanımlarını 2.2-3.7 MPa arasında olduğunu ifade etmiştir [122]. Ulusu (2007), perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların yarmada çekme dayanımları basınç dayanımlarının %8-11'i, Gao vd. (1997) yüksek dayanımlı hafif betonun yarmada çekme dayanımı basınç dayanımının %5.7'si ve Haque vd. (2004), ürettikleri hafif betonların yarmada çekme dayanımlarını basınç dayanımının %6.5'i olduğunu belirlemişlerdir [19, 123, 124].

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin 7 günlük yarmada çekme dayanımlarında en yüksek dayanım değeri 7.5-CLM numunelerinden (2.37 MPa) ve en düşük dayanım değeri 17.5-CLM numunelerinden (1.78 MPa), 28 günlük en yüksek yarmada çekme dayanımı 17.5-CLM numunelerinden (2.39 MPa) ve en düşük dayanımı kontrol numunelerinden (1.91 MPa), 90 günlük numunelerde ise en yüksek dayanım 7.5-CLM (2.53 MPa) ve en düşük dayanım 0-CLM numunelerinden (2.01 MPa) elde edilmiştir.

Kontrol numunelerine göre 7 günlük numuneler karşılaştırıldığında; 0-CLM'de %21 ve 7.5-CLM'de %25 artış, 12.5-CLM'de %1 ve 17.5-CLM'de %6 azalma, 28 günlük numunelerde 0-CLM'de %12, 7.5-CLM'de %13, 12.5-CLM'de %3 ve 17.5-CLM %25 artış, 90 günlük numunelerde ise 0-CLM'de %1 azalma, 7.5-CLM'de %25, 12.5-CLM %8 ve 17.5-CLM %16 artış gözlenmiştir.

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin yarmada çekme dayanımları kendi aralarında incelenmiştir. 7 günlük numunelere göre; kontrol numunelerinde 28 günde %1, 90 günde %10 artış, 0-CLM numunelerinde 28 günde %7, 90 günde %12 azalma, 7.5-CLM numunelerinde 28 günde %9 azalma, 90 günde %7 artış, 12.5-CLM numunelerinde 28 günde %5, 90 günde %17 artış, 17.5-CLM numunelerinde ise 28 günde %34 ve 90 günde %32 artış

gerçekleştiği gözlenmiştir. Şekil 4.19'da yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.19. Yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin yarmada çekme dayanımları basınç dayanımlarının %5-10'u arasında değişmiştir. Sonuçların literatürle [19, 121, 123, 124] uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4.5.4. Su emme oranı

Sertleşmiş betonda su emme deneyi TS 3624 standardına uygun olarak yapılmıştır [125]. Deney için 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Kür sonunda (28 gün) su emme deneyine tabi tutulan numuneler tartıldıktan sonra 24 saat 110 ºC sıcaklıktaki bir etüvde (sabit sıcaklığa gelinceye kadar) kurutulmuştur. Etüv kurusu ağırlık değeri (As) belirlenen numuneler (20–25ºC'ye kadar soğutularak), 24 saat 21±2ºC sıcaklıktaki su içine batırılarak bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numune yüzeylerinin ıslaklığı kuru bir bez ile silinerek doygun kuru yüzeyli numune ağırlığı (Bs) kaydedilerek hesaplamasında Eş. 4.10 kullanılmıştır. 28 günlük hafif betonun su emme deneyi ile ilgili veriler Tablo 4.13'te ve Şekil 4.20'de verilmiştir.

$$m_1 = (Bs - As) / As \times 100\ \% \qquad (4.10)$$

Burada;

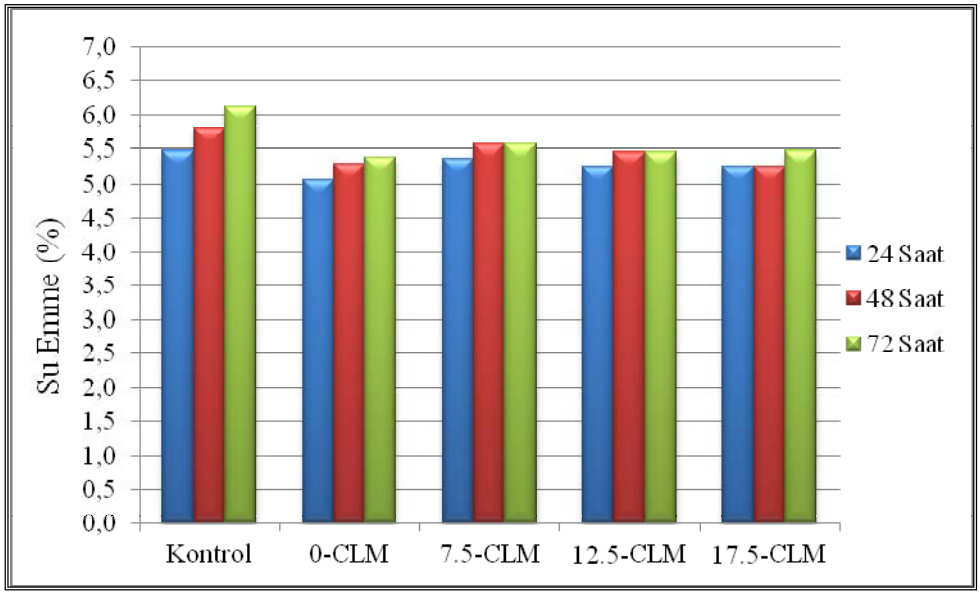
m_1: Ağırlıkça su emme oranı (%)

As: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g)

Bs: Doygun kuru yüzeyli numune ağırlığı (g)

Tablo 4.13. Beton numunelerde su emme ağırlıkları

Karışımlar	Etüv Kurusu Ağırlığı (g)	Su Emme					
		24 saat		48 saat		72 saat	
		Ağırlık (g)	(%)	Ağırlık (g)	(%)	Ağırlık (g)	(%)
KONTROL	1866	1968	5.5	1974	5.8	1980	6.1
0-CLM	1894	1990	5.1	1994	5.3	1996	5.4
7.5-CLM	1938	2042	5.4	2046	5.6	2046	5.6
12.5-CLM	1904	2004	5.3	2008	5.5	2008	5.5
17.5-CLM	1826	1922	5.3	1922	5.3	1926	5.5



Şekil 4.20. Beton numunelerin su emme grafiği

Ulusu (2007), su emme oranı üzerinde en etkili parametrelerin, agrega boşluk yapısı ve miktarının, su/çimento oranının ve bağlayıcı miktarının olduğunu [19], Neville

(1994) ve Aicitin (1998)'e de [126, 127] atıf yaparak durabilitesi yüksek hafif betonların maksimum su emme oranının %10 ile sınırlandığını belirtmiştir.

28 günlük beton numunelerin su emme oranları 24, 48 ve 72 saat olarak incelendiğinde kaplı agregalarla üretilen numunelerin ortalama %5 su emdiği, kontrol numunelerin ise %6 su emdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.20'den görüleceği üzere zaman ilerledikçe numunelerin su emme oranlarının da doğrusal bir şekilde arttığı gözlenmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında agreganın çimento ve çimento+kolemanit kaplanmasının su emme oranını belirgin şekilde değiştirmediği gözlenmiştir.

4.5.5. Kılcal su emme

Deneyde 100x100 mm'lik silindir numuneler etüv kurusu haline getirilmiştir. Numunelerin suya değen kısımları hariç, diğer yüzeylerinden su emmesini önlemek için parafin ile kaplanmıştır. Numunelerin kuru ağırlıkları belirlendikten sonra kaplanmayan yüzü suyla temas edecek şekilde içi su dolu, ızgaralı tepsiye yerleştirilmiştir (Şekil 4.21). Numunelerin 60, 240, 540, 960, 1500, 2160, 2940, 3840 saniye sürelerinde 0.1g hassasiyetle ağırlıkları kaydedilerek Eş. 4.11'de verilen formülle kılcallık katsayısı hesaplanmıştır. Üretilen beton numunelerin 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı (k) Tablo 4.14'te, kılcal su emme grafik gösterimleri Şekil 4.22 ve 4.23'te verilmiştir.

$$Q/A = k\sqrt{t} \tag{4.11}$$

Burada;

Q: Kılcal yolla emilen su miktarı (cm^3)

A: Suyun temas ettiği yüzey alanı (cm^2)

t: Zaman (s)

k: Kılcal su emme katsayısı ($cm/s^{1/2}$)



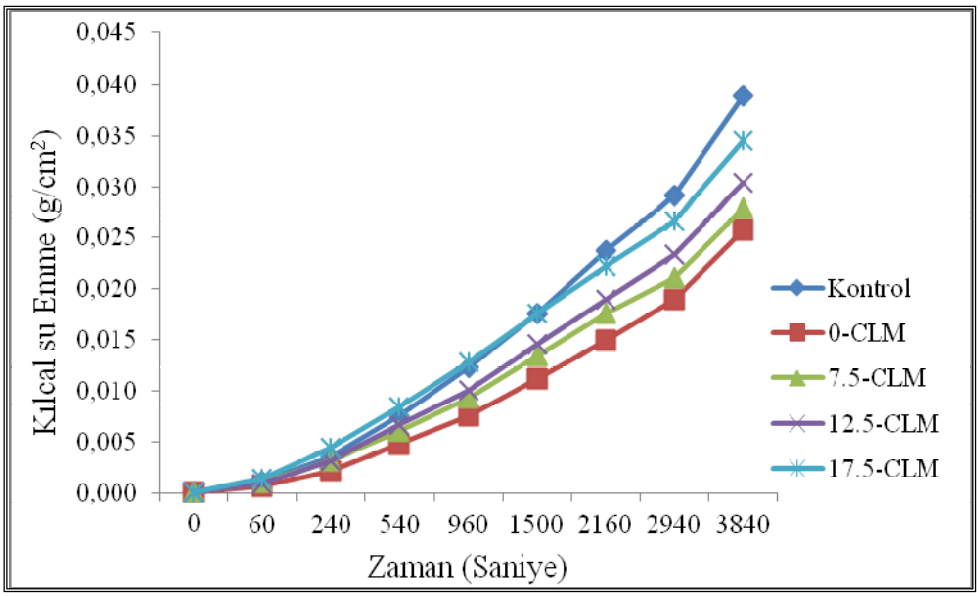
Şekil 4.21. Kılcal su emme deneyi

Tablo 4.14. Kılcal su emme katsayıları

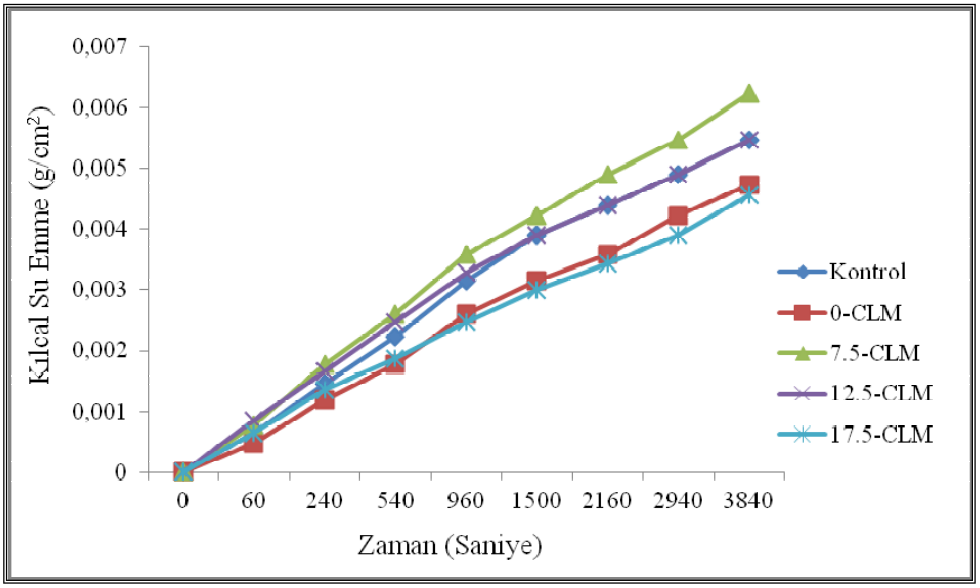
Süre (sn.)	Kılcal Su Emme Katsayısı (k)(10^{-5}) cm/sn$^{1/2}$									
	KONTROL		0-CLM		7.5-CLM		12.5-CLM		17.5-CLM	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	1.97	1.08	0.98	0.78	1.69	1.31	1.56	1.43	2.27	1.08
240	1.49	0.61	0.88	0.49	1.31	0.74	1.31	0.69	1.83	0.57
540	1.39	0.41	0.88	0.33	1.12	0.48	1.23	0.46	1.56	0.35
960	1.28	0.33	0.78	0.27	0.98	0.37	1.05	0.34	1.34	0.26
1500	1.17	0.26	0.74	0.21	0.90	0.28	0.98	0.26	1.17	0.20
2160	1.10	0.20	0.69	0.17	0.81	0.23	0.88	0.20	1.03	0.16
2940	0.99	0.17	0.64	0.14	0.72	0.19	0.79	0.17	0.90	0.13
3840	1.01	0.14	0.67	0.12	0.72	0.16	0.79	0.14	0.90	0.12

Kılcallık, küçük boşlukların yüzey gerilmelerinden dolayı suyu çekmesinden oluşmaktadır. Betondaki birbiriyle bağlantılı küçük boşluklardaki yüzey gerilim kuvvetlerinden dolayı su, betonun kuru olan kısımlarına doğru çekilmektedir. Kılcal boşlukların çapları küçüldükçe kılcal su yüksekliği daha fazla olmaktadır. Betondaki kılcal su hareketiyle yabancı iyon ve moleküllerde taşınmaktadır [128]. Kabay (2009), yaptığı deneysel çalışmada basınç dayanımına etki eden esas faktörün kapiler boşlukların ve çapı 200 µm'nin üzerinde olan boşlukların olduğunu tespit etmiştir [129]. Wang vd. (1997), 300-400 µm çaplı çatlaklı betonlarda su geçirimliliği 10^{-3}- 10^{-2} cm/sn ve çatlak olmayan numunelerde 10^{-10}-10^{-9} cm/sn olduğunu belirtmişlerdir [130].

Hossain vd. (2011), pomza içeren farklı karışım oranlarındaki çimentolu hafif betonlarda, 12 haftalık kılcal su emme katsayılarını, hafif betonlarda 2.5-4.2x10^{-5} cm/sn$^{1/2}$ ve yarı hafif betonlarda 3.0-3.5x10^{-5} cm/sn$^{1/2}$ bulmuşlardır [131].



Şekil 4.22. Beton numunelerde 28 günlük kılcal su emme grafiği



Şekil 4.23. Beton numunelerde 90 günlük kılcal su emme grafiği

Elde edilen verilere göre, kılcal su emme katsayıları 28 günlük numunelerde 0.67-1.01x10^{-5} cm/s$^{1/2}$, 90 günlük numunelerde 0.12-0.16x10^{-5} cm/s$^{1/2}$ arasında

bulunmuştur. Çalışmada, tüm serilerde 90 günlük numunelerin 28 günlük numunelere göre kılcal su emme katsayılarının 5-8 kat azaldığı tespit edilmiştir. 28 günlük numuneler kontrol numunelerine göre incelendiğinde, 0-CLM'de %34, 7.5-CLM'de %29, 12.5-CLM'de %22 ve 17.5-CLM'de %11 azalma, 90 günlük numuneler kontrol numunelerine göre incelendiğinde, 0-CLM ve 17.5-CLM'de %14 azalma, 7.5-CLM'de %14 artış ve 12.5-CLM'de herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

4.5.6. Aşınma (Böhme metodu)

Böhme (sürtünme yöntemi ile) (TS 699) aşınma deneyi, 70±1 mm'lik küp numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir [132]. Etüv kurusu haline getirilen küp numunelerin aşındırma yüzeyi kenarları 1'den 4'e kadar numaralandırılmıştır. Numune döner disk üzerindeki cihazın numune tutucu çerçevesi içine yerleştirilmiştir. Deney numunesine çelik manivela yardımıyla 5 kg'lık yük uygulanarak numunenin sürtünme şeridine basınç ile bastırılması sağlanmıştır. Sürtünme şeridine 20 g'lık zımpara tozu homojen biçimde serpilerek cihaz çalıştırılmıştır (Şekil 4.24). Bir periyotluk (22 devir) aşındırma yapıldıktan sonra cihaz otomatik olarak durmuştur. Her 22 devir sonrasında disk üzerindeki zımpara tozları ve numuneden ayrılan kısımlar fırça ile temizlenmiştir. Her periyot öncesinde numune saat yönünde ve düşey eksen etrafında 90° döndürülerek tekrar tutucu içine yerleştirilmiş ve sürtünme şeridi üzerine zımpara tozu serpilmiştir. Bu şekilde ikinci, üçüncü ve dördüncü yüzeylerde aşındırılarak 88 devir sonunda numune temizlenerek ölçülmüştür. Aynı deney yöntemi uygulanarak deney iki kez daha (hafif betonun hemen parçalanmasını önlemek amacıyla 4 yerine 2 kez yapılmıştır) tekrar edilmiş toplam 8 periyot (176 devir) uygulanmıştır. Her iki periyot sonrasında numuneler 9 yerinden 0.01mm hassasiyetle ölçülmüş ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak deney numunesinin deneyden sonraki kalınlığı bulunmuştur (d_1). Ayrıca sürtünme yüzeyinin kenarları da 0.1 mm hassasiyetle ölçülerek bu yüzün alanı hesaplanmış ve 0.01 cm^2'ye yuvarlatılarak kaydedilmiştir. Aşınma kaybı numune kütlesindeki azalma Eş. 4.12 kullanılarak hesaplanmıştır. 28 ve 90 günlük deney sonuçları Tablo 4.15'te verilmiştir. Ayrıca beton numunelerde 28 ve 90 günlük aşınma kaybı ilişkisi Şekil 4.25'te ve aşınma kaybı basınç dayanımı ilişkisini gösteren grafikler Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

$d = d_0 - d_1$ ($cm^3/50cm^2$) (4.12)

Burada;

d: Aşınma kaybı

d_0: Taşın deneyden önceki ortalama kalınlığı (cm)

d_1: Taşın deneyden sonraki ortalama kalınlığı (cm)

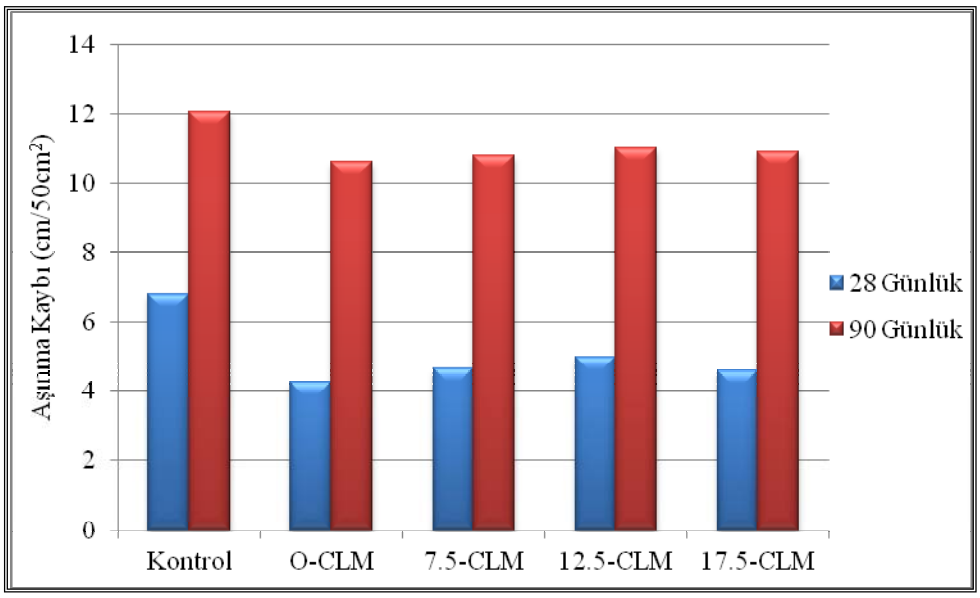
(Bulunan sonuçlar 0.01cm/50 cm^2'ye yuvarlatılarak belirtilir.)



Şekil 4.24. Böhme aşındırma cihazı ve deney numunesi

Tablo 4.15. Beton numunelerin aşınma kaybı değeri

Karışımlar	28 günlük				90 günlük			
	Basınç Dayanımı		Aşınma Kaybı Değeri		Basınç Dayanımı		Aşınma Kaybı Değeri	
	MPa	%	$cm^3/50cm^2$	%	MPa	%	$cm^3/50cm^2$	%
KONTROL	23.2	100	6.8	100	27.1	100	12.0	100
0-CLM	33.2	143	4.3	63	39.5	146	10.6	88
7.5-CLM	33.7	145	4.7	69	39.1	144	10.8	90
12.5-CLM	36.2	156	5.0	74	41.7	154	11.0	92
17.5-CLM	36.8	159	4.6	67	37.0	137	10.9	91

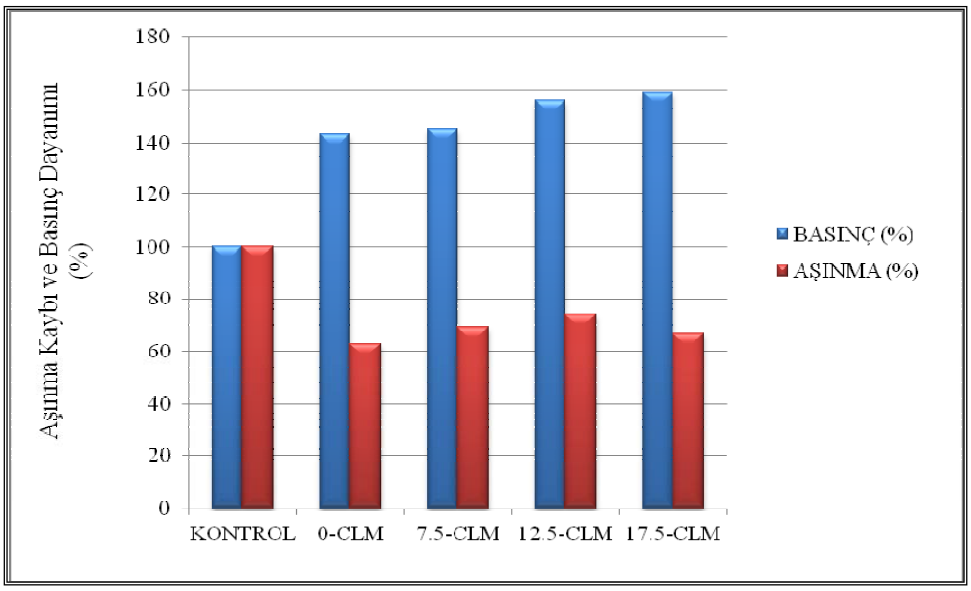


Şekil 4.25. Beton numunelerde 28 ve 90 günlük aşınma kaybı ilişkisi

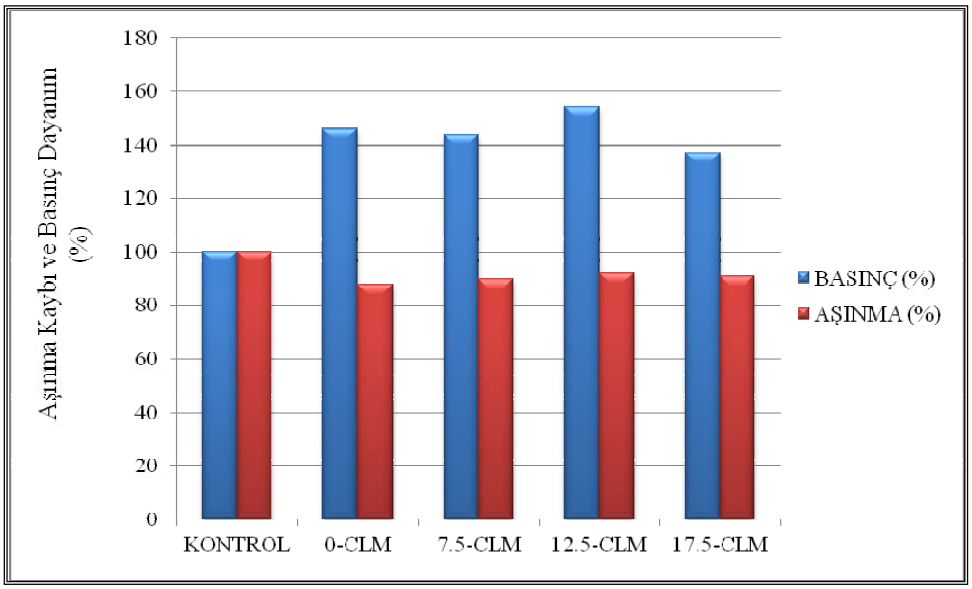
Oymael ve Yeğinobalı (1996), bitümlü şist külü katkılı beton numunelerinde katkı miktarının artışıyla orantılı olarak numunelerin aşınma kayıplarının arttığını belirtmişlerdir. Ancak, katkı oranı yüksek olan numunenin ağırlık kaybında azalma gözlenmiş, basınç dayanımındaki azalmadan bağımsız olarak gözlenen bu aşınma kayıplarındaki azalmayı, puzolanik reaksiyonlar sonucu çimento hamuru ile hamur-agrega ara yüz kalitesindeki iyileşmeler ile açıklamışlardır [133].

Beton numunelerin aşınma kaybı değerleri kontrol numunelerine göre incelendiğinde, 28 günlük numunelerde 0-CLM'de %37, 7.5-CLM'de %31, 12.5-CLM'de %26 ve 17.5-CLM'de %33, 90 günlük numunelerde ise 0-CLM'de %12, 7.5-CLM'de %10, 12.5-CLM'de %8 ve 17.5-CLM'de %9 azaldığı tespit edilmiştir.

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin aşınma kaybı değerleri kaplamalarına göre incelendiğinde, 90 günlük numunelerin 28 günlük numunelere göre, kontrol numunelerinde %56, 0-CLM'de %40, 7.5-CLM'de %43, 12.5-CLM'de %45 ve 17.5-CLM'de %42 arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.26. Beton numunelerde 28 günlük aşınma kaybı ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.27. Beton numunelerde 90 günlük aşınma kaybı ile basınç dayanımı ilişkisi

Beton numunelerin aşınma kaybı ile basınç dayanımı ilişkisi incelendiğinde, 28 ve 90 günlük beton numunelerin kontrol numunelerine göre basınç dayanım değerleri artarken aşınma kaybı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sonuçlara göre, çimentoya kolemanit katkısının aşınma dayanımına olumlu etkisi olduğu düşünülmektedir.

4.5.7. Ultrases geçiş hızı

Ultrasonik test cihazı, ses üstü dalgaların, dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasındaki bir mesafeyi ne kadar zamanda geçtiğini mikrosaniye birimiyle otomatik olarak belirlemekte ve cihaz üzerindeki ekranda göstermektedir [88]. Ultrases deney ölçümleri ASTM C 597 standardına uygun olarak 7, 28, 90 günlük 100x200 mm'lik silindir numunelere uygulanmıştır (Şekil 4.28) [134]. Ölçümlerde direkt iletim yöntemi kullanılmıştır. Ultrases geçiş hızı, Eş. 4.13 kullanılarak hesaplanmıştır. 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçları Tablo 4.16'da, ultrases geçiş hızı grafiği Şekil 4.29'da ve ultrases geçiş hızı-basınç dayanımı ilişkisi Şekil 4.30'da verilmiştir.

$$V = L/U \tag{4.13}$$

Burada;

V: Ultrases geçiş hızı, km/sn

L: Geçiş uzunluğu, mm

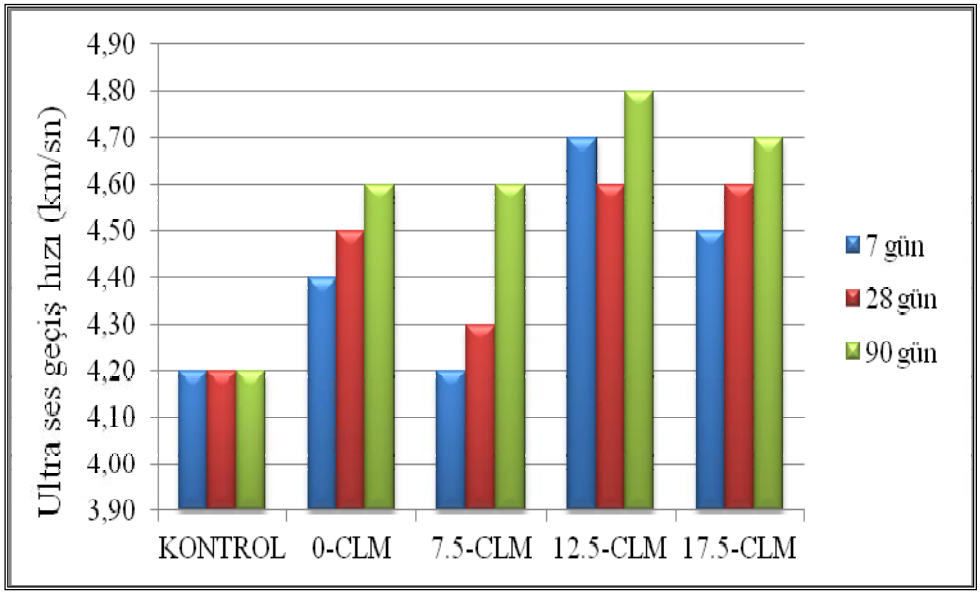
U: Geçiş zamanı, μs



Şekil 4.28. Ultrases hızı ölçümü

Tablo 4.16. Beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı değerleri

Karışımlar	7 günlük				28 günlük				90 günlük			
	Basınç Dayanımı		Ultrases Geçiş Hızı		Basınç Dayanımı		Ultrases Geçiş Hızı		Basınç Dayanımı		Ultrases Geçiş Hızı	
	MPa	%	km/sn	%	MPa	%	km/sn	%	MPa	%	km/sn	%
KONTROL	19.5	100	4.2	100	23.2	100	4.2	100	27.1	100	4.2	100
0-CLM	33.4	171	4.4	105	33.2	143	4.5	107	39.5	146	4.6	110
7.5-CLM	31.6	162	4.2	100	33.7	145	4.3	102	39.1	144	4.6	110
12.5-CLM	35.5	182	4.7	112	36.2	156	4.6	110	41.7	154	4.8	114
17.5-CLM	33.0	169	4.5	107	36.8	159	4.6	110	37.0	137	4.7	112



Şekil. 4.29. Beton numunelerde ultrases geçiş hızı

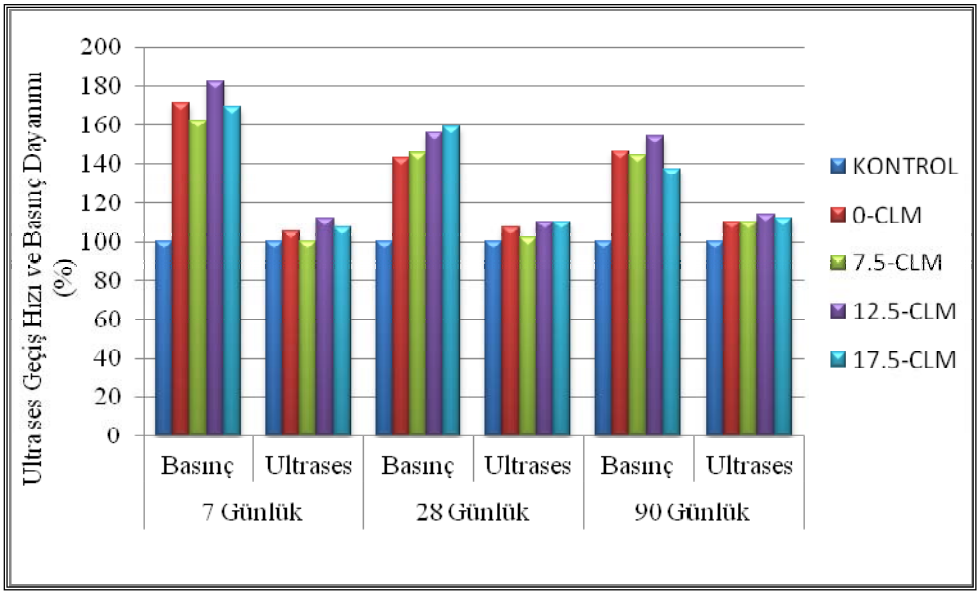
Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri kontrol numunelerine göre incelendiğinde, 7 günlük numunelerde 0-CLM'de %5, 7.5-CLM'de %0, 12.5-CLM'de %12 ve 17.5-CLM'de %7, 28 günlük numunelerde 0-CLM'de %7, 7.5-CLM'de %2, 12.5-CLM ve 17.5-CLM'de %10 ve 90 günlük numunelerde ise 0-CLM ve 7.5-CLM'de %10, 12.5-CLM'de %14 ve 17.5-CLM'de %12 arttığı tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızına göre 7, 28, 90 günlük numunelerde yapılan incelemelerde en düşük ultrases geçiş hızı, kontrol numunelerinden (4.2 km/sn), en yüksek ultrases geçiş hızı ise 12.5-CLM kodlu numunelerden (4.8 km/sn) elde edilmiştir.

Neville (1990) ve Erdoğan (2007)'ın Whitehurs'a atıf yaparak belirttiği gibi, yoğunluğu 2400 kg/m^3 olan betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde sesüstü dalga hızı bilindiği takdirde beton kalitesinin ne olabileceğine dair sonuçlar Tablo 4.17'de verilmiştir [88, 135, 136].

Tablo 4.17. Ultrases geçiş hızı test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi

Ses geçiş hızı, km/sn	**Beton kalitesi**
>4.5	Mükemmel
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Şüpheli
2.0-3.0	Zayıf
<2.0	Çok zayıf

Şekil 4.29'dan görüleceği üzere, kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen numunelerin beton kalitesinin literatürde [88, 135, 136] belirtilen ultrases geçiş hızı değerleri, en düşük ultrases geçiş hızına sahip numunelerde "iyi", en yüksek ultrases geçiş hızına sahip numunelerde "mükemmel" beton sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Kontrol numunesi hariç diğer numunelerde, yaş artışı ile ürünlerin hidrate olarak yoğunluğunun arttığı belirlenmiş ve sonuçların SEM analizleri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.30. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı ilişkisi

Beton numunelerin ultrases geçiş hızı ile basınç dayanımı ilişkisi incelendiğinde, 7, 28 ve 90 günlük beton numunelerin yaş artışı ile basınç dayanımları artarken ultrases geçiş hızlarının da arttığı gözlenmiştir.

4.5.8. Basınç altında su işleme derinliği

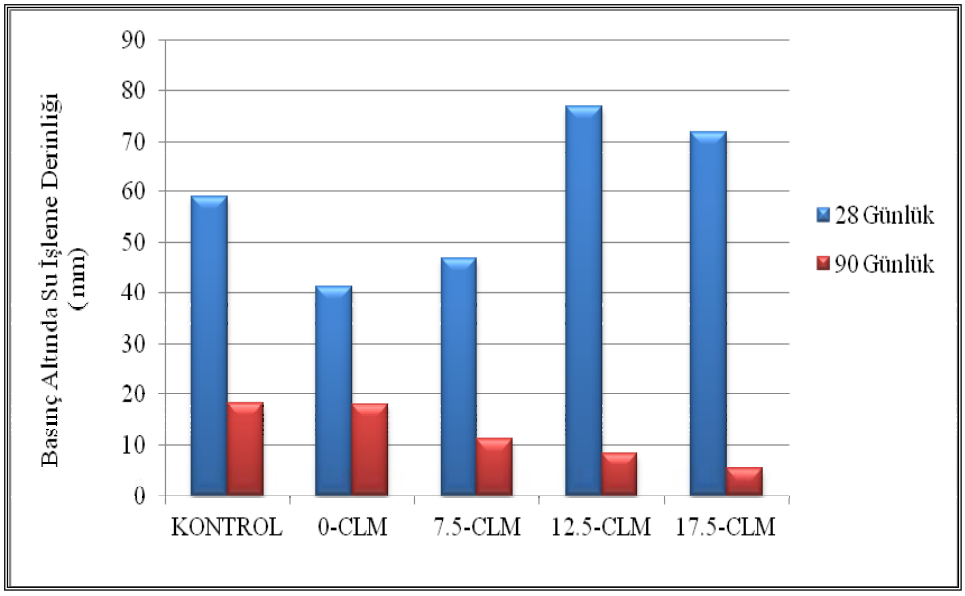
Beton geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesinde, basınçlı su etkisi altında su işleme derinliğinin ölçülmesi TS EN 12390-8 standardına uygun olarak yapılmıştır [137]. 28 ve 90 günlük kürden çıkarılan numuneler 24 saat süreyle 3 MPa (hafif betonun zarar görmesini engellemek amacıyla 5MPa yerine) basınç uygulanacak şekilde cihaza yerleştirilmiştir. Süre sonunda cihazdan çıkarılan numunelerin üzerindeki fazla su temizlenerek basınçlı su uygulanan yüzeye dik gelecek şekilde ortasından yarılarak ikiye bölünmüştür. Numunenin bölünmesinden suyun işlediği en büyük derinlik mm boyutunda ölçülerek kaydedilmiştir. Basınç altında su işleme derinliği deney yapım aşamaları Şekil 4.31'de, deney sonuçları Tablo 4.18'de, grafiksel gösterimi Şekil 4.32'de, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı ilişkisi Şekil 4.33 ve 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.31. Basınç altında su işleme derinliği deneyi

Tablo 4.18. 28 ve 90 günlük basınç altında su işleme derinliği değerleri

Karışımlar	28 günlük				90 günlük			
	Basınç Dayanımı		Basınç Altında Su İşleme Derinliği		Basınç Dayanımı		Basınç Altında Su İşleme Derinliği	
	MPa	%	mm	%	MPa	%	mm	%
KONTROL	23,2	100	59	100	27,1	100	18	100
0-CLM	33,2	143	41	70	39,5	146	18	98
7.5-CLM	33,7	145	47	79	39,1	144	11	61
12.5-CLM	36,2	156	77	130	41,7	154	8	46
17.5-CLM	36,8	159	72	122	37	137	5	29



Şekil 4.32. 28 ve 90 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin basınç altında su işleme derinliği değerleri incelendiğinde; 28 günlük numunelerde en yüksek değer 12.5-CLM (76.82 mm), en düşük değer 0-CLM (41.34 mm) numunelerinden ve 90 günlük numunelerde ise en yüksek değer kontrol (18.3 mm), en düşük değer 17.5-CLM (5.3 mm) numunelerinden elde edilmiştir.

Kontrol numunelerine göre 28 günlük numunelerin değerleri karşılaştırıldığında; 0-CLM'de %30 ve 7.5-CLM'de %21 azalma, 12.5-CLM'de %30 ve 17.5-CLM'de %22 artış, 90 günlük numunelerde ise 0-CLM'de %2, 7.5-CLM'de %39, 12.5-CLM'de %54 ve 17.5-CLM'de %71 azalma tespit edilmiştir.

Basınç altında su işleme derinliği değerleri kendi aralarında (28 günlük numunelerin 90 günlük numunelere göre) incelendiğinde, kontrol numunelerinde %69, 0-CLM numunelerinde %56, 7.5-CLM numunelerinde %76, 12.5-CLM numunelerinde %89 ve 17.5-CLM numunelerinde %93 azalma olduğu gözlenmiştir.

TS 3440 standardında, betonun zararlı kimyasal etkilere dayanıklılığının sağlanabilmesi için geçirimlilik sınırlandırılmıştır. Tablo 4.19'da zararlı etki derecesine göre izin verilebilecek en büyük S/Ç oranı ve su işleme derinliği değerleri verilmiştir [138].

Tablo 4.19. Zararlı etki derecesine göre izin verilebilecek en büyük S/Ç oranı ve su işleme derinliği değerleri

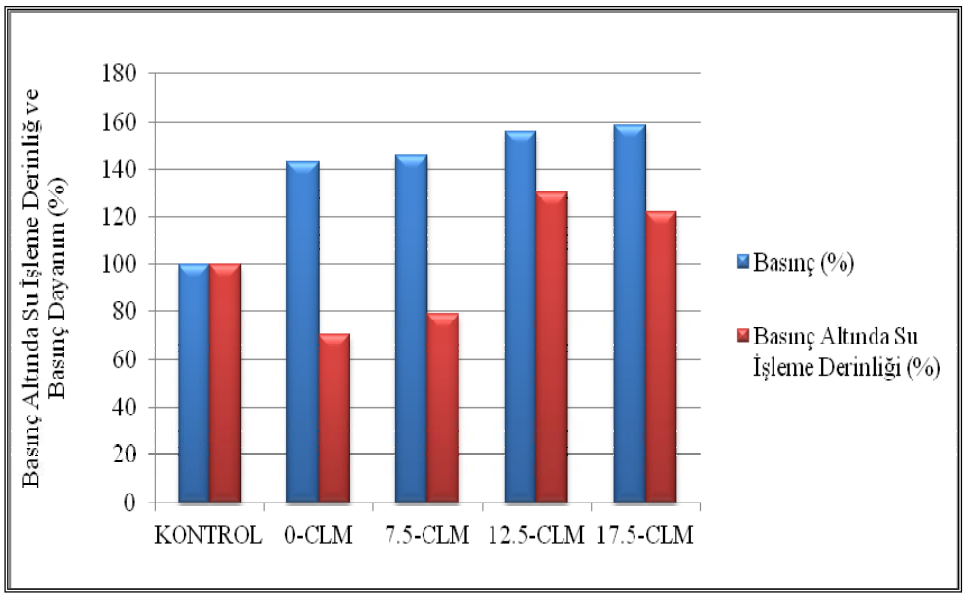
Beklenen zararlı etkinin derecesi	Su işleme deriliği (cm), (max)	S/Ç oranı (max.)
Zayıf	5	0.60
Kuvvetli	3	0.50
Çok kuvvetli	Betonda koruyucu önlemler alınmalı	

Baradan ve Yazıcı (2003), betonun bulunduğu ortamın değerlendirilmesi, çevresel etki sınıflaması ve yıpratıcı etkiye karşı dayanıklılığın sağlanabilmesi için beton karışımları için getirilen önerilerin TS EN 206-1 standardında sunulduğunu bildirmişlerdir. Buna göre klorürlerin sebep olduğu korozyon riskinin deniz suyundan kaynaklanan ve deniz suyu haricindeki klorürler olarak sınıflandırmışlardır. Bu ortamda kullanılacak betonun, etkinin şiddetine göre S/Ç oranının 0.55-0.45, en az çimento dozajının 300-340 kg/m^3 olması ve beton sınıfının ise en az C30/37-C35/45 olarak seçilmesinin önerildiğini belirtmişlerdir [87].

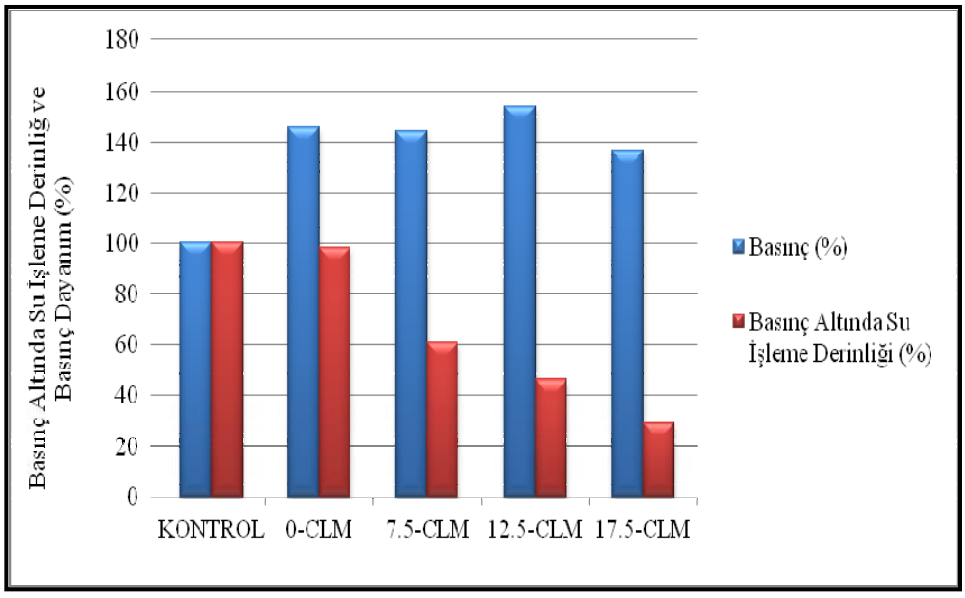
Haque vd. (2004), doğal kum ve iri hafif agrega ile ürettikleri betonun (basınç dayanımı 35 MPa), basınç altında su işleme derinliğinin, 28 günlük numunelerde 40-73 mm, 365 günlük numunelerde 34-115 mm arasında olduğunu tespit etmişlerdir [124].

Çalışmada, 28 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği değerlerinin 41.3-76.8 mm ve 90 günlük numunelerde ise 18.3-5.3 mm arasında değiştiği bulunmuştur. Sonuçların literatürde verilen değerler ile [124] uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, TS 3440'a [138] göre 28 günlük numunelerin standart değerleri sağlamadığı, 90 günlük numunelerin ise standart değerlere uygun olduğu ve

kür süresinin artmasıyla basınç altında su işleme derinliğini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.



Şekil 4.33. 28 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.34. 90 günlük numunelerde basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı ilişkisi

Basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı ilişkisi incelendiğinde, basınç dayanımının artışıyla, 28 günlük 0-CLM ve 7.5-CLM kaplı agregalarla üretilen betonlarda ve 90 günlük tüm numune serilerinde olumlu etki yaptığı belirlenmiştir.

Ayrıca, agrega kaplamasındaki kolemanit katkısının beton numunelerin hidratasyonunda gecikmeye sebep olduğu, zamanla mikro yapısında yoğunluğun artmasıyla basınç altında su işleme derinliğini azalttığı gözlenmiştir.

4.5.9. Sülfat tayini

Çalışmada 100x100 mm boyutlarında silindir numuneler 28 günlük kür süresi sonunda 2 gün süreyle 60 ˚C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuşlardır. Çözelti katı haldeki Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ tuzlarının hacimce %5 oranında olacak şekilde saf su içerisinde çözdürülmesiyle hazırlanmıştır. Deneyde numunelerin konulduğu cam havuzların üzeri cam levhalarla kapatılmıştır. Çözeltiler belirli sürelerde karıştırılarak homojenliği korunmuştur (Şekil 4.35). Deney numuneleri 28, 90 ve 365. günlerde basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Tablo 4.20'de TS 3440 standardına göre doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler verilmiştir [138]. Deney sonuçları Tablo 4.21'de ve Şekil 4.36 ve 4.37'de verilmiştir.

Tablo 4.20. Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler

İncelenen Özellik	Zayıf	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
Ph değeri	6.5-5.5	3.5-4.5	4.5>
Magnezyum (Mg^{+2}) mg/l	100-300	300-1500	1500<
Sülfat (SO^{-2}_4) mg/l	200-600	600-3000	3000<



Şekil 4.35. Numunelerin çözelti içinde kürü

Oymael (1995), sülfatlı çözeltilerin beton üzerindeki olumsuz etkilerinin ortaya çıkmasının yıllar alabileceğini, bu bakımdan çimento ve katkı maddelerinin sülfat dirençlerini değerlendirebilmek için kısa sürede sonuç alınabilecek deney yöntemlerine gereksinim olduğunu, sülfatlı çözeltilerin kullanılmasında dikkat edilecek bazı konuları

- Suyun buharlaşması ile sülfat konsantrasyonun artacağını ve bu artışın yüzeyde daha fazla olması nedeniyle, yüzeyin hemen altındaki kısma isabet eden harç ve betonun daha fazla zarar göreceğini,
- Sülfatlı su harç ve betonun kapiler kanalcıklarında üst kısımlara ulaştığını, buralarda suyun buharlaşma miktarına bağlı olarak sülfat konsantrasyonun dolayısıyla zararlı etki derecesinin artacağını,

Suda sülfattan başka klorürlerin bulunmasının, sülfatların reaksiyonunu yavaşlatacağını ve zararlı etki derecesini azaltacağı şeklinde ifade etmiştir [139].

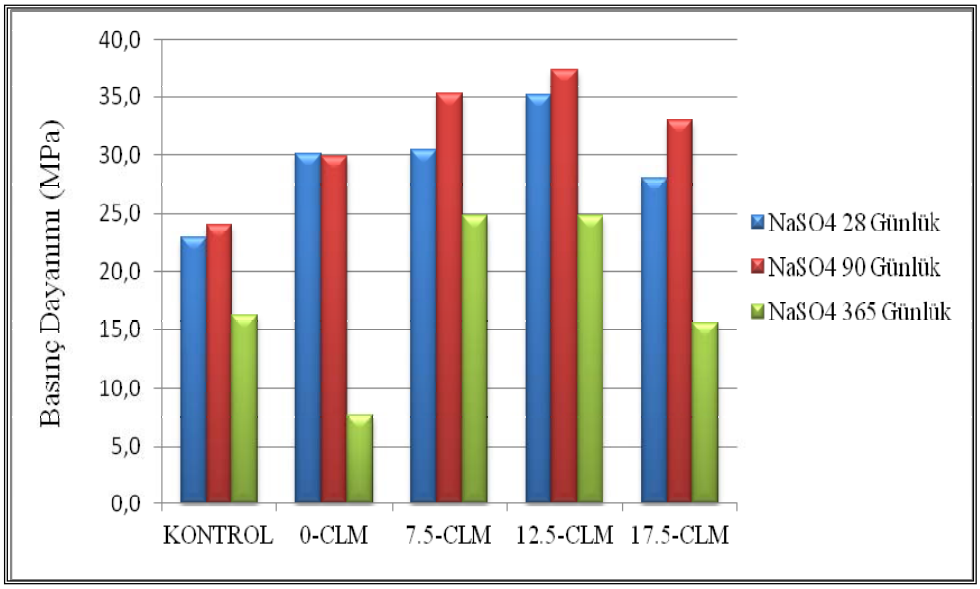
Çalışmada, $NaSO_4$ çözeltisi içinde bekletilen 28, 90 ve 365 günlük beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında, 90 günlük numunelerin 28 günlük numunelere göre; kontrol numunelerinde %5, 7.5-CLM'de %5, 12.5-CLM'de %7 ve 17.5-CLM'de %18 artarken, 0-CLM'de %1 azalmıştır. 90 günlük numunelerin 365 günlük numunelere göre karşılaştırılmasında ise, kontrol, 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinin basınç dayanımlarının sırasıyla %33, %74, %30, %34, %53 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Tablo 4.21).

$MgSO_4$ çözeltisi içinde bekletilen 28, 90 ve 365 günlük beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında, 90 günlük numunelerin 28 günlük numunelere göre; kontrol numunelerinde %6.5, 7.5-CLM'de %29, 12.5-CLM'de %7 ve 17.5-CLM'de %33 artarken, 0-CLM'de %3 azalmıştır. 90 günlük numunelerin 365 günlük numunelere göre karşılaştırılmasında ise kontrol, 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinin basınç dayanımlarının sırasıyla %19, %31, %12, %18, %22 oranında azaldığı belirlenmiştir (Tablo 4.21)

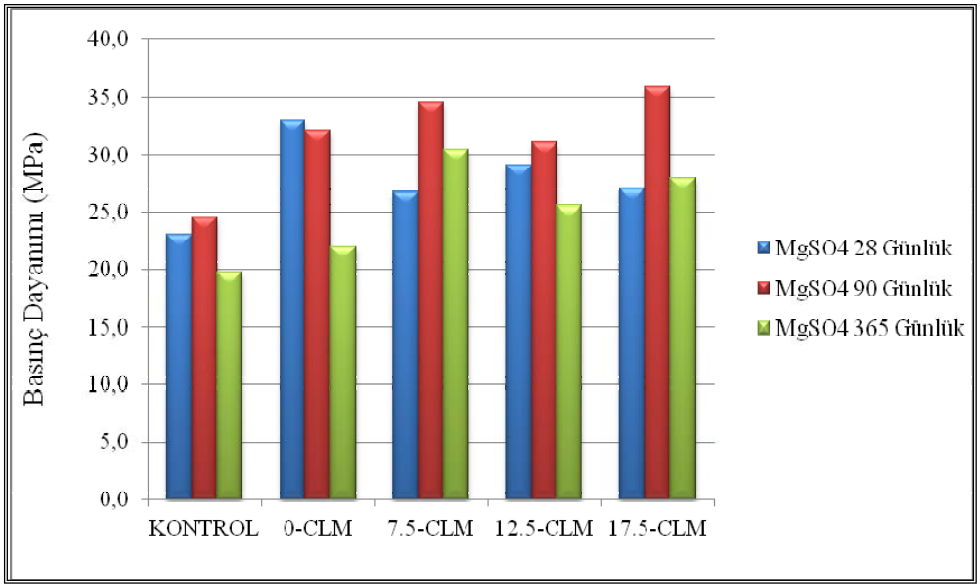
Çalışmada, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin literatürde verilenin aksine [48, 53] betonu daha az tahrip ettiği, bu durumun kaplamada kullanılan kolemanitin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. 28 ve 90 gün bekletilen numunelere çözeltilerin ($MgSO_4$ ve $NaSO_4$), kür etkisi yaptığı, 365 gün bekletilen numunelerin dayanımlarının azaldığı, ancak tahrip olmadığı gözlenmiştir. Şekil 4.36 ve 4.37'de $NaSO_4$ ve $MgSO_4$ içerisindeki 28, 90 ve 365 günlük numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 4.21. $NaSO_4$ ve $MgSO_4$ çözeltileri kürü sonrası basınç dayanımları (MPa)

Karışımlar	$NaSO_4$			$MgSO_4$		
	28 Günlük	90 Günlük	365 Günlük	28 Günlük	90 Günlük	365 Günlük
KONTROL	22.9	24.0	16.2	23.0	24.5	19.8
0-CLM	30.1	29.8	7.6	32.9	32.0	22.0
7.5-CLM	30.5	35.2	24.8	26.7	34.5	30.5
12.5-CLM	35.1	37.4	24.8	29.1	31.1	25.5
17.5-CLM	28.0	32.9	15.6	27.0	35.9	27.9



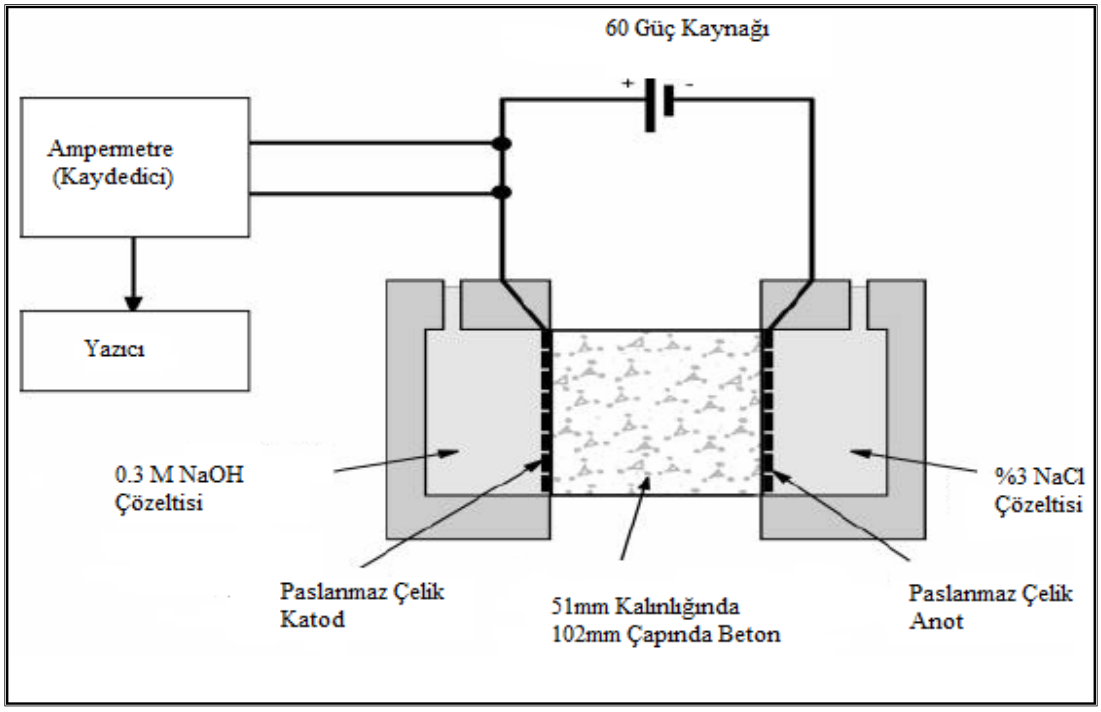
Şekil 4.36. $NaSO_4$ içerisindeki 28, 90 ve 365 günlük numunelerin basınç dayanımı



Şekil 4.37. $MgSO_4$ içerisindeki 28, 90ve 365 günlük numunelerin basınç dayanımı

4.5.10. Hızlı klorür geçirimliliği (penetrasyon)

Hızlı klorür geçirimliliği deneyi ASTM C 1202 standardına uygun olarak yapılmıştır [140]. Kürden çıkarılan 28 ve 90 günlük boyutları 50 mm kalınlığında ve 100 mm çapında disk şeklindeki numunelerin eğrisel yüzeyleri yalıtkan bir malzeme ile kaplanmıştır. Kaplanan numunelerin vakum altında önce 3 saat içerisindeki hava boşlukları çıkarılmış ve sonrasında 1 saat saf suda suya doygun hale getirilmiştir. Suya doygun hale getirilen numuneler bir tarafında NaOH, diğer tarafında NaCl çözeltisi doldurulan deney kabına yerleştirilmiştir (Şekil 4.38) [141]. Beton disk 60 voltluk bir elektriksel alana maruz bırakılmıştır. 30 dakika aralıklarla geçen akımın şiddeti (amper) ölçülmüştür. Toplam 6 saat süren deney sonunda şiddet-zaman diyagramındaki alan yardımıyla bu sürede iletilen elektrik yük miktarı (coulomb) hesaplanmıştır. Elektrik yük miktarı iyon miktarı ile orantılı varsayılarak değerlendirmeye (Tablo 4.22) gidilmiştir [142]. Deney yapım süreci Şekil 4.39'da, deney sonuçları Tablo 4.23'te ve grafiksel gösterimi Şekil 4.40'ta verilmiştir.



Şekil 4.38. Hızlı klorür direnci

Tablo 4.22. Hızlı klor iyon geçirimlilik deney sonuçlarına göre betonun iyon geçirimliliği yönünden değerlendirilmesi [142].

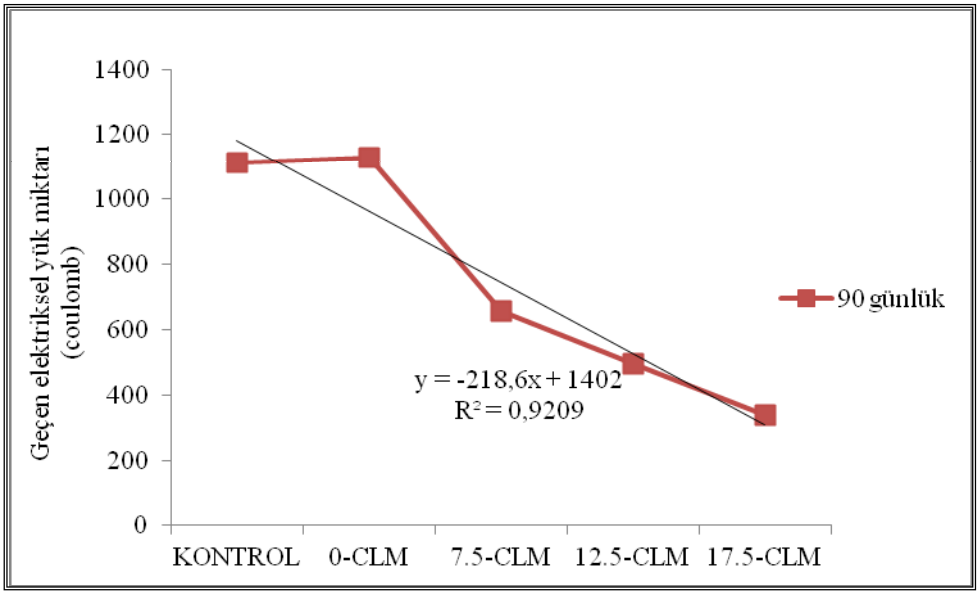
Geçen elektriksel yük miktarı C (coulomb)	Klor iyonu geçirimliliği yönünden değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok düşük
< 100	İhmal edilebilir



Şekil 4.39. Hızlı klorür geçirimliliği deney aşamaları

Tablo 4.23. 90 günlük hızlı klorür geçirimliliği değerleri

Karışımlar	Geçen elektriksel yük miktarı (coulomb)	Klor iyonu geçirimliliği
KONTROL	1115	Düşük
0-CLM	1127	Düşük
7.5-CLM	655	Çok Düşük
12.5-CLM	497	Çok Düşük
17.5-CLM	337	Çok Düşük



Şekil 4.40. 90 günlük hızlı klorür geçirimliliği

Chia ve Zhang (2002), hafif betonla ilgili yaptıkları çalışmada, su/çimento oranı 0.55 olan serilerde klor iyonu geçirimliliğini yüksek (5095 coulomb) ve 0.35 olan serilerde klor iyonu geçirimliliğini orta (2843 coulomb) olarak bulmuşlardır [42]. Liu vd. (2011), ürettikleri hafif betonun klor iyonu geçirimliliğini iyi (2385 ile 3620 coulomb) olarak tespit etmişlerdir [143].

Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin 90 günlük hızlı klorür geçirimliliği değerleri incelendiğinde; en yüksek değer 0-CLM (1127 coulomb), en düşük değer 17.5-CLM (337 coulomb) numunelerinden elde edilmiştir. Standart ile kıyaslandığında kontrol ve 0-CLM numunelerinin klor geçirgenliğinin "düşük", 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinin ise "çok düşük" olduğu belirlenmiştir. Sonuçların literatürde verilen [42, 143] değerlerden 7-8 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

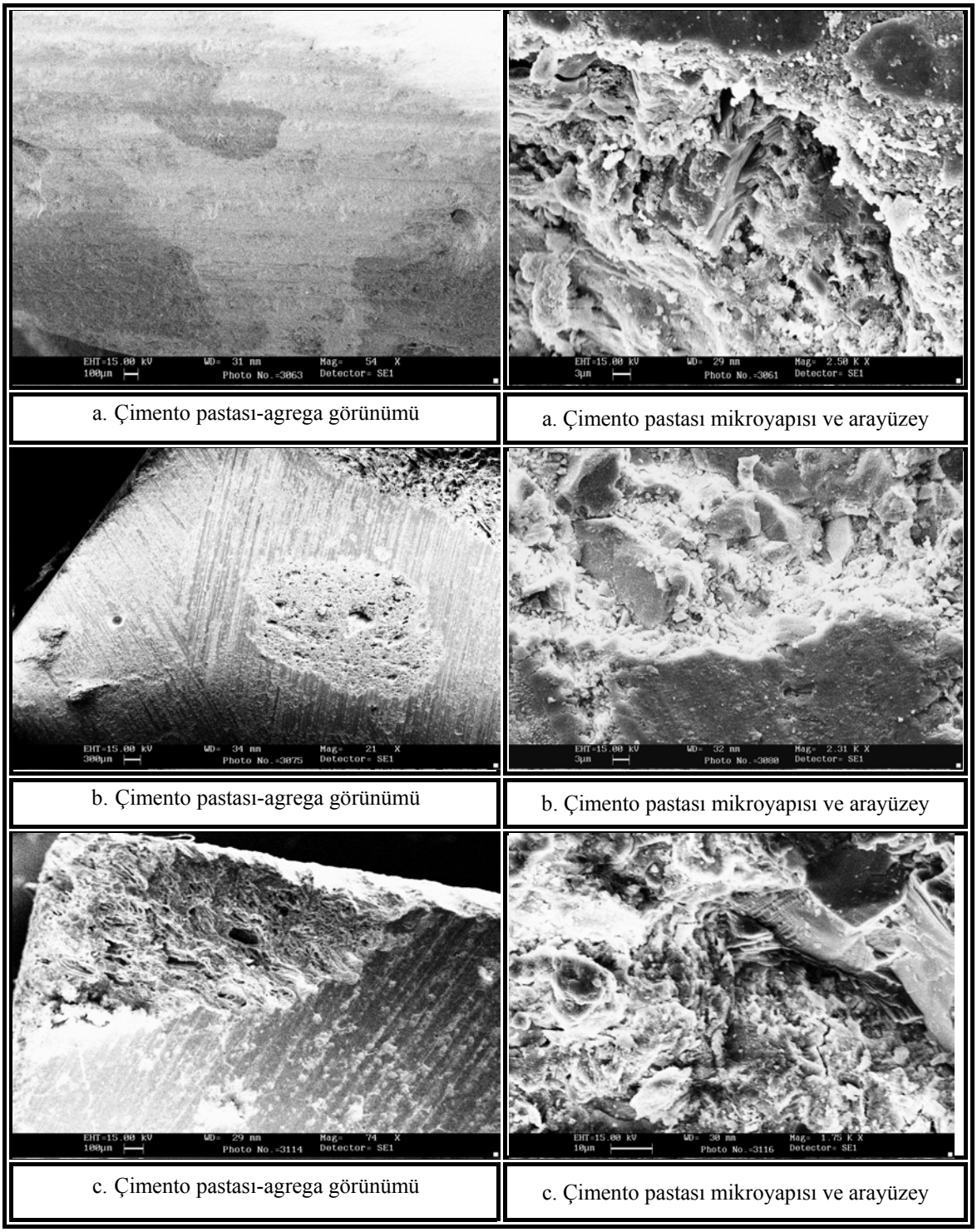
4.5.11. SEM analizleri

Kürden çıkarılan 7, 28 ve 90 günlük numunelerden alınan 100'er gramlık parçalar hidratasyonu durdurmak amacıyla saf aseton içerisinde 12 saat süre ile bekletilmişlerdir [139]. Parçalar taneli olarak cam şişelere konularak analize gönderilmiştir. Beton numunelerin yüzeyleri altınla (200 A˚) kaplanmış ve numunelerin mikro yapıları, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nde farklı büyütme oranlarında ikincil elektron görüntüsü yöntemiyle Tarama Elektron Mikroskobu (SEM), (LEO 435 VP) ile incelenmiştir [144]. Kaplanmamış, çimento kaplanmış, çimento+kolemanit kaplanmış agregalarla elde edilen 400 dozlu hafif beton numunelere ait görüntüler 7, 28 ve 90 günlük yapıları incelenecek şekilde ele alınmıştır. Görüntüler Şekil 4.41-45'te verilmiştir.

Oymael (1995), çimentolarda hidratasyon ve reaksiyonların nasıl geliştiği konusunda bazı ilerlemeler sağlanmış olmakla beraber, özellikle hidratasyon ürünleri olan bileşiklerin yapıları hakkında henüz tam bir fikir birliğine varılmadığını ifade etmiştir. Çimentoda bulunan oksitlerden CaO'in SiO_2 ile birleşmesiyle CS, C_3S, C_2S gibi kalsiyum silikatlar oluştuğunu ve CaO'in Al_2O_3 ile birleşmesi ile de, C_3A, C_3A_5 ve C_5A_3 gibi kalsiyum alüminatlar oluştuğunu belirtmiştir [139].

"Hidratasyon sonunda C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) ile serbest kireç $Ca(OH)_2$ meydana gelir. Çimentonun yüksek bir mukavemete sahip olmasını sağlayan maddeler C-S-H'dır. X-ışınları ve elektronik mikroskop ile yapılan incelemeler sonucunda C-S-H'ın yapısını incelemek mümkün olmuştur. Çalışmalara göre C-S-H elemanları iyi bir şekilde kristalleşmemiş; hatta pratik bakımdan amorf yapıya yaklaşan karaktere sahiptir. Bu elemanlar genellikle lif ve ince levha veya yaprak halinde olmak üzere iki değişik şekle sahiptir. Kalsiyum silikatların hidrate elemanları meydana gelirken, $Ca(OH)_2$ hekzogonal kristal şeklinde oluşarak hidrate elemanlar arasında köprüler kurar. C-S-H elemanlarının zamanla artması sonunda lifler ve levhalar büyüyerek birbiri içine girerek ve birbiriyle kaynaşarak çimentonun mukavemetinin zamanla artmasını sağlar" [145].

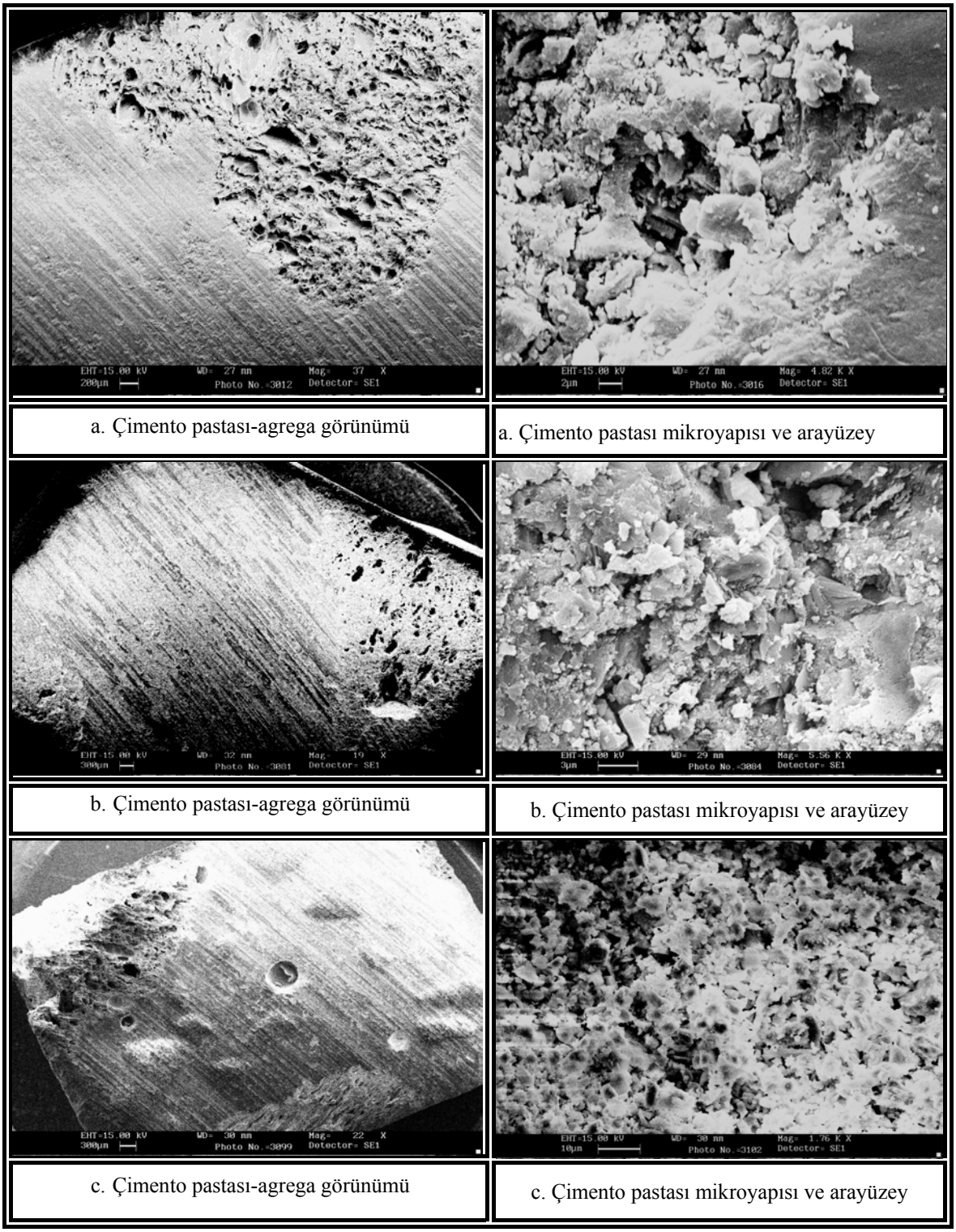
Pomza içindeki amorf silisin, $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H oluşturarak yapı içindeki $Ca(OH)_2$'i azaltmaktadır. Mağmatik kayaçlarda feldispat oranı ise %60 civarındadır [106].



a. Çimento pastası-agrega görünümü	a. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
b. Çimento pastası-agrega görünümü	b. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
c. Çimento pastası-agrega görünümü	c. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey

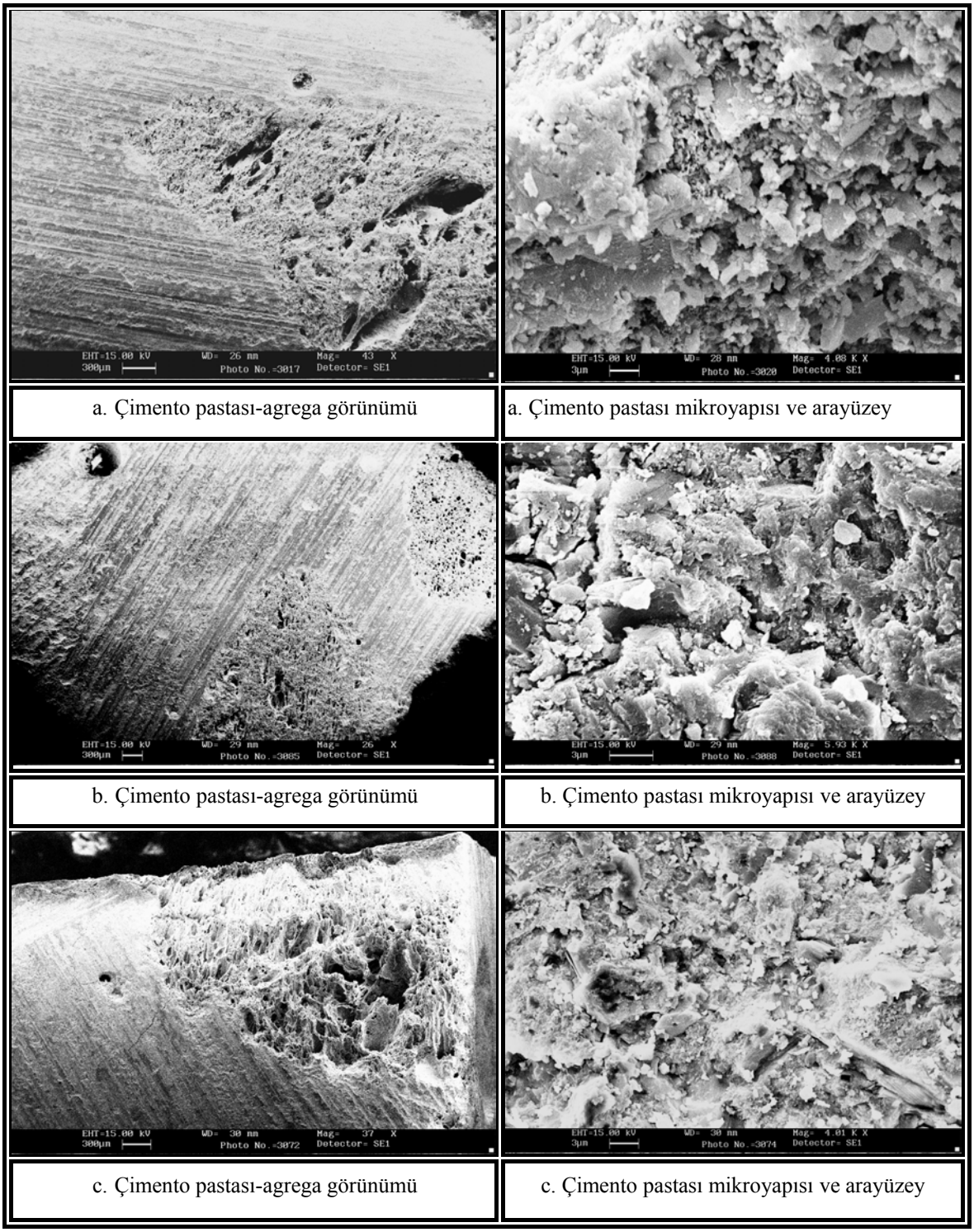
Şekil 4.41. Kontrol numunelerinin SEM görünümü

(a.7 günlük, b.28 günlük, c.90 günlük)



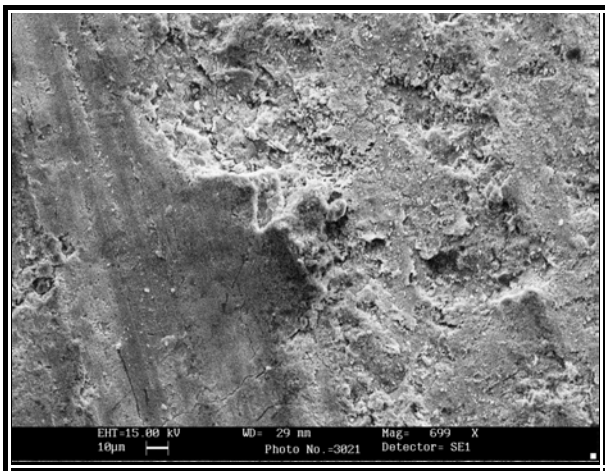
a. Çimento pastası-agrega görünümü	a. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
b. Çimento pastası-agrega görünümü	b. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
c. Çimento pastası-agrega görünümü	c. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey

Şekil 4.42. 0-CLM numunelerinin SEM görünümü
(a.7 günlük, b.28 günlük, c.90 günlük)

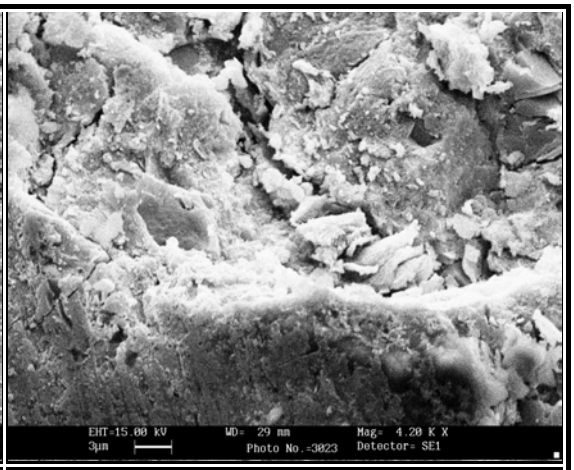


a. Çimento pastası-agrega görünümü	a. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
b. Çimento pastası-agrega görünümü	b. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
c. Çimento pastası-agrega görünümü	c. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey

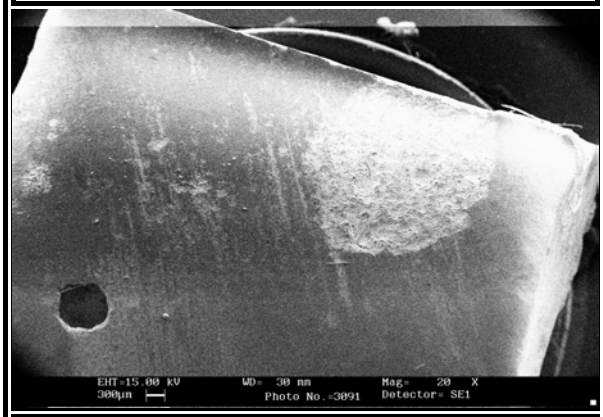
Şekil 4.43. 7.5-CLM numunelerinin SEM görünümü
(a.7 günlük, b.28 günlük, c.90 günlük)



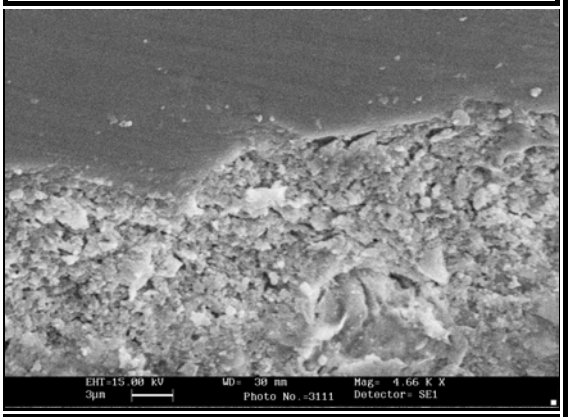
a. Çimento pastası-agrega görünümü



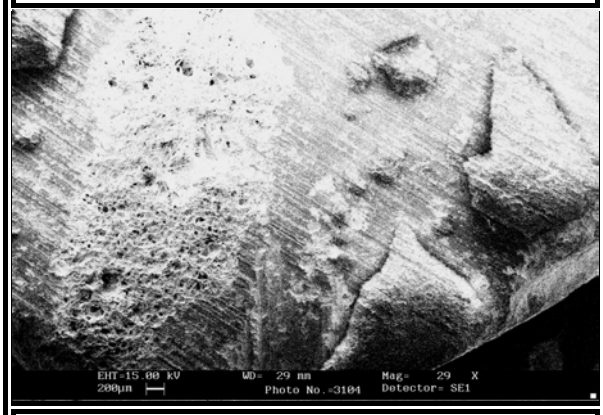
a. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey



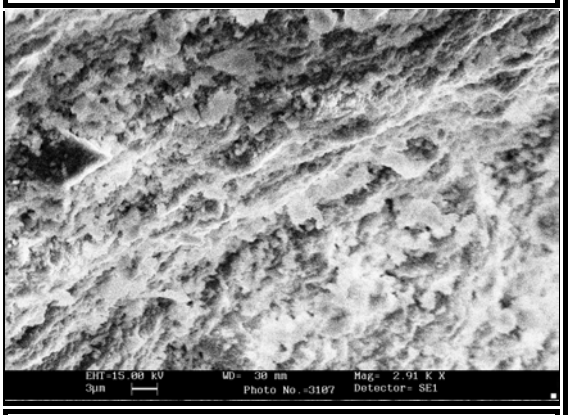
b. Çimento pastası-agrega görünümü



b. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey

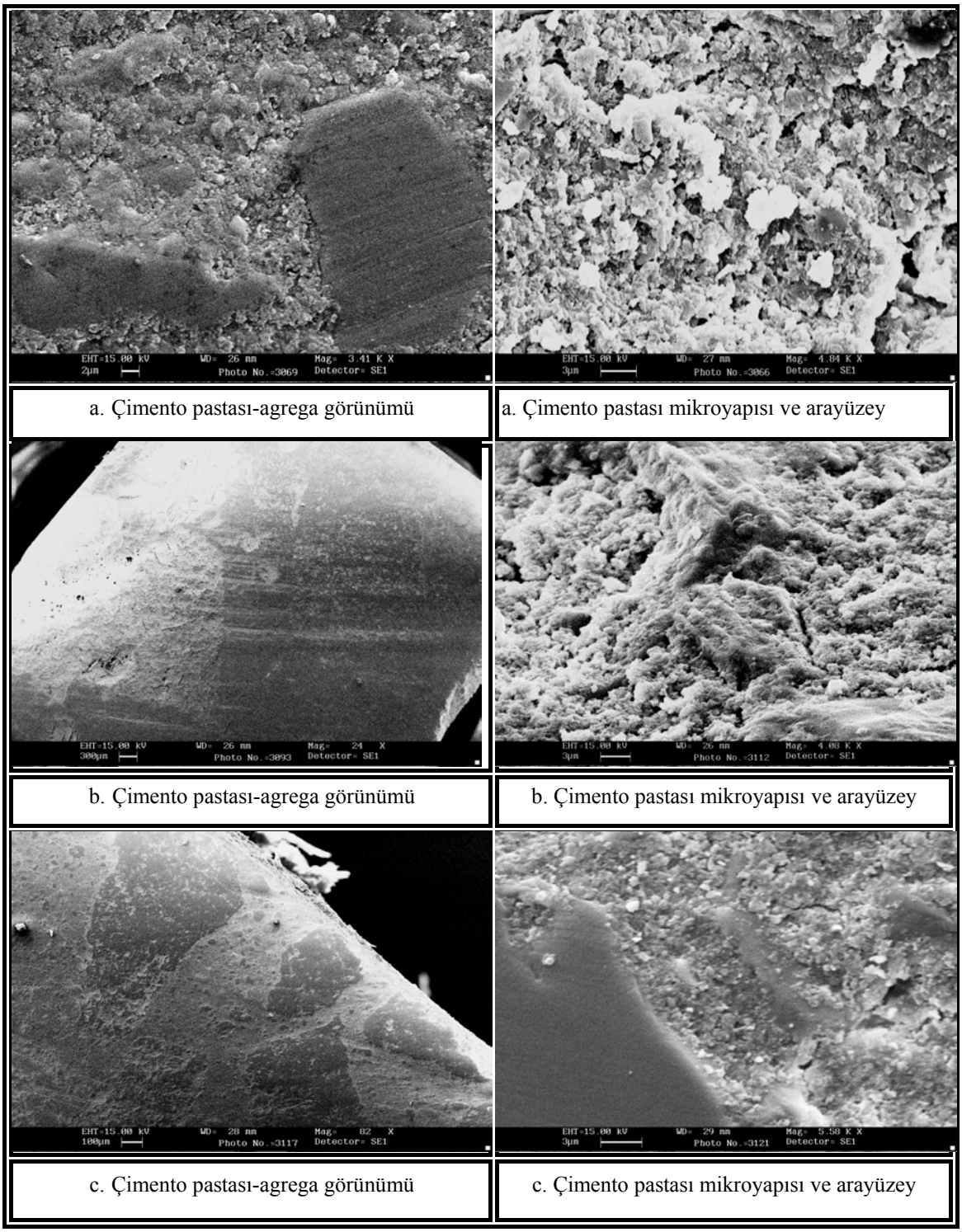


c. Çimento pastası-agrega görünümü



c. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey

Şekil 4.44. 12.5-CLM numunelerinin SEM görünümü
(a.7 günlük, b.28 günlük, c.90 günlük)



a. Çimento pastası-agrega görünümü	a. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
b. Çimento pastası-agrega görünümü	b. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey
c. Çimento pastası-agrega görünümü	c. Çimento pastası mikroyapısı ve arayüzey

Şekil 4.45. 17.5-CLM numunelerinin SEM görünümü
(a.7 günlük, b.28 günlük, c.90 günlük)

Beton numunelerine ait görüntüler, yapının genel görünümü, agrega-çimento pastası (zemin faz) ve mikro yapı olarak üç ayrı şekilde alınmıştır. Numunelerin genel olarak incelenmesinde, gözenekli camsı yapıya sahip ve mineraller içeren hafif agregalar bulunduğu; yapı içinde kuvars, alkali feldispat, kalsit gibi mineraller ve C-S-H, portlandit ve etrengit gibi hidrate fazlar ve hidrate olmamış çimento tanecikleri bulunduğu görülmüştür. 90 günlük numunelerin mikro yapısının 7 ve 28 günlüklere kıyasla daha yoğun olduğu belirlenmiştir [144].

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Çalışma kapsamında; 400 dozlu kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış pomza agregası kullanılarak hazırlanan hafif betonlar üzerinde yapılan deneyler ve analizlerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

Agrega deneyleri;

- Nevşehir ili, Merkez ilçesi, Çardak köyünden alınan pomza agregalar üzerinde polarizan mikroskop çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonucunda kayacın dasit bileşimli asidik magma ürünü olduğu belirlenmiştir.

- Tane büyüklüğü dağılımı deneyi sonucunda kullanılan pomzanın TS 706 EN 12620 standardına uygun olduğu belirlenmiştir.

- Kontrol agregalarına göre, 8/16 mm göz açıklığına sahip agregaların özgül ağırlık değerlerinin, çimento+kolemanit kaplaması ile arttığı ve beton üretiminde kullanılacak hafif agregaların özgül ağırlık değerinin 2.1 g/cm^3 (Gündüz, 2005) ile uyum sağladığı tespit edilmiştir.

- Gevşek birim ağırlık deneyi sonuçları incelendiğinde, kaplanmamış 8/16 mm göz açıklığına sahip pomza agregası hariç diğer agregaların, literatürde belirtilen 480–880 kg/m^3 değerler arasında olduğu görülmüştür.

- Agregaların tane çaplarına göre su emme yüzdeleri incelendiğinde; kontrol agregaların tane çapları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Ancak agregalar çimento ve çimento+kolemanit kaplandıktan sonra tane çapları arasındaki su emme farkının azaldığı, dolayısıyla agregalar kaplandıktan sonra tane boyutunun su emme üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu belirlenmiştir.

- Agrega darbe katsayısı (Impact value) ve agrega kırılma katsayısı (Crushing value) ufalanma yüzdelerinin 30'dan büyük çıkması anormal bir sonuç olarak değerlendirilmekle beraber, agreganın darbe ve kırılma katsayısı ufalanma yüzdesinin azalmasının, basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Taze beton deneyi;

- Üretilen taze betonların birim ağırlıkları 1806 kg/m³ ile 1957 kg/m³ arasında olduğu görülmüştür. Taze betonun birim ağırlıkları, çimento miktarı ile doğru orantılı olarak artmıştır.

Sertleşmiş beton deneyleri;

- Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin birim ağırlık değerleri 1664 ile 1898 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu değerlerin literatürde verilen üst sınırı (2000 kg/m³) geçmediği görülmüştür.

- Kontrol numuneleriyle, kaplanmış agregalarla elde edilen beton numunelerinden en yüksek basınç dayanımı 12.5-CLM numunelerinden ve en düşük basınç dayanımı kontrol numunelerinden elde edilmiştir. Basınç dayanımları incelendiğinde çimento, çimento+kolemanit katkılarının basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.

- TS EN 206-1'e göre, hafif beton kontrol numunelerinin LC 25/28, 0-CLM, 7.5-CLM ve 17.5-CLM hafif beton numunelerinin LC 35/38 ve 12.5-CLM hafif beton numunelerinin ise LC 40/44 dayanım sınıfında olduğu belirlenmiştir.

- Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin yarmada çekme dayanımları basınç dayanımlarının %5-10'u arasında değişmiştir.

- Beton numunelerin su emme oranları incelendiğinde; çimento, çimento+kolemanit kaplı agregalarla üretilen numunelerin ortalama %5, kontrol numunelerin ise %6 su emdiği tespit edilmiştir. Su emme sonuçları karşılaştırıldığında, agreganın çimento ve çimento+kolemanit kaplanmasının beton numunelerde su emme oranını belirgin şekilde değiştirmediği gözlenmiştir.

- Kılcal su emme verilerine göre, 28 günlük numunelerde kılcal su emme katsayıları 0.67-1.01x10^{-5} cm/$s^{1/2}$, 90 günlük numunelerde 0.12-0.16x10^{-5} cm/$s^{1/2}$ arasında bulunmuştur. Çalışmada, tüm serilerde 90 günlük numunelerin 28 günlük numunelere göre kılcal su emme katsayılarının 5-8 kat azaldığı tespit edilmiştir.

- Kaplanmamış, çimento ve çimento+kolemanit kaplanmış agregalardan elde edilen beton numunelerin aşınma kaybı değeri, kaplamalarına göre incelendiğinde, 90 günlük numuneler 28 günlük numunelere göre %40-56 arasında arttığı belirlenmiştir.

- Ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde; en düşük ultrases geçiş hızına sahip numune (kontrol) "iyi", en yüksek ultrases geçiş hızına sahip numunelerde (0-CLM, 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM) "mükemmel" beton sınıfına girdiği tespit edilmiştir.

- Basınç altında su işleme derinliği değerlerinin, 28 günlük numunelerde 41.3-76.8 mm olduğu ve standart değerleri sağlamadığı, 90 günlük numunelerde ise 5.3-18.3 mm arasında değiştiği ve standart değerlere uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 90 günlük numunelerin kür süresinin artmasıyla basınç altında su işleme derinliğini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir.

- Çalışmada, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin $NaSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelere göre daha az tahrip olduğu, 28 ve 90 gün bekletilen numunelere

çözeltilerin ($MgSO_4$ ve $NaSO_4$), kür etkisi yaptığı, 365 gün bekletilen numunelerin dayanımlarının azaldığı, ancak tahrip olmadığı tespit edilmiştir.

- Hızlı klorür geçirimliliği değerleri; kontrol numunelerine göre incelendiğinde, 0-CLM'de önemli bir artış gözlenmezken, 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinde %40-70 arasında azalma tespit edilmiştir. Kontrol ve 0-CLM numunelerinin klor geçirgenliğinin "düşük", 7.5-CLM, 12.5-CLM ve 17.5-CLM numunelerinin ise "çok düşük" olduğu belirlenmiştir.

- Hafif beton numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, numunelerin genel olarak incelenmesinde, gözenekli camsı yapıya sahip ve mineraller içeren hafif agregalar bulunduğu; yapı içinde kuvars, alkali feldispat, kalsit gibi mineraller ve C-S-H, portlandit ve etrengit gibi hidrate fazlar ve hidrate olmamış çimento tanecikleri bulunduğu görülmüştür. 90 günlük numunelerin mikro yapısının 7 ve 28 günlüklere kıyasla daha yoğun olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalar sonucunda, emniyetli olarak %12.5 kolemanit katkılı CEM I 42.5 R çimentosu ile kaplı agregalarla, kılcal su emmesi, hızlı klor geçirimliliği, basınç altında su geçirimliliği ve aşınma kaybı değeri düşük, basınç dayanımı değeri yüksek taşıyıcı özel hafif beton üretilebileceği tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

Çalışmada pomza agregasına, çimento ve çimento+kolemanit kaplaması yapılarak hafif beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen hafif beton numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın yanı sıra elde edilen hafif beton numunelerine donma-çözülme, sünme, yanma ısısı deneyleri de uygulanarak etkileşimleri irdelenebilir. Değişik bölgelerden alınan kolemanit ile de çalışmalar yapılarak deneyler tekrarlanabilir. Ayrıca farklı puzolanik malzemelerle agregaların kaplanması sağlanarak elde edilecek hafif betonların dayanım ve durabilite açısından özellikleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Buluttekin, M.B., ***Bor Madeni Ekonomisi: Türkiye'nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri***, 2. Ulusal İktisat Kongresi, DEÜ İİBF İktisat Bölümü, İzmir, Türkiye, 2008.

[2] Gündüz, L., Rota, A., Hüseyin, A., ***Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi***, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Sayfa No: 175-188, İzmir, Türkiye, 2001.

[3] Topçu, İ.B., ***Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi***, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 1988.

[4] Yıldırım, H., ***Yarı Hafif Betonun Az Tekrarlı Yük Altındaki Davranışına Bileşimin Etkisi***, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1989.

[5] Yıldırım, H., ***Agrega Konsantrasyonunun Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi***, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 1995.

[6] Müller, H.S., Linsel, S., ***A New Type Of High-Performance Light Concre***te, Materials for Buildings and Structures, Volume 6, 2005.

[7] Uğur, İ., ***Kırmataş Agregalı Hafif Betonların Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Analiz***, 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Sayfa No: 67-74, İstanbul, 2003.

[8] Tolğay, A., Yaşar, E. ve Erdoğan, Y., ***Nevşehir Pomzasının Agrega Olarak Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması***, 5.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Sayfa No: 345-354, İzmir, Türkiye, 2004.

[9] Hiçyılmaz, C., Altun, N., E., ***Pomzanın Yapı Malzemesi Olarak Kullanılma Olanaklarındaki Son Gelişmelerin ve Koşullarının Değerlendirilmesi***, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005, Sayfa No: 159-165, Isparta, Türkiye, 2005.

[10] Ceylan, H., ***Farklı Pomza Agrega Türlerinden Elde Edilen Hafif Betonun Sıcaklık Etkisindeki Karakteristiği***, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta, 2005.

[11] Sancak, E., Şimşek, O., ***Betonarme Betonunda Isparta Bims Agregasının Kullanılabilirliği***, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005, Sayfa No: 235-243, Isparta, Türkiye, 2005.

[12] Ünal, O., Uygunoğlu, T., Yıldız, A., ***Pomza ve Diyatomitle Üretilen Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması***, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005, Sayfa No: 211-217, Isparta, Türkiye, 2005.

[13] Topçu, İ., B., Altun, F., Arı, K., ***Kayseri Yöresi Hafif Agrega Özellikleri ve Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi***, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005, Sayfa No: 167-175, Isparta, Türkiye, 2005.

[14] Ceylan, H., Saraç, M., S., ***Kayseri Pomzasından Elde Edilen Hafif Betonun Tek Eksenli Basınç Dayanım Karakteristiği***, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005, Sayfa No: 127-132, Isparta, Türkiye, 2005.

[15] Gündüz, L., Şapçı, N., Bekar, M., İsker, M., ***Bimsbetonların Genleştirlmiş Perlit Agregalar İle Teknik Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Teknik Bir Analiz***, 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 2-4 Aralık, İstanbul, Türkiye, 2006.

[16] Başpınar, E., Gündüz, L., ***İnşaat Endüstrisinde Kullanılan Pomza Agregalarının Mineralojik ve Petrografik Özellikleri***, 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 2-4 Aralık, İstanbul, Türkiye, 2006.

[17] Türkel, S., Kadiroğlu, B., ***Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi***, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:13, Sayı:3, Sayfa No:353-359, 2007.

[18] Coşkun, A., Tanyıldızı, H., ***Silis Dumanı Katkılı Hafif Betonun Basınç Dayanımı ve Ultrasonik Ses Geçirgenliğine Farklı Kür Koşullarının Etkisi***, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayfa No: 14, Kütahya, 2007

[19] Ulusu, İ., ***Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilebilirliğinin Araştırılması***, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum, 2007.

[20] Subaşı, S., ***Genleştirilmiş Kil Agregası ile Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi***, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 24, No 3, Sayfa No: 559-567, Ankara, 2009.

[21] Gökçe, S., Can, Ö., ***Pomza Agregasının Farklı Zamanlardaki Su Emmelerinin Hafif Betonun Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi*****,** Politeknik Dergisi, Cilt:12, Sayı:4, Sayfa No:293-298, Türkiye, 2009.

[22] Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., ***Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Kür Ortamı ve Agrega Etkisi***, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25,No 3, Sayfa No: 459-467, 2010.

[23] Binici, H., Sevinç, A., H., Durgun, M., Y., ***Pomza, Barit, Kolemanit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Dayanımı ve Sülfat Direnci***, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:7, Sayı:1, Sayfa No: 39-51, Türkiye, 2011.

[24] Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E., ***Hafif Agregalı Betonlarda Donatı Çeliği-Beton Aderansı***, http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/10153.pdf (Erişim Tarihi: 2011).

[25] Bideci, A., ***Polimer Kaplı Pomza Agregalarla Elde Edilen Betonların Özelliklerinin Araştırılması***, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Edirne, 2011.

[26] Volkman, D.E., Bussolini, P.L., ***Comparison of Fine Particle Colomanite and Boron Frit in Concrete for Time-Strength Relationship***, Journal of Testing and Evalutation, Vol:20, No:1, 1992.

[27] Yalçın, S., ***Kolemanitli Çimentoların Betonarme Demirlerinin Korozyonu Üzerine İnhibitif Etkisi***, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1996.

[28] Kula, İ., ***Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi***, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ekim, 2000.

[29] Demir, İ., Orhan, M., ***Bor Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Değerlendirilmesi***, I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Sayfa No: 235-239, Kütahya, 2002.

[30] Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., Sevinç, V., ***Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi***, I.Uluslararası Bor Sempozyumu, Sayfa No: 259-265, Kütahya, 2002.

[31] Topçu, İ.B., Boğa, A.R., Demir, A., ***Bor Atıklı Çimento Harçlarında Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi***, III. Uluslararası Bor Sempozyumu, 2-4 Kasım, Sayfa No: 117-121 , Ankara, Türkiye, 2006.

[32] Sağlık, A., Sümer, O., Tunç, E., Kocabeyler, M., F., Çelik, R., S., ***Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu ve DSİ Projelerinde Uygulanabilirliği***, DSİ Teknik Bülteni, Sayı:105, 2009.

[33] Zeybek, M.S., Erdoğan, Y., Özmal, F., Atar, N., Şengil, İ.A., Erdoğan, M.S., ***Bazı Borlu Çimentoların Nötron Zırh Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması***, III. Uluslar arası Bor Sempozyumu, 2-4 Kasım, Sayfa No:123-126, Ankara, Türkiye, 2006.

[34] Sağlık, A., Sümer, O., Tunç, E., Kocabeyler, M.F., Çelik, R.S., ***Borlu aktif Belit (BAB) Çimentosunun özellikleri ve Kütle Betonu İle Klasik Betonda Kullanılabilirliği***, II. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 17-18 Nisan, Sayfa No:231-241, Ankara, Türkiye, 2008.

[35] Aydın, U., ***Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi*”,** Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Antakya,2009.

[36] Çimento ve Beton Dünyası, ***Beş Yıllık Borlu Yol Aşınma Göstermedi***, TÇMB Yayın Organı, Yıl/Vol:17, Sayı/No:95, Sayfa No:48-49, Ocak Şubat, 2012

[37] Çalık, A., Akkurt, İ., Akyıldırım, H., Günoğlu, K., ***Borlama: Malzemelerin Radyasyondan Koruma Özelliklerinin İyileştirilmesi***”, IV. Uluslararası Bor Sempozyumu, 15-17 Ekim, Sayfa No:19-21, Eskişehir, Türkiye, 2009.

[38] Özder, E., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, M.S., ***Kolemanitin Frit Katkılı Ham Seramik Sır Üretiminde Kullanımı***, III. Uluslararası Bor Sempozyumu, 2-4 Kasım, Sayfa No: 97-104, Ankara, Türkiye, 2006.

[39] Aygün, M., Çoban, M., Canımkurbey, B., ***Trommel Sieve Waste (TSW)'nin Seramik Yapıştırıcı ve Derz Dolguda Soğurma ve Saçılma Etkilerinin İncelenmesi***, II. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 17-18 Nisan, Sayfa No:289-293, Ankara, Türkiye., 2008.

[40] Pekkan, K.K., Karasu, B., Önal, H.Ş., ***Hızlı Pişirim Duvar Karosu Cam-Seramik Sır Sistemlerinde Bor Oksidin Etkileri***, 2. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 17-18 Nisan, Sayfa No:325-331, Ankara, Türkiye, 2008.

[41] Postacıoğlu, B., ***Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton***, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, Cilt 2, İstanbul, 1987.

[42] Chia, K.S. ve Zhang, M.H., ***Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete***, Cement and Concrete Research, Vol:32, pp:639–645, 2002.

[43] Erdoğdu, Ş. ve Karataş, E., ***Sülfat İyonu Konsantrasyonu Düşük Ortamlara Maruz Betonun Durabilitesinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi***, 5. Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı, Sayfa No:555-565, İstanbul, 2003.

[44] Binici, H., Görür, E.B., ***Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Deniz Yapılarında Kullanımı***, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005, Sayfa No: 121-125, Isparta, Türkiye, 2005.

[45] Özkul, H.M., Doğan, Ü.A., İlki, A., ***Beton Bileşim ve geçirimlilik Özelliklerinin Donatı Korozyonu Üzerine Etkisi***, http://istanbultek.academia.edu/Anil Dogan/Papers/491355, 2006.

[46] Şahmaran, M., Kasap, Ö., Yaman, İ.Ö, ***Tras ve Uçucu Kül Katkılı Çimentoların Sülfat Etkisindeki Performansları***, 6. Ulusal Beton Kongresi, Sayfa No: 201-208, 2005.

[47] Erdoğdu, K., Tokyay, M., Türker, P., ***Traslar ve Traslı Çimentolar***, TÇMB, AR-GE, Y99-2, Nisan, Ankara, 2007.

[48] Oymael, S., Şen, L., Durmuş, A., ***Üretimlerinde Puzolanlı Çimento Kullanılan Mikrobetonlarda Sülfatlara Dayanıklılık***, e-Journal of New World Sciences Academy, Vol:2, Number:3, www.newwsa.com, 2007.

[49] Mehta P.K., Monterio P.J.M., ***Concrete***, 2nd Edn. McGraw Hill, New York, 1993.

[50] Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mermerdaş, K., ***Metakaolin Katkılı Betonların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi***, http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3153.pdf, Sayfa No:259-269, 2007.

[51] Durmuş, G., ***Farklı Beton Sınıflarının Su İşleme Derinliğinin Değerlendirilmesi*****,** Politeknik Dergisi, Cilt:11, Sayı:4, Sayfa No:379-383, 2008.

[52] Mirza, F.A.M., ***Effect of Sand Replacement and Silica Fume Addition on Chloride Ion Permeability of Light Weight Concrete***", JKAU: Eng.Sci. Vol:20 No:1, pp:61-73 (http://www.kau.edu.sa/Files/320/Researches/52742_23048.pdf, 2009.

[53] Kılınçarslan, Ş., Başyiğit, C., Uzun, İ., ***Ağır Betonların Sülfat Etkisinde Mekanik Özellikleri***, SDU International Journal of Technologic Sciences, Vol:2, No:2, pp:60-71, 2010.

[54] Uluöz, N., Özbebek, H., Arslan, M., Açık, H., ***Farklı Çimento Tipleri ve Mineral Katkılar ile Üretilen Betonların Mekanik ve Geçirimlilik Özellikleri***, THBB Hazır Beton Kongresi 2011, Sayfa No: 376-387, İstanbul, 2011.

[55] Assas, M.M., ***Transport and Mechanical Properties of Silica Fume Lightweight Aggregate Concrete***, Life Science Journal, 9 (1), pp:628-635, 2012.

[56] Gündüz, L., ***İnşaat Sektöründe Bimsblok***, Süleyman Demirel Üniversitesi Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta, 2005.

[57] TS 10088 EN 932-3, ***Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler Kısım 3: Basitleştirilmiş Petrografik Tanımlama İçin İşlem ve Terminoloji***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.

[58] DPT, ***Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı***, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri-III, Ankara, 2001.

[59] Gündüz, L., Yılmaz, İ., ***Orta Anadolu Pomza Oluşumlarının Endüstriyel Olarak Kullanılabilir Ölçütleri***, Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, ss:213-220, Türkiye, 2001.

[60] Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., Krukowski, S.T., ***Industrial Minerals and Rocks***, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., USA. 2006

[61] Tuncer, G., Özkan, Ş.G., ***Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış***, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:7, Sayı:2, Sayfa No:269-276, 2001.

[62] Artuso, J.F. ve Wargo, G.R., ***Concrete Consruction Handbook***, Forth Edition, McGraw-Hill Handbooks, Chapter 11, 1998.

[63] Özkan, Ş.G., Tuncer, G., ***Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış***, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/ecd070e606afbf0_ek.pdf, (Erişim Tarihi: 2012).

[64] DPT, ***Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel hammaddeler alt Komisyonu Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri,*** Cilt-2, Yayın No: DPT: 2434, ÖİK: 491, Türkiye, 1996.

[65] http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf, (Erişim Tarihi: 2012).

[66] Gündüz, L., ***Pomza Teknolojisi, Pomza Karakterizasyonu***, Cilt I, Isparta,1998.

[67]http://www.mta.gov.tr/v2.0/turkiye_maden/maden_potansiyel_2010/Nevsehir_Madenler.pdf(Erişim Tarihi: 2012).

[68] Yenmez, N., ***Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerinin Türkiye İçin Önemi***, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü, Coğrafya Dergisi, Sayı:19, Sayfa No:59-94, İstanbul, 2009

[69] DPT***, Dokuzuncu Kalkınma Planı, 2007-2013, Bor-Soda Külü, Krom Kimyasalları Çalışma Grubu Raporu***, Ankara, 2008.

[70]http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_ETI_MADEN_2011.pdf

[71] Helvacı, C., ***Türkiye Borat Yatakları, Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası***, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5.1., 2003.

[72] Şaylı, S., ***İnsan Sağlığı ve Bor Mineralleri***, www.bigadiç.gov.tr., 2000.

[73] http://www.etimaden.gov.tr, (Erişim Tarihi: 2012).

[74] Helvacı, C., ***Bor Yatakları ve Oluşum Modelleri***, ***Evaporitler Tuzlar Semineri***, Sayfa No:10-19, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Sayı:81, 2004.

[75] Helvacı, C., ***Türkiye Borat Yatakları: Jeoloji Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası***, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 Mayıs, İzmir, Türkiye, 2004.

[76] Gülensoy, H., Kocakerim, M., M., ***Kolemanit Mineralinin Karbondioksitli Sulardaki Çözünürlüğü ve Jeolojik Oluşumu Hakkındaki Araştırmalar***, www.mta.gov.tr. (Erişim tarihi, 2011).

[77] Helvacı, C., ***Türkiye Borat Yatakları, Jeolojik konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası***, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5.5, Sayfa No:4-40, 2003.

[78] Özkan, Ş., G., Çebi, H., Delice, S., Doğan, M., ***Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciliği***, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Sayfa No:224-228, İzmir Türkiye, 1997.

[79] Chandra, S. ve Berntsson, L., ***Lightweight Aggregate Concrete, Science, Technology and Application***, Noyes Publications, p:193, USA., 2003.

[80] Neville, A.M., ***Properties of Concrete***, Pitman Publishing, London, 1993.

[81] Mindess, J. ve Young, J, S., ***Concrete***, Engleood Cliffs, Newjersey: Prentice Hall, Inc. Pp. 581–596. New Jersey,1981.

[82] Taşdemir, M.A., ***Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları***, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, Doktora Tezi, İstanbul,1982.

[83] Newman, J. ve Owens. P., ***Properties of Lightweight Concrete***, Advanced Concrete Technology Processes (Edited by: Newman, J. ve Choo, B.S.), Butterworth-Heinemann, Elsevier, p.2/9-10, Oxford, 2003.

[84] TS EN 206-1, ***Beton – Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

[85] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., ***Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)***, THBB Birliği, İstanbul, 2010.

[86] Taşdemir, M.A., ***Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi***, Sürekli Eğitim Seminerleri, İMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 2002

[87] Baradan B., Yazıcı, H., ***Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler***, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı:426-2003/4, 2003.

[88] Erdoğan, T.Y., ***Beton***, ODTÜ Geliştirme Vakfı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 2007.

[89] Şimşek, O., ***Beton ve Beton Teknolojisii***, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2007.

[90] Kutlu, O., Erdoğan, B., ***CEM III/A Çimentosunun Sülfat Direnci Konusunda Karşılaştırmalı Bir Çalışma***, , Çimento ve Beton Dünyası, TÇMB Yayın Organı, Vol/Yıl:12, Sayı:71, Sayfa No:52-55, Ankara, 2008.

[91] Subaşı, S., ***Kalıp Yüzey Farklılıklarının Betonun Bazı Fiziksel Özelliklerine Etkileri***, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2001.

[92] Washa, G.W., ***Concrete Consruction Handbook – Revised by Joseph A. Dobrowolski***, Forth Edition, McGraw-Hill Handbooks, Chapter 7, 1998.

[93] Şimşek, O., ***Beton ve Beton Teknolojisi***, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2004.

[94] Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Gjorv, O.E., ***Puzolanik Malzemelerin Betonun Mekanik Özellikleri ve Klor İyonu Yayınıma Etkisi***, İTÜ Dergisi, Cilt:6, Sayı:1, ss:53-64, İstanbul, 2007.

[95] Kurdowski, W., ***Structure and Performance of Cements***, Chapter:11, (Edited by Bensted, J., Barnes, P.), Second Edition, Spon Press, Taylor and Francis Group, New York, 2002.

[96] Gönen, T., ***Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması***, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 2009.

[97] Blokbims Madencilik Hafif Yapı Elemanları, ***Pomza Analiz Raporu***, Nevşehir, 2012.

[98] Binici, H., Zengin, H., Zengin, G., Yasarer, F., ***The Use Of Pumice As A Coating For The Reinforcement Of Steel Against Corrosion and Concrete Abrasions*****,** Corrosion Science, 50, pp:214-2148, 2008.

[99] Tempo İnşaat turizm Maden San. Tic. A.Ş., ***Doğal Agrega (Kum) Analiz Raporu***, Kırklareli, 2011.

[100] Kırklareli Limak Trakya Çimento Fabrikası***, Çimento Kimya Analizi Raporu No: 001***, Kimya Laboratuarı, Kırklareli, 07.12.2011.

[101] Eti Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü, ***Kolemanit Analiz Raporu***, Balıkesir, 2011.

[102] Demirörs, N., ***Suudi ArabistanDamad Barajında Uçucu Kül Yerine Puzolanik Madde Olarak Taş Unu Kullanımı ve Proje Ekonomisine Etkisi***, ARCEA-Association of Turkish Consulting Engineers and Architects, 7th Engineering Consultancy Congress, Ankara, 2009.

[103] Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Sönmez, R., ***Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimliliği***, 5. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, ss: 75-85, İstanbul, 2003.

[104] http://www.gulmak.com.tr/sayfalar/kuruyemis_7.asp, (Erişim Tarihi 2012).

[105] TS 2511, ***Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1977.

[106] Ersoy, Y., Helvacı, C., ***Petrografi Laboratuvar Notları I (Mağmatik Petrografi)***, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, http://kisi.deu.edu.tr/yalcin.ersoy/petrolab.pdf, 2011.

[107] Gültekin, A.H., ***Yapı Taşları Jeolojisi***, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı Ders Notları, Edirne, 2006.

[108] Erdoğan, Y., ***Asidik ve Bazik Pomzadan Üretilen Yapı Malzemelerinin Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması***, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 2007.

[109] TS 3530 EN 933–1, ***Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999.

[110] TS 706 EN 12620, ***Beton Agregaları***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.

[111] Cengizkan, K., Ersoy, U., ***Betonarmede Bims Kullanımı***, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Yayın No:31, İzmir, Türkiye, 1999.

[112] TS EN 1097-3, ***Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999.

[113] TS EN 1097–6, ***Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

[114] Sangari, ***Beton (Yapı Malemeleri Laboratuarı El Kitabı)***, Kenedi Cad. No:71, Kavaklıdere, Ankara, 1992(?).

[115] TS EN 12350–2, ***Beton –Taze Beton Deneyleri – Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

[116] TS EN 12350–6, ***Beton –Taze Beton Deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

[117] TS EN 197-1, ***Çimento-Bölüm1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

[118] TS EN 12390–3, ***Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

[119] Gönül, H., ***Bazalt Skoriasının Taşıyıcı Yarı Hafif Beton Üretiminde Kullanımı,*** Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Ankara, 2008.

[120] TS EN 12390–6, ***Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

[121] ASTM C 330, ***Spesification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete***, Annual Book of ASTM Standarts, USA, 2002.

[122] Hossain, K.M.A***., Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweigth Concrete***, Cement and Concrete Research, Vol:34, pp:283-291, 2004.

[123] Gao, J., Sun, W. ve Morino, K., ***Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced High Stregth Lightweigth Concrete***, Elsevier Cement and Concrete Composites, Vol:19, pp, 307-313, 1997.

[124] Haque, M.N., Al-Khaiat, H. ve Kayali, O., ***Strength and Durability of Ligthweigth Concrete***, Elsevier Cement and Concrete Composites, Vol:26, pp, 307-314, 2004.

[125] TS 3624, ***Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1981.

[126] Neville, A.M., ***Properties of Concrete***, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York, 1994.

[127] Aicitin, P.C., ***High-Performance Concrete***", E&FN Spon, London and Newyork, 1998.

[128] Ustabaş, İ., Erdoğdu, Ş., ***Betonda Deniz Kumu Kullanımı e Kılcallık Etkisiyle Klorür Taşınması***, THBB Hazır Beton Kongresi 2011, Sayfa No: 99-108, İstanbul, 2011.

[129] Kabay, N., ***Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi***, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 2009.

[130] Wang, K., Jansen, D.C., Shah, S.P. ve Karr, A.F., ***Permeability Study of Cracked Concrete***, Cement and Concrete Research, Vol:27, pp:381-393, 1997.

[131] Hossain, K.M.A., Ahmed, S. ve Lachemi, M., ***Lightweigth Concrete in Corporating Pumice Based Blended Cement and Aggregate: Mechanical and Durability Characteristics***, Elsevier, Construction and Building Materials, Vol:25, pp:1186-1195, 2011.

[132] TS 699, ***Doğal Yapı Taşları - İnceleme ve Laboratuar Deney Yöntemleri***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.

[133] Oymael, S., Yeğinobalı, A.M., ***Bitümlü Şist Külü Katkısının Betonda Aşınma Dayanımına Etkisi***, Sayfa No:359-368, www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/11716.pdf., 1996.

[134] ASTM C 597, ***Test Method for Pulse Velocity Through Concrete***, Annual Book of ASTM Standarts, USA, 2002.

[135] Neville, A.M., ***Properties of Concrete***, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York, 1990.

[136] Whitehurst, E.A., ***Soniscope Tests Concrete Structures***, Journal of American Concrete Institue, 47, pp:443-444, 1951.

[137] TS EN 12390-8, ***Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

[138] TS 3440, ***Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1982.

[139] Oymael, S., ***Bitümlü Şist Külünün Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi***, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Elazığ, 1995.

[140] ASTM C 1202, ***Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Choloride Ion Penetration***, Annual Book of ASTM Standarts, USA, 1997.

[141] Özkul, H., Doğan, Ü.A., ***Kendiliğinden Yerleşen Betonların Geçirimlilik Özellikleri***, Beşinci Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, Sayfa No: 111-122, İstanbul, 2003.

[142] Akman, M. S., Özyurt, N., ***Beton Kıyı Yapılarında Denizin Geçirimsizlik Üzerine Etkisi***, http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/10568.pdf (Erişim Tarihi: 2012).

[143] Liu, X., Chia, K.S., Zhang, M.H., ***Water Absorption, Permeability and Resistance to Chloride-Ion Penetration of Lightweight Aggregate Concrete***, Elsevier, Construction and Building Materials, Vol:25, pp:335-343, 2011.

[144] Rapor No:1854, ***Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Laboratuarları İnceleme Raporu***, Ankara, 19.10.2012.

[145] Postacıoğlu, B., ***Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton***, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, Cilt 1, İstanbul, 1986.

[146] TS EN 1008, ***Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler Ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları***, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.

[147] http://www.mta.gov.tr/v2.0/turkiye_maden/il_maden/pdf_2010/nevsehir.pdf, (Erişim Tarihi 2012).

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında İsviçre'nin Bern şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Eskişehir'de tamamladı. 1996 yılında girdiği Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği'nden 2000 yılında mezun oldu. 2000 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi'nde başladığı yüksek lisansını 2003 yılında tamamladı. 2006 yılında Trakya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı. Halen, 2007 yılında kurulan, Kırklareli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

Yabancı dili İngilizce'dir, evli ve bir çocuk annesidir.