

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOLEMANİT İKAMELİ BETON YOLLARIN DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİ

CUMA KARA

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ TUBA KÜTÜK
TEZ JÜRİLERİ
DOÇ. DR. EROL İSKENDER
DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ GÜRBÜZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RİZE-2019

Her Hakkı Saklıdır

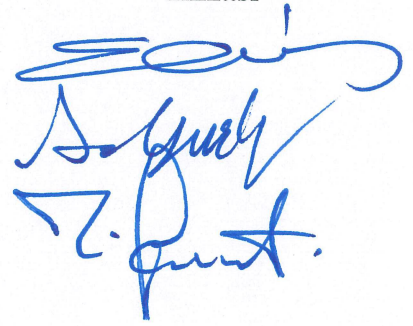
T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOLEMANİT İKAMELİ BETON YOLLARIN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Tuba KÜTÜK danışmanlığında, Cuma KARA tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/06/2019 tarihinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı
Başkan	: Doç. Dr. Erol İSKENDER
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Tuba KÜTÜK

İmzası




Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Kolemanit ikameli beton yolların durabilite özelliklerinin araştırıldığı bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda “Yüksek Lisans Tezi” olarak hazırlandı.

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Tuba KÜTÜK’e, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocalarım Doç. Dr. Sezai KÜTÜK ile Dr. Öğr. Üyesi İlknur BEKEM KARA’ya sonsuz teşekkür ederim.

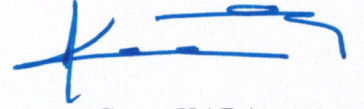
Tez çalışması için gerekli malzemelerin tedarik edilmesinde emeği geçen Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü ve deneysel çalışmalarda desteklerinden dolayı Artvin Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürü Fatih DEŞİK ile İnşaat Teknikeri Adem ŞAHİN’e içtenlikle teşekkür ederim.

Maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan fedakâr aileme ve tez çalışmaları esnasında sabırla bekleyen kızım Rüveyda Ece KARA’ya ayrıca teşekkürü borç bilirim.

Cuma KARA

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan ‘‘Kolemanit İkameli Beton Yolların Durabilite Özellikleri’’ başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 21/06/2019



Cuma KARA

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

KOLEMANİT İKAMELİ BETON YOLLARIN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Cuma KARA

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tuba KÜTÜK

Bu çalışmada kolemanit minerali çimentoya %0, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ikame edilerek Su/Çimento oranı 0,45 olan C30/37 beton üretimi yapılmıştır. Taze betonların hava içeriği ve çökme miktarı belirlenmiştir. Küp, silindir ve prizmatik kalıplara dökülen beton örnekleri üzerinde 7, 28 ve 90. günlerde kapiler su emme, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı, aşınma, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Beton yolların maruz kaldığı iklimsel faktörlerin, zemin ve buz çözücü tuzlardan kaynaklı olarak ortaya çıkan kimyasal etkilerin beton durabilitesini olumsuz etkilediği yadsınamaz bir gerçektir. Bu nedenle beton yollar olarak tasarlanan örneklerin ıslanma-kuruma, donma-çözülme, sülfat ve klorür durabilite özellikleri araştırılmıştır.

Sonuç olarak %5'e kadar kolemanit ikamesinin C30/37 beton sınıfında hedef basınç dayanımını sağladığı görülmüştür. Dayanım ve durabilite özelliklerini geliştiren optimum kolemanit ikame oranının ise %3 olduğu tespit edilmiştir. Özellikle çevresel şartlara karşı malzeme özelliklerinin geliştirilmesi, çimentodan tasarruf sağlanması ve bor madeni minerallerinin değerlendirilmesi bağlamında beton yollarda kolemanit kullanımının uygun olduğu kanısına varılmıştır.

2019, 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kolemanit, Beton, Durabilite, Çimento, İkame

ABSTRACT

DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE ROADS SUBSTITUTION COLEMANITE

Cuma KARA

**Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Master Thesis
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Tuba KÜTÜK**

In this study, colemanite mineral is substituted with 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% cement and C30/37 concrete was produced with water/cement ratio of 0,45. Air content and slump amount of fresh concrete were determined. Capillary water absorption, Schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity, abrasion, flexural and compressive strength tests were performed on the concrete specimens poured into cube, cylinder and prismatic molds on 7th, 28th and 90th days. It is an undeniable fact that climatic factors and chemical effects from ground and de-icing salts exposed to concrete roads have negative impacts on concrete durability. Therefore, wetting and drying, freezing-thawing, sulphate and chloride durability properties of the specimens which are designed as concrete roads were investigated.

As a result, colemanite substitution up to 5% provides target compressive strength in concrete class C30/37. It was found that the optimum colemanite substitution rate which improves the strength and durability properties was 3%. It is concluded that colemanite is used in concrete roads especially in terms of development of material properties against environmental conditions, saving of cement and evaluation of boron mineral minerals.

2019, 85 pages

Keywords: Colemanite, Concrete, Durability, Cement, Replacement

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
TABLolar DİZİNİ.....	VIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Beton Yollar.....	3
1.3. Beton	9
1.4. Kolemanit Minerali ve Literatür Özeti	17
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Materyal	24
2.1.1. Çimento.....	24
2.1.2. Kolemanit Minerali	24
2.1.3. Agrega.....	26
2.1.4. Katkı Maddesi	26
2.1.5. Beton Karışım Suyu.....	26
2.2. Yöntem.....	28
2.2.1. Agrega Deneyleri	30
2.2.2. Beton Tasarımı ve Karışımların Hazırlanması	34
2.2.3. Taze Beton Deneyleri	36
2.2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri	37
3. BULGULAR.....	44
4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	68
5. ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Afyon-Emirdağ beton yol görüntüsü.....	6
Şekil 2.	Hasdal-Kemberburgaz beton yol görüntüsü.....	7
Şekil 3.	Ordu-Ulubey beton yol görüntüsü.....	7
Şekil 4.	Karamürsel beton yol görüntüsü	8
Şekil 5.	Schmidt çekici ölçümlerinin yaklaşık basınç dayanımına dönüşüm grafiği. .	15
Şekil 6.	Kolemenit mineralinin (a) optik mikroskop (b) elektron mikroskobu görüntüleri	25
Şekil 7.	Beton tasarım, dökümü, taze beton deneyleri ve kalıplara yerleştirilmesi.....	29
Şekil 8.	Beton numunelerin kür edilmesi ve sertleşmiş beton deneyleri.....	29
Şekil 9.	Polarizan mikroskopta incelenen agrega görüntüsü.....	31
Şekil 10.	Agregalara ait deneysel granülometri eğrisi.....	31
Şekil 11.	Beton karışımların hazırlanması için kullanılan laboratuvar tipi beton mikseri.....	35
Şekil 12.	Taze beton deneylerinden (a) Çökme (Slump) seti ve (b) Hava ölçer görüntüleri.....	36
Şekil 13.	(a) Schmidt çekici ve (b) Ultrases geçiş hızı cihaz görüntüleri.....	38
Şekil 14.	(a) Basınç dayanım deney presi ve (b) Eğilme dayanımı deney görüntüsü. ..	39
Şekil 15.	(a) Basınç dayanım deney presi ve (b) Yarmada çekme deney aparatı görüntüsü.....	39
Şekil 16.	Böhme (Yatay) aşındırma cihazı.....	40
Şekil 17.	Kapiler su emme deney düzeneği.....	41
Şekil 18.	(a) Etüv ve (b) ıslanma kuruma çevrimi düzeneği.	42
Şekil 19.	(a) Numune kaplarına beton ve su yerleştirilmesi (b) Numune kaplarının cihaza yerleştirilmesi (c) donma ve çözülme cihazı.....	43
Şekil 20.	Kimyasal ortam görüntüleri: (a) $MgSO_4$ ve (b) $NaCl$	43
Şekil 21.	Taze beton numunelerinin yoğunluk sonuçları.	44
Şekil 22.	Taze beton numunelerin çökme (slump) miktarları.	45
Şekil 23.	Taze beton numunelerin hava içeriği sonuçları.....	45
Şekil 24.	Schmidt çekici ile elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.	47
Şekil 25.	Ultrases geçiş hızı deneyi ile 7, 28 ve 90 günlük ölçüm değerleri.	47
Şekil 26.	Kapiler ve ağırlıkça su emme deneyleri ile 7, 28 ve 90 günlük sonuçlar.....	48
Şekil 27.	Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri.	49
Şekil 28.	Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri.	51
Şekil 29.	Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	52

Şekil 30. Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük aşınma kaybı değerleri.	53
Şekil 31. Islanma ve kuruma etkisi sonucunda beton numunelerin kütle kayıpları.	55
Şekil 32. Islanma ve kuruma sonrası Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.	55
Şekil 33. Islanma ve kuruma sonrası ultrases geçiş hızı değerleri.	56
Şekil 34. Islanma ve kuruma çevrimi sonrası beton türlerinin basınç dayanımları.	57
Şekil 35. Donma ve çözülme etkisi sonucunda beton numunelerin kütle kayıpları.	58
Şekil 36. Donma ve çözülme sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen dayanım değerleri.	59
Şekil 37. Donma ve çözülme sonrası beton türlerinin ultrases geçiş hızı değerleri.	60
Şekil 38. Donma ve çözülme sonrası beton türlerinin basınç dayanımı değerleri.	60
Şekil 39. Sülfat sonrası beton türlerinin kütle kayıpları.	62
Şekil 40. Sülfat sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.	62
Şekil 41. Sülfat sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.	63
Şekil 42. Sülfat sonrası beton türlerinin basınç dayanımları.	63
Şekil 43. Klor sonrası beton türlerinin kütle kayıpları.	64
Şekil 44. Klor sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.	65
Şekil 45. Klor sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.	65
Şekil 46. Klor sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.	Satış cinsine göre yol ağı.....	1
Tablo 2.	Türkiye’de yapılan beton yolların bazı teknik özellikleri.....	8
Tablo 3.	Beton yapıların iç ve dış etkenlerle bozulması.	10
Tablo 4.	Ultrases geçiş hızı ve beton kalite ilişkisi.....	16
Tablo 5.	Çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve basınç dayanımı özellikleri.....	24
Tablo 6.	Kolemanit mineraline ait kimyasal özellikler.....	25
Tablo 7.	Katkı maddesine ait teknik özellikler	26
Tablo 8.	Karma suyuna ait analiz sonuçları	27
Tablo 9.	Kimyasal maddelere ait özellikler	27
Tablo 10.	Kimyasal maddelere ait özellikler	27
Tablo 11.	Agregalara uygulanan fiziksel deneyler.	30
Tablo 12.	Agregalara ait fiziksel özellikler.....	32
Tablo 13.	Kolemanitin ikame oranları ve beton numunelerin etiketlenmesi.	34
Tablo 14.	Beton karışımına giren malzeme miktarları.....	35
Tablo 15.	Beton numunelerin kalıpta bekleme süreleri.	36
Tablo 16.	Donma ve çözülme döngüsü.....	42
Tablo 17.	Beton türlerinin basınç dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri.....	50
Tablo 18.	Beton türlerinin yarmada çekme dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri.....	51
Tablo 19.	Beton türlerinin eğilme dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri.....	53
Tablo 20.	Beton türlerinin aşınma kayıpları ve zamanla referansa göre değişimleri...	54
Tablo 21.	Islanma ve kuruma çevrimi sonrasında yapılan deneylerde elde edilen yüzde kayıplar.....	58
Tablo 22.	Donma ve çözülme çevrimine maruz kalmış beton türlerinde hesaplanan yüzdelik kayıplar.....	61
Tablo 23.	MgSO ₄ çevrimine maruz kalmış beton türlerinde hesaplanan yüzdelik kayıplar.	64
Tablo 24.	NaCl çevrimine maruz kalmış beton türlerinde hesaplanan yüzdelik kayıplar.	66

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

K0	Bağlayıcı Miktarı %100 Çimento
K1	Bağlayıcı Miktarı %99 Çimento ve %1 Kolemanit
K2	Bağlayıcı Miktarı %98 Çimento ve %2 Kolemanit
K3	Bağlayıcı Miktarı %97 Çimento ve %3 Kolemanit
K4	Bağlayıcı Miktarı %96 Çimento ve %4 Kolemanit
K5	Bağlayıcı Miktarı %95 Çimento ve %5 Kolemanit
B ₂ O ₃	Bor Oksit
MgSO ₄	Magnezyum Sülfat
NaSO ₄	Sodyum Sülfat
NaCl	Sodyum Klorür
CaCl ₂	Kalsiyum Klorür
SA	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi
CEM I 42.5 R	Portland Çimentosu
C-75	75 Mikron Elek Altı Malzeme
S/Ç	Su/Çimento
TKEDY	Tüketilerce Kabul Edilebilir ve Herhangi Bir Anormal Değişim Yok

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ulaştırma sistemleri, bir ülkede sosyal, kültürel ve ekonomik faaliyetlerin canlanmasında etkin rol oynayan bir araçtır. Bu nedenledir ki doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanılması, mal ve hizmetlerin hızlı dağıtılması, iç ve dış ticaretin geliştirilmesi, ancak ulaşımın dikkatli bir şekilde planlanması ve düzenli bir ulaştırma ağının oluşturulması ile mümkün olacaktır (Akgüngör ve Demirel, 2004). Günümüzde yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan başlıca ulaştırma sistemleri karayolları, demiryolları, denizyolları, havayolları, boru hatlarıdır. Ülkeler ulaşım sistemlerinin işleyişini daha verimli hale getirmek için yoğun çalışmalar yapmaktadır. Seçilecek olan ulaştırma sisteminin ülke koşullarına uygun bir ulaştırma sisteminin olması gerekmektedir (Aydemir, 2016). Güzergâh seçiminde esneklik göstermesi, aktarmasız bir ulaşım olanağı sağlaması, taşıma kapasitesi ve diğer tüm yolcu taşıma türlerinin tamamlayıcısı durumunda olması nedeniyle karayolu taşımacılığı diğer taşıma seçeneklerine göre daha fazla kullanım alanına sahiptir (Taç, 2018).

Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğu altında bulunan karayolu uzunluğu 01.01.2019 tarihi itibarıyla toplam 67333 km olup, 3 sınıf yoldan oluşmaktadır. Bunlar otoyol, devlet yolları ve il yollarıdır. Satış cinsine göre yolların dağılımı Tablo 1'de görülmektedir (URL-1). Tabloda verilen otoyol uzunluğuna ana gövde ve bağlantı yolu dahil olup, yan yol ve kavşak kolları ile Yap-İşlet-Devret kapsamında yapılan otoyollar dahil değildir.

Tablo 1. Satış cinsine göre yol ağı.

Satış Cinsi	Otoyol (km)	Devlet Yolları (km)	İl Yolları (km)	Toplam (km)
Asfalt Betonu	2159	17520	4403	24082
Satış Kaplama	-	13115	26218	39333
Parke	-	58	232	290
Stabilize	-	27	537	564
Toprak	-	-	443	443
Diğer Yollar	-	301	2320	2621
Toplam	2159	31021	34153	67333

Trafik yüklerini güvenli taşıyarak taban zeminine aktarılmasını sağlayan eleman “karayolu üst yapısı” veya “yol kaplaması” olarak tanımlanmaktadır. Üstyapı aynı zamanda sağlamış olduğu kayma direnci güvenliği ve sürüş konforu sayesinde yol performansında da önemli bir parametre olmaktadır (Şengün vd., 2017). Trafik güvenliğini etkileyen ana faktörlerden biri olan üstyapı tasarımı hizmet ömrü boyunca gerekli teknik özellikleri sağlamalıdır. Gerekliliklerin yol kaplamalarına uymaması kaza sayısında artışa neden olmaktadır (Korochkin, 2018). Yol kaplamaları, üzerinde hareket eden trafik yüküne dayanacak şekilde özellikle dayanıklı ve kullanışlı hale getirilmiş gerçek hareket yüzeyidir. Yol kaplamaları, araçlar için sürtünme sağlar, böylece sürücüye rahatlık sağlar ve trafik yükünü üst yüzeyden doğal toprağa aktarır. Yol kaplamaları öncelikle araçlar ve yayalar tarafından kullanılmalıdır (Mohod ve Kadam, 2016).

Karayollarında üstyapı tipi seçimi yapılırken, üstyapı tipleri teknik ve ekonomik bakımdan karşılaştırılmalı ve ülke koşulları da dikkate alınarak karara varılmalıdır (URL-2). Tüm dünyada genel olarak yol üstyapıları ikiye ayrılmıştır. Bunlar bağlayıcı malzemesi bitüm esaslı olan esnek (asfalt) üstyapılar ve bağlayıcı malzemesi hidrolik esaslı çimento olan rijit (beton) üstyapılardır (Şengün vd., 2017).

Esnek üstyapılar, uzun yıllardan beri karayolu inşaatlarında uygulanan bir kaplama türüdür. Türkiye’de mevcut yatırımlar; bu konuda uzmanlaşmış ekipler, tesis ve makine sayısının yeterli olması gibi faktörler nedeniyle esnek üstyapı kaplamaları, yaygın olarak uygulanmaktadır. Ayrıca esnek üstyapı malzemesi olan bitümlü karışımlar, hızlı ve kolay inşaat imkânıyla şehir içi ve şehir dışı yollarda trafik sıkışıklığına neden olmadan, güvenli ve hızlı bir şekilde yolun trafiğe açılmasını sağlaması yönünden uygun olmaktadır. Düşük trafik yoğunluğunda, esneklik özelliğinden dolayı daha ince bir tabaka halinde uygulanabilmesi, uzun süre bağlayıcı özelliğini kaybetmemesi, içerisinde yer alan bitüm ve agreganın kısmen geri dönüştürülebilir olması gibi nedenlerden dolayı da tercih edilen bir üstyapı malzemesi olmaktadır (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017).

Türkiye’de halen inşası hızla artan esnek yol kaplamaları, taşıt sayısı ve çeşitliliğindeki artış nedeni ile ekonomik verilerin ne denli önem arz ettiğini gözler önüne sermektedir. Trafik hacmi ve buna bağlı olarak, kaplama gerilmelerindeki artış, üstyapı problemlerinin daha sık yaşanmasına ve yolların servis ömürlerinde azalmalara sebep

olmaktadır. Bu durum ise ekonomik yönden büyük kayıpları beraberinde getirmektedir. Ayrıca yol yapımında kullanılan malzemelerin, beklenen performans limitinin altında kalması ve iklim-bölge şartlarının yol üzerindeki olumsuz etkileri de yolun hizmet ömrünü en aza indirmektedir. Hizmet ömrü içerisinde yoldan ekonomik bir şekilde faydalanmanın veya başka bir deyişle yolun hizmet ömrünü uzatmanın tek çözümü, gerekli düzeyde yeterli bakım yaparak yol üstyapısının dayanımını yükseltmektir (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017). Mevsimler arasında büyük sıcaklık farklılıkları bulunan, kara ikliminin hâkim olduğu bölgelerde, asfalt betonunun viskoelastik davranışlı bir malzeme olması nedeniyle, yazın tekerlek izi oluşmasına direnç gösteren, kışın ise çatlamayan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi güç olmaktadır. Bu tip bölgelerde rijit üstyapıların kullanılması daha uygun olmaktadır (Kuloğlu vd., 2011).

Son yıllarda rijit kaplamalar yani beton yollar yüksek dayanım, iyi servis ve uzun dayanıklılığı sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Ziari vd., 2017). Karayolu uygulamalarında beton yollar Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Avusturya, Belçika, Kanada gibi gelişmiş ülkelerde daha çok ağır tonajlı tekrarlı yüklerin yoğun olduğu yüksek trafik hacimli yollarda tercih edilmektedir (Şengün vd., 2016). Daha uzun hizmet ömürleri, daha az bakım gereksinimleri ve daha yumuşak sürüş yüzeyleri nedeniyle Hindistan'daki birçok yeni yol projesinde beton yollar tercih edilmektedir (Khan vd., 2018). Ülkemizde üstyapı tipi seçiminde, esnek üstyapı yanında, özellikle Otoyollarda, rijit üstyapı seçeneğinin de dikkate alınması ve üstyapı tasarımında analitik-deneysel yöntemlerin kullanılması için gerekli hazırlıkların yapılması önerilmektedir (URL-2).

1.2. Beton Yollar

Rijit kaplamalar olarak tanımlanan beton yollar, portland çimentosu betonundan yapılmıştır ve beton kaplama ile zemin arasında bir temel tabakası olabilir veya olmayabilir. Sertliği ve yüksek gerilme mukavemeti nedeniyle, rijit bir kaplama yükü nispeten geniş bir alt zemin alanı üzerine dağıtma eğilimindedir ve yapısal kapasitenin büyük bir kısmı kaplama tarafından sağlanmaktadır. Beton yollar daha ağır yükler için kullanılır ve göreceli olarak zayıf alt zemin üzerine inşa edilebilmektedir (Kuloğlu vd., 2011; Güngör vd., 2013; Gill ve Maharaj, 2015). Karayolları, havaalanları, caddeler, yerel yollar, otoparklar, endüstriyel tesisler ve diğer altyapı türlerinde kullanılan beton yollar

düzgün bir şekilde tasarlanıp dayanıklı malzemelerden yapıldığında, çok az bir bakım veya hiç bakım gerektirmeden hizmet verebilmektedir. Beton genellikle asfalttan daha yüksek bir başlangıç maliyetine sahiptir, ancak daha uzun hizmet ömrü ve düşük bakım maliyetleri bulunmaktadır (Delatte, 2008).

Rijit kaplamalar, yeterli eğilme dayanımı ve sertliğine sahip olmalıdır. Gerilmeler, esnek kaplamalarda olduğu gibi doğrudan zemine aktarılmaz. Rijit kaplamalar, portland çimentosu betonundan düz, betonarme veya öngerilmeli yapılmaktadır. Beton plakaların eğilme dayanımının yaklaşık 40 kg/cm² olması istenir (Khan vd., 2018). Trafik yüklerinin beton kaplama üzerinde yaratacağı eğilme direnci, beton yol tasarımının birincil öncülünü oluşturur. Betonda oluşan bu maksimum dolaylı çekme gerilmesi birçok durumda donatı ihtiyacı gerektirmez (Ağar vd., 1998).

Beton kaplamalar, güvenli ve uzun ömürlü yol yüzeyleri sağlamak için tasarlanmaktadır (Chai cd., 2012). Beton plağın elastisite modülü, taban zemininin elastisite modülünden çok büyüktür. Bu bakımdan beton yol, elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışmakta ve trafik yüklerini bu esasa göre, esnek üstyapıya nazaran daha geniş bir alana yayarak, taban zeminine iletmektedir. Trafik hacmi ve yıllık trafik artış oranı yüksek, ayrıca trafik içindeki ağır taşıt miktarı fazla olan yollar için rijit üstyapı dikkate alınmalıdır (Kuloğlu vd., 2011). Karayolu uygulamalarında rijit (beton) üstyapılar Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Avusturya, Belçika, Kanada gibi gelişmiş ülkelerde daha çok ağır tonajlı tekrarlı yüklerin yoğun olduğu yüksek trafik hacimli yollarda tercih edilmektedir (Şengün vd., 2016).

Trafik yoğunluğunun ve standart aks yüklerindeki artış, dayanıklı yol yapım ve karışımlarını araştırmaya yönlendirmiştir. Yol kaplama yapılarının güçlendirilmesi için sürekli artan ihtiyaç, yeni yol yapım teknolojilerinin kullanılmasına, kaplama yapı katmanlarının oluşturulmasında yeni yöntemlerin araştırılmasına ve gerçek şartlar altında kaplamaları araştırır (Cygus vd., 2008).

Herhangi bir mühendislik yapısında olduğu gibi karayolu üstyapı tasarımı ve inşaatında kullanılacak malzeme arasında seçim yapmak gerektiğinde bir dizi teknik, ekonomik ve çevresel faktörler dikkate alınır. Teknik faktörler seçilen malzemenin servis

ve çevre koşullarındaki fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, yapım kolaylığı ve süresi, dayanıklılığı ile kullanıcı güveni ve konforu gibi hususları içerir. Ekonomik faktörler arasında ilk maliyet ve yaşam döngüsü maliyeti yer alır (Şengün vd., 2016). Ayrıca, inşaat endüstrisi doğal kaynakların büyük bir tüketicisi ve CO₂ emisyonlarına önemli bir etkisi bulunmaktadır. Sürdürülebilirlik ve son zamanlarda kaynakların korunmasına önem verildiğinden, mevcut inşaat uygulamaların çevresel performans açısından da değerlendirilmesi önemlidir (Anastasiou vd., 2015).

Beton yollar ağır trafik yüklemelerine karşı gösterdikleri mukavemet ve uzun ömürlü olmaları gibi bazı avantajları nedeniyle 20. yüzyılın başından beri asfalt kaplamalı yollara alternatif olarak kullanılmaktadır. Beton yollar özellikle rafinerizasyon işlemlerinin gelişmediği ve doğal asfaltın zor temin edilebildiği 20. yüzyılın ilk yarısında yaygın olarak kullanılmışken, özellikle 1960'lı yıllardan itibaren araç kullanımına paralel olarak hızla gelişen petrol teknolojisi ve rafinerizasyon nedeniyle asfalt kaplamalı yolların kullanımı daha ağırlık kazanmıştır (Güngör vd., 2013).

Rijit üstyapıları, esnek üstyapılara göre dünya genelinde oldukça az tercih edilmesine rağmen özellikle ağır tonajlı yüksek trafik hacimlere sahip yollarda sağlamış olduğu avantajlı yaşam döngüsü maliyetleri ve sürdürülebilir etkisi nedeniyle önemli bir konuma sahiptir. Bundan dolayı özellikle gelişmiş ülkelerin birçoğu bu avantajdan faydalanmak için beton yollardan yararlanmışlardır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) yoğun trafik hacmine sahip yolların birçoğunda, Kanada'nın Quebec eyaletinde ise beton yollar, tüm yolların %4'ünü oluşturmalarına rağmen trafiğin %75'ini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Avrupa ülkelerinde ise özellikle Almanya, Avusturya ve Belçika gibi orta Avrupa ülkelerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Almanya'da yüksek hacimli otobanların yaklaşık dörtte birini, Avusturya'da dörtte üçünü, Belçika'da ise yaklaşık yarısını beton yol oluşturmaktadır. Ayrıca Belçika'da köy yollarının %60'ında beton üstyapı tercih edilmiştir (Şengün vd., 2016).

Günümüzde bu tür uygulamaların ilk yapım maliyetleri neredeyse sathi kaplama ile yarışabilir duruma geldiği için özellikle kırsal kesimde tercih sebebi olmaktadır. Örneğin, Kocaeli Belediyesi'nde 2015 yılında yapılan ihalelerde 6.5 m genişliğindeki bir beton yolun ilk yapım maliyeti 258,500 TL iken aynı yol sathi kaplama olarak inşa edildiğinde

228,500 TL'ye mal olmuştur. Neredeyse her yıl yenilenen sathi kaplama yollara göre beton yolların onlarca yıl hizmet verebildiği göz önüne alındığında aradaki %12'lik ilk yapım maliyet farkının önemsiz olduğu açıkça görülecektir (Şengün vd., 2017).

Karayolları Genel Müdürlüğü ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) arasında bir protokol imzalanmıştır. İmzalanan bu protokol çerçevesinde, Afyon-Emirdağ ayrımı 5+700 - 7+700 km arasında (İşcehisar Geçişi) 2 km'lik bölünmüş tek yönlü 3 şeritli taşıt yolunda TÇMB tarafından deneme amaçlı beton yol yapılması işi gerçekleştirilmiş ve Haziran 2004 tarihinde trafiğe açılmıştır. Beton karışımında, Afyon Çimento Fabrikası mamulü Portland (PÇ) 42.5 çimento, kırma çakıl, kırma kum, doğal kum ve mineral katkı malzemesi (silika füme) ile hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Kaplama yapımında, agrega maksimum tane çapı 32 mm, CEM I 42.5 minimum çimento dozu 375 kg/m³, S/Ç oranı 0.41~0.45 arasında, hava içeriği %4~5, çökmesi 3~4 cm olan, C30 dayanım sınıflı beton kullanılmıştır (Ulaştırma Bakanlığı, 2013; Güngör vd., 2013).



Şekil 1. Afyon-Emirdağ beton yol görüntüsü (URL-3).

Yine Karayolları Genel Müdürlüğü ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği arasında imzalanan beton yol yapım protokolü çerçevesinde, Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz Devlet Yolu 40+000 - 43+500 km arasındaki 3.5 km.'lik bölünmüş yolun tek taşıt yolunda TÇMB tarafından bedelsiz olarak deneme amaçlı beton yol yapılmıştır (Ulaştırma Bakanlığı, 2013; Güngör vd., 2013).



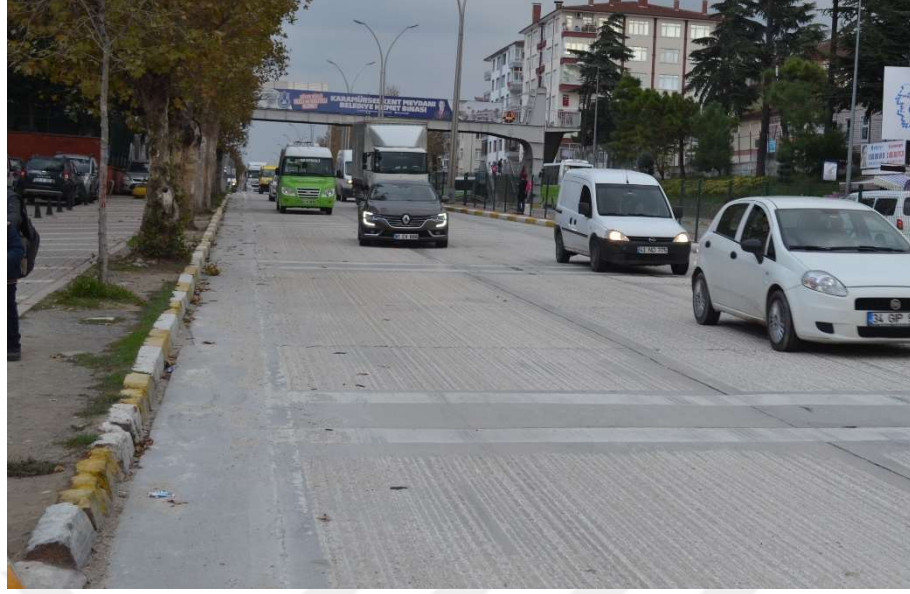
Şekil 2. Hasdal-Kemberburgaz beton yol görüntüsü (Yeğınobalı, 2010a).

Ordu–Ulubey Devlet Yolunda, Karayolları Genel Müdürlüğü ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) arasında imzalanan protokolle 5+000 - 6+000 km arasında beton yol deneme kesimi yapılmıştır. Bu beton yol deneme kesiminde bor katkıli çimentonun performansının izlenebilmesi amacıyla yolun 700 metrelik kısmı bor katkıli çimento ile 300 metrelik kısmı ise normal katkısiz çimento ile yapılmıştır (Ulaştırma Bakanlığı, 2013; Güngör vd., 2013).



Şekil 3. Ordu-Ulubey beton yol görüntüsü (URL-4).

Karamürsel şehir geçişi beton yol çalışması, İzmit - Yalova D-130 Devlet Yolunun Karamürsel Şehir Geçişinde 38+400 - 40+000 km arasında uygulanmıştır (Ulaştırma Bakanlığı, 2013; Güngör vd., 2013).



Şekil 4. Karamürsel beton yol görüntüsü (URL-5).

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün hem üstyapı projelendirmesi, beton tasarımı, hem de imalatını yaptığı ilk beton yol uygulaması özelliğini taşıyan bu çalışma, ülkemizde yol üst yapısında değişik tekniklerin araştırıldığı bir dönemde, önemli bir alternatif olma özelliği taşımaktadır (Ulaştırma Bakanlığı, 2013; Güngör vd., 2013). Türkiye'de yapılan beton yolların bazı teknik özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Türkiye'de yapılan beton yolların bazı teknik özellikleri.

Beton Yol Özellikleri	Afyon - Emirdağ	Hasdal - Kemerburgaz	Ordu - Ulubey	Karamürsel
Bölgesi	3. bölge	1. bölge	7. bölge	1. bölge
Yapım Tarihi	Haziran 2004	Ağustos 2006	Ekim 2007	Ocak 2010
Proje Süresi	30 yıl	30 yıl	30 yıl	30 yıl
Uzunluk	2 km	3,5 km	1 km	1,6 km
Genişlik	12 m	10,5 m	2 x 10,5 m	2 x 8,5 m
Şerit Sayısı	3	2	2 x 2	2 x 2
Derz Aralığı	5 m	5 m	4,5 m	4,5 m
Kalınlık	27 cm	27 cm – 32 cm	28 cm	30 cm
Çimento tipi	PÇ 42,5	CEM I 42,5	Bor Katkılı	CEM I 42,5 R
Çimento miktarı	375 kg/m ³	375 kg/m ³	350 kg/m ³	378 kg/m ³
Su/Çimento	0,41 - 0,45	≤ 0,45	~ 0,30	~ 0,43

Temel ve kaplama tabakası yapımı için yüksek mukavemetli veya yüksek kaliteli malzemelerin kullanılması, yol yapım maliyetlerini artırır. Bu nedenle, mümkün olan en

büyük ekonomik etkiyi elde etmek için yerel ucuz yol yapım malzemeleri ve yüksek dayanımlı malzemeler kullanılarak istenen dayanımlı kaplama yapısını inşa etmek için sürekli araştırılma yapılmaktadır (Cygus vd., 2008).

Yol kaplamalarıyla ilgilenen araştırmacılar ve malzemeler konusunda uzmanlar, çevreye ve kültürel normlara yeterince dikkat etmeden kaplamalar malzemelerinin yapısal sağlamlığına odaklanmıştır. 21. yüzyılda, yol tasarımı ve rehabilitasyon kavramı, iklim değişikliğinden kaynaklanan ek yapısal yükler, çevresel zorluklar, sosyal gereksinimler ve yaşlanan nüfus gibi yeni gereksinimler nedeniyle değiştirilmelidir (Jamshidi vd., 2019).

Yapılan çalışmalarda yüksek taşıma gücü, uzun hizmet ömrü, yerli malzeme kullanımı, dayanıklı, çevreci ve ekonomik olması beton yolların öne çıkmasına sebep olmuştur (URL-6; Yeğinobalı, 2010b; İyınam ve Ağar, 2004). Ancak rijit kaplamaların üstün özellikleri, kullanılan malzeme, iklimsel etkiler ve araç yükü gibi faktörlerin bir fonksiyonu olan kaplama bozulma oranına bağlıdır (Darestani vd., 2006) ve malzeme özellikleri, tasarım ömrü, beklenen performans parametreleri ve yol altındaki toprak koşulları gibi bir dizi faktör üstyapı tasarımını ve performansını etkilemektedir (Sabih ve Tarefder, 2016). Bu nedenle, rijit üst yapıda dikkat edilmesi gereken ana unsurun beton ve beton özellikleri olduğu kanısına varılmıştır.

1.3. Beton

Beton, her türlü yapı inşasında yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Dünyada çelik, plastik, ahşap ve alüminyum gibi diğer tüm inşaat malzemelerinin toplamından iki kat daha fazla beton kullanıldığı yadsınamaz bir geçektir.

Betonun kalitesi, dayanım ve dayanıklılık olmak üzere iki temel kavram ile ifade edilmektedir. Yapı elemanlarının ve yapı ürünlerinin işlevlerini uzun süre bozulmadan yerine getirmeleri “dayanıklılık” olarak adlandırılmaktadır. Basınç dayanımı yüksek olan betonlar bile zaman içerisinde maruz kaldıkları etkiler dolayısıyla dayanıklılıklarını kaybedebilmektedirler. Dayanıklılık, betona tesir eden iç ve dış etkenlerle oluşan bozulma ile azalma göstermektedir. Tablo 3’te verilen bu bozulmalar fiziksel, mekanik,

kimyasal ve biyolojik etkenler olarak literatürde yer almaktadır (Baradan ve Aydın, 2013).

Tablo 3. Beton yapıların iç ve dış etkenlerle bozulması.

Fiziksel ve Mekanik Etkenler	Kimyasal ve Biyolojik Etkenler
Aşırı yükleme, Darbe etkisi	Karbonatlaşma
Boy ve hacim değişimi	Asitler, Agresif sıvılar
Islanma-Kuruma	Sülfat etkisi
Donma-Çözülme	Alkaliagrega reaksiyonları
Buz çözücü tuzlar	CaO, MgO hidratasyonu
Aşınma, Erezyon, Oyulma	Biyolojik oluşumlar

Bu etkenler sonucunda, betonda çatlama, dökülme, kapak atma, deformasyon, dayanım ve rijitlik kayıpları meydana gelmektedir. Bu olaylar ise betonun boşluk yapısını değiştirerek, gözenekliliğinde artış böylelikle de geçirimsizliğin artmasına yol açmaktadır. Bu nedenler sonucunda betonun bozulma süreci hızlanmakta ve hizmet ömrünü kısaltmakta veya işlevselliğini kaybetmektedir.

Beton yollar çoğunlukla karayolu yüzeyleri, köprü terası, havaalanı pistleri ve otoparklar için kullanılır. Betonun dayanıklılığı artırmak ve beton yolların kullanım ömrünü uzatmak önemli ve teknik bir sorundur; çünkü doğrudan hava koşullarına maruz kalır (Salemi ve Behfarnia, 2013).

İklimsel faktörler olan ıslanma- kuruma ve donma-çözülme etkenleri beton yollarda önem verilmesi gereken konulardandır. Çünkü, kullanım ömrü boyunca beton yollar, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek çok sayıda donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimleri dahil olmak üzere çevresel koşullara maruz kalırlar.

Islanma-kuruma döngüleri, kılcal emme ve difüzyonun kombine etkileri ile betonun bozulmasını hızlandırır. Islanma döngüsü sırasında, kılcal emme, beton içerisindeki temizleyici kaynaklı klorür iyonlarıyla birlikte suyu tahrik eder. Kurutma döngüsü sırasında, bazı sular gözeneklerden buharlaşarak klorür iyonları bırakır ve bazı

durumlarda gözeneklerin içinde kristal tuz birikintileri bırakır. Bu kristal tuzları esas olarak betonun içindeki her yöne yayılabilen klorür iyonları tarafından oluşturulur. Bu işlem, her ıslanma-kuruma döngüsünde yinelenir ve betondaki klorür iyonları dahil iyonik parçacıkların birikmesine neden olur. Klorür iyonlarının birikmesi, üç farklı mekanizma ile bozulmayı artırır:

- 1) Buz çözücüler ile çimento hamuru / agregası arasındaki kimyasal reaksiyonlar;
- 2) Tuz ölçeklendirme gibi fiziksel bozulma ve
- 3) Magnezyum klorür ($MgCl_2$) veya kalsiyum klorür ($CaCl_2$) varlığında alkali-karbonat reaktivitesini etkileyen bir katyon değişim mekanizması gibi agrega-çimento reaksiyonlarını birleştirmek (Verian ve Behnood, 2018).

Beton yüzeyi ıslanma-kuruma döngülerine maruz kaldığından, kılcal emme mekanizması mobilize edilir, böylece nem taşınır ve dış faktörlerin etkisi daha etkili olabilir. Islanma-kuruma döngüleri, beton bozulma süreçleri için en elverişsiz çevre koşulu olarak tanımlanmaktadır (Li vd., 2009).

Beton yapılarda donma-çözülme hasarı soğuk bölgelerde altyapı için ciddi bir konudur. Bu tür hasarın erken aşamalarda doğru tespiti, koruma ve rehabilitasyon faaliyetleri için optimum stratejilerin seçilmesine olanak sağlamaktadır (Freeseaman vd., 2018). Çeşitli özelliklerdeki yol kaplamaları, sürekli olarak yüksek trafik yüklerine, yüksek sıcaklık değişimlerine ve kış aylarında donma çözülme etkisine maruz kalmaktadır (Boykova vd., 2017).

Betondaki donma-çözülme hasarı iki mekanizma ile oluşur:

- 1) Kılcal veya hava boşluklarında buz oluşumu ve
- 2) Sıvının matrisin donmamış alanlarına atılması.

Sıvının donması hacmini artırır (yaklaşık %9) ve fazla suyun atılmasına neden olur. Bu olay sırasında, kılcal gözeneklerdeki suyun donmasından kaynaklanan dilatasyon basıncı betonun gerilme direncini aştığında çatlaklar oluşabilir.

Soğuk dağ iklimlerinde bulunan kaplamalar için, sıcaklık ve nem etkileri, iç kaldırım gerilmelerini artıran tekrarlayan donma-çözülme döngüleri oluşturmak için etkileşime girebilir. Zamanla, yüksek gerilimli gerilme çimento macununu parçalayabilir ve betonun ölçeklenmesine ve çatlamasına yol açabilir. Hava sürükleyici katkı maddeleri, donma-çözülme koşullarında düzgün bir hava kabarcıkları matrisi oluşturarak, donma-çözülme koşullarında uzun süreli beton dayanıklılık performansını artırır, böylece yol kaplamasındaki su donmuşken veya çözöldüğünde büzölürken genleşebilir (State of California Department of Transportation, 2015).

Aşınma faktörü, betonun dayanıklılığını etkileyen çok önemli bir unsurdur. Beton yol kaplaması gibi bir yapı inşa ederken bu gerçeğin dikkate alınması çok önemlidir. Agreganın büyüklüğü ve miktarı, karışım oranı, betonun dayanımı ve çimentolu malzemelerin veya liflerin eklenmesi betonun aşınma direncine etki eder. Ayrıca yüzeydeki gözenekli yapıların aşınma direncini etkileyebileceği de kanıtlanmıştır. Betonda mineral tozlar gibi katkıların kullanılmasının etkileri üzerine çalışmalar vardır. Fakat çoğu mekanik ve reolojik yönleriyle ilgilidir. Atık tozların aşınma direnci üzerindeki etkisi hakkında da az sayıda araştırma bulunmaktadır (Popek vd., 2016).

Sudaki, zemindeki ve deniz suyundaki sülfat iyonları betonarme yapılarda bozulmaya yol açabilir. Sülfat saldırısının zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli (C_3A) ve kalsiyumlu ($Ca(OH)_2$) bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmaktan kaynaklanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır (Kılınçarslan vd., 2010). Beton sülfat etkisine maruz kaldığında hacim genleşmesi, dayanım ve kütle kaybına uğramaktadır. Bu etkiler sülfat iyonunun tipi ve konsantrasyonuna bağlı olarak gelişir. Bu nedenle sülfatlı ortamlarda kullanılacak malzemelerin uygun şekilde üretilmesi ve malzeme seçiminin ona uygun olması gereklidir (Yazıcı ve İnan Sezer, 2016).

Kışın, betonun üzerindeki buzlanmanın çözülmesi için klorürlü tuzlar kullanılmakta ve bu tuzlar sodyum klorür, kalsiyum klorür ve magnezyum klorürden oluşmaktadır. Klorürün beton yüzeyinde bulunup dışarıdan betona nüfuz etmesi zamana bağlı bir süreç olup betonun geçirgenliğine ve difüzyon katsayısına göre bu süreç değişmektedir (Topçu vd., 2005). Ülkemizde buz mücadelesinde kullanılan tuz miktarının yıllık ortalama 40 bin ton civarında olduğu bilinmektedir. Beton yollara zarar veren tuzlar (NaCl ve CaCl_2), beton yüzeyinin soyulmasına neden olmaktadır. Hava katkısız betonlarda suda eriyen tuzlar kurduğunda kristalleşerek boşluk çeperlerinde basınç yaratırlar. Bu basınç, beton yüzeyinin kabarması yanında oyukların ve çatlakların oluşmasına da neden olmaktadır. Kullanılan tuzun miktarı ve uygulanma sıklığı beton yüzeyinin bozulmasını artırır, %2'lik NaCl çözeltisi bile betona büyük zarar verebilmektedir (Berberoğlu, 2011).

Yukarıda bahsedilen ıslanma kuruma, donma çözülme, aşınma, sülfat ve klor etkileri beton yolların bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, bu faktörlerin betonun fiziksel (boşluk yapısı, kütle kaybı) ve mekanik (basınç, çekme ve eğilme dayanımı) özellikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi gerekmektedir.

Betonun tanımlanması ve sınıflandırılması ise basınç dayanımına göre yapılmaktadır (TS 500/T3, 2014). Basınç dayanımı, yük taşıma kapasitesine karar vermede önemli bir husustur. Betonun basınç dayanımı laboratuvarında beton numunelerin dökülmesi ve test edilmesiyle belirlenir (Thandavamoorthy, 2015). Mevcut ve yerinde yapılan uygulamalarda ise basınç dayanımı, şantiye koşullarında da değerlendirebilecek olan betonun standart dayanım parametresidir. Tahribatlı bir yöntem olan yapıdan karot örneklerinin alınmasıdır.

Betonun çekme dayanımı ise eksenel çekme deneyi ile belirlenmekle birlikte eğilme ve yarmada çekme deneylerinden de elde edilebilir (TS 500/T3, 2014) Ayrıca eğilme dayanımı, betonun çekme dayanımını belirlemek için kullanıldığı gibi beton kaplamaların tasarımında ise önemli bir kriter olmaktadır (Ziari vd., 2017).

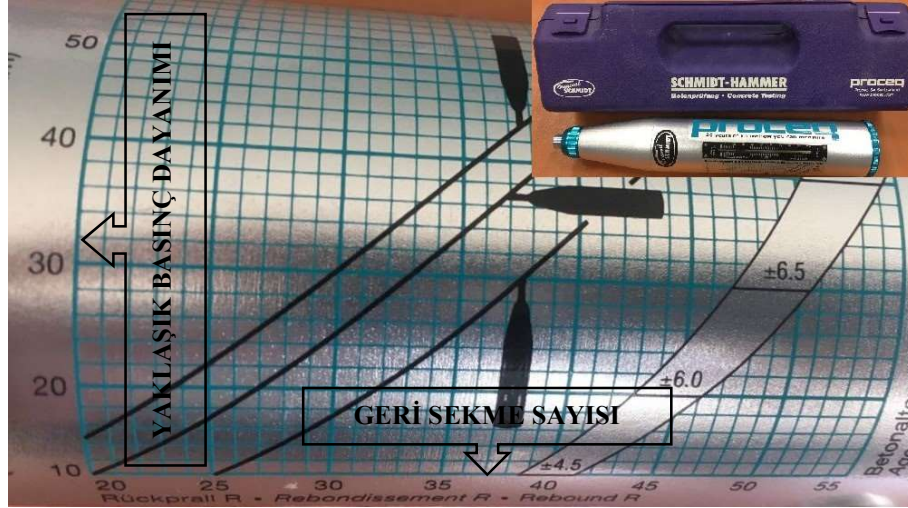
Beton yol yapımında kullanılacak betonun tasarımı, ilgili standartlar dikkate alınmakla birlikte, çevre koşullarına ve uygulamaya göre değişebilmektedir. Ayrıca beton

yolların tasarımında beton kalitesi, basınç dayanımından çok, eğilmede çekme, aşınma direnci ve dayanıklılığına göre belirlenmektedir (İyınam ve Ağar, 2004).

Betonun mekanik özelliklerinin tahribatlı deneyler ile ölçülmesinin dışında deneysel bazı tahribatsız yöntemler de betonun hakkında fikir sahibi olunmasına olanak sağlamaktadır. Tahribatsız muayene yöntemlerinin belirgin avantajları nedeniyle betonun değerlendirilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Betonun kalite değerlendirmesi genellikle basınç dayanımı ve tahribatsız teknikler arasındaki ampirik ilişkilere dayanmaktadır (Trtnik vd., 2009).

Tahribatsız test yöntemleri genel olarak betonun homojenliğini, sertleşme koşullarını, çatlak varlığını, basınç dayanımı ve zararlı etkiler sonrasında betonun dayanımının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Breccolotti vd., 2013). Beton özelliklerin tahmin ve değerlendirilmesinde en sık kullanılan tahribatsız deneyler beton test çekici (Schmidt çekici) ve ultrases geçiş hızı yöntemleridir.

Betonun kalitesi ile bağlantılı birçok faktörden biri de sertliğidir (Bungey vd., 2006). Schmidt çekici bir yüzey sertliği test cihazıdır. Betonun dayanım özelliklerini tahmin etmek için basit, kolay ve ucuz bir yöntem sağlar (Helal vd., 2015). Elastik bir kütlenin geri sekmesi, kütlenin çarptığı yüzeyin sertliği prensibi ile çalışır. Çekiç yaklaşık 1.8 kg ağırlığında ve hem laboratuvarda hem de sahada kullanıma uygundur. Çekiç yatay, dikey olarak üst veya dikey olarak aşağı yönde ve çekicinin test edilen yüzeye dik olması koşuluyla farklı açılarda kullanılabilir (Malek ve Kaouther, 2014). Farklı açılarda ölçümü yapılan Schmidt çekici geri sekme değerleri cihaz üzerinde bulunan grafik ile yaklaşık basınç dayanımı belirlemeye olanak sağlamaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Schmidt çekici ölçümlerinin yaklaşık basınç dayanımına dönüşüm grafiği.

Schmidt çekici ölçüm sonuçları; beton kalitesinin homojenliğini kontrol etmek, benzer betonları karşılaştırma, yaklaşık basınç dayanımı tahmini ve aşınma direnci sınıflandırması gibi uygulamalarda kullanışlı olmaktadır (Bungey vd., 2006). Bununla birlikte Schmidt çekici deney sonuçları, yüzeyin düzgünlüğü, geometrik özellikleri, test örneğinin yaşı, betonun yüzey ve iç nem koşulları, kaba agregası tipi, çimento tipi, küf tipi ve beton yüzeyde karbonatlaşma gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Bungey vd., 2006; Helal vd., 2015).

Ultrases geçiş hızı yöntemi de Schmidt çekici gibi laboratuvar ve saha ortamında kullanılmaya uygun tahribatsız bir test yöntemidir. Betonun içyapısındaki değişiklikleri değerlendirme yeteneği gibi bir takım avantajlara sahiptir (Hwang vd., 2018). Birçok çalışmada ultrases geçiş hızı yönteminin temel olarak beton dayanımını ve özelliklerini tahmin etmek ve değerlendirmek için kullanıldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, bu yöntem, çatlaklar gibi betonun iç kusurlarını tespit etmek için de kullanılabilir (Kalyan ve Kishen, 2013).

Ultrases geçiş hızı, çimento bazlı kompozitlerin karakterizasyonu için önemli bir tekniktir. Bu teknik yıllar boyunca farklı amaçlar için kullanılmıştır. Çimentonun hidratasyonu ve prizi, yapılarındaki kusurların tespiti, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan sonra hasarın değerlendirilmesi, farklı agregaların betona dâhil edilmesi gibi. Hızlı ve güvenilir sonuçlar veren, tahrip edici olmayan önemli bir teknik olmaya devam ediyor (Panzer vd., 2011).

Ultrases geçiş hızı sonuçları ile betonun homojenliği, çatlak oluşumu, boşluk yapısı, benzer betonları karşılaştırmak, kalite kontrolü, bozulma durumu ve dayanım belirlemek için sık sık kullanılmaktadır. Tablo 4 ultrases geçiş hızı ölçümleri için önerilmekte ve beton kalitesini belirlemekte ultrases geçiş hızı sonuçlarının kullanımını göstermektedir (Qasrawi, 2000).

Tablo 4. Ultrases geçiş hızı ve beton kalite ilişkisi.

Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	> 4,5	3,5~4,5	3,0~3,5	2,0~3,0	< 2,0
Beton Kalitesi	Mükemmel	İyi	Şüpheli	Zayıf	Çok zayıf

Boşluk miktarları, su/imento oranı, agrega tipi ve diğer değişkenler betonun mekanik özelliklerini etkiler. Ultrases geçiş hızı ve betonun dayanımı arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir (Lorenzi vd., 2007).

Yapılan alışmalarda Schmidt çekici ile ultrases geçiş hızı deneylerinin hızlı ve ekonomik olduğu belirtilmektedir. Ayrıca Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı yöntemlerinin dayanım testi olmadığı, ancak betonlar hakkında değerlendirme ve karşılaştırma yapmak için kullanılmaktadır. Schmidt çekici ile betonun yüzey sertliği, ultrases geçiş hızı ise içyapısını belirlemekte etkili olması, birlikte kullanılmasının daha faydalı olacağını göstermektedir.

Betona olan talep, dünya çapında gün geçtikçe artmakta ve alternatif çimentolu malzemelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, endüstriyel yan ürünlerin ve atık malzemelerin kullanım olanaklarını keşfederek imento için alternatif, düşük maliyetli enerji tasarruflu alternatifler bulmak ve tedarik etmek için acil bir ihtiyaç vardır. Endüstriyel atıklar beton yapımında hammadde olarak kabul edilmiştir. Literatür taramasından, sanayi yan ürünleri ve atık malzemelerle yapılan betonun, beton bileşenlerini kısmen değiştirek, geleneksel betona göre mukavemet, performans ve dayanıklılık bakımından üstün özelliklere sahip olduğu görülmektedir (Acharya ve Patro, 2016). Atık geri dönüşümünün ana faydaları, evre kirliliğinin azaltılması ve doğal kaynakların korunmasıdır (Onuaguluch ve Panesar, 2014).

Kolemanit minerali günümüzde kullanılmakta ve gelecekte kullanımı muhtemel alanlarda çalışmalar yapılmaktadır. Dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden

birisi olan beton üretiminde kolemanitin kullanılabilirliği üzerine yapılan çalışmalar bulunmakta ve çalışmalara devam edilmektedir. Beton yollara ait özelliklerin iyileştirilmesine yönelik olarak bu çalışmada kolemanit minerali tercih edilmiştir. Ayrıca kolemanit minerali ile yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

1.4. Kolemanit Minerali ve Literatür Özeti

Türkiye maden kaynaklarının çeşitliliği açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Maden kaynaklarının ülke ekonomisine katkı sağlaması için ise rezerv miktarının yeterli miktarda olması önemli bir husustur. Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve Amerika Birleşik Devletlerinde bulunmaktadır. Bu bağlamda Türkiye ise dünyadaki toplam bor rezervinin %72.8'ine sahiptir (URL-7). Bor elementi oksitli bileşik (B_2O_3) halinde üleksit, tinkal ve kolemanit benzeri minerallerden elde edilmektedir (Kutuk ve Kutuk-Sert, 2017). Kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$) minerali ise rezerv açısından Türkiye'de en çok bulunan bor cevherlerinden birisidir.

Kolemanit minerali geçmişten günümüze kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır ve gelecekte kullanımı muhtemel alanlarda çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir. Dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden birisi olan beton endüstrisinde de kolemanit mineralinin kullanımına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Çimento esaslı kompozitlerde kolemanit mineralinin kullanımı ile yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Erdoğan vd. (1998), kolemanitin kaba (25 mm elek altı) ve çamur atığını Portland ve tras çimentoya %1, %3, %5 ve %7 oranlarında ağırlıkça ikame etmişler. İkame edilen kolemanit atıkların B_2O_3 yüzdeleri %17 ve %29 olarak belirtilmiş ve tüm çimento karışımları 45 µm elekten geçen numuneler ile hazırlanmış. Kolemanit ikame oranı arttıkça çimento karışımların priz sürelerinin uzadığını belirlemişlerdir. Çalışmada priz süresi, hacim genleşme, eğilme ve basınç dayanım deneyleri yapılmış olup kolemanit atıklarının ağırlıkça %5'e kadar çimento katkı maddesi olarak kullanılabileceği önerilmektedir (Erdoğan vd., 1998).

Kula vd. (2001), kolemanit atığı, taban külü ve uçucu külün çimento özellikleri üzerine etkileri üzerine yaptıkları çalışmada ise; kolemanitin B_2O_3 yüzdesi %17.65 olarak verilmiştir. Kolemanit yapılan çalışmada %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında kullanılmıştır. Kolemanitin tek başına ve kolemanit + uçucu kül + taban külün (üçlü karışım) bir araya getirilmesi ile yapılan deneyler sonucunda, kolemanit cevheri atığı içeren karışıma kıyasla üçlü karışım ile daha iyi bir basınç dayanımı performansı elde edilmiş. Ayrıca kolemanit mineralindeki B_2O_3 varlığının, priz süresini arttırdığı ve çimentonun mekanik özellikleri üzerinde de B_2O_3 varlığının etkisi olduğu belirtilmektedir. (Kula vd., 2001).

Targan vd. (2002), doğal puzolan olan kula cürufu, bentonit ve bor minerallerinden birisi olan kolemanit konsantratör atığının birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Doğal puzolanlar ve atıklar çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Kimyasal yapısında B_2O_3 miktarı %18.71 olan kolemanit çalışmada %4 diğer malzemeler ise %5, %10, %15, %10, %25 ve %30 oranlarında çimentoya kütlice ikame olarak kullanılmıştır. Kolemanitin priz süresini uzatması %4 kolemanit ve kula cürufunun birlikte kullanılması ile azalmıştır. kolemanit ve kula cürufu içeren katkılı çimentolarla elde edilen tüm harçların 28 gününden sonra basınç dayanımlarında önemli bir artış gözlenmiş ve ileriki yaşlarda betonun dayanımını geliştirebileceği belirtilmiştir (Targan vd., 2002).

Targan vd. (2003), yaptıkları çalışma, doğal puzolan, kolemanit cevheri atığı, uçucu kül ve taban külünün çimento ve betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kolemanit B_2O_3 içeriği çalışmada %18.71 olarak verilmiş. Yapılan testler neticesinde kolemanitin priz süresini uzattığı ancak doğal puzolan ile birlikte kullanılması ile priz süresinin daha fazla uzadığı belirtilmektedir. Ayrıca doğal puzolan ve kolemanitin birlikte kullanılmasıyla 28 günlük basınç dayanımında önemli bir artış olduğu, ilerki yaşlarda ise dayanımın artabileceğini söylemektedirler (Targan vd., 2003).

Olgun vd. (2007), Portland çimentosu üretiminde doğal alçı yerine kolemanit (B_2O_3 yüzdesi %19.40) kullanma olasılığını ve kimyasal aktivatörlerin kolemanit içeren harçların kuvvet gelişimi ile mikro yapıları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışma sonucunda doğal alçı taşının kolemanit ile değiştirilmesinin kabul edilebilir bir

priz süresi ile sonuçlandığını ve hazırlanan harcın basınç dayanımının uzun vadede arttığını göstermiştir. Kolemanit içeren karışımlara kimyasal aktivatörlerin eklenmesi, pozolanik reaksiyonu hızlandırdı ve harçların erken dayanımını önemli ölçüde arttırdığını ifade etmektedirler (Olgun vd., 2007).

Binici vd. (2010), barit, kolemanit, yüksek fırın cürufu ve pomza içeren betonların dayanım ve dayanıklılığını incelemişlerdir. Çimento ve ince agreganın yerine barit, kolemanit, yüksek fırın cürufu ve pomza kullanılmıştır. B_2O_3 yüzdesi ise %40 olan kolemanit çalışmada %0.25, %0.50 ve %0.75 oranlarında ikame edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler ile kolemanitin basınç, donma-çözülme, aşınma, sülfat dayanımlarına ve su geçirimsizliği gibi birçok özelliğine olumlu katkılarda bulunduğu deneysel olarak gözlenmiştir. Bu sonuçlar kolemanitin kullanım oranının daha çok artırılması ile daha da geliştirilebileceğini ve böylece ülkede bol miktarda bulunan kolemanitin kullanıldığı çeşitli alanların ortaya çıkabileceğini söylemektedirler (Binici vd., 2010).

Gencel vd. (2010), kolemanitin agrega olarak kullanılmasıyla betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada kolemanit iri ve ince agrega yerine ikame edilmiştir. iri ve ince agrega ikamesi olarak kullanılan kolemanit minerallerinin B_2O_3 içerikleri %41.24 ve %39.48 olarak verilmiştir. Betonda agrega olarak %10 ile %50 arasında olan kolemanit kullanılmasının hem fiziksel hem de mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ve sertleşme süresinin uzadığı belirtilmektedir. Betonların işlenebilirliği ve dayanımında kabul edilebilir seviye olarak kolemanitin agrega yerine %30'a kadar eklenmesinin bu kabul edilir olduğu belirtilmiştir (Gencel vd., 2010).

Binici vd. (2011), tarafından pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu içeren harçların mekanik dayanımı ve sülfat dayanıklılığı incelenmiştir. Deneylerde çimento ve standart kumu yerine çeşitli oranlarda pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kolemanitin B_2O_3 yüzdesi ise %40 olup %0.25, %0.50 ve %0.75 oranlarında ikame edilmiştir. Kolemanit ikamesi ile erken yaş dayanımların düştüğü ilerki yaşlarda ise dayanımın kontrol harcından yüksek olduğu belirlenmiştir. Sülfat çözeltisinde bekletilen harçlar üzerinde kütle kaybı, eğilme ve basınç dayanımı testleri

gerçekleştirilmiş. Kolemanit ikameli harçların kütle kaybı kontrol harcından düşük, dayanım değerleri ise yüksek sonuçlandığını tespit etmişlerdir (Binici vd., 2011).

Sevim (2011), kolemanit içeren beton karışımlarının basınç ve yarmada çekme dayanımı, harçların ise rötre özelliklerini değerlendirmek için bir laboratuvar çalışması gerçekleştirmiştir. Kolemanitin 90 µm ve 45 µm elek üstü miktarları sırasıyla %64.4 ve %76.4 verilmiştir. Beton karışımların S/Ç oranı 0.5 olup kimyasal yapısında B₂O₃ yüzdesi ise %13.67 olan kolemanit %3, %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ağırlığına ikame edilmiştir. Basınç dayanımı 150 mm küp numuneler üzerinde 7, 28, 56 ve 90 günlük, yarmada çekme dayanımı ise 28 günlük 150 mm çaplı 300 mm yükseklikteki silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Erken yaşta (7. gün) kolemanit ikamesinin bütün oranları kontrol örneği ile karşılaştırıldığında basınç dayanımını düşürmüştür. Diğer yaşlarda ise (28, 56 ve 90. günler) kolemanit ikamesinin %3 ve %5 ikame edilmesi ile elde edilen beton türleri basınç dayanımı arttırmıştır. 28 günlük yarmada çekme sonuçları ise basınç dayanımını ileriki yaşlarına benzer olarak %3 ve %5 ikameli beton numuneler ile kontrol örneğinden yüksek olduğu görülmüştür. Harç numuneler üzerinde elde edilen rötre ölçümleri sonucunda ise en yüksek rötre miktarını kolemanit ikamesiz referans örneği ile elde edilmiştir. Kolemanit ikameli numunelerde ise kolemanit ikame oranı arttıkça rötre miktarının da arttığı belirtilmektedir (Sevim, 2011).

Ustabaş (2011), kolemanit ve üleksitin çimentoda kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada; kolemanit ile üleksit minerallerini çimento kütlesinin %0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında CEM I 42.5 R sınıfı çimentoya ikame etmiştir. Kolemanit ile üleksitin B₂O₃ miktarı sırasıyla %39.8 ve %37.11 olarak verilmiştir. Çalışmada çimento pastaları üzerinde standart kıvam, priz başlama ve bitiş süreleri ile genleşme miktarı belirlenmiş. Harçlar üzerinde ise eğilme ve basınç dayanımları 2, 7, 28 ve 90 günlerde ölçülmüştür. Kolemanit ve üleksit ikamesi ile elde edilen numunelerin standart kıvam değerlerinin ve priz sürelerinin arttığı belirlenmiş olup özellikle üleksitin priz süresini aşırı arttırdığı belirtilmektedir. Basınç dayanımı sonuçlarında ise bütün zamanlarda ikameli harç numunelerinin basınç dayanımları referans numuneden düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde ise 28 günlük deneylerde %3, 90 günlük deneylerde ise %4 kolemanit ikamesi en yüksek dayanım değerini sağladığı görülmüş (Ustabaş, 2011).

Taban vd. (2012), çimento katkı malzemesi olarak kullanılan doğal puzolanların ekolojik etkilerini incelediği çalışmada; kolemanit, zeolit, perlit ve dolomiti çimentoya ikame olarak %10 ve %20 oranlarında kullanmışlardır. %38.12 B_2O_3 içeriğe sahip kolemanitin özgül ağırlığı 2.39 g/cm^3 ve özgül yüzeyi $3460 \text{ cm}^2/\text{g}$ verilmiştir. Hazırlanan harçlar üzerinde 7 ve 28 günlerde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak çalışmada kullanılan kolemanit katkı miktarlarının yüksek olması (%10 ve %20) çimento harç numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımları kontrol numunelerine göre çok düşük sonuçlar vermesine neden olmuştur (Taban vd., 2012).

Aksoğan vd. (2016), yaptıkları çalışmada, mısır, buğday ve ayçiçeği sapı külünün ile barit ve kolemanit içeren betonların dayanıklılık özellikleri incelemiştir. Çimento yerine mısır, buğday ve ayçiçeği sapı külü kullanılırken, farklı oranlarda ince agrega yerine barit ve kolemanit kullanılmıştır. Beton numuneleri, basınç dayanımı 7, 28 ve 180. günlerde test edilmiştir. Ayrıca, dayanıklılık özelliklerini araştırmak için testler yapılmıştır. Yapısında %40 B_2O_3 içeren kolemanit katkılı örnekler, 7. gün basınç dayanımları referanstan daha düşük sonuçlanmış ancak 180. gün referanslara göre %17 daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşmışlardır. Referans numunenin basınç dayanımı %16 azalırken, %1 kolemanit ikameli numunesi için bu oran %5 olarak bulunmuştur. Sülfat etkisine bağlı kütle kaybı ve basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde kolemanit ikamesi ile referans numuneye göre daha az kütle ve basınç dayanımı kaybı gerçekleşmiştir. Am-241 gama radyasyonu altında, harç numunelerinin doğrusal absorpsiyon katsayıları incelendiğinde ise kolemanit ikameli numuneleri için en düşük seviyede olduğu belirlenmiştir (Aksoğan vd., 2016).

Kutuk-Sert (2016), farklı boyutlarda kolemanit mineralini Portland çimentosuna ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3 ve %5 oranlarında ilave olarak beton karışımlarında kullanmıştır. Kolemanit, sırasıyla -3 mm (C-3), -75 μm (C-75) ve -45 μm (C-45) olmak üzere üç farklı boyutta bir madenden temin edilmiş. C-3 boyutlu kolemanit öğütülerek -25 μm (C-25) boyutunda malzeme elde edilmiş. C-3, C-75 ve C-45 boyutlu kolemanit minerallerinin kimyasal yapısında sırasıyla %36, 40 ± 0.5 ve 40 ± 0.5 B_2O_3 olduğu belirtilmektedir. Yapılan ölçümlerin sonucunda, kolemanit mineralinin boyutu

küçüldükçe daha küçük oranlarda, büyüdüğüçe daha yüksek oranlarda kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Kutuk-Sert, 2016).

Yılmaz (2016), kolemanit atıklarını %1, %2.5, %5, %10 ve %20 oranlarında çimento ile yer değıştirdiği çalışmada kolemanitin B_2O_3 yüzdesini %16.28 vermiştir. Üretilen numuneler üzerinde fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneyler uygulanmıştır. Kolemanit oranı arttıkça priz başlama ve bitiş süresinin uzadığı görülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre %5 oranına kadar kolemanitin çimentoya ikame edilebileceği belirtilmiştir. Donma çözölmeye karşı en yüksek dayanım direncini %1 kolemanit ikamesi ile sağlandığını ayrıca kolemanit ikamesinin genleşmeyi azalttığını söylemektedir (Yılmaz, 2016).

Gezmen ve Türkel (2017), portland çimentosu ile farklı oranlarda kullanılan kolemanit mineralinin (%0, %2, %4, %6, %8, %10) ve uçucu kül içeren harçların (%0, %10, %20, %30) 7, 28, 56, 90. günlerdeki basınç ve eğilme dayanımları incelemiştir. Dayanım sonuçlarına göre, B_2O_3 miktarı %40 olan kolemanitin çimentoya kütlece %2 ve %4 oranlarında kullanılabileceğini ve sülfata dayanıklılık sonuçlarına göre, kolemanit miktarının artmasıyla sülfata dayanıklılığın geliştiğini görmüşlerdir (Gezmen ve Türkel, 2017).

Sevim vd. (2017), iki farklı su çimento oranına sahip (0.50 ve 0.60) ve ağırlıkça %0, %3, %5, %10 ve %15 oranında kolemanit çimentoya ikame edilerek toplam 10 farklı beton karışımı tasarımı yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kolemanit ikamesinin betonların işlenebilirliğini azalttığı belirlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde 28. gün kolemanit ikamesinin %3, 180. günde ise %3 ile %5 oranlarda ikame edilmesi referans numuneden daha yüksek basınç dayanımı sahip oldukları belirlenmiştir. 180. gün yarmada çekme dayanımları incelendiğinde su/bağlayıcı oranı 0.60 olan betonlarda kolemanit ikameli beton türleri referans numuneden düşük, 0.50 su/bağlayıcı oranı sahip beton türlerinde ise bütün oranlarda kolemanit ikamesi ile yüksek yarmada çekme dayanımı elde edilmiştir (Sevim vd., 2017).

Sallı Bideci ve Bideci (2018), öğütölmüş kolemanit katkısının çimento harç özelliklerine etkisini araştırmıştır. Öncelikle öğütölmüş kolemanitin puzolanik aktivite

özelliği belirlenmiş. Daha sonra %0, %1, %3, %5 ve %7 oranlarda öğütülmüş kolemanit katkılı çimento harçlarının; özgül ağırlık, özgül yüzey, priz başlama ve sona erme süreleri tayini, kıvam ve genleşme deneylerinin yapılmasının yanı sıra harç numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı belirlenerek referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. %39.85 B₂O₃ içeren kolemanitin puzolanik aktivite deneyi sonucunda standartta belirtilen değeri sağladığında dolayı puzolanik aktivitesinden bahsedilebileceği ve %1, %3 ve %5 oranında kolemanitin çimento ikame malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir (Sallı Bideci ve Bideci, 2018).

Mushurov vd., (2018), B₂O₃ içeriği 40.05 ± 0.5 olan kolemanit mineralini %5 ve %7 oranlarında çimentoya ikame etmiş ve aynı zamanda karışımlarda hiper akışkanlaştırıcı beton katkısının etkisini araştırmışlardır. Tüm zamanlarda kolamanit ikamesi eğilme ve basınç dayanımı referans numuneden düşük ölçülmüştür. Hiper katkılı örnekler incelendiğinde ise kolemanit ikamesiz numune en yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerlerini sağlamıştır. Hiper akışkanlaştırıcı ve kolemanitin birlikte kullanımı ile referans örneğe göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Mushurov vd., (2018).

Durgun ve Sevinc (2019), yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra atık yüksek fırın cürufu, atık cam ve kolemanit atığı ile üretilen betonların dayanım, kütle kaybı ve ultrases geçiş hızı özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarla ve elde edilen sonuçlara göre, kolemanitin 7 günlük basınç dayanımı değeri referanstan düşük iken 28 ve 90 günlerde referans numuneden yüksek olduğu belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre ise 7, 28 ve 90 günlerde en yüksek değer %3 kolemanit ikameli numuneye aittir. Yüksek sıcaklık maruziyetinden sonra ise numuneler arasında yüksek sıcaklıktan en az en az etkilenen %3 kolemanit ikameli numune olmuştur (Durgun ve Sevinç, 2019).

Bu çalışmada ise kolemanitin beton yollarda kullanılabilirliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kolemanit mineralinin betonun priz süresini olumsuz etkisi bilinen bir gerçektir. Çalışmada kolemanit minerali çimentoya ağırlıkça %0, %1, %2, %3, %4 ve %5 olarak kullanılmıştır. Kolemanit ikameli beton numunelerin dayanım ve durabilitesi test edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan malzemeler; CEM I 42.5 R çimentosu, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü maden ocağından temin edilen öğütülmüş kolemanit minerali, Artvin-Borçka'da bulunan taş ocağına ait agrega, katkı maddesi, şebeke suyu ve iki farklı kimyasal ($MgSO_4$ -NaCl) maddelerden oluşmaktadır.

2.1.1.Çimento

Beton üretiminde bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. CEM I 42.5 R çimentosu Çanakkale Fabrikası olan Akçansa Çimentodan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve basınç dayanımı özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

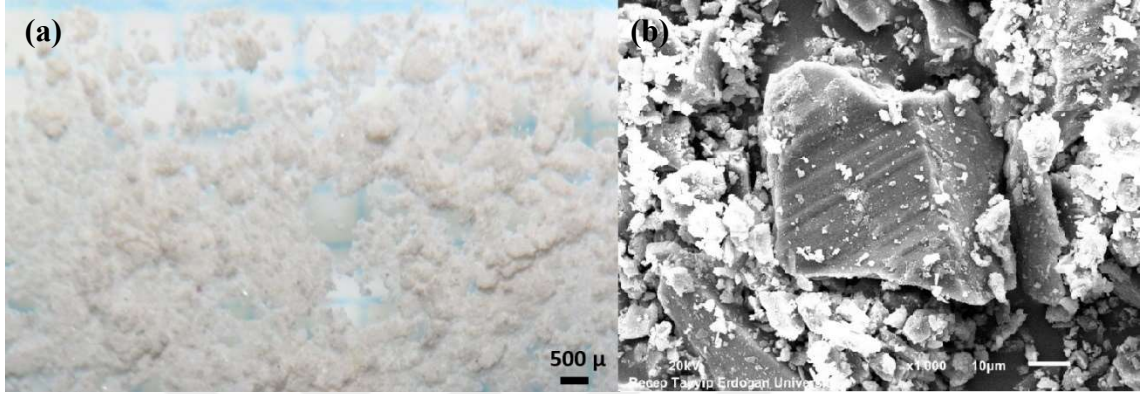
Tablo 5. Çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve basınç dayanımı özellikleri.

Analiz	Oksit	Değer (%)	Analiz	Deneşler	Değer
Kimyasal	CaO	62,64	Fiziksel	Özgöl yüzey (cm^2/g)	3269
	Al ₂ O ₃	4,56		Hacim Genleşmesi (mm)	2,0
	Fe ₂ O ₃	3,36		Yoğunluk (g/cm^3)	3,12
	SiO ₂	19,05		Priz başlama süresi (dakika)	150
	SO ₃	2,88		Priz bitiş süresi (dakika)	210
	MgO	2,98	Basınç Dayanımı	Deneş Zamanı	MPa
	Na ₂ O	0,15		2. gün	32,5
	Kızdırma kaybı	3,02		7. gün	43,4
	Çözünmeyen kalıntı	0,30		28. gün	53,6

2.1.2. Kolemanit Minerali

Öğütülmüş kolemanit minerali, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü maden ocağından temin edilmiştir. Öğütülmüş kolemanit mineralinin partikül boyutu minimum %82'si 75 µm (C-75) elek altı malzemeden oluşmaktadır (URL-8).

Yoğunluğu 2.39 g/cm^3 ve özgül yüzeyi ise $3432 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir (TS EN 196-6, 2010). Öğütülmüş kolemanit mineralinin optik mikroskop ve elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 6 (a) ve (b)'de verilmiştir. Elektron mikroskobu görüntüsünden kolemanit mineralinin keskin kenar ve düzgün geometrik şekle sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Kolemanit mineralinin (a) optik mikroskop (b) elektron mikroskobu görüntüleri (Kutuk-Sert, 2016).

Çimentoya ikame olarak kullanılan C-75 kolemanit mineralinin kimyasal özellikleri ise Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Kolemanit mineraline ait kimyasal özellikler (URL-8).

Oksit	Değer (%)
B ₂ O ₃	40,00 ± 0,50
CaO	27,00 ± 1,00
SiO ₂	4,00 ~ 6,50
SO ₄	≤ 0,60
Fe ₂ O ₃	≤ 0,08
Al ₂ O ₃	≤ 0,40
MgO	≤ 3,00
SrO	≤ 1,50
Na ₂ O	≤ 0,50
Nem	≤ 1,00
Kızdırma kaybı	≤ 25,00

2.1.3. Agrega

Çalışmada kullanılan agrega Artvin ili Borçka ilçesinde faaliyet gösteren taş ocağından temin edilmiştir.

2.1.4. Katkı Maddesi

Beton üretiminde katkı maddesi olarak süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddesi Grace Zyla 420 olup katkı maddesine ait teknik özellikler Tablo 8’de görülmektedir.

Tablo 7. Katkı maddesine ait teknik özellikler (URL-9).

Analiz	Sonuç
Yapısı	Homojen sıvı
Görünüm	Kahverengi
Özgür ağırlık (g/cm ³)	1,080 ± 0,020
pH	7 ± 1,50
Alkali miktarı (%)	< 7,00
Klorür miktarı (%)	< 0,10
Önerilen dozaj miktarı (%)	0,5 ~ 1,2

2.1.5. Beton Karışım Suyu

Betonda hidratasyon olayı ve işlenebilirlik için suya ihtiyaç vardır ayrıca beton karışım suyu betonun özelliklerini olumsuz etkilememelidir. Karışımlarda kullanılacak su yabancı maddeler bulundurmayan, doğal, temiz ve içilebilir olmalıdır. Beton karma suyu olarak kullanılan Artvin ili Borçka ilçesi şebeke suyunun analiz sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Bütün beton karışım ve küründe aynı şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 8. Karma suyuna ait analiz sonuçları (Halk Sağlığı Müdürlüğü, 2017).

Analiz	Sonuç
Tat	TKEDY
Renk	TKEDY
Koku	TKEDY
Bulanıklık	TKEDY
Amonyum (mg/L)	0,02
İletkenlik (µS/cm)	< 2500
pH	7,93

2.1.6. Kimyasallar

Deneylerde Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) ve Sodyum Klorür ($NaCl$) kimyasalları kullanılmıştır. Saflığı %99 üzerinde ve pH'ı 5.0~8.0 olan $MgSO_4$ kimyasalına ait özellikler Tablo 9'da görünmektedir.

Tablo 9. Kimyasal maddelere ait özellikler (URL-10).

Kimyasal	Özellik	Değer (%)
$MgSO_4$ (Magnezyum Sülfat)	Kalsiyum (Ca)	< 3
	Klorür (Cl)	< 0,01
	Demir (Fe)	< 0,0005
	Kurşun (Pb)	< 0,0005
	Arsenik (As)	< 0,0005

Yoğunluğu 2.17 g/cm³ saflığı %99.5 ve pH'ı 4.5~7.0 arasında olan $NaCl$ kimyasalına ait özellikler ise Tablo 10'da verilmiştir.

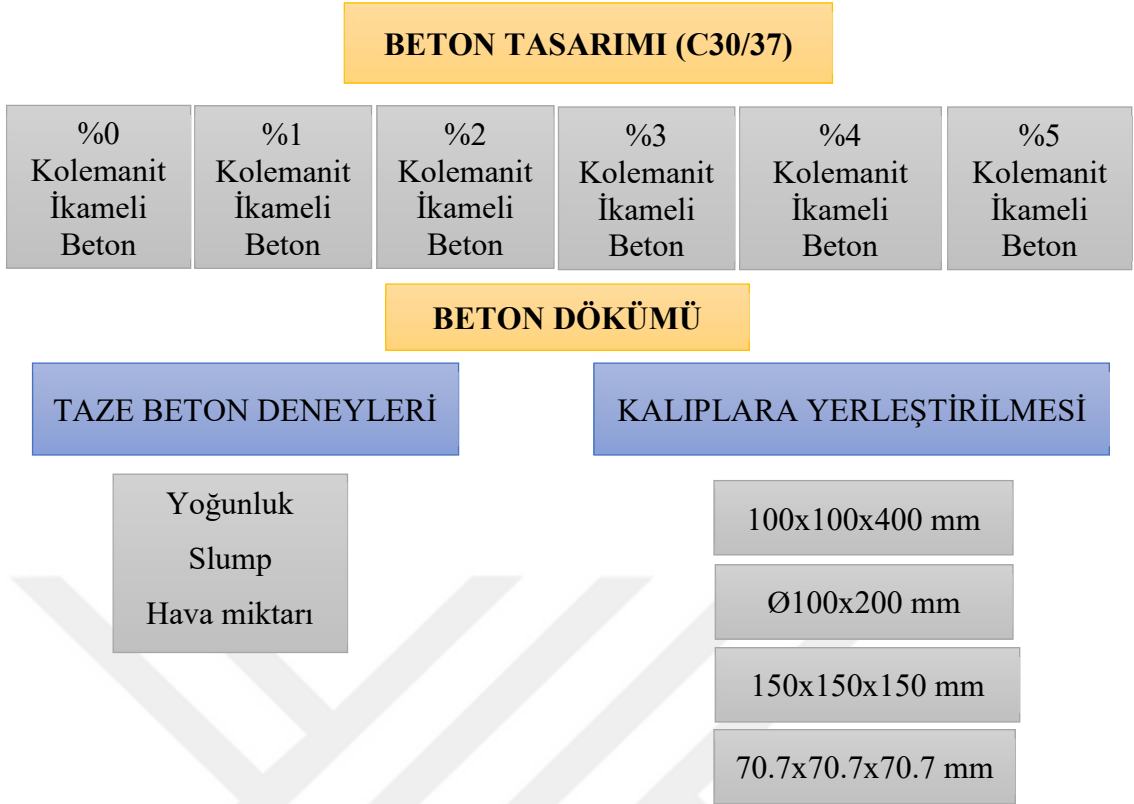
Tablo 10. Kimyasal maddelere ait özellikler (URL-11).

Kimyasal	Özellik	Değer (%)
$NaCl$ (Sodyum Klorür)	Kalsiyum (Ca)	$\leq 0,002$
	Demir (Fe)	$\leq 0,0001$
	Kurşun (Pb)	$\leq 0,0005$
	Arsenik (As)	$\leq 0,00004$

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında yapılan deneyler Artvin Çoruh Üniversitesi İnşaat Bölümü Laboratuvarı ve Artvin Devlet Su İşleri Yapı Malzemeleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Beton numunelerin tasarımı için agregalara ait fiziksel özellikler belirlenmiş ve beton tasarımı yapılarak karışımlar hazırlanmıştır. Beton üretimi sırasında taze betonların yoğunluk, çökme miktarı (Slump) ve hava içeriği belirlenmiştir (TS EN 12350-6, 2010; TS EN 12350-2, 2010; TS EN 12350-7, 2010).

Taze beton deneylerinden sonra hazırlanan beton karışımları prizmatik (100x100x400 mm), silindir ($\phi 100 \times 200$ mm) ve küp (71x71x71 mm ve 150x150x150 mm) kalıplara yerleştirilmiştir (TS EN 12390-1 2013; TS EN 13892-3 2015). Beton numuneler 7, 28 ve 90 gün suda kür edilerek numuneler üzerinde Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı ve aşınma kaybı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fiziksel ve kimyasal ortamların beton numuneler üzerindeki etkilerin belirlenmesi için 28 gün su kürü edilmiş numuneler 90. güne kadar farklı fiziksel ve kimyasal ortamlara maruz bırakılmıştır. 90 günün sonunda kütle kaybı, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Fiziksel ve kimyasal ortamlarda bekletilen numunelerden elde edilen sonuçlar kontrol (90 gün su kürü) numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemler agrega deneyleri, beton tasarımı ve karışımların hazırlanması, taze beton deneyleri ile sertleşmiş beton deneylerinden oluşmaktadır. Kolemanit ikamesi ile bu çalışma kapsamında hazırlanacak beton türleri ve deneyler Şekil 7 ve Şekil 8’te verilmiştir.



Şekil 7. Beton tasarım, dökümü, taze beton deneyleri ve kalıplara yerleştirilmesi.



Şekil 8. Beton numunelerin kür edilmesi ve sertleşmiş beton deneyleri.

2.2.1. Agrega Deneyleri

Artvin ili Borçka ilçesindeki taş ocağından temin edilen agregaların petrografik analizi ve agregalar üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirilmiştir. Agreganın petrografik analizi yapılmış ve agreganın alındığı kayacın cinsi belirlenmiştir. Agregalara ait tane büyüklüğü dağılımı TS 706 EN 12620+A1 ve TS EN 933-1 standartlarına göre yapılmıştır (TS 706 EN 12620+A1, 2009; TS EN 933-1, 2012). Agregalar üzerinde yapılan diğerk fiziksel deneyler ve ilgili standartlar Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Agregalara uygulanan fiziksel deneyler.

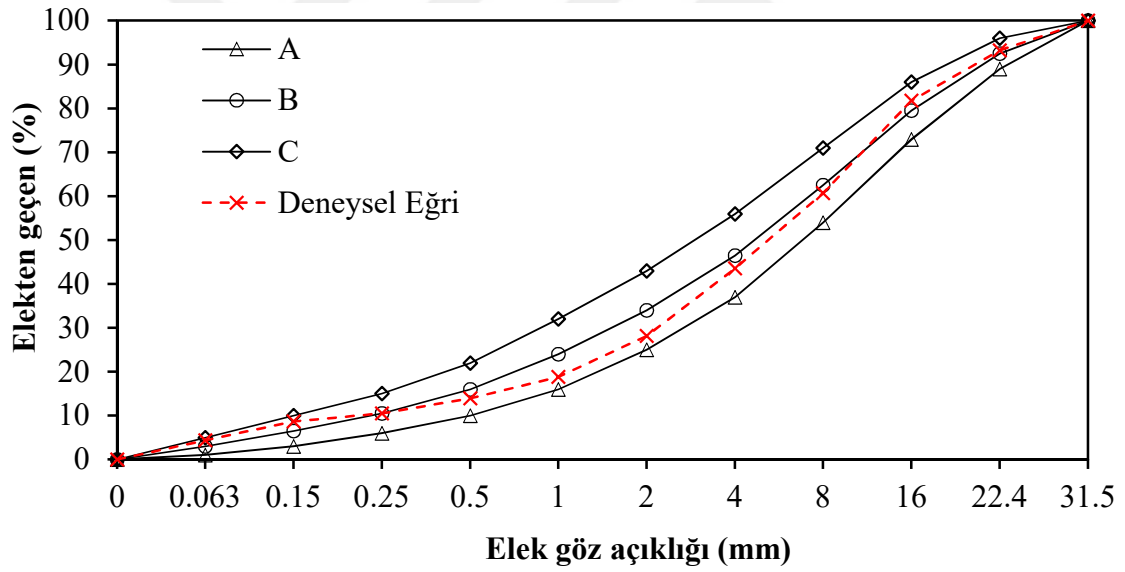
Deneyler	Standartlar
Yoğunluk tayini	ASTM C127 - C128, 2015
Su emme tayini	ASTM C127 - C128, 2015
İnce malzeme tayini	TS EN 933-10, 2015
Kil toprakları ve eriyebilir parçacık miktar	ASTM C 142, 2017
Tane şekli tayini: Yassılık endeksi	TS EN 933-3, 2012
Metilen mavisi deneyi	TS EN 933-9+A1, 2014
Los Angeles Aşınma kaybı tayini	ASTM C 131, 2014
Donma ve çözölmeye karşı direnç	TS EN 1367-1, 2009
Dona dayanıklılık (NaSO ₄)	ASTM C88, 2018

İri (12-25 mm) agregalar içerisinden seçilen numunelerin ince kesitleri petrografik inceleme esaslarına uygun hazırlanmıştır. Hazırlanan ince kesitler Polarizan mikroskopta incelenerek, agregaların tanımlaması yapılmıştır. Petrografik incelemeler sonucunda taş ocağına ait agregaların dokusal farklılık gösteren andezit çakıllarından oluştuğı görölmüştür (şekil 9).



Şekil 9. Polarizan mikroskopta incelenen agregaya görüntüsü.

Agregalara ait deneysel granülometri eğrisi Şekil 10’da verilmiştir. Elde edilen tane dağılımı, standart eğrilerle sınırlanan alan içerisinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 10. Agregalara ait deneysel granülometri eğrisi.

Beton üretiminde ince (0-5 mm) ve iri (5-12 ile 12-25 mm) agregalar üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Agregalara ait fiziksel özellikler.

Deneyler	Agrega (mm)	Değer	Limit
Yoğunluk (g/cm ³)	0-5 kırma kum	2,63	≥ 2.0
	5-12 kırmataş	2,70	
	12-25 kırmataş	2,72	
Su emme (%)	0-5 kırma kum	2,30	İnce agreg a ≤ 3
	5-12 kırmataş	1,65	İri agreg a ≤ 2
	12-25 kırmataş	1,20	
İnce malzeme tayini (%)	0-5 kırma kum	12,8	İnce agreg a ≤ 16
	5-12 kırmataş	1,2	İri agreg a ≤ 1
	12-25 kırmataş	1,0	
Kil toprakları ve eriyebilir parçacık miktarı (%)	0-5 kırma kum	0,1	İnce agreg a ≤ 3
	5-12 kırmataş	0,1	İri agreg a ≤ 1
	12-25 kırmataş	0,3	
Yassılık indeksi (%)	5-12 kırmataş	11,9	≤ 20
	12-25 kırmataş	8,7	
Metilen mavisi (%)	0-5 kırma kum	1,5	≤ 2
Los Angeles aşınma kaybı (%)	12-25 kırmataş	100 devir: 5,9	≤ 10
		500 devir: 25,5	≤ 50
Donmaya ve çözölmeye karşı	12-25 kırmataş	1,2	Kategori F ₂
direncin tayini	12-25 kırmataş	1,3	
Donma çözölmeye kaybı (%)	12-25 kırmataş	5,5	

Agregaların yoğunlukları sırasıyla 2.63, 2.70 ve 2.72 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Beton üretiminde kullanılacak agregaların yoğunlukları 2.00 g/cm³'ten büyük olması istenmektedir (TS 706 EN 12620+A1, 2009). Çalışmada kullanılan agregaların yoğunlukları istenilen değerin üzerinde olduğu görölmüştür.

0-5, 5-12 ve 12-25 mm agregaların su emme oranları %2.3, %1.65 ve %1.20 olarak ölçölmüştür. Beton agregaları için su emme oranı ince agregalarda %3, iri agregalarda ise %2'nin altında olmalıdır (URL-12). Agregaların su emme değeri incelendiğinde limit değeri altında olduğu görölmektedir.

Agregalarda ince malzeme ile kil toprakları ve eriyebilir parçacık miktarları ölçölmüş ve yüzde olarak hesaplanmıştır. Agregaların ince malzeme ile kil toprakları ve eriyebilir parçacık miktarları limit değeri altında sonuçlanmıştır (TS EN 933-10, 2015; ASTM C33/C33M, 2016).

Agregaların (5-12 ve 12-25 mm) yassılık indeksi sırasıyla %11.9 ve %8.7 olup, beton agregası olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür (URL-12). İnce agreganın metilen mavisi değeri arttıkça agreganın kirliliğinin arttığını yani kil içeriğinin fazla olduğunu, metilen mavisi değeri azaldıkça kirliliğin azaldığı sonucuna varılmaktadır. İnce agrega (0-5 mm) üzerinde yapılan metilen mavisi %1.5 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değer çalışmada kullanılan ince agreganın oldukça az kil miktarına sahip olduğu göstermektedir (URL-12).

Agregaların aşınma direnci, agrega tanelerinin kırılabilirliği ve sertliği, süreksizlik düzlemleri, minerallerin kenetlenmesi ile taneler arası bağın mukavemetini yansıtmaktadır (Fokes, 1980). Los Angeles metodu ile aşınma kaybı 100 devir için %5.9, 500 devir sonrası ise %25.5 olarak hesaplanmıştır. Agreganın aşınma kaybının 100 devirde %10, 500 devirde ise %50'nin üzerinde olması önerilmektedir (Şimşek, 2004; Yalçın ve Gürü, 2006). Düşük aşınma kaybı, agregaların mekanik etkilere karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Agregalar üzerinde yapılan donma ve çözölmeye karşı direncin tayini deneyin sonucu %1.2 ve %1.3 kayıpla sonuçlanmıştır. Sodyum sülfat ile donma çözölmeye dayanıklılığı kaybı ise %5.5 olarak hesaplanmıştır. Agregada betonun donma ve çözölmeye dayanıklılığı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Betonlarda kullanılacak agreganın da donma çözölmeye dayanıklı olması agregalardan beklenen bir özelliktir. Yapılan deneylerin sonuçları agregaların donma ve çözölmeye etkisine karşı dayanıklı olduğunun göstergesidir (ASTM C33 / C33M-18, 2018).

Betonu oluşturan malzemeler içinde agreganın önemi oldukça fazladır. Agregada beton karışımlarında hacim ve kütle olarak ana bileşen konumundadır. Beton üretiminde kullanılan agregaların özellikleri ise betonun kalitesini etkilemektedir. Dolayısı ile kaliteli beton elde etmenin en önemli şartlarından birisi, beton karışımında yer alacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir (Tekin vd., 2017). Çalışmada beton üretiminde kullanılacak agregaların cinsi ve fiziksel özellikleri belirlenmiş ve beton üretimi için uygun olduğu yapılan deneyler ile tespit edilmiştir.

2.2.2. Beton Tasarımı ve Karışımların Hazırlanması

Betonların karışım hesabı TS 802 ve TS EN 206:2013+A1 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir (TS 802, 2016; TS EN 206:2013+A1, 2017). Karışımların beton sınıfı C30/37 olup, SA bağlayıcı miktarının %0.8'i kadar kullanılmıştır. Beton karışımlarında farklı oranlarda (%0, %1, %2, %3, %4 ve %5) kolemanit çimentoya ikame edilmiştir. Kolemanitin çimentoya ikame oranları ve beton numunelerin etiketlenmesi Tablo 13'de görülmektedir.

Tablo 13. Kolemanitin ikame oranları ve beton numunelerin etiketlenmesi.

Numune Etiketleri	K0	K1	K2	K3	K4	K5
Kolemanit Oranı (%)	0	1	2	3	4	5
Çimento Oranı (%)	100	99	98	97	96	95

K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 olmak üzere toplam 6 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Literatürde bor bileşiklerinin çimento hidratasyonunu geciktirdiği ve özellikle erken dayanıma olumsuz etkisine vurgu yapılmaktadır (Erdogan vd., 1998; Kula vd., 2001; Targan vd., 2003; Olgun vd., 2007; Yılmaz, 2016). Dolayısı ile kolemanitin ikame miktarı hem hidratasyon zamanı hem de dayanım özellikleri için büyük önem arz etmektedir. Kolemanitin çimentoda %5'e kadar kullanılmasının uygun olacağı belirtilmektedir (Erdoğan vd., 1998; Yılmaz, 2016; Sallı Bideci ve Bideci, 2018). Bu bağlamda kolemanitin beton içerisinde en uygun oranını belirlemek için %1, %2, %3, %4 ve %5 oranları kullanılmıştır. Her bir tür için beton karışımına giren malzeme miktarları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Beton karışımına giren malzeme miktarları.

Malzemeler	K0 (Referans)	K1	K2	K3	K4	K5
Çimento (kg)	350,0	346,5	343,0	339,5	336,0	332,5
Kolemanit (kg)	0	3,5	7,0	10,5	14,0	17,5
Su (kg)	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5
SA (%0,8) (kg)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
0-5 mm kırma kum (kg)	925,5	925,1	924,6	924,2	923,8	923,3
5-12 mm kırmataş (kg)	408,7	408,5	408,3	408,1	407,9	407,7
12-25 mm kırmataş (kg)	589,0	588,7	588,4	588,2	587,9	587,6

Karışımların tasarımında kolemanit minerali ikamesinin işlenebilirliğe etkisini belirlemek için kolemanit ikamesiz (K0) beton numunesinin çökme sınıfı S3 (100~150 mm) olarak tercih edilmiştir (TS EN 206:2013+A1, 2017). Karışımlar laboratuvar tipi beton mikserinde (Şekil 11) sabit hızla karıştırılmıştır.



Şekil 11. Beton karışımların hazırlanması için kullanılan laboratuvar tipi beton mikseri.

Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal Hava Koşullarında) standardında belirtilen esaslara uygun olarak betonun kalıplara dökümü, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması gerçekleştirilmiştir (TS 1247, 2018). Taze beton karışımları kalıp yüzeyleri yağlandıktan sonra prizmatik, silindir ve küp kalıplara yerleştirilmiştir (TS EN 12390-1,

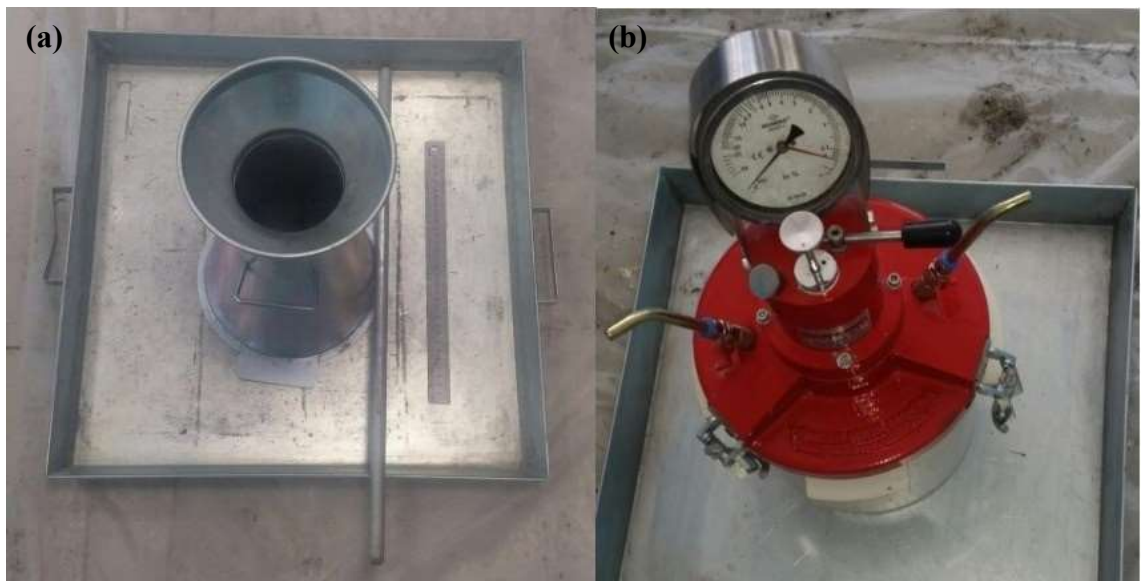
2013). Kolemanit mineralinin çimento ile kullanımı çimentonun priz sürelerini arttırdığı yapılan çalışmalardan bilinmektedir. TS EN 12390-2 standardında ise deney numuneleri, kalıp içerisinde, 16 saatten az, 3 günden daha fazla olmamak üzere, yeterli sertliğe ulaşıncaya kadar bekletilmesinin gerekliliği belirtilmektedir (TS EN 12390-2, 2010). Kolemanit ikameli beton numuneleri yeterli sertliğe ulaşana kadar kalıplarda bekletilmiştir. K0, K1 ve K2 beton numuneleri 24 saat (1 gün), K3 betonu 48 saat (2 gün), K4 ve K5 beton numunelere ise 72 saat (3 gün) sonra kalıplardan çıkarılarak kür tankına yerleştirilmiştir. Kolemanit ikamesi üretilen beton numunelerin yeterli sertliğe gelmesi ile kalıptan çıkarılma süreleri Tablo 15’te görülmektedir.

Tablo 15. Beton numunelerin kalıpta bekleme süreleri.

Beton türleri	K0	K1	K2	K3	K4	K5
Kalıpta bekle süresi (gün)	1	1	1	2	3	3

2.2.3. Taze Beton Deneyleri

Kolemanit ikamesi ile elde edilen K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 taze beton karışımlarının yoğunluk, çökme (Slump) miktarları ve hava içerikleri belirlenmiştir (TS EN 12350-6, 2010; TS EN 12350-2, 2010; TS EN 12350-7, 2010). Çökme miktarı ve hava içeriği tayini için kullanılan deney düzenekleri Şekil 12 (a) ve (b)’de verilmiştir.



Şekil 12. Taze beton deneylerinden (a) Çökme (Slump) seti ve (b) Hava ölçer görüntüleri.

2.2.4.Sertleşmiş Beton Deneyleri

K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 olmak üzere farklı kolemanit minerali içeren beton türleri hazırlanmıştır. Hazırlanan 150x150x150 mm küp, 100x100x400 mm prizmatik, ø100x200 mm silindir ve 71x71x71 mm küp beton numunelerinde toplamda 288 adet beton numunesi üretilmiştir. Sertleşmiş beton numunelere tahribatlı ve tahribatsız deneyler uygulanmıştır. Beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen tahribatlı her deney için 7, 28 ve 90. günlerde gerçekleştirilmek üzere 3'er adet numune elde edilmiştir. Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve kapiler su emme deneyleri için ayrıca numune üretimi yapılmamış olup üretilen numuneler kullanılmıştır. Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç, yarmada çekme, eğilme ve aşınma dayanımları için 7, 28 ve 90. gün ölçümler yapılmıştır. İslanma kuruma, donma çözülme, sülfat ve klorür dayanımları için ise 28 gün kür edilmiş numuneler 90. güne kadar fiziksel ve kimyasal ortamlara maruz bırakılmıştır. Fiziksel ve kimyasal ortamlarda bırakılan numuneler üzerinde ise kütle kaybı, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca fiziksel ve kimyasal ortamlara maruz kalmış beton numuneleri kontrol (90 gün su kürü uygulanan beton numuneler) numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini değerlendirme de Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı testleri tahribatsız yöntemlerdendir. Schmidt çekici beton numunelerin yüzey sertliği, ultrases geçiş hızı ise boşluk yapısı hakkında yorum yapılmasına olanak sağlamaktadır (Qasrawi, 2000; Abo-Qudais, 2005). Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı deneyleri kesin sonuçlar vermemekle birlikte benzer beton numuneler hakkında hızlı bilgiler edinmek üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. Ölçümlerde kullanılan Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızına ait resimler Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13. (a) Schmidt çekici ve (b) Ultrases geçiş hızı cihaz görüntüleri.

Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızları ölçümleri 150x150x150 mm küp numunelerde yapılmıştır. Schmidt çekici geri tepme sayıları cihaz üzerinde bulunan grafik (Şekil 1) ile yaklaşık basınç dayanımına dönüştürülmüştür (TS EN 12504, 2013). Ultrases cihazının alıcı ve gönderici uçları karşılıklı olacak şekilde seçilmiş olup numune boyutları cihaza metre olarak girilmiş, sonuçlar ise km/s cinsinden ölçülmüştür (ASTM C 597-83, 2009).

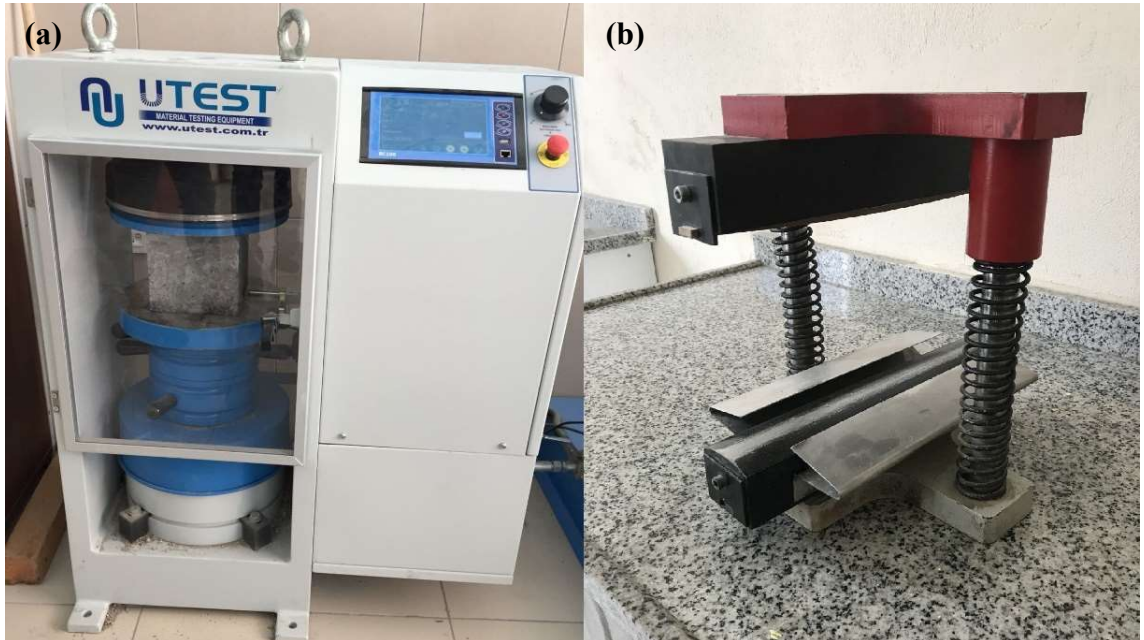
Basınç dayanımı deneyi 150x150x150 mm küp beton numuneler üzerinde tahribatsız deney ölçümleri yapıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı ise 100x100x400 mm prizmatik numuneler ile tespit edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri 7, 28 ve 90. günlerde gerçekleştirilmiştir.

Basınç ve eğilme dayanım deneyleri için pres standartlarda belirtilen esaslara uygun olarak ayarlanmış ve otomatik olarak kırılarak dayanımlar ölçülmüştür (TS EN 12390-3, 2010; TS EN 12390-5, 2010). Basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz görüntüleri Şekil 14 (a) ve (b)'de görülmektedir.



Şekil 14. (a) Basınç dayanım deney presi ve (b) Eğilme dayanımı deney görüntüsü.

Yarmada çekme dayanımı ölçümleri basınç presinde yarmada çekme aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pres standartlarda belirtilen esaslara uygun olarak ayarlanarak dayanım değerleri tespit edilmiştir (TS EN 12390-6, 2010). Deneyde kullanılan presi ve yarmada çekme deney aparatı Şekil 15 (a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 15. (a) Basınç dayanım deney presi ve (b) Yarmada çekme deney aparatı görüntüsü.

Kolemanit ikameli betonların yüzey aşınmasının belirlenmesi amacıyla 71x71x71 mm boyutlarında küp örnekler üretilmiştir. Böhme (yatay) aşındırma cihazında 7, 28 ve

90. günlerde beton numuneler deneye tabi tutulmuştur. Deneyde 30 ± 1 devir/dakika hızla dönmesini sağlayan yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırma diski bulunmaktadır. Disk üzerine numune yerleştirilmeden önce 20 ± 0.5 gr aşındırma tozu serilerek numune yerleştirilmiş ve numune üzerine 294 ± 3 N yük yüklenerek deney gerçekleştirilmiştir. 22 devir sonunda otomatik olarak duran disk üzerinden aşındırıcı toz ve numune atıkları temizlenmiştir. Her deney tekrarında 20 ± 0.5 gr aşındırıcı toz disk üzerine serilerek, numune düşey eksen etrafında 90° çevrilerek yerleştirilmiştir. Her numune için 22 devirden meydana gelen deney, 16 defa uygulanmıştır. Beton numuneler temizlendikten sonra numune boyutları 0.01 mm hassasiyetle olan kumpas ile ölçülmüş ve hassas terazide tartılmıştır (TS EN 13892-3, 2015). Çalışmada kullanılan Böhme (yatay) aşındırma cihazı Şekil 16’da görülmektedir.



Şekil 16. Böhme (Yatay) aşındırma cihazı.

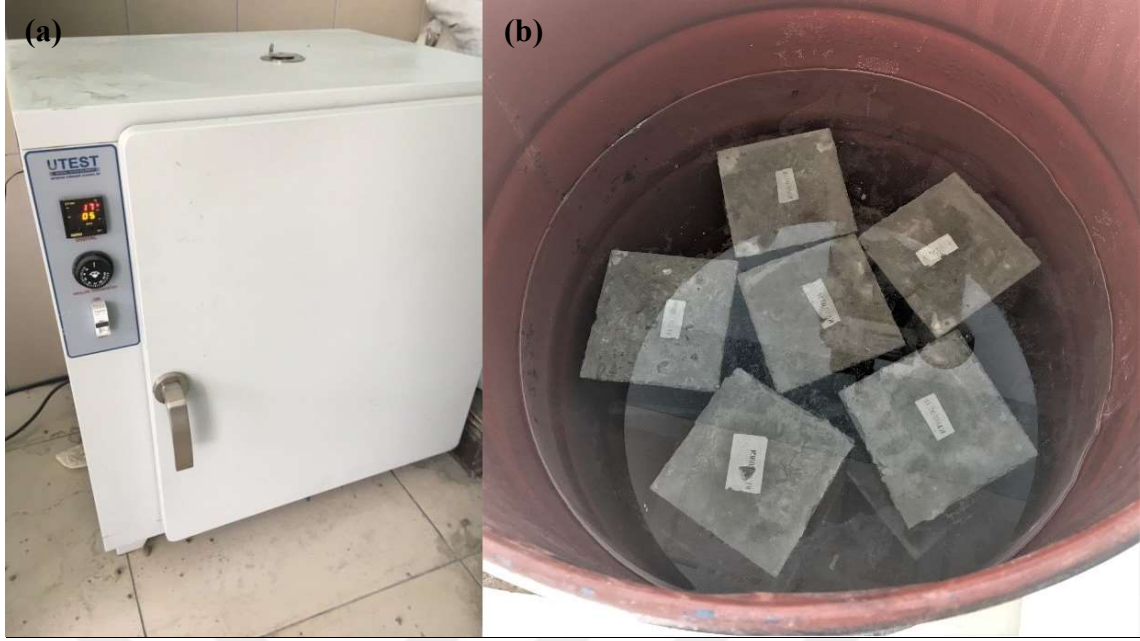
Kolemanit ikamesi ile hazırlanan farklı beton karışımlara ait 150x150x150 mm boyutlarındaki küp örnekler üzerinde kapiler su emme deneyi yapılmıştır (TS EN 772-11, 2012). Küp örneklerin yan yüzeyleri silikon ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su teması olacak şekilde deney şartları gerçekleştirilmiştir (Şekil 17). Su seviyesi deney sürecinde 5 mm olarak sabit tutulmuştur. Başlangıçta etüv kurusu olarak suya yerleştirilen

örnekler 0, 10, 20, 30, 60, 120, 360 ve 1440 dakika sürelerde tartılmıştır. Deney sonunda beton numunelerin kapiler su emme katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 17. Kapiler su emme deney düzeneği.

Beton numuneler üzerinde en etkili çevre koşullarından olan ıslanma ve kuruma etkisini belirlemek için 3 tane 150x150x150 mm numune kullanılmıştır. Beton numuneler 28 gün boyunca kür edildikten sonra 90. güne kadar ıslanma ve kuruma çevrimine maruz bırakılmıştır. Islanma ve kuruma çevrimi 24 saat 105 °C etüvde kurutulan numuneler, 48 saat normal su içerisinde tam doygun hale getirilmiş deney gününe kadar bu çevrimler tekrarlanmıştır (Öner vd., 2004). Islanma kuruma çevrimine maruz bırakılmış beton örnekleri üzerinde kütle kaybı, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ıslanma ve kuruma çevrimine maruz bırakılmamış (Kontrol) beton numuneler ile karşılaştırılmıştır. Islanma ve kuruma döngüsü için kullanılan etüv ve deney düzeneği Şekil 18 (a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 18. (a) Etüv ve (b) ıslanma kuruma çevrimi düzeneği.

Donma çözülme deneyi için her karışımdan 3 numune üretilmiştir. Deneyde 150 mm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Üretilen her numune için donma ve çözülme deneyi haricinde referans numuneler üretilip, bu numunelerin basınç dayanımları saptanmıştır. Başlangıçta beton numuneler 20 °C su içerisinde olacak şekilde numune kaplarına yerleştirilmiş ve donma çözülmeye maruz bırakılmıştır. Donma çözülme sıcaklık döngüsü Tablo 16'da görülmektedir.

Tablo 16. Donma ve çözülme döngüsü.

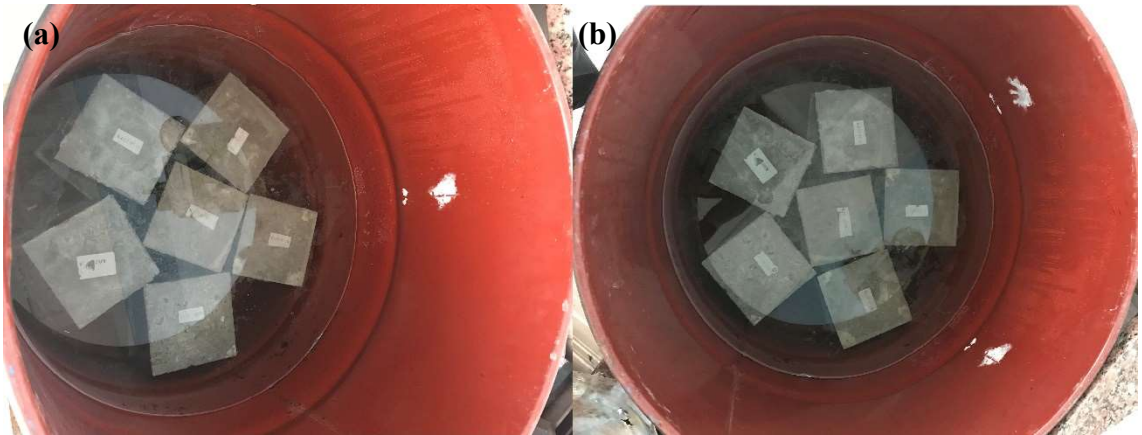
İşlemler	İlk sıcaklık (°C)	Son sıcaklık (°C)	Süre (sa)	Tolerans (sa)
Soğutma	20 ± 5	0	2,5	± 1,0
Bekletme	0	0	3,5	± 1,5
Soğutma	0	- 17,5 ± 2,5	3,0	± 1,0
Bekletme	- 17,5 ± 2,5	- 17,5 ± 2,5	Min. 4,0	-
Çözülme	- 17,5 ± 2,5	20 ± 3	Maks. 10,0	-

Dondurma işlemi tamamlandıktan sonra cihaz 20 °C sıcaklıkta en fazla 10 saat bekletilerek donma ve çözülme işlemi bir döngü olmaktadır. Onuncu döngü sonunda beton numunelerin ağırlıkları, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçları kontrol numuneler ile karşılaştırılarak kayıplar belirlenmiştir. Deney cihazı ve numuneler Şekil 19 (a), (b) ve (c)'de görülmektedir.



Şekil 19. (a) Numune kaplarına beton ve su yerleştirilmesi (b) Numune kaplarının cihaza yerleştirilmesi (c) donma ve çözülme cihazı.

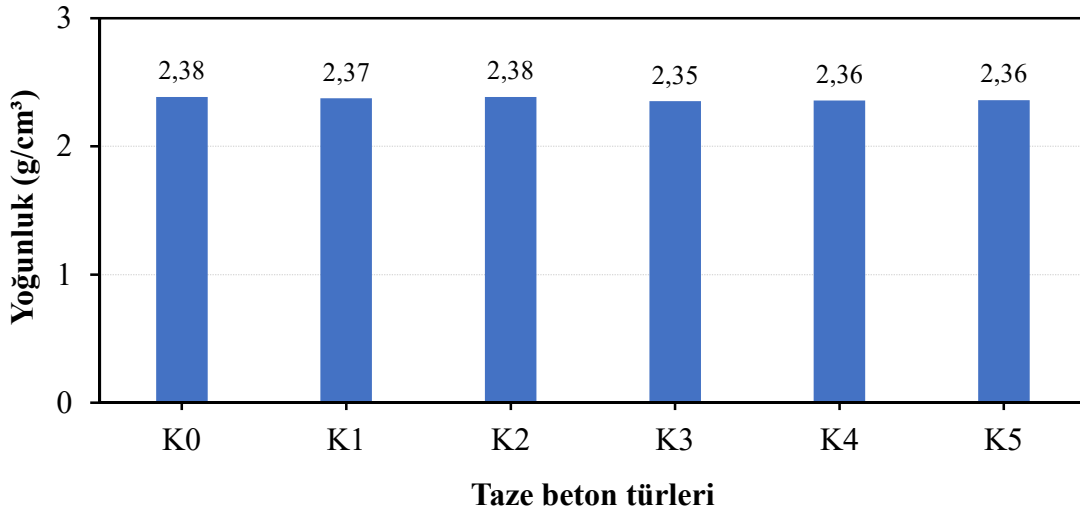
Kolemanit ikamesi ile üretilen beton numunelerin kimyasal ortamlardaki dayanıklılığını belirlemek için $MgSO_4$ ve $NaCl$ kullanılmıştır. Beton numuneler 28 gün kür edilerek 90. güne kadar kimyasal ortamlarda bekletilmiştir (Şekil 20). Kimyasal ortamların konsantrasyonu %5 $MgSO_4$ ve %5 $NaCl$ ile olacak şekilde hazırlanmıştır. 90. gün sonunda ağırlık kaybı, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı belirlenmiştir. Kimyasal ortama maruz kalmayan kontrol beton numuneleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 20. Kimyasal ortam görüntüleri: (a) $MgSO_4$ ve (b) $NaCl$.

3. BULGULAR

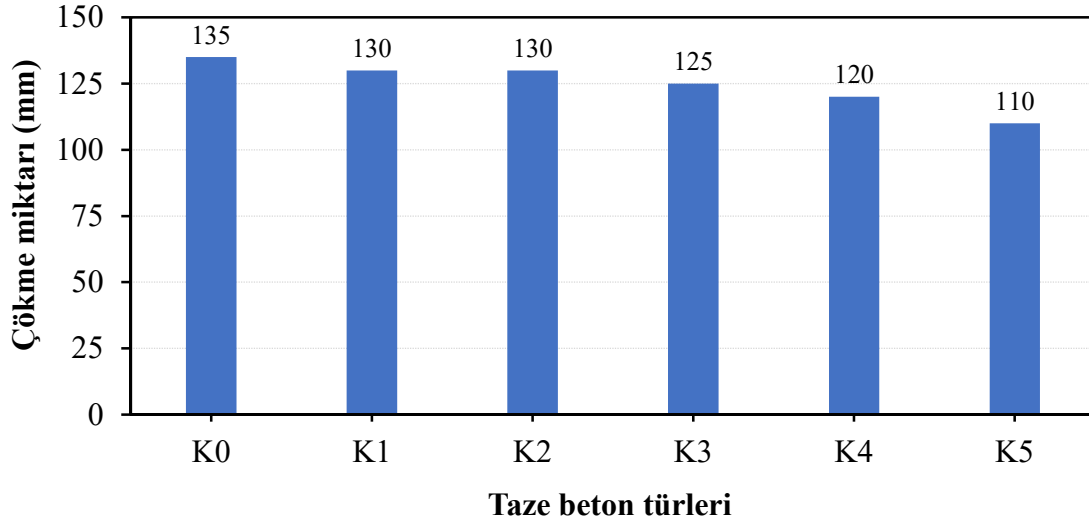
Beton üretimden %0, %1, %2, %3, %4 ve %5 kolemanit çimentoya ikame olarak kullanılmıştır. Kolemanit ikamesiz (Referans) ve ikameli beton numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numuneler K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 olarak etiketlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen taze betonların yoğunlukları (birim hacim ağırlık) belirlenmiş olup Şekil 21’de görülmektedir. Taze beton numunelerin birim ağırlıkları 2,35 ile 2,38 g/cm³ aralığında bulunmuştur. Taze betonların yoğunlukları incelendiğinde kolemanit ikamesi ile yoğunluğun değişmediği belirlenmiştir.



Şekil 21. Taze beton numunelerinin yoğunluk sonuçları.

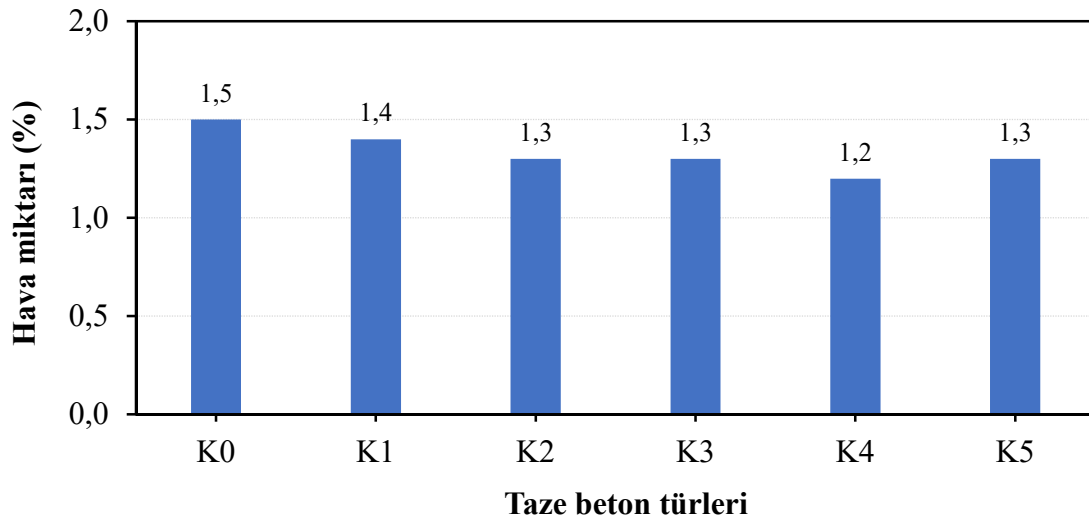
Kolemanit ikamesinin işlenebilirliğe etkisini belirlemek için taze betonlar üzerinde çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Taze beton numunelerin işlenebilirliğinin kolemanit ikame oranının artmasıyla bir miktar azaldığı görülmüştür. K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 beton türlerinin çökme miktarları sırasıyla 135, 130, 130, 125, 120 ve 110 mm olarak ölçülmüştür. Geçmiş çalışmalar kolemanitin çimentolu kompozitlerdeki dayanım özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır özellikle betonda kolemanitin taze hal özelliklerine etkisinin incelendiği çalışma sayısının kısıtlı olduğu görülmüştür. Kıvam değerlerinin incelendiği bir çalışmada ise kolemanitin çimentoya ikame olarak kullanımının betonun işlenebilirliğini azalttığı ve bu durum kolemanitin kızdırma değeri kaybının yüksek olması ile açıklanmıştır (Sevim vd., 2017). Çalışmada ölçülen çökme değerleri işlenebilirliğin bir miktar azaldığını ancak bütün beton türlerinin kıvamının S3 sınıfında belirtilen çökme miktarı aralığında olduğu tespit edilmiştir. Taze beton türleri üzerinde

elde edilen çökme miktarları Şekil 22’de verilmiştir. Kolemanit ikame oranının %5’e kadar kullanılmasının, betonun işlenebilirliğinde kayda değer bir değişim meydana getirmediği belirlenmiştir.



Şekil 22. Taze beton numunelerin çökme (slump) miktarları.

Taze beton numunelerin hava miktarları ölçümleri Şekil 23’de görülmektedir. Kolemanit mineralinin ikame olarak kullanılması ile elde edilen taze beton numunelerin hava içeriğini bir miktar azaltmıştır. Bütün taze beton numunelerde elde edilen hava miktarı %1.2~1.5 olarak belirlenmiştir. Taze betonlardaki hava miktarının azalması; kolemanit mineralinin özgül yüzeyinin çimentodan yüksek olması ayrıca karışımlara hacimce çimentodan fazla kolemanit girişi ile açıklanabilir.

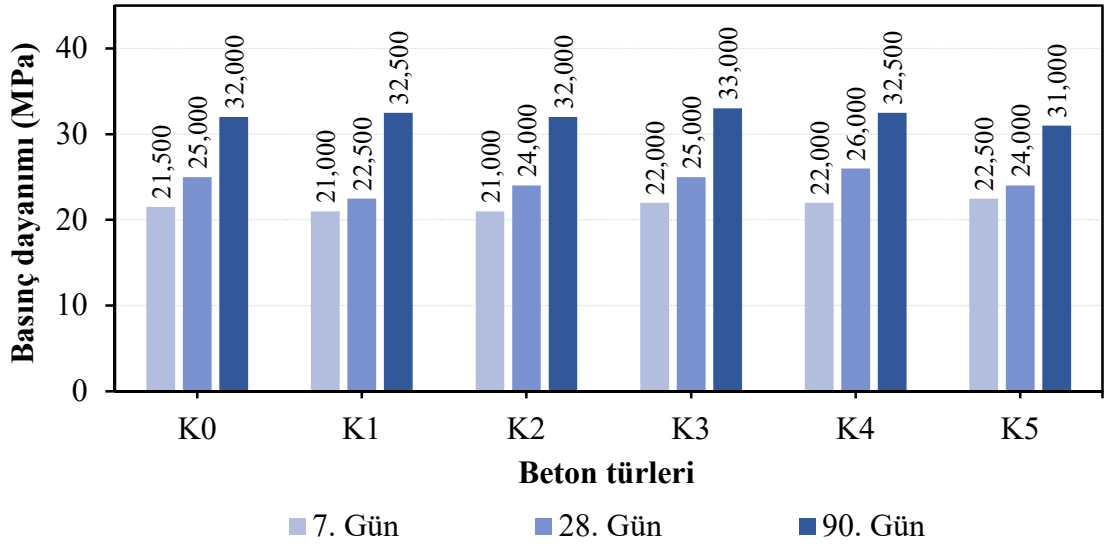


Şekil 23. Taze beton numunelerin hava içeriği sonuçları.

Taze betonlar üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre kolemanit mineralinin betonun işlenebilirliği ve hava içeriğinde önemli bir etkisinin olmadığı kanısı oluşturmaktadır.

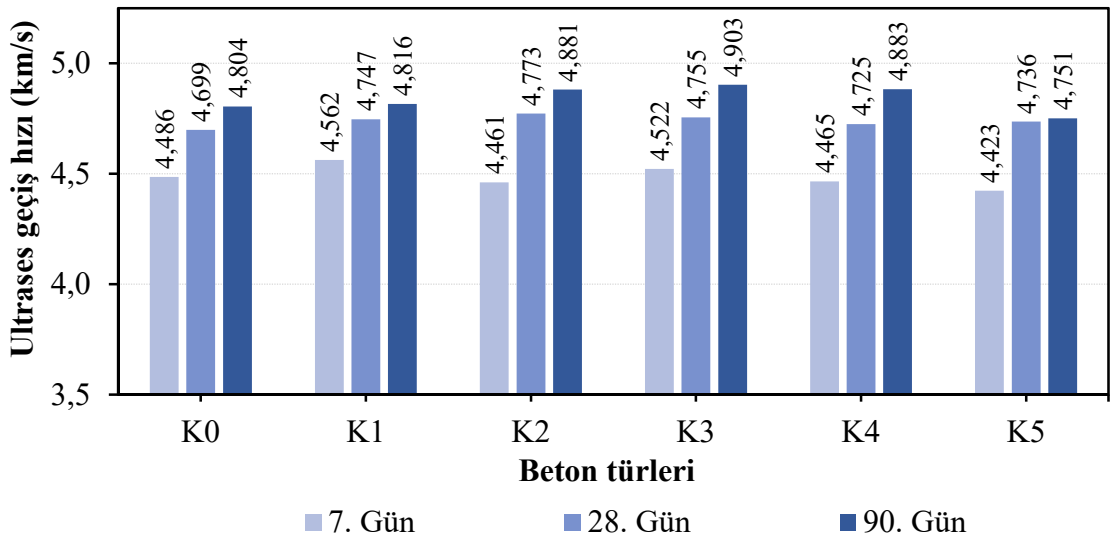
Schmidt çekici bir yüzey sertliği test cihazıdır ve yaklaşık basınç dayanımı tahmini için sık kullanılan yöntemlerdendir (Bungey vd., 2006; ; Malek ve Kaouther, 2014). Schmidt çekici ile elde edilmiş olan yaklaşık basınç dayanımları Şekil 24'te görülmektedir. Kolemanit ikameli betonlarda ölçülen 7. gün Schmidt çekici ölçümlerine göre kolemanit ikame oranının artmasıyla dayanımlarında arttığı belirlenmiştir. Ancak K1 ve K2 beton türlerinin dayanımlarının K0 (kolemanit minerali ikamesiz) beton türünden küçük olduğu görülmüştür. 28. gün Schmidt çekici sonuçları incelendiğinde ise K0 beton türüne göre dayanımı arttıran sadece K4 beton türü olmuştur. Diğer ikame oranlarında dayanım referans (K0) beton türünden düşük veya aynı sonuçlandığı görülmüştür. Kolemanit minerali ikamesinin farklı oranlarda üretilen betonlarda erken yaş dayanımları üzerinde etkisinin düzensiz olduğu görülmüştür.

90. gün sonuçlar incelendiğinde ise kolemanit mineralinin %5 olduğu K5 beton türü en düşük dayanım değerini vermiştir. Diğer kolemanit ikame oranlarında dayanım değerlerinin referans beton türünden yüksek olduğu Şekil 24'de görülmektedir. Schmidt çekici ile belirlenen en yüksek basınç dayanımı değerini ise K3 beton türü sağlamıştır. En yüksek dayanım K3 beton türü ile elde edilmiş ve K0 beton türünden %3.125 yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit ikamesinin %4'e kadar kullanılması ile Schmidt çekici değerlerinin arttığı görülmüştür.



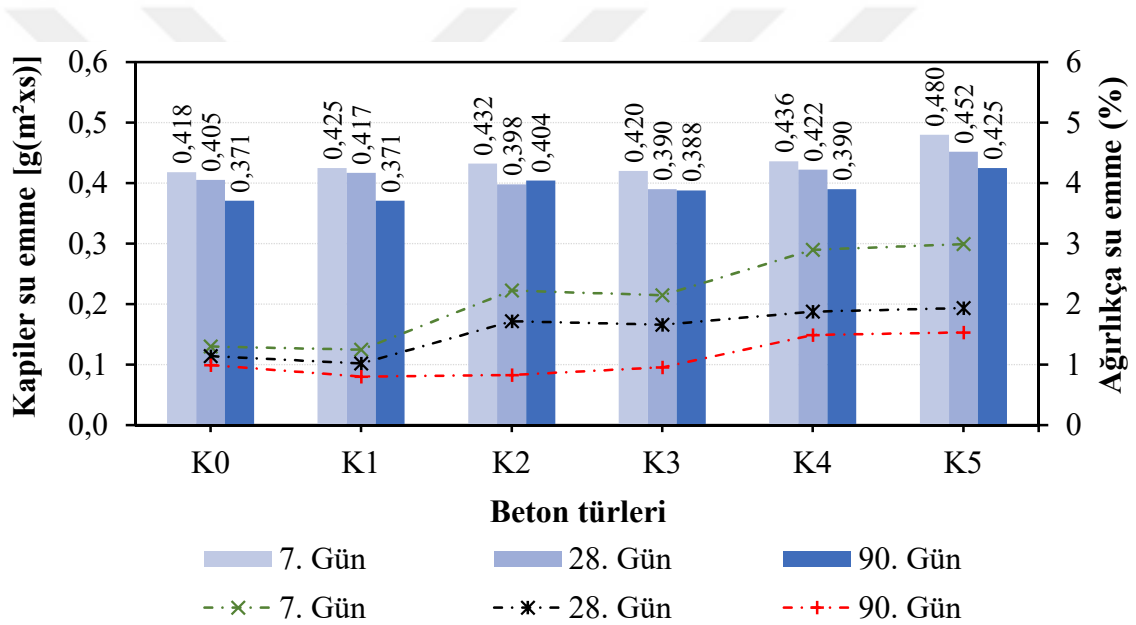
Şekil 24. Schmidt çekici ile elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.

Kolemanit minerali ikameli ve ikamesiz bütün beton türlerinde ultrases geçiş hızı değerleri betonun yaşı ile birlikte artmıştır. Beton numunelerin 7. gün ultrases geçiş hızları K1 ve K3 beton türlerinde 4,5 km/s üzerinde diğer beton türlerinde ise 3.5 ~ 4.5 km/s aralığında ölçülmüştür. Tablo 4'te verilen ultrases geçiş hızı ile beton kalite ilişkisine göre K1 ve K3 beton türlerinin kalitesi mükemmel, diğer beton türleri ise iyi olarak nitelendirilebilir. 28. ve 90. günlerde ise bütün beton türlerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri 4.5 km/s değerinin üzerinde sonuçlanmıştır. Ultrases geçiş hızı yöntemi ile beton türlerinde ölçülen ses geçiş hızı değerleri Şekil 25'de verilmiştir.



Şekil 25. Ultrases geçiş hızı deneyi ile 7, 28 ve 90 günlük ölçüm değerleri.

Beton numuneler üzerinde kapiler ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar Şekil 26’da görülmektedir. Beton numunelerin sertleşme süreleri arttıkça kapiler ve ağırlıkça su emme değerleri azalmıştır. Hidratasyon gelişimi ile zamanla kapiler boşlukların azalması ile beklenen bir sonuçtur. Kolemanit ikamesi ile elde edilen farklı kolemanit oranlarına sahip betonların kapiler ve ağırlıkça su emme değerleri artmıştır. Ancak 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri incelendiğinde K1 ve K2 beton türlerinde su emme değerleri diğer beton türlerinden daha düşük elde edilmiştir. Kolemanit mineralinin uzun sürede az da olsa boşluk kapatıcı bir özellik göstermesi ile açıklanabilir. K5 numunesinde suyun nüfuz etmesi bütün günlerde en yüksek değerleri vermiştir.

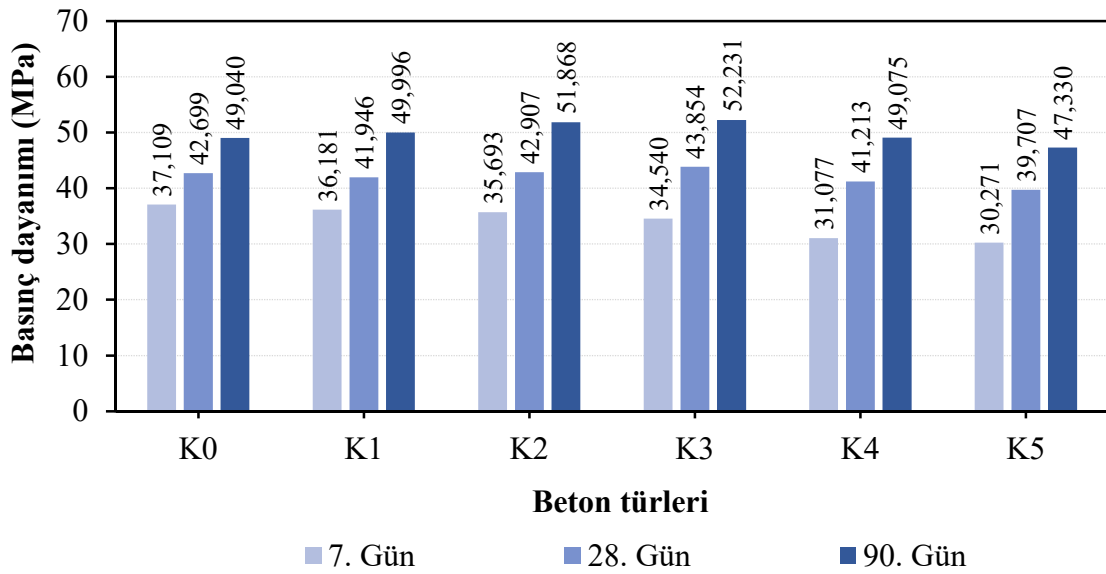


Şekil 26. Kapiler ve ağırlıkça su emme deneyleri ile 7, 28 ve 90 günlük sonuçlar.

Geleneksel olarak, betonun kalitesini belirlemek için kullanılan özellik basınç dayanımıdır (Lorenzi vd., 2007). Basınç dayanımının yüksek olması çoğu zaman betonun diğer dayanım özelliklerini de olumlu etkilemektedir. Beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 27’de verilmiştir. Şekil 27 incelendiğinde kolemanit ikamesi ile 7. gün bütün kolemanit minerali oranları betonların basınç dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir (Binici vd., 2010; Sevim, 2011; Aksoğan vd., 2016). Erken yaşta basınç dayanımında gözlemlenen düşüş beklenen bir sonuç olmuştur. Kolemanit mineralinin tüm oranlarda ikame olarak kullanılması, erken yaşlarda basınç dayanımı gelişimini yavaşladığı belirlenmiştir.

Puzolanik özellik gösteren malzemelerin güç kazanım hızı yavaştır. Kolemanitin puzolanik özelliği ile dayanım kazanımı beton yaşı arttıkça gelişmektedir (Kula vd., 2001; Targan vd., 2002; Olgun vd., 2007; Aksoğan vd., 2016). Kolemanit minerali ikamesi ile üretilen beton numunelerin 28 günlük sonuçları incelendiğinde dayanım gelişiminin arttığı görülmüştür. Kolemanit ikameli K3 beton türünün basınç dayanımı ikamesiz beton olan K0 betonundan %2.705 yüksek elde edilmiştir. Kolemanit ikameli diğer beton türlerinde ise referans beton türü ile olan dayanım farkının 28. günde azaldığı görülmüştür.

Kolemanit ikamesi ile elde edilen beton numunelerin 90. gün basınç dayanımları incelendiğinde ise en düşük K5, en yüksek K3 beton türünde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı K3 ile elde edilmiştir ancak K4 beton türü K3 beton türünden düşük K0 beton türünden ise yüksek sonuçlanmıştır. Ayrıca bütün beton türlerinde hedef dayanım değerinin (C30/37) sağlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 27. Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri.

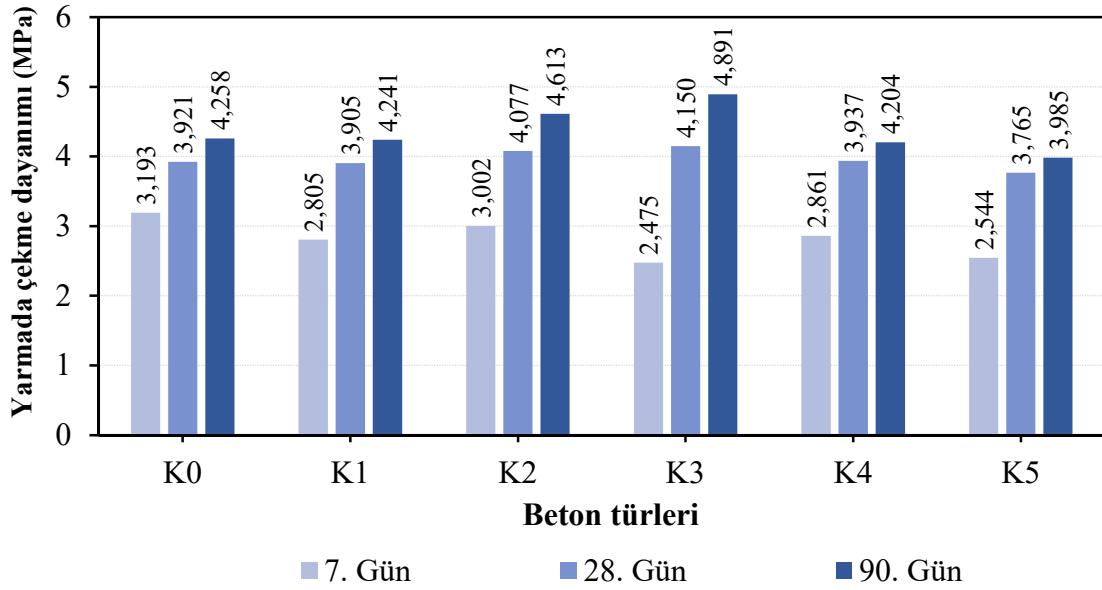
Beton başlangıçta hızlı, ilerleyen zamanlarda ise dayanım kazanımı yavaşlayarak devam eder (Akinpelu vd., 2019). Kolemanit minerali ise başlangıçta dayanım kazanımını yavaşlatmaktadır. Tablo 17’de beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ile kolemanit ikameli beton türlerin ikamesiz beton (Referans) türüne göre zamanla dayanım değişimleri yüzde olarak hesaplanmıştır.

Tablo 17. Beton türlerinin basınç dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri.

Beton Türleri	Basınç Dayanımı (MPa)			Referansa göre değişim (%)		
	7. gün	28. gün	90. gün	7. gün	28. gün	90. gün
K0 (Referans)	37,109	42,699	49,040	-	-	-
K1	36,181	41,946	49,996	- 2,501	- 1,764	+ 1,949
K2	35,693	42,907	51,868	- 3,816	+ 0,487	+5,767
K3	34,540	43,854	52,231	- 6,923	+ 2,705	+ 6,507
K4	31,077	41,213	49,075	- 16,255	- 3,480	+ 0,071
K5	30,271	39,707	47,330	- 18,427	- 7,007	- 3,487

Kolemanit ikameli beton türlerinin basınç dayanımları betonun ilerleyen yaşlarında kontrol örneğinden büyük ya da kontrol örneğine yakın olduğu belirlenmiştir. Kolemanit ikamesi ile en yüksek dayanım kazanımı 90 günlük numuneler içerisinde K3 beton türü ile elde edilmiştir. K0 beton türüne göre K3 beton türünün 28. ve 90. günlerde dayanım artışı sırasıyla %2.705 ve %6.507 olmuştur. Kolemanit ikamesi ile beton türleri erken yaşlarda (7. gün) dayanım kaybı oluşturmamasına rağmen beton türleri yaş aldıkça (28. ve 90. gün) dayanım kazanmıştır. K4 beton türü ise 7. ve 28. gün sonuçlarında K0 beton türünden düşük sonuç sağlamasına rağmen 90. gün dayanım kazanımı artarak K0 beton türünden yüksek sonuçlanmıştır. Kolemanitin ikame oranı %4'e kadar basınç dayanımını arttırırken %5 oranı ise dayanımını tüm yaşlarda düşürmüştür.

Betonun çekme dayanımının belirlenmesi direkt çekme veya yarmada çekme deneyleri ile belirlenebilmektedir. Uygulamada pratik ve basınç presine eklenen aparat ile yapılması sebebiyle yaygın olarak yarmada çekme deneyi tercih edilmektedir. Yarmada çekme deneyi silindir ve küp numuneler üzerinde gerçekleştirilebilir. Çalışmada yarmada çekme deneyi için $\varnothing 100 \times 200$ mm silindir boyutu tercih edilmiştir. Numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları belirlenmiş olup Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri.

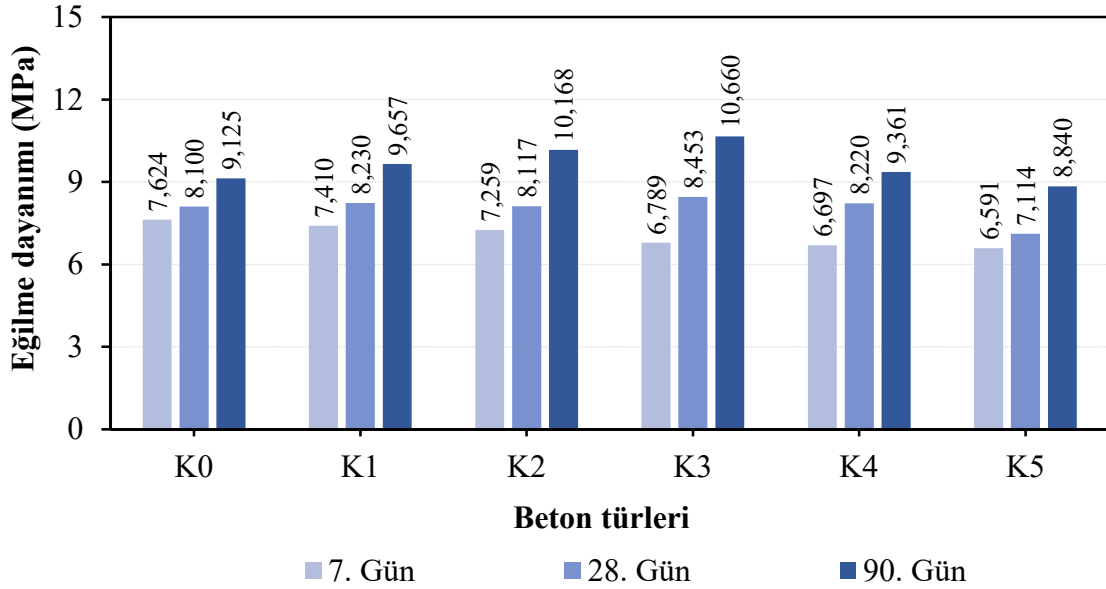
Kolemanit mineralinin ikame edilmesi ile bütün oranlarda 7 günlük yarmada çekme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanım değerleri ise beton yaşı ile birlikte artmıştır. 90 günlük sonuçlar içerisinde K3 beton türü yarmada çekme dayanımını %14.866 artarken, K5 beton türünde ise %6.411 azaltmıştır. Beton türlerinin yarmada çekme dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri Tablo 18’de görülmektedir.

Tablo 18. Beton türlerinin yarmada çekme dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri.

Beton Türleri	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)			Referansa göre değişim (%)		
	7. gün	28. gün	90. gün	7. gün	28. gün	90. gün
K0 (Referans)	3,193	3,921	4,258	-	-	-
K1	2,805	3,905	4,241	- 12,152	- 0,408	- 0,399
K2	3,002	4,077	4,613	- 5,982	+ 3,979	+ 8,337
K3	2,475	4,150	4,891	- 22,487	+ 5,840	+ 14,866
K4	2,861	3,937	4,204	- 10,398	+ 0,408	- 1,268
K5	2,544	3,765	3,985	- 20,326	- 3,979	- 6,411

Yol betonun sık sık eğilme yüklerine maruz kalmaktadır. Tekrarlanan eğilme yüklemesine maruz kalma, yapının sertliğinde ve iç mikro çatlakların yayılmasında sürekli bir azalma ile sonuçlanır, bu da sonunda yorulma yetmezliğine yol açabilir (Li

vd., 2007). Bu bağlamda eğilme dayanımı özellikle yol betonları için önemli bir parametre olmaktadır. Çalışmada elde edilen eğilme dayanımı değerleri Şekil 29’da görülmektedir.



Şekil 29. Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri.

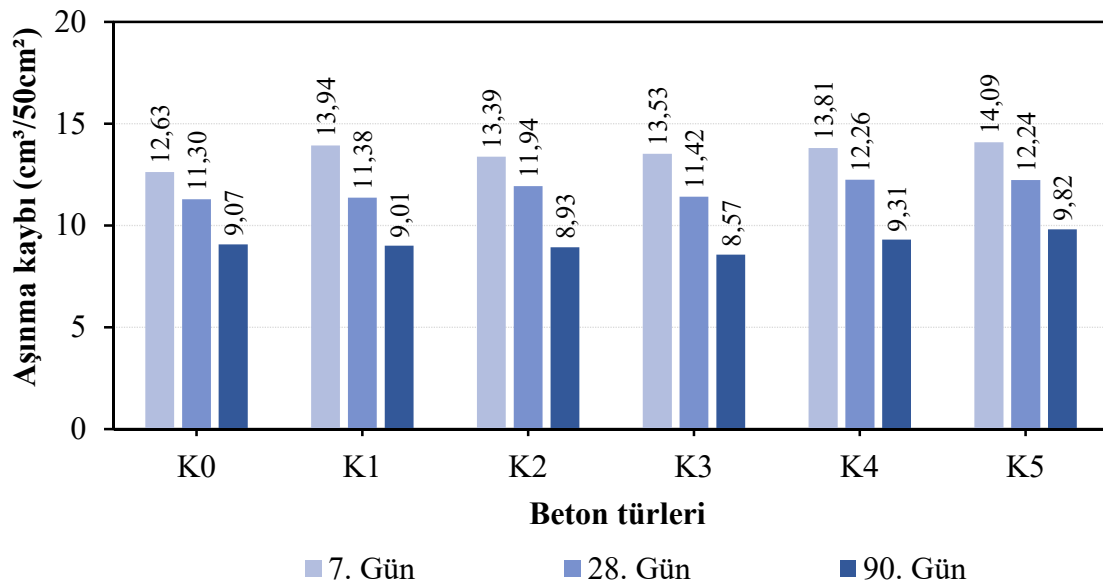
Şekil 29 incelendiğinde 7 günlük eğilme dayanımları kolemanit minerali ikamesi ile azalmıştır. Erken yaşlarda dayanım azalması basınç ve yarmada çekme dayanımı ölçümlerinde de benzerlik göstermiştir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde ise kolemanit minerali ikamesi ile dayanım kazanımları artmış ve referans beton türünden yüksek sonuçlar elde edilmiştir. 90 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde ise kolemanit minerali ikamesi ile dayanım kazanımlarının artış gösterdiği görülmektedir. Kolemanit mineralinin puzolanik özelliğinin olduğu kanısı oluşmaktadır. Kolemanit minerali ikamesi ile üretilen beton numunelerin referans beton türüne göre dayanım kazanımları Tablo 19’da hesaplanmıştır.

Tablo 19. Beton türlerinin eğilme dayanımları ve zamanla referansa göre değişimleri.

Beton Türleri	Eğilme Dayanımı (MPa)			Referansa göre değişim (%)		
	7. gün	28. gün	90. gün	7. gün	28. gün	90. gün
K0 (Referans)	7,624	8,100	9,125	-	-	-
K1	7,410	8,230	9,657	- 2,807	+ 1,605	+ 5,830
K2	7,259	8,117	10,168	- 4,788	+ 0,210	+ 11,430
K3	6,789	8,453	10,660	- 10,952	+ 4,358	+ 16,822
K4	6,697	8,220	9,361	- 12,159	+ 1,481	+ 2,586
K5	6,591	7,114	8,840	- 13,549	- 12,173	- 3,123

Basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının 90 günlük sonuçları incelendiğinde K3 beton türünün K0 beton türünden yüksek dayanım sağladığı görülmüştür. Ayrıca K3 beton türünün K0 beton türünden basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sırasıyla %6.507, %14.866, %16.822 fazla olduğu görülmüştür. Kolemanit ikamesi ile çekme dayanımı (yarmada çekme ve eğilme) basınç dayanımından daha fazla artış göstermiştir.

Aşınma olayı fiziksel bir özelliktir ve betonun bileşenleri ile ilişkisi yüksektir. Kolemanit minerali ile üretilen betonların yüzey aşınma sonuçları Şekil 30'da görülmektedir.

**Şekil 30.** Beton türlerinin 7, 28 ve 90 günlük aşınma kaybı değerleri.

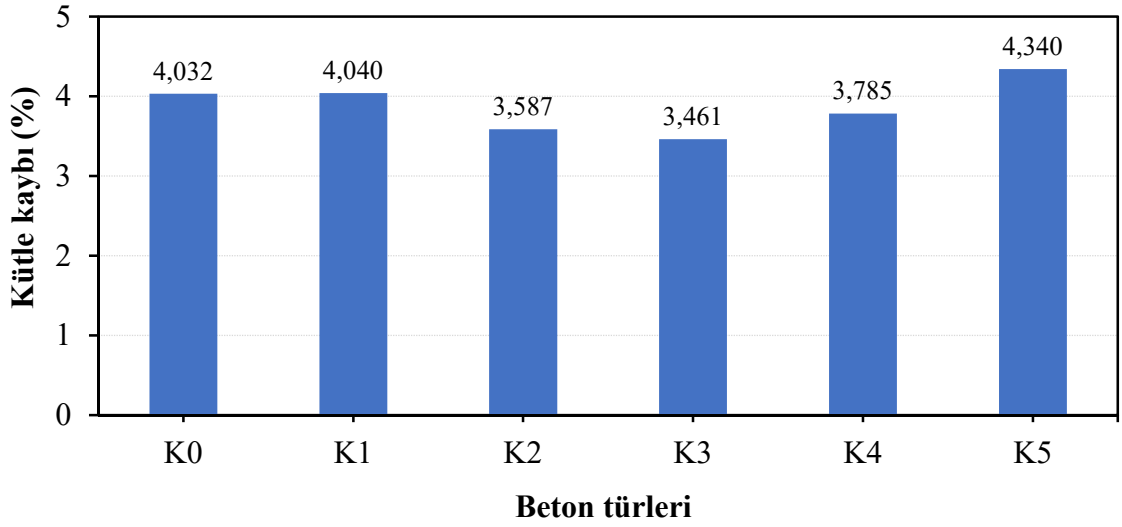
Kolemanit mineralinin betonda kullanılmasıyla başlangıçta aşınma kaybını arttırmış ancak betonun yaşı arttıkça aşınma kaybın azalmıştır. En az aşınma kaybı K3 beton türü ile elde edilmiştir. K3 beton türünde aşınma kaybının düşük çıkması beklenen bir sonuçtur. Basınç dayanımı ile aşınma direnci arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Mukavemeti yüksek betonların aşınma kaybı düşük direnci ise yüksek olmaktadır. 7, 28 ve 90 günlük aşınma kayıpları ve zamanla aşınma miktarının değişimleri Tablo 20’de görülmektedir.

Tablo 20. Beton türlerinin aşınma kayıpları ve zamanla referansa göre değişimleri.

Beton Türleri	Aşınma Kaybı (cm ³ /50cm ²)			Referansa göre değişim (%)		
	7. gün	28. gün	90. gün	7. gün	28. gün	90. gün
K0 (Referans)	12,63	10,38	9,07	-	-	-
K1	13,94	11,30	9,01	+ 10,372	+ 0,708	- 0,662
K2	13,39	11,94	8,93	+ 6,017	+ 5,664	- 1,544
K3	13,53	11,42	7,57	+ 7,126	+ 1,062	- 5,513
K4	13,81	12,26	9,31	+ 9,343	+ 8,496	+ 2,646
K5	14,09	12,24	10,02	+ 11,560	+ 8,319	+ 8,269

Karayolları geniş kullanım ağı itibari ile trafik yükleri dışında farklı çevresel koşullara sık sık maruz kalmaktadır. Dolayısı ile tasarım aşamasında yolun maruz kalması muhtemel çevre koşullarına uygun olması göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmada kolemanit minerali ikameli üretilen beton numuneler ve ikamesiz beton numune fiziksel ve kimyasal ortamlara maruz bırakılmıştır. Üretimi yapılan betonların çevresel koşullar ile dayanım özelliklerinin değişimi araştırılmıştır.

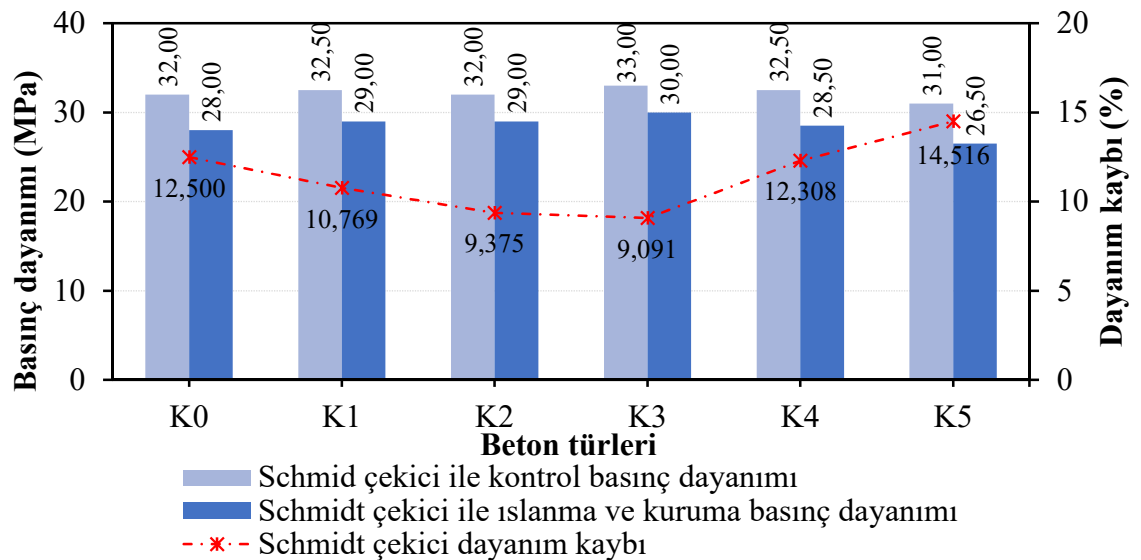
Beton numuneler 28 gün kür edildikten sonra değişmez ağırlığa gelinceye kadar 100 ± 5 °C etüvde kurutulmuş ve ortam sıcaklığında kütleleri belirlenmiştir. Daha sonra 90. güne kadar ıslanma ve kuruma çevrimi uygulanmıştır. 90 günlük numuneler tekrar değişmez ağırlığa gelinceye kadar 100 ± 5 °C bekletilen numunelerin kütleleri ortam sıcaklığına geldiğinde tartılmıştır. Islanma ve kuruma çevrimine maruz bırakılan beton numunelerin hesaplanan kütle kayıpları Şekil 31’de verilmiştir.



Şekil 31. Islanma ve kuruma etkisi sonucunda beton numunelerin kütle kayıpları.

Kolemanit mineralinin %4 ve %5 ikame edilmesi ile kütle kayıpları artmıştır. Diğer ikame oranlarında ise kütle kaybında azalma meydana gelmiştir. K0 beton türünde kütle kaybı %4.032 hesaplanmış ve en az kütle kaybı ise K3 beton türünde %3.461 olarak belirlenmiştir.

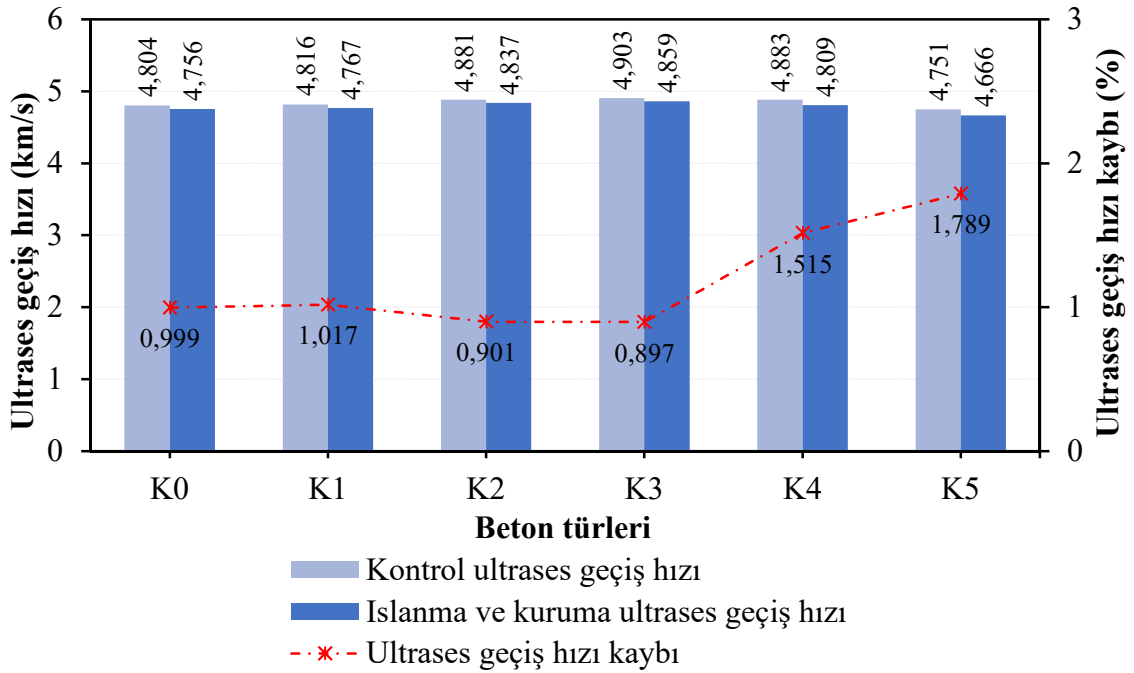
Betonların ıslanma ve kuruma çevrimine maruz bırakılmasından sonra ölçülen Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 32’de görülmektedir. Islanma ve kuruma çevrimine maruz kalan K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 beton türlerinin Schmidt çekici ile belirlenen basınç dayanımlarından en düşük 26.50 MPa ile K5, en yüksek ise 30.00 MPa ile K3 beton numunesinde ölçülmüştür.



Şekil 32. Islanma ve kuruma sonrası Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.

Schmidt çekici ile belirlenen ıslanma ve kuruma dayanım değerlerinin kontrol beton türlerinden düşük olduğu Şekil 32’de görülmektedir. Schmidt çekici ölçümleri neticesinde hesaplanan dayanım kayıpları ise sırasıyla %12.500, %10.769, %9.375, %9.091, %12.308 ve %14.516 olarak hesaplanmıştır. En düşük dayanım kaybı K3, en yüksek ise K5 beton numunesine ait olduğu görülmüştür.

Islanma ve kuruma ile kontrol beton türlerinin tespit edilen ultrases geçiş hızları Şekil 33’de verilmiştir. Islanma ve kuruma sonrası elde edilen ultrases geçiş hızları 4.666 km/s ile 4.859 km/s aralığındadır. En yüksek ses hızı değeri K3 beton numunesi ile elde edilmiştir. Islanma ve kuruma etkisine maruz beton numunelerde ultrases geçiş hız değerlerinin kontrol beton numunelerinden düşük olduğu tespit edilmiştir.

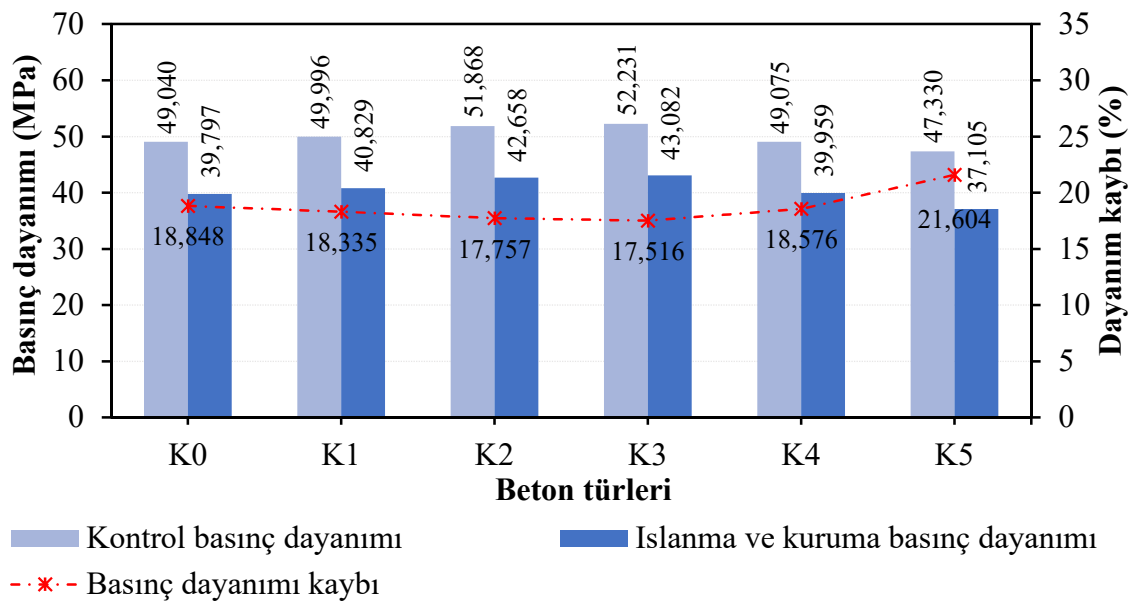


Şekil 33. Islanma ve kuruma sonrası ultrases geçiş hızı değerleri.

Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarında hesaplanan kayıplar ise %0.897 ile %1.789 aralığında hesaplanmıştır. Beton numuneler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı ölçümleri sonucunda belirgin bir fark tespit edilmemiştir. Islanma ve kuruma etkisi betonun dış yüzeyinde belirgin hasara sebep olmuş, boşluk yapısında ise bu çalışma sürecinde etkisinin az olduğu görülmüştür. Ancak yüzeyde meydana gelen hasar ıslanma kuruma süresinin artmasıyla zamanla boşluk yapısını ve geçirimliliğini de etkileyecektir. Beton

yüzeyinde meydana gelen olası hasar zamanla betonu diğer çevresel etkilere korunaksız durumda bırakacaktır.

Islanma ve kuruma etkisi sonunda betonların basınç dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Şekil 34’de görülmektedir. Islanma kuruma etkisine maruz beton numuneler içerisinde en düşük basınç dayanımı K5, en yüksek ise K3 beton numunesinde ölçülmüştür. Tespit edilen basınç dayanımları sırasıyla 39.797, 40.829, 42.658, 43.082, 39.959 ve 37.105 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 34. Islanma ve kuruma çevrimi sonrası beton türlerinin basınç dayanımları.

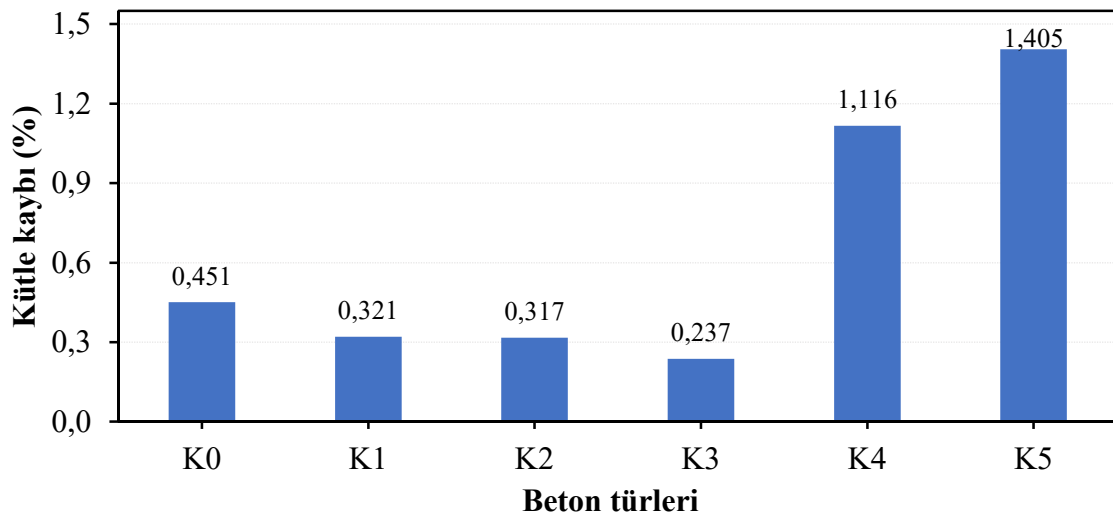
Islanma ve kuruma sonrası beton numunelerin Schmidt çekici, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları belirlenmiş olup, elde edilen deney sonuçları ıslanma ve kurumaya maruz bırakılmayan kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Islanma ve kurumaya maruz betonların kontrol beton türlerine göre hesaplanan yüzde kayıpları Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Islanma ve kuruma çevrimi sonrasında yapılan deneylerde elde edilen yüzde kayıplar.

Beton türleri	Kütle	Schmidt	Ultrases	Basınç
K0	4,032	12,500	0,999	18,848
K1	4,040	10,769	1,017	18,335
K2	3,587	9,375	0,901	17,757
K3	3,461	9,091	0,897	17,516
K4	3,785	12,308	1,515	18,576
K5	4,340	14,516	1,789	21,604

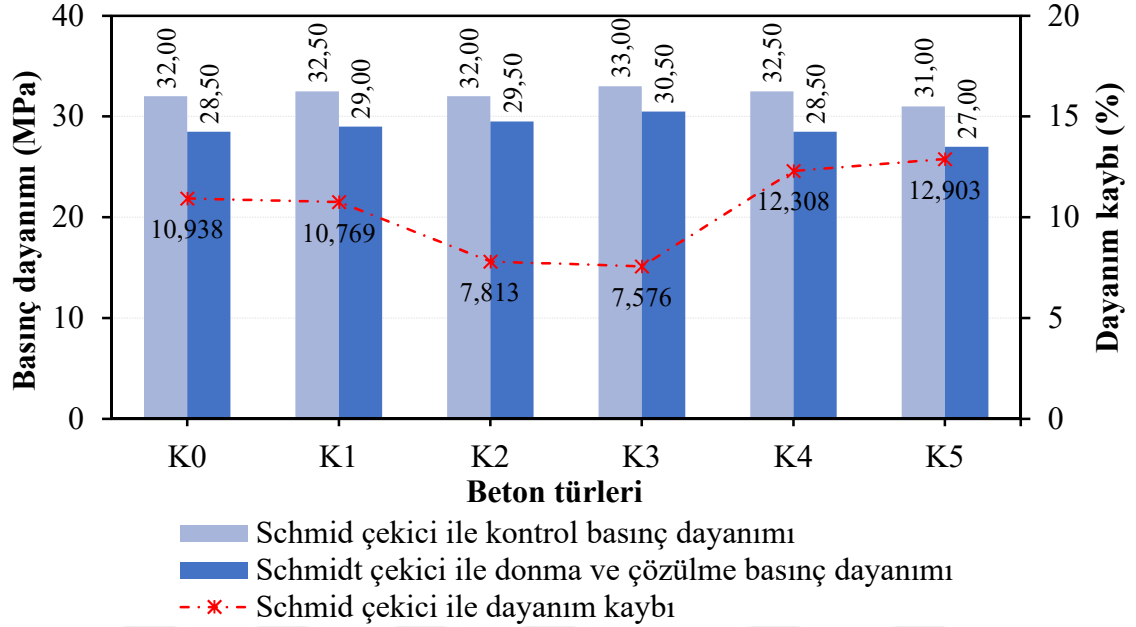
Islanma ve kuruma sonrasında K0, K1, K2, K3, K4 ve K5 beton numunelerinde hesaplanan basınç dayanımı kayıpları %18.848, %18.335, %17.757, %17.516, %18.756 ve %21.604'tür. Hesaplanan kayıp yüzdeler incelendiğinde Schmidt çekici ve basınç dayanımları kayıpları, ultrases geçiş hızı kayıplarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Tahribatsız yöntemlerden olan Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı deneylerinden elde edilen yüzdelik kayıplar incelendiğinde en yakın sonuçlar Schmidt çekici ile sağlanmıştır.

Beton numuneler donma ve çözülme sonrasında tartılmış ve kontrol numuneye ile karşılaştırma yapılarak kütle kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplanan kütle kayıpları Şekil 35'de verilmiştir. En yüksek kütle kaybı K5 beton numunesinde elde edilmiştir. En düşük kütle kaybı ise K3 betonunda olduğu hesaplanmıştır. K3 betonunda kolemanit ikamesiz K0 beton türünden daha az kütle kaybı olduğu hesaplanmıştır.



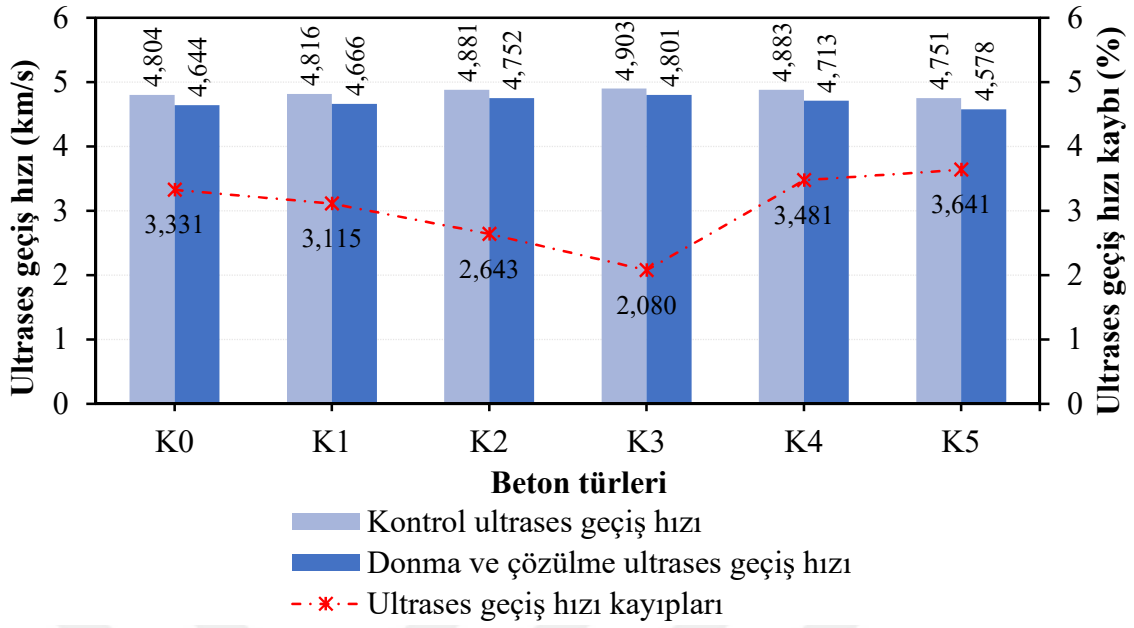
Şekil 35. Donma ve çözülme etkisi sonucunda beton numunelerin kütle kayıpları.

Donma ve çözülme sonrası elde edilen Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımı sonuçları Şekil 36’da görülmektedir. Donma ve çözülme sonrasında kolemanit ikamesi ile elde edilen K5 beton türü en düşük dayanım sonucunu vermiştir. Diğer ikame oranlarında dayanımı K0 beton türünden yüksek elde edilmiştir.



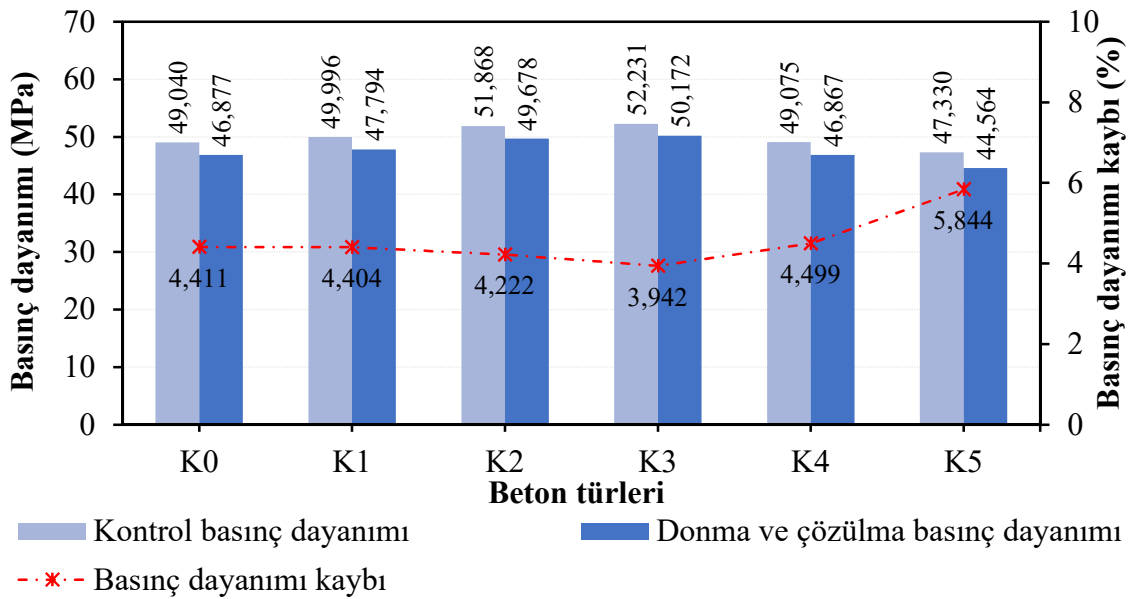
Şekil 36. Donma ve çözülme sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen dayanım değerleri.

Donma ve çözülme çevrimine maruz kalmış beton türlerinin ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüştür. Ölçümü yapılan ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 37’de verilmiştir. Tespit edilen ultrases geçiş hız değerleri 4.60 km/s ile 4.82 km/s aralığında ölçülmüştür. Ultrases geçiş hızı ile beton kalite ilişki tablosuna göre bütün betonlar mükemmel olarak niteliğindedir.



Şekil 37. Donma ve çözülme sonrası beton türlerinin ultrases geçiş hızı değerleri.

Donma ve çözülme çevrimine maruz bırakılmış beton türlerin de ölçülen basınç dayanımı sonuçları Şekil 38’de görülmektedir. Referans (K0) beton türü ile kıyaslama yapıldığında K1, K2 ve K3 beton türlerinde dayanım değerleri K0 beton türünden yüksek elde edilmiştir. K4 ve K5 beton türlerinde ise dayanım değerleri K0 beton türünden düşük sonuçlanmıştır.



Şekil 38. Donma ve çözülme sonrası beton türlerinin basınç dayanımı değerleri.

Donma ve çözülme sonrası beton numunelerin Schmidt çekici, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları belirlenmiş olup, elde edilen deney sonuçları donma ve çözölmeye maruz bırakılmayan kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Donma ve çözölmeye maruz kalmış ve kontrol numunelerin deney sonuçları Tablo 22’de verilmiştir.

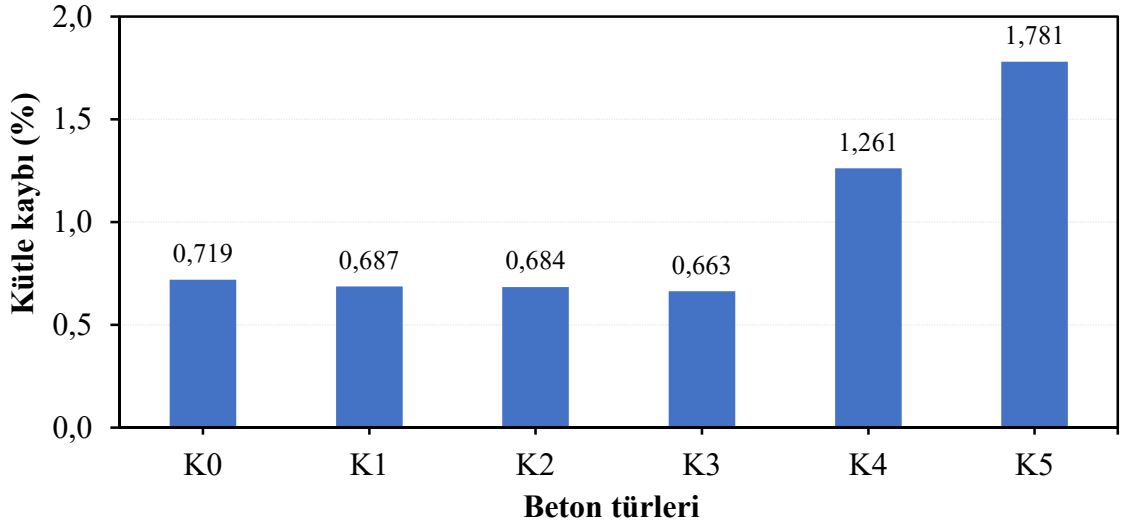
Tablo 22. Donma ve çözölme çevrimine maruz kalmış beton türlerinde hesaplanan yüzdelik kayıplar.

Beton türleri	Kütle	Schmidt	Ultrases	Basınç
K0	0,451	10,938	3,331	4,411
K1	0,321	10,769	3,115	4,404
K2	0,317	7,813	2,643	4,222
K3	0,237	7,576	2,080	3,942
K4	1,116	12,308	3,481	4,499
K5	1,405	12,903	3,641	5,844

Tablo 22’de verilem donma ve çözölme çevrimine maruz kalmış beton türlerinde elde edilen dayanım ve ultrases geçiş hızı kayıpları hesaplanmıştır. Schmidt çekici ile elde edilen ölçümler sonucunda sırasıyla %10.938, %10.769, %6.250, %4.545, %12.308 ve %12.903 bulunmuştur. Donma ve çözölme sonrasında ultrases geçiş hız ölçümlerinde ise kayıplar %3.331, %3.115, %3.053, %2.080, %3.481 ve %3.641 olarak tespit edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı sonucunda ise %4.411, %4.404, %4.222, %3.942, %4.499 ve %5.844 kayıplar olduğu görölmüştür.

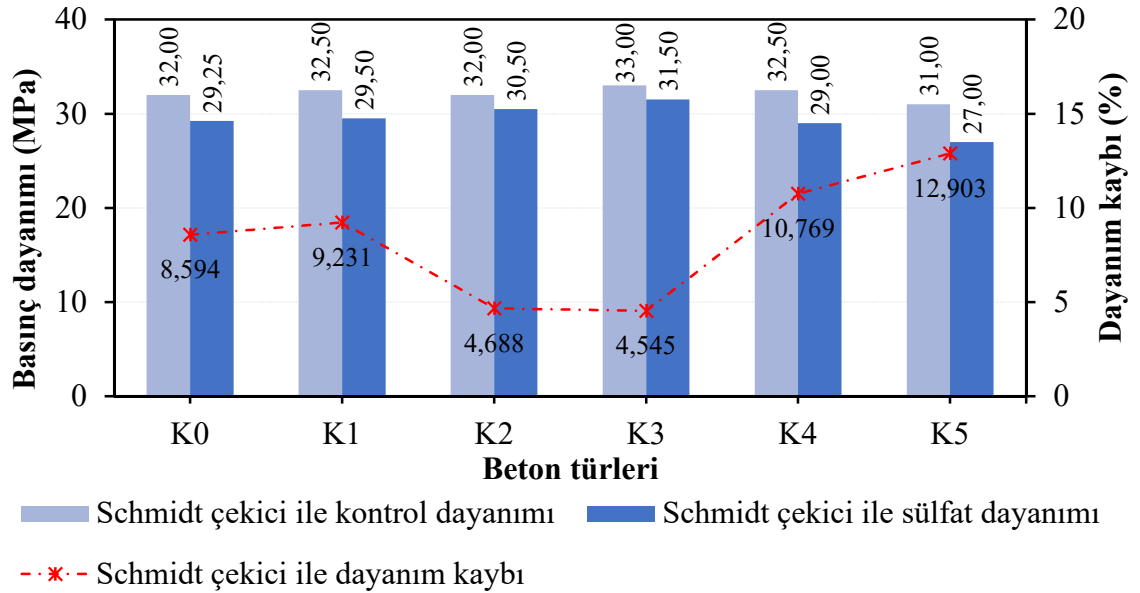
Kolemanit ikamesi ile elde edilen beton türlerinin kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını belirlemek için $MgSO_4$ ve $NaCl$ kimyasalları kullanılmıştır. Beton türleri 28 gün kürden sonra 90. güne kadar kimyasal çözeltilerde bekletilmiştir.

Sülfat çözeltine maruz beton numunelerin kütle kayıpları Şekil 39’da verilmiştir. Kolemanit mineralinin %1, %2 ve %3 ikame edilmesi ile kütle kayıpları azalmıştır. En yüksek kütle kayıpları K4 ve K5 beton türlerinde görölmüştür. K3 beton türü ile ise en düşük kütle kaybı elde edilmiştir.



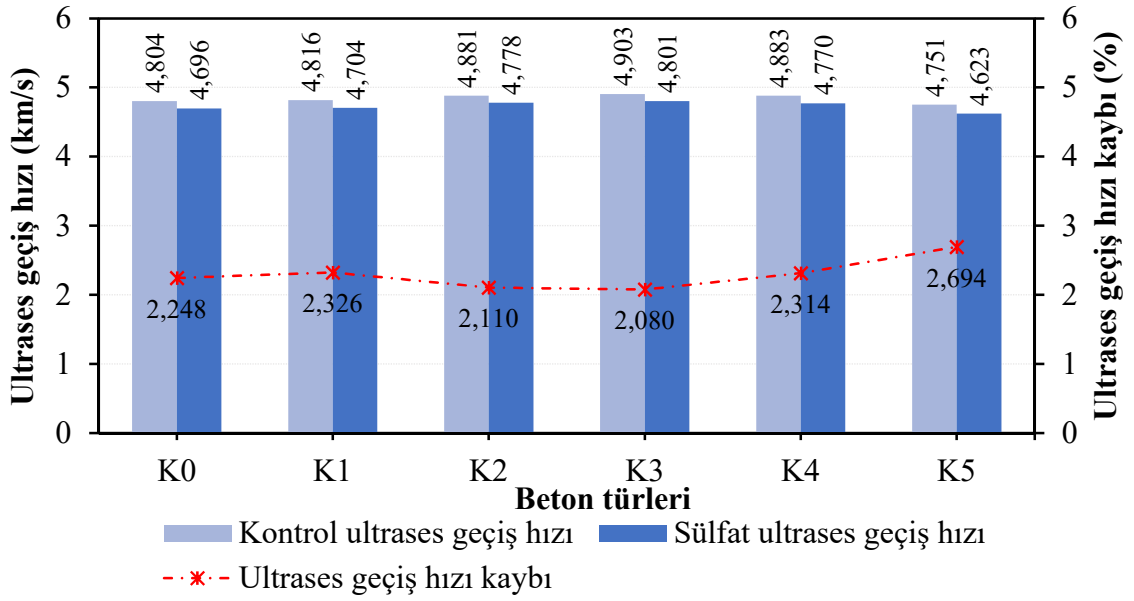
Şekil 39. Sülfat sonrası beton türlerinin kütle kayıpları.

Beton numunelerin Schmidt çekici ile elde edilen sülfat sonrası dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanım değeri K3 beton türünde ölçülmüştür. K4 ve K5 beton türlerinde dayanım değerleri referans beton (K0) türünden daha düşük sonuçlanmıştır. Sülfatlı ortamda bekletilmiş beton numunelerin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları Şekil 40’da görülmektedir.



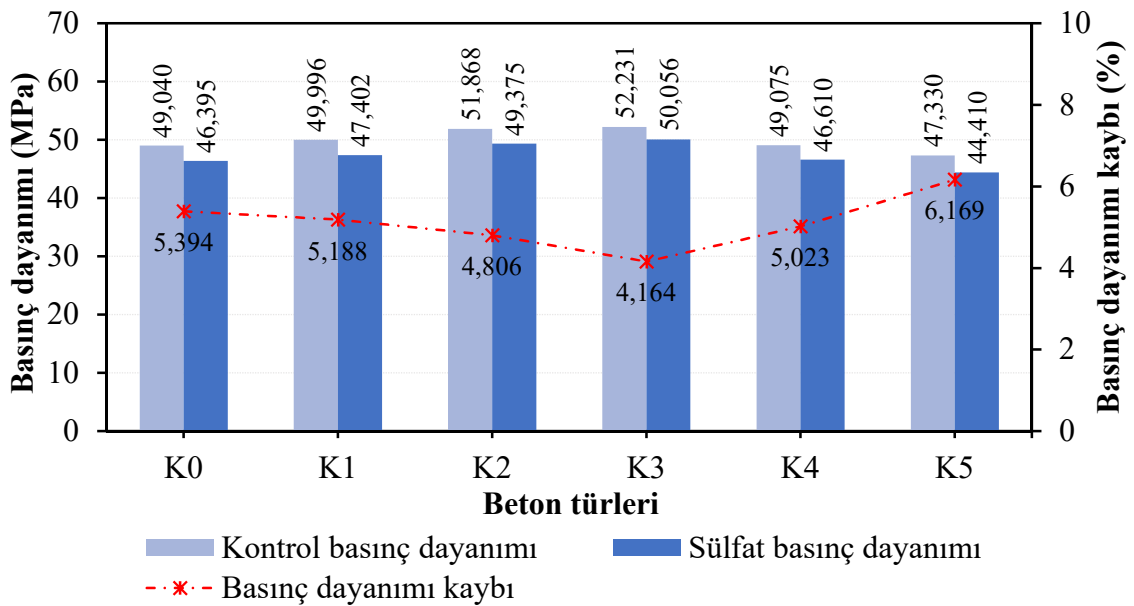
Şekil 40. Sülfat sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.

Beton numuneler üzerinde sülfat sonrası elde edilen ultrases geçiş hızları Şekil 41’de verilmiştir. Ölçülen ultrases geçiş hızları incelendiğinde bütün ölçümler 4.5 km/s üzerinde bulunmuştur. K5 beton türü en düşük ultrases geçiş hızı değerini sağlamıştır. Kolemanit ikamesi K5 beton türü dışında ultrases geçiş hızı değerini arttırmıştır.



Şekil 41. Sülfat sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.

Tahribatsız Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinden sonra tek eksenli basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Şekil 42’de verilmiştir. K3 beton türü en yüksek, K5 beton türü ise en düşük basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır. %4’e kadar kolemanit mineralinin çimentoya ikame edilmesi ile basınç dayanımı artmıştır. %5 kolemanit ikamesi ise basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür.



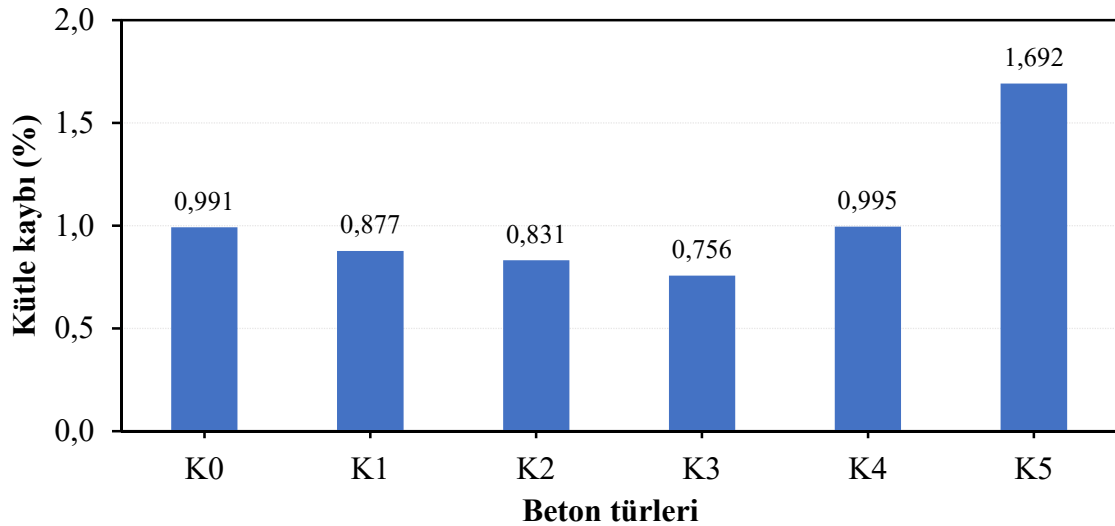
Şekil 42. Sülfat sonrası beton türlerinin basınç dayanımları.

Sülfat etkisi sonucunda kontrol beton türlerine göre hesaplanan kütle ve dayanım kayıpları Tablo 23’de verilmiştir.

Tablo 23. $MgSO_4$ çevrimine maruz kalmış beton türlerinde hesaplanan yüzdelik kayıplar.

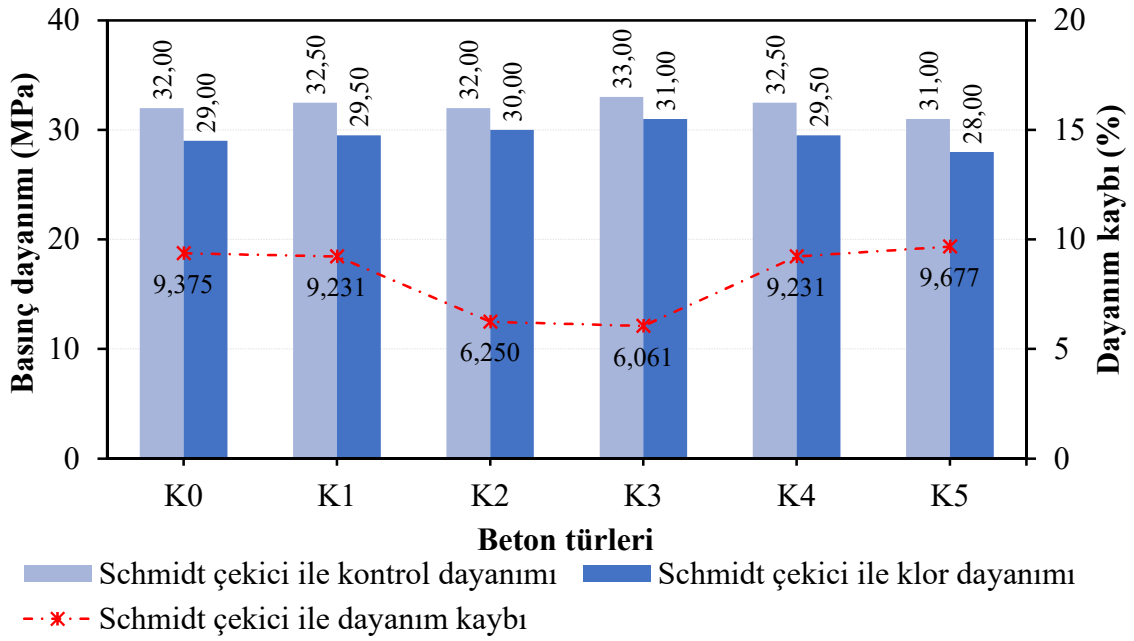
Beton türleri	Kütle	Schmidt	Ultrases	Basınç
K0	0,719	8,594	2,248	5,394
K1	0,687	9,231	2,326	5,188
K2	0,684	4,688	2,110	4,806
K3	0,663	4,545	2,080	4,164
K4	1,261	10,769	2,314	5,023
K5	1,781	12,903	2,694	6,169

Beton numunelerin kütle kayıpları, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları %5 NaCl çözeltisinde bekletilen numuneler üzerinde araştırılmıştır. %5 NaCl çözeltisinde bekletilen beton numunelerden 90 günlük ölçümler yapılmıştır. Şekil 43’de klorür çözeltisinde bekletilen harç numunelerin kütle kayıpları verilmiştir. En düşük kütle kaybı K3 beton türünde görülmüştür. K5 beton türü kütle kaybını arttırmıştır.



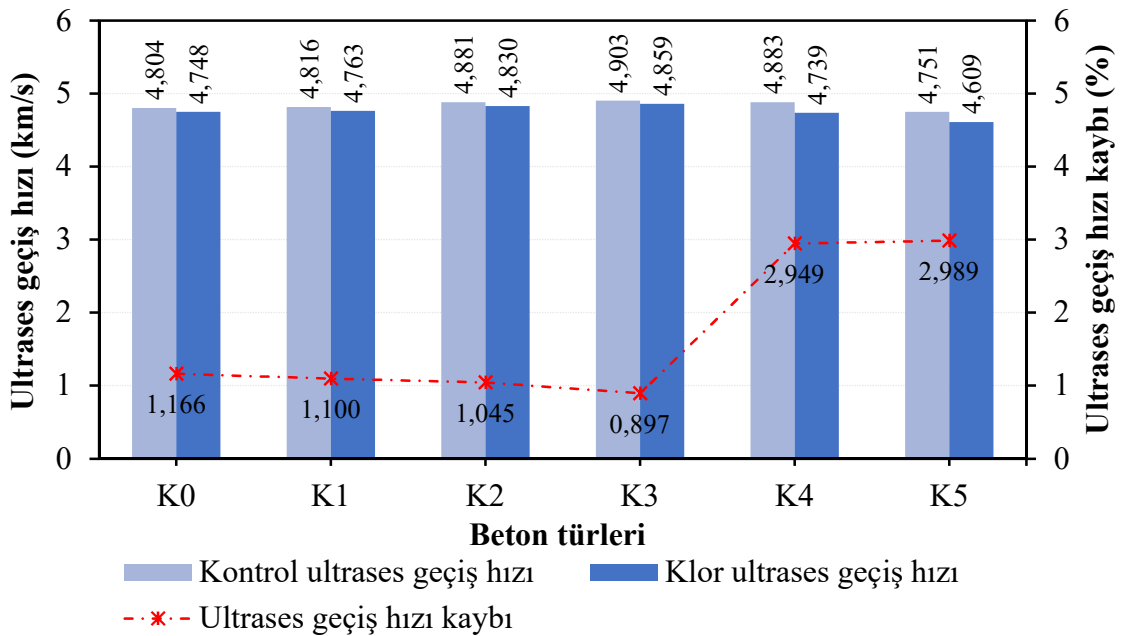
Şekil 43. Klor sonrası beton türlerinin kütle kayıpları.

%5 NaCl ortamında bekletilen beton türlerinde elde edilen Schmidt çekici sonuçları basınç dayanımına dönüştürülmüştür. Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları Şekil 44’de görülmektedir. K1, K2, K3 ve K4 beton türlerinde dayanım artmış, K5 beton türünde ise dayanım azalmıştır.



Şekil 44. Klor sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.

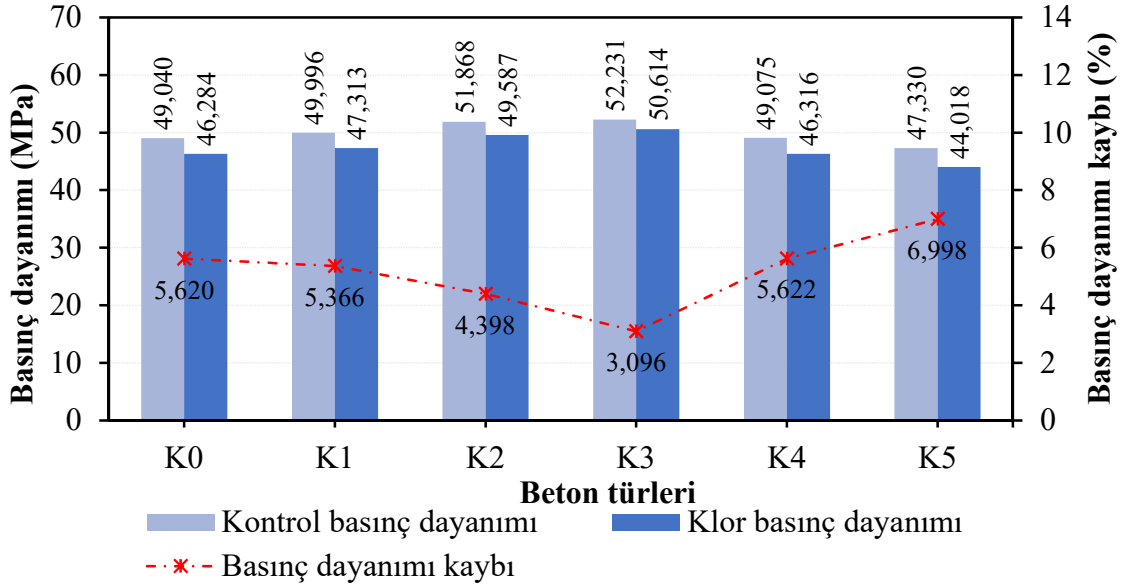
NaCl ortamında bekletilen beton numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümleri Şekil 45'te verilmiştir. Ultrases geçiş hız ölçümleri incelendiğinde 4.859 km/s ile K3 beton türü en yüksek, 4.609 km/s ile K5 beton türü ise en düşük ultrases geçiş hızı değerini vermiştir.



Şekil 45. Klor sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri.

Beton numuneler 28 gün standart kür edilmiş ve sonrasında 90. güne kadar %5 NaCl ortamında bekletilmiştir. Tahribatsız ölçümler sonrasında basınç dayanımı deneyi

beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümü yapılan basınç dayanımı sonuçları Şekil 46’da görülmektedir. Kolemanit minerali ikamesi ile klorür ortamında bekletilen beton türlerinde en düşük basınç dayanımı 44.018 MPa ile K5 beton türünde ölçülmüştür. %4’e kadar çimentoya kolemanit ikame edilmesi ise klor ortamında bekletilen beton numunelerde K0 beton türünden yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 46. Klor sonrası beton türlerinin Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları.

Klor etkisi sonucunda kontrol beton türlerine göre hesaplanan kütle ve dayanım kayıpları Tablo 24’te verilmiştir.

Tablo 24. NaCl çevrimine maruz kalmış beton türlerinde hesaplanan yüzdelik kayıplar.

Beton türleri	Kütle	Schmidt	Ultrases	Basınç
K0	0,991	9,375	1,166	5,620
K1	0,877	9,231	1,100	5,366
K2	0,831	6,250	1,045	4,398
K3	0,756	6,061	0,897	3,096
K4	0,995	9,231	2,949	5,622
K5	1,692	9,677	2,989	6,998

Fiziksel ve kimyasal ortamlara maruz bırakılan beton türlerinde yapılan deneyler sonucunda K4 beton türü bazı ölçümlerde K0 beton türüne kıyasla düşük sonuçlanırken

bazı ölçümlerde ise yüksek sonuçlanmıştır. Ancak deneyler sonucunda hesaplanan yüzde kayıplar incelendiğinde K4 beton türünde hesaplanan kayıpların daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Kolemanit mineralinin beton yollarda çimento yerine kullanılabilirliğinin durabilite özellikleri açısından incelendiği bu çalışmada, referans karışıma ilave olarak %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında kolemanit ikamesi yapılarak üretilen beton türlerinden elde edilen deneysel sonuçlar taze ve sertleşmiş beton özellikleri olarak aşağıda sunulmuştur.

Referans ve beş farklı oranda kolemanit ikamesinin taze betonun birim ağırlık, işlenebilirlik ve hava içeriği özellikleri üzerinde önemli ölçüde bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ancak elde edilen bulgular kolemanit mineralinin ikame oranının artmasıyla betonun taze hal özelliklerinin daha fazla etkileneceğini göstermektedir.

Kolemanit mineralinin betonda kullanımı ile erken yaşlarda dayanım düşmekte ve ileriki yaşlarda ise dayanım artmaktadır. Kolemanitin kullanılması ile üretilen betonlarda yaklaşık basınç dayanımı belirlemede Schmidt çekici testinin özellikle erken yaşlarda sağlıklı ve gerçeği yansıtmayan veri üretimine sebep olacağı görülmektedir. Qasravi (2000) Schmidt çekici sonuçlarının betonun yüzey sertliğine bağlı olduğunu ve betonun yüzeyinden 30-50 mm kalınlığındaki dış beton katmanını temsil ettiğini belirtmektedir (Qasravi 2000). Schmidt çekici ile elde edilen basınç dayanımları incelendiğinde 7 ve 28. günlerde kolemanit ikamesi ile birlikte beton numunelerine ait yüzey sertliğinin referans beton türü ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. 90 günlük deney sonuçlarında ise kolemanit ikamesinin %3 olduğu K3 beton türü en yüksek Schmidt çekici değerini sağlamıştır. %3 kolemanit ikamesi beton numunelerinin yüzey sertliğini kolemanit ikamesiz betona göre %3.125 yükselttiği tespit edilmiştir. Kolemanit minarelinin çimentoya ikame edilmesi, beton numunelerin yüzeylerinin sertleştirdiği söylenebilir.

Ultrases geçiş hızı ölçümlerinde 28 ve 90 günlerde bütün beton türlerinin ultrases geçiş hızı 4.5 km/s üzerinde ölçülmüştür. 90. gün ultrases geçiş hızları incelendiğinde;

- Referans betonun ultrases geçiş hızının 4.804 km/s olduğu,
- Kolemanit ikame oranı %1'den %3'e arttıkça ultrases geçiş hızının arttığı,
- En yüksek ultrases geçiş hızı değerinin 4.903 km/s ile K3 beton türüne ait olduğu,

- %5 kolemanit ikamesinin referans beton türüne kıyasla ultrases geçiş hızını azalttığı elde edilen veriler arasındadır.

Ultrases geçiş hızı ile betonun boşluk yapısı arasında bir ilişkinin olduğu düşünüldüğünde elde edilen ultrases geçiş hızı sonuçları ile kolemanit ikamesinin bir miktar boşluk azaltıcı etkisinin olduğu söylenebilir.

Beton türlerinde kapiler su emme ve toplam su emme deney sonuçları incelendiğinde beton yaşı arttıkça su emme miktarlarının tüm beton türlerinde azaldığı görülmüştür. Ayrıca erken yaşta kolemanit ikamesi arttıkça betonların ağırlıkça su emme oranlarının referansa kıyasla arttığı, 90. günde ise %3'e kadar referans beton türüne yakın sonuçlar verdiği elde edilen sonuçlar arasındadır. En yüksek su emme değerleri ise K4 ve K5 beton türlerinde elde edilmiştir.

Suyun çimento esaslı bir malzemeye girmesi dayanıklılığını azaltabilir. Dolayısıyla, betonun içerisine suyun taşınımını öngörmek, ilgili yapının dayanıklılık tasarımının bir parçasıdır (Wagner vd., 2019). Kapiler su emme ve ağırlıkça su emme ile ölçülen sonuçlara göre kolemanit ikamesi zamanla suyun beton içerisine nüfuz etmesini azaltmaktadır.

Referans betona ait basınç dayanımları 7, 28 ve 90. günler için sırasıyla 37.109 42.699 ve 49.040 MPa olarak ölçülmüştür. Kolemanit ikameli betonların basınç dayanımları incelendiğinde elde edilen sonuçlar şunlardır:

- 7. günde kolemanit ikamesi arttıkça beton basınç dayanımında referansa kıyasla azalma meydana gelmiştir. Erken yaştaki en düşük beton dayanımı K5 beton türüne ait olup, 30.271 MPa'dır.

- 28. gün kolemanit ikamesi basınç dayanımında referansa göre artış göstermeye başlamıştır. %2 ve %3 ikameleri basınç dayanımını sırasıyla %0.487 ve %2.705 oranlarında arttırmıştır. İkameli beton türlerinde en düşük basınç dayanımı K5 beton türünde 39.707 MPa ölçülmüştür. Çalışma da C30/37 beton tasarımı yapıldığı göz

önüne alınırsa, küp numuneler için 28. gün hedeflenen dayanım 37 MPa'dır. K5 bu sınırı geçmiş olup hedef dayanımı sağlamıştır.

- 90. günde kolemanit ikame oranı %1'den %3'e arttıkça basınç dayanımları referansa kıyasla artış göstermiştir. En yüksek basınç dayanımı 52.231 MPa ile K3 beton türüne aittir. %5 kolemanit ikamesinin referansa göre basınç dayanımını azalttığı görülmüştür.

Kolemanitin betonun sertleşme süresini uzattığı literatürden (Erdoğan vd., 1998; Kula vd., 2001) ve yapılan çalışma neticesinde bilinmektedir. 7 günlük basınç dayanımının kolemanit ikame oranı ile azalması beklenen bir sonuç olmuştur. 28. ve 90. günlerde ise kolemanit ikamesi ile basınç dayanımı artış göstermiştir. Kolemanit katkılı numunelerin basınç dayanımına olumlu katkıları, kolemanitin mineral yapısı ile açıklanan bir durumdur (Aksoğan vd., 2016).

Beton türleri üzerinde gerçekleştirilen yarmada çekme deneyine ait sonuçlar basınç dayanımı ile paralellik göstermektedir. 7. günde kolemanit ikamesi referans betona kıyasla yarmada çekme dayanımlarını azaltmıştır. 90. günde %3 kolemanit ikamesi yarmada çekme dayanımını referans betona göre %14.866 daha fazla arttırmıştır. En düşük dayanım değeri K5 beton türüne aittir.

Referans betona ait eğilme dayanımı 7, 28 ve 90. günlerde sırasıyla 7.624, 8.100 ve 9.125 MPa olarak ölçülmüştür. Kolemanit ikamesi erken yaşlarda diğer dayanım özelliklerinde olduğu gibi eğilme dayanımını da azaltmış, sonraki günlerde ise etkisini göstermeye başlamıştır. 90. günde %4'e kadar kolemanit ikamesi referansa kıyasla eğilme dayanımını arttırmıştır. En yüksek değer K3 beton türüne aittir (referansa göre %16.822 arttırmıştır). %5 kolemanit ikamesinin ise eğilme dayanımını referansa göre %3.123 azaltarak olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

Elde edilen basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre kolemanit ikamesinin basınç dayanımından daha çok eğilme dayanımını etkilediği görülmüştür. Karayollarında tekrarlı eğilme yüklerine maruz kaldığı göz önünde

bulundurulduğunda elde edilen bulgular kolemanit ikamesinin yol betonunda kullanılmasının ikamesiz beton türünden daha uygun olacağı kanısına varılmıştır.

Beton yol kaplamalarının sürekli aşınma etkisine maruz kalması sebebiyle kullanılacak betonun aşınma direncinin yüksek olması uzun hizmet ömrü için gerekli bir parametre olmaktadır. Düşük aşınma miktarı ile beton yüksek aşınma dayanımı sağlayacaktır. Aşınma dayanımı incelenen beton türleri yaşlarına göre farklı sonuçlar sergilemişlerdir. 7 ve 28. günlerde en iyi aşınma direnci referans beton türüne aittir. 90 günlük numunelere yapılan aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde ise;

- Referans betonun aşınma kaybının $9.07 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ olduğu,
- Kolemanit ikame oranı %1'den %3'e arttıkça aşınma kaybının referans beton türüne göre azaldığı,
- En az aşınma kaybının $8.57 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ ile K3 beton türüne ait olduğu,
- Bu durumda K3 beton türünün referansa göre %5.513 daha az aşınma kaybına uğradığı,
- K4 ve K5 beton türlerinin aşınma dayanımının referans betondan daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Literatürde aşınma direnci ile basınç dayanımı arasında bir ilişki olduğu görülmüştür. Yüksek basınç dayanımına sahip beton türünden yüksek bir aşınma direnci beklenmektedir. Ayrıca aşınma miktarının artması veya azalması gerçeği, mineral tozunun cinsi ve karışımdaki konsantrasyonuna bağlı olmakla birlikte yüzeydeki gözenekleri dolduran mineral tozların kullanımı ile aşınma miktarını azaltabilmektedir (Popek vd., 2016). Elde edilen tahribatlı ve tahribatsız deney sonuçları kolemanit ikemesinin %3'e kadar kullanılmasının betonun boşluk yapısının azalmasında, yüzey sertliği ve dayanım değerlerinin artmasında etkili olduğunu göstermektedir. yapılan çalışmada kolemanit ikamesi (%3'e kadar) ile ikamesiz betona göre daha az boşluksuz ve nispeten daha yüksek dayanımlı elde edilen beton örneklerinde elde edilen düşük aşınma değerleri literatür ile paralellik göstermiştir.

Karayollarının geniş ağ yapısının olması dolayısıyla yol yapımında kullanılan malzemelerin yer yer farklı iklimsel faktörlere maruz kalacağı bir gerçektir. Referans ve

kolemanit ikamesi ile üretilen beton türleri ıslanma-kuruma, donma-çözünme, sülfat ve klor olmak üzere farklı fiziksel ve kimyasal etkilere maruz bırakılmıştır. Tüm beton türleri fiziksel ve kimyasal koşullardan olumsuz olarak etkilenmiş, numunelerde kütle kaybı, yüzey sertliğinde azalma, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Betonun en belirgin özelliği olan basınç dayanımı baz alınarak elde edilen sonuçlardan bazıları şunlardır:

- Islanma kuruma etkisi ile referans beton türünde meydana gelen dayanım kaybı %18.848 iken, çevrimden en fazla etkilenen beton türünün %21.604 basınç dayanımı kaybı ile K5 olduğu tespit edilmiştir. K1, K2 ve K3 beton türleri ıslanma kuruma faktöründen referans betona kıyasla daha az etkilenmiştir. %1'den %3'e kolemanit ikame oranı arttıkça, dayanım kaybı azalmıştır. En düşük dayanım kaybı %17.516 ile K3 beton türüne ait olduğu belirlenmiştir.

- Donma çözünme etkisi sonrası referans beton dayanımı %4.411 azalma göstermiştir. Islanma kuruma çevriminde olduğu gibi donma çözünmenin olumsuz etkisi kolemanit ikamesi %1'den %3'e arttıkça azalmıştır. K4 ve K5 beton türlerinin basınç dayanım kaybı referans betondan daha yüksektir. En az dayanım kaybı %3.942 ile K3 beton türüne aittir.

- $MgSO_4$ etkisi ile referans beton türünde basınç dayanımı %5.394 azalmıştır. Kolemanit ikame oranı %1'den %3'e arttıkça beton türlerinin $MgSO_4$ 'dan daha az etkilendiği ve referans betona göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. K5 beton türü referans betona göre $MgSO_4$ etkisinden daha fazla zarar görmüş ve basınç dayanımı %6.169 azalmıştır. $MgSO_4$ 'dan en az etkilenen beton türü %4.164 dayanım kaybı ile K3 beton türüdür.

- Klor etkisine maruz kalmış referans beton türünün basınç dayanım kaybı %5.620 iken bu oran kolemanit ikamesi %1'den %3'e arttıkça azalmıştır. K4 ve K5 beton türleri donma çözünme etkisinde olduğu gibi referans betona göre klordan daha fazla etkilenererek, basınç dayanımlarını sırasıyla %5.622 ve %6.998 oranlarında kaybetmiştir. Klordan en az etkilenen beton türü %3.096 ile K3 beton türüne aittir.

Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde ıslanma kuruma çevriminin tüm beton türlerini donma çözünme, $MgSO_4$ ve klor etkisinden daha olumsuz etkilediği görülmektedir. Özellikle Karadeniz bölgesi gibi çok yağış alan bölgelerde inşa edilecek beton yollarda bu faktörün göz önüne alınması gerekliliği yadsınamaz bir gerçektir.

Sonuç olarak çalışmada ele alınan bütün kolemanit ikame oranlarının (%1 ~ %5) hedeflenen C30/37 dayanım sınıfını sağlamış olması dolayısıyla yol betonu yapımında kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Gerçekleştirilen dayanım deney sonuçlarına göre optimum kolemanit ikame oranının %3 olduğu tespit edilmiştir.



5. ÖNERİLER

Kolemanit mineralinin erken yaşlarda dayanımı düşürmesi priz başlangıç ve bitiş sürelerini uzatması ile ilgilidir. Sertleşme süresinin azaltılması için benzer çalışmaların priz hızlandırıcılar ile yapılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada priz süresini uzatması sebebiyle kolemanit ikamesi en fazla %5 ile sınırlandırılmıştır. Priz hızlandırıcılar ile kolemanit ikame oranının artırılması üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Nano malzemelerin priz süresini hızlandırdığı ve erken yaşlarda dayanım artışı sağladığı bilinmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda nano malzemeler ile kolemanit mineralinin birlikte kullanılması ile priz sorununun ortadan kalkabileceği düşünülmektedir.

Yapılan çalışmada kolemanit ikamesinin betonun dayanım ve dayanıklılık özelliğine olumlu katkılarda bulunduğu deneysel olarak gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kolemanitin betonun özelliklerini geliştirilebileceğini göstermiştir. Ancak literatür incelendiğinde özellikle çimento harcı çalışmalarında aksini belirten sonuçlar mevcuttur. Çimentolu kompozitlerde kolemanit mineralinin partikül boyutu ve B_2O_3 oranlarına göre yeni çalışmalar yapılması, hem çimento harcı hem beton üretiminde aynı özelliklerde kolemanit kullanılarak aradaki farkların görülmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

Kolemanit etkisinin beton yollarda daha net anlaşılabilmesi için numune sayısının ve deney süresinin artırılması gerekliliği de yadsınamaz bir gerçektir.

KAYNAKLAR

- Abo-Qudais, S.A., 2005.** Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. *Construction and Building Materials*, 19, 257-263.
- Acharya, P.K. and Patro, S.K., 2016.** Strength, sorption and abrasion characteristics of concrete using ferrochrome ash (FCA) and lime as partial replacement of cement. *Cement and Concrete Composites*, 74, 16-25.
- Ağar, E., Sütaş, İ. ve Öztaş, G., 1998.** Beton Yollar. İstanbul Teknik Üniversitesi, 1. Baskı, ISBN: 975-561-125-8, 392 s.
- Akgüngör, A.P. and Demirel, A., 2004.** Türkiye'deki ulaştırma sistemlerinin analizi ve ulaştırma politikaları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3), 423-430.
- Akinpelu, M.A., Odeyemi, S.O., Olafusi, O.S. and Muhammed, F.Z., 2017.** Evaluation of splitting tensile and compressive strength relationship of self-compacting concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31, 19-25.
- Aksoğan, O., Binici, H. and Ortlek, E., 2016.** Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes. *Construction and Building Materials*, 106, 253-263.
- Anastasiou, E.K., Liapis, A. and Papayianni, I., 2015.** Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 1-8.
- Arın, Y., 2016.** Bor atıklarının çimento harcı üretiminde değerlendirilmesi. *International Multidisciplinary Congress of Eurasia, Odessa*, 11-13 Temmuz, 321-327.
- ASTM C 597-83, 2009.** Beton - Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, United States.
- ASTM C127-15, 2015.** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, United states.
- ASTM C128-15, 2015.** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, United states.
- ASTM C131 / C131M-14, 2014.** Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA, United states.

- ASTM C142 / C142M-17, 2017.** Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, United states.
- ASTM C33 / C33M-18, 2018.** Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, United states.
- ASTM C88 / C88M-18, 2018.** Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM International, West Conshohocken, PA, United states.
- Aydemir, H., 2016.** Türkiye'nin ulaştırma politakaları çerçevesinde demiryolu ulaştırma sisteminin genel durumunun irdelenmesi ve geleceğine bakış. Demiryolu Mühendisliği, 3, 41-46.
- Bağdath, M.E.C. and Yıldırım, M.Ş., 2017.** Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların bakım maliyetlerine etkisi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(1), 102-111.
- Baradan, B. ve Aydın, S., 2013.** Betonun durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 21-23 Şubat, 265-288.
- Berberoğlu, Ş., 2011.** Beton Yollarda Buz Çözücü Tuz Etkisine Su-Çimento Oranının Etkileri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 93 s., 52.
- Bideci, Ö.S. ve Bideci, A., 2018.** Öğütölmüş kolemanit katkısının çimento harçlarına etkisi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(1), 133-138.
- Binici, H., Sevinç, A.H. and Durgun, M.Y., 2010.** Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 1-14.
- Binici, H., Sevinç, A.H. and Durgun, M.Y., 2011.** Pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların dayanımı ve sülfat direnci. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(1), 39-51.
- Boykova, T.I., Solovyova, V.Y. and Solovyov, D.V., 2017.** Effective repair and refurbishment compound for the strengthening of a road concrete pavements. Procedia Engineering, 189, 650-653.
- Brecolotti, M., Bonfigli, M.F. and Materazzi, A.L., 2013.** Influence of carbonation depth on concrete strength evaluation carried out using the SonReb method. NDT&E International, 59, 96-104.
- Bungey, J.H., Millard, S.G. and Grantham, M.G., 2006.** Testing of concrete in structures. Taylor & Francis, 4th Edition, ISBN: 0-415-26301-8, 352 p.
- Chai, G., Van Staden, R., Guan, H. and Chaye Loo, Y., 2012.** Impact of Climate Related Changes in Temperature on Concrete Pavement: A Finite Element Study. In 25th ARRB Conference, Perth, 23-26 September, 1-12.

- Cygas, D., Laurinavicius, A., Vaitkus, A. and Puodziukas, V., 2008.** Research of Experimental Road Pavement Structures. The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC-2008), Vilnius, 26-29 June, 22-28.
- Darestani, M.Y., Thambiratnam, D.P. and Nataatmadja, A., 2006.** Experimental Study on Structural Response of Rigid Pavements Under Moving Truck Load. 22th ARRB Conference, Canberra, 29 October -2 November, 1-14.
- Delatte, N., 2008.** Concrete pavement design, construction and performance. Taylor & Francis, 1. Baskı, ISBN: 978-0-415-40970-4, 372 p.
- Durgun, M.Y. and Sevinç, A.H., 2019.** High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions. Construction and Building Materials, 196, 66-81.
- Erdoğan, Y., Zeybek, M.S. and Demirbaş, A., 1998.** Cement mixes containing colemanite from concentrator wastes. Cement and Concrete Research, 28, 605-609. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00018-0).
- Fookes, P.G., 1980.** An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 13(4), 207-229.
- Freeseaman, K., Khazanovich, L. and Hoegh, K., 2018.** Nondestructive analysis techniques for freeze-thaw damage detection in concrete slabs using shear waves. International Journal of Pavement Research and Technology, Article in press, <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.06.003>.
- Gencel, O., Brostow, W., Ozel, C. and Filiz, M., 2010.** An investigation on the concrete properties containing colemanite. International Journal of Physical Sciences, 5(3), 216-225.
- Gezmen, T. ve Türkel, S., 2017.** Bor minerali ve uçucu kül içeren harçların mekanik özelliklerinin ve sülfata dayanıklılığının incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 19(57), 757-778.
- Gill, S. and Maharaj D.K., 2015.** Comparative study of design charts for rigid pavement. American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics, 11(1), 94-98.
- Güngör A.G., Sağlık A. ve Ünal, N., 2013.** Karayolu Beton Yol Deneme Kesimleri Performans Değerlendirmesi. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 21-23 Şubat, 96-111.
- Halk Sağlığı Müdürlüğü, 2017.** Borçka ilçesi su analizleri. Artvin, Türkiye, 1 s.
- Helal, J., Sofi, M. and Mendis, P., 2015.** Non-destructive testing of concrete: A review of methods. Electronic Journal of Structural Engineering, 14(1), 97-105.

- Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Gucunski, N. and Nam, J., 2018.** Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 171, 511-520.
- İyınam, Ş. ve Ağar, E., 2004.** Kara Yollarında Hazır Beton. Beton 2004 Kongresi, İstanbul, 10-12 Haziran, 66-72.
- Jamshidi, A., Kurumisawa, K., White, G., Nishizawa, T., Igarashi, T., Nawa, T. and Mao, J., 2019.** State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. *Construction and Building Materials*, 200, 713-755.
- Kalyan, T. and Kishen, C., 2013.** Experimental Evaluation of Cracks in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity. Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, 18-22 November, Poster.
- Khan, M.I., Khan, A.A. and Yadav, S., 2018.** Mechanistic analysis of rigid pavement for wheel load stresses by finite element method considering different sub-grade. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 55(2), 61-67.
- Kılınçarslan, Ş., Başıyigit, C. ve Uzun, İ., 2010.** Ağır betonların sülfat etkisinde mekanik özellikleri. *SDÜ Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2(2), 60-71.
- Korochkin, A., 2018.** Impact of rigid pavements with the asphalt-concrete wearing course on road performance and traffic safety. *Transportation Research Procedia*, 36, 315-319.
- Kula, I., Olgun, A., Erdogan, Y. and Sevinc, V., 2001.** Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 31, 491-494. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00486-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00486-5).
- Kuloğlu, N., Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Tanyıldızı, M., 2011.** AASHTO Metodunda Rijit Üstyapı Kaplama Kalınlığına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 16-18 Mayıs, 40-44.
- Kutuk, S. and Kutuk-Sert, T., 2017.** Effect of PCA on nanosized ulexite material prepared by mechanical milling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(11), 4801-4809.
- Kutuk-Sert, T., 2016.** Stability analyses of submicron-boron mineral prepared by mechanical milling process in concrete roads. *Construction and Building Materials*, 121, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.156>.
- Li, H., Zhang, M.H. and Ou, J.P., 2007.** Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292-1301. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.10.004>.

- Li, K., Li, C. and Chen, Z., 2009.** Influential depth of moisture transport in concrete subject to drying-wetting cycles. *Cement and Concrete Composites*, 31, 693-698.
- Lorenzi, A., Tisbierek, F.T. and Silva, L.C.P., 2007.** Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Concrete Specimens. In IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Octubre, 1-13.
- Malek, J. and Kaouther, M., 2014.** Destructive and non-destructive testing of concrete structures. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 8(4), 432-441.
- Mohod, M.V. and Kadam, K.N., 2016.** A comparative study on rigid and flexible pavement: a review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 84-88.
- Mushurov, M., Canpolat, O., Uysal, M., Al-mashhadani, M.M. and Aygörmez, Y., 2018.** Investigation of Waste Products of Boron and Metakaolin Utilizes. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3(2), 212-220.
- Olgun, A., Kavas, T., Erdogan, Y. and Once, G., 2007.** Physico-chemical characteristics of chemically activated cement containing boron. *Building and Environment*, 42(6), 2384-2395. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.003>.
- Onuaguluchi, O. and Panesar, D.K., 2014.** Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 82, 125-131.
- Öner, A., Direr, S. and Sevgül, T., 2004.** Islanma Kuruma Çevrimi-Dinamik Elastisite Modülü İlişkisi. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre ve Sergisi, İstanbul*, 15-17 Nisan, 448-450.
- Panzer, T.H., Christoforo, A.L., Cota, F.P., Borges, P.R. and Bowen, C.R., 2011.** Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials. In *Advances in Composite Materials-Analysis of Natural and Man-Made Materials*, ISBN: 978-953-307-449-8, 502 s.
- Popek, M., Sadowski, Ł. and Szymanowski, J., 2016.** Abrasion resistance of concrete containing selected mineral powders. *Procedia Engineering*, 153, 617-622.
- Qasrawi H.Y., 2000.** Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 739-746.
- Sabih, G. and Tarefder, R.A., 2016.** Impact of variability of mechanical and thermal properties of concrete on predicted performance of jointed plain concrete pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9, 436-444.
- Salemi, N. and Behfarnia, K., 2013.** Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 934-941.

- Sevim, U.K., 2011.** Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. *Materials and structures*, 44, 187-193.
- Sevim, U.K., Ozturk, M., Bankir, M.B. and Aydin, U., 2017.** Utilization of Colemanite waste in Concrete Design. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 4(12), 170-175.
- State of California Department of Transportation, 2015.** Concrete Pavement Guide. California, USA, 188 p.
- Şengün, E., Kıran, E. ve Yaman, İ.Ö., 2017.** Türkiye’de beton yol ve beton bariyer fırsatları. *Çimento ve Beton Dünyası*, 22(126), 72-82.
- Şengün, E., Yaman, İ.Ö. ve Ceylen, H., 2016.** Türkiye’de beton yol ve beton bariyer fırsatları. *Çimento ve Beton Dünyası*, 21(123), 58-67.
- Şimşek, O., 2004.** Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık. ISBN: 975-347-809-7, 304 s.
- Taban, H., Gökçe, H.S. ve Abama, H.İ., 2012.** çimento katkı malzemesi olarak kullanılan doğal puzolanların ekolojik etkileri. *Politeknik Dergisi*, 15(4), 185-190.
- Taç, Ş.G., 2018.** Karayolu ulaşımında meydana gelen trafik kazalarının önlenmesinde akıllı ulaşım sistemlerinin rolü. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(2), 12-21.
- Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B. ve Sevinç, V., 2002.** Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi. *I.Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya*, 3-4 Ekim, 259-265.
- Targan, Ş., Olgun, A., Erdogan, Y. and Sevinc, V., 2003.** Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 33, 1175-1182. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00025-5).
- Tekin, İ., Kotan, T., Yurdakul, M. and Öner, E., 2017.** Bayburt bölgesinde bulunan farklı agrega tipleri ile üretilen geleneksel betonların mekanik mukavemetleri üzerine bir çalışma. *Politeknik Dergisi*, 20(3), 513-518.
- Thandavamoorthy, T.S., 2015.** Determination of concrete compressive strength: A novel approach. *Advances in Applied Science Research*, 6(10):88-96.
- Topçu, İ.B., Ünal, O. Ve Uygunoğlu, T., 2005.** Betonarme yapılarda klorür etkisi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Haber Bülteni*, 20(124), 36-40.
- Trtnik, G., Kavčič, F. and Turk, G., 2009.** Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, 49(1), 53-60.

- TS 1247, 2018.** Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında). TSE., Ankara.
- TS 500/T3, 2014.** Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. TSE., Ankara.
- TS 706 EN 12620+A1, 2009.** Beton agregaları. TSE., Ankara.
- TS 802, 2016.** Beton karışım tasarımı hesap esasları. TSE., Ankara.
- TS EN 12350-2, 2010.** Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. TSE., Ankara.
- TS EN 12350-6, 2010.** Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk. TSE., Ankara.
- TS EN 12350-7, 2010.** Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava muhtevasının tayini - Basınç yöntemleri. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-1, 2013.** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-2, 2010.** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010.** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010.** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-6, 2010.** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12504-2, 2013.** Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 2: Tahribatsız muayene- Geri sıçrama sayısının belirlenmesi, TSE., Ankara.
- TS EN 1367-1, 2009.** Agregaların ısı ve bozunma özelliklerini tayin için deneyler - bölüm 1: Donmaya ve çözölmeye karşı direncin tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 13892-2, 2015.** Şap malzemeleri - Deney yöntemleri - Bölüm 3: Aşınma direncinin tayini - Böhme. TSE., Ankara.
- TS EN 196-6, 2010.** Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 206:2013+A1, 2017.** Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TSE., Ankara.

- TS EN 772-11, 2012.** Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Betondan, gazbetondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 933-1, 2012.** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. TSE., Ankara.
- TS EN 933-10, 2015.** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 10: İnce malzeme tayini - İnce dolgu malzemelerinin tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması (hava jetiyle eleme). TSE., Ankara.
- TS EN 933-3, 2012.** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi. TSE., Ankara.
- TS EN 933-9+A1, 2014.** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce tanelerin tayini - Metilen mavisi deneyi. TSE., Ankara.
- Ulaştırma Bakanlığı, 2013.** 11'inci Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Şurası. Karayolu Çalışma Gurubu Raporu. Ankara, Türkiye, 428 s.
- URL-1, 2018.** <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> (20 Aralık 2018).
- URL-2, 2019.** https://www.bebka.org.tr/admin/datas/sayfas/files/Ulasrma_Ana_Plani_Stratejisi.pdf (10 Mart 2019).
- URL-3, 2019.** http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Bolgeler/3Bolge/3_Bolge_Md_Onemli_Projeler1.pdf (15 Şubat 2019).
- URL-4, 2019.** <http://www.betonyol.org.tr/icerik.php#iid=12&aid=2058&lang=tr> (15 Şubat 2019).
- URL-5, 2019.** <http://www.marmaragazetesi.com/beton-yol-sorununa-ilk-onlem-alindi-116842h.htm> (15 Şubat 2019).
- URL-6, 2019.** https://bmsit.ac.in/system/study_materials/documents/000/000/198/original/CEMENT_CONCRETE_PAVEMENTS.pdf (10 Şubat 2019).
- URL-7, 2018.** http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/2018/05/Stratejik_plan_2015_2019.pdf (20 Aralık 2018).
- URL-8, 2018.** <http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/2018/01/16-2017-Ground-Colemanite-75-Micron.pdf> (20 Aralık 2018).
- URL-9, 2018.** <http://www.dmaksyapi.com/urun-detay/zyla-420-m/> (25 Haziran 2018).
- URL-10, 2018.** http://www.tekkim.com.tr/lib_s_sertifika/558.PDF (25 Haziran 2018).

- URL-11, 2018.** http://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Sodium-chloride,MDA_CHEM-106404 (25 Haziran 2018).
- URL-12, 2018.** http://www.dsi.gov.tr/docs/proje-teknik-%C5%9Fartnameler/beton-i-%C5%9Fleri-teknik-%C5%9Fartnamesi_r01_20180706.pdf?sfvrsn=2 (20 Ekim 2018).
- Ustabaş, İ., 2011.** Kolemanit ve Üleksitin Çimentoda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Beton 2011 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 20-22 Ekim, 367-375.
- Verian, K.P. and Behnood, A., 2018.** Effects of deicers on the performance of concrete pavements containing air-cooled blast furnace slag and supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 90, 27-41.
- Wagner, C., Villmann, B., Slowik, V. and Mechtcherine, V., 2019.** Capillary absorption of cracked strain-hardening cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 97, 239-247.
- Yalçın, H. ve Gürü, M., 2006.** Çimento ve Beton. Palme Yayıncılık, ISBN: 9944-341-16-9, Ankara, 304 s.
- Yazıcı, Ş. ve İnan Sezer, G., 2016.** Polimer ilaveli harçlarda sülfat etkisinin ve alkali silis reaksiyonunun incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 413-417.
- Yeğinobalı, A., 2010a.** Türkiye'nin İlk Beton Karayolları. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği/Arge Enstitüsü, 2. Baskı, ISBN: 975-8136-27-8, 64 s.
- Yeğinobalı, A., 2010b.** Niçin Beton Yol?. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği/Arge Enstitüsü, 2. Baskı, ISBN: 975-8136-28-5, 28 s.
- Ziari, H., Barakoochi, A.T. and Moniri, A., 2017.** Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10, 297-303.

ÖZGEÇMİŞ

Cuma KARA, 01.05.1983 tarihinde Kırşehir/Kaman'da doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Kırşehir ili Kaman ilçesinde Cumhuriyet İlkokulu ve Melikşah Ortaokulu'nda, lise öğrenimini ise Ankara ili Etimesgut ilçesi Mehmetçik Lisesi'nde tamamladı. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Lisans öğrenimini 15.05.2008, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Yüksek Lisans öğrenimini 05.09.2013 ve Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Lisans öğrenimini ise 11.02.2015 tarihinde tamamladı. 2017 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans öğrenimini halen devam ettirmektedir. 2015 yılı itibariyle Artvin Çoruh Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Orta seviyede İngilizce bilen Cuma KARA, evli ve 1 çocuk babasıdır.

Bilimsel Çalışmaları ve Yayınları;

- 1- **Kütük-Sert, T., Kara, C. and Kutuk, S., 2019.** The Effect of Wetting and Drying on Concrete Roads Substituted Colemanite. International Civil Engineering and Architecture Conference 2019 (ICEARC'19), Trabzon, 17-20 April, 2550-2557.
- 2- **Kara, C., 2018.** Çay atığının doğal lif olarak betonda kullanılabilirliği. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4(2), 156-165.
- 3- **Kara, C. ve Bekem, İ., 2018.** Endüstriyel atıkların beton dayanımına etkisi üzerine bir çalışma: Çay fabrikası kömür külü örneği. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 7(2), 75-85.
- 4- **Kütük-Sert, T. ve Kara, C., 2018.** Farklı kür koşullarının kolemanit ikameli betonların dayanımına etkisi. Journal of Investigations on Engineering & Technology, 1(2), 19-23.
- 5- **Kara, C. ve Bekem Kara, İ., 2018.** Mermer Tozu İkameli Betonlarda Silis Dumanı Etkisi. 4. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi, Antalya, 30 Ekim-3 Kasım, 2049-2056.
- 6- **Bekem Kara, İ. ve Kara, C., 2018.** Çay Fabrikası Yakma Ünitesi Atığının Betonun Aşınma Dayanımına Etkisi. 4. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi, Antalya, 30 Ekim-3 Kasım, 2374-2379.

- 7- **Bekem Kara, İ. ve Kara, C., 2018.** Borçka (Artvin) Andezitinin Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Uluslararası Artvin Sempozyumu, Artvin, 18-20 Ekim, 1226-1240.
- 8- **Demirel, C., Bekem Kara, İ. ve Kara, C., 2017.** Deriner Baraj Kazısından Çıkan Malzemelerin Beton Üretiminde Agrega Olarak Değerlendirilmesi. 2. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi, Antalya, 18-21 Ekim, 1011-1017.
- 9- **Yazıcıoğlu, S. ve Kara, C., 2017.** Betonda atık mermer tozu kullanımının karbonatlaşmaya etkisi. Politeknik Dergisi, 20(2), 369-376.
- 10- **Kara, C. ve Yazıcıoğlu, S., 2016.** Mermer tozu atığı ve silis dumanının betonun karbonatlaşmasına etkisinin araştırılması. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 5(2), 191-202.
- 11- **Bekem Kara, İ. ve Kara, C., 2016.** Beyaz çimentolu betonlarda yüksek sıcaklık etkisinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 32(2), 1-8.
- 12- **Bekem Kara, İ. ve Kara, C., 2016.** Farklı kimyasal katkıları ile üretilen betonlar üzerinde magnezyum sülfat ve sodyum klorür etkisinin araştırılması. Electronic Journal of Vocational Colleges, 2. Uluslararası Multidisipliner Avrasya Kongresi Özel Sayısı, 117-125.
- 13- **Kara, C., 2016.** Fly Ash Usage at Roller Compacted Concrete and Mass Concrete. International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16), Kilis, 19-20 March, 2140-2146.
- 14- **Bekem, İ. ve Kara, C., 2015.** Endüstriyel Atık İkamesinin 700 °C Yüksek Sıcaklıkta Beton Basınç Dayanımına Etkisi. 4. Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu (UMYOS'15), Yalova, 21-23 Mayıs, 715-722.