T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

KATKILI BETONLARIN FARKLI ORTAM KOŞULLARINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Hamit ÖZTÜRK

DANIŞMAN
Prof. Dr. Fahriye M.KILINÇKALE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 15.10.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Fahriye M.KILINÇKALE
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Fevziye AKÖZ
Hasan Kalyoncu Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Turhan BİLİR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Savaş ERDEM
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bilgi ve deneyimlerini paylaşarak, her konuda katkıda bulunan danışmanım Sayın Prof. Dr. Fahriye M.KILINÇKALE 'ye içten minnettarım. İÜC Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan yardımcı olan tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Bana maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aile fertlerine tek tek ve manevi babam Sayın Firouz FARAHMAND teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2021 Hamit ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **İV**
İÇİNDEKİLER ..... **V**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **Vİİİ**
TABLO LİSTESİ ..... **Xİ**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **Xİİ**
ÖZET ..... **Xİİİ**
SUMMARY ..... **XİV**
1 . GİRİŞ **1**
2 . GENEL KISIMLAR **3**
2.1 BETON 3
2.1.1 Çimento 3
2.1.2 KARIŞIM SUYU 4
2.1.3 Agrega 5
2.1.4 Beton katkı maddeleri 6
2.2 BETONDA DURABİLİTE (DAYANIKLILIK) 7
2.2.1 Durabilite endeksleri 8
2.3 AGRESİF ORTAM KOŞULLARI 9
2.3.1 Islanma-Kuruma 10
2.3.2 Donma-Çözülme 11
2.4 MİNERAL KATKILAR 12
2.4.1 Doğal Puzolanlar 13
2.4.2 Yapay Puzolanlar 15
2.4.2.1 Yüksek Fırın Cürufu *15*
2.4.2.2 Silis Dumanı *15*
2.4.2.3 Pirinç Kabuğu Külü *16*
2.4.2.4 Uçucu Kül *16*
2.5 UÇUCU KÜL 16
2.5.1 Uçucu Külün Tanımı 16
2.5.2 Uçucu Kül Özelikleri 18
2.5.2.1 Fiziksel Özelikleri *18*

2.5.2.2 Kimyasal Özelikler *18*
2.5.3 Uçucu Külün Sınıflandırılması 19
2.5.4 Uçucu Külün Reaksiyonu 21
2.6 UÇUCU KÜLÜN BETONA ETKİLERİ 23
2.6.1 Uçucu Külün Taze Betondaki Etkileri 23
2.6.1.1 Beton işlenebilirliği *23*
2.6.1.2 Hava İçeriği (sürüklenmiş hava miktarı) *23*
2.6.1.3 Terleme *24*
2.6.1.4 Priz Süresi *24*
2.6.1.5 Hidratasyon Isısı *25*
2.6.2 Uçucu Külün Sertleşmiş Betondaki Etkileri 25
2.6.2.1 Basınç Dayanımı *26*
2.6.2.2 Eğilme ve Yarma Mukavemetleri *29*
2.6.2.3 Elastisite Modülü (E) *30*
2.6.2.4 Kuruma Büzülmesi *31*
2.6.2.5 Dayanıklılık *31*
2.6.2.6 Donma-Çözülme *35*
2.6.3 Literatür Araştırması Sonucu 38
3 . MALZEME VE YÖNTEM 39
3.1 KULLANILAN MALZEMELER 39
3.1.1 Çimento 39
3.1.2 F Sınıfı Uçucu Kül 40
3.1.3 Agrega 40
3.1.4 Karışım suyu 43
3.1.5 Süper Akışkanlaştırıcı 44
3.2 DURABİLİTE; ESKİTME SÜREÇLERİ 44
3.2.1 Donma-Çözülme 45
3.2.2 Islanma-Kuruma 45
3.3 NUMUNELERİN ÜRETİMİ 46
3.3.1 Çimento hamuru numuneler: 46
3.3.2 Beton numuneler 47
3.4 DENEYLER 49
3.4.1 Çimento hamuru deneyleri 49
3.4.1.1 Normal kıvam suyu miktarı ve priz süresi tayini: *49*

3.4.1.2 Su emme kapasitesi: *49*
3.4.1.3 Ultrases hızı *50*
3.4.1.4 Eğilme dayanımı *50*
3.4.1.5 Basınç dayanımı *51*
3.4.2 Beton deneyleri 52
3.4.2.1 Çökme deneyi *53*
3.4.2.2 Birim hacim ağırlığı deneyi *53*
3.4.2.3 Su emme kapasitesi *53*
3.4.2.4 Ultrases deneyi *53*
3.4.2.5 Basınç dayanımı *54*
3.4.3 Elektron Mikroskop Taraması (SEM) 54
4 . BULGULAR 56
4.1 ÇİMENTO HAMURU NUMUNELER 57
4.1.1 Su Emme Kapasitesi 57
4.1.2 Ultrases Geçiş Hızı 66
4.1.3 Eğilme Dayanımı 68
4.1.4 Basınç Dayanımı 70
4.2 BETON NUMUNELER 72
4.2.1 Su Emme Kapasitesi 72
4.2.2 Ultrases Geçiş Hızı 74
4.2.3 Basınç Dayanımı 76
5 . TARTIŞMA VE SONUÇ 79
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 100

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2-1: Puzolanların Sınıflandırılması 13

Şekil 2-2: Uçucu Külün elde edilmesi 17

Şekil 2-3: Taze betonda hava sürüklenmesi 36

Şekil 2-4: Hava sürükleyici katkıların karbon yüzeyine adsorpsiyonu, çimento hamurunda stabil hava kabarcıkları oluşturmak için daha az AEA serbest bırakır 37

Şekil 3-1: Kırmataş 01 agrega grubu granülometrisi 41

Şekil 3-2: İnce agrega grubu granülometrisi 42

Şekil 3-3: Kırmataş 05 agrega grubu granülometrisi 42

Şekil 3-4: Birleşik agrega yığınının granülometrisi 43

Şekil 3-5: Eğilme dayanımı deneyi 51

Şekil 3-6: Basınç dayanımı deneyi uygulaması 52

Şekil 3-7: Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı 55

Şekil 4-1: Şahit ve katkılı hamur ve beton numunelerde uygulanan işlemlerin şematik görünümü 56

Şekil 4-2: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin % su emme kapasitesi 57

Şekil 4-3: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin % su emme kapasitesi 58

Şekil 4-4: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin % su emme kapasitesi 58

Şekil 4-5: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde ıslanma-kuruma'ya maruz kalan şahit hamur numunelerin SEM görüntüsü 60

Şekil 4-6: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde ıslanma-kuruma'ya maruz kalan uçucu küllü hamur numunelerin SEM görüntüsü 61

Şekil 4-7: Islanma-kuruma veya Donma-çözülme döngülerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü hamur numunelerin boşluklarının çap değişimi 63

Şekil 4-8: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde donma-çözülme'ya maruz kalan şahit hamur numunelerin SEM görüntüsü 64

Şekil 4-9: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde donma-çözülme'ya maruz kalan uçucu küllü hamur numunelerin SEM görüntüsü 65

Şekil 4-10: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı (km/s) 66

Şekil 4-11: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı (km/s) 67

Şekil 4-12: Islanma-kuruma veya Donma-çözülme döngülerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü hamur numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s) 67

Şekil 4-13: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s) 68

Şekil 4-14: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin eğilme dayanımı (MPa) 69

Şekil 4-15: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin eğilme dayanımı (MPa) 69

Şekil 4-16: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin eğilme dayanımı (MPa) 70

Şekil 4-17: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin basınç dayanımı (MPa) 71

Şekil 4-18: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin basınç dayanımı (MPa) 71

Şekil 4-19: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin basınç dayanımı (MPa) 72

Şekil 4-20: Islanma-kuruma koşuluna maruz beton numunelerin % su emme kapasitesi 73

Şekil 4-21: Donma-çözülme koşuluna maruz beton numunelerin % su emme kapasitesi 73

Şekil 4-22: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan beton numunelerin % su emme kapasitesi 74

Şekil 4-23: Islanma-kuruma koşuluna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s) 75

Şekil 4-24: Donma-çözülme koşuluna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s) 75

Şekil 4-25: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan beton numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s) 76

Şekil 4-26: Islanma-kuruma koşuluna maruz beton numunelerin basınç dayanımı(MPa) 77

Şekil 4-27: Donma-çözülme koşuluna maruz beton numunelerin basınç dayanımı(MPa) 77

Şekil 4-28: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan beton numunelerin basınç dayanımı(MPa).....78

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2-1: Portland Çimento Türleri 4

Tablo 2-2: Farklı kömür türlerinden üretilen uçucu külün normal kimyasal bileşim aralığı 19

Tablo 2-3: Uçucu külün ASTM Standartlarına göre sınıflandırılması 21

Tablo 3-1: CEM I 42,5 R çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri 39

Tablo 3-2: F sınıfı uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ve standart sınır değerleri 40

Tablo 3-3: Kırmataş01, ince agrega, kırmataş05 ve birleşik agrega yığınının granülometrisi 41

Tablo 3-4: Agrega fiziksel özellikleri 43

Tablo 3-5: MasterGlenium SKY 608'in bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri [EN 934-1:2008, EN 934-2] 44

Tablo 3-6: Çimento hamuru numunelerin kodları, karışımları, kür süresi ve eskitme ortamı 47

Tablo 3-7: Beton numunelerin kodları ve Karışımları (1 m3 için) 48

Tablo 4-1: Şahit ve uçucu küllü hamur numunelerde oluşan boşlukların çapı(μm) 62

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
CaO	: Kireç
CH	: Kalsiyum Hidroksit
C_2S	: Dikalsiyum Silikat
C_3S	: Trikalsiyum Silikat
C_3A	: Trikalsiyum Alüminat
C_4AF	: Tetra Kalsiyum Alüminoferrit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat Jeli

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KATKILI BETONLARIN FARKLI ORTAM KOŞULLARINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Hamit ÖZTÜRK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Fahriye M.KILINÇKALE

Beton, çimento, su ve agregadan oluşan kompozit malzemedir. Yapılar tasarlanmış hizmet sürecinde çeşitli yıpratıcı çevre koşullarına maruz kalabilir. Betonun dayanım ve dayanıklılığını, arttırmak için, kimyasal ve mineral katkılar ilave edilir. Islanma-kuruma ve donma-çözülme gibi ortamlarda, betonda iç hasar oluşturarak dayanımı düşürür. Betonun dayanım ve geçirimsizliğini sağlamak için puzolan katkıdan yararlanılır. Bu çalışmada çimento ağrılığının %20'si uçucu külle yer değiştirerek üretilen hamur ve betonların özelikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda çimentonun ağırlıkça %20'sini F tipi uçucu külle ikame ederek çimento hamuru ve beton numuneler üretilmiştir. Üretilen şahit ve uçucu küllü numuneler 28, 56 ve 90 günde; 60 döngü ile ıslanma-kuruma ve donma-çözülme maruz bırakılmıştır. 60 döngü sonunda numunelerde birim ağırlık, su emme, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, şahit hamur numuneler hem ıslanma-kuruma, hem de donma-çözülme döngüleri sonrası uçucu küllü hamurlardan daha iyi performans göstermişler. Uçucu küllü beton numuneler ise ıslanma-kuruma sonrası daha iyi performans göstermişler. Donma-çözülme eskitme süreci, uçucu küllü numunelerde daha fazla hasar vermiştir.

Ekim 2021, 114 sayfa.

Anahtar kelimeler: uçucu kül, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, durabilite

SUMMARY

Ph.D. THESIS

BEHAVIOUR INVESTIGATION OF CONCRETE WITH ADMIXTURES EXPOSED TO DIFFERENT CONDITIONS

Hamit ÖZTÜRK

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Fahriye M.KILINCKALE

Concrete is a composite material including cement, water, and aggregate. Structures may be exposed to various aggressive environmental conditions during the designed service period. Chemical and mineral additives are added to concrete to increase the strength and durability. In some environment conditions such as wetting-drying and freezing-thawing, the creature of internal damage to the concrete, reduces its strength. Pozzolan additive is used to provide strength and impermeability of concrete. In this thesis, the properties of the cement paste and concrete produced by replacing 20% of the cement weight with fly ash were investigated. Produced cement paste and concrete samples were prepared by substituting 20% of cement weight with F-type fly ash. Produced control and fly ash samples were exposed to 60 cycles of wetting-drying and freeze-thawing after 28, 56, and 90 curing days. After the 60 cycles, unit weight (density), water absorption, ultrasonic pulse velocity, flexural and compressive strength tests were performed on the samples. According to the obtained results, the control cement paste samples exhibited better performance than the fly ash pastes after both wetting-drying and freeze-thawing cycles. The fly ash concrete samples showed better performance after wetting-drying. The freeze-thaw aging process led to more damage in fly ash samples.

October 2021, 114 pages.

Keywords: fly ash, wetting-drying, freezing-thawing, durability

1. GİRİŞ

Beton en çok kullanılan yapı malzemelerindendir ve çimento esaslı bağlayıcıları içerir [1], [2]. Bir yılda dünyada kişi başına $1m^3$'den çok beton üretilmektedir [3].

Beton, çimento, agrega ve suyun karıştırılması ile elden edilen kompozit malzemedir [4]. Çimento, hidrolik bağlayıcı özelliğine sahiptir ve su ile karıştırıldığında sertleşerek dayanım kazandığı için önemlidir.

Beton birçok inşaat malzemesi ile karşılaştırıldığında, çevresel etkisi düşüktür; ancak büyük hacimlerde üretildiğinden çevresel CO_2 emisyonlarına katkısı önemlidir [5].

Yıllık CO_2 emisyonlarının %5-8'ini çimento ve beton üretiminin oluşturduğu tahmin edilmektedir [3]. Bu emisyonların yaklaşık %60'ı, çimentonun ham maddelerinden kireç taşının kalsinasyonundan, %40 ise, fırında yakıtların yakılmasından kaynaklanır [5].

Gelecekte, çimento ve beton için talebin artacağı düşünülür. İklim değişikliği, üreticilerin çimento endüstrisinde emisyonların azalmasını ve daha sürdürülebilir malzemelerin üretilmelerini gerektirmektedir [6].

Çimento üretiminin çevresel etkisini azaltmak için, çimentonun bir kısmının öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi atık katkılarla yer değiştirmek suretiyle kullanılır. Bu malzemelerin her ikisi de puzolan adı verilen atık ürünlerdir. Yüksek fırın cürufu çelik üretiminden ve uçucu kül ise kömürle çalışan termik santrallerinde kömürün yanması sonucu oluşur. Bu atık maddeler kalsinasyon gerektirmedikleri için, portland çimentonu ile kısmen değiştirilmesi, CO_2 emisyonlarında önemli ölçüde azaltır [7].

Katkılar arasında en çok kullanılan puzolanlar, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi sanayi ve enerji üretiminden ortaya çıkan atıklardır. Böylece hem doğada bu atıklardan oluşan zararlar azalmakta ve hem doğal kaynakların daha az kullanılması sağlanmaktadır.

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi katkılar, emisyonları azaltmak için çözüm gibi görünse de, bağlayıcının özelliklerini değiştirebilen mikro yapısal değişimlere neden olur [8], [9].

Çevreye bakıldığında, binalar, depolar, köprüler, yollar, limanlar, barajlar, enerji santralları ve havaalanları gibi yapıların çoğu betondan oluşur. Diğer yapı malzemelerine göre betonun işlenebilmesi, ekonomik olması, kolaylıkla taşınabilmesi, dayanıklı ve yüksek mukavemetli olması, her yerde üretilebilme olması ve estetik olması gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen yapı malzemesidir.

Betonun 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme mukavemetleri önemlidir. TS-EN 197-1 standartına göre [10], betonun tasarımında ve sınıflandırılmasında 28 günlük dayanım esas alınır. Ancak yapılan araştırmalar ve deneylere göre çoğu zaman ihtiyaç duyulan dayanımdaki betonun tasarımı aşamasında, betonun muhtemel maruz kalabileceği çevre koşulları veya kür şartları fazla dikkate alınmamakta ve bu yüzden beton amaçlanan hizmet süresinden daha kısa bir sürede dayanım veya dayanıklılık gibi önemli özelliklerini kaybetmektedir.

Baradan ve diğ göre beton özeliklerini sürdürebilmesi için dayanımın yanı sıra durabil ve kalıcı olması gerekiyor. Bunun için 2004 yılında TS-EN 206-1 standardı, betonun maruz kalacağı ortam koşularını dikkate alarak çevresel etkiler için sınırlamalar ve sınıflandırılmalar getirmiştir [11], [12].

Farklı amaçlar ile üretilen betonlar ıslanma-kuruma, donma-çözülme, yüksek sıcaklık, sülfat etkisi, alkali-silika reaksiyonu, çözücü tuzlar vb. gibi çevre etkilerine maruz kalabilirler. Bu etkilere karşı betonun dayanıklılığını geliştirmek için çimentonun üretim aşamasında veya betonun karışım sırasında mineral veya kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Dolayısıyla son zamanlarda uçucu kül gibi katkılı çimentolar üretilmektedir.

Betonda kullanılan uçucu kül maliyeti düşürmenin yanı sıra, taze betonun işlenebilmesi, terlemesi, plastik rötresi, su ihtiyacı ve hidratasyon ısısı gibi parametreleri de olumlu şekilde etkilemektedir.

Ayrıca uçucu kül hidratasyon ürünü olarak ortaya çıkan serbest kireçle reaksiyona girer ve ekstra bağlayıcı jeli üreterek betonun dayanımı ve dayanıklılığını geliştirir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 BETON

Beton, hidrolik bağlayıcı olarak çimento, su ve agregadan oluşur [13]. Beton, genellikle bağlayıcı malzeme, ince agregalar, iri agregalar, su ve katkıların uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir.

2.1.1 Çimento

Portland çimentosu (PÇ), çimentonun yeterli su ile priz (donma) ve sertleşme (dayanım kazanma) kabiliyetine atıfta bulunan hidrolik bir bağlayıcıdır [14].

Çimentosu suyla temas ettiğinde, tanecikler hemen çözünür ve hidratasyon olarak adlandırılan reaksiyonlara başlar. Hidratasyon karmaşık bir süreçtir çünkü çimentosu bileşeni, farklı hızlarda reaksiyona giren ve farklı hidratlar oluşturan klinker mineralinden oluşur. Dört ana klinker karmaşık bileşeni, trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum alüminat (C_3A) ve tetra kalsiyum alüminoferrittir (C_4AF) [15].

Genel olarak, çimento içinde % 50'den fazla C_3S ve daha düşük miktarlarda C_2S, C_3A ve C_4AF bulunur. Portland çimentosu, farklı uygulamalar için beş ana sınıfa ayrılır (Tablo 2.1) [16]. Farklı çimento tipleri, bileşim, incelik, basınç dayanımına göre gruplandırılır.

Kalsiyum silikatlar (C_3S ve C_2S) su ile reaksiyonda, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (CH) oluşturur. Bu hidratlar, agregaları birbirine bağlayarak mukavemet kazandıran gözenekli çimento hamurunu meydana getirir. C_3S, erken yaşlardaki dayanım gelişimi için en önemlidir, C_2S ise daha ilerdeki yaşlarda dayanım gelişmesine katkıda bulunur.

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \quad \textbf{(2.1)}$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \quad \textbf{(2.2)}$$

Tablo 2-1: Portland Çimento Türleri

Ağırlık %	I	II	III	IV	V
C_3S	55	55	55	42	55
C_2S	18	19	17	32	22
C_3A	10	6	10	4	4
C_4AF	8	11	8	15	12
CSH_2	6	5	6	4	4
İncelik (m2/Kg)	365	375	550	340	380
Dayanım (1gün)	15	14	24	4	12
Hidratasyon ısısı (j/g)	350	265	370	235	310

C_3A, çevredeki koşullara bağlı olarak farklı şekillerde tepki verebilir. Sadece su ile temas ettiğinde reaksiyonu çok hızlıdır ve malzemenin erken priz almasına neden olabilir. Erken priz, işlenebilirliği sınırlar ve betonun basınç dayanımı gibi önemli özelliklerini bozar. Bu nedenle çimentoya alçıtaşı şeklinde sülfat eklenir. Alçıtaşı, C_3A reaksiyonunu yavaşlatarak ona C_3S'e benzer bir hız verir ve bu süreçte etrenjit oluşturuyor [17].

$$S_3A + 3C\overline{S^3}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\overline{S^3}H_{32} \quad \textbf{(2.3)}$$

Sistemin alçıtaşı bittiğinde, kalan C_3A etrenjit ile reaksiyona girerek monosülfata dönüşür.

$$2C_3A + C_6A\overline{S^3}H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4A\bar{S}H_{12} \quad \textbf{(2.4)}$$

Tüm etrenjit tükendiğinde ve C_3A kaldığında, silikat reaksiyonlarından ortaya çıkan CH ile reaksiyona girer.

$$C_3A + CH + 12H \rightarrow C_4AH_{13} \quad \textbf{(2.5)}$$

İkinci alüminat fazı C_4AF, C_3A'ya benzer şekilde, ancak daha yavaş bir hızda tepki verir.

2.1.2 KARIŞIM SUYU

S / Ç oranı, betonun dayanımını belirleyen önemli faktörlerden biridir. Daha düşük S / Ç oranı daha dayanımlı beton verir, ancak işlenmesi zordur, Daha yüksek S / Ç oranı, daha düşük mukavemetli beton verir. Çimento hamuru, su ve çimentodan oluşan malzemedir. Betonun

karıştırılması için kullanılan su, yabancı maddelerden arındırılmış olmalıdır. Suyun pH değeri 7'dan az olmamalı (pH ≥ 7).

Çimentonun reaksiyona girmesi ve hidratasyonu için gereken su miktarı, çimento ağırlığının %25'i kadardır. Ancak betonun işlenebilirlik özeliğini sağlamak için katılan su bu miktara eklendiğinde, beton için gereken su miktarı çimento ağırlığının %40-65'i kadar olmakta. %25'in üzerindeki katılan su sertleşmiş betondan buharlaşarak ayrılmakta ve kılcal boşluklara sebep olarak betonun dayanımının düşmesine yol açar.

2.1.3 Agrega

Agregalar, toplam beton hacminin yaklaşık % 70 - 75'ini oluşturur; beton özelliklerinde etkisi önemlidir. Agregaların temel görevi, betonun iskeletini sağlamak ve çimento hamurunun dolduracağı boşluk alanını azaltmaktır.

Agrega seçiminde büyüklük (granülometri) önemlidir. Bu, beton sıkıştırma üzerinde etkisi olan işlenebilirliği; dolayısıyla beton dayanımını da etkiler [18].

Ayrıca, agrega granülometrisi, gerekli minimum çimento içeriğini etkiler çünkü bu, agregaların toplam yüzey alanına bağlıdır. Genel olarak, daha küçük bir toplam yüzey alanı daha düşük bir minimum çimento hamuru içeriği gerektirmelidir; Çimento miktarının düşmesi toplam CO_2 emisyonlarınıda azaltır [18].

Agregaların şeklide çimento hamuru miktarını etkiler. Doğal agregalar kullanıldığında, pürüzsüz ve yuvarlak şekli nedeniyle daha az çimento hamuruna ihtiyaç duyulur. Kırılmış agregalar köşeli ve geniş bir alan olduğundan; beton işlenebilirliğini azaltır ve çimento hamuru ihtiyacını artırır [19].

Beton dayanımı, agregaların farklı Young modülü ve maksimum basınç dayanımlarına sahip çeşitli mineraller içermesine bağlıdır. Beton basınç dayanımı, sertleştirilmiş çimento hamuru ve agregaların dayanımlarının bir kombinasyonudur [18].

Dayanıklılık düşünüldüğünde, agregaların özelliklerine göre uygun olanlar seçilmelidir. Çakmaktaşı gibi amorf kuvars agregaları alkali-silika reaksiyonları oluşturabilir; reaksiyondan

elde edilen ürün artan bir hacme sahiptir ve bu nedenle betonu çatlatabilir ve böylece onu tahrip edebilecek bir basınç yaratır. Bu, düşük alkali içerikli çimento ve / veya düşük amorf silis içerikli agregalar kullanılarak önlenebilir.

Donma etkisinde kalan soğuk iklim bölgesinde beton yapılar için donma hasarı riski vardır, beton karışımında donmaya dayanıklı agregalar kullanılır. donmaya dayanıklı agregalar yüksek dayanıma ve düşük su emme özelliğine sahiptir. Agregaların donmaya dayanıklı olup olmadığını belirlemek için standartta belirtilen testler uygulanır [18].

2.1.4 Beton katkı maddeleri

Betonun özelliklerini iyileştirmek için beton karışımına mineral ve kimyasal katkılar eklenebilir. Bu, daha düşük viskoziteli bir beton, daha yüksek hava içeriğine sahip bir beton elde etmek veya beton yapının çekirdeğinde üretilen ısıyı düşürmek için olabilir [20]

- **Kimyasal katkılar**: Kimyasal katkılar organik, inorganik bileşikte, katı veya sıvı şeklindedir. Katkılar normal beton karışımına eklenir, çimentolu sistemle etkileşime girebilir ve taze, priz yapmış, sertleşmiş durumda karışımın özelliklerini değiştirir. Su azaltıcı, priz kontrol edici, hava sürükleyici, hızlandırıcı ve süper plastik katkılar genellikle betonda kullanılır.
- **Mineral katkılar**: Mineral katkılar, çeşitli endüstrilerden gelen atık maddeler veya belirli bir miktarda çimentonun yerini almak için ikame malzemeleri olarak kullanılan maddelerdir. Bu, esas olarak hidratasyon işlemi sırasında çimentonun ürettiği hidratasyon ısısını azaltmak için kullanılır. Mineral katkılar iki gruba ayrılır:
    I. Reaktif mineraller, puzolanik ya da bağlayıcı ya da her iki özelliğe sahip olanlar
    II. Ne puzolanik ne de bağlayıcı özelliklere sahip inert mineral katkılar

Bu katkılar, çimentonun yerine ikame edilerek betona katılır. Hidratasyon yapmış çimento hamurunda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kompleks bileşikler oluştururlar. Bu katkılar betonun geçirgenliğini azaltarak dayanım ve dayanıklılığı artırarak betonu iyileştirir. Uçucu kül, silika dumanı, pirinç kabuğu külü, metakaolin ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılar puzolan olarak betonda kullanılır [21].

2.2 BETONDA DURABİLİTE (DAYANIKLILIK)

Beton durabilitesi, betonun bulunduğu ortamda başlangıçtaki orijinal biçiminin, kalitesinin ve hizmet vermesinin devamlılığı için hava koşullarına, kimyasal saldırıya, aşınmaya veya diğer bozulma mekanizmasına dayanma yeterliliği olarak tanımlanır [22]. Gowripalan [23], bir beton yapının dayanıklılığı, betonun çevreden farklı zararlı maddelerin geçişini engelleme kabiliyetinden büyük ölçüde etkilenir. Betonda dayanıklılık, yapının hizmet ömrünü azaltabilecek çok çeşitli sorunları kapsar.

Genellikle malzemelerin özellikleri değiştiğinde beton bozulmaya başlar. Malzeme bozulmaları zamanla giderek artarak, betonun yapısında hasar olacaktır [24]. Donatılı betonlarda (betonarme yapılar), korozyon ve harici kimyasal etkenler betonun zarar görmesinden asıl sorumludur. Bu sorunların onarım ve yenilenmesi en büyük maliyetlerin nedenidir [25].

Bozulma, betonun maruz kaldığı ortamdan yani dış etkenlerden veya betonun kendi yapısındaki iç nedenlerden kaynaklanabilir. Beton bozulmasının nedenleri fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak üçe ayrılır.

Dış etkenler, donma ve çözülmenin olumsuz etkileri, aşınma ve erozyon, toprakta, yeraltı sularında ve endüstriyel sıvılarda bulunan sülfatların saldırısı, yumuşak su ve deniz ortamlarının saldırısı, karbonatlaşma nedeniyle çelik donatı korozyonu ve / veya klorürlerin penetrasyonu. İç nedenler, alkali-agrega reaksiyonu bileşenlerinde bulunan klorür tarafından çelik donatını korozyonu ve agregaların sağlam olmamasıdır [26].

Genellikle, bir beton yapının bozulması, değişik çevresel faktörlerin ve yüklemenin birleşik etkisinden ortaya çıkmakta dolayısıyla tek bir dayanıklılık parametresinin kullanılması betonun kalitesini yeterince tanımlayamaz [24], [25].

Betonun bozulma mekanizması, betonun gözenek yapısı içindeki taşıma sistemleriyle etkilidir. İşlemin hızı öncelikle beton yüzeyindeki mikro çevre koşullarına, gözenek sisteminin mikro çevre ile olan bağlantılarına ve nüfuz eden maddelerin beton matrisi bileşenleri ile reaksiyonlarına bağlıdır. Beton bileşimi, özellikle bağlayıcı türü ve su-çimento oranı, belirli bir

ortamda bozulmaya karşı direnççi üzerinde etkiye sahiptir. Böylece tüm bu parametreleri kontrol eden ana faktörün betonun mikro yapısı olduğu açıkça ortaya konulabilir [25].

Beton veya harç üzerinde durabiliteyi belirlemek için eskitme süreçleri uygulanır. Yapılan bu deneylerden sonra beton veya harçta, hasar düzeyini, ürünlerini saptamak amacıyla hasar kontrol deneyleri yapılır.

Eskitme süreçleri: betonun durabilitisinde, betonun geçirimliliği, kimyasal etkilere karsı direnci, taze ve sertleşmiş betonda don etkisi, betonun termik, elektriksel özellikleri, bunların zaman içinde değişimi anlaşılır. Betondaki eskitme süreçleri arasında, ıslatma-kuruma, donma-çözülme, çözeltilerde bekletme şeklinde deneyleri saymak mümkündür.

Hasar tespit deneyleri: eskitme süreçleri sonunda hasarı belirlemek ve hasar tespiti için kontrol deneyleri yapılır. Bu deneyler fiziksel, kimyasal ve mekanik olabilir.

Fiziksel deneyler arasında, ağırlık, boy değişimi, kılcallık, geçirimlilik, porozite, özgül ağırlık, birim ağırlık deneyleri sayılabilir.

Kimyasal deneyler beton veya harcın bünyesindeki veya çözeltilerdeki kimyasal değişimi, oluşan yeni ürünleri, kristal yapıyı inceleyen X-Ray Difraktometresi, SEM, TEM ile yapılan deneyler ve kimyasal analizlerdir.

Mekanik deneyler ise eğilme, basınç dayanımı, elastiklik modülü tayini dir.

2.2.1 Durabilite endeksleri

Dayanıklılık endeksleri, fiziksel olarak ölçülebilen mühendislik parametreleridir. Bu endeksler inşa edilmiş yapıda betonu erken yaşlarda tanımlar ve çimento türü, su/bağlayıcı oranı, kür türü ve derecesi gibi özelikleri, üretim prosesi ve çevresel faktörlere karşı hassastır. Malzeme indekslemenin amacı, nispeten erken yaşta beton dayanıklılığı ile ilgili mikro yapı ve özellikleri için tekrarlanabilir bir mühendislik ölçülme sağlamaktır. Durabilite endekslerin bazıları şunlardır [27]:

I. Fiziksel parametreler (malzemenin fiziksel mikro yapısı)
- Sıvılar veya gazlara karşı geçirgenlik
- Su emme ve emicilik
- Gözeneklilik, gözenek aralığı parametreleri
- Mekanik parametreler
- Aşınma direnci

II. Kimyasal, fizyokimyasal ve elektrokimyasal parametreler
- Kalsiyum hidroksit içeriği
- Difizyon ve iletkenlik
- Dirençlilik
- Elektriksel taşınma

2.3 AGRESİF ORTAM KOŞULLARI

Beton için zararlı dış ortam genellikle kimyasal çevredir. Doğadaki sülfat, klörür, nitratlı sular korrozif kimyasal ortamı oluşturur. Doğada nehir, göl, ırmak, deniz sularının yanı sıra kimyasal ortamı oluşturur. Doğada nehir, göl, ırmak, deniz sularının yanı sıra kimya endüstrisinin neden olduğu kimyasal atık maddeler de aynı şekilde betonu tahrip eder. Kimya endüstrisinde üretim sırasında ve/veya sonunda oluşan tuz ve asit çözeltileri aşınmaya neden olur.

Zararlı ortamın sınıflandırılması değişiktir. Bu sınıflandırma; kimyasal bileşiğin anorganik veya organik oluşuna, korrozif maddenin katı, sıvı, gaz şeklinde bulunmasına, çözeltideki anyon ve katyonlara göre yapılabilir.

Genelde kimyasal dış ortam sülfat, klörür, nitrat v.s. şeklinde tuzların anyonuna göre yapılır. Betonu etkileyen organik maddeler ise bitkisel, hayvansal, metalik yağlar, yosunlar, bakteriler gibi organizmalardır. Bunlara ilave olarak asetik asit, lastik asit gibi organik asitler de sayılabilir.

Kimyasal etkilerin neden olduğu çözeltiler beş grupta toplanır;

I. Saf sular: çimentonun hidratasyon sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ çözerek boşluklu geçirimli beton oluşumunu kolaylaştırır.

II. Karbonatlı çözeltiler: havadaki CO_2 su içinde H_2CO_3'e dönüşür. Oluşan H_2CO_3 betona korrzif şekilde etki eder.

III. Klörür çözeltiler: çözeltideki klörür çimentodaki $Ca(OH)_2$'in çözünmesini kolaylaştırır, betonarme yapıdaki donatının korrozyonuna neden olur. Bu olumsuz etkilerin yanı sıra, sülfat iyonlarının C_3A'daki etkisini yavaşlatması olumlu bir etkime şeklidir.

IV. Nitratlı çözeltiler: nitratlar, çimentonun hidratasyonu sonunda oluşan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girer. Meydana gelen ürün, C_3A'nın hidratasyon ürünü ile reaksiyona girerek hacımca genleşmeye neden olan tuzlar oluşturur.

V. Sülfatlı çözeltiler: sülfatlı bileşiklere doğada çok sık rastlanır. Toprakta %0.01-0.05 hatta %5 oranında bile bulunabilir. Sülfat, az veya çok tüm sularda, temel sularında, akarsular, deniz suyunda, veya kimya endüstrisinde ürün ve/veya atık şeklinde, Na, k, Ca, Mg gibi alkali ve toprak alkalilerin tuzlarında bulunur.

Sıcaklık mevsimsel ve günlük sıcaklık döngülerini izlesede, yapı malzemelerinde her zaman bir sıcaklık gecikmesi meydana gelir. Betonarme bir yapının enine kesitleri boyunca sıcaklıktaki farklılıklar, elemanlarda hacim değişikliklerine neden olur. Bu sebeple, değişiklikler kapalı yapılardakinden daha büyüktür. Hacim değişikliğinin engellenmesi, yüzey ve döşeme plakalarının, kirişlerin ve kolonların çatlamasına ve korunmazsa, daha fazla bozulmaya yol açan su ve klorürlerin hızla girmesine neden olabilir. Buz çözücü tuzlar kullanıldığında, bu tuzların bir kısmı betonun çatlaklı yüzeyi tarafından emilir. Şiddetli ıslanma-kuruma, donma-çözülme döngüleri altında suyun donmaya neden olan en soğuk bölgeye doğru hareketi ile yüksek ozmotik ve hidrolik basınç meydana getirir.

2.3.1 Islanma-Kuruma

Islanma-kuruma döngüleri, beton gözeneklerinde sürekli nem hareketine neden olabilir [28], [29], [30]. Islanma-kuruma döngülerinin betonun bozulmasını ve dayanıklılık sorunlarını hızlandırabileceği bilinir. Çünkü bu olay, betonu sülfat, alkali, asit ve klorür gibi yıkıcı iyonların hareketine ve birikimine sebep olmaktadır.

Hong ve Hooton'a göre, betona klor girişini yöneten absorpsiyon, difüzyon, klorür bağlama, geçirimlik ve dispersiyon gibi çeşitli mekanizmalar vardır [28]. Emilim ve difüzyon, ıslanma-kuruma döngülerine maruz kalan yapılar için en önemli klor giriş mekanizmasıdır. Çelik donatıda klorür kaynaklı korozyon, agresif ortamlara maruz kalan betonarme yapının hizmet ömrünü etkileyen önemli bir nedendir.

Betonda çimentonun kısmi ikamesi için uygun katkı maddeleri kullanılmasa beton ıslanma-kuruma döngüleri ve karbonatlaşma sonucunda klorür saldırısına daha da dayanıksız olacak ve bu yapının servis ömrünün daha hızlı bitmesine neden olacaktır [31].

2.3.2 Donma-Çözülme

Donma ve çözülmeye maruz kalan beton içeriden veya dışarıdan zarar görebilir. Tuz çözeltisine maruz kalan betonda, dış hasar oluşur. Saf suya maruz kalan betonun iç çatlaklardan zarar görme olasılığı daha yüksektir [32].

Donma-çözülme hasarları, içsel donma hasarı veya tuz birikmesinden kaynaklanabilir. İç don hasarına karşı direnç, uygun toplam hava boşluğu hacminin yanı sıra uygun hava boşluğu boyutu ve aralığı dahil olmak üzere yeterli bir hava boşluğu sistemi sağlayarak artırılır. Hem geçirgenliği hem de büyük gözenek sayısını azaltmak için düşük su-çimento oranlı malzemeler ve uygun çimento katkı maddeleri kullanılabilir.

Beton dayanımının arttırılması aynı zamanda içteki don hasarına karşı direnci de arttırır. Yeterli bir sürüklenmiş hava boşluk sistemi sağlayarak, su/çimento oranını düşürerek kür uygulamaları sağlayarak tuz kireçlenmesi önlenebilir. Uçucu kül veya cüruf kullanımının tuz tortusu direncini azaltabileceğine dair bazı kanıtlarda vardır.

Tamamen su dolu gözeneklerde su donmaya başladığında ekstra hacmi olacak yeterli alan kalmadığı için donmamış suyun boş alanlara taşınması gerekir. Donmamış suyun çimento hamurunun kılcal ve jel gözeneklerinden akışı hidrolik bir basınç oluşturacaktır. Hidrolik basınç, gözenekler arasındaki mesafeden ve kılcal gözeneklerin çapından etkilenir; daha uzun mesafe ve daha ince gözenekler basıncı artırır. Yıkıcı basınç, ozmotik basınçla daha da artacaktır.

2.4 MİNERAL KATKILAR

Mineral katkılar, belirli özellikleri iyileştirmek veya belirli özellikleri elde etmek için betonda kullanılan çok ince öğütülmüş malzemelerdir ve iki gruba ayrılır;

I. İnert veya yarı inert katkılar,
II. Puzolanik veya gizli hidrolik katkılar. Tip II katkılara puzolan da denir [33].

Puzolan, doğal ve yapay şekilde içinde aktif halde silis bulunduran malzeme olarak tanımlanır. Puzolanlar kendi başına bağlayıcı özellik göstermezler. Ancak normal koşullarda kireç veya çimento ile karıştırıldığında su ile yaptığı reaksiyon sonunda çözülmeyen, kararlı, bağlayıcı madde özeliği kazanan SiO_2 ve Al_2O_3 oluşur [34].

Uçucu kül, cüruf, mikro silika ve pirinç kabuğu külü gibi puzolanlar büyük toplam yüzey alanına sahiptir. Genellikle, ince parçacıklar iri parçacıklardan daha hızlı reaksiyona girer ve bu da erken yaşlarda daha yüksek dayanıma yol açar.

SiO_2, Al_2O_3 ve CaO içeriği gibi diğer bileşikler de puzolanların reaktivitesini etkiler. Puzolanların temel kimyasal bileşenleri olan SiO_2 ve Al_2O_3, çimento hidratasyon ürünü kireç $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat ve alüminat hidratlarını oluşturur. Böylece betondaki boşlukları doldurur, geçirgenliği düşürür, büzülmeyi, sünmeyi, klorür girişini ve sülfat saldırısını azaltarak uzun süreli mukavemeti ve dayanıklılığı artırır. Puzolanik reaksiyon, ara yüzey bölgesinin kalınlığını ve gözenekliliğini azaltarak, hamur ve agrega arasındaki bağı daha da güçlendirir [35], [36].

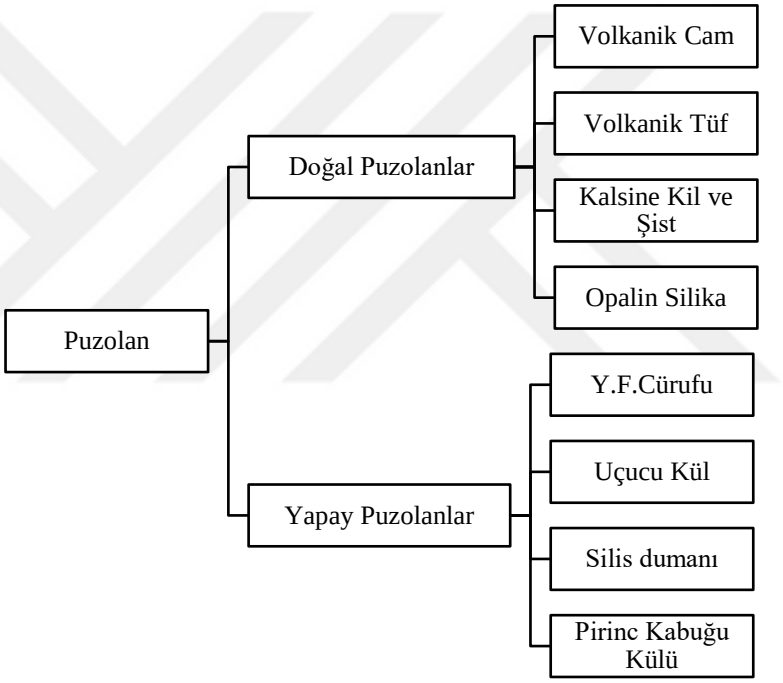
Puzolanların dayanıma katkıları, incelik ve cam içeriğine ve değiştirme oranlarına bağlı olan puzolanik reaktivitelerine göre değişir. İnce partiküller, hidratasyon ürünlerinin kristalizasyonu için çekirdeklenme yerleri olarak hareket ederek, mukavemeti arttırır [35], [37].

Normal sıcaklıklarda, çimento ve puzolan arasındaki reaksiyon genellikle yavaştır. Bir puzolan reaktivitesini hızlandırmak için üç yöntem geliştirilmiştir:

I. Mekanik işlem - puzolan, öğütülerek inceliğini geliştirerek daha aktif hale gelir,
II. Kimyasal aktivasyon - puzolanın aktivitesi kimyasallar eklenerek hızlandırılabilir

III. Isıl işlem - reaksiyon, daha yüksek sıcaklıkta ve / veya daha yüksek basınçta kürlenerek hızlandırılabilir [38].

Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılır. Doğal grupta volkanik cam, volkanik tüf, kalsine kil, şist ve opalin silika dan, yapay grup ise uçucu küller, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin ve pirinç kabuğu külünden oluşur. 500 ila 800^{o} C arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılarak, doğal puzolanların puzolanik reaktivitesi de iyileştirilir [39], [40], [41], [42], [43].



Şekil 2-1: Puzolanların Sınıflandırılması

2.4.1 Doğal Puzolanlar

Doğal Puzolan, volkanik kül veya süngertaşı, opalin ve şeyller, tüfler ve bazı diyatomlu topraklar, puzolanik özelliklere sahip ham veya kalsine edilmiş doğal bir malzemedir [44].

Mehta, doğal puzolanları kireç ile reaktif bileşenine göre, değişmemiş volkanik cam, volkanik tüf, kalsine kil veya şist, ham veya kalsine opalin silika olmak üzere dört şekilde sınıflandırmış [45].

Ham veya işlenmiş doğal puzolanlar, hidrolik-çimento beton ve harç üretiminde öğütülmüş şekilde çimentonun bir bileşeni veya betona katılan mineral katkı maddesi olarak kullanılır [44].

Doğal puzolanların özellikleri bileşenlerin oranları ve aktif maddelerin mineralojik ve fiziksel yapısı nedeniyle, önemli ölçüde değişiklik gösterir. Çoğu doğal puzolan silis dışında, kalsiyum hidroksit ve alkalilerle (sodyum ve potasyum) reaksiyona girecek olan alümina ve demir oksit gibi önemli miktarda bileşen içerir.

Puzolanik aktivitesi sadece silika, alümina ve demirin varlığını ölçerek belirlenemez. Amorf malzeme miktarı genellikle doğal puzolanın reaktivitesini belirler. Doğal bir puzolanın bileşenleri, amorf reaktif malzemelerden yavaş yavaş reaksiyona girecek veya hiç reaksiyon göstermeyecek kristal ürünlere kadar çeşitli formlarda olabilir. Genellikle, amorf silika, kalsiyum hidroksit ve alkalilerle, kristalin formdaki (kuvars) silikadan daha hızlı reaksiyona girer.

Volkanik camlar ve zeolitik tüfler, kireçle karıştırıldıklarında, kalsiyum silikat hidratlar (CSH) ile kalsiyum hidrate alüminatlar ve kalsiyum alüminosilikatlar üretirler. Bu puzolanların puzolanik aktivitesini iyi olduğu görülmüştür. Oysa doğal killer ve şeyller puzolanik değildir veya aktivitesi zayıftır. Çünkü, kil mineralleri kireçle kolayca reaksiyona girmez bu yüzden reaksiyona girmek için yüksek sıcaklıklarda kalsinasyonla kristal yapıları kısmen veya tamamen değişmesi gerekmektedir.

Doğal kökenli puzolanlar büyük projelerde kütle betonda kullanılmıştır. Doğal puzolanlar reaktivitelerine bağlı olarak betonda çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Doğal puzolanlar çimentosunun kısmi ikamesi olarak veya çimentoya katkı olarak kullanılabilir. Bazı doğal puzolanlar, uçucu külle hemen hemen aynı şekilde kullanılmıştır. Metakaolin gibi yüksek reaktiviteye sahip doğal puzolan silis dumanına benzer şekilde kullanıldığı da bulunmuştur.

Doğal puzolan kullanma miktarı ve oranı, puzolanın aktivitesine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Bazı doğal puzolanlar, betondaki toplam bağlayıcı malzemenin kütlesine bağlı olarak %15 ila% 35 aralığında kullanılır. Daha reaktif doğal puzolanlar, toplam bağlayıcı malzemenin kütlesine göre % 5 ila %15 gibi daha düşük oranlarda kullanılır.

2.4.2 Yapay Puzolanlar

2.4.2.1 Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, demir çelik fabrikalarının bir yan ürünüdür. GGBS, çimentosu ve diğer puzolanik malzemelerle birlikte dayanıklı beton yapılar yapmak için kullanılır.

Yüksek Fırın cürufunun kimyasal bileşimi oldukça değişken olduğundan, cürufunun mineral bileşimi de değişir. Olivin, Merwinite, C_3S, C_2S, C_4AF, C_2F, RO fazı (CaOFeO-MnO- MgO katı çözelti) ve serbest CaO, çelik cürufunda yaygın minerallerdir. Kimyasal bileşimi, CaO %45-60, SiO_2 % 10 -15, Al_2O_3% 1-% 5, Fe_2O_3 %3-9, FeO % 7-20, MgO % 3-13 ve P_2O % 1-4'ten oluşur [46]. C_3S, C_2S, C_4AF ve C_2F'in varlığı cürufunun hidrolik özelliklerini onaylamakta. Bununla birlikte, çelik cürufundaki C_3S içeriği çimentodakinden çok daha düşüktür. Bu nedenle, çelik cürufu düşük mukavemetli bir hidrolik malzeme olarak kabul edilir [47], [48].

Su varlığında cürufun çok yavaş reaksiyona girmesinden dolayı tek başına pratik kullanımı çok azdır. Esasen cürufun hidrolikliği camsı yapısı içinde kilitlidir (yani gizli hidrolikliğe sahiptir) ve bu reaktiviteyi serbest bırakmak için bir tür "aktivasyon" gereklidir. Genellikle sülfatlar ve / veya alkaliler olan aktivatörler, cüruf ile kimyasal olarak reaksiyona girerek sistemin pH'ını yükseltir. Bu artış, camsı yapıyı "bozar" ve cürufun aktivasyonu ile sonuçlanır. Pratikte, çimento hem alkali hem de sülfat içerdiğinden, cüruf ile karıştırılarak aktivasyon sağlanır [49].

2.4.2.2 Silis Dumanı

Silis dumanı veya Microsilica, silikon ve ferrosilikon alaşımlarının üretiminde elektrikli fırında yüksek saflıktaki kuvars ve kömürden elde edilir [50]. Yüksek su / çimento oranıyla ilişkili basınç dayanımında beklenen azalma, gerekli çökmeyi koruyan ve üç gün ve sonrasında artan bir basınç dayanımı gösteren süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla önlenebilir [51].

Silika dumanı kullanımıyla ilgili bir dizi sorun vardır. İlk olarak, inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle, toz halindeki kullanım konusunda insan sağlılığı ile ilgili korkular var. İkincisi, silika dumanı çok pahalı bir üründür [49], [50].

Betona silis dumanı ilavesi, basınç dayanımını arttırmada, kuruma rötreyi azaltmada, aşınma direncini arttırmada, çelik donatı ile aderansı arttırmada ve geçirgenliği düşürmede etkilidir [52].

2.4.2.3 Pirinç Kabuğu Külü

Pirinç değirmenlerinin atık ürününden elde edilir. Yüksek reaktif puzolanik katkıdır. Kristal olmayan formda kabuk tutan silikanın kontrollü yakılmasıyla üretilebilir. Pirinç kabuğunun inceliği 50-60 m^2/ gr aralığındadır [21].

Mazlum'a göre, pirinç kabuğu, çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığı yapısındaki SiO_2 yandıktan sonra elde edilen kül hızlı bir şekilde soğutulursa amorf, yavaş bir şekilde soğutulursa kristal SiO_2 oluşur. Amorf şekilde özgül yüzeyi büyük değerler alır. Dolayısıyla puzolanik aktivitesi yüksektir [34].

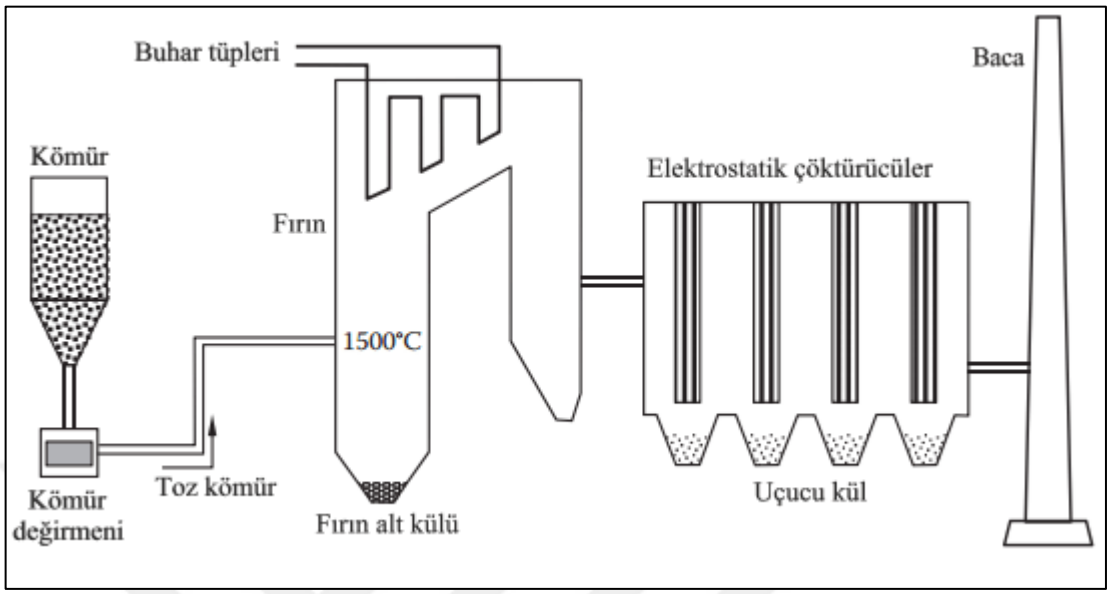
2.4.2.4 Uçucu Kül

Bu tez kapsamında uçucu kül kullanıldığı için bölüm 2.5'te bu mineral katkı ile ilgili özelikler ve betondaki etkileri daha detaylı şekilde anlatılmıştır.

2.5 UÇUCU KÜL

2.5.1 Uçucu Külün Tanımı

Uçucu kül, elektrik üretmek için pülverize kömür yakan elektrik santrallerinde atık olarak çıkar [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59]. Elektrik enerjisi üretim tesislerinde kömürün yakılması iki tür kül üretir. Biri, baca gazları ile yanma odasının tepesine taşınabilecek kadar ince ve hafiftir, diğeri ise yanma odasının altına ve yanlarına düşer. Yanma odasının dibine ve yanlarına düşen kül, taban külü olarak, baca gazları ile yanma odasının üstüne taşınan kül ise uçucu kül olarak isimlendirilir (Şekil 2.2).



Şekil 2-2: Uçucu Külün elde edilmesi

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, kömür, önce öğütme değirmenlerinde toz haline getirilerek fırının yanma bölgesine hava ile gönderilir, değirmende toz haline getirilir. Bu bölgede kömürün yanıcı bileşenleri (esas olarak karbon, hidrojen ve oksijen) ateşlenir ve yaklaşık 1500°C'ye ulaşan sıcaklıklara erişilir. Bu sıcaklıkta kömürle ilişkili yanmayan inorganik mineraller (kuvars, kalsit, alçıtaşı, pirit, feldispat ve kil mineralleri) ergir ve küçük sıvı damlacıklar oluşturur. Bu damlacıklar yanma bölgesinden gazlarla birlikte taşınır ve hızla soğur, odadan çıkarken küçük küresel camsı parçacıklar oluşturur. Katı partiküller, mekanik ve elektrikli çökelticiler veya torbalar kullanılarak gazlardan ayrılır. Gazlarla fırından ayrılan kül partiküllerine uçucu kül denir ve bu malzeme betonunda ikame malzemesi olarak kullanılır. Uçucu kül, bazı ülkelerde pülverize yakıt külü (PFA) olarak da adlandırılır. Daha ağır yanmamış kül parçacıkları fırının dibine düşer ve bu malzemeye taban külü denir, bu tür bir malzeme genellikle beton için çimento ikame malzemesi olarak kullanıma uygun değildir, ancak duvar bloğu imalatında kullanılır [60].

Elektrik enerjisi endüstrisi ilk kez 1930 yılında uçucu kül terimini kullanmıştır, ancak Kuzey Amerika'da betondaki olası kullanımına dair her şeyi kapsayan bir bilgi ilk kez 1937 yılında rapor edilmiştir [61]. Daha sonra, uçucu kül kullanımı ve dolayısıyla bertarafından kaynaklanan çevre kirliliğine çözüm sunan birçok çalışma ile uygulamada yer almıştır.

Uçucu kül kullanımına ilişkin Ahmaruzzaman' un yaptığı çalışmada, uçucu külün maden dolgusu, yol alt tabanı, beton üretimi, zeolit sentezi, organik bileşiklerin giderilmesi için düşük maliyetli bir adsorban, boyalar ve ağır metallerde kullanabileceğini belirlemiştir [62].

2.5.2 Uçucu Kül Özelikleri

Uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, yakılan kömürün niteliğine ve üretilen uçucu külün yakılması ve geri alınması şekline ve sürecine bağlıdır.

2.5.2.1 Fiziksel Özelikleri

Uçucu kül, farklı boyut ve şekillerde parçacıklardan oluşur. Parçacıkların çoğu, küresel veya yuvarlak bir şekildedir, diğerleri düzensiz veya köşelidir, kuvars ve diğer yanmamış parçacıkları içerir [63].

Uçucu kül partikülleri katı veya içi boş formdadır ve genellikle camsı pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Uçucu külün bu şekli ve yüzey kalitesi, betonda daha az su ile sağlanan işlenebilirliği artırmaktadır [63].

Uçucu kül partikül boyutu, 1μm'den küçük, 100μm'den büyük olabilen bir aralıktadır ve özgül ağırlığı 1.9 ile 2.8 g/cm^3 arasındadır [64]. Uçucu külün özgül yüzey alanı 170 ila 1000 m^2/kg arasında değişir ve aynı zamanda uçucu küldeki yanmamış karbon miktarı ile değişen siyah, gri ve bronz rengi gibi çeşitli renklere sahiptir [62].

Uçucu külün ortalama partikül boyutu 20 μm'den küçüktür. Parçacıkların kütlece yaklaşık %10-30'u 45 μm'den daha büyüktür [65].

2.5.2.2 Kimyasal Özelikler

Uçucu külün bileşenleri Fe_2O_3, CaO, Al_2O_3 ve SiO_2 dır. Uçucu külün diğer kimyasal bileşenleri Na_2O, MgO, TiO_2, SO_3, K_2O ve yanmamış karbondur (C) [61].

Uçucu külün kimyasal bileşimi, onu üreten kömüre ve yanma koşullarına bağlıdır [66].

Antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasıyla üretilen F sınıfı uçucu kül, düşük kalsiyum oksit (CaO), ancak yüksek miktarda alümina (Al_2O_3) ve silis (SiO_2) içerir. Linyit ve alt bitümlü kömürün yakılmasıyla üretilen C sınıfı uçucu kül ise daha düşük alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) ancak yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) içerir [63].

Uçucu kül soğuma hızının, partiküllerin cam veya kristal şeklinde oluşmasında etkilidir. Hızlı bir soğutma, uçucu kül partiküllerin camsı parçacıklar şeklinde oluşmasına neden olur ve bu kütlesinin % 50-90'ını oluşturur. Yavaş soğutma, uçucu kül kütlesinin yaklaşık %5-50'sinin kristal parçacıklarını oluşturur [66], [67].

2.5.3 Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu külün kömürün türüne bağlı olarak bileşimi Tablo 2.2'de verilmiştir. Bitümlü, yarı bitümlü ve linyitin uçucu kül bileşeni değişmektedir.

Tablo 2-2: Farklı kömür türlerinden üretilen uçucu külün normal kimyasal bileşim aralığı

Bileşenler	**Bitümlü (%)**	**Yarı Bitümlü (%)**	**Linyit (%)**
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerinin değişkenliği, kömür türü ve kaynağı, kazan tipi, yanma sırasındaki koşullar, emisyon kontrol cihazlarının tipi, depolama ve işleme yöntemleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin herhangi birinde meydana gelen değişiklikler, uçucu külün özelliklerini, dolayısıyla mühendislik özelliklerini etkiler.

Kömür türü, uçucu kül özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Genel olarak SiO_2, Al_2O_3 ve serbest kireç (CaO) miktarları arttıkça uçucu külün puzolanik aktivitesi artar.

ASTM C 618 uçucu külü kimyasal yapısına göre F ve C olmak üzere iki grupta sınıflandırır [68].

F sınıfı uçucu kül, yanan antrasit ve bitümlü kömürlerden üretilir. Bu uçucu kül silisli veya silisli ve alüminyumlu bileşenlere sahiptir ve bağlayıcı değeri çok az veya hiç yoktur, ancak ince öğütülmüş formda ve nemin varlığında normal sıcaklıkta $Ca(OH)_2$ ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özeliğine sahip olur. F tipi uçucu kül ’de silika, alümina ve demir oksit içeriği toplam kütlenin en az %70'idir ve en çok %10 CaO bulunur.

C sınıfı uçucu kül, normalde linyit ve yarı bitümlü kömürlerden üretilir ve genellikle önemli miktarda CaO içerir. C sınıfı uçucu kül, puzolanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra bağlayıcı özeliğe sahiptir. C sınıfı uçucu külünde, toplam kütlenin en az %50 SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oluşturur ve CaO içeriği yüksektir (%10-30) [69].

Uçucu küllerin sınıflandırılması için ASTM C 618'de gereken kimyasal içerik Tablo 2.3'te gösterilmiştir [68].

Uçucu külün kimyasal bileşimi rengini etkiler. Uçucu külün rengi açık kahverengi veya kremadan koyu kahverengi veya griye kadar değişir. Renk, CaO ve uçucu külün organik içeriğini tahmin etmeye yardım eder. Daha açık renkli uçucu kül genellikle daha yüksek bir CaO yüzdesine sahiptir. Daha koyu renkler daha yüksek organik içerik olduğunu gösterir [70].

Uçucu küllerin sınıflandırılması için başka bir standart EN-197 dir. Bu standarda göre iki tür uçucu kül vardır; silisli uçucu kül V tipi veya kalkerli uçucu kül W tipi [71].

V tipi uçucu kül esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3’ten oluşur ve geri kalanı Fe_2O_3 ve diğerleridir. Bu tip uçucu külde CaO içeriği %10'dan az, SiO_2 ise % 25'ten fazla olmalıdır.

W tipi uçucu kül esas olarak reaktif kireç, silika ve alüminadan oluşur, gerisi demir oksit ve diğerleridir. Bu tür uçucu küllerde reaktif kireç ve silis içerikleri sırasıyla % 10 ve % 25'ten fazla olmalıdır [72].

Tablo 2-3: Uçucu külün ASTM Standartlarına göre sınıflandırılması

Kimyasal İçerik	**Uçucu Kül Sınıfı**	
	F	C
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	70	50
SO_3, max (%)	5	5
Nem, max (%)	3	3
Kızdırma Kaybı, max (%)	6	6

2.5.4 Uçucu Külün Reaksiyonu

Çimento hidratasyonu, çimento suyla karıştırıldığında meydana gelen ekzotermik bir reaksiyondur. Bu reaksiyon, su, çimento bileşenini oluşturan alüminatlar ve silikatlar ile temas ettiğinde başlar ve kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jeli ve $Ca(OH)_2$ gibi hidratasyon ürünleri üretir [50].

Çimentoda hidratasyonun oluşma hızı çimentonun mineralojik bileşimine bağlıdır [73]. Hidratasyon reaksiyonu, yüksek C_3A ve düşük C_3S içeren çimentolarda daha fazla ısı oluşumuna ve daha kısa priz süresine, ancak düşük C_3A ve yüksek C_3S çimentolarda daha az ısı oluşmakta ve daha uzun priz süresine sahiptir [73].

Çimentonun kısmen uçucu kül ile yer değiştirilmesinde çimento hidratasyonu olumlu yönde etkilenir [74]. Hidratasyon ve sertleştirme işlemi sırasında uçucu kül ve çimentonun etkileşimi karmaşıktır. Bununla birlikte, uçucu külün puzolanik reaksiyonunun, çimento hidratasyonunda üretilen serbest kireç veya portlandit $Ca(OH)_2$ ile uçucu külün camsı fazının kalsiyum silikat ve alüminat hidratlar üretmesi şeklinde olabileceği tespit edilmiştir.

Uçucu külün çimento ile reaksiyonu, karışım suyu eklendiğinde hemen başlamaz. Bu pasiflik süresi boyunca, uçucu kül esas olarak çimento hidratasyonundan kaynaklanan kireç ve C-S-H için çökelme yerleri olarak işlev görür. Bu durgun dönemden sonra, reaksiyon hızı açısından yavaş bir süreç olan puzolanik aktivite başlar. Bu gecikmiş uçucu kül reaksiyonu, uçucu kül

içeren betonun taze halindeki farklı davranışın temelini oluşturur. Uçucu kül başlangıçta az çok inert malzeme gibi davrandığından, esasen daha yüksek bir su-çimento oranı (S/Ç) üretir. Dolayısıyla beton başlangıçta daha az güçlü olacak ve daha yüksek geçirgenliğe sahip olacaktır [75], [76], [77].

Puzolanik reaksiyon başladıktan sonra, uçucu külün mukavemet gelişimine katkıda bulunması daha yüksek S/Ç oranına bağlı olumsuz etkileri azaltır. Reaksiyonun kapsamı, külün bileşiminin ve fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonudur, incelik ve ince yüzey alanı özellikle önemlidir.

Puzolanik reaksiyonun başlaması, külün cam fazının ayrışması ile ilişkilidir. Camsı faz malzemedeki aktif bileşen olduğundan, camın kristal fazlara oranı birinci derecede önemlidir.

Uçucu külün betondaki puzolanik aktivitesi, büyük ölçüde gözenek suyunun alkalinitesi ile belirlenir. Genel olarak, camsı fazın etkili bir şekilde çözünmesinden önce 13'ten daha büyük bir pH'a ulaşılması gerekir. Çimentonun hidratasyon reaksiyonu, gözenek suyuna $Ca(OH)_2$ salgılayarak pH'ı yükseltir, dolayısıyla çimento hidratasyon reaksiyonunun hızı uçucu külün hareketsiz süresinin uzunluğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

Puzolan etkisi ve alkali oluşumu aşağıdaki faktörlere bağlıdır [76],

- Uçucu kül ve çimentonun kimyasal bileşimlerinde alkali içeriği
- Çimentonun inceliği, incelik fazla olursa, hidratasyon oranı o kadar yüksek olur, dolayısıyla gözenek suyunun pH'ı o kadar hızlı artar.
- Yüksek bir S/Ç oranında, gözenek suyunun alkalinitesi düşük olur ve bu nedenle puzolanik reaksiyonu geciktirir.
- Yüksek sıcaklık, artan bir alkalinite gelişimine ve dolayısıyla uçucu külün camsı fazının daha hızlı reaksiyona girmesine neden olur.
- Kür etkisi uçucu küllü betonda çok etkilidir.

Uçucu külün gözenek suyunda çözünmesi, sudaki serbest kireç konsantrasyonunun azalmasına neden olur. Serbest kireç içeriğini azaltmanın ve aslında onu çimento esaslı bir bağlayıcı malzemeye dönüştürmenin ve böylece betonun mukavemet gelişimine yardımcı olur.

Serbest kireç bittiğinde, puzolanik reaksiyon da biter. Çimento hidrasyonundan kireç açığa çıktığı zaman içinde, uçucu kül-kireç reaksiyonu mukavemette bir artışa neden olur. Yine de çimentonun hidratasyonu ve bunun sonucu olarak puzolanik reaksiyon zamanla yavaşlayacaktır.

2.6 UÇUCU KÜLÜN BETONA ETKİLERİ

2.6.1 Uçucu Külün Taze Betondaki Etkileri

2.6.1.1 Beton işlenebilirliği

Taze beton, betonun plastik haldeyken gösterdiği şeklidir. Taze betonun özellikleri büyük ölçüde nihai sertleşmiş betonun özelliklerini belirler [16]. Taze betonun belirli nitelikleri tutarlılık, hareketlilik, akışkanlık, pompalanabilite, sıkıştırılabilirlik, sertlik vb. terimlerle tanımlanır kıvam ve işlenebilirlik olarak bilinir [16], [50].

Uçucu külün fiziksel özellikleri, taze betona büyük katkı sağlar, partiküllerinin küresel şekli betonun işlenebilirliğini arttırır. Betondaki uçucu kül yüzdesi ne kadar büyükse, agregaların yağlanması o kadar iyi olur ve partiküllerin "bilyeli yatak etkisi" ile beton akışı sağlanır [78].

Bouzoubaa ve diğ, çimentoya uçucu kül ile kütlesel ikamesi ile % 30, 40 ve 50 katarak araştırmıştır. Uçucu kül arttıkça, belirli bir çökmeye ulaşmak için gereken su ihtiyacının azaldığını, ve sonuç olarak su/bağlayıcı oranının da azaldığını göstermiştir [79].

Kearsley ve Wainwright on dokuz farklı kaynaktan elde edilen otuz dört uçucu külü araştırmıştır, farklı uçucu küller için su gereksiniminin külün karbon içeriğinin bir fonksiyonu olduğunu belirlemiştir; karbon içeriği ne kadar yüksekse su talebi o kadar yüksek olduğu belirtmiştir [80].

2.6.1.2 Hava İçeriği (sürüklenmiş hava miktarı)

Karbonun adsorbe etmesi nedeni ile, ince öğütülmüş malzemeler, betona sürüklenen hava içeriğini azaltmaktadır. Hava sürüklenmesi istenen herhangi bir betona uçucu kül veya doğal puzolan ilave edildiğinde, hava içeriği testleri ile hava miktarı kontrol altına alınmalıdır.

Hava sürükleyici katkıların etkinliği, uçucu kül içeriğinin artmasıyla azalır. Uçucu küldeki karbon içeriği daha yüksek olduğunda, daha fazla hava sürükleyici katkı kullanılmalıdır [81].

Bilodeau ve diğ. tarafından yapılan bir araştırmaya göre, uçucu kül ve çimentonun özelliklerinin hava sürükleyici katkının miktarını güçlü bir şekilde etkilediği görünmüştür. Çok yüksek karbona sahip uçucu kül için daha yüksek dozajlarda hava sürükleyici katkı gereklidir [82].

2.6.1.3 Terleme

Çoğu uygulamada, uçucu kül, betonun terlemesini azaltır. Uçucu külün bu etkisi, kullanılan uçucu kül türüne göre ve beton karışımlarının özelliklerine göre değişir.

Uçucu külü fazla olan betonlarda, ince taneciklerin fazla olması ve düşük su / ç oranı nedeniyle genellikle katkısız betonlara göre daha az terleme ve ayrışma gösterdiği belirtilmiştir [65]. Bununla birlikte, terlemedeki azalma, plastik büzülme çatlamasına yol açar, sıcak, kuru, rüzgarlı koşullarda sorun olur ve uçucu kül fazla kullanıldığında daha da etkilidir [83].

2.6.1.4 Priz Süresi

C ve F sınıfı uçucu külün beton priz süresinde etkileri birbirinden farklıdır. Genellikle F sınıfı uçucu kül betonun priz süresini uzatır [84].

Daha yüksek kalsiyumlu uçucu kül genellikle düşük kalsiyumlu uçucu küllere göre daha az priz geciktirir. Çünkü muhtemelen uçucu külün hidrolik reaktivitesi artan Ca içeriği ile artar [85]. Zang ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada ise,% 2 nano-silika eklenmesi uçucu küllü betonunun priz başlangıç ve sonu sürelerini sırasıyla 90 dakika ve 100 dakika azalttığını göstermiştir [86].

Uçucu külün soğuk havada betonda kullanımı, hızlı priz alan Tip III çimentosu kullanılarak ayarlanması ve $CaCl_2$, klorür içermeyen hızlandırıcılar ve orta seviye su azaltıcılar sıvı katkılarla başarıyla kullanılmıştır [87], [88].

2.6.1.5 Hidratasyon Isısı

Çimento kısmen uçucu kül ile değiştirildiğinde, çimento ile su arasındaki hidratasyon azalır. Uçucu külün, erken yaştaki hidratasyon ısısına katkısı, çimenton ağırlığının %15 - 30'una etkilediği şeklinde düşünülmektedir [89].

Puzolanik reaksiyon hızının hidratasyon hızından daha yavaş olduğu, bu nedenle çimentonun kısmen uçucu kül ile yer değiştirildiğinde, uzun sürede ısı açığa çıkmasına neden olur. Isı çıktıkça dağıldığı için beton sıcaklığı daha düşük sıcaklıkta kalır [90].

Kritik ilk 24 saatte, yaklaşık %10 çimentonun uçucu kül ile değiştirilmesi, herhangi bir mukavemet veya dayanıklılık özelliklerinden ödün vermeden hidratasyon ısısını %19 azaltabilir. Artan hidratasyon hızının neden olduğu zarar verici etkiler, çimento ağırlığının uçucu kül ile değiştirilmesi azaltılabilir.

Yaygın kür sıcaklıklarında, 20-35°C arasında, uçucu kül hidratasyonu erken dönemlerde geciktirir, ancak daha sonraki dönemlerde çimentonun hidratasyonu hızlanır. 50ºC gibi yüksek kür sıcaklıklarında ve yüksek uçucu kül oranlarında, uçucu kül, hidratasyon için daha çok su tüketir. Bu nedenle uçucu külün puzolanik reaksiyonu nedeniyle, çimentonun hidratasyonunu daha sonraki aşamalarda geciktirir [91].

2.6.2 Uçucu Külün Sertleşmiş Betondaki Etkileri

Beton, işlenebilir plastik bir malzemeden sertleşmiş bir kütleye dönüşürken özellikleri de değişir. Sertleşmiş beton, basınç dayanımı, çekme dayanımı, büzülme, elastik özellik, sünme, termal ve taşıma özellikleri gibi mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahiptir [92].

Sertleşmiş betonun özellikleri, performansını zayıflatan veya iyileştiren bazı faktörlere bağlıdır. Örneğin betonun basınç dayanımı, su-çimento oranı, sıkışma, yaş, kür şekli, sıcaklık, agrega tipi ve boyutu, çimento tipi, miktarı ve katkı maddesi türü gibi faktörlere bağlıdır [50].

Uçucu külün betona eklenmesi, diğer sertleşmiş beton özelliklerinin yanı sıra basınç dayanımını da etkiler [61]. Uçucu kül ilavesi, çimento miktarında ve hidratasyon için gerekli su miktarında bir azalmaya neden olarak betonun basınç dayanımını arttırır [61].

Uçucu külün belirli fiziksel, kimyasal ve reaktivite özellikleri betonda mukavemetin kazanılma oranını etkiler. C sınıfı uçucu kül daha hızlı tepki verir ve bu nedenle betonda erken dayanım gelişimine yol açarken, F Sınıfı daha yavaş tepki verir ve betonda geç dayanım gelişimine neden olur [93].

Betonda kullanılan uçucu külün öğütülerek inceliğini artırma eylemi, betonun basınç dayanımını ve diğer mekanik özelliklerini de arttırır [94].

Birçok araştırmacı uçucu külün betonda kullanımının artmasıyla, betonun mekanik ve dayanıklılık özeliklerine etkisini araştırmıştır.

2.6.2.1 Basınç Dayanımı

Mansur, 28 ve 90 günlük kürde, çeşitli uçucu küllü beton karışımlarında basınç dayanımının zamanla değişimini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, C Sınıfı uçucu kül kullanımı, betonların basınç dayanımını artırmaktadır. Çimentoya %10 C Sınıfı uçucu kül ile basınç dayanımını artırır ve bu gelişme uçucu kül yüzdesi ile artar [95].

Nath ve diğ. yaptığı çalışmada uçucu külün betona katılmasının, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında daha erken yaşta dayanımı azalttığını göstermiştir. Ayrıca % 30 uçucu kül içeren betonların % 40 uçucu küllü betonlara göre daha yüksek mukavemete gösterdiğini belirtmiştir. 56 güne kadar kontrol betona göre her iki seride dayanımın daha yüksek oranda geliştiğini göstermiştir [96].

Serdar ve diğ, ASTM C sınıfı uçucu kül katkısının betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Uçucu kül katkısının % 30'unun üzerindeki beton karışımlarında uzun süreli dayanımının önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdi [97].

Öner ve diğ., çimentonun yaklaşık % 40'ına kadar uçucu kül katkısı ile dayanımın arttığını ve daha sonra artan uçucu kül oranı ile azaldığını belirtmiştir [98].

Jingyi Zhu, C sınıfı uçucu kül içeren betonun 7 günlük dayanımının % 35 uçucu kül katkısında maksimum olduğunu, F sınıf uçucu külün ise % 25 çimento değişiminde maksimum basınç dayanımına ulaştığını göstermiştir.

Vasundhara çalışmasına göre %40 uçucu külün karışıma katılmasıyla betonun dayanımın artırır, çalışmanın devamı %50 ve 60 uçucu kül oranlarında katılması, kontrol betona göre dayanımın düştüğünü göstermiştir [99].

Rafat Siddique, betonda kısmen çimento ikamesi ile yüksek hacimde F Sınıfı uçucu kül kullanımının 28 günde betonun mekanik özelliklerini azalttığını belirtmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, F Sınıfı uçucu külün, prefabrik elemanlarda ve betonarme yapılarda kullanılmak üzere betonda %50 çimento ikamesi seviyesine kadar uygun şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir [100].

Poon, yüksek mukavemetli beton üretmek için karışımı su / bağlayıcı oranını 0.30'dan az olarak yüksek hacimde uçucu kül ile yapılmıştır. 0.24 su / bağlayıcı oranında, % 25 uçucu kül içeren karışımın 3. ve 7. günde daha düşük, 28 ve 90. günlerde daha yüksek basınç dayanımı gösterdiğini belirtmiştir [101].

Sivasundaram ve diğ., ortalama basınç dayanımının 28 günde 31,2 N/mm^2 ve 91 günde ortalama dayanımın 42,3 N/mm^2 olduğunu bildirmişlerdir. 28 günde uçucu küllü betonun basınç dayanımının kontrol betonunun %70 - 90'ı arasında değiştiğini belirtmiştir [102].

Aggarwal, 90 gün veya daha fazla yaşta, çimentonun kısmi katkısı olarak % 15-20 uçucu külle betonun mukavemetinin, sadece çimentodan oluşan betonun mukavemeti ile karşılaştırılabilir hale geldiğini belirtmiştir [103].

Naik ve diğ. uçucu külün betonun mekanik ve dayanıklılık özeliklerindeki etkisini araştırmışlar. Bu araştırmada, kontrol olarak uçucu külsüz Tip I çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun % 35 oranında ASTM C sınıfı uçucu kül ile değiştirilmiş ve % 40 hem C sınıfı ve hem de F sınıfı uçucu kül ile çimentonun değiştirildiği betonlar üretilmiştir. C ve F sınıfı içeren üçlü karışımlar, sırasıyla %75 / 25, %50 / 50, %25 / 75 olarak oranlanmıştır. Beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelikleri belirlenmiştir. Dayanıklılık özelliklerin belirlenmesi için, aşınma direnci, kuruma büzülmesi, klorür iyon penetrasyonunun elektriksel tahmini ve tuz ölçekleme direnci gibi testler yapılmıştır. Hem mekanik hem de dayanıklılık özellikleri testleri için sonuçlar, C ve F sınıf'ının

üçlü karışımlarının, kontrol beton ve C sınıfı ve çimentonun ikili karışımları içeren karışımlara göre daha iyi veya benzer olduğunu göstermiştir [104].

Shaikh ve diğ., ultra ince uçucu külün yüksek hacimli F Sınıfı içeren betonun basınç dayanımı ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu araştırma, kontrol numune olarak uçucu kül içermeyen Portland çimentolu betonu, % 8 ve 12 çimento katkısında ultra ince uçucu kül, %40 ve 60 ultra ince uçucu kül içermeyen yüksek hacimli F Sınıfı uçucu kül betonu, %32 ve 52 yüksek hacimli ve %8 ultra ince içeren beton numuneler kullanılarak yapılmıştır. Farklı karışım oranlarından üretilen beton numuneler, 3, 7, 28, 56 ve 90. günlerde basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar, % 8 ultra ince uçucu külün katkısının, kontrol betonunun ve yüksek hacimli F sınıfı uçucu küllü betonun basınç dayanımını erken ve geç yaşta iyileştirdiğini göstermiştir [105].

Nath ve Sarker uçucu külün yüksek dayanımlı betonun özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Test numuneleri, kontrol betonu uçucu külsüz çimentolu ve % 30 ve 40 içerikli F Sınıfı uçucu küllü betonlar üretilmiştir. Karışımlar, hem farklı su/çimentolu oranı hem de sabit su / çimentolu oranı kullanılarak üretilmiştir. Sonuçlara göre, sabit su/çimento oranında 28 günlük uçucu kül beton dayanımının azaldığını göstermiştir. Ancak S/Ç oranı %0,31 ve 40 uçucu kül ile 28 günde basınç dayanımı 60 MPa olan yüksek mukavemetli bir beton elde edilmiştir. Uçucu küllü beton, kontrol beton ile aynı 28 günlük tasarım mukavemetinde kuruma büzülmesinde azalma olduğunu belirtmiştir. Uçucu kül katkısından dolayı emilme ve klorür iyonu nüfuzunda da önemli bir azalma olduğunu belirtmiştir [96].

Uçucu kül içeren betonda dayanım geliştirme hızı, başlangıçta, çimentolu betona göre daha düşüktür. Bununla birlikte, uçucu kül içeren beton mukavemet kazanmaya devam eder; birkaç hafta veya ay sürebilir, ve uçucu küllü betonun mukavemetinin, normal çimentolu betondan daha yüksek olacağı anlamına gelir. Puzolanik aktivite, betondaki geçiş bölgesinin, yani hamur ve agrega arasındaki ara yüzün dayanımını ikincil etkilerle iyileştirir. Ayrıca, uçucu kül taze betonun partiküllerinin daha iyi birleşmesini ve gözenekliliğini azaltarak dolayısıyla daha yüksek mukavemete yol açacağını belirlemiştir [106].

Uçucu kül içeren beton için dayanım gelişimi, çimentolu betonda olduğu gibi, sıcaklığa bağlıdır. Daha yüksek sıcaklık, mukavemet geliştirme oranını artıracaktır. Bununla birlikte,

uçucu kül içermeyen betonun dayanımı, daha yüksek sıcaklıklarda kür edildiğinde daha düşük olur ve bu da uçucu küllü beton için uygun olmayacaktır. Ayrıca, uçucu küllü betonun kür sırasında ısıya maruz kaldığında, puzolanik reaksiyonun daha yüksek oranda devam edeceğini belirtmiştir [42].

Çalışmalar, C sınıfı uçucu külün, F sınıfı uçucu küllü betona göre erken yaşlarda daha hızlı bir mukavemet kazandığını göstermiştir, çünkü C Sınıfı küller genellikle erken yaşlarda daha yüksek bir reaksiyon oluşturur. Bununla birlikte, F Sınıfı küller, erken yaşta daha yavaş mukavemet gelişimi hızına rağmen, C Sınıfı küllere göre betonun daha uzun vadeli mukavemet kazanımına katkıda bulunacağını belirtmiştir [107].

Papadakis tarafından yapılan bir çalışmada, çimentonun yerini yüksek kalsiyum aldığında, sadece uçucu küldeki aktif silika içeriği çimentodan daha yüksek nihai dayanımın, kontrol karışımının dayanımını aştığı göstermiştir. Nihai mukavemet kazancı, karışım hacmindeki aktif silis içeriği ile yaklaşık olduğunu belirtmiştir [108].

Şengül, betondaki çimentonun uçucu kül ile %0 -70 kısmen değiştirilmesinin basınç dayanımı ve klorür penetrasyonu üzerindeki etkisini incelemiştir. Yüksek hacimli uçucu küllü betonun 28 günde basınç dayanımının düşürdüğünü, 56 ve 120 günlerde dayanımın arttığını bildirmiştir [109].

2.6.2.2 Eğilme ve Yarma Mukavemetleri

Uçucu küllü betonun eğilme ve ayrılma-gerilme mukavemetlerinin, belirli bir mukavemet için basınç dayanımı izlemekte, erken yaşlarda ise daha düşük, ileri yaşlarda daha yüksek dayanım göstermektedir.

Atis'in yaptığı bir araştırma, erken kür günlerinde, %70 uçucu küllü karışımlarının eğilme gerilme mukavemetlerinin kontrol betonunkinden daha düşük olduğunu, %50 uçucu kül karışımlarının eğilme mukavemetlerinin daha yüksek olduğunu bulmuştur. Üç aylık kür ardından, %70 uçucu küllü karışımları, kontrol betonu ile karşılaştırılabilir eğilme mukavemetine ulaştığı belirtilmiştir. Ek olarak, %50 uçucu kül içeren betonun yarılma mukavemeti, %70 uçucu kül karışımlarından daha yüksek olduğu görünmüştür. [110].

Davis tarafından yapılan bir çalışmada, %50 uçucu kül katkılı numunelerde eğilme ve yarılma mukavemetinde nispeten az değişiklik olduğu ve %70 ikameli karışımların daha düşük eğilme ve yarılma mukavemeti gösterdiği görülmüştür [79].

Sahmoran, çimentonun % 40'ının uçucu kül ile değiştirildiği betonun çekme dayanımının 180 günde kontrol betonunkinden biraz daha fazla olduğunu bildirmiştir. Ancak 28. ve 90. günlerde biraz daha düşük olduğu görülmüştür [111].

Antiohos, uçucu kül ağırlıkça %20 çimentoya katıldığında, kontrol betonunun 7 günlük hidratasyona kadar her uçucu kül numunelerinden daha iyi performans gösterdiğini bildirmiştir. 28 günlük kür ardından, tüm uçucu kül örnekleri kontrol betonuna yaklaşarak veya daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [112].

Vasundhara, %10, 20, 30, 40 ve 50 olan farklı uçucu kül değiştirme katkılarını incelemiştir. Eğilme mukavemetinin % 50 uçucu kül ikame seviyesinde ve 0,50 su / çimento oranıyla 28 ve 365 günde sırasıyla % 16 ve 25,5 arttığını göstermiştir [113].

Siddique, her yaşta, uçucu kül oranlarındaki artışla birlikte eğilme dayanımın artmaya devam ettiğini gösterdi. Maksimum eğilme mukavemetinin% 50 uçucu kül içeriği ile oluştuğunu bildirdi. Deneysel sonuçlar eğilim mukavemetin 28 günde 4,3 N/mm^2, 91 günde 5,2 N/mm^2 ve 365 günde 5,4 N/mm^2 olduğunu göstermiştir [114].

2.6.2.3 Elastisite Modülü (E)

Davis'e göre Elastisite modülü, mekanik özellikler açısından uçucu kül ikamesinden yararlandı, % 50 uçucu küllü karışım, benzer veya fark edilir ölçüde daha sert bir betonla sonuçlanmıştır. Çimentonun %70'i uçucu külle değişimi, elastisite modülünün az da olsa düşmesine neden olmuş, ancak bu düşüş fazla değildir [79].

Bilodeau ve Malhotra (1998: 7) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek hacimli uçucu küllü beton için elde edilen yüksek elastik modülün, ince agrega gibi davranan önemli miktarda camsı küresel parçacıklardan oluşan reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıkların varlığından kaynaklandığını öne sürmüşlerdir [82].

Durán-Herreraa ve diğ., %15'lik uçucu kül katkısının, referans betona göre elastisite modülünü %8'e kadar artırdığını bildirmişlerdir [115].

Siddique, uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte uçucu kül betonların elastisite modülünün artmaya devam ettiğini bildirmiş, ancak uçucu külün artmasıyla artış oranının azaldığını göstermiştir. Ayrıca maksimum elastisite modülü değerinin her yaşta %50 uçucu kül içeriği ile oluştuğunu bildirmiştir [114].

2.6.2.4 Kuruma Büzülmesi

Kuruma büzülmesi, tipik olarak 30 yıla kadar süren uzun bir zaman içermektedir. Serbest büzülmeyi etkileyen en önemli faktörlerden biri Su/Bağlayıcı oranıdır. Daha düşük su/bağlayıcı oranlarına sahip betonların daha az gözenek suyuna sahip olduğu, dolayısıyla daha düşük kuruma büzülmesi gösterdiği bilinir. Harçta kullanılan uçucu kül kuruma rötresini %30 - 40 arasında azaltır [116].

Borsoi, çimentonun %20'si uçucu kül ile değiştirildiğinde betonların kuruma büzülmesinde %50 bağıl neme 120 günde ise %20 oranında bir azalma olduğunu belirtmiştir [117].

2.6.2.5 Dayanıklılık

Beton dayanıklılığını belirlerken, minimum basınç dayanımı, maksimum Su/Bağlayıcı oranı, minimum çimento içeriği ve hava sürüklenmesi gibi parametrelere ele alınmış olsa da, düşük su geçirimliliği ve rötre, çevresel korozyon koşullara maruz kalan bir yapının hizmet ömrünü uzatabilen performans özellikleri önemlidir.

Çoğu zaman betonun bozulma süreci iki aşamadan oluşur:

- Betonun kılcal gözenekli yapısı nedeniyle, kolaylıkla agresif iyonların (klörürler, sülfatlar) betona nüfuz etmesi veya taşınması
- Çözünmüş katı veya gaz içeren çözeltiler (agresif maddeler,) kimyasal veya fiziksel bozulma reaksiyonları [118].

2.6.2.5.1 Geçirgenlik (Permeability)

Geçirgenlik, betonun dayanıklılığının en önemli özeliğidir. Dayanıklı olması için betonun nispeten geçirimsiz olması gerekir. Genel olarak, daha düşük geçirgenlik, daha fazla dayanıklılık anlamına gelir. Betonun geçirgenliği, bağlayıcı malzeme miktarı, su içeriği, agrega granülometrisi, konsolidasyon ve kür gibi birçok faktöre bağlıdır [89], [44].

Uçucu külün dahil edilmesi, çimento hidrasyonunun birlikte puzolanik reaksiyon ürünlerinin oluşumu büyük gözeneklerin daha küçük gözeneklere dönüşümüne neden olabilir. Uçucu kül ve kireç arasındaki puzolanik reaksiyon nedeniyle, betonun geçirgenliği önemli ölçüde azalır, böylece betonun dayanıklılığını etkileyen nem, oksijen, CO_2, klorürler ve diğer zararlı maddelerin girişini azaltır [90].

Uçucu küllü beton daha az geçirgen olarak kabul edilir, puzolanik aktiviteyle uçucu kül, kılcal boşlukları doldurduğu ve suda çözünen kireç tarafından su kanallarını boşalttığı için daha dayanıklı C-S-H oluşturur [78].

Yapılan bir çalışmada, altı aylık kürün ardından uçucu külün yavaş puzolanik reaksiyonu nedeniyle uçucu küllü betonların çimentolu betonlara göre çok daha az geçirgen olduğunu göstermiştir [107].

2.6.2.5.2 Klorür

Donatıya zarar verecek tek şey serbest klorür iyonlarıdır. Klorür iyonlarının penetrasyonu ayrıca betonun geçirgenliğine de bağlıdır; daha geçirgen bir beton, penetrasyona karşı daha az direnç sağlar [50]. Uçucu kül içeren beton, klorür penetrasyonuna karşı çimentolu betona göre daha iyi direnç göstermiştir. Bunun nedeni kısmen, uçucu külün daha yoğun bir yapı oluşturması ve bu da nüfuz etmeyi azaltmasıdır; ama aynı zamanda, uçucu kül içeren betonun klorür iyonlarını daha iyi bağlaması nedeniyle daha az serbest iyon bırakmasıdır [119].

Betona klorür girişine ilişkin deneysel bir çalışma Leng tarafından yapılmıştır. Klorür iyonlarına karşı direncin, S/Ç oranından ve betondaki uçucu kül miktarından etkilendiği gösterilmiştir. Daha yüksek S/Ç oranı, klorür çözeltisinin içinden taşınması için daha fazla gözenekli bir beton , bu da klorür iyonlarının nüfuz etmesine karşı daha az dirençli bir betona sebep olmuştur. Difüzyon katsayıları, çimento içeriğinin %11'i, 43'ü ve 67'si uçucu kül içeren

beton için test edilmiştir. Sonuçlar, daha fazla uçucu külün daha dayanıklı bir beton verdiğini göstermiştir [120].

Mucteba ve diğ. çalışmasında, % 30 uçucu küllü beton karışımının en düşük klorür geçirgenliğine sahip olduğunu, karışımlar arasında 90 günde çok düşük derecelendirmenin, kontrol beton karışımlarına kıyasla benzer basınç dayanımı değerlerine sahip olduğunu göstermiştir [121].

Nath ve diğ., hızlı klorür geçirgenlik testinde (RCPT) geçen toplam yükün, beton içerisindeki klorür iyonunun penetrasyonunu gösterdiğini bildirmiştir. Uçucu kül betonları daha iyi direnç göstermiştir. Karışımlarda uçucu külün artmasıyla penetrasyon kabiliyetinin azaldığını belirtmiştir. Bu çalışmada, 28 günde uçucu küllü betonlar, kontrol betonlarının 'Orta' seviyesinin aksine 'Düşük' seviyede klorür iyonu penetrasyonu elde edilmiştir. 180 günde, uçucu küllü betonlar için klorür penetrasyonu "Çok Düşük" seviyede bulunmuştur [96].

Vengata' göre, 28 günde uçucu küllü betonun dayanımı, yüksek hacimlerde uçucu kül ilavesinin betonun geçirgenliğini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir [122].

Çimentoya göre uçucu külde daha büyük miktarlarda bulunan aktif Al_2O_3, klorür iyonlarını bağlayabilir. Dhir çalışmasında bağlama kapasitesinin, çimentonun %50'si kadar uçucu kül ikame edildiğinde maksimum olduğu, ancak optimumun miktar %30 olduğunu bulmuştur. Çimentonun %33'ünün yerini alan uçucu kül, bağlama kapasitesi çimentodan dört kat daha büyüktür. Çimentonun %30 uçucu kül ile değiştirilmesinin klorür iyonlarına karşı direnci 2-4 kat artırdığı bulunmuştur [119].

2.6.2.5.3 Sülfat Direnci

Betonarme bir yapının korozyona, sülfata, alkali agrega genişlemesine ve diğer kimyasal saldırılara karşı direnci, betonun su geçirimsizliğine bağlıdır. Genel olarak, F Sınıf uçucu kül beton karışımlarının sülfat v direncini artırabilir.

Sülfat direncindeki artış, kısmen uçucu külün betondaki hidroksitlerle devam eden reaksiyon, çimento hamurundaki kılcal gözenekleri dolduran ve böylece geçirgenliği ve sülfat

çözeltilerinin girişini azaltan ek C-S-H jeli oluşturmaya devam etmesinden kaynaklandığını belirtmiştir [44].

F Sınıfı küller genellikle C Sınıfı küllere göre sülfata daha dayanıklı beton üretir. Bazı C Sınıfı küllerin normal dozaj oranlarında sülfat direncini azalttığı bilinmektedir [65].

Von Fay tarafından yapılan bir çalışmada, uçucu külün %50'nin üzerine çıkmasının sülfat saldırısına karşı daha fazla direnç sağladığı, F Sınıfı uçucu külün ise en etkili olduğu bulunmuştur [123].

Ash Resources tarafından yaptırılan bir çalışmada, uçucu külün betona dahil edilmesinin sülfat direncini önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Bu etki, uçucu kül içeriği ile artar ve %50 uçucu küllü beton, Sülfata Dayanıklı Portland Çimentosu betonuna yaklaşan eşit dirence ulaştığı görülmüştür [124].

2.6.2.5.4 Karbonatlaşma

Hidrate olmuş çimento ile atmosferdeki karbondioksit arasında oluşan hidratasyon sonucunda karbonlaşma meydana gelir ve betonun büzülmesine neden olur. Karbonatlaşma büzülmesi, beton yüzeyi boyunca meydana gelir [116].

Betonun karbonlaşma direnci, uçucu kül değiştirme oranına bakılmaksızın kabaca su/bağlayıcı oranı ile orantılıdır [125]. Betonda karbonlaşma, artan geçirgenliğe, büzülmeye ve çatlamaya ve donatı çeliğini korozyondan koruyan pasif tabakanın azalmasına neden olabilir [89]. Uçucu külün betona katılması, takviye çeliğini çevreleyen beton kaplamanın alkalinitesini, geçirgenliğini ve karbonatlaşmasını etkileyebilir [90].

Karbonatlaşma derinliği, 7 gün boyunca nemli kürlenen beton için çimento içeriğinin bir fonksiyonudur, 90 güne kadar daha fazla kür ile, uçucu kül içeren beton, normal ve suyu azaltılmış betonlara kıyasla daha yavaş bir karbonatlaşma hızı göstermiştir [89].

Burden, hızlandırılmış karbonatlaşma odasında 90 günde katkısız betonun uçucu kül içeren betona göre daha düşük miktarda karbonatlaşma sağladığını bulmuştur [107].Ayrıca, aşağıdaki eğilimler açıkça gösterildi: artan uçucu kül seviyeleri, artan su/bağlayıcı ve azalan nemli kürleme süresinin tümü, artan karbonatlaşma derinlikleri.

Çimento'nun belirli bir su/bağlayıcı oranında mineral ilaveleriyle değiştirilmesi karbonatlaşma oranını artırır, %15 gibi düşük ikame seviyelerinde ihmal edilebilir, ancak mukavemet seviyesi düşürülmezse, uçucu kül ve cüruf içeren betonlarda karbonatlaşmanın korozyon riski yoktur [126].

Zhang ve diğ. uçucu küllü betonda karbonatlaşma reaksiyonu ile puzolanik reaksiyon arasındaki ilişkiyi incelerken, uçucu küllü beton sistemindeki uçucu külün puzolanik reaksiyonunun erken karbonasyon reaksiyonu tarafından engellendiğini bulmuştur. Erken karbonatlaşma derecesi ne kadar yüksekse uçucu külün puzolanik reaksiyonu o kadar düşüktür. Bu, Ca $(OH)_2$ için yarışan her iki reaksiyondan kaynaklanıyor olabilir [127].

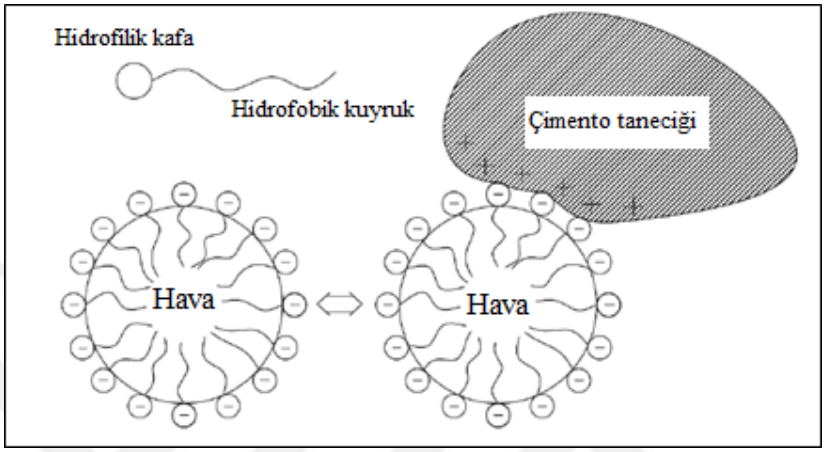
2.6.2.6 Donma-Çözülme

Beton her zaman gözeneklerinde bir miktar su bulunur ve su donarken yaklaşık %9 oranında hacmen genişler. Bu hacmi sağlamak için yeterli boşluk yoksa, bir basınç oluşacak ve bu da basınç çatlamasına neden olur. Hidrolik ve ozmotik basınç nedeniyle parçalanma daha da artacaktır [128].

Tamamen su dolu gözeneklerde su donmaya başladığında ekstra hacmi barındıracak yeterli alan kalmadığı için donmamış suyun boş alanlara taşınması gerekir. Donmamış suyun çimento hamurunun kılcal ve jel gözeneklerinden bu akışı, bir hidrolik basınç yaratır. Hidrolik basınç, gözenekler arasındaki mesafeden ve kılcal gözeneklerin inceliğinden etkilenir; daha uzun mesafe ve daha küçük gözenekler basıncı artırır. Yıkıcı basınç, ozmotik basınçla daha da artacaktır. Donma ve çözülmeye maruz kalan beton içeriden veya dışarıdan zarar görebilir. Tuz çözeltisine maruz kalan beton için, normalde dış hasar söz konusudur, bu da beton yüzeyindeki küçük yongaların ve / veya pulların kaldırılması anlamına gelir. Saf suya maruz kalan betonun iç çatlaklardan zarar görme olasılığı daha yüksektir [32].

Uçucu küllü betonda hava sürükleyici maddeler: Donmaya / çözünmeye dayanıklı bir beton elde etmek için hava sürükleyici ajanlar (AEA'lar) kullanılır. AEA'lar, havayı stabilize ederek taze betondaki havayı birleştirir, böylece sertleşmiş betonda donma / çözülme direnci ile ilgili gereksinimleri karşılayan bir hava kabarcığı oluşturur. Yani hava miktarını artırır ve hava gözenekleri arasındaki mesafeyi azaltır [128].

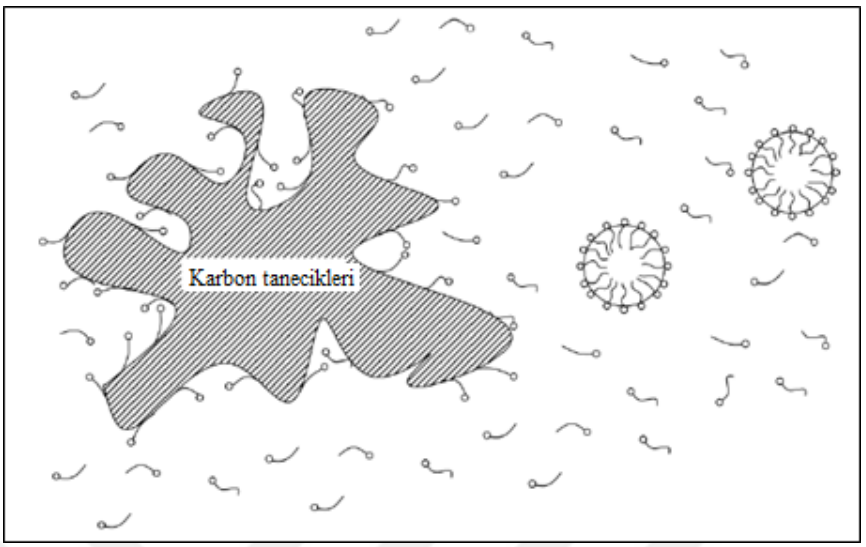
AEA'lar yüzey aktif maddelerdir, molekülleri hava-su veya katı su ara yüzlerinde güçlü bir şekilde adsorbe edilir. Moleküller negatif, hidrofilik bir kafa ve hidrofobik bir kuyruktan oluşur (şekil 2.3), [32].



Şekil 2-3: Taze betonda hava sürüklenmesi

Uçucu kül içeren taze betonda, AEA'lar uçucu kül içindeki parçacıklar üzerinde güçlü bir şekilde adsorbe edilir. Uçucu küldeki yanmamış karbon, adsorbe edilmiş yüzey aktif maddelerden sorumludur. Karbon partiküllerinin yüzeyi polar değildir, bu nedenle yüzey aktif parçacıklar yine polar olmayan hidrofobik kısımları karbon yüzeyine adsorbe eder (şekil 2.4). Sonuç olarak, karbon üzerine adsorbe edilen yüzey aktif maddeler, sürüklenen havanın kararlılığı üzerinde olumsuz etkisi vardır [129].

Hava kaybı daha fazla AEA ile telafi edilebilir. Bununla birlikte, uçucu kül, çok yüksek AEA dozlu betonlarda, hava yapısında ve içeriğinde çok büyük değişikliklere yol açabilir [129]. Zhang, sabit hava içeriğinde, uçucu kül ilavesiyle AEA'nın dozajlarının arttığını göstermiştir [130]. Dozaj, yalnızca uçucu kül kaynağına değil, aynı zamanda kullanılan AEA türüne de bağlıdır.



Şekil 2-4: Hava sürükleyici katkıların karbon yüzeyine adsorpsiyonu, çimento hamurunda stabil hava kabarcıkları oluşturmak için daha az AEA serbest bırakır

Literatür, uçucu küllü hava sürükleyici katkılı betonun dayanıklılığı katkısız numunelere benzer veya biraz az olduğunu göstermektedir. Çimento ağırlığının yaklaşık % 40'ı veya daha az uçucu kül içeren beton, buz çözücü tuz kireçlenmesi açısından dayanıklıdır, oysa daha yüksek miktarda uçucu kül içeren beton dayanıklı değildir. Uçucu küllü beton, donma ve çözülmeye maruz kaldığında iyi bir performans gösterdiği görünmüştür [131], [132], [133], [134], [135].

Ronning, donma / çözülme dayanıklılığını araştırmasında %20 uçucu küllü hava sürüklenmiş betonu test etmiştir. Uçucu kül içeren beton, kontrol betonuna göre donma ve çözülmeye karşı daha az direnç göstermiştir. Bu çalışmaya göre, düşük hava içeriğinden dolayı hava sürükleyici içermeyen hem %20 uçucu küllü beton ve hem de kontrol beton donma-çözülmeye karşı dayanıksızdır, ama uçucu küllü betonun daha dayanıksız olduğunu belirtmiştir [131].

Fagerlund, %5 uçucu küllü betonun donma / çözülme dayanıklılığını araştırmıştır. Sonuçlar, hava sürükleyici katkısı içermeyen %5 uçucu küllü betonun az direnç gösterdiğini, ancak sürüklenen hava ile betonun dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hava sürüklenmiş %23 uçucu kül içeren betonun donma-çözülmeye karşı dayanıklı olduğunu göstermiştir [32].

Schiefl, çimentonun %30 'unun uçucu kül ile değiştirildiği hava sürüklenmiş betonun, katkısız betona göre yüzeyde donma / çözülmede daha az direnç göstermiştir. Bununla birlikte,

dayanıklılık seviyesi kabul edilebilir bir değerde olduğunu göstermiştir. Direnç, uzun süreli kür ile daha da geliştirilmiştir [136].

Müller, çimentoda farklı miktarda uçucu kül içeren hava sürüklenmiş betonu araştırmıştır. Kullanılan farklı uçucu kül miktarları %0, 20, 30 ve 35 idi. %0, 20 ve 30 uçucu küllü betonlar benzer direnç gösterirken, %35 uçucu kül içeren beton dayanıksız olarak belirtilmiştir [137].

Li, uzun süreli kürlenmiş beton için donma / çözülme dayanıklılığı açısından %25 uçucu küllü hava sürüklenmiş betonu araştırmıştır. Sonuçlar, katkısız betonun katkılı numuneler göre daha iyi direnç gösterdiğini belirtmiştir [138].

2.6.3 Literatür Araştırması Sonucu

Literatür araştırmasına göre, uçucu külün betona katılmasının erken yaşlarda basınç dayanımını azalttığını, ancak daha sonraki yaşlarda basınç dayanımında ciddi bir artış olduğunu belirlemiştir. Katkı miktarı artarsa erken dayanım daha da azalır. Ancak, diğer yandan değiştirme yüzdesi arttığında, su / bağlayıcı oranı azalır, böylece ileri yaştaki basınç dayanımı artar. Ayrıca, uçucu kül ile çimento ikamesi %40'tan fazla olan betonların ileri yaş dayanımının, su / bağlayıcı oranının kademeli olarak düşmesine rağmen olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir.

Önceki çalışmalara göre çimento ile uçucu kül yer değişimi için optimum miktar, çimento ağırlığının %20-30 olarak belirtilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında, %20 uçucu kül katılarak hamur ve beton numuneler üretilmiştir. Tüm şahit ve uçucu küllü hamur ve beton numuneler 28, 56 ve 90 gün kür sonrası 60 döngü ıslanma-kuruma veya donma-çözülmeye maruz bırakılmıştır. Daha sonra, numuneler üzerinde su emme, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzemeler, bu malzemelerle hazırlanan çimento hamuru ve beton karışım oranları, yapılan deneyler ve kullanılan deney düzenekleri açıklanmıştır.

3.1 KULLANILAN MALZEMELER

3.1.1 Çimento

TS EN 197-1 standardına uygun ve hızlı sertleşen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Tablo 3.1'de, CEM I 42,5R çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3-1: CEM I 42,5 R çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kıimyasal Özelikler		**Standart Sınır Değerler (%)**	**Cem I 42,5 R (%)**
SiO_2		-	19,9
Al_2O_3		-	4,7
Fe_2O_3		-	3,9
CaO		-	62,2
MgO		-	1,23
SO_3		$\leq$ 4,0	3.31
Na_2O		-	0,26
K_2O		-	0,83
Cl-		$\leq$ 0,10	0.0213
Kızdırma Kaybı		< 5,0	3,07
Çözünmeyen Kalıntı		$\leq$ 5,0	0.75
Serbest CaO		-	1,35
FİZİKSEL ÖZELİKLER			
Özgül Ağırlık (g/cm^3)		-	3,13
Priz (dk)	Başlangıç	> 60	149
	Bitiş	-	210
Hacim Genleşmesi (mm)		$\leq$ 10	1
Özgül Yüzey (cm^2/g)		-	3770
İncelik (%)	45 (µm)	-	2,9
	90 (µm)	-	0,2
MEKANİK ÖZELİKLER			
Basınç Dayanımı (MPa)	2. Gün	$\geq$ 20	33,7
	7. Gün	-	47,8
	28. Gün	42,5 $\leq$ Değer $\leq$ 62,5	58,5

3.1.2 F Sınıfı Uçucu Kül

Çanakkale Bekirli Termik Santralinden temin edilen uçucu kül, ASTM C 618 standardına göre, F sınıfı uçucu küldür. Düşük kireçli F sınıfı uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ile standart sınır değerleri Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3-2: F sınıfı uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ve standart sınır değerleri

Kimyasal Özelikler		**Deney Yöntemi**	**Standart Sınır Değerleri (%)**	**F Sınıfı Uçucu Kül (%)**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		TS EN 196-2	> 65	90,5
Reaktif SiO_2		TS EN 197-1	> 22	62,7
Kızdırma Kaybı		TS EN 196-2	< 5	3,5
Toplam Alkali Muhtevası		TS EN 196-2	< 5,5	2,9
Reaktif CaO		TS EN 197-1	< 11	1.55
MgO		TS EN 196-2	< 4,5	1,59
Sülfirik Anhidrit		TS EN 196-2	< 3,5	0,3
Serbest CaO		TS EN 451-1	< 2,6	0,1
Klorür		TS EN 196-2	< 0,1	0,02
Fiziksel Özelikler				
Priz (dk)	Başlangıç	TS EN 196-3	150	190
	Sonu		200	250
Aktivite Endeksi (%)	28. Gün	TS EN 196-1	> 70	71,6
	90. Gün		> 80	82
İncelik (45 µ üstü) (%)		TS EN 451-2	< 40	20,2
Yoğunluk (kg/m^3)		TS EN 196-6	2,015 < Değer < 2,465	2.25

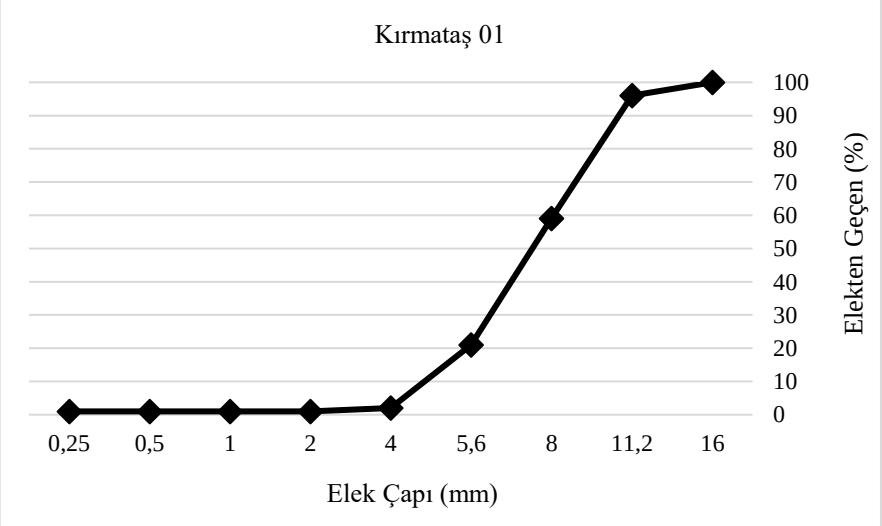
3.1.3 Agrega

TS EN 706 12620+A1 standardına uygun ve inşaat sektörünce, mıcır olarak isimlendirilen ince ve kaba kırmataş agrega karışımı (kırmataş 01), doğal kum olarak isimlendirilen ince agrega yığını ve taş tozu olarak isimlendirilen ince ve kaba kırmataş agrega karışımı (kırmataş 05), agrega tesisinden temin edilmiştir. İnce agrega, kırmataş 01 ve kırmataş 05 agregaların granülometrisi ve bu üç agrega grubunun sırasıyla %33, %41 ve %25 oranlarında karıştırılmasıyla elde edilen birleşik agrega yığınının elek analizi Tablo 3.3'de verilmiştir [139].

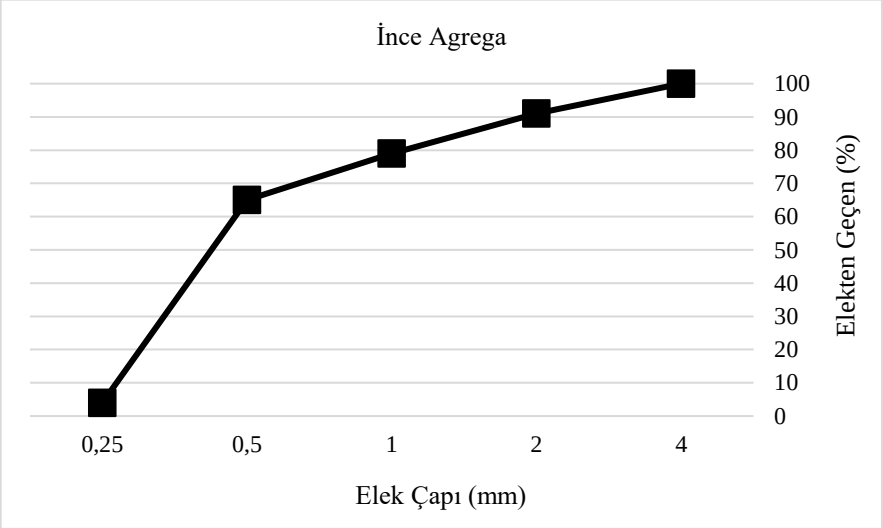
Tablo 3-3: Kırmataş01, ince agrega, kırmataş05 ve birleşik agrega yığınının granülometrisi

Elek Çapı (Mm)	Elekten Geçen (%)			
	Kırmataş 01	İnce Agrega (Doğal Kum)	Kırmataş 05	Birleşik Agrega Yığını
16	100	100	100	100
11,2	96	100	100	98,3
8	59	100	100	82,9
5,6	21	100	100	67,08
4	2	100	95	57,9
2	1	91	58	45,2
1	1	79	34	35,2
0,5	1	65	20	27,08
0,25	1	4	10	4,2
0,125	0	0	6	1,5
0,063	0	0	2	0,5

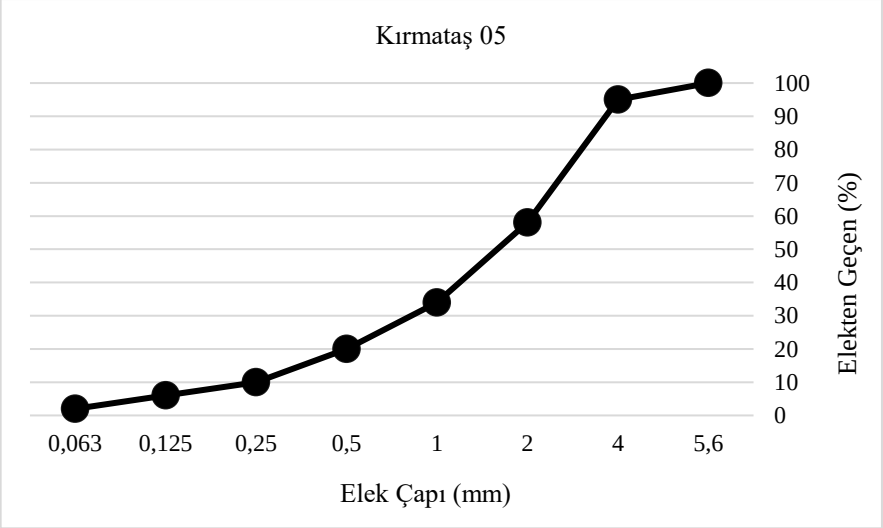
Kırmataş01 agrega yığınının, ince agrega yığınının, kırmataş05 agrega yığınının ve birleşik agrega yığınının granülometri grafiği sırasıyla Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmiştir ve bu agrega yığınlarının granülometri eğrisi Tablo 3.3'deki elek değerlere göre çizilmiştir.



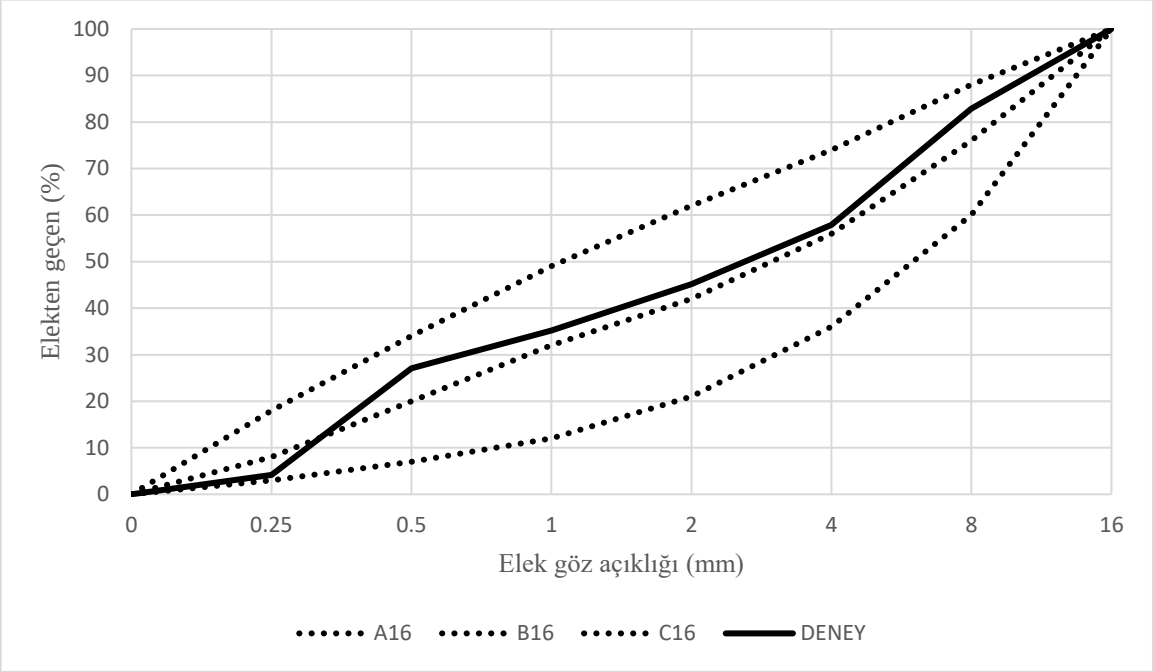
Şekil 3-1: Kırmataş 01 agrega grubu granülometrisi



Şekil 3-2: İnce agrega grubu granülometrisi



Şekil 3-3: Kırmataş 05 agrega grubu granülometrisi



Şekil 3-4: Birleşik agrega yığınının granülometrisi

Agrega üreticisi tarafından belirtilen agrega özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3-4: Agrega fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	**İnce Agrega**	**Kaba Agrega**
İnce Madde Oranı (<0.063mm)	-	1.8
İnce Madde Oranı (Çökme Yöntemi)	-	4
Metilen Mavisi Kirlilik Değeri	-	1
Kum Eşdeğerliği Değeri	-	75
Numune Nem Oranı (%)	1.3	1.5
Yassılık İndeksi	15	-
Aşınma (Los Angeles Yöntemi) (%)	22.7	-
Özgül Kütle (g/cm^3)	2.72	2.64
Su Emme Oranı (%)	0.9	0.9

3.1.4 Karışım suyu

Tüm numunelerin üretiminde ve küründe, pH'ı 7 civarında olan içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Ayrıca, kullanılan suların aynı musluktan olmasına özen gösterilmiştir.

3.1.5 Süper Akışkanlaştırıcı

Polikarboksilik eter esaslı MasterGlenium SKY 608, süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesidir. Diğer polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcılarla karşılaştırıldığında, priz süresinde gecikme olmadan yüksek işlenebilirliğe sahip kaliteli bir beton elde etmek mümkündür. Bu ürün, çimento tanecikleri üzerinde geciken adsorpsiyona izin verir ve çimento taneciklerini istenen işlenebilirliğe sağlayacak süre boyunca etkili bir biçimde dağıtarak birbirinden uzak tutar. MasterGlenium SKY 608'ün moleküler yapısı, erken dayanım gelişiminde etkilidir. Geleneksel polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcılar, çimento taneciğinin etrafını tamamen sararak bir bariyer oluşturur. Çimento taneciği suyla birleşemediğinden dolayı hidratasyon işlemi yavaşlar. Bu mekanizmadan farklı olarak, MasterGlenium SKY 608 molekülleri çimento tanecikleri üzerinde ani hidratasyona izin veren boşluklar bırakır. Bu boşluklar erken yüksek dayanım gelişimini sağlar. Bu nedenle, bu tür süper akışkanlaştırıcılar, "Akıllı Dinamik Beton" üretiminde kullanılır. Tablo 3.5'de MasterGlenium SKY 608'in bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3-5: MasterGlenium SKY 608'in bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri [EN 934-1:2008, EN 934-2]

Kimyasal Ve Fiziksel Özellikleri	
Malzemenin Kimyasal Yapısı	Polikarboksilik Eter
Renk	Kahverengi
Form	Sıvı
Özgül ağırlık (20°C'de) (kg/lt)	1.069 – 1.109
pH	5-7
Kütlece Alkali içeriği (%)	≤ 3.00
Kütlece Klor içeriği (%)	≤ 0.10
Korozyon davranışı	EN 934-1:2008- EK A.1 standardına uygun bileşenleri içerir.
Tehlikeli maddeler	EN 934-2-Ek-AZ'ye uygundur

3.2 DURABİLİTE; ESKİTME SÜREÇLERİ

Bu çalışmada, uçucu kül içeren beton ve çimento hamuruna farklı ortamların etkisinin incelenmesi amacıyla ıslanma-kuruma ve donma-çözülme olmak üzere iki farklı eskitme süreci uygulanmıştır.

3.2.1 Donma-Çözülme

Beton ve çimento hamuru numuneleri üzerinde donma-çözülme ortam koşullarını sağlamak amacıyla, TS 15177 Standardına uygun olarak otomatik donma-çözülme kabini kullanılmıştır. Buna göre donma fazının süresi, çözülme fazının süresinin 2 katı şeklinde önerilmiştir ve gereken minimum döngü sayısı 56 olarak belirtilmiştir [140].

Bu çalışmada tüm numuneler 12350-2 Standardına uygun hazırlanmıştır [141]. Numuneler 28,56 ve 90 gün kür uygulandıktan sonra donma-çözülmeye maruz bırakılmıştır. Donma-çözülme kabininde her döngü 8 saat -20±2ºC donma süresinin ardından 4 saat +20±2 ºC sıcaklıkta çözülme süresi şeklinde ayarlanmıştır. Böylece, kabindeki numuneler 30 günün sonunda 60 donma-çözülme döngüye maruz kalmışlar ve sonra kabinden alınıp 24 saat 20±2 ºC sıcaklıkta havuzda bekletilmiştir. Ek olarak, 24 saat sonra havuzdan çıkartılan numuneler 15dk laboratuvar ortamında bekletildikten sonra ultrases geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Bu aşamadan sonra hamur numunelerde eğilme ve basınç deneyler yapılmıştır. Beton numunelerde de basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

3.2.2 Islanma-Kuruma

Bu tez çalışmasında, numunelerin maruz bırakıldığı ıslanma-kuruma evreleri eşit sürelerde uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyine benzer şekilde, tüm numuneler 28, 56 ve 90 gün kür uygulandıktan sonra kür havuzundan alınıp 60 ıslanma-kuruma döngüleri başlatılmıştır.

Islanma-kuruma döngüleri için numuneler 12 saat boyunca(±15dk) 50±2 ºC sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numuneler etüvden çıkartılarak 30dk laboratuvar ortamında bekletildikten sonra 12 saat boyunca 20±2 ºC sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilmiştir. Böylece, her 24 saatte 1 adet ıslanma-kuruma döngüsü uygulanmıştır ve toplam olarak numuneler adet ıslanma-kuruma döngülerine maruz bırakılmışlardır.

60 adet ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılmış numuneler üzerinde, 24 saat süresince 20±2 ºC sıcaklıkta kür havuzunda bekletildikten sonra, su emme kapasitesi tayini, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyler yapılmıştır.

3.3 NUMUNELERİN ÜRETİMİ

Bu tez kapsamında, katkısız (şahit) ve uçucu kül katkısı içeren çimento hamuru ve beton numuneler üretilmiştir.

3.3.1 Çimento hamuru numuneler:

Çimento hamuru olan numuneler, TS EN 196-1 standardına uygun 40x40x160 mm standart boyutlarında üretilmiştir. Şahit ve uçucu küllü numuneler üç seri olarak her eskitme koşulları için ayrı ayrı üretilmiştir. Bununla beraber, numunelere 28, 56 ve 90 günlük 20±2ºC su içinde kür süreleri uygulanmıştır.

Her bir seri şahit numunelerinin üretimi için 1303 gr çimento kullanılmıştır. Çimento hamuru numunelerde kullanılan su / bağlayıcı oranı standart kıvam deney ile 0.32 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, şahit numunelerde 417 gr su kullanılmıştır.

Her bir seri uçucu küllü numunelerin üretimi için, 1043 gr çimento ve 260 gr uçucu kül (%20) kullanılırken standart kıvam deneyinde su / bağlayıcı oranı 0.32 elde edildiği için 417 gr su kullanılmıştır.

Tüm şahit numuneler aynı gün ve uçucu küllü numuneler ise bir sonraki gün aynı koşullarda üretilmiştir. Çimento hamuru numuneleri 24 saat sonunda kalıplardan çıkartıldıktan sonra gereken kür süresi boyunca 20±2ºC sıcaklıkta kür havuzunda bekletilmiştir.

Çimento hamuru numunelerde ilk seri (şahit ve uçucu kül içeren) 28 günlük kür koşullarına, ikinci seri 56 günlük kür koşullarına ve üçüncü seri ise 90 günlük kür koşullarına maruz bırakıldıktan sonra kür havuzundan alınıp eskitme koşullarına (donma-çözülme veya ıslanma-kuruma) maruz bırakılmıştır.

Tablo 6'da şahit ve uçucu küllü numunelerin kodları ve her kalıp (3 adet prizma) için kullanılan malzemeler miktarları (gr) verilmiştir. Bu tabloda kullanılan kodların açıklaması aşağıdaki gibidir:

Ş: şahit

U: uçucu küllü

H: hamur

I: ıslanma-kuruma

D: donma-çözülme

Tablo 3-6: Çimento hamuru numunelerin kodları, karışımları, kür süresi ve eskitme ortamı

Numune Kodu	Çimento (Gr)	Uçucu Kül (Gr)	Su (Gr)	Kür Süresi (Gün)	Eskitme Ortamı
ŞHI28	1303	0	417	28	Islanma-kuruma
ŞHI56	1303	0	417	56	Islanma-kuruma
ŞHI90	1303	0	417	90	Islanma-kuruma
ŞHD28	1303	0	417	28	Donma-çözülme
ŞHD56	1303	0	417	56	Donma-çözülme
ŞHD90	1303	0	417	90	Donma-çözülme
UHI28	1043	260.5	417	28	Islanma-kuruma
UHI56	1043	260.5	417	56	Islanma-kuruma
UHI90	1043	260.5	417	90	Islanma-kuruma
UHD28	1043	260.5	417	28	Donma-çözülme
UHD56	1043	260.5	417	56	Donma-çözülme
UHD90	1043	260.5	417	90	Donma-çözülme

3.3.2 Beton numuneler

Beton numunelerin karışım oranları TS EN 802'ye uygun olarak tasarlanmıştır. Şahit ve uçucu kül içeren beton numuneleri üretilerek ıslanma-kuruma veya donma-çözülme eskitme koşullarına maruz bırakılmıştır.

Bunun için, 150x150x150 mm boyutlarında, toplamda 24 adet şahit ve 24 adet uçucu küllü beton küp numuneleri üretilmiştir [142].

Tüm numunelerde su/bağlayıcı oranı 0.45 ve süper akışkanlaştırıcı katkısı su miktarının %1.0'i olacak şekilde üretilmiştir. Beton içerisindeki agrega karışım oranları sabit tutulmuştur. Şahit betonda 478 kg/m³ çimento kullanılmıştır, uçucu küllü betonda ise çimento miktarının %20'si F tipi uçucu kül ile ikame edilmiştir.

Beton numunelerin üretiminde düşey eksenli 100dm³ kapasitesine 1500 W motor gücüne sahip olan mikser kullanılmıştır.

Numuneler üretilirken, aynı kıvam ve işlenebilirliği sağlamak amacıyla betonların aynı koşullarda üretilmesi için özen gösterilmiştir. Bu doğrultuda, ilk önce agregalar, çimento ve uçucu kül mikserin içine konulmuş ve iki dakika boyunca kuru olarak karıştırılmasının ardında su miktarının üçte ikisi miksere eklenip iki dakika daha karıştırılmıştır. Son olarak, geri kalan üçte bir su miktarına süper akışkanlaştırıcı katkısını ekleyerek beton karışımına ilave edilip üretime devam edilmiştir.

Beton karışımı hazırlandıktan sonra numuneler iki aşamada küp kalıplara yerleştirilmiştir ve her aşamada sarsma tablasında on saniye olmak üzere toplam yirmi saniye vibrasyon uygulanmıştır.

Tüm numuneler yerleştirildikten 24 saat sonra kalıplardan çıkartılıp ve maruz bırakılması planlanan kür süresi boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Tablo 7'de beton numunelerin kodları ve karışım oranları verilmiştir.

Tablo 3-7: Beton numunelerin kodları ve Karışımları (1 m3 için)

NUMUNE KODU	ÇİMENTO (Kg)	UÇUCU KÜL (Kg)	S/B MİKTARI (lt)	KIRMATAŞ01 (Kg)	KIRMATAŞ05 (Kg)	KUM (Kg)	KİMYASAL KATKI (%)	ESKİTME ORTAMI
ŞBI28	478	0	215.5	684	410	574	1.0	I-K
ŞBI56	478	0	215.5	684	410	574	1.0	I-K
ŞBI90	478	0	215.5	684	410	574	1.0	I-K
ŞBD28	478	0	215.5	684	410	574	1.0	D-Ç
ŞBD56	478	0	215.5	684	410	574	1.0	D-Ç
ŞBD90	478	0	215.5	684	410	574	1.0	D-Ç
UBI28	383	96	215.5	684	410	574	1.0	I-K
UBI56	383	96	215.5	684	410	574	1.0	I-K
UBI90	383	96	215.5	684	410	574	1.0	I-K
UBD28	383	96	215.5	684	410	574	1.0	D-Ç
UBD56	383	96	215.5	684	410	574	1.0	D-Ç
UBD90	383	96	215.5	684	410	574	1.0	D-Ç

3.4 DENEYLER

Çimento hamuru numunelerinde, standart kıvam su oranı, priz süresi, su emme kapasitesi, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Betonlarda, taze halde çökme ve birim ağırlık deneyleri, sertleşmiş beton numunelerde ise su emme kapasitesi, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3.4.1 Çimento hamuru deneyleri

3.4.1.1 Normal kıvam suyu miktarı ve priz süresi tayini:

Normal kıvam için su miktarını bulmak için TS-EN 196 standardına uygun Vicat Aleti kullanılmıştır. Deney, 20-25ºC laboratuvar sıcaklığında ve 300 gr çimento kullanarak yapılmıştır.

İlk deney, çimento ağırlıkça 0.35 su oranı ile başlatılmıştır, ve azaltarak diğer deneylere devam edilmiştir. Standarda göre sonda ucu cam levhanın 5-7 mm uzaklığında kaldığı an çimento hamuru için tespit edilen su içeriği normal kıvam su oranı olarak belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan CEM I 42.5R tipi çimentonun standart kıvam suyu oranı 0.32 olarak elde edilmiştir.

Çimento hamurunun priz süresi tayininde, Vicat Aletinde Vicat iğnesi kullanılmıştır. Priz süresinin başlangıcını tayin etmek için her 15 dakikada bir ölçüm yapılmıştır. Numunenin hazırlandığı an ile Vicat iğnesi levhaya 4±1 mm kaldığı an arasındaki geçen süre priz başlangıç süresi ve iğnenin hamura 0.5 mm battığı ana kadar geçen süre ise priz sonudur. Bu süre çalışmada kullanılan çimento için 3 saat 16 dakika olarak bulunmuştur.

3.4.1.2 Su emme kapasitesi:

Sertleşmiş şahit ve uçucu küllü çimento hamuru numunelerde 28, 56 ve 90 gün standart su küründe kaldıktan sonra, ıslanma-kuruma veya donma-çözülme eskitme ortamına maruz bırakılarak döngüleri uygulanmıştır. Eskitme süreci tamamlandıktan sonra, numuneler deneylere tabi tutulmuşlar.

Numunelerin su emme kapasitesinin tayininde eskitme koşullarının döngüleri tamamlandıktan sonra numuneler 24 saat 20±2ºC sıcaklıktaki kürün havuzunda tutulmuşlardır. Bu bekleme süresinden (24 saat) sonra numuneler havuzdan alınıp yüzeylerindeki su kurulanarak su emmiş durumdaki kütleleri 0.01 (g) hassasiyetli terazi ile belirlenmiştir. Kütleleri belirlenen numuneler 24 saat 100±5 ºC etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır.

Numunelerin kütlece su emme oranı, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$W_S = \frac{W_I - W_K}{W_K} \times 100 \quad \textbf{(3.1)}$$

Bağıntıda;

W_S: su emme oranı (%)

W_I: ıslak kütle ağırlık (g)

W_K: kuru kütle ağırlık (g)

3.4.1.3 Ultrases hızı

Numunelerin su emme kapasitesi belirlendikten sonra numuneler 24 saat 20±2 ºC sıcaklıktaki havuzda bekletilmiştir. Sonra numuneler havuzdan alınıp 15 dakika oda sıcaklığına kaldıktan sonra ultrases aleti ile ses geçiş süresi ölçülmüştür. Ultrases geçiş hız değerleri, numune uzunluğunun ölçülen zamana bölünmesiyle hesaplanmıştır [143].

$$V = \frac{l}{t} \quad \textbf{(3.2)}$$

V: ultrases geçiş hızı (mm/µs veya km/sn)

l: ölçülen numune uzunluğu (mm)

t: ölçülen zaman

3.4.1.4 Eğilme dayanımı

Hamur numunelerin eğilmede çekme dayanımı, TS EN 12390-5 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deney düzeneği birbirinden 100 mm ± 0,5 mm uzaklıkta iki mesnetten

içermektedir. Ayrıca, iki mesnet prizmanın tam ortasında kuvvet uygulanır (şekil 3.5). İki mesnet ve kuvvet uygulayan parçanın eksenlerinden geçen dikey eksenler birbirine simetriktir. Üretilen 40×40×160 (mm) boyutundaki prizma numunesi, yan yüzeylerinden en düzgün yüzeyler seçilerek, uzunluğuna ekseni mesnetlerin eksenine dik bir şekilde mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Yükleme hızı, saniyede 40 ± 10 (N) olarak uygulanmıştır. Deney sonuçları, aşağıdaki bağıntıda yerlerine koyularak ve tam sayıya yuvarlatılarak, eğilmede çekme dayanımı (fe) hesaplanmıştır [144].

$$f_e = 1.5\frac{P.l}{b^3} \qquad \textbf{(3.3)}$$

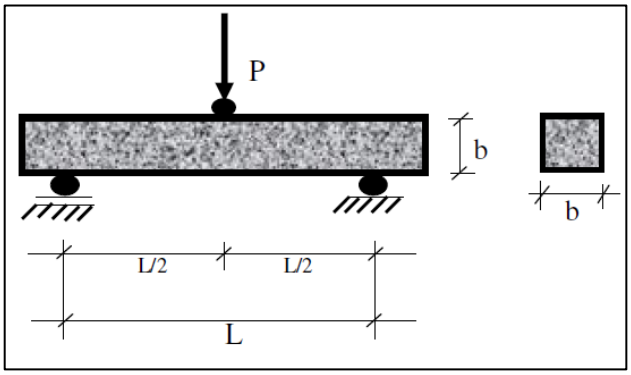
Bağıntıda;

b = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

P = Prizmanın açıklık ortasına uygulanmış olan kırılma kuvveti (Newton)

l = Destek prizmaların eksenleri arasındaki uzaklık (mm)

fe = Eğilmede çekme mukavemeti (N/mm^2)



Şekil 3-5: Eğilme dayanımı deneyi

3.4.1.5 Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyi, eğilmede çekme dayanımı deneyinden elde edilen 40x 40x80 ± 5 (mm) boyutlarındaki numunelerde TS EN 12390-3'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yarım prizma

numuneleri, cihazın plakaları arasına ±0,5 (mm) den fazla taşmayacak ölçüde merkezlenmiş ve prizmanın arka yüzü yardımcı plakalardan 10 (mm) taşacak ölçüde uzunlamasına yerleştirilmiştir. Yükleme hızı, saniyede 1000 ± 200 (N) seçilmiştir. Statik yükleme numune eksenine dik doğrultuda ve numune kırılana kadar uygulanmıştır (şekil 3.6). Numunelerin basınç dayanımları aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır [145]:

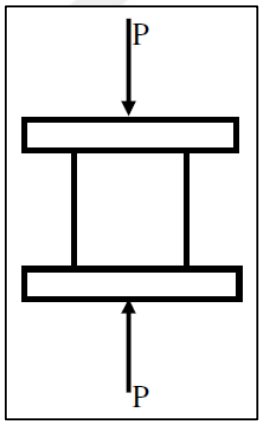
$$f_c = \frac{P}{A_0} \quad \textbf{(3.4)}$$

Bağıntıda;

f_c : Basınç dayanımı (N/mm^2)

P : Kırılmadaki en büyük yük (N)

A_0 : Plakaların veya yardımcı plakaların (40 mm × 40 mm) alanıdır (mm^2)



Şekil 3-6: Basınç dayanımı deneyi uygulaması

3.4.2 Beton deneyleri

Betonlarda taze halde çökme ve birim ağırlık deneyleri, sertleşmiş halde ise su emme kapasitesi tayini, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyden sonra kırılan numunelerden parça alarak SEM görüntüleri alınmıştır.

3.4.2.1 Çökme deneyi

Çökme deneyi, TS-EN 12350-2 standardına göre ve Abrams çökme konisi kullanılarak yapılmıştır. Koninin yüksekliği 30 cm, üst çapı 10 cm ve alt çapı 20 cm dir. Koni büyük çelik tepsinin üzerine konulmuştur ve 3 tabakada taze beton ile doldurulmuştur. Her tabaka, beton yerleştirildikten sonra çelik çubuk ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Koni doldurulduktan sonra üst kısmı mala ile düzeltilmiştir. Koni yukarı çekilerek taze betondan ayrılmıştır. Boş koni çökmüş beton numunenin yanına koyarak betonun üst kısmı ile koninin üst kısmının arasındaki mesafe ölçülmüştür. Betonlarda çökme değeri 9.5 – 10 cm olarak elde edilmiştir.

3.4.2.2 Birim hacim ağırlığı deneyi

Şahit ve uçucu küllü betonların gerçek miktarını bulmak için birim hacim ağırlık deneyi yapılarak bulunmuştur [146].

Bu deney için darası belli 8 lt hacmindeki bir silindir kap kullanılmıştır. Beton silindirin içine doldurarak yerleştirilmiştir ve titreşimle sıkıştırılmıştır. Tartılan taze beton dolu kabın ağırlığından boş kabın ağırlığı düşülerek kabın hacmine bölünmesi ile betonun birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Şahit beton serisi için birim ağırlığı 2348, uçucu küllü beton serileri için ise 2295 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

3.4.2.3 Su emme kapasitesi

Bu deney çimento hamuru numunelerine benzer şekilde beton numunelerde yapılmıştır ve aşağıdaki bağıntıyla numunelerin su emme yüzdesi bulunmuştur;

$$W_S = \frac{W_I - W_K}{W_K} \times 100 \qquad \textbf{(3.5)}$$

3.4.2.4 Ultrases deneyi

Çimento hamuru numunelerde yapıldığı şekilde beton numunelerde de ultrases geçiş süresi ölçülmüştür ve 3.2 bağıntı ile ultrases hızı hesaplanmıştır.

3.4.2.5 Basınç dayanımı

150x150x150 mm küp beton numunelere, ıslanma-kuruma veya donma-çözülme döngüleri uygulandıktan sonra basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

Basınç dayanımı deneyi TS-EN 12390-3 Standardına göre yapılmıştır. Bu deneyde U-TEST markalı 12390-4 standart'a uygun üretilmiş ve maksimum yük uygulama kapasitesi 2000 kN olan beton test cihazı kullanılmıştır.

Beton numuneler yük uygulama ekseni betonun dökülme eksenine dik gelecek deney cihazına yerleştirilmiş ve yük hızı 0.4 MPa/sn olarak ayarlanmıştır. Kırılma kuvvetinin, yükün uygulandığı (150x150 mm^2) kesit alana bölünmesiyle betonların basınç dayanımı değeri hesaplanmıştır.

3.4.3 Elektron Mikroskop Taraması (SEM)

İç yapı SEM görüntüleri incelenerek değerlendirilmiştir. Çimento hamuru ve beton numuneleri gibi metal olmayan numunelerde iletkenlik özelliği sağlamak için örnekler altın veya karbon gibi malzemeler ile kaplama yapılmaktadır. Bu kaplamanın kalınlığı en fazla 20 nm olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında çimento hamuru ve beton numunelerinin iç yapısının incelenmesi için basınç dayanımı deneyi uygulandıktan sonra kırılmış numunelerden 1x1 cm^2 kesit alanında örnekler çıkarılmıştır. Şekil 3.7'de taramalı elektron mikroskop cihazı gösterilmiştir.



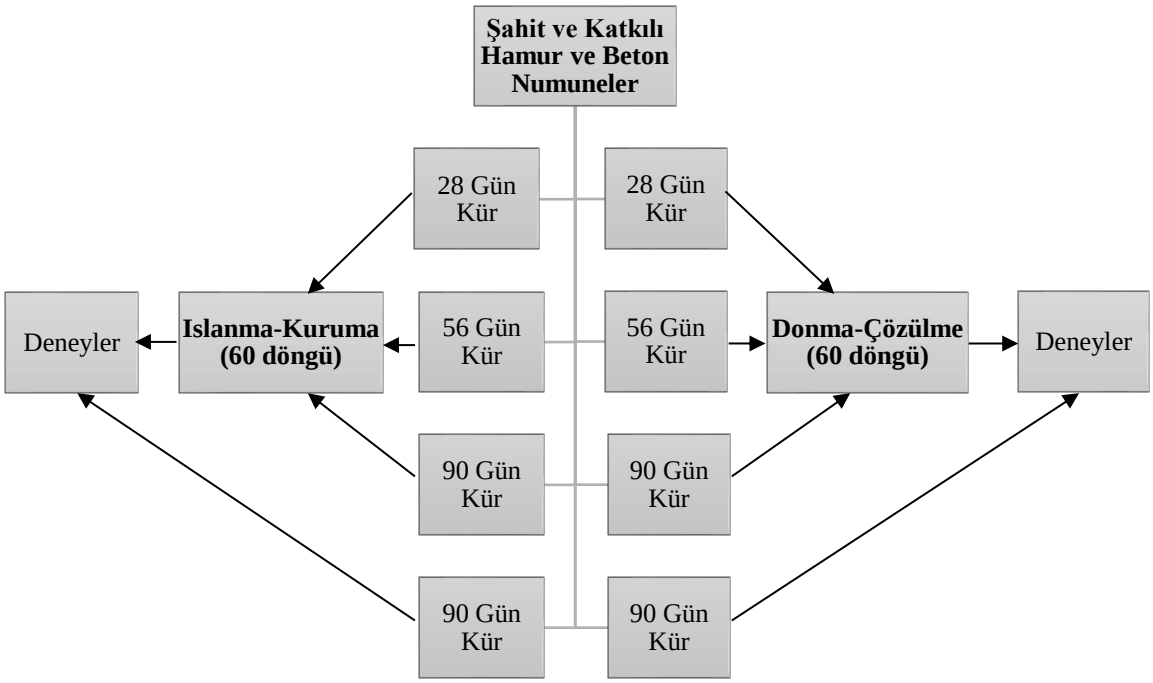
Şekil 3-7: Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı

4. BULGULAR

Bölüm 3'de anlatıldığı gibi, hamur ve beton numuneler iki grupta ayrı ayrı üretilmiştir. Beton ve harç numuneler uçucu kül içeren ve içermeyen numuneler olarak üretilmiştir. Uçucu kül içermeyen numuneler şahit numune olarak adlandırılmıştır. Numunelerin ilk serisi 28 gün kür havuzunda bekletilmiş daha sonra ya ıslanma-kuruma'ya veya donma-çözülme döngülerine maruz bırakılmış. İkinci ve üçünce seriler ise sırasıyla 56 ve 90 gün kürlenme süresi bittikten sonra aynı koşullara maruz kalmışlar.

Dördüncü serilerde ise 90 gün havuzda kürden sonra hiçbir eskitme koşula ve döngüye maruz kalmadan deney yapılmıştır. Numunelerde uygulanan işlemler, daha kolay anlaşılması için şematik olarak şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Bu bölümde, şahit ve uçucu kül katkılı çimento hamuru ve beton numuneleri üzerinde yapılan mekanik, fiziksel ve dayanıklılık(durabilite) deneylerinin sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.



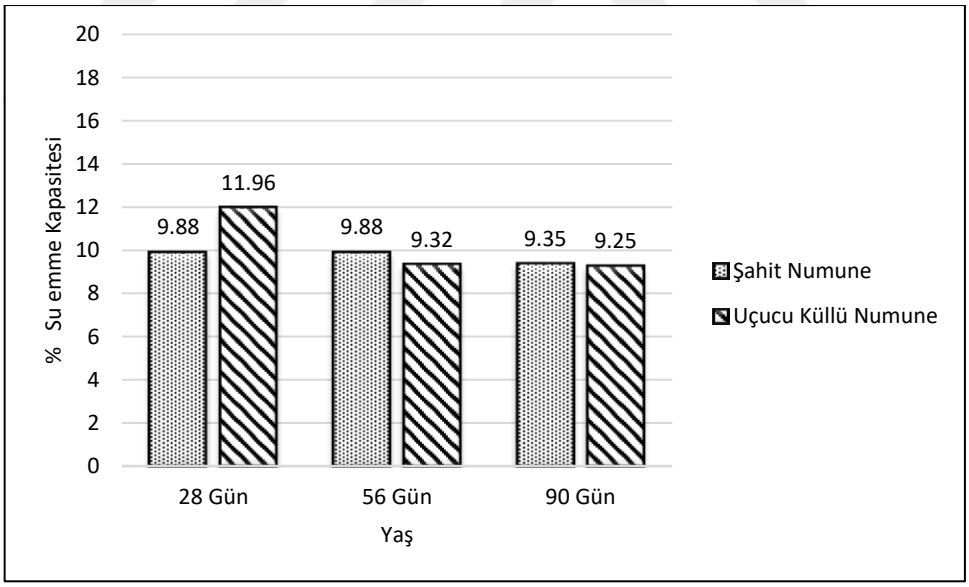
Şekil 4-1: Şahit ve katkılı hamur ve beton numunelerde uygulanan işlemlerin şematik görünümü

4.1 ÇİMENTO HAMURU NUMUNELER

4.1.1 Su Emme Kapasitesi

Her seride şahit ve katkılı hamur numuneler üzerinde, gereken kür süresi tamamlandıktan sonra planlanan eskitme koşulana maruz bırakılıp döngüler tamamlanmış, ardından su emme deneyi yapılmıştır. Şekil 4.2'de ıslanma-kuruma döngülerine, şekil 4.3'de donma-çözülme döngülerine maruz kalan ve şekil 4.4 ise hiçbir eskitme koşullarına maruz kalmayan numunelerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

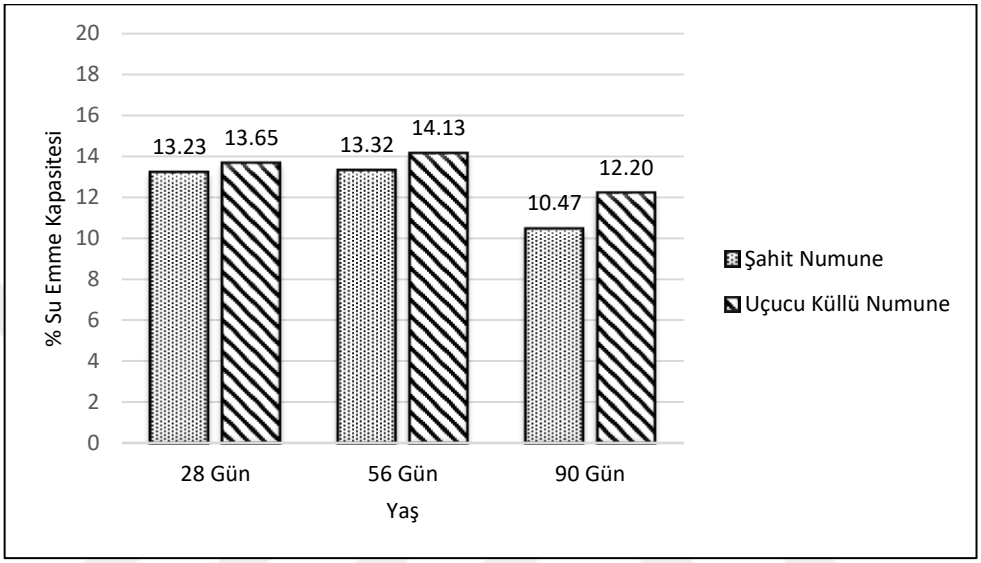
Islanma-kuruma döngülerine maruz kalan hem şahit numunelerde ve hem uçucu küllü numunelerde genel olarak, kür süresi arttıkça su emme kapasitesi düşmektedir. Bu gelişme uçucu kül katkılı numunelerde daha belirgin ve yüksektir. Bu sonuçlar uçucu külün reaksiyonlarının daha geç yaşlarda tamamlanmasına bağlanmaktadır.



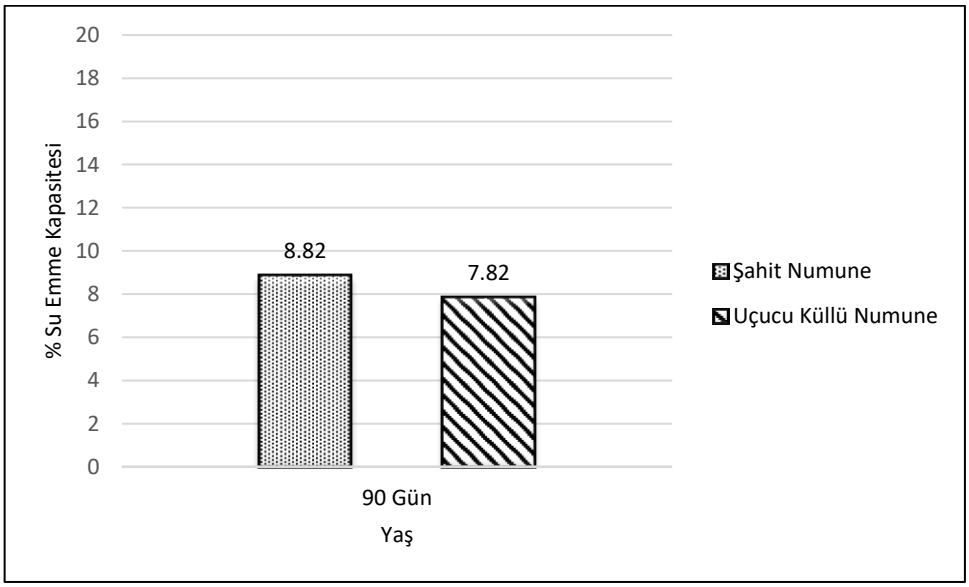
Şekil 4-2: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin % su emme kapasitesi

Donma-çözülme döngülerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü numunelerin sonuçları şekil 4.3'te verilmiştir. Donma çözülme döngülerine maruz kalan hem şahit numunelerde ve hem uçucu küllü numunelerde genel olarak, 56 gün suda kürlenen numunelerde belirgin bir değişiklik olmazken, 90 gün kürlenen numunelerde, hem şahit hem de uçucu küllü numuneler

için belirgin oranda düşmektedir. Bu düşüş, uçucu kül katkılı numunelerde daha belirgin ve yüksektir. Bu sonuçlar uçucu külün reaksiyonlarının daha geç yaşlarda tamamlanmasına bağlanmaktadır.



Şekil 4-3: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin % su emme kapasitesi



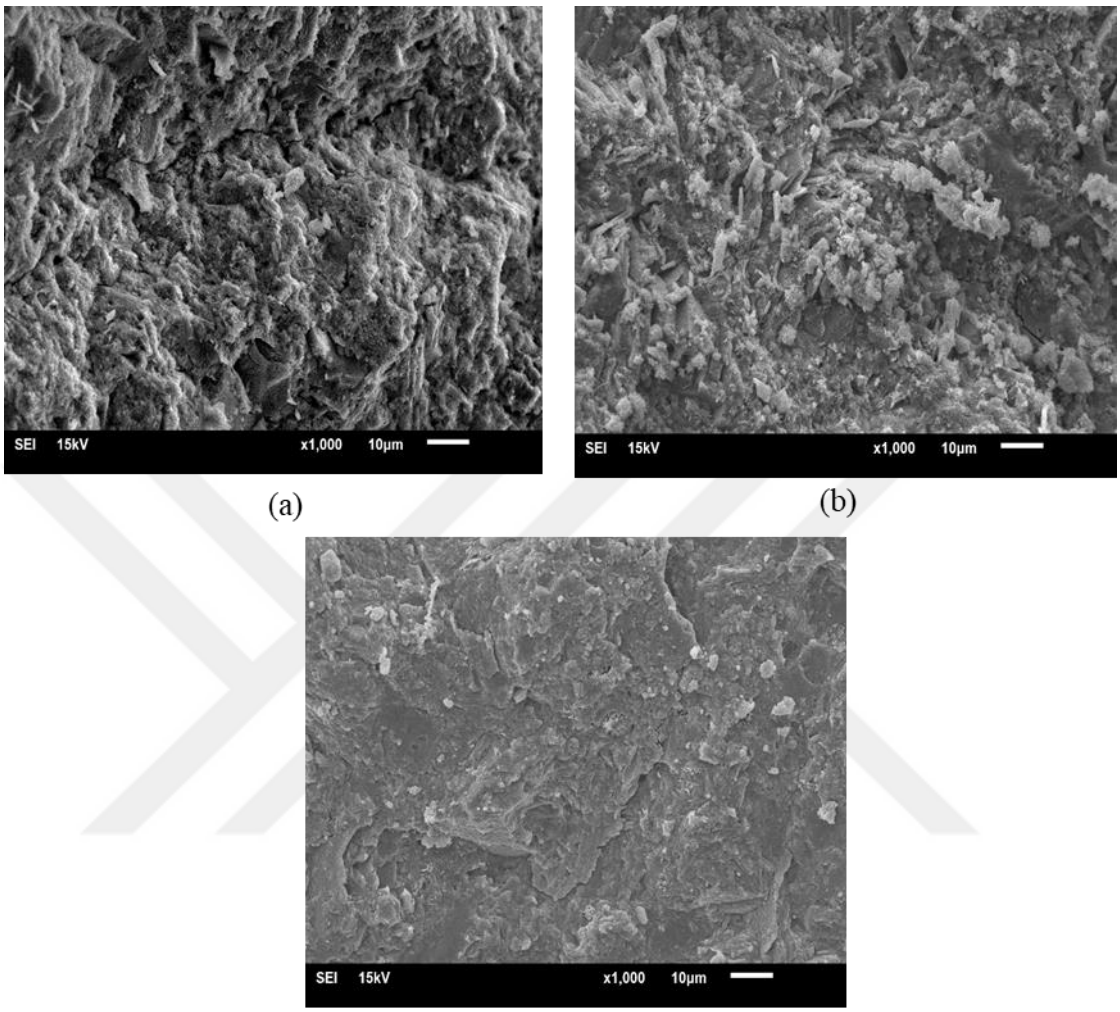
Şekil 4-4: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin % su emme kapasitesi

Şekil 4.4’te hiçbir eskitme etkene maruz bırakılmamış ve 90 gün kürlenmiş şahit ve uçucu küllü numunelerin su emme oranları gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde uçucu kül içeren numunelerin su emme oranlarının şahit numune su emme oranlarına göre %12 oranında düşük olduğu görülmektedir.

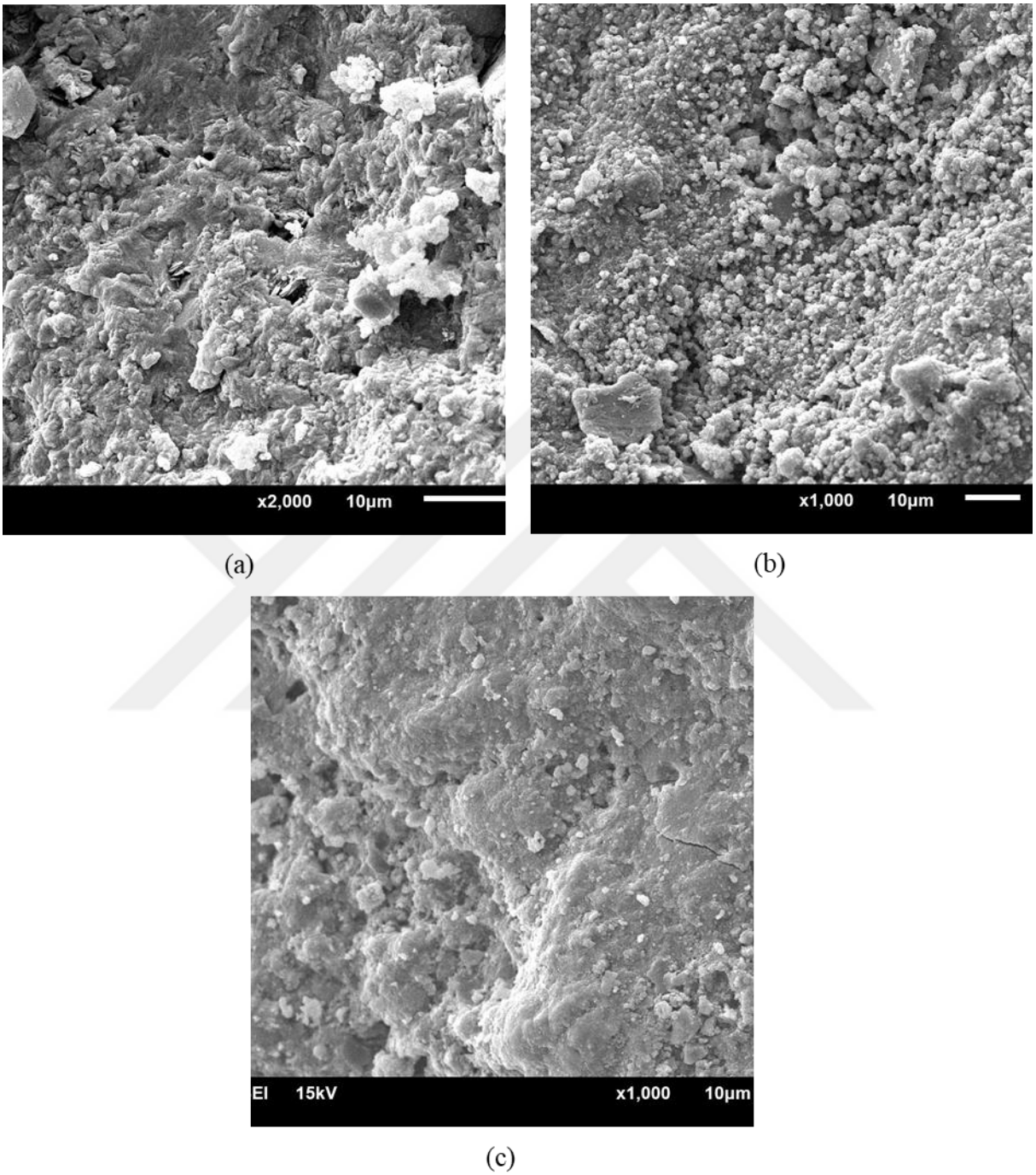
Serbest kireç ile reaksiyona giren uçucu kül gibi puzolanların kullanılması, çimento matrisinin içindeki boşlukları ve iç kapiler gözenekleri hidratasyon ürünü olan C-S-H ile dolması ile sonuçlanır.

Genel olarak, çimento hamurunun hidratasyon yaşı arttıkça yoğunluğu giderek artmaktadır. Bunun nedeni, hidratasyon ürünleri ile gözeneklerin doldurulması sonucu hidratasyon yaşı ile birlikte toplam gözenekliliğin azalmasıdır.

Islanma kurumaya maruz bırakılan numunelerin elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.5 ve 4.6’da verilmektedir. Yaşın artmasıyla birlikte çimentonun hidratasyon derecesi sürekli artmış ve uçucu kül zamanın ilerlemesi ile birlikte reaksiyonunu tamamlama imkanı bulmuştur. Yeni oluşan hidratasyon ürünleri sürekli olarak sertleşmiş gözenekleri doldurduğu için, numunelerin toplam gözenek hacmi ve gözeneklerin çapının önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4-5: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde ıslanma-kuruma'ya maruz kalan şahit hamur numunelerin SEM görüntüsü



Şekil 4-6: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde ıslanma-kuruma'ya maruz kalan uçucu küllü hamur numunelerin SEM görüntüsü

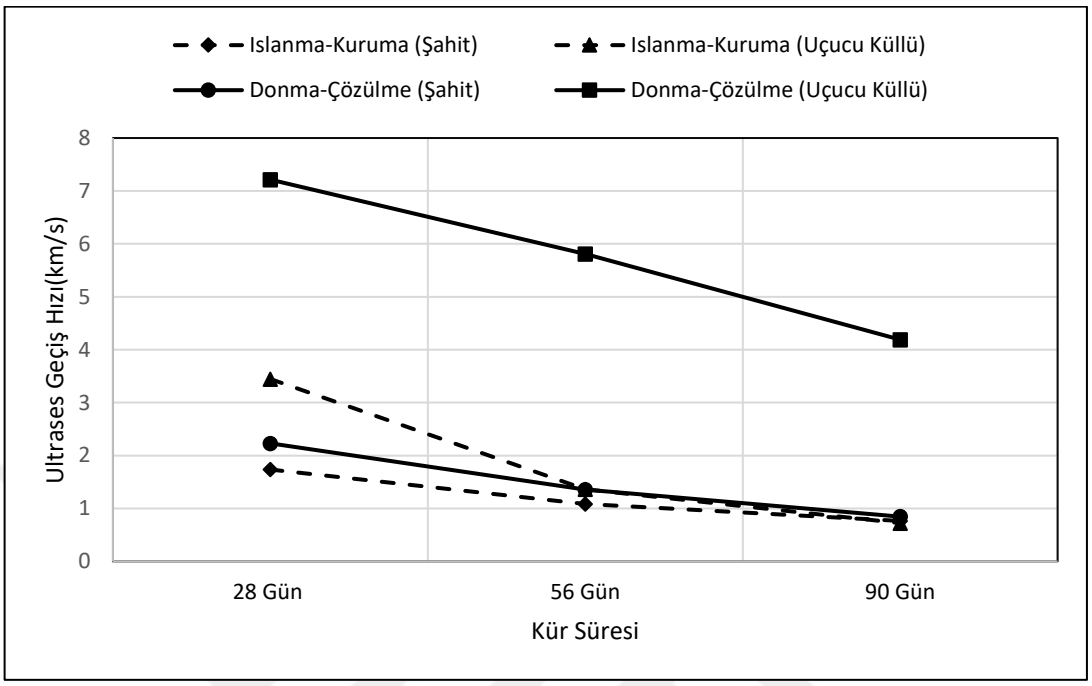
Tablo 4-1'de ıslanma-kuruma veya donma-çözülme döngülerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü hamur numunelerinde oluşan boşluk ve gözeneklerin çap değişim aralığı ve her seriden

elde edilen ortalama çaplar verilmiştir. Çap ölçümleri, elektron mikroskobu görüntülerine dayanılarak yapılmıştır. Ayrıca şekil 4.7'de tüm hamur numunelerin kür süresi ile boşluk çapı ilişkilerini gösteren grafik gösterilmektedir.. Numunelerin yaş ilerlemesi ile hidratasyon reaksiyonuda ilerlemektedir dolayısıyla daha çok C-S-H jeli üretilmektedir, böylece üretilen jeller boşlukların için doldurmaktadır. Bu sebeple boşlukların çapı küçülmekte olup numunedeki toplam boşluk hacmi azalmaktadır. Kür süresinin artışıyla su emme kapasitelerinde elde edilen düşüş yukarıda anlatılan sebebe bağlanabilir.

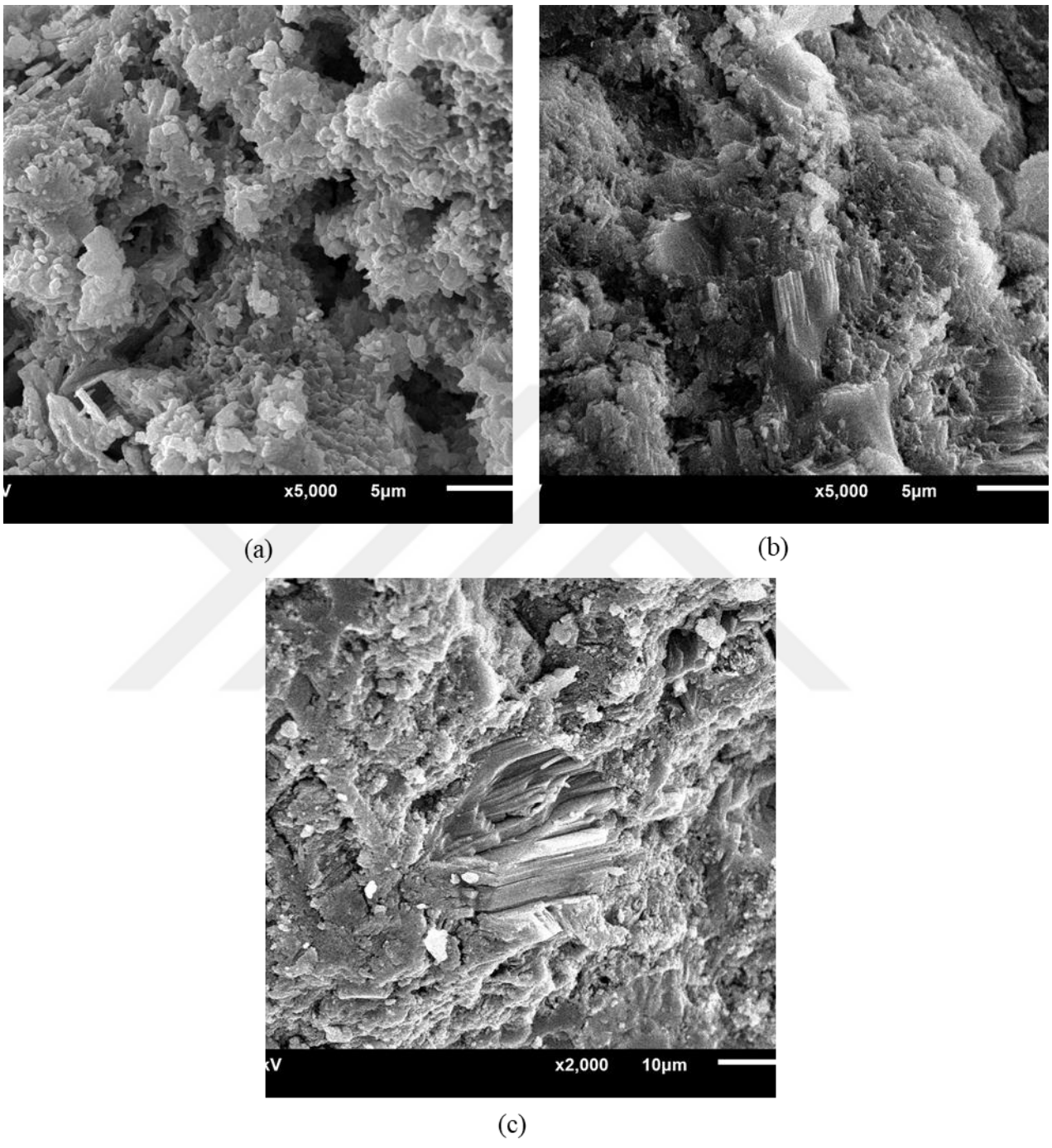
Tablo 4-1: Şahit ve uçucu küllü hamur numunelerde oluşan boşlukların çapı(µm)

Eskitme koşulu	**Numune**	**28 Gün Kür**		**56 Gün Kür**		**90 Gün Kür**	
		Çap aralığı(µm)	ortalama(µm)	Çap aralığı(µm)	ortalama(µm)	Çap aralığı(µm)	ortalama(µm)
Islanma-Kuruma	Şahit	0.611-3	1.735	0.604-1.74	1.087	0.531-1.397	0.765
	Uçucu küllü	1.589-7.291	3.446	0.98-3	1.365	0.34-1.366	0.724
Donma-Çözülme	Şahit	1.026-3.689	2.23	0.89-2.761	1.356	0.378-1.308	0.846
	Uçucu küllü	3.81-9.56	7.214	2.55-7.98	5.806	2.11-6.87	4.19

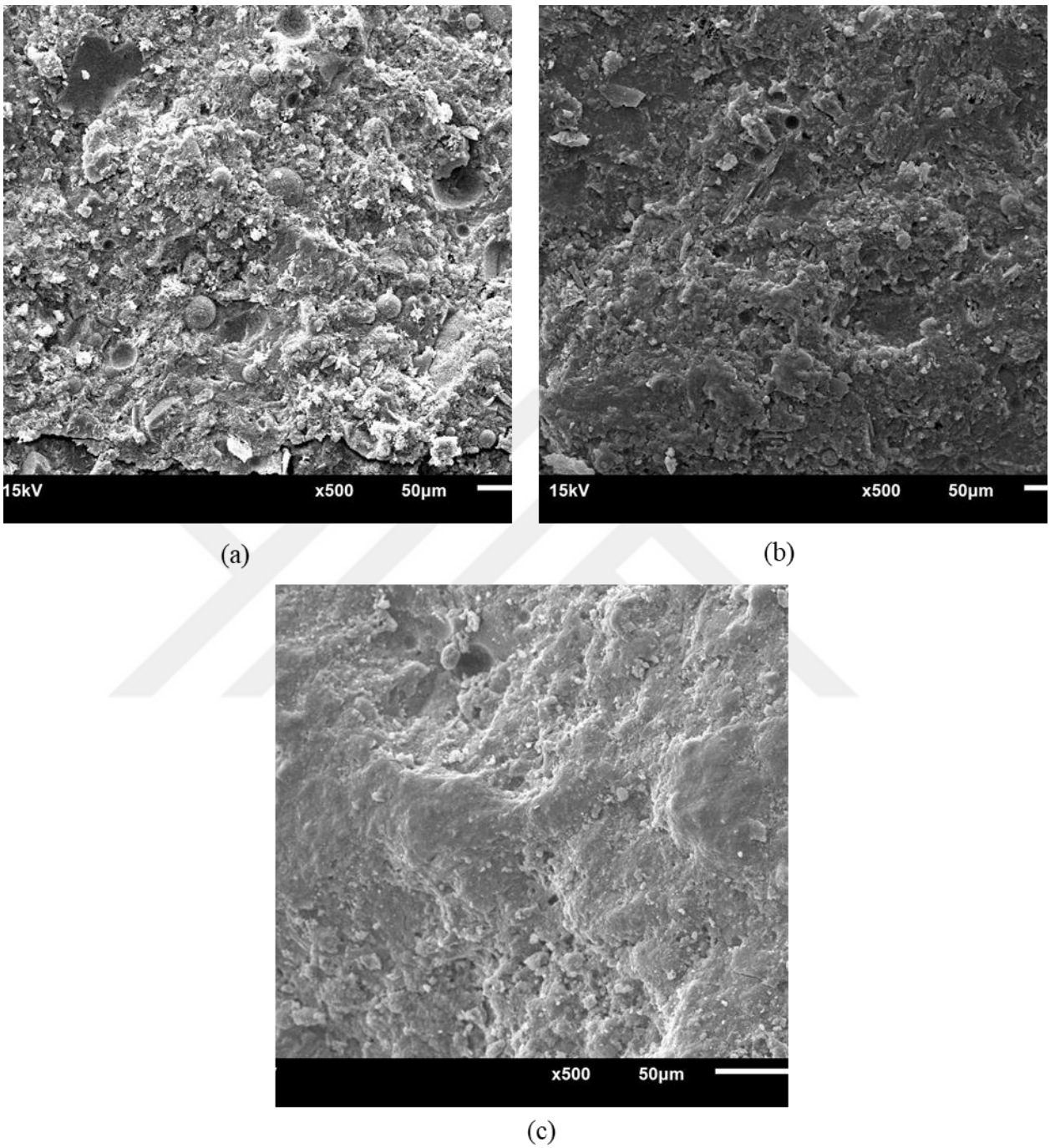
Şekil 4-7'de şahit ve uçucu küllü numunelerin boşluk boyut dağılımı ve kür süresi ilişkisi gösterilmektedir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, numunelerin kür süresi arttıkça su emme yüzdesi düşmektedir; bu düşüş oranı şahit numunelerde %20 ve uçucu küllü numunelerde %10 mertebesindedir. Bu numunelerin sem görüntüleri incelendiğinde numunelerin daha çok gözenekli olduğu (özelikle uçucu küllü numuneler) ve boşlukların çapları daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bunun en önemli sebebi çevresel soğuk havanın (-20 ºC) hidratasyon ısısı üzerindeki olumsuz etkisidir, şöyle ki soğuk hava hidratasyon reaksiyonları yavaşlatmakta ve böylece daha az C-S-H üretilmektedir. 56 ve 90 gün kürlenmiş numunelerde C-S-H daha fazla üretilmekte ve böylece numunelerin gözenekleri jel ile dolmakta olup boşlukların çaplarının küçülmesi sonucunda toplam boşluk hacmi azalmaktadır.



Şekil 4-7: Islanma-kuruma veya Donma-çözülme döngülerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü hamur numunelerin boşluklarının çap değişimi



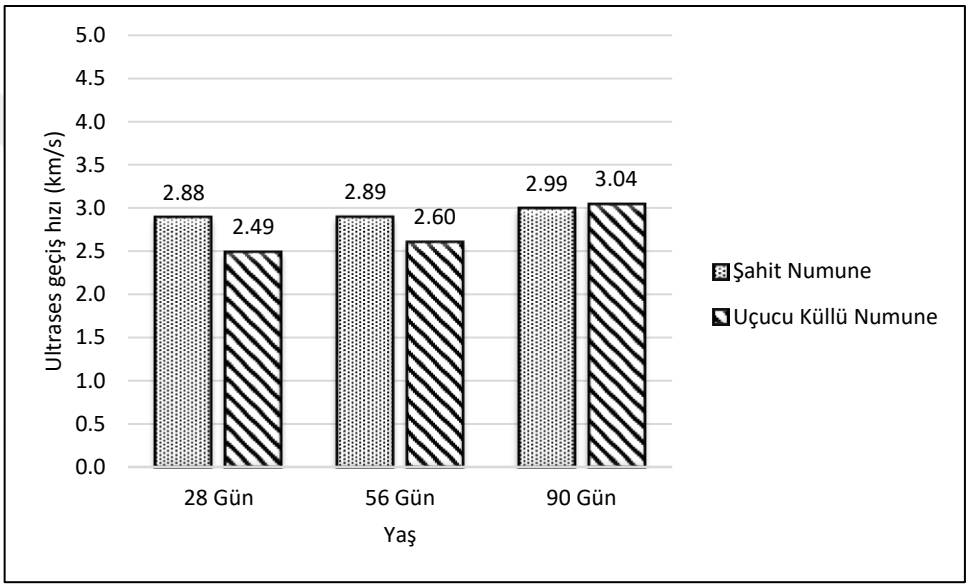
Şekil 4-8: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde donma-çözülme'ya maruz kalan şahit hamur numunelerin SEM görüntüsü



Şekil 4-9: (a) 28 gün, (b) 56 gün ve (c) 90 gün kür süresinde donma-çözülme'ya maruz kalan uçucu küllü hamur numunelerin SEM görüntüsü

4.1.2 Ultrases Geçiş Hızı

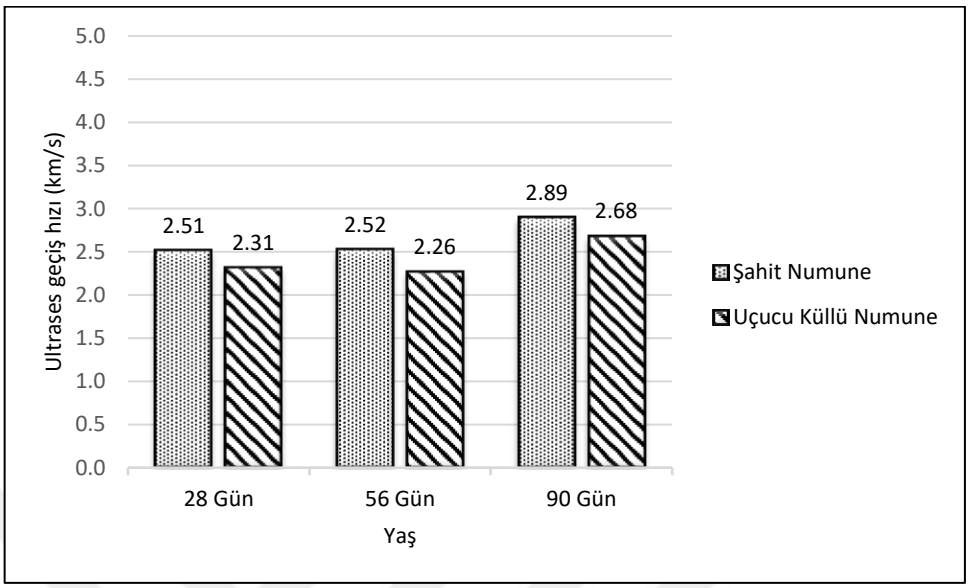
Şekil 4.10'da ıslanma-kuruma'ya maruz kalan numuneler şekil 4.11'de ise donma-çözülme çevirimlere maruz bırakılmış numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları verilmiştir. Kür süresi ilerledikçe ultrases geçiş hızı yükselmektedir. Bunun nedeni kür süresinin uzaması ile birlikte daha çok hidratasyon, daha çok C-S-H jeli oluşmaktadır. Dolayısıyla numuneler ne kadar yoğun ve boşluksuz olursa o kadar ultrases geçişi daha hızlı olmaktadır.



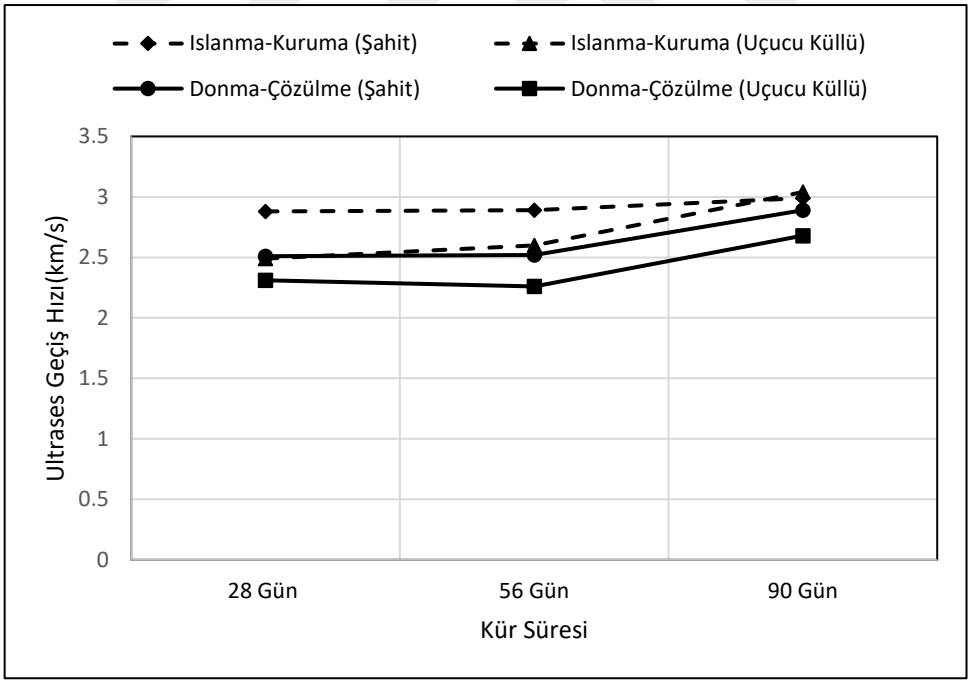
Şekil 4-10: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı (km/s)

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, genel olarak 90 gün kür görmüş numunelerde hem ıslanma-kuruma çevrimleri ve hem donma-çözülme döngüleri sonrası ultrases geçiş hızı yükselmiştir. Fakat donma-çözülmeye maruz kalan numuneler, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan numunelere göre daha düşük ultrases geçiş hızı görünmüştür.

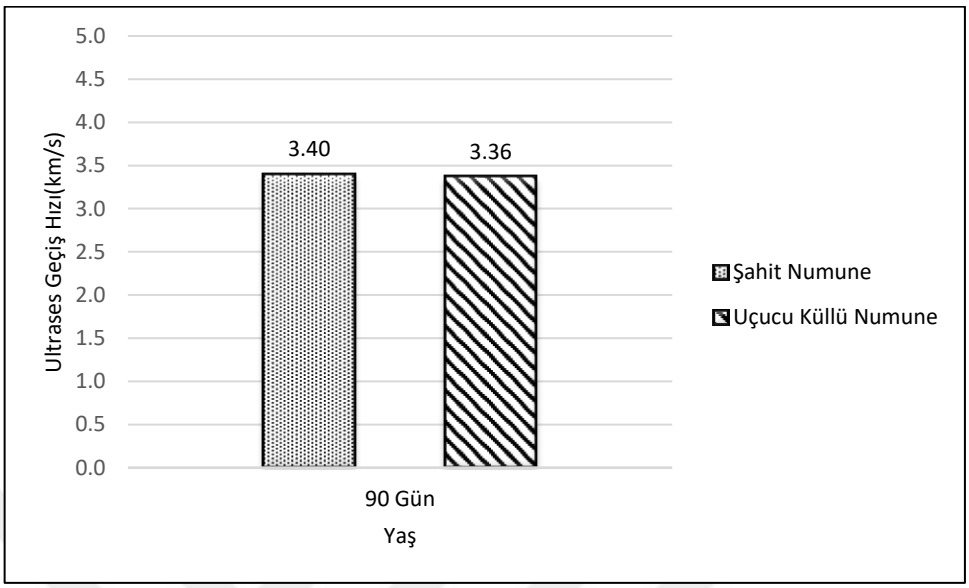
Şekil 4.13'te eskitme koşuluna maruz kalmayan 90 günden sonra deney yapılan şahit ve uçucu küllü hamur numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi şahit ve uçucu küllü numuneler hemen hemen aynı ultrases geçiş hızı değerlerine sahiptir.



Şekil 4-11: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı (km/s)



Şekil 4-12: Islanma-kuruma veya Donma-çözülme döngülerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü hamur numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s)



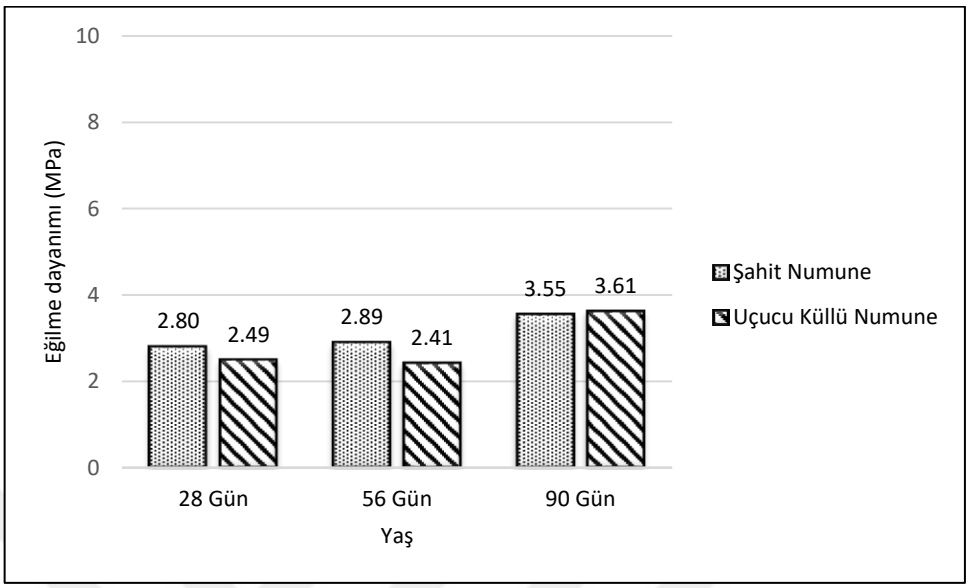
Şekil 4-13: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s)

4.1.3 Eğilme Dayanımı

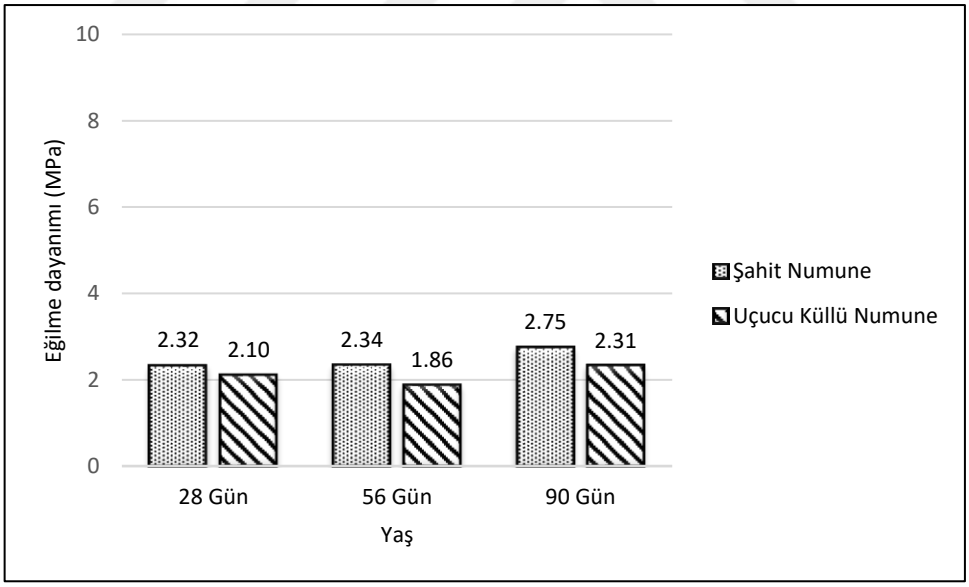
Şekil 4.14 ve 4.15'e göre, eğilme dayanımı sonuçları 90 günün sonunda, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan şahit numunelerin dayanımı 28 gün dayanımına kıyas %27, uçucu küllü numunelerin dayanımı 28 gün dayanımına kıyas %45 artmıştır. Donma-çözülme koşulunda ise şahit numuneler %18, uçucu küllü numuneler %10 oranında artmıştır.

Şekil 4.16'da gösterildiği gibi, farklı eskitme koşularına maruz kalan numunelerden elde edilen sonuçlar, hiçbir eskitme koşuluna maruz kalmayan ve 90 gün kür süresinden sonra deneye tabi tutulan numunelerin sonuçlarına kıyasla, şahit numunelerde ıslanma-kuruma %5, donma-çözülme %26 oranında ultrases geçiş hızı azalması elde edilmektedir. Bu oranlar, donma-çözülme sonrası numunelerde sırasıyla %12 ve %44 olmuştur.

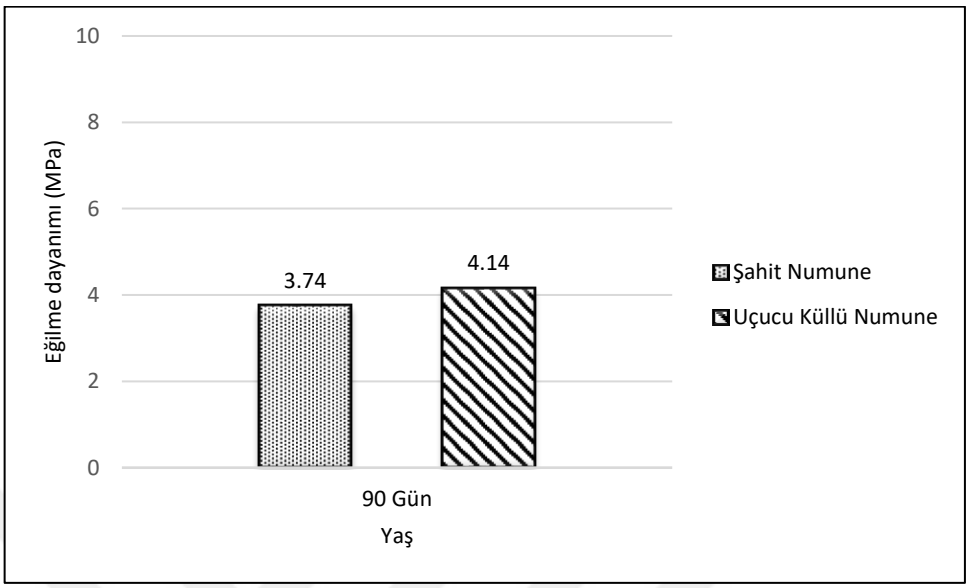
Eğilme dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar dikkate alındığına donma-çözülme döngüleri sonucunda ultrases geçiş hızındaki azalma ıslanma-kuruma çevrimlerine göre iki kat daha fazla olmaktadır.



Şekil 4-14: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin eğilme dayanımı (MPa)



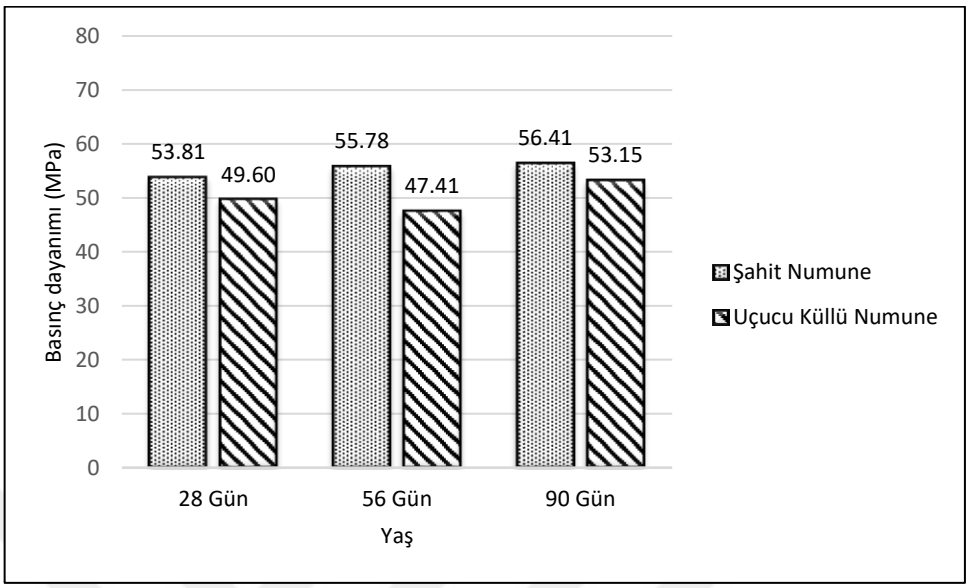
Şekil 4-15: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin eğilme dayanımı (MPa)



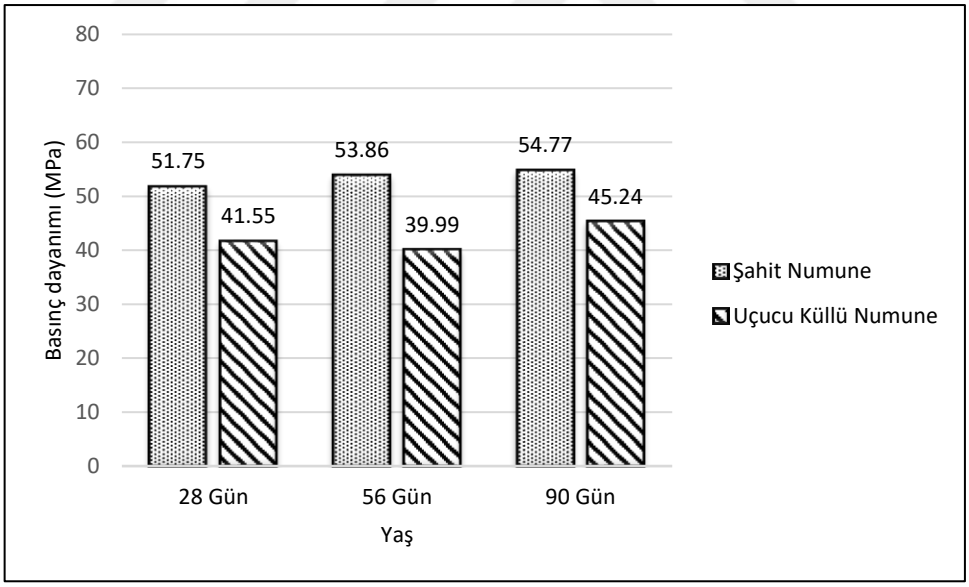
Şekil 4-16: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin eğilme dayanımı (MPa)

4.1.4 Basınç Dayanımı

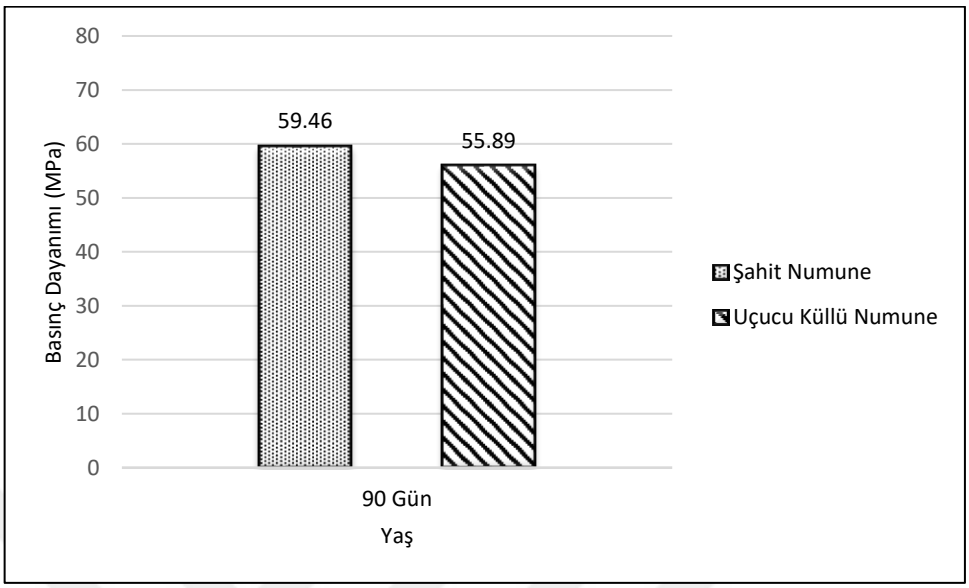
Numunelerin basınç dayanımı sonuçları şekil 4.17, 4.18 ve 4.19 da verilmiştir. Eğilme deneyinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde kür süresi ilerledikçe tüm numunelerin basınç dayanımı yükselmiştir. 90 gün kürlenmiş ve hiç eskitme koşula maruz kalmayan şahit ve uçucu küllü numunelerde basınç dayanımı sırasıyla 59,46 ve 55,89 MPa iken bu değerler ıslanma-kuruma'ya maruz kalan numunelerde 56,41 ve 53,15 MPa olarak elde edilmiştir. Donma-çözülme'ye maruz kalan numunelerde ise hiç eskitme koşula maruz kalmayan şahit ve uçucu küllü numunelerde basınç dayanımı sırasıyla 54,77 ve 45,24 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4-17: Islanma-kuruma koşuluna maruz kalan numunelerin basınç dayanımı (MPa)



Şekil 4-18: Donma-çözülme koşuluna maruz kalan numunelerin basınç dayanımı (MPa)



Şekil 4-19: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan hamur numunelerin basınç dayanımı (MPa)

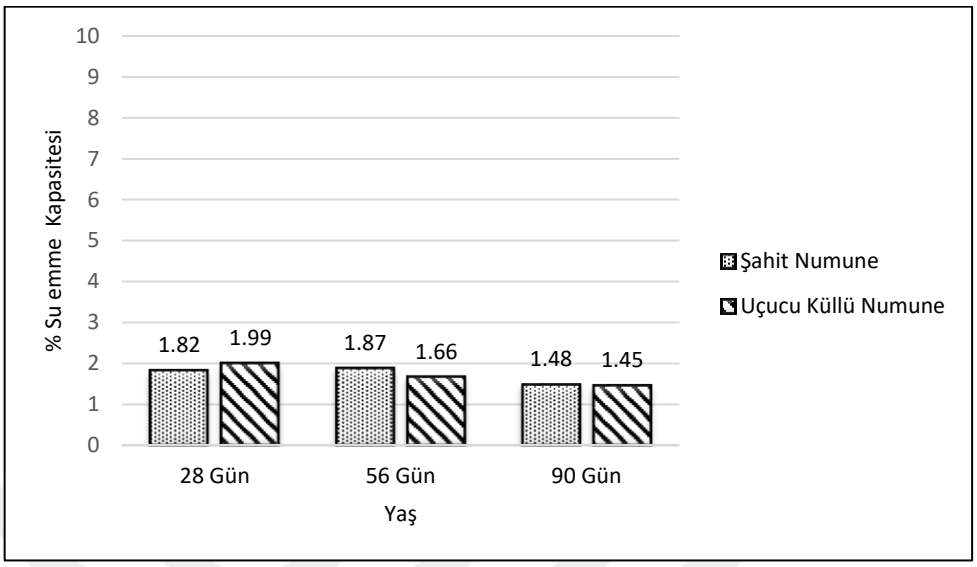
4.2 BETON NUMUNELER

4.2.1 Su Emme Kapasitesi

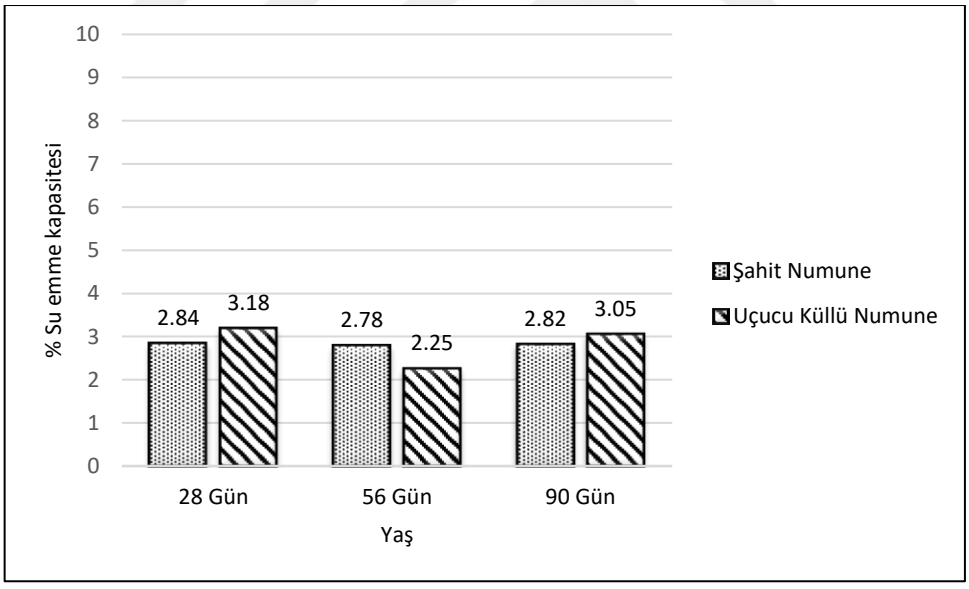
Şekil 4.20'de ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan hamur numunelerin sonuçları gösterilmiştir. Islanma-kuruma çevirimlerine maruz kalan beton numunelerde 28 gün süresince kürlenen uçucu küllü numunelerde su emme yüzdesi yüksek olmasına rağmen 90 gün kürlenmeden sonra şahit numunelerle aynı mertebede sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi, donma-çözülme döngülerine maruz kalan numunelerde şahit numuneler daha düşük su emme yüzdesine sahiptir. Ayrıca donma-çözülme tüm numunelerde ıslanma-kuruma'ya maruz kalan numunelere göre daha yüksek su emme yüzdesine sebep olmuştur.

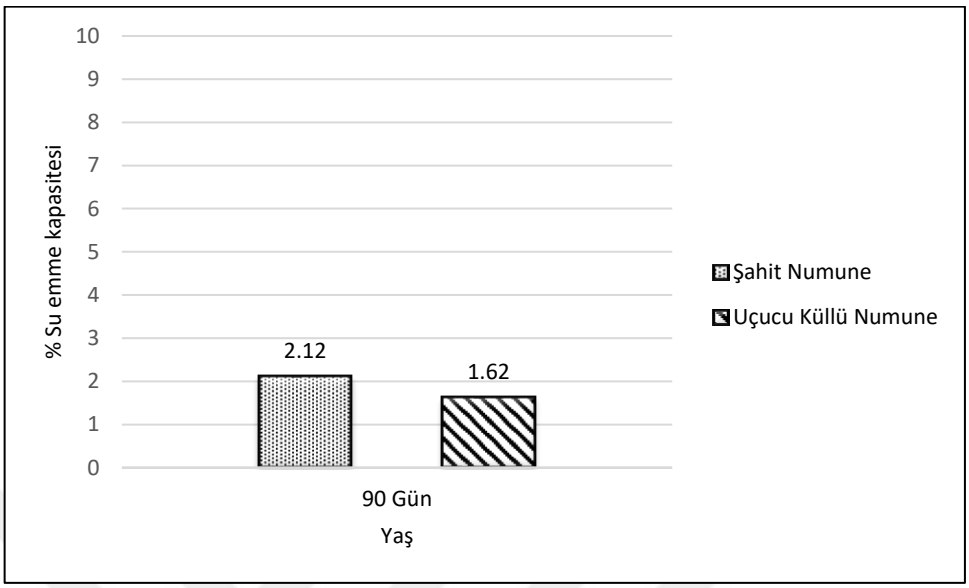
Şekil 4.22'de 90 günlük kür süresi sonrası hiçbir eskitme koşuluna maruz kalmadan deneye tabi tutulan numunelerin sonuçları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu numunelerin su emme yüzdesi ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan numunelerden daha yüksek olmuştur. Başka değişle ıslanma-kuruma çevrimleri beton numunelerin su emme yüzdesini düşürmek yönünde olumlu bir şekilde etkilemiştir.



Şekil 4-20: Islanma-kuruma koşuluna maruz beton numunelerin % su emme kapasitesi



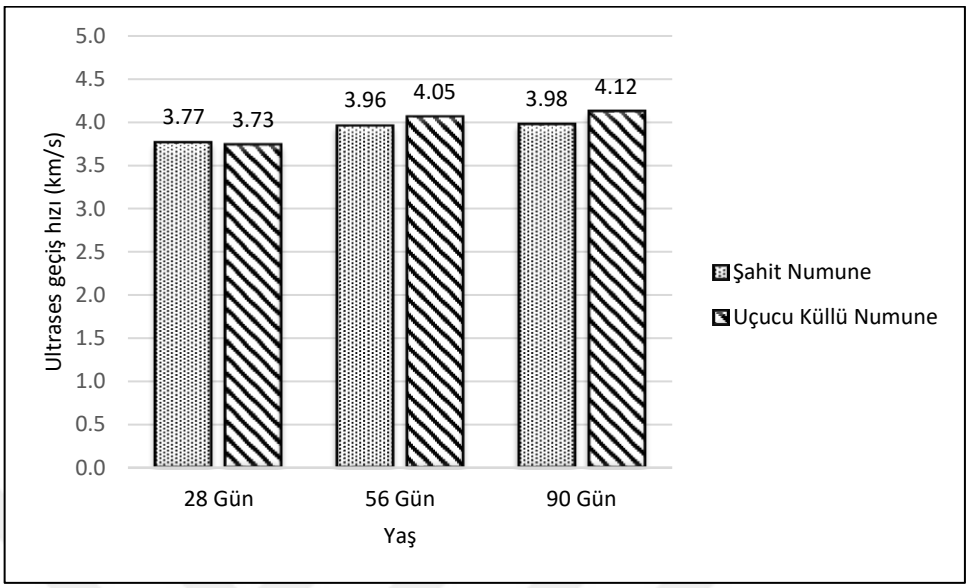
Şekil 4-21: Donma-çözülme koşuluna maruz beton numunelerin % su emme kapasitesi



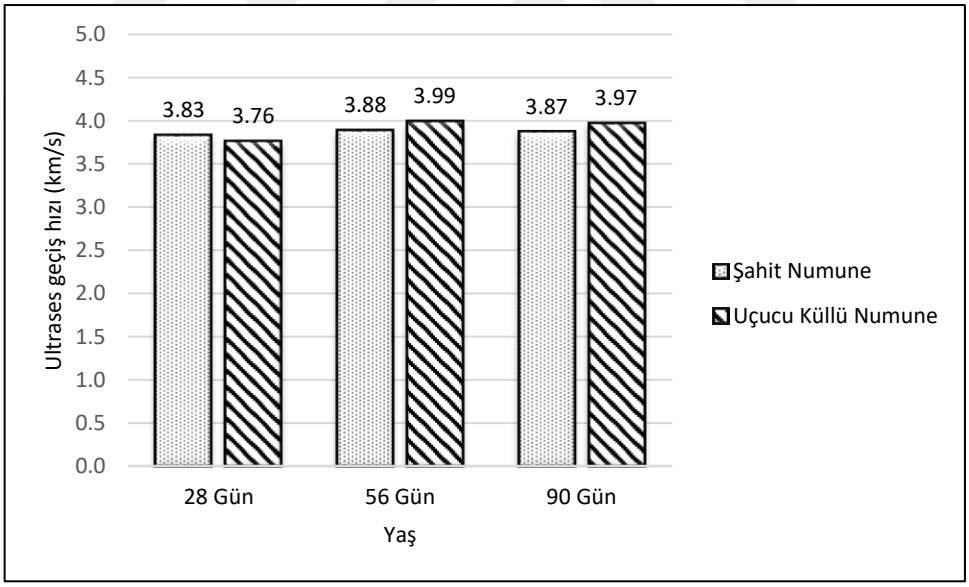
Şekil 4-22: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan beton numunelerin % su emme kapasitesi

4.2.2 Ultrases Geçiş Hızı

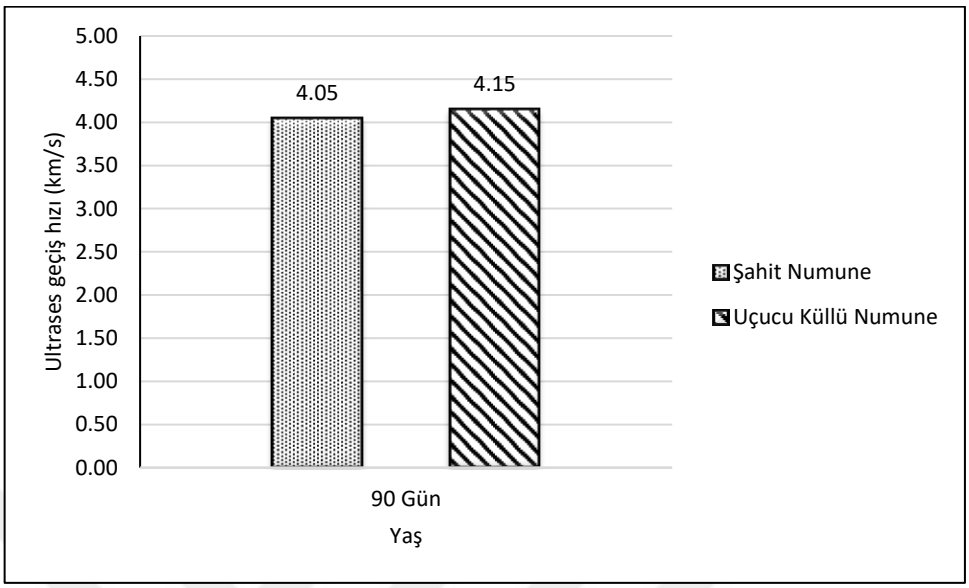
Beton numunelerde ultrases geçiş hızının sonuçları şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'de verilmiştir. Tüm numunelerde kür süresi ilerledikçe ultrases geçiş hızı yükselmektedir. Bunun nedeni kür süresi uzadıkça, hidratasyon reaksiyonun devam etmesi, dolayısıyla daha çok C-S-H jelinin oluşması olarak yorumlanmıştır. Daha çok C-S-H jelinin oluşması betonun yapısında bulunan boşlukların doldurulmasına katkıda bulunmakta, boşlukların çapını küçülterek daha sık ve yoğun bir yapının oluşmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 4-23: Islanma-kuruma koşuluna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s)



Şekil 4-24: Donma-çözülme koşuluna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s)



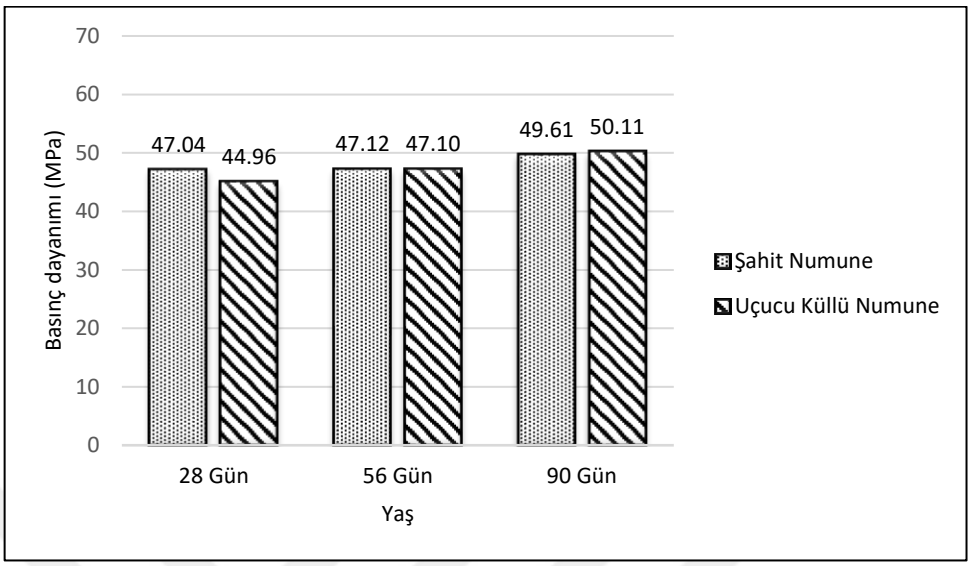
Şekil 4-25: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan beton numunelerin ultrases geçiş hızı(km/s)

4.2.3 Basınç Dayanımı

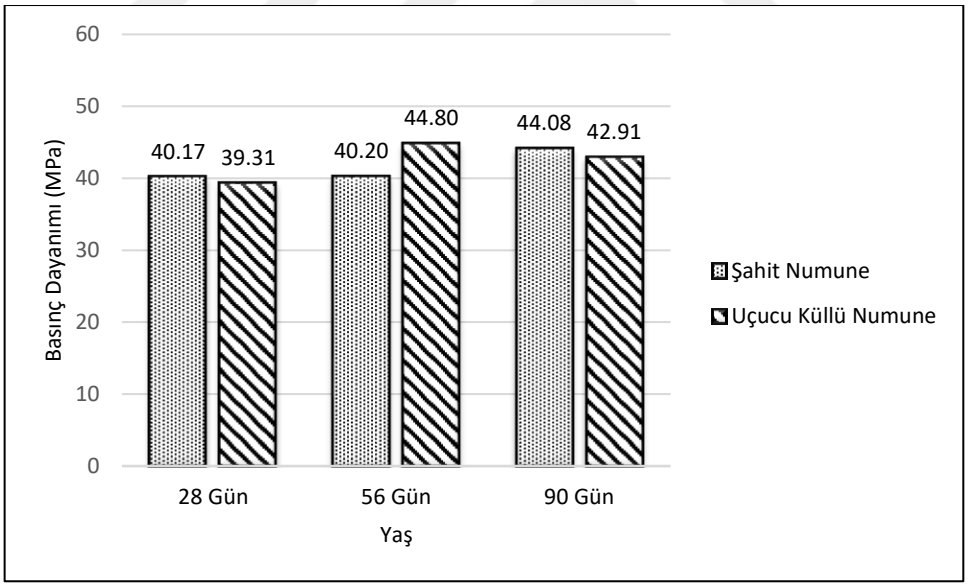
Genel olarak tüm numunelerde yaş ilerledikçe 90 günlük numunelerin basınç dayanımı 28 günlük numunelere göre daha yüksek değerler almıştır.

şekil 4.26'ye göre, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan numunelerde uçucu küllü numuneler şahit numunelere göre daha iyi performans göstermişlerdir. Şahit numunelerin basınç dayanımı 49,61 MPa'ken uçucu küllü numunelerin basınç dayanımı 50,11 MPa olmuştur.

Şekil 4.27'de donma-çözülme döngülerine maruz kalan numunelerin sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre 90 günlük uçucu küllü numunelerin basınç dayanımı 28 günlük dayanıma göre yüksek olsa da 56 günlük numunelere göre daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Bunun sebebi kesin olmamakla birlikte, 90 günlük numunelerin daha yoğun ve az gözenekli olması olarak yorumlanabilir. Böylece donma sebebi ile hacim artışı 90 günlük numunelerde çatlakların oluşmasına neden olmuş olabilir. Bu durumun, basınç dayanımını az da olsa olumsuz şekilde etkilemiş olabileceği düşünülmektedir.



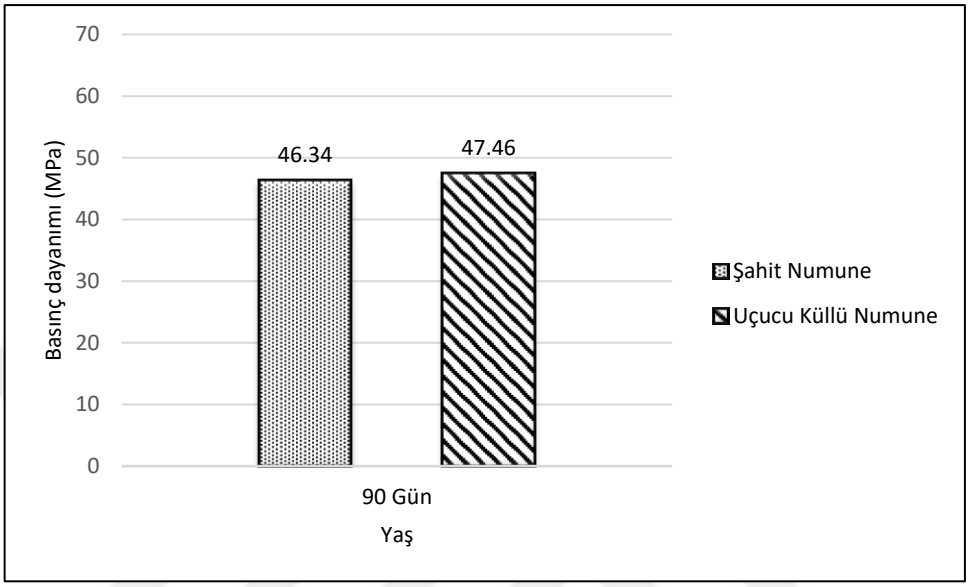
Şekil 4-26: Islanma-kuruma koşuluna maruz beton numunelerin basınç dayanımı(MPa)



Şekil 4-27: Donma-çözülme koşuluna maruz beton numunelerin basınç dayanımı(MPa)

Şekil 4.28'de, 90 gün kürlenmiş ve hiçbir eskitme koşuluna maruz kalmayan numunelerin sonuçlarına bakıldığında basınç dayanımının ıslanma-kuruma'ya maruz kalan numunelerden düşük olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni numunelerin, ıslanma kuruma çevrimlerinde 50 ºC sıcaklıkta kurutulmasıdır. Ortam sıcaklığının artmasıyla hidratasyon hızı da artmakta, böylece daha hızlı ve çok kalsiyum hidroksit üretilmekte ve üretilen reaksiyon ürünü, puzolanik

özeliğe sahip olan uçucu kül ile reaksiyona girip ve daha çok C-S-H jeli üretilmesine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 4-28: 90 gün kürlenmiş ve hiç bir eskitme koşuluna maruz kalmayan beton numunelerin basınç dayanımı(MPa)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

- Uçucu küllü numunelerde erken yaşlarda su emme kapasitesi artmaktadır. Şahit numunelere göre uçucu küllü numunelerde %20 daha az çimento kullanıldığı için daha az C-S-H jeli üretilmekte, bu yüzden erken yaşlardaki uçucu küllü numunelerde daha çok ve daha büyük boşluklar oluşmaktadır. Çimento hidratasyonu devam ettikçe, daha çok kalsiyum hidroksit ortaya çıkmakta ve ileri yaşlarda uçucu külde mevcut olan silis ile reaksiyona girip daha fazla C-S-H jeli oluşturmaktadır. Yeni üretilen bu jeller, boşlukların içine doğru hareket etmekte ve mevcut boşlukları ya tamamen doldurmakta ya da küçültmektedir.

- Tüm numunelerde yaş ilerledikçe ultrases geçiş hızı artmaktadır. Ultrases hızı basınç dayanımı ile doğru orantılıdır. Donma-çözülme döngülerine maruz kalan numunelerin ultrases hızı ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan ve hiçbir eskitme koşuluna maruz kalmayan numunelere göre daha düşüktür. Bunun nedeni donma-çözülmeye maruz kalan numunelerin daha boşluklu olmasıdır.

- 90 günlük hamur numunelerde ultrases hızı kıyaslandığında, donma-çözülme'ye maruz kalan şahit numuneler %15, ıslanma-kuruma'ya maruz kalan numuneler %12 düşüş göstermiştir. Aynı şekilde bu sonuçlar uçucu küllü numunelerde sırasıyla, %20 ve %9 olmuştur.

- Beton numunelerde ultrases sonuçlarına göre, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası elde edilen değer, eskitme koşullarına maruz kalmayan numuneler ile aynı mertebededir. Ancak, donma-çözülme koşulundaki numunelerde ultrases değerleri %4 oranında düşmüştür. Hamur ve beton numunelerde uçucu kül kullanılması ile erken yaşlarda dayanım kazanım hızı düşmektedir.

- Tüm uçucu küllü hamur numunelerde erken yaşta basınç ve eğilme dayanımı, şahit (katkısız) numunelere göre daha düşüktür. Bu sonuç, erken yaşta çimento hidratasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$'in yeterli miktarda ortaya çıkmamasından kaynaklanmaktadır.

Dolayısıyla uçucu kül bu aşamada daha reaksiyona girmemiştir. Numunelerin yaşı ilerledikçe ortamda gerekli kalsiyum hidroksit bulunduğunda uçucu kül reaksiyona girip ve daha çok C-S-H jeli üretilmektedir. Bu sebeple 90 günlük uçucu küllü numunelerin dayanımı daha yüksek olmuştur.

- Hamur numunelerde hem donma-çözülme ve hem ıslanma-kuruma çevirimlerine maruz kalan şahit numunelerde yaş ilerledikçe eğilme ve basınç dayanımı yükselmiştir. Aynı durum uçucu küllü hamur numunelerde geçerli olmayıp ancak 90 günlük numuneler bu dayanım kaybını telefi etmiş ve değerler yükselmiştir.

- Donma-çözülme sonrası uçucu küllü numunelerde eğilme dayanımı, aynı koşuldaki şahit numuneye göre %16 düşmüştür. Islanma-kuruma sonrası şahit ve uçucu küllü numunelerde çok yakın eğilme dayanımı elde edilmiştir. Hiç eskitme koşuluna maruz kalmayan numunelerde ise 90 gün sonrası uçucu küllü numunelerin eğilme dayanımı şahit numunelere göre %11 oranında daha yüksek olmuştur.

- Hamur numunelerin basınç dayanımında eğilme dayanımına benzer şekilde gelişme trendi izlenmiştir.

- Beton numunelerde yaş ilerlemesi ile numunelerin su emme kapasitesi düşmüştür. Sonuçlar incelendiğinden düşük su emme kapasitesi oranı ıslanma-kuruma çevrimlere maruz kalan numunelerde elde edilmiştir. Bu numuneler hiçbir eskitme koşuluna maruz kalmayan numunelere göre şahit numunelerde %30, uçucu küllü numunelerde %10 daha düşük su emme kapasitesine sahiptir.

- Eskitme koşuluna maruz kalmayan 90 günlük numunelerde uçucu küllü beton numunelerin su emme kapasitesi şahit numunelerden %23 daha azdır. Bunun sebebi uçucu küllü beton numunelerde puzolanik reaksiyonu devam etmesi ile boşlukların azalmasıdır.

- Uçucu kül, betonun mikro yapısını iki şekilde yoğunlaştırır. Külün ince bir toz olarak varlığı, boşlukları ve aralıkları doldurarak fiziksel partikül paketlemesini iyileştirir. Bununla birlikte, farklı bir yoğunlaştırma mekanizması, mevcut gözenek alanını daha da dolduran ilave kalsiyum silikat jeli sağlayan uçucu külün puzolanik reaksiyonudur.

- Beton numunelerin basınç dayanımı en yüksek değer ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü numunelere aittir. 90 günlük hiçbir eskitme koşuluna maruz kalmayan numunelerde şahit numunenin basınç dayanımı 46,34 MPa, uçucu küllü numunede ise 47,46 MPa iken ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan şahit ve uçucu küllü numunelerde basınç dayanımı sırasıyla 49,61 MPa ve 50,11 MPa olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni ıslanma-kuruma çevrimlerinde numuneyi kurutma amacı ile kullanılan 50 ºC etüv sıcaklığıdır.

- Uçucu küllü betonlarda kür sıcaklığının arttırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, kür sıcaklığı 20 °C iken 28. günden sonra, kür sıcaklığı 40 °C iken 7. günden sonra uçucu külün puzolanik reaksiyonunun hızlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar [147]ile uyumludur.

- Islanma-kuruma çevrimlerde numuneler 8 saat 50ºC sıcaklıkta etüvde ve 16 saat 20ºC sıcaklıkta kür havuzunda bekletilmiştir. Bir taraftan kurutma sürecindeki sıcaklık öte yandan ıslanma sürecindeki mevcut su, uçucu küllerin puzolanik reaksiyona girmesinin ve daha hızlı ilerlemesini sağlamakta ve numunelerin dayanım kazanma hızını yükseltmektedir. Dolayısıyla ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan numunelerde dayanım basıncı hiç eskitme koşuluna maruz kalmayan numuneler göre daha yüksek olmuş ve uçucu küllü numuneler, şahit numuneler göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur.

- Donma-çözülme sonuçlarına göre, döngülere maruz kalan 90 günlük şahit numunelerin basınç dayanımı eskitme koşuluna maruz kalmayan şahit numunelere göre %5 düşmüştür. Bu düşüş oranı uçucu küllü numunelerde %10 olarak elde edilmiştir.

- Donma-çözülmeye maruz kalan şahit beton numunelerde kür süresi ilerledikçe numunelerin basınç dayanımı yükselmekte ve dayanım 40 MPa dan 44 MPa mertebesine çıkmaktadır. Ancak uçucu küllü betonlarda aynı trend elde edilememektedir.

- Uçucu küllü beton numunelerde 56 gün kür sonrası basınç dayanımı 44,80 MPa iken, 90 günlük numunede basınç dayanımı 42,91 MPa olmuştur. Bu nedeni kesin olmamakla birlikte, uçucu küllü numunelerde puzolanik reaksiyon devam ettikçe betonun boşluk hacminin azalmasıdır.

KAYNAKLAR

[1] Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., and Gartner, E.M., «Sustainable development and climate change initiatives,» *Cement and Concrete Research,* cilt 38, no. 2, pp. 115-127, 2008.

[2] Lippiatt, B.C. and Ahmad, S., «Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the bees approach,» *Presented at International workshop on sustainable development and concrete technology*, Ames, 2004.

[3] Scrivener, K.L and Kirkpatrick, R.J., «Innovation in use and research on cementitious material,» *Cement and Concrete Research,* cilt 38, no. 2, pp. 128-136, 2008.

[4] Akman, M.S., «Yapı Malzemeleri,» İstanbul, 1990.

[5] Scrivener, K., «Options for the future of cement,» *Indian Concrete Journal,* cilt 81, pp. 11-21, 2014.

[6] Gartner, E., «Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements,» *Cement and Concrete Research,* cilt 34, no. 9, pp. 1489-1498, 2004.

[7] Lothenbach, B., Scrivener, K. and Hooton, R.D., «Supplementary cementitious materials,» *Cement and Concrete Research,* cilt 41, no. 12, pp. 1244-1256, 2011.

[8] Skibsted, J. and Snellings, R., «Reactivity of supplementary cementitious materials in cement blends,» *Cement and Concrete Research,* cilt 124, 2019.

[9] Giergiczny, Z., «Fly ash and slag,» *Cement and Concrete Research,* cilt 124, 2019.

[10] TS EN 197-1, «Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,» Türk Standardları Enstitüsü, 2012.

[11] Baradan, B., Yazıcı, H., ÜN, H., «Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite),» DEÜ. Müh. Fak. Yayın No: 298, İzmir, 2002.

[12] TS EN 206-1, «Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk,» Türk Standartları Enstitüsü, 2002.

[13] Neville, A.M.,, Properties of Concrete, New york: Longman Scientific & Technical, 1981.

[14] Hendricks, C.A., «Emission reduction of Greenhouse gases from the cement industry,» *conference on greenhouse gas control technologies*, 2004.

[15] Taylor, H. F. W., Cement Chemistry, London: Thomas Telford, 1997.

[16] Mindness, S., J. F. Young, et al, Concrete, Pearson Education, 2002.

[17] Scrivener, K.L. and Nonat, A., «Hydration of cementitious materials, present and future,» *Cement and Concrete Research*, cilt 41, no. 7, pp. 651-665, 2011.

[18] Strand, Martin J., «Experimental study of de-icing salt frost scaling in concrete with low calcium fly ash or slag; Influence of drying and carbonation, and air content,» Lund University, 2019.

[19] Kim, S.-J., Yang, K.-H. and Moon, G.-D., «Hydration Characteristics of Low-Heat Cement Substituted by Fly Ash and Limestone Powder,» *Materials*, cilt 8, no. 9, pp. 5847-5861, 2015.

[20] Sandra Lagundžija and Marie Thiam, «Temperature reduction during concrete hydration in massive structures,» KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2017.

[21] Rao, P. Rama Mohan, «Experimental Investigation of The Strength and Durability Characteristics of High Strength and High Volume Fly Ash Concrete,» Jawaharlal Nehru Technological University, Anantapur, 2014.

[22] Mehta, P.K. and Monteiro, P., Concrete: microstructure, properties, and materials, London: McGraw-Hill, 2006.

[23] Gowripalan, N. ,Cabrera, J. ,Cusens, A. and Wainwright, P., «Effect of curing on durability,» *Concrete International,* cilt 12, no. 2, pp. 47-54, 1990.

[24] Tang, S.W. ,Yao, Y. ,Andrade, C. and Li, Z., «Recent durability studies on concrete structure,» *Cement and Concrete Research,* cilt 78, pp. 143-154, 2015.

[25] Alexander, M.G., Santhanam, M. and Ballim, Y., «Durability design and specification for concrete structures—the way forward,» *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics,* cilt 2, no. 3, pp. 95-105, 2010.

[26] Frigione, G. and Zenone, F., «Quality control of concrete,» 1991.

[27] Alexander, M. and Thomas, M., «Service life prediction and performance testing—Current developments and practical applications,» *Cement and Concrete Research,* cilt 78, pp. 155-164, 2015.

[28] Hong, K., & Hooton, R. D., «Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover,» *Cement and Concrete Research,* cilt 29, no. 9, pp. 1379-1386, 1999.

[29] Jaya, R.P., Bakar, B.H.A., Johari, M.A.M., Ibrahim, M. H. W., Hainin, M. R., &, «Strength and microstructure analysis of concrete containing rice husk ash under seawater attack by wetting and drying cycles,» *Advances in Cement Research,* cilt 26, no. 3, pp. 145-154, 2014.

[30] Şahmaran, M., Erdem, T. K., & Yaman, I. O., «Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting–drying and heating–cooling environments,» *Construction and Building Materials,* cilt 21, no. 8, pp. 1771-1778, 2007.

[31] Ye, H., Jin, X., Fu, C., Jin, N., Xu, Y., & Huang, T., «Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation,» *Construction and Building Materials*, cilt 112, pp. 457-463, 2016.

[32] Fagerlund, G., «Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete, Durability of concrete: Aspects of admixtures and industrial by-products,» *International seminar*, 1988.

[33] *BS EN 206 - 1. 2000. Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity.*

[34] Mazlum, F., «Pirinç kabugu külünün puzolanik özellikleri ve külün çimento harcının dayanıklılıgına etkisi, Doktora Tezi,» İTÜ, Istanbul, 1989.

[35] Kuroda M, Watanabe T, Terashi N., «Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash,» *Cement and Concrete Research*, cilt 30, no. 2, pp. 253-258, 2000.

[36] Wong HS, Razak HA, «Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance,» *Cement and Concrete Research*, cilt 35, no. 4, pp. 696-702, 1999.

[37] Ping X, Beaudoin JJ., «Modification of transition zone microstructure silica fume coating of aggregate surfaces,» *Cement and Concrete Research*, cilt 22, no. 4, pp. 597-604, 1992.

[38] Liu, Miao, «Wider application of additions in self-compacting concrete,» University College London, London, 2009.

[39] Kılınçkale, F.M., Çelik, K., «Katkı miktarı, türünün ve ögütmenin çimentonun dayanım performansına etkileri,» 2. Mühendislik Bilimleri Genç Arastırmacılar Kongresi, MBGAK, Istanbul, 2005.

[40] Hewlette, P. C., Lea's chemistry of cement and concrete, New York: John Wiley and Sons Inc, 1998.

[41] Malhotra VM, Zhang MH, Read PH, Ryell J, «Long-term mechanical properties and durability characteristics of high strength/ high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions,» *ACI Mater Journal,* cilt 97, no. 5, p. 518–25, 2000.

[42] Malhotra, V.M.Ramezanianpour,A.A., Fly ash in Concrete, Ottwa: CANMET, 1994.

[43] Malhotra.V.M., «Making concrete Greener with Fly ash,» *Concrete International,* cilt 21, no. 5, pp. 61-66, 1999.

[44] *ACI 232.1R-00, Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete.*

[45] Mehta, P. K., «Natural pozzolans: supplementary cementing materials for concrete,» CANMET-SP-86-8E, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa, 1987.

[46] Shi, C. and Qian, J. , «High performance cementing materials from industrial slags - a review,» *Resources Conservation and Recycling,* cilt 29, no. 3, 2000.

[47] Kourounis,S. Tsivilis S. and Tsakiridis P.E., «Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag,» *Cement and Concrete Research,* cilt 37, pp. 815-822, 2007.

[48] MEng, Nicholas Tombs, «Processing of fly ash and associated waste materials as cement replacements,» University of Wales, Cardiff, 2011.

[49] Lewis, L. Sear, L. Wainwright, P. Ryle, R., «Cementitious additions,» *Advanced concrete technology - Constituent materials*, Elsevier, Oxford, 2003, pp. 3/1 - 3/66.

[50] Neville, A.M., Properties of concrete, U.K: Longman group, 1995.

[51] Malhotra V. M. and Carette, G. G., «Silica fume - A pozzolan of new interest for use in some concretes,» *Concrete Construction* , pp. 443 - 446, 1992.

[52] Li, X., Chung D.D.L, «Improving silica fume for concrete by surface treatment,» *Cement and Concrete Research,* cilt 28, no. 4, pp. 493-498, 1998.

[53] ERDOGAN, T.Y., «Sorular ve yanıtlarıyla beton malzemeleri,» Türk Hazır Beton Birligi, 975-92122-1-8, İstanbul, 2004.

[54] CANPOLAT, F., YILMAZ K., «Dogal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılıgı,» Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 2002.

[55] Aruntaş, H.Y., G.Ü Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21, No 1, 193–203, 2006, Ankara, 2006.

[56] Davis,R.E., Carlson,R.W., Kelly, J.W.H. and Davis, H.E., «Properties Of cements and concretes containing fly ash,» *Journal of the American Concrete Institute,* cilt 33, no. 5, pp. 577-611, 1937.

[57] Folliard, K., Hover, K., Harris, N., Ley, T. M., & Naranjo, A., «Effects of Texas fly ash on air-entrainment in concrete: comprehensive report,» 2009. [Çevrimiçi]. Available: http://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/0_5207_1.pdf.

[58] Atiş, C. D., «Heat evolution of high-volume fly ash concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 5, no. 5, pp. 751-756, 2002.

[59] Xu, R., «Hg absorbents in fly-ash: effect on fresh concrete properties,» University of Alberta, 2008.

[60] [Çevrimiçi]. Available: http://www.civilengineeringforum.me/production-fly-ash/.

[61] Ramezanianpour, A. A., «Fly Ash,» *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability,* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, 2014, pp. 47-156.

[62] Ahmaruzzaman, M., «A review on the utilization of fly ash,» *Progress in Energy and Combustion Science,* , pp. 327-363, 2010.

[63] Marinković, S., & Dragaš, J., «Fly Ash,» *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* , Woodhead Publishing, 2018, pp. 325-360.

[64] Rashad, A. M., «A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer,» *International Journal of Sustainable Built Environment,* cilt 4, no. 2, pp. 278-306, 2015.

[65] Kosmatka, S., Kerkhoff, B. and Panarese, W. C., «Fly Ash, Slag, Silica Fume and Natural Pozzolans,» *Design and Control of Concrete Mixtures, 14th ed.,* Skokie: Portland Cement Association, 2003, pp. 57-70.

[66] Aughenbaugh, K. L., Stutzman, P., & Juenger, M. C. G., «Identifying glass compositions in fly ash,» *Frontiers in Materials,* cilt 3, no. 1, 2016.

[67] Kruse, K., Jasso, A., Folliard, K., Ferron, R., Juenger, M., & Drimalas, T., «Characterizing Fly Ash,» https://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/0-6648-1.pdf, 2013.

[68] *ASTM C618: Specification for coal Fly ash and raw or Calcined natural Pozzolan for use in concrete.* [Performance]. ASTM International, DOI: 10.1520/c0618-03, 2008.

[69] Jayant D., Mineral admixtures in cement and concrete, New York: Taylor & Francis Group, LLC, CRC, 2013.

[70] Cockrell CF, Leonard JW., «Characterization and utilization studies of limestone modified fly ash,» Coal Research Bureau, West Virginia University, Morgantown, 1970.

[71] «EN 197-1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements,» EUROPEAN STANDARD, 2000.

[72] Turker P., Erdoğan B., Katnas F. ve Yeğinobalı A., Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2003.

[73] Monteagudo, S. M., Moragues, A., Gálvez, J. C., Casati, M. J., & Reyes, E., «The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases.,» *Thermochimica Acta,* cilt 592, pp. 37-51, 2014.

[74] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T., & Dangla, P., «Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes,» *Construction and Building Materials,* cilt 27, no. 1, pp. 560-569, 2012.

[75] Kocak, Y., & Nas, S. , «The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements,» *Construction and Building Materials,* cilt 73, pp. 25-32, 2014.

[76] Bijen, J.M.J.M., « Fly Ash as Addition to Concrete,» A.A.Balkema , 1992.

[77] Tang, S. W., Cai, X. H., He, Z., Shao, H. Y., Li, Z. J., & Chen, E., «Hydration process of fly ash blended cement pastes by impedance measurement,» *Construction and Building Materials,* cilt 113, pp. 939-950, 2016.

[78] Headwaters Resources, «Fly ash for concrete,» Headwaters Resources, 2014.

[79] Davis, D. A., «Effects of high volume fly ash and powder activators on plastic and hardened concrete properties,» MS Thesis. Missouri: Missouri Institution of Science and Technology, 2012.

[80] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J., «The effects of fly ash properties on concrete strength,» *Journal of South African Institute of Civil Engineering,* cilt 45, no. 1, pp. 19-24, 2003.

[81] Madhavi, T. Ch., Raju, L. S. and Mathur, D., «Durabilty and strength properties of high volume fly ash concrete,» *Journal of Civil Engineering Research,* cilt 4, no. 2A, pp. 7-11, 2014.

[82] Bilodeau, A., Malhotra, V. M. and Seabrook P. T., «High volume fly ash systems: the concrete solution for sustainable development,» *Malhotra, V.M., ed. CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry*, Ottawa, 2001.

[83] Electric Power Research Institute, «Use of class C fly ash in high volume fly ash concrete applications,» California, 2007.

[84] Hou, Q., «Setting behavior and shrinkage of high performance pavement concrete: effect of supplementary cementitious materials, chemical admixtures and temperature,» MSc Dissertation. Ames: Digital Repository Iowa State University, 2013.

[85] Thomas, M., «Optimizing the use of fly ash in concrete,» Portland Cement Association, 2014.

[86] Zang, M., Zakaria, M. and Islam, J., «Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag,» https://www.researchgate.net/publication, 2012.

[87] Bentz, D., Ferraris, C., Peltz, M. and Winpigler, J., «Mixture proportioning options for improving high volume fly ash concretes,» *NIST, ed. International conference on sustainable concrete pavements: practices, challenges, and directions*, Sacramento, 2010.

[88] Headwaters Resources, «Fly ash in cold weather concrete,» www.flyash.com, 2005.

[89] Berry, E. E. and Malhotra, V. M., «Fly ash in concrete,» Energy, Mines and Resources, Canada, 1986.

[90] Joshi, R. C and Lohtia, R. P., Fly ash in concrete: Production, Properties and Uses, Gordon and Breach Science Publishers, 1997.

[91] Narmluk, M. and Nawa, T., «Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures,» *Cement and Concrete Reasearch,* cilt 41, no. 6, pp. 579-589, 2011.

[92] Kovler, K., & Roussel, N., «Properties of fresh and hardened concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 41, no. 7, pp. 775-792, 2011.

[93] Thomas, M. D. A., Shehata, M. H., Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S., & Cail, K., «Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 29, pp. 1207-1214, 1999.

[94] Aydin, S., Karatay, C., & Baradan, B., «The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars,» *Powder Technology,,* cilt 197, pp. 68-72, 2010.

[95] Mansur Sumer, «Compressive strength and sulphate resistance properties of concretes containing Class F and Class C fly ashes,» *Construction and Building Materials,* cilt 34, p. 531–536, 2012.

[96] Nath, P., & Sarker, P., «Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete,» *Procedia Engineering,* cilt 14, pp. 1149-1156, 2011.

[97] Serdar Aydın, Halit Yazıcı, Hüseyin Yiğiter,Bülent Baradan, «Sulphuric acid resistance of high-volume fly ash concrete,» *Building and Environment,* cilt 42, p. 717–721, 2007.

[98] Oner A., Akyuz S. and Yildiz R, «An experimental study on strength development of concrete containing Fly ash and optimum usage of Fly ash in concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 35, no. 6, pp. 1165-1171, 2005.

[99] Vasundhara.M, MaganiJanardhana, M.V.SeshagiriRao, «Strength characteristics of normal concrete using High volume fly ash as an additional ingredient,» *Advances in concrete and construction*, Vasavi college of engineering, Hyderabad, 2004.

[100] Siddique, R, «Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 34, no. 3, pp. 487-493, 2004.

[101] Poon.C.S., L. Lam, Y.L. Wong, «A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash,» *Cement and Concrete Research,* cilt 30, pp. 447-455, 2000.

[102] Sivasundaram.V, Carette, G.G., and Malhotra, V.M., «Mechanical properties, creep and Resistance to diffusion to chloride ions of concretes incorporating Hogh volumes of ASTM class F fly ashes from seven different sources,» *ACI Materials journal,* cilt 88, no. 4, pp. 407-416, 2004.

[103] Aggarwal T.P, «Use of Fly ash in Structural concrete,» *Proceedings of second international seminar on Cement and Building Materials, National Council for Cement and Building Materials*, New Delhi, 1989.

[104] Naik, T. R., Singh, S. S., & Ramme, B. W., «Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash,» *Materials Journal,* cilt 95, no. 4, pp. 454-462, 1998.

[105] Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M., «Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA),» *Construction and Building Materials,* cilt 82, pp. 192-205, 2015.

[106] Illston J.M., Domone, P.L.J., Construction Materials, Their nature and behaviour, New York: Taylor & Francis, 2001.

[107] Burden, D., «The durability of concrete containing high levels of fly ash,» MSc Thesis. Illinois: Portland Cement Association University of New Brunswick, 2006.

[108] Papadakis, V. G., «Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash,» *Cement and Concrete Research,* cilt 30, pp. 1647-1654, 2000.

[109] Sengul O.,Tasdemir C. and Tasdemir M. A, «Mechanical properties and rapid chloride permeability of concretes with Ground fly ash,» *ACI Materials Journal,* cilt 102, no. 6, pp. 474-482, 2005.

[110] Atis, C. D., «Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition,» *Cement and Concrete Research,* cilt 35, pp. 1112-1121, 2005.

[111] Sahmoran M., Ismail O.Y. and Mustafa T., «Transportation and Mechanical properties of Self consolidated concrete with High volume Fly ash,» *Cement and concrete Research,* cilt 31, pp. 99-106, 2009.

[112] Antiohos.S.K., V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, S. Tsimas, «Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes,» *Cement and Concrete Research,* cilt 37, pp. 877-885, 2207.

[113] Vasundhara.M, MaganiJanardhana, M.V.SeshagiriRao, «Strength characteristics of normal concrete using High volume fly ash as an additional ingredient,» *International conference on Advances in concrete and construction, Vasavi college of engineering*, Hyderabad, 2004.

[114] Siddique, R., «Effect of Fine aggregate replacement with class F Fly ash on the Mechanical properties of concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 33, no. 4, pp. 539-547, 2003.

[115] Durán-Herreraa , C.A. Juárez a, P. Valdez , D.P. Bentz, «Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes,» *Cement & Concrete Composites,* cilt 33, pp. 39-45, 2011.

[116] Tia, M., Subramanian, R., Brown, D. and Broward, C., «Evaluation of shrinkage cracking potential of concrete used in bridge decks in Florida,» University of Florida University of Florida, 2005.

[117] Borsoi, A., Collepardi, M., Collepardi, S. and Troli R., «Influence of fly ashes on the drying shrinkage of superplasticized concretes in the presence of SRA,» http://www.encosrl.it/enco%20srl%, 2009.

[118] Bickley, J., Hooton, R. D. and Hover, K. C., «Preparation of a performance-specification for cast-in-place concrete,» RMC Research Foundation, 2006.

[119] Dhir, R.K., Jones, M.R., «Development of chloride–resisting concrete using fly ash,» *Fuel,* cilt 78, no. 2, pp. 137-142, 1999.

[120] Leng, F., Feng, N., Lu, X., «An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete,» *Cement and Concrete Research,* cilt 30, no. 6, pp. 989-992, 2000.

[121] Mucteba Uysal, Veysel Akyuncu, «Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes,» *Construction and Building Materials,* cilt 34, pp. 170-178, 2012.

[122] Vengata G. K.B.,, «High volume fly ash concrete for pavements,» M.E. Dissertation, Department of Civil Engineering, Anna University, Chennai, 2009.

[123] von Foy, K. F., «Effects of various fly ashes on compressive strength, resistance to freezing and thawing, resistance to sulfate attack and adiabatic temperature rise of concrete,» Bureau of Reclamation United States Department of the Interior, 1995.

[124] Basson, J. J. and Ballim, Y., «Durability of concrete,» *Concrete Technology*, Midrand: Portland Cement Institute,, 1994, pp. 153-179.

[125] Quan, H. and Kasami, H., «Experimental study on durability improvement of fly ash concrete with durability improving admixture,» *The Scientific World Journal*, 2014.

[126] Collepardi M., Collepardi S., Olagot J. J. and Simonelli F. n.d., «The Influence of slag and fly ash on the carbonation of concretes,» www.encosrl.it, 2017.

[127] Zhang, D., Cai, X. and Shao, Y., «Carbonation curing of precast fly ash concrete,» https://www.researchgate.net/publication/303794688, 2016.

[128] Ramachandran, V.S., Concrete Admixtures, New Jersey: Noyes Publications, 1995.

[129] Pedersen, K.H. et al., «A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete,» *Progress in Energy and Combustion Science*, cilt 34, no. 2, pp. 135-154, 2008.

[130] Zhang, D.S., «Air entrainment in Fresh Concrete with PFA,» *Cement and Concrete Composites*, cilt 18, no. 6, pp. 409-418, 1996.

[131] Rønning, T. F., «Freeze-Thaw resistance of concrete, effect of curing conditions, moisture exchange and materials,» The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 2001.

[132] Gebler, S.H., Klieger, P., «Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained concrete,» *Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete*, Madrid, 1986.

[133] Jepsen et al., «Durability of Resource Saving “Green” Types of Concrete,» *Green Concrete*, 2010.

[134] Bouzoubaâ, N., Zhang M.H., Malhotra V.M., «Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash,» *Cement and concrete research,* cilt 31, no. 3, pp. 1393-1402, 2001.

[135] Bortz, B.S., «Salt-Scaling Durability of fly ash concrete,» Department of Civil engineering, College of engineering, Manhattan, 2010.

[136] Schieβl, P. et al., «Neue Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Beton mit Steinkohlenflugashe,» *Beton, Verlag Bau + Technik,* cilt 2, pp. 9-13, 2001.

[137] Müller, C., Severins, K., «Durability of concretes made with cements containing fly ash,» *Concrete Technology reports,* cilt 31, pp. 7-17, 2010.

[138] Li, B., «Chloride Transport in Concrete under Frost Action, An Experimental study,» Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2009.

[139] TS 706 EN 12620+A1, «Beton agregaları,» Türk Standartları Enstitüsü, 2009.

[140] TSE CEN/TR 15177, «Betonun donma-Çözülme direncinin tayini - Yapısal iç hasar,» Türk Standartları Enstitüsü, 2012.

[141] TS EN 12350-2, «Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi,» Türk Standartları Enstitüsü, 2019.

[142] TS EN 12390-2, «Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması,» Türk Standartları Enstitüsü, 2019.

[143] TS EN 12504-4, «Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini,» Türk Standartları Enstitüsü, 2019.

[144] TS EN 12390-5, «Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini,» Türk Standartları Enstitüsü, 2019.

[145] TS EN 12390-3 , «Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin,» Türk Standartları Enstitüsü, 2019.

[146] TS EN 12350-6 , «Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi,» Türk Standartları Enstitüsü, 2019.

[147] Nurullah MERCAN, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ , 2007.

[148] *ASTM C 618. 2003. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.*

[149] Çelik, K., «Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Traslı Çimentolarla Üretilen Aynı Mukavemet Sınıfındaki Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi,» İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

[150] *ASTM C125-19 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates,* 2019.

[151] Alis, J.C., «Mechanical properties of fly ash concrete cured under different temperatures andhumidity conditions, fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete,» *Fourth International CANMET /ACI Conference*, Istanbul / Turkey, 1992.

[152] TS 706 EN 12620+A1, «Beton agregaları,» Türk Standartları Enstitüsü, 2009.

[153] J. Skibsted and R. Snellings, «Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends,» *Cement and Concrete Research,* cilt 124, p. 105799, 2019.

[154] J. W. Bullard, «Mechanisms of cement hydration,» *Cement and Concrete Research,* cilt 41, no. 12, pp. 1208-1223, 2011.

[155] K. L. Scrivener, P. Juilland, and P. J. M. Monteiro, «Advances in understanding hydration of Portland cement,» *Cement and Concrete Research,* cilt 78, pp. 38-56, 2015.

[156] O. Linderoth, «Binding of moisture in fly ash blended Portland cement paste and mortar: Impact of replacement level and curing temperature,» *Cement and Concrete Research,* cilt 40, no. 6, pp. 867-874, 2010.

[157] E. Berodier and K. Scrivener, «Evolution of pore structure in blended systems,» *Cement and Concrete Research,* cilt 73, pp. 25-35, 2015.

[158] E. Gallucci, X. Zhang, and K. L. Scrivener, «Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H),» *Cement and Concrete Research,* cilt 53, pp. 185-195, 2013.