

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YIKAMA SUYU FİLTRE KALINTI MALZEMESİNİN HARÇ
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adil Görkem GEDİK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YIKAMA SUYU FİLTRE KALINTI MALZEMESİNİN HARÇ
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Adil Görkem GEDİK
(501161054)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ünal Anıl DOĞAN

ŞUBAT 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501161054 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Adil Görkem GEDİK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YIKAMA SUYU FİLTRE KALINTI MALZEMESİNİN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Ünal Anıl DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Hulusi ÖZKUL
Beykent Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13.01.2022**
Savunma Tarihi : **24.02.2022**



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, hazır beton tesislerinde atık olarak bulunan yıkama suyu filtre kalıntı malzemesinin çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir kullanımı hedeflenmiş ve bu doğrultuda harç üretiminde yeniden kullanımının harçların hidratasyon ve dayanım özelliklerine olan etkileri incelenmiştir.

İTÜ İnşaat Fakültesi'nde almış olduğum lisans eğitimi döneminde kendisini tanıma şansına eriştiğim; yüksek lisans eğitimimde, bu tez çalışması süresince ve kariyerim boyunca bana yol gösteren, engin bilgilerini koşulsuz paylaşan ve herşeyden öte bir arkadaş olan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ünal Anıl DOĞAN'a en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı ve Altyapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneylerde ikinci danışmanım olan arkadaşım Sayın Arş. Gör. Sidar Nihat BIÇAKÇI'ya, yardımları için Sayın Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA'ya, Sayın İnşaat Yük. Müh. Cengiz ŞENGÜL'e, Sayın Arş. Gör. Hasan Nuri TÜRKMENÖĞLU'na, ve değerli laboratuvar çalışanlarına sonsuz teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalardaki mesai arkadaşım, ağabeyim Sayın Abdullah SAĞIR'a yapmış olduğu tüm katkılar ve emekleri için teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmalarında kullanılan filtre kalıntı malzemesinin tedarikini sağlayan OYAK BETON SANAYİ ve TİCARET A.Ş.'ye teşekkür ederim.

BETONSA Yenibosna Hazır Beton Tesisi'nde konuyla ilgili bilgi, tecrübe ve önerilerini paylaşan Sayın İnşaat Müh. İlker MENEKŞE'ye ve yardımları için Sayın İnşaat Yük. Müh. Muhittin TARHAN'a çok teşekkür ederim.

Her kararında ve eylemimde beni koşulsuz destekleyen, yaptıkları büyük fedakarlıklar ve gösterdikleri karşılıksız sevginin layığı olmaya çalıştığım, her zaman gurur duyduğum annem Nermin GEDİK ve babam Salih GEDİK'e, en iyi arkadaşım ve sevgili kardeşim Utku GEDİK'e herşey için sonsuz teşekkür ederim.

İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tanıştığım, sevgisini ve desteğini her koşulda hissettiren, ikinci ailem, hayat arkadaşım Çevre Müh. Şeyma ZİNCİR'e binlerce kez teşekkür ederim.

Şubat 2022

Adil Gökem Gedik



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1 Beton ve Harçların Genel Özellikleri.....	5
2.2 Filler Malzemelerin Beton Özelliklerine Etkisi	6
2.2.1 Kalker tozunun beton özelliklerine etkisi	7
2.3 Sıcaklığın Beton Özelliklerine Etkisi	8
2.4 Hidratasyon	9
2.4.1 Hidratasyonun aşamaları.....	11
2.4.1.1 Başlangıç evresi	14
2.4.1.2 Uyku evresi	15
2.4.1.3 Hızlanma evresi.....	15
2.4.1.4 Yavaşlama evresi	15
2.4.2 Hidratasyona etki eden parametreler.....	16
2.5 Hazır Beton	19
2.5.1 Türkiye’de hazır beton sektörü	21
2.5.2 Hazır beton tesislerinde geri dönüşüm.....	22
2.6 Yıkama Suyu ve Filtre Kalıntı Malzemesi	26
2.6.1 Yıkama suyu ve filtre malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	26
2.6.2 Yıkama suyu ve filtre malzemesi literatür taraması.....	31
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	47
3.1.1 Çimento	47
3.1.2 Agrega	47
3.1.3 Kalker tozu	48
3.1.4 Filtre kalıntı malzemesi.....	48
3.1.5 Karma suyu	49
3.2 Filtre Kalıntı Malzemesinin Hazırlanması	49
3.3 Harç Karışımlarının Tasarımı.....	50
3.4 Harç Numunelerinin Hazırlanması.....	53
3.5 Deney Yöntemleri	53
3.5.1 Yayılma tablası deneyi.....	53
3.5.2 Tek eksenli basınç deneyi	54

3.5.3 İzotermal kalorimetreye hidratasyon özelliklerinin belirlenmesi	54
4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME	57
4.1 Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları.....	57
4.2 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	59
4.3 İzotermal Kalorimetre Deneyi Sonuçları.....	63
5. GENEL SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	93



KISALTMALAR

AFt	: Etrenjit
AFm	: Monosülfat
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
ASTM	: American Society for Testing and Materials
C₂S	: Dikalsiyum Silikat
C₃S	: Trikalsiyum Silikat
C₃A	: Trikalsiyum Alüminat
C₄AF	: Tetrakalsiyum Alüminoferrit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
EN	: European Standards
TS	: Türk Standartları



SEMBOLLER

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
C	: Celcius
Ca⁺²	: Kalsiyum İyonu
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
Fe₂O₃	: Demir (III) Oksit
HCl	: Hidroklorik Asit
J	: Joule
K₂O	: Potasyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
mW	: MiliWatt
Na₂O	: Sodyum Oksit
NaOH	: Sodyum Hidroksit
OH⁻	: Hidroksil İyonu
pH	: Power of Hydrogen (Asitlik Derecesi)
ppm	: Parts Per Million
Si	: Silisyum
SO₃	: Kükürt Trioksit
µm	: Mikrometre



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sülfat miktarının hidratasyona etkisi.....	19
Çizelge 2.2 : Taze beton atığı geri dönüşüm sistemleri.....	23
Çizelge 2.3 : Yıkama suyu kimyasal analizi.....	27
Çizelge 2.4 : Filtre kalıntı malzemesi kimyasal bileşimi.....	28
Çizelge 3.1 : Agreg a elek analizi.....	47
Çizelge 3.2 : Harç karışımlarına ait bileşimler.....	51
Çizelge 3.3 : S/Ç= 0,50 oranıyla hazırlanan harçlarda 1 m ³ 'teki bileşen miktarları.	51
Çizelge 3.4 : S/Ç= 0,60 oranıyla hazırlanan harçlarda 1 m ³ 'teki bileşen miktarları.	52
Çizelge 3.5 : İzotermal kalorimetre yöntemiyle test edilen harçlar.....	56
Çizelge 4.1 : Harçların yayılma çapı değerleri.....	57
Çizelge 4.2 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (S/Ç=0,50).....	59
Çizelge 4.3 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (S/Ç=0,60).....	60
Çizelge 4.4 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük bağıl basınç dayanımları (S/Ç=0,50).....	61
Çizelge 4.5 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük bağıl basınç dayanımları (S/Ç=0,60).....	62
Çizelge 4.6 : İzotermal kalorimetreyle test edilen harçların 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	63
Çizelge 4.7 : Hidratasyon evreleri ve priz süreleri.....	70
Çizelge 4.8 : Hidratasyon ısısı değerleri.....	71



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İzotermal kalorimetre haznesi şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.2 : Isı akışı (sol) ve Toplam hidratasyon ısısı (sağ) grafikleri [27]	11
Şekil 2.3 : Klinker fazlarının hidratasyon sırasında zamana bağlı tükenme miktarı(%) [22].....	12
Şekil 2.4 : Hidratasyon ürünlerinin zamana bağlı oluşumu (%) [22].....	12
Şekil 2.5 : Hidratasyonun aşamaları	13
Şekil 2.6 : Etrenjitin monosülfata dönüşmesiyle oluşan dördüncü tepe (E).....	14
Şekil 2.7 : Türkiye'deki bir hazır beton tesisinde geri dönüşüm sistemi	24
Şekil 2.8 : Hazır beton tesisinde yıkama suyunun geri kazanımı işlemi [64].....	25
Şekil 2.9 : Çökeltme havuzu yapısı [53].....	26
Şekil 2.10 : Mikroskop altı görüntüsü. (a) Portland çimentosu ve (b) çamur tozu [65].....	29
Şekil 3.1 : Kalker tozu tane boyut dağılımı	48
Şekil 3.2 : Hazır beton santralinden alınan filtre kalıntı malzemesi.....	48
Şekil 3.3 : Filtre kalıntı malzemesi tane boyut dağılımı.....	49
Şekil 3.4 : Filtre kalıntı malzemesinin hazırlanması aşamaları	49
Şekil 3.5 : Yayılma tablası deneyi	54
Şekil 3.6 : Tek eksenli basınç deneyinde küp numunelerin kırılma şekli	54
Şekil 3.7 : İzotermal kalorimetre	55
Şekil 3.8 : Endotermik davranıştan dolayı oluşan negatif eğri.....	55
Şekil 4.1 : Harçların yayılma çapı değerleri	58
Şekil 4.2 : 10°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon hızı eğrileri.....	63
Şekil 4.3 : 10°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon ısısı eğrileri	64
Şekil 4.4 : 10°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon hızı eğrileri	64
Şekil 4.5 : 10°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon ısısı eğrileri	64
Şekil 4.6 : 20°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon hızı eğrileri.....	65
Şekil 4.7 : 20°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon ısısı eğrileri	66
Şekil 4.8 : 20°C sıcaklıkta MS-135K, MS-135F hidratasyon hızı eğrileri	66
Şekil 4.9 : 20°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon ısısı eğrileri	67
Şekil 4.10 : 30°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon hızı eğrileri.....	68
Şekil 4.11 : 30°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon ısısı eğrileri	68
Şekil 4.12 : 30°C sıcaklıkta MS-135K, MS-135F hidratasyon hızı eğrileri	68
Şekil 4.13 : 30°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon ısısı eğrileri	69
Şekil 4.14 : Farklı S/Ç oranının hidratasyon hızına etkisi	69
Şekil 4.15 : Sıcaklığın ve S/Ç oranının filtre malzemesi içeren harçların hidratasyonuna etkisi	72
Şekil 4.16 : Sıcaklığın ve S/Ç oranının kalker tozu içeren harçların hidratasyonuna etkisi.....	72
Şekil A.1 : 7 günlük basınç dayanımı regresyon analizi	87
Şekil A.2 : 28 günlük basınç dayanımı regresyon analizi	87
Şekil A.3 : 90 günlük basınç dayanımı regresyon analizi	87

Şekil A.4 : 3 günlük basınç dayanımı regresyon analizi.....	88
Şekil A.5 : 12 saatlik hidrasyon ısısı regresyon analizi	88
Şekil A.6 : 24 saatlik hidrasyon ısısı regresyon analizi	88
Şekil A.7 : 48 saatlik hidrasyon ısısı regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)	89
Şekil A.8 : 72 saatlik hidrasyon ısısı regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)	89
Şekil A.9 : 12, 24, 48 ve 72 saatteki hidrasyon ısısı değerlerinin korelasyonu	89
Şekil A.10 : Uyku evresi (saat) regresyon analizi	90
Şekil A.11 : Priz başlangıcı (saat) regresyon analizi	90
Şekil A.12 : Priz sonu (saat) regresyon analizi	90
Şekil A.13 : Priz süresi (saat) regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)	91
Şekil A.14 : Maksimum hız süresi (saat) regresyon analizi	91
Şekil A.15 : Maksimum hız (mW/g) regresyon analizi	91
Şekil A.16 : Maksimum hız regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)	92
Şekil A.17 : Maksimum hız, 12 saatlik ısı ve 24 saatlik ısı korelasyonu	92
Şekil A.18 : Maksimum hız ve priz süresi korelasyonu	92

YIKAMA SUYU FİLTRE KALINTI MALZEMESİNİN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

İnşaat sektöründeki yatırımların günden güne artması yapı malzemelerinin, özellikle de yapımda en çok kullanılan malzeme olan betonun tüketimini de arttırmıştır. Kaynakların sorumlu tüketimi konusunda inşaat mühendislerini düşünmeye iten bu durum, hazır beton tesislerinde sürdürülebilir beton üretimi gerçekleştirmek amacıyla yapılan çalışmaların tetikleyicisi olmuştur. Beton üretim maliyetinin geçmişe oranla yüksek oluşu, sertleşmiş betonun geri dönüştürülmesinde yaşanan zorluklar ve taze betonun doğaya ve çevreye verebileceği potansiyel zararların tümü göze alındığında, hazır beton tesislerinde atık taze betonun geri dönüşümü çalışmaları özellikle son yıllarda büyük önem kazanmıştır.

Hazır beton tesislerinde taze betonun geri dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem, yıkama suyu, filtre malzemesi ve agregaların ayrı ayrı toplanması şeklindedir. Bu yöntemde, transmikserler beton sertleşmeden önce taze betonu uzaklaştırmak üzere şebeke suyu ile yıkanır. Daha sonra atık ürün ayırma ünitesi görevi gören spiral elemanlara sahip bir tambura aktarılır. Agregalar ile ince parçacıklar içeren yıkama suyu tamburdan iki farklı ürün olarak çıkar. Yüksek miktarda askıda ince partikül içeren yıkama suyu, çökeltme havuzlarında toplanır ve filtre prese pompalanır. İşlemin son ürünleri, yeni beton üretimlerinde karışım suyu olarak kullanılabilen büyük ölçüde arıtılmış yıkama suyu ve filtre kalıntı malzemesidir. Filtre malzemesinin ağır metal içeriği, yüksek alkalinitesi ve atık sahalarına taşınma maliyeti dikkate alınması gereken önemli sorunlardır. Bu bağlamda, beton üretiminde yeniden kullanılması ekonomik ve çevresel açıdan faydalı olabilir.

Filtre malzemesi büyük oranda hidrate çimento, ince malzemeler, su ve genellikle ihmal edilebilir miktarlarda anhidr çimentodan oluşan bir karışımdır. Bu sebeple, bileşenlerinin çoğu zaman hidrasyon tepkimesi vermesi beklenmemektedir. Ortalama tane boyutunun oldukça küçük olması ve yapısında kalsiyum silikat hidratların varlığı filler malzeme olarak kullanılması bakımından önemlidir. Literatürde filtre malzemesinin hem filler malzeme olarak kullanımı hem de hidrasyona olan etkileriyle ilgili çalışmalar mevcut olsa da; özellikle hidrasyona etkilerinin geniş kapsamda araştırıldığı çalışmaların sayısı azdır.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında bu tez çalışmasının amacı, hazır beton tesislerinden elde edilen filtre kalıntı malzemesinin harç üretiminde ilave veya ikame malzeme olarak kullanılarak bertaraf edilmesidir. Bu kapsamda, hazır beton tesisinden elde edilen filtre malzemesi önce küçük parçalara ayrılarak $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra ortalama tane boyutu çimento boyutuna ($<90\ \mu\text{m}$) indirgenmiştir. Filtre malzemesi üç set halinde harç hazırlığına dahil edilmiştir. İlk sette, çimento ile %10 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. İkinci sette, kalker tozu ile birlikte, bu iki malzemenin toplam miktarı karışımdaki çimento miktarının %10'u

veya %20'si olacak şekilde harçlara ilave malzeme olarak dahil edilmiştir. Filtre malzemesi ve kalker tozunun birbirlerine göre karışım oranları ise sırasıyla, %0-100, %33-67, %67-33 ve %100-0 olarak belirlenmiştir. Üçüncü sette ise filtre malzemesi ve kalker tozu birbirlerine göre ikinci sette kullanılan oranlarla, kum ile ağırlıkça ikame edilmiştir. İkame oranı sırasıyla kum miktarının ağırlıkça %10'u ve %20'si olarak belirlenmiştir. Karışımların su/çimento oranları 0,50 ve 0,60 olarak seçilmiştir.

Üretilen harçların taze ve sertleşmiş durumdaki özellikleri bu tez kapsamında incelenmiş ve yorumlanmıştır. Taze harçların yayılma tablası deneyi ile kıvam değerleri karşılaştırılmıştır. 3, 7, 28 ve 90. günlerde tek eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına istinaden son iki set içinden seçilen belirli karışımlar tekrar üretilerek, numunelerin 10°C, 20°C ve 30°C sabit ortam sıcaklıkları altında izotermal kalorimetre metodu ile 72 saat boyunca hidrasyon özellikleri gözlenmiştir. 3 günlük basınç dayanımı deneyi, hidrasyon ve dayanım arasındaki yakın ilişkiyi gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, kum ile ikame edildiğinde veya karışımda ilave olarak kullanıldığında, filtre malzemesinin dayanımı arttırdığını ve mekanik özelliklerin iyileştiğini göstermiştir. Kalker tozu kullanımında görülen filler etkisi filtre malzemesiyle de görülmüştür. Çimento ile ikame edildiğinde, seyreltici etkiden dolayı dayanımda düşüş gözlenmiştir. İnce malzeme olduğundan, karışımlara belirli bir oranın üzerinde dahil edilmesi işlenebilirlik açısından problemlere neden olmaktadır. 30°C ortam sıcaklığında 72 saatteki toplam hidrasyon ısısını arttırmasının yanında, filtre malzemesi 10°C ortam sıcaklığında da toplam ısıya katkıda bulunmuştur. Genel olarak 72 saat boyunca hidrasyon hızını arttırıcı etki göstermiş, uyku periyodunun ve priz sürelerinin kısılmasına neden olmuştur. Filtre malzemesi kullanımıyla ana hidrasyon zirvelerinin gerçekleştiği süreler kısalmış, maksimum hız değerleri artmıştır. Elde edilen bulgular filtre malzemesinin kış koşullarında hidrasyonu hızlandırıcı ve erken dayanımı arttırıcı bir malzeme olarak kullanılması fikrini desteklemektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda rötre ve termal çatlakların engellenmesi için gerekli önlemler alınmalıdır. Filtre malzemesinin üretimde yeniden kullanımının, beton özellikleri ve sürdürülebilirlik konusundaki olumlu etkileri ile fayda sağladığı görülmüştür.

EFFECTS OF WASHWATER FILTER RESIDUE MATERIAL ON PROPERTIES OF MORTARS

SUMMARY

Increasingly ongoing investments in the construction sector has also increased the usage of the construction materials, especially concrete, which is the most used material in structures. The excessive usage of the materials, which compelles civil engineers to think about responsible consumption of resources, has been the trigger of the studies carried out to success sustainable concrete production in ready-mixed concrete plants. Considering the high cost of concrete production compared to the past, the difficulties experienced in recycling hardened concrete, and the potential harm that fresh concrete may cause to the nature and the environment, the recycling of waste fresh concrete in ready-mixed concrete plants has gained great importance in recent years.

A common process for recycling fresh concrete in ready-mixed concrete plants consists of an equipment system which can collect washwater, filter material, and aggregates seperately from the mixture. In this method, after inside of the truck mixers being washed with tap water to remove the fresh concrete prior to the concrete hardens, the mixture is transferred to a drum with spiral elements which acts as a separation unit. The aggregates and the mixture of washwater and fine particles exit the drum as two different products. The washwater containing high amount of suspended fine particles is collected in settling tanks and pumped into the filter press. The end products of the process are the treated washwater which can be used as mixing water in new concrete productions and the filter material, so-called washwater sludge. The heavy metal content and high alkalinity of the filter material, and the cost of transportation to landfills are important issues to be considered. If some instabilities related with the material properties can be removed, reusing it in concrete production in ready-mixed concrete plants can be economically and environmentally favorable.

The filter material is in a form of hydrated cement, fines, water and generally negligible amounts of anhydrous cement mixture. For this reason, its components are not expected to give significant hydration reactions most of the time. The fact that its average particle size is quite small and the presence of calcium silicate hydrates in the structure promotes the idea of using it as fillers. There are some researchs stating that the filter material contributes to the hydration process by acting as nucleation sites or due to its high pH value.

Hydration is an exothermic reaction which takes place in concrete right after the cement and water meet. Depending mainly on cement components, its duration, rate and the amount of heat released are affected by many factors such as water to cement ratio, existence of chemical admixtures, pozzolanas or other additives, curing temperature, cement dosage, fineness of cement, sulphates, aggregate type and so on. Hydration reaction may still continue at very low rates even after many years.

Hydration mechanism mainly consists of four periods: Initial period, induction period (dormant period), acceleration period and deceleratory period. The initial period is formed usually due to the reaction of tri-calcium aluminate phases, while tri-calcium silicate is responsible for the main hydration. Depending on such factors stated above, the occurrence times and specific heat values of all these periods change. Accordingly, the properties of concrete in fresh and hardened state will form in relation with heat evolution, rate of hydration, setting times and so on. The heat of hydration and hydration rate are well monitored with isothermal calorimeters which can measure the heat generation under a constant temperature and give more accurate results than other type of calorimeters do. However, their small chamber is a limitation in relation to representing concrete in large volumes. Also, they don't allow the samples to be mixed internally and this later on leads to that first heat of hydration peak due to very fast reaction of C_3A in first minutes can not be observed.

In the light of the information given above, the aim of this thesis study is set to dispose of the filter material obtained from ready-mixed concrete plants by using it as an additive or substitute material in mortar production. In this context, the filter material obtained from the ready-mixed concrete plant was first cut into small pieces and left to dry at $110\pm 5^\circ\text{C}$ for 24 hours. It was then ground to the cement size ($<90\ \mu\text{m}$) and included in the mortar preparation in three sets. In the first set, the filter material was used as a substitution for cement at 10% and 20%, respectively. In the second set, the filter material and limestone powder were incorporated into mortars as additives. The addition rates were determined as 10% and 20% of the cement weight, respectively. In the third set, the filter material and the limestone powder were replaced with sand by weight, providing that the total amount of these two materials is 10% and 20% of the amount of sand in the mixture. The ratios of filter material and limestone powder compared to each other were determined as 0-100%, 33-67%, 67-33% and 100-0%, respectively.

The workability of fresh mortars were compared with the flow-table test. Uniaxial compression tests were performed on days 3, 7, 28 and 90. Based on the compressive strength test results, the mixtures selected from the last two sets were reproduced and their hydration properties were observed for 72 hours by isothermal calorimetry method under constant temperatures of 10°C , 20°C and 30°C . The 3-day compressive strength test was carried out to observe the close link between the hydration mechanism and the strength.

The results showed that the filter material increases the strength especially at early ages and the mechanical properties are improved when it is used as a substitution for sand or used as an additive in the mixture. On the other hand, the compressive strengths of mortars in which the filter material was replaced with cement were lower than the reference mortar. However, the gap between the reference and the mortars with the filter material replaced with cement decreased with time. The filler effect seen in the use of limestone powder was also observed with the filter material. Since it is a very fine material, its inclusion in the mixtures above a certain rate may cause problems in terms of workability. Besides increasing the total heat of hydration within 3 days at 30°C , the filter material contributed to the total heat of hydration even at 10°C . The filter material increased the rate of dissolution of cement in water during the first hours of the hydration reaction. The 3 days compressive strength values were well connected with hydration heat values. The findings support the idea of using the filter material as hydration accelerator so that a rapid early strength development can be obtained in winter conditions. It's already a widely used option to use the washwater as

replacement with tap water thanks to its fine content stimulating the hydration and making the setting times become earlier. The same procedure can be followed with the filter material considering its hydration boosting effect. However, necessary precautions should be taken to prevent shrinkage related or thermal cracks at high temperatures as it can lead to occur high temperature differences in concrete occasionally.

To sum up, the filter material is found to be a good recycling material with its positive influences on mechanical and hydration properties of mortars.





1. GİRİŞ

Beton; inşaat endüstrisinde başta ekonomik olması sebebiyle uzun süredir kullanılan, düzgün planlama ve uygulama yapıldığı takdirde üzerine gelen büyük yükleri taşıyabilecek kadar mukavim, çevresel etkilere uzun yıllar karşı koyabilecek kadar dayanıklı bir yapı malzemesidir [1]. En basit haliyle; yeterli miktarda ve belirli oranlarda bağlayıcı, su ve agregaların bir araya getirilip karıştırılmasıyla elde edilir.

Betonun üretim maliyeti üzerine düşünülmesi gereken bir konudur. Bir yapı malzemesi olarak betonun kullanımı her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla, başta enerji ve su olmak üzere kaynakların tüketiminde de doğrudan veya dolaylı olarak artışa neden olmaktadır. Betonun çevresel ve ekonomik çerçevedeki etkileri yalnızca kaynak tüketimiyle ilgili olmamakla birlikte, bileşenlerinin üretimi veya beton üretimi sonucu oluşan atıklar ve bu atıkların bertaraf edilmesi için gereken maliyetler ile betonun taşınması ve yerleştirilmesi sürecinde oluşan atıklar ve maliyetler olarak özetlenebilir. Tüm bu etkiler göz önüne alınarak, betonun olumsuz etkilerini azaltmak için yapılan çalışmaların özellikle son yıllarda arttığı ve inşaat sektörünün daha sürdürülebilir hale gelmek için büyük çaba sarf ettiği söylenebilir.

Betonun temel bileşeni olan çimento, üretim aşamasında büyük miktarda CO₂ salınımına neden olmaktadır ve inşaat sektörü çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımındaki payıyla dünyada üst sıralarda yer almaktadır [2]. Beton endüstrisiyle ilgili diğer bir sorun ise su tüketimidir. Su krizi, insan talebinde olan su kaynaklarının azalmasıyla birlikte tüm dünyayı etkileyen bir sorun haline gelmiştir. Bu sorun, dünyanın birçok ülkesinde gıda, tarım ve sağlığı etkilemektedir. Atık su arıtma tesislerinin inşası ve yeraltı suyu kullanımının azaltılması, bu krize karşı ilk olarak alınması gereken önlemler gibi görünmektedir. Atık suyun yüksek miktarda su tüketen endüstrilerde yeniden kullanılması, sorunun üstesinden gelinmesine önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

İnşaat endüstrisi büyük miktarda su tüketiminden sorumlu görünmektedir. Temiz su kaynaklarının 1/6'sını kullanmasıyla en önemli su tüketicilerinden biri konumundadır

[3]. 1 m³ beton üretmek için yaklaşık 150-200 litre su gereklidir [4]. Karma suyu kullanımı üretimin bir parçası olduğundan önlenemez bir kayıp olsa da; mikserler, kamyonlar veya tesislerin yıkanmasında kullanılan su azaltılabilir. İnşaat sahasından hazır beton tesisine dönen her transmikserin içinde bir miktar plastik kıvamda beton kaldığı bilinmektedir. Mikser içinde kalan bu beton hidrasyon düzenleyici kimyasal katkılarla tekrar kullanılabilenmekte veya yıkanarak çıkarılmaktadır [5]. Yıkama işlemi sonunda su ve toprak kirliliğine sebep olan önemli miktarda atık su oluşmaktadır. Üstelik beton üretiminde kullanılan suyun çok daha fazlasının (~1.500 lt/mikser/gün) mikserlerin gün sonunda yıkanmasında kullanıldığı sonucuna ulaşılmıştır [6]. Askıda katı madde miktarı ve alkalitesi yüksek olan atık suyun tahliyesi, yasal sınırlamalar gereği bir dizi arıtma işlemi sonucu gerçekleştirilebilmektedir [7]. Bu nedenle, atık suyun geri dönüşümü hem su tasarrufu hem de temiz bir çevre için gerekli bir süreç haline gelmiştir. Betonda yeniden kullanıldığında, atık su arıtımı kimyasal arıtma gerektirmediği için ekonomik bir katkı sağlayabilir.

Beton yıkama suyunun çevreye olan zararlı etkisi ve deşarjı konusunda getirilen sınırlamalar hazır beton endüstrisinde maliyetlerin artmasına sebep olduğu için yıkama suyunun yeniden kullanımı yakın geçmişten beri beton üreticilerinin ilgi odağı haline gelmeye başlamıştır. Birçok beton üreticisi, kendi atık sularının yönetimi için çeşitli yapılandırmalara girmişlerdir. Alternatif çözümler arasında; çökeltme havuzları, yağmur suyu tutma/biriktirme tesisleri ve atık suyun yeniden kullanılmasına dönük sistemler sayılabilir. Yıkama suyunun yanı sıra, artık beton içerisindeki agregalar da beton üretiminde yeniden kullanılmaktadır. Ayrıca, yıkama suyunun filtre presten geçirilmesi sonucu, bu tez kapsamında filtre malzemesi olarak adlandırılan malzeme elde edilmektedir. Filtre malzemesi daha sonra kurumaya bırakılmakta ve yerel yönetimler tarafından belirlenen atık sahalarına taşınmaktadır. Kurumuş haldeki filtre malzemesi reaksiyona girmeyen malzeme olarak kabul edilmektedir. Tekrar üretime katılmasının neredeyse sıfır maliyetle gerçekleşeceği düşünüldüğünde; beton karışımına giren ucuz hammaddeler olan agregaların, daha da önemlisi üretim maliyeti en yüksek bileşen olan çimentonun yerine düşük oranlarda bile kullanılabilir ise, çevreye ve ekonomiye önemli katkısı olacağı açıktır.

Bu çalışmada, hazır beton tesislerinde yıkama suyunun filtrelenmesi sonucu elde edilen filtre kalıntı malzemesinin üretimde tekrar kullanımının uygunluğu araştırılarak, beton endüstrisinin sürdürülebilir ve daha ekonomik bir şekilde faaliyet

gösterebilmesi amacına odaklanılmıştır. Tez kapsamında, filtre malzemesinin kalker tozu gibi ince filler maddesi olarak değerlendirilmesinin sonuçları araştırılmıştır. Filtre malzemesi ve kalker tozunun işlenebilirlik, hidrasyon ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu konuda daha önce yapılan çalışmaların genelinde görülen betonun makro boyutta incelenmesi yerine mikro boyutlarda incelenmesi hedefiyle harç üretimlerinin gerçekleştirilmesi ve filtre malzemesinin çimento hidrasyonuna etkilerinin araştırılması ile bu çalışmanın filtre malzemesiyle ilgili araştırmalara katacağı sunacağı düşünülmüştür.





2. GENEL BİLGİLER

2.1 Beton ve Harçların Genel Özellikleri

Beton; istenilen taze ve sertleşmiş haldeki performansı gösterebilmesi amacıyla, standartlara uygun bir şekilde üretimde kullanılabilirliği deneysel olarak ispatlanmış çimento veya diğer bağlayıcılar, su, ince ve iri agregalar, kimyasal katkı maddeleri, puzolanlar ve çeşitli diğer bileşenlerin o tasarıma özgü oranlarda bir araya getirilip, homojen bir karışım elde edilmek suretiyle karıştırılması, ardından kalıp içerisine yerleştirilmesi ve uygun koşullarda kürlenmesi sonucu elde edilen yapı malzemesidir. Başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilirken, zamanla sertleşir.

Betonun iri agregası kullanılmadan üretilmesiyle harç adı verilen malzeme elde edilir. TS EN 206 standardı harcı “ D_{max} değeri (agrega en büyük tane büyüklüğü) 4 mm veya daha küçük olan betonlar” şeklinde tanımlamaktadır [8]. Standart harç üretiminde su, çimento ve ince agreganın kütlece birleşim oranı sırasıyla 0,5:1:3 şeklindedir ve 450 ± 2 gr çimento ile hazırlanan harç karışımı 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki 3 adet prizmatik kalıbı doldurmaya yetecek miktardadır [9]. Harçlar beton özelliklerinin ve bileşenlerinin etkilerinin incelenmesinde betonu daha küçük boyutlarda temsil etme işlevi görmektedir. Ayrıca güçlendirme, onarım gibi yapısal uygulamalarda ve çeşitli mimari uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

Betonun tasarımından bağımsız olarak sahip olması gereken özellikler bulunmaktadır. Bunlardan ilki taze haldeyken işlenebilir olmasıdır. İşlenebilirlik; betonun karıştırma ve yerleştirilmesinin kolaylıkla sağlanması, bununla birlikte kararlı ve homojen şekilde durabilmesidir. Betonun ayrışma ve terleme olmadan homojen kalabilmesi, hedeflenen dayanıma ve durabiliteye ulaşmanın önemli koşuludur. Betondan beklenen diğer özellikler ise sertleştikten sonra istenen dayanıma ve dayanıklılığa sahip olmasıdır. Sertleşmiş haldeyken beton artık işlenemez ve şekil verilemez durumdadır. Dolayısıyla, düzgün bir karışım dizaynı ile birlikte taze beton üzerine yapılan tüm

doğru işlemler uygun kür koşullarıyla bir araya geldiğinde betonun nihai performansını da arttıracaktır.

Betonun performansı bileşenlerinin özelliklerine doğrudan bağlıdır. Çimento hamuru, agrega ve bu ikisi arasında oluşan bağ kuvveti betonun dayanımını belirler. Betonda gerilmeler genellikle agregalarda yoğunlaşır ve çimento hamuru-agrega arayüzeyine aktarılır. Sonuç olarak betonun zayıf bölgesi olan arayüzeyde çatlaklar oluşur ve kesit içerisinde agrega yüzeyi boyunca ilerler. Arayüzeyin yüksek dayanıma sahip olması durumunda çatlakların yayılması engellenir. Düşük dayanımlı agrega içeren betonlarda çatlakların agregalarda oluştuğu görülebilen, bu durum bir bütün olarak betonun dayanımını da düşürmektedir [10]. Betonun ölçülen dayanımı deney parçasının biçimi, boyutları, büyüklüğü ve deney hızına bağlı olarak değişmektedir. Betonun boşluklu yapısı çekme deneyi sırasında gerilme yığılmaları oluşturur, bu nedenle çekme dayanımı düşüktür. Bu kusurlar basınç etkisi altında kapanır ve kesite gelen yük yüzeyden yüzeye aktarılarak malzemenin yüksek gerilmeleri taşımasını sağlar [11].

Betonun dayanım kazanması, çimento taneleri suyla temas eder etmez başlayan ekzotermik hidrasyon olayıyla birlikte gerçekleşir. Hidrasyon başlangıcında çimento taneleri arasındaki mesafe fazla ve oluşan bağ zayıftır. Betonda reaksiyona girebilecek anhidr çimento bulunması ve çimentonun tamamının hidrate olmasına yetecek miktarda su bulunması durumunda hidrasyon ürünleri oluşmaya devam eder ve taneler arasındaki mesafe zamanla azalır. Dayanım kazanımı bu şekilde yıllar sonra bile devam edebilir [12]. Karışıma katılan suyun yeterli işlenebilirliği sağlaması ve betonda ilave boşluklar oluşturmaması gereklidir. Su/çimento oranının gereğinden düşük veya yüksek olması betonda ilave boşlukların oluşmasına ve mukavemetin azalmasına neden olmaktadır.

2.2 Filler Malzemelerin Beton Özelliklerine Etkisi

Beton karışımında çimento hamuru; agregalar arasındaki boşlukları dolduran, tanelerin yüzeyini kaplayan ve bu sayede hapsolmuş hava oluşumunu engelleyen, hidrasyon ile betona mekanik özelliklerini kazandıran ve taze betonun işlenmesini kolaylaştıran bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, beton içerisindeki çimento hamuru hacmi çok küçük olmamalıdır. Diğer taraftan, betonun hacimsel stabilitesini koruyabilmesi, sıcaklık, rötre ve sünme gibi etkiler sonucu çatlama riskinin azalması için çimento

hamuru hacmi olabildiğince küçük olmalıdır [13]. Tüm bu koşulları sağlayarak beton üretebilmenin bir yolu da filler malzemeleri beton karışımında kullanmaktır.

Filler malzemeler, en büyük tane boyutu 0,075 mm'den küçük olan agregalardır. Filler malzemeler beton içerisinde oldukça küçük bir hacim kaplamasına rağmen beton özellikleri üzerindeki etkileri büyüktür. Taze betonun işlenebilirliğini iyileştirmek, boşluklu yapı oluşumunu azaltmak, hidrasyonu hızlandırmak, rötre ve sünme etkilerini kısıtlamak, dayanım artışı sağlamak ve çimento dozajını düşürmek gibi amaçlarla betonda filler malzemeler kullanılmaktadır. Filler malzemeler betonda belirli oranlarda ince agregaların yerine de kullanılabilir. Bu şekilde daha iyi bir agrega gradasyonu sağlayarak arayüzeydeki boşlukları doldurur.

Puzolanik olmayan filler malzemelerin beton matrisi içerisinde kimyasal reaksiyona girmedeği kabul edilir. Ancak, kullanılan türe bağlı olarak farklı çimento bileşenlerinin hidrasyonunu farklı yollardan etkilediği, standart beton karışımında daha pasif durumda gerçekleşen bazı reaksiyonları harekete geçirerek hidrasyon kinetiğini değiştirdiği söylenebilir. Özellikle çimento ile ikame edildiğinde oluşan seyreltici etki (çimento dozajının azalması) ile birim çimento yüzeyine gelen su miktarının artmasından ötürü veya karışıma dahil edildiğinde tane yüzey alanının artmasıyla oluşan çekirdeklenme etkisi ile hidrasyonu hızlandırabilir, erken dayanımı arttırabilirler [14]. Filler malzemelerin taze beton özelliklerine olan etkisi de kullanılan türe bağlı olarak değişmektedir [15].

2.2.1 Kalker tozunun beton özelliklerine etkisi

Kalker tozu esasen kırmataş ocaklarından yan ürün olarak elde edilen bir malzemedir. Ucuz ve temininin kolay olması avantajı ile betonda kullanılan mineral katkılardan biridir. Çimento ve beton özelliklerine olumlu etkileri olan kalker tozunun klinker öğütülmesi sırasında karışıma katılması ve betonda çimento veya agrega yerine filler olarak kullanılması günümüzdeki yaygın uygulamalardır. Kalker tozu çimentodan daha ince halde çimento ile ikame edilirse seyreltici etkisinin yanında filler etkisi de görülürken, çimentoyla aynı boyutlarda olduğunda filler etkisini gösteremez.

Kalker tozunun hidrasyona olan etkilerinin incelendiği bir çalışmada araştırmacılar kalker tozu kullanımının uyku periyodunun önemli ölçüde kısalmasını ve hızlanma periyodu sırasında reaksiyonların hızlanmasını sağladığını ortaya koymuşlardır. Kalker tozu C_3S ve C_2S 'in hidrasyonu için bir çekirdeklenme noktası görevi görerek

bu bileşenlerin reaksiyonlarını hızlandırmıştır [16]. Buna benzer bir başka araştırmada, kalker tozunun inceliği arttıkça erken yaşlarda oluşan hidrasyon ürünlerinin miktarında artma gözlenirken, C_3S hidrasyonunu hızlandırdığı belirtilmiştir [17]. Geniş yüzey alanına sahip olması ile kalker tozu kılcal boşlukları azaltarak dayanım artışı sağlamıştır [18]. Çimento yerine küçük oranlarda kullanıldığında geçirimsizliği azalttığı, basınç dayanımı ve elastisite modülünde artış sağladığı söylenebilir. İnce agrega ile ikame edildiğinde de benzer etkiler görülmektedir. Filler etkisi ve çimento azaltıcı etkisi betonun toplam rötresini azaltırken, çekirdeklenme etkisi otojen rötrede artışa sebep olmaktadır [19].

2.3 Sıcaklığın Beton Özelliklerine Etkisi

Sıcaklık betonun üretimini, taze ve sertleşmiş durumdaki tüm özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Betonun istenen performansı gösterebilmesi için hava sıcaklığına bağlı olarak malzeme seçimi, karıştırma ve yerleştirme sıcaklığı ile koruma süreleri değişkenlik göstermektedir.

Taze betonda hidrasyonun gerçekleşmesi için gerekli olan optimum sıcaklık genellikle $+15 - +25^{\circ}C$ 'dir. $+5^{\circ}C$ 'nin altındaki sıcaklıklar kalıp alma süresinden sayılmamakla birlikte, $-10^{\circ}C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda dayanım kazanımının tamamen durduğu kabul edilmektedir. Soğuk havalarda beton dökümü esnasında önemli olan nokta karışımda bulunan serbest su miktarını azaltarak donmaya engel olmaktır. Bunu sağlamanın yolu ise suyun hidrasyon reaksiyonlarında bağlanmasıdır. Erken yaşlarda hidrasyonu hızlandırmak için de betonda istenilen sıcaklığın oluşturulması gereklidir. Yapı elemanının kesit ölçüleri de dikkate alınarak hava sıcaklığına göre taze betonda sağlanması gereken minimum sıcaklık değerleri mevcuttur. Ancak unutulmamalıdır ki, taze beton sıcaklığının aşırı yüksek olması da soğuk hava şartlarında istenen bir durum değildir. Büyük sıcaklık farkları taze betonda hızlı ısı kaybı oluşturacağından, betonda termal ve plastik rötre çatlaklarının oluşma riski artacaktır. Ayrıca karma suyu ihtiyacının artmasına sebep olabilir.

Sıcak hava koşulları da betonun performansını olumsuz etkileyebilir. Olumsuz etkinin hangi sebeplerden kaynaklandığına gelecek olursak; hidrasyon hızının artması ve taze beton içerisindeki suyun buharlaşması akla ilk gelenlerdir. Sıcak hava etkisinde betonda kıvam kaybı, erken priz alma, soğuk derz oluşumu, plastik rötre çatlakları ve termal çatlaklar gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık altında kürlen

betonda porozitede artış ve dayanımda düşüş görülebilmektedir. Betonun karıştırma, yerleştirme ve kürlenmesi yüksek sıcaklık altında gerçekleştirildiğinde düşük sıcaklık altında yapılan aynı işlemlere oranla daha yüksek erken dayanım elde edilirken, 28 günlük dayanım değerlerinde ters etki görülmektedir [20, 21]. Sıcak hava, rüzgar ve düşük bağıl nemin birlikteliği taze betonda terleme yoluyla yüzeye çıkan suyun buharlaşmasını hızlandırır. Eğer buharlaşma hızı terleme hızından büyük olursa plastik rötre çatlakları meydana gelir. Bu soruna çözüm olarak betonun terlemesi yerine buharlaşmasına neden olan etkenleri ortadan kaldırmak gereklidir. Priz geciktirici katkıları ve uçucu kül gibi ince mineral katkıların kullanımı ya da beton sıcaklığının düşürülmesi gibi seçenekler rötre çatlakları ihtimalini arttıracaktır.

Özetle anlatmak gerekirse; sıcaklığın beton özelliklerini etkileyişi biçimi çoğunlukla hidrasyonu nasıl etkilediğiyle yakından ilişkilidir. Bölüm 2.2’de anlatılan filler malzemelerin hidrasyona olan etkilerini ve bu bölümde anlatılan etkileşimleri daha iyi anlamak için hidrasyon konusunun detaylı olarak irdelenmesi, hidrasyon mekanizmasının ve hidrasyonu etkileyen parametrelerin içselleştirilmesi gerekmektedir.

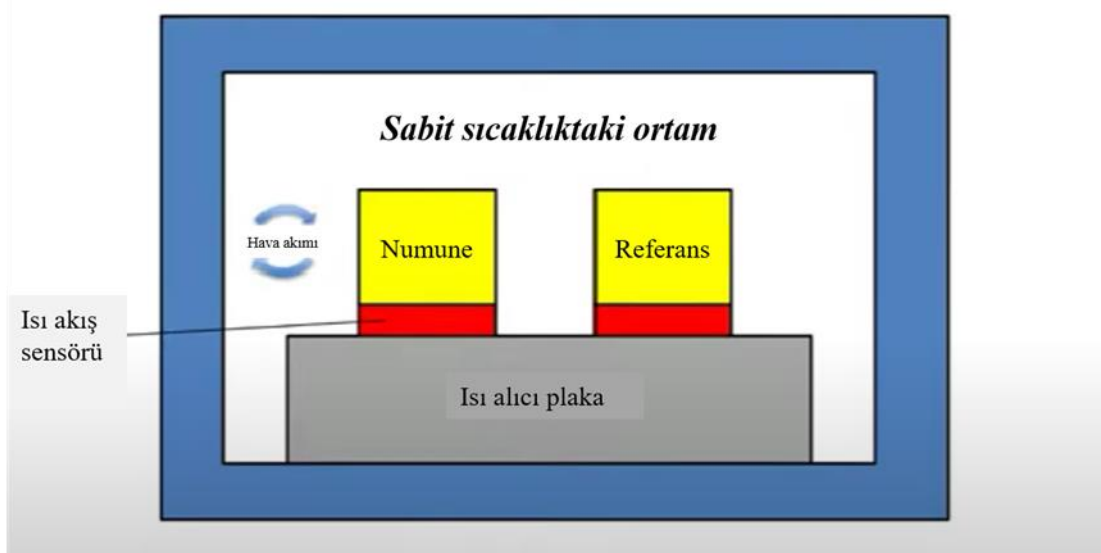
2.4 Hidrasyon

Çimento kimyasında hidrasyon, anhidr çimentonun ya da çimento bileşenlerinin betonda fiziksel ve kimyasal değişiklikler oluşturmak üzere su ile tepkimeye girmesi olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle hidrasyon; çimento taneleri ile su moleküllerinin birbirine temas etmesiyle gerçekleşmeye başlayan, betonun prizini takiben sertleşmesine ve dayanım artışına neden olan reaksiyondur. Hidrasyon ekzotermik bir tepkime türüdür. Gerçekleşebilmesi için belirli bir sıcaklığın sağlanması ve çimentonun yeterli miktarda su ile karıştırılması gerekmektedir. Hidrasyon ile birlikte su ve çimento karışımı hamur kıvamına gelir ve taze çimento hamuru olarak adlandırılır. Hidrasyon ilerledikçe çimento hamuru priz alır, sertleşmeye başlar ve sertleşmiş çimento hamuru halini alır. Hidrasyonun ilk saatlerinde betonda aniden gerçekleşen plastisite kaybına priz denir. Prizi takiben beton sertliğinin ve dayanımının artışı sertleşme olarak ifade edilir [22]. Priz süresi, dökümü arasında zaman farkı bulunan beton tabakalarının soğuk derz meydana getirme olasılığı düşünüldüğünde uygulamada önem arz etmektedir. Soğuk derzin meydana geldiği beton tabakasında tekrar vibrasyon uygulanamamaktadır. Kayar kalıp

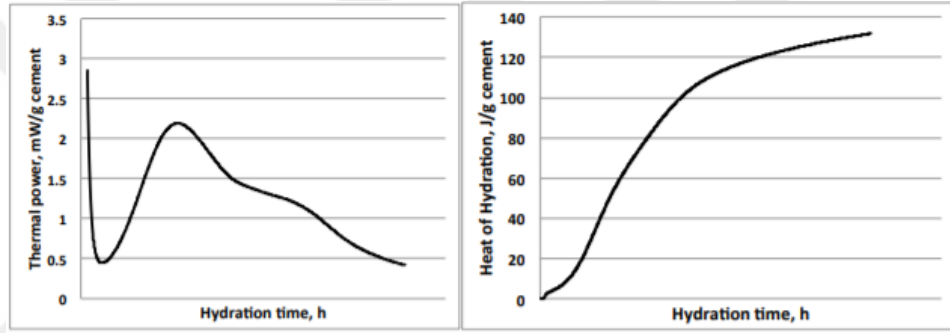
teknolojisinin kullanıldığı özel inşaat projelerinde priz süresi tasarım aşamasında mutlaka dikkate alınması gereken bir husustur [23].

Hidratasyon genellikle beton üretildikten sonraki ilk 3 gün içerisinde hızlı bir şekilde ilerler ve bu sürede yoğun bir ısı çıkışı gözlenir. Bu sürede toplam hidratasyon ısının yaklaşık yarısı açığa çıkmaktadır. İlk 3 günden sonra karışımdaki anhidr çimento tanelerinin sayısı ile bağlı olmayan su miktarının azalması, ayrıca yeni hidrate ürünlerin oluşması için yeterli alanın bulunmaması reaksiyonun yavaş bir şekilde ilerlemesine neden olur [24]. Dolayısıyla, asıl hidratasyonun önemli aşamalarını görebilmek için reaksiyonun en az 72 saat boyunca izlenmesi faydalı olacaktır. İlk 3 günden sonra hidratasyon yavaş bir şekilde uzun bir süre boyunca ilerlemeye devam eder. Hidratasyonu gözlemlemek ve zamana bağlı olarak erken yaştaki betonun gelişimini değerlendirmek amacıyla kalorimetreler kullanılmaktadır. Kalorimetre, çimento hidratasyonu gibi bir kimyasal reaksiyon sırasında kaybedilen veya kazanılan ısının ölçümünü sağlar [25]. İzotermal, adyabatik veya yarı adyabatik koşullar altında gerçekleştirilebilir. İzotermal kalorimetreler belirlenen sabit sıcaklık altında limitleri dahilinde olmak kaydıyla istenilen süre boyunca ısı ölçümü sağlar. Diğer kalorimetrelere kıyasla daha hassas ölçüm imkanı sağlamasına rağmen ölçüm kaplarının küçük olması gibi bir dezavantajı vardır [26]. Ayrıca, karıştırma işleminin kalorimetre haznesi dışında yapılması hidratasyonun ilk anlarında açığa çıkan ısının ölçülememesine neden olmaktadır. Şekil 2.1’de bir izotermal kalorimetre haznesinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu gösterimdeki numunenin çimento hamuru olduğu varsayılırsa, ekzotermik hidratasyon reaksiyonu ile birlikte numunenin sıcaklığı artar ve ortam sıcaklığının üzerinde bir değere ulaşır. Hazne içerisindeki sistemin ısı dengeye ulaşması için numuneden ısı akış sensörü yoluyla ısı alıcı plakaya ısı akışı gerçekleşir. Bu sırada aktarılan ısının ölçümü de ısı akış sensörlerinden gelen voltaj sensörleriyle yapılmaktadır. Daha sonra voltaj cinsinden ölçülen ısı watt cinsinden değere dönüştürülmektedir.

Şekil 2.1’de referans olarak adlandırılan nesne ise herhangi bir kimyasal tepkimeye girmeyen ve kompleks yapıda olmayan bir malzemedir. Kalorimetre ile yapılan ölçüm sonucu elde edilen veri, zamana bağlı ısı akış hızını ve açığa çıkan toplam ısıyı gösterecek şekilde grafiklere aktarılır.



Şekil 2.1 : İzotermal kalorimetre haznesi şematik gösterimi



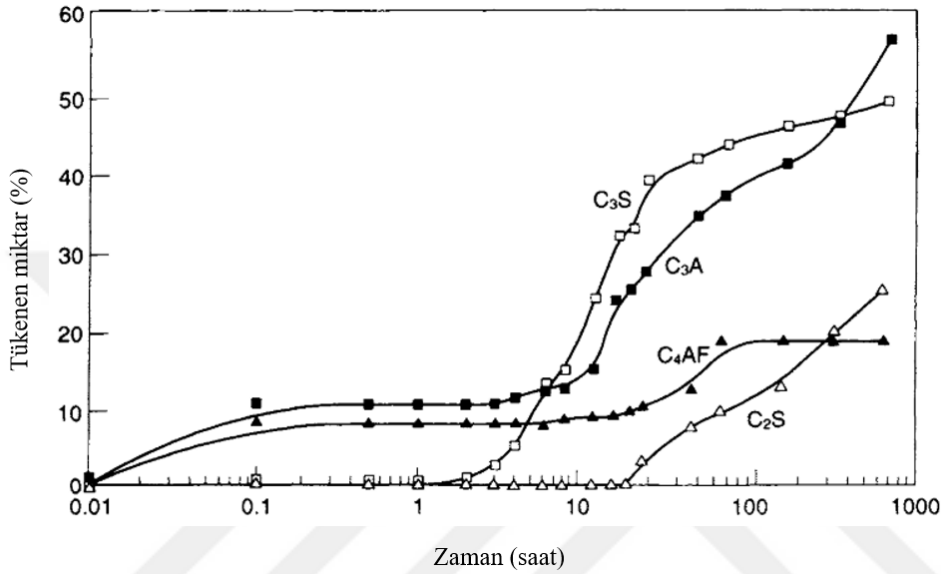
Şekil 2.2 : Isı akışı (sol) ve Toplam hidrasyon ısısı (sağ) grafikleri [27]

Şekil 2.2’de izotermal kalorimetre ile yapılan bir hidrasyon ısısı ölçümü sonucu elde edilen ısı akış hızı ve toplam ısı grafikleri görülmektedir. Soldaki grafik birim zamanda harcanan gücü, yani hidrasyonun anlık ısı akışını göstermektedir. Sağdaki grafik ise soldaki grafiğin integrali alındığında elde edilen, eğri altında kalan alanı, yani açığa çıkan kümülatif ısı miktarını göstermektedir. Isı akışı eğrisindeki değişiklikler, toplam ısı eğrisinin eğimini değiştirmektedir. Bu grafiklerin iyi anlaşılması karışımın işlenebilirliği, priz süreleri, dayanım gelişimi ve sülfat miktarı gibi özelliklerinin yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

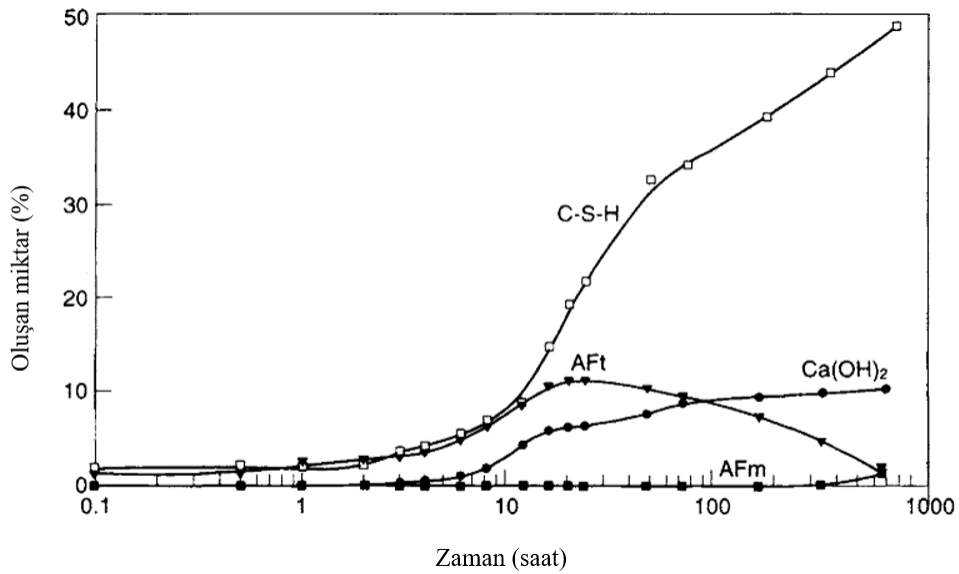
2.4.1 Hidrasyonun aşamaları

Portland çimentosu, kil ve kireçtaşının pişirilmesiyle elde edilen klinkerin alçıtaşı ile birlikte öğütülmesiyle üretilmektedir. Klinker bileşenleri, trikalsiyum silikat ($C_3S-3CaO.SiO_2$ veya Ca_3SiO_5 , alit), dikalsiyum silikat ($C_2S-2CaO.SiO_2$ veya Ca_2SiO_4 , belit), trikalsiyum alüminat ($C_3A-3CaO.Al_2O_3$ veya $Ca_3Al_2O_6$, selit) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($C_4AF-4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ veya $Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$, ferrit) şeklindedir [28].

Şekil 2.3 Portland çimentosu bileşenlerinin hidrasyon süresince yüzde olarak tükenme miktarlarını ve Şekil 2.4 oluşan ürünlerin miktarlarını zamana bağlı olarak göstermektedir. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, C_3A ve C_4AF bileşenleri suyla hızlı reaksiyon vermekte ve hidrasyonun ilk anından itibaren hızlı bir şekilde tükenmektedir. Birkaç dakika sonra (grafikte 0,1. saate yakın) iki bileşenin de tükenme hızının azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.3 : Klinker fazlarının hidrasyon sırasında zamana bağlı tükenme miktarı (%) [22]

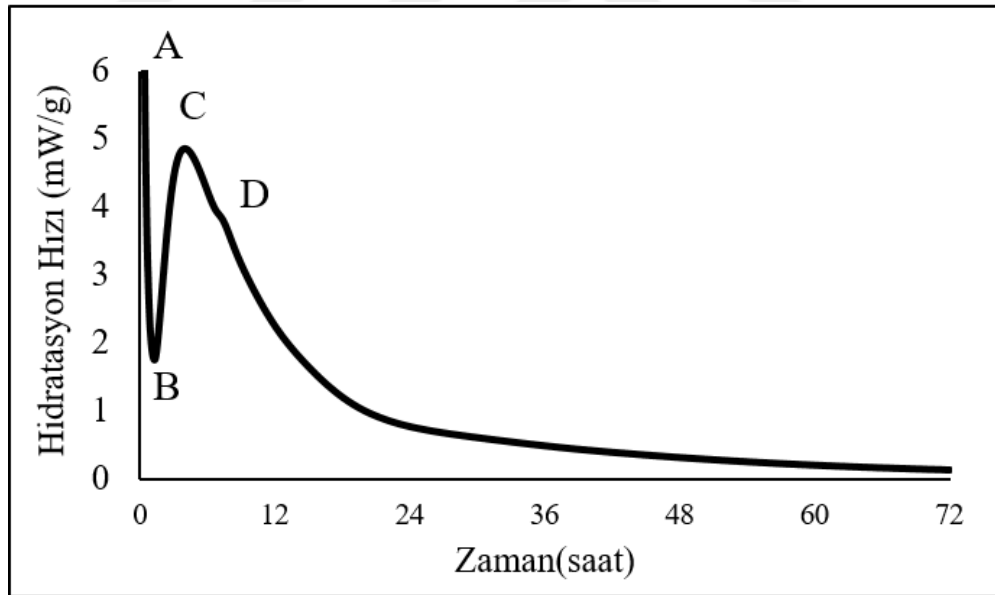


Şekil 2.4 : Hidrasyon ürünlerinin zamana bağlı oluşumu (%) [22]

Şekil 2.4'te aynı dakikalara bakılırsa AFt (etrenjit) oluşumu başlamaktadır. Bu aşamada alçıtaşı alüminatlar ile birleşerek etrenjit oluşturmaya ve alüminatların hızlı

reaksiyonun baskılamaya başlamıştır. Yaklaşık 10 saat sonra tekrar yukarı doğru ivmelenen C_3A ve C_4AF eğrileri ise karışımdaki sülfatların tükenmesi ve alüminat reaksiyonunun yeniden hızlanmasıyla ilişkilidir. Hidratasyonun ilk saatinden itibaren reaksiyona giren C_3S miktarı hidratasyonu kontrol etmeye başlar ve betona asıl dayanımını veren kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) oluşumu hızlanır. C-S-H ile birlikte portlandit ($Ca(OH)_2$) oluşumu da görülür. Portlandit su ile etkileşime girince çözünen bir yapıdadır. Portlanditin çözünmesi beton içerisinde boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Uçucu kül gibi mineral katkıları beton karışımına dahil edildiğinde portlandit ile tepkimeye girerek C-S-H oluşturur. Beton soğumaya başladıktan sonra C_2S hidratasyonu da etkisini göstermeye başlar. C_2S , betonun ileri yaşlardaki dayanımını arttıran bileşendir.

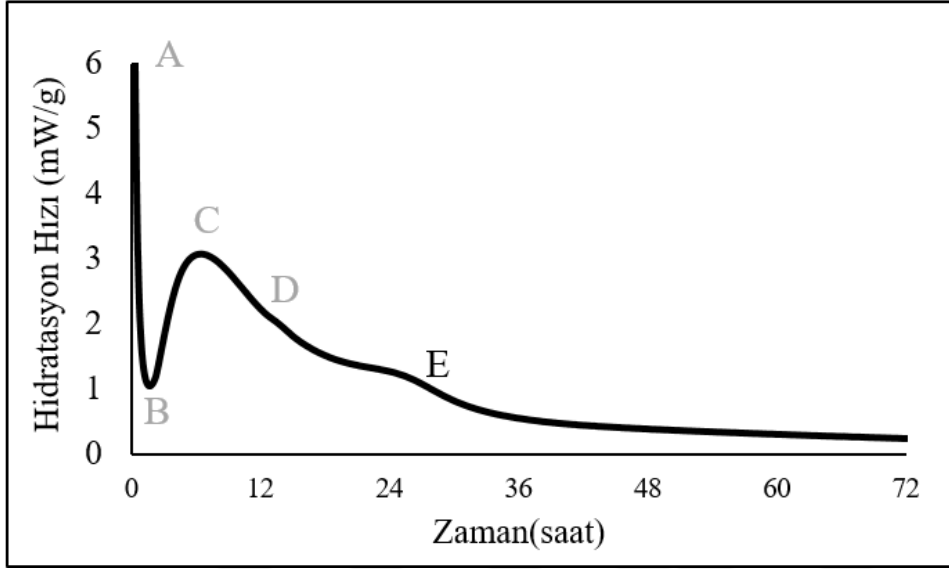
Portland çimentosu hidratasyonu sırasında gerçekleşen ve hidratasyonun ilerleyişine yön veren birtakım evreler bulunmaktadır. Bu evrelerin gerçekleşme zamanı, miktarı ve süresi hidratasyon kinetiğini değiştirmektedir. Şekil 2.5'te tipik bir hidratasyon hızı grafiğindeki aşamalar görülmektedir.



Şekil 2.5 : Hidratasyonun aşamaları

Grafikte işaretlenen noktaları açıklamak gerekirse; A noktası büyük ölçüde C_3A 'nın ani hidratasyonu sonucu oluşan ilk tepe noktasını ve başlangıç periyodunu, B noktası reaksiyonun yavaşladığı uyku periyodunu, B-C arası eğri hidratasyonun yeniden yoğunlaştığı hızlanma periyodunu, C noktası C_3S hidratasyonuna atfedilen ikinci (ana) tepe noktasını, D noktası karışımdaki sülfat miktarının azalmasıyla birlikte C_3A 'nın

yeniden tepkime vermesi sonucu oluşan üçüncü ısı salınım tepesini (sülfat tükenim tepesi), C noktasından başlayarak D noktasını aşan ve hidrasyon hızının azalarak devam ettiği kısım ise yavaşlama periyodunu temsil etmektedir. Bazı durumlarda Şekil 2.6'da E noktasıyla temsil edilen, etrenjitin monosülfata dönüşmesiyle oluşan bir dördüncü tepe görülebilir.



Şekil 2.6 : Etrenjitin monosülfata dönüşmesiyle oluşan dördüncü tepe (E)

2.4.1.1 Başlangıç evresi

Hidrasyonun başlangıç evresinde, çimento ve suyun ilk temasının hemen ardından C_3A 'nın hidrasyonu ile hızlı bir ısı salınımı görülmektedir. Çimentodaki C_3A -sülfat dengesi bu evrede büyük önem arz etmektedir. Eğer çimento içerisinde yeterli miktarda alçıtaşı gibi bir sülfat kaynağı bulunursa, C_3A ile sülfatlar reaksiyona girerek etrenjit oluştururlar. Kalsiyum sülfatların bir kısmı C_3A ile tepkimeye girerken bir kısmı da hidrasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) tarafından emilir. Bu sayede hızlı reaksiyon yavaşlamaya başlar ve ani priz oluşumu engellenir. Kalsiyum sülfatların bulunduğu forma (anhidrit, hemihidrat, alçıtaşı) bağlı olarak çözünme hızları da farklılık göstermektedir [29]. Diğer taraftan, sülfat miktarı C_3A hidrasyonunu baskılamaya yetecek miktardan fazla olursa karışım suyunu bağlar ve çimentoda yalancı priz olarak adlandırılan geçici donma durumu gözlenebilir. Yalancı priz, karıştırma işlemi ile engellenerek başlangıçtaki işlenebilirlik tekrar kazanılabilir [30]. Başlangıç periyodunda C_3S bileşeni de hidrasyona uğramaktadır. Ancak, açığa çıkan büyük miktardaki ısı çok daha hızlı tepkimeye giren C_3A 'ya bağlanmaktadır. Başlangıç periyodu karıştırma işleminden birkaç dakika sonra sona erer.

2.4.1.2 Uyku evresi

Hızlı C_3A reaksiyonunun ardından hidratasyon hızı dramatik bir şekilde azalır ve uyku evresi başlar. Uyku evresi, karışımın işlenebilirliğinin sağlandığı zaman aralığıdır. Portland çimentosunda yaklaşık 2 saate kadar devam etmektedir [31]. Bu evrede, hidratasyon bileşenleri çok yavaş bir şekilde halen çözünmektedir. İlk dakikalarda oluşan hidratasyon ürünlerinin anhidr bileşenlerin yüzeyini kaplayarak bariyer etkisi yaratması nedeniyle bu bileşenlerin reaksiyona girememesi veya çözeltide Ca/Si dengesi oluşmadığı için $Ca(OH)_2$ oluşumunun gerçekleşmemesinden dolayı C_3S reaksiyonun yavaşlaması gibi bazı teoriler uyku döneminin oluşma nedenleri olarak öne sürülmüştür. Karışımdaki sülfat miktarı arttıkça uyku periyodunun süresi uzamakta ve betonun işlenebilirlik özelliği daha uzun süre korunmaktadır.

2.4.1.3 Hızlanma evresi

Uyku evresini takiben, hidratasyonun yeniden yoğunlaştığı ve esas olarak C_3S 'in tepkimeye girmesiyle oluşan ısı salınımı bu evrede gerçekleşir. Belirgin bir C_2S hidratasyonu da bu aşamada gerçekleşmektedir. Hidratasyon hızı ve toplam hidratasyon ısısı artar. Portlandit (CH) çökmeye başlar ve karışımdaki Ca^+ iyonu konsantrasyonu azalır. Etrenjit oluşumu devam ederken karışımdaki kalsiyum sülfat miktarı da hem etrenjit oluşumu hem de $C-S-H$ 'ın yüzey emilimi nedeniyle azalmaktadır. Hidratasyon ürünleri oluşmaya devam ettikçe çimento taneleri arasındaki temas noktaları sayısı artar, matris giderek yoğunlaşır ve plastisite kaybı sonucu beton priz almaya başlar. Hızlanma periyodunun bitişinden önce priz sonlanır. Prizden hemen sonra, taneler arasındaki temas noktaları sayısı hala az miktardadır ve bu nedenle oluşan katı ağ dış kuvvet altında kolayca kırılabilir, yani malzemenin dayanımı hala düşüktür. Hidratasyon ilerledikçe ve hidrate malzeme miktarı arttıkça dayanım da artar. Hızlanma evresinin sonlarında, ilk C_3A tepkimesinde oluşan tepe oluşumunun ardından, C_3S hidratasyonu ile meydana gelen ikinci bir ısı salınımı zirvesi görülmektedir. Bu tepe oluşumundan önce artık priz sonlanmış, beton tabakası hızla sertleşmeye başlamış ve ısı salınımı da artmaya devam etmiştir. Prizin sonlanmasını takiben betonun kürlenmesine başlanmalıdır.

2.4.1.4 Yavaşlama evresi

Ana hidratasyon tepesinin ardından hidratasyon hızı kademeli olarak yavaşlamaya başlar. Hidratasyon ürünleri oluşmaya devam eder ve betonun boşluk hacmi azalır. Bu

aşamadan itibaren reaksiyon için yeterli alan bulunmadığından dolayı hidratasyon difüzyon kontrollü hale gelir. Hidratasyon hızının azalmasının nedeni reaksiyona girmeyen malzeme ve bağlı olmayan su miktarının azalmasıdır. Bu süreçte, tepkime hızı daha yavaş olan C_2S hidratasyonu aktif durumdadır. Su/çimento oranı yeteri kadar fazla olan karışımlarda, hidratasyon çimento tanelerinin tamamı tepkimeye girene kadar ilerler. Bu uzun süreç dayanım ve dayanıklılık artışı sağlayarak devam eder. Ancak, yıllar sonra bile anhidr çimento tanelerinin bulunma olasılığı vardır. Düşük su/çimento oranlarında hidratasyon için yeterli su miktarı sağlanamadığından reaksiyon durabilir. Ana hidratasyon tepesinin ardından beton soğumaya başlar. Sertleşmeyle birlikte dayanım artışı bu evrede hızlanmaktadır.

Yavaşlama evresinde ana hidratasyon tepesinin hemen ardından ikinci bir tepe oluşumu görülebilir. Isı salınımında artışa neden olan bu olayın nedeni karışımda bulunan kalsiyum sülfatların tükenmesiyle, baskılanan C_3A reaksiyonunun serbest duruma geçmesi ve reaksiyon hızının yeniden artmasıdır. Daha sonra hidratasyonun ilk zamanlarında C-S-H yüzeyi tarafından absorbe edilen kalsiyum sülfatlar çözelti içine geçerek C_3A ile yeniden tepkimeye girer ve etrenjit oluşturur. Devamında, sülfatların tükenmesiyle çözeltinin SO_3/Al_2O_3 oranı giderek azalır ve etrenjit kararsız hale gelir [32]. Buna bağlı olarak dördüncü bir tepe noktası oluşumu, etrenjitin C_3A ile etkileşime girerek monosülfat üretmesi sonucu gerçekleşebilir. Monosülfat oluşumundan sonra beton içerisine dışarıdan bir sülfat girişi olursa bu sülfatlar monosülfat ile birleşerek yeniden etrenjit oluşturabilir. Oluşan etrenjitin hacmi monosülfata göre fazladır. Bu nedenle, beton sertleştikten sonra gerçekleşen bu hacim artışı çatlakların oluşmasına sebebiyet verir.

2.4.2 Hidratasyona etki eden parametreler

Hidratasyonu etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bunlardan en önemlisi karışımda kullanılan çimento tipidir. Çimento seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalardan biri yapısındaki klinker bileşenlerinin bulunma yüzdesidir. C_3A miktarı arttıkça hidratasyonun ilk dakikalarında açığa çıkan ısı artacak, betonun işlenebilirliğinin sağlandığı süre azalacaktır. C_3S miktarının artışı da ilk 24 saatte hidratasyonu hızlandırmaktadır. C_3S 28 gün boyunca hidratasyona yön verir ve dayanım artışı sağlar. C_2S nispeten daha yavaş hidratasyona uğradığı için, C_2S/C_3S oranı arttığında betonda açığa çıkan ısı miktarı ilk 72 saatte azalacak, hidratasyon grafiğindeki ana tepe

daha geniş bir zaman aralığında oluşacak ve tepe noktası değeri daha düşük olacaktır. 28 günde hidratasyona uğrayan C_2S miktarı C_3S miktarına göre oldukça düşüktür. Bununla birlikte, daha ileri yaşlarda C_2S hidratasyonu önem kazanmaktadır. Klinker fazlarının yanında, çimentoda bulunan alçıtaşı miktarı da hidratasyonun özellikle ilk dakikalarını etkilemektedir. Alçıtaşı miktarının artması uyku evresinin süresini uzatarak, betonun priz almasını geciktirir.

Hidratasyon sırasında önce en ince tanelerin reaksiyona girdiği bilinmektedir. Çimento inceliği arttıkça belirli bir zamana kadar hidrate olmuş çimento tanelerinin sayısı artar. Özgül yüzey alanının artması, çimento tanelerinin birim alanının suyla daha çabuk temas etmesini sağlamaktadır. İnceliğin artmasıyla priz başlangıç süresinin kısaldığı, hidratasyon zirvelerinin daha erken sürelerde oluştuğu ve çimento yerine belirli oranda kullanılan filler malzemeden kaynaklanan seyreltici etkinin azaldığı literatürde daha önce belirtilmiştir [33]. İncelik arttıkça daha yoğun bir yapı oluşumu gözlenmekte ve basınç dayanımı artmaktadır.

Su/çimento oranının hidratasyona olan etkisi karışımdaki çimento tanelerinin tamamının hidrate olmasına yetecek miktarda su bulunmasıyla ilişkilidir. Hidratasyonun ilk dakikalarında su/çimento oranının bir etkisi bulunmamaktadır. Çimento tanelerinin hepsini hidrate edecek miktarda su bulunduğu varsayımıyla düşük su/çimento oranlarında ana hidratasyon tepesinin daha yüksek değerlere ulaştığı ve daha kısa sürede tamamlandığı, yüksek s/ç oranlarında ise yavaşlama periyodunda hidratasyon hızının arttığı söylenebilir. Düşük su/çimento oranında karışımdaki alkali yoğunluğu artmaktadır. Alkali konsantrasyonunun yüksek olması hidratasyonu hızlandırmaktadır.

Hidratasyon özelliklerini etkileyen parametrelerden biri de kür sıcaklığıdır. Sıcaklık artışı genel itibarıyla kimyasal reaksiyonların hızını arttırmaktadır. Hidratasyon hızı da sıcaklık artışıyla birlikte artmaktadır. Sıcaklığın $20^{\circ}C$ 'den $35^{\circ}C$ 'ye çıkarılmasıyla ana hidratasyon tepesi değerinin 2 katına çıktığı görülmüştür [34]. C_3S hidratasyonunun sıcaklığın artmasıyla daha erken başladığı, uyku periyodunun kısaldığı; ancak 72 saat sonunda hidratasyonun daha düşük hızda seyrettiği belirtilmiştir [35]. Sıcaklık artışı belli bir dereceye kadar hidratasyonun lehine görünse de, yüksek sıcaklıklarda betonda porozite artışı ve dayanımda azalmaya sebebiyet vermektedir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda hidratasyon ürünlerinin beton matrisi içinde daha düzgün bir şekilde dağılması ve çökmesi sağlanabilirken, daha yüksek

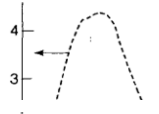
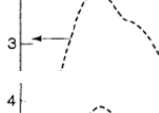
sıcaklıklarda hidrate ürünler anhidr tanelerin yüzeyini hızlı bir şekilde kapatmakta ve ileri hidrasyonu yavaşlatmaktadır [36].

Sülfat miktarı, hidrasyon kinetiğini önemli ölçüde etkilemektedir. Hidrasyon hızı grafiğinde görülen sülfat tükenim zirvesi, çimentoya eklenen sülfat miktarını ve türünü optimize etmede Portland çimentosu üreticisi için faydalı bir göstergedir. Sülfat bakımından dengeli bir çimentoda sülfatın tükenmesi ana hidrasyon zirvesinden birkaç saat sonra meydana gelir. Çimentoda bulunan sülfat miktarı C_3A 'nın yeniden reaksiyona girme zamanını belirlemektedir. Bu miktar, tekrar hızlanan C_3A reaksiyonunun C_3S hidrasyon zirvesinden sonra gerçekleşmesini sağlayacak kadar yeterli olmalıdır. Aksi durumda C_3S hidrasyonu baskılanacak ve erken dayanım gelişimi sekteye uğrayacaktır [37]. C_3A ve C_4AF 'nin sülfat ile reaksiyonunun ürünleri başlangıçta etrenjit ve daha sonra monosülfoalüminattır. Etrenjitin yapısında monosülfata göre daha fazla sayıda su molekülü bulunduğundan hacmi daha büyüktür. Belirli bir orana kadar artan sülfat miktarı, daha fazla etrenjit ve daha az monosülfat oluşumu sağlamaktadır. Buna istinaden daha büyük bir katı ürün hacmi ve düşük porozite elde edilir. Porozite azaldıkça beton içerisinde terleme ile kaybedilecek su miktarı da azalmaktadır. Kısaca, optimum sülfat miktarı çimento dayanımını maksimize ederken, rötreyi minimuma indirmektedir [38].

Çizelge 2.1'de farklı miktarlarda sülfat içeren ve aynı Portland çimentosu tipiyle üretilen çimento hamurlarının ana hidrasyon tepeleri ve sülfat tükenim noktaları karşılaştırılmıştır. Tabloda kimyasal bileşimleri birbirine benzer olan 1 ve 2 numaralı çimentolarda aynı S/Ç oranında (0,44) sülfat miktarı %0,5 artırıldığında yeniden hızlanan C_3A hidrasyonunun her iki çimentoda ana hidrasyon tepesinden sonra gerçekleştiği ve %2,5 sülfat ilavesinde tamamen baskılandığı (omuz şeklinde ikinci bir tepe oluşumu gerçekleşmemiş) görülmektedir. Sülfat miktarının çok az olması durumunda yenilenen C_3A hidrasyonu C_3S hidrasyonundan önce gerçekleşebilir ve C_3S hidrasyonu ile elde edilen dayanım kazanımını olumsuz etkileyebilir. Optimum miktarda sülfat içeren çimentolarda, sülfat tükenim tepesi ana hidrasyon tepesinden sonra oluşur ve bu C_3S hidrasyonunun düzgün bir şekilde gerçekleştiği anlamına gelir. Sülfat miktarının gereğinden fazla olması ise hem uyku evresini uzatarak C_3S hidrasyonunun ve dolayısıyla dayanım kazanımının gecikmesine, hem de gecikmiş etrenjit oluşumu riskine neden olmaktadır. Ayrıca, belirli bir oranın üzerinde klinkere katılan her kalsiyum sülfat miktarı klinker fazlarının miktarında

azalmaya neden olduğundan hidratasyon ürünü olan C-S-H'nin miktarı da azalır. 1 numaralı çimentoda sülfat miktarı aynıyken S/Ç oranının artması maksimum hız değerinin azalmasına ve maksimum hıza ulaşılan sürenin uzamasına neden olmuştur. Bu durum, yüksek S/Ç oranında çimento taneleri arasındaki mesafenin artmasından dolayı ya da çözeltinin alkali yoğunluğunun azalmasından dolayı hidratasyonun yavaşlamasıyla ilişkilendirilebilir.

Çizelge 2.1 : Sülfat miktarının hidratasyona etkisi. [39]

Çimento Kodu	İncelik (m ² /kg)	S/Ç	Sülfat miktarı (%)	Maksimum hız (W/kg)	Maksimum hızın gerçekleşme süresi (saat)	Ana zirve ve sülfat tükenim zirvesi
1	537	0,38	3,30	4,39	10,6	
		0,44	3,30	4,09	11,7	
		0,44	3,30+0,50	4,07	9,4	
		0,44	3,30+2,50	3,91	9,5	
2	529	0,44	3,23	4,82	8,3	
		0,44	3,23+0,5	4,3	7,7	
		0,44	3,23+2,5	4,09	7,7	

2.5 Hazır Beton

Hazır beton, bileşenlerinin şantiyede karıştırılmak yerine merkezi bir tesiste karıştırılmasıyla elde edilen beton anlamına gelir [40]. Hazır beton üretiminde, bilgisayar yardımıyla istenilen oranlarda beton karışımı standartlara uygun olarak elde edilir [41]. Müşterinin talebi doğrultusunda hazırlanan taze haldeki beton karışımı, beton mikseri ya da çimento mikseri olarak adlandırılan kamyonlara yüklenecek imalat noktasına taşınır.

Her ne kadar beton kalitesi uluslararası ve ulusal normlara göre belirlense de, üretimi inşaat sahasındaki uygulayıcının teknik bilgisine ve yeteneğine büyük ölçüde bağlı olduğundan, şantiyede üretilen taze betonun denetimi düzgün yapılmadığı takdirde betonu istenilen kalitede elde etmek zorlaşacaktır. Ayrıca, sahada üretilen beton miktarı sınırlı olduğundan, her üretimin nitelikleri de farklı olabilmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla taze beton, üretimin otomasyon sistemleri ile desteklendiği hazır beton tesislerinde üretilmektedir [42].

Hazır betonun genel olarak 3 temel üretim şekli vardır. Kuru karışım yöntemi, suyun ve kimyasal katkının diğer bileşenlerden ayrı tutularak betonun yerleştirilmesine yakın bir zamanda karışmasını sağlar. Bu yöntem, merkezde tamamen karıştırılan betonun taşınması ve yerleştirilmesi sırasında olası gecikmelerden kaynaklanan kıvam kaybı ve erken priz gibi sorunları önlemek için uygulanır. Bu sayede, transmikserde karıştırma betonun tesisten uzak inşaat alanlarına taşınmasını mümkün kılar. Bununla birlikte bu uygulamanın bazı dezavantajları, mikser kapasitesinin merkezde karıştırılmış beton içeren aynı mikserin kapasitesinden daha az olması, agregaların taşıma sırasında ufalanması ve şantiyede su katma işleminin mikser şoförünün inisiyatifine bırakılması olarak sıralanabilir. Yaş karışım (merkezi karışım), betonun mikserde yüklenmeden önce tesiste tamamen karıştırılmasıyla elde edilen karışımdır. Bu yöntemde, farklı haznelerde depolanıp tartılan bileşenler sistemin çalıştırılmasıyla karıştırma haznesinde toplanır. Ayırmaya sebep olmayacak şekilde ve homojenliğin sağlanması koşuluyla belirli bir süre karıştırılan beton, transmikserlere aktarılır ve pompa ile döküm işlemi gerçekleşinceye kadar karıştırılmaya devam edilir [42]. Tesiste gerçekleştirilen karıştırma işlemiyle betonu daha hızlı üretmek mümkündür. Yarı yaş karışım, tesis karıştırıcısında kısmen karıştırıldıktan sonra karıştırılma işleminin transmikserde tamamlanması yöntemiyle üretilen betondur. Bu yöntemle, hem karışımın hacmi azaltılarak mikserin yük kapasitesi arttırılmış, hem de transmikserle karıştırmanın taze betonun kıvamını daha uzun süre koruması yönündeki avantajından faydalanılmış olur.

Üretimi ve taşınmasından sonra hazır betonun teslim edilmesi, kontrolü, pompalanması ve yerleştirilmesi aşamaları gelir. Betonun uygunluk kontrolü standartlaşmış deneylerle sağlanır. Kalıpların ve donatıların projeye uygunluğu, kalitesi, stabilitesi, temizliği ve çevre koşullarının döküm için elverişliliği sağlandıktan sonra betonun pompalanması işlemi başlar. Pompalanan beton, esnek hortum veya sert

borudan basınçla taşınan ve istenen yere boşaltılan taze beton olarak tanımlanabilir [43]. Betonun kullanım amacı, bileşimi, yapı elemanlarının geometrisi, hava sıcaklığı, ortam nemi, rüzgar vb. diğer faktörlere bağlı olarak betonun bakımı ve korunması standartlar dahilinde uygulanır [44, 45].

2.5.1 Türkiye’de hazır beton sektörü

Türkiye ekonomisinin lideri konumunda olan inşaat endüstrisinin toplam yatırımlar içerisindeki payı oldukça fazladır. Sektördeki büyümeyle birlikte hazır beton kullanımının artması ile betonda kalite ve güvenilirlik konuları önem kazanmıştır. Türkiye'nin büyük bir kısmı deprem bölgesinde yer aldığından, beton kalitesi son derece önemli bir konu haline gelmiştir. 1988 yılında hazır beton endüstrisi içinde bir ticaret organizasyonu kurma girişimleri başlamış ve üreticiler arasında teknik koordinasyonu kolaylaştırmak, rehberlik sağlamak ve kamu güvenliği ve Türk standartları çerçevesinde üretim yapılmasını sağlamak amacıyla Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) kurulmuştur [46].

Hazır beton sektörü dünyada gelişmekte olup, Türkiye’de de son birkaç yıl öncesine kadar sürekli büyüme göstermiştir. Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO)’nin 2019 yılı verilerine göre, Türkiye 2018 yılında 100 milyon m³ ile Avrupa’nın en büyük hazır beton üreticisi konumundadır [47]. Küresel bazda Çin ve ABD’den sonra 3. sıradadır. Bu miktarda hazır beton üretiminin gerçekleşmesi sırasında oluşan atık miktarı da oldukça fazladır. Beton mikserinin iç çeperine yapışan beton, şantiyedeki dökümden kalan fazla beton, operasyonel hatalardan dolayı mikser dışına dökülen beton, üretimin bir süreliğine durmasıyla veya beton bileşiminin değişmesiyle artakalan fazla beton ve kalite kontrol deneyleri için numune olarak alınan beton, hazır beton santrallerinde atık oluşumuna örnek olarak verilebilir.

2016 yılında yapılan araştırmada [48], Türkiye Hazır Beton Birliği’ne bağlı üyelerin toplam yıllık üretiminin %73’ünü oluşturan tesislerin %75,39’unun bir geri dönüşüm sistemine sahip oldukları öğrenilmiştir. Geri dönüşüm sisteminin bu tesislerde yüksek düzeyde (en az 80% kapasite ile) kullanım oranı ise %27,31 olmuştur. Geri dönüşüm sistemi bulunmayıp çökeltme havuzu içeren tesislerin oranı %26,38 iken, çökeltme havuzu dahi bulunmayan tesisler ise %0,40’lık bir paya sahiptir. Araştırmaya katılan 260 tesiste toplam üretimin %4’ü kadar taze beton atığı olduğu sonucuna varılmıştır.

2.5.2 Hazır beton tesislerinde geri dönüşüm

İnşaat endüstrisi dünya genelinde doğal kaynakların yaklaşık %50'sini tüketmekte ve atıkların da %50'sini oluşturmaktadır [49]. Hazır beton tesislerinde oluşan atık hacmini kesin olarak belirlemek sürekli gözlem isteyen, takibi zor bir işlemdir. Sealey ve ekibi 2001 yılında yaptığı araştırmada, İngiltere'de hazır beton santralleri tarafından her yıl üretilen atık miktarının o dönemde 750.000 tona ulaştığını göstermiştir [50]. Dünya genelinde kabaca her yıl 125 milyon ton atık beton oluştuğu söylenebilir [51]. Avrupa'da inşaat sektöründe atık haline gelen beton miktarı, üretilen toplam betonun %1-4'ü aralığında iken, Brezilya'da hazır beton hacminin %9'u kadar taze beton atığı oluşmaktadır [52]. ABD'de ise bu oran %6'dır. Japonya ve Hong Kong'da, üretilen toplam betonun sırasıyla ağırlıkça yaklaşık %1-2'si [53] ve %1.5'i [54] boşa gitmektedir.

Taze betonun geri dönüşümü fikri; atık çamurun, agregaların ve yıkama suyunun beton üretiminde yeniden kullanımını sağlaması ile önemli bir gelişmedir. Türkiye'deki en büyük hazır beton üreticilerinden birine ait aktif faaliyet gösteren 26 tesisten, 2019 yılının son 6 ayı içerisinde geri dönüşüm sistemiyle geri kazanılan agrega miktarının yaklaşık 7.600 ton olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında yapılan hesaplara göre, geri dönüşüm sistemini aktif bir şekilde kullanan bu tesislerde 1 m³ atık betondan yaklaşık 1,7 ton agrega tekrar kullanılmak üzere elde edilmektedir. Sonuçlar, Bölüm 3.1'de bahsedilen araştırmayla paralellik göstermektedir [48]. Günlük ortalama 300 m³ hazır beton üretimi yapan bir tesiste gün sonunda 0,5-1 m³ hacimdeki betonun atık haline geldiği söylenebilir [55]. Türkiye'deki ortalama bir tesiste gün boyunca yaklaşık 10 adet mikserin faaliyet halinde olduğu ve yıkama boyunca mikser başına harcanan temiz su miktarının ortalama 1000 litre olduğu hesaba katılırsa, 1000 litre/ mikser x 10 mikser/ gün = 10.000 litre/gün miktarında bir su tüketimi ve bu suyun bertaraf edilmesi söz konusu olmaktadır. Ayrıca, 1 m³ betondan yaklaşık 30 kg atık çamur oluşmaktadır [56]. Bununla beraber bu sürece dahil olan maliyetler vardır. Atık çamur içerisinde bulunabilen arsenik ve krom gibi maddelerin çevreyi kirletme riski de bulunmaktadır [57]. Bu nedenle, depolama alanına gönderilmesini önlemek için bu atığı en aza indirmek ve hatta ortadan kaldırmak gerekir.

Taze beton atığının geri dönüşümünü sağlamak üzere uygulanan 4 farklı yöntem Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

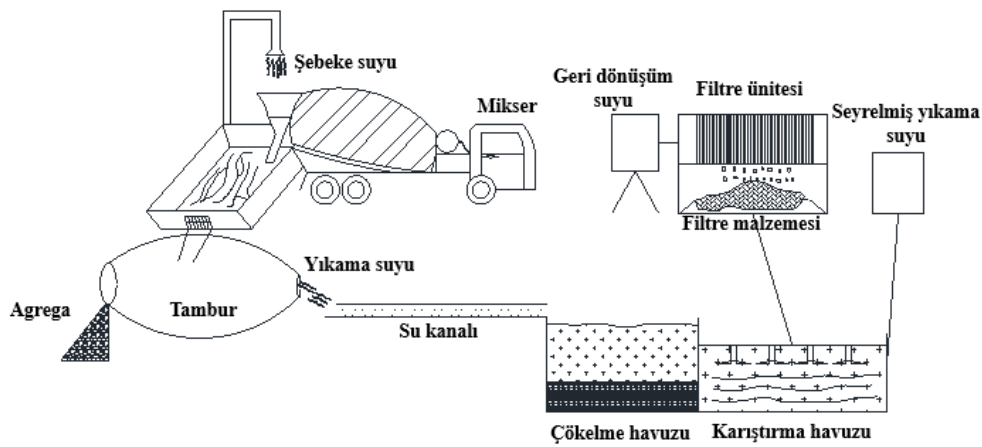
Atık yönetimlerinin uygulanabilirliği hazır beton tesislerinde farklılık gösterebilir. İlk iki yöntem, taze beton atığından yeni ürünler elde etmek amacıyla doğrudan kullanım süreçleri olarak değerlendirilebilir. Ancak bu iki yöntemde; taşıma ve kimyasal katkılarla karıştırma işlemleriyle oluşan ek maliyetler ve zaman kısıtlılığı söz konusudur. Diğer iki geri dönüşüm yöntemi dolaylı kullanım süreçleri olarak kabul edilebilir [58]. Üçüncü yöntem, hem atık su hem de katı atık oluşumunun engellenmesini sağlar [59]. Bu yöntemde, ilave katkı maddelerinin kullanım maliyeti ve tesis içerisinde gerekli ekstra alan dikkate alınmalıdır. Dördüncü yöntem, bu tez çalışmasında kullanılan filtre malzemesinin elde edildiği yöntemdir.

Çizelge 2.2 : Taze beton atığı geri dönüşüm sistemleri [58].

Yöntem	Uygulanan İşlemler
1. Yeni ürünler elde edilmesi	Parke taşı ve duvar gibi prekast beton elemanların üretimi veya grobeton ve dolgu malzemesi gibi kullanımlar için belirli fabrikalara taze beton atıkları verilmesi
2. Yeni üretilen betonda doğrudan kullanım	Taze beton atıklarının priz geciktirici ve hidrasyon düzenleyici kimyasal katkı maddeleri ile yeni beton karışımlarında tekrar kullanılması
3. Taze beton atığının sertleşmesinden sonra geri dönüşüm	Taze beton atıklarının priz hızlandırıcı katkılarla yeniden karıştırılarak veya karıştırılmadan sertleşmiş betona dönüştürülmesi, ardından geri dönüştürülmüş beton agregaları elde etmek üzere parçalanması
4. Yıkama işlemi ile geri kazanım	Agregaları ve gri suyu geri kazanmak için mekanik agrega geri kazanım sistemi ile taze beton atıklarının yıkanması sağlanırken, atık çimento bulamacının çökmesi veya bir filtre presle susuz hale getirilmesi

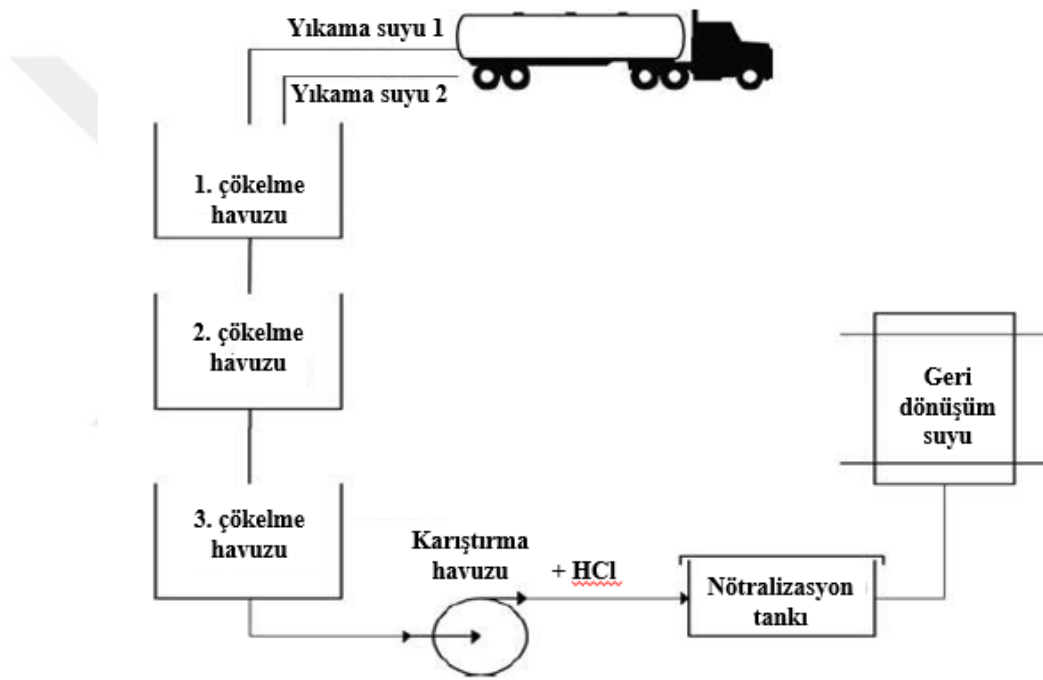
Hazır beton santralinde gerçekleştirilen bir geri dönüşüm işlemindeki adımlar şu şekilde ilerlemektedir. İlk önce, beton mikserinin şebeke suyu ile yıkanması ve içindeki atık betonun suyla birlikte bir tambur içine aktarılması gerçekleştirilir. Tambur içinde akışın zıt yönünde dönen spiral şeklinde yapılar (helezonlar) mevcuttur. Bu sayede agregalar ile ince parçacıklar içeren su iki ayrı faz olarak elde edilir. Tamburun bir tarafından atık betondan ayrılan agregalar çıkar. Eğer tambur elekler

içeren bir ekipman şeklindeyse ince agrega ve iri agrega birbirinden ayrılabilir. Tamburun işleyişi sırasında da su tüketimi gerçekleştiğini belirtmek gerekir. Tamburun diğer tarafından çıkan askıda katı madde içeren yıkama suyu eğimli bir kanal vasıtasıyla çöktürme havuzuna iletilir. Bazı tesislerde yağmur suyu da yıkama suyu ile aynı havuza yönlendirilir [60]. Çöktürme havuzunda askıda katı maddeler yerçekimi etkisiyle dibe doğru çöker ve yıkama suyu kısmi seyrelmiş hale gelir. Makine yağı vb. maddeler de su yüzeyine çıkar. Kısmi seyreltilmiş yıkama suyu, karıştırıcıların bulunduğu ikinci bir havuza yönlendirilir. Karıştırıcıların çalıştırılmasıyla katı maddelerin su içinde askıda kalarak değişen su seviyesi boyunca eşit bir şekilde dağılımı amaçlanır [61]. Karıştırma işleminden sonra yıkama suyu filtre pres ünitesine pompalanır. Burada, basınçlandırma ile içindeki katı maddeden büyük oranda kurtulan ve berrak hale gelen yıkama suyu, beton karma suyu olarak kullanılmak üzere silolarda depolanır. Bu şekilde elde edilen yıkama suyu karışımında doğrudan kullanılabilir. Bir başka yöntem ise karıştırma havuzunda askıda katı madde içeren yıkama suyunun filtre prese gönderilmeden kullanılması şeklindedir. Havuzdan alınan numunenin laboratuvar ortamında TS EN: 1008 standardı gereği fiziksel ve kimyasal analizi yapılmaktadır [62]. Üretimde yeniden kullanılabilirliği kanıtlandıktan sonra yıkama suyunun birim ağırlığı ölçülerek beton karışımına ilave edilecek su miktarı ve eksiltilecek kum kütlesi belirlenir [63]. Karıştırma havuzundan doğrudan alınan yıkama suyu teste tabi tutulmadan beton karma suyu olarak kullanılamamaktadır. Şekil 2.7’de Türkiye’de bir hazır beton tesisinde kullanılan geri dönüşüm sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Türkiye’de bir hazır beton tesisinde geri dönüşüm sistemi

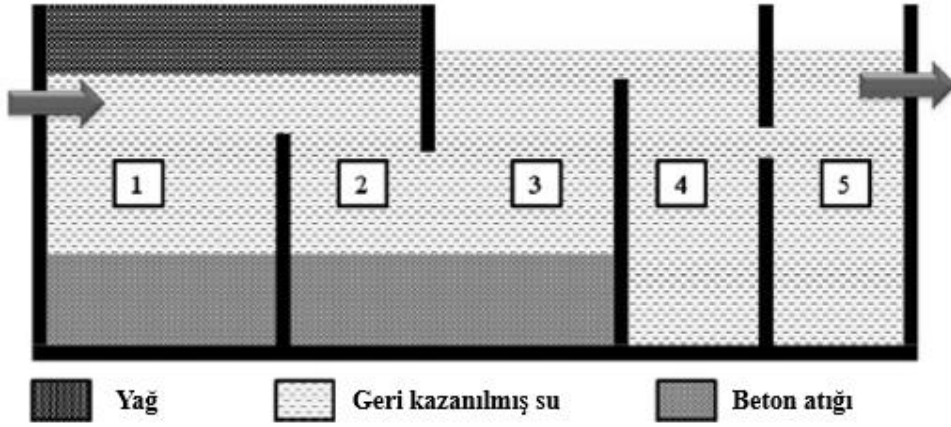
Başka bir hazır beton tesisinde uygulanan yıkama suyunun geri kazanılması yöntemi Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Bu yöntemde filtre pres kullanmak yerine, yıkama suyunun katı tanelerden ayrılması için transmikserlerin iki kez yıkanması ve üç kez çökeltilmesi tercih edilmiştir. Yıkama suyu 1. havuzdan 3. havuza aktarıldıkça seyrelmiş hale gelmektedir. İşlem devam ettikçe 1. havuz içerisinde yalnızca çamur kıvamındaki ince katı taneler birikmeye başlar. 3. havuzda büyük oranda berraklaşan su nötralizasyon tankına pompalanır. Burada, HCl ilavesi yapılarak yıkama suyunun pH değeri yaklaşık olarak 7’ye ayarlanır. Nötralize edilen yıkama suyu depolanır ve beton üretiminde kullanılmak üzere şebeke suyu ile belirli oranlarda karıştırılır.



Şekil 2.8 : Hazır beton tesisinde yıkama suyunun geri kazanımı işlemi [64]

Brezilya’da yapılan bir araştırmada, çalışmaların yapıldığı iki farklı tesisteki çökeltme havuzlarının yapısı Şekil 2.9’daki gibidir. Geri kazanılmış suda dağılan partiküllerin miktarını azaltmak amacıyla Şekil 2.9’daki çökeltme havuzunun tasarımı, akış hızını azaltan bir düzenek şeklinde yapılmıştır. Böylece yıkama suyunun yerçekimi etkisiyle katı atık ve yağlardan ayrılmasına olanak sağlanmıştır. Giriş tankı olan birinci bölme yıkama suyunun boşaltıldığı yapıdır. İkinci bölme, su yüzeyine çıkan yağı tutmak üzere tasarlanmıştır. Üçüncü bölmede su ve katı atık büyük oranda ayrışır. Dördüncü bölme, ilk üç bölmeden sızan herhangi bir malzemeyi tutan, geri kazanılan suyu

depolayan ve sadece yıkama suyunun beşinci bölmeye ulaşmasını sağlayan güvenlik havuzudur.



Şekil 2.9 : Çökeltme havuzu yapısı [53]

2.6 Yıkama Suyu ve Filtre Kalıntı Malzemesi

Hazır beton tesislerinde elde edilen yıkama suyu ve filtre kalıntı malzemesi, geri dönüşüm çerçevesinde beton üretiminde tekrar kullanılabilir. Bu konu üzerine literatürde gerçekleştirilen çalışmalar özellikle son 20 yılda daha detaylı bir şekilde ve farklı bakış açılarıyla ele alınmıştır. Yeniden üretimde kullanılabilmesi için öncelikle bu malzemeleri tanımak, fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak gereklidir.

2.6.1 Yıkama suyu ve filtre kalıntı malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Çizelge 2.3’de yıkama suyu ile ilgili daha önce farklı araştırmalarda yapılan kimyasal analizlerin sonuçları gösterilmektedir. Yıkama suyu özelliklerindeki değişkenlik; beton sınıfı, beton bileşimi, hazır beton santralinde kullanılan makine ve ekipmanlar, çökeltme havuzlarının yapısı, geri dönüşüm işleminde kullanılan yöntem ve numune alma yöntemi gibi birçok parametreyle açıklanabilir. Örnek vermek gerekirse, çökeltme havuzunda numunenin alındığı su derinliğinin artışı ile yıkama suyu içindeki katı madde miktarı da artmaktadır [66]. Geri dönüşüm sisteminde nötralizasyon işlemi varsa yıkama suyunun pH değeri düşmekte; ayrıca, nötralizasyon işlemi HCl gibi bir asitle yapılıyorsa yapısındaki klorür muhtevası da artmaktadır [64].

Çizelge 2.3’de görüldüğü üzere yıkama suyunun en belirgin özellikleri kayda değer miktarda katı partikül içermesi ve pH değerinin yüksek olmasıdır. Toplam katı madde

miktarının fazla olması yıkama suyunda yüksek alkaliniteye sebep olmaktadır [70]. Genel olarak, şebeke suları ve yeraltı sularının pH değeri 6-8 arasında değişirken, yıkama suyunun pH değeri 11'in üzerindedir. Beton yıkama suyunun içinde bulunan fazla miktarda kireçtaşı, sodyum ve potasyum nedeniyle yüksek pH değerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır [66-68]. Şebeke suyu ile karşılaştırıldığında; yıkama suyunun alkalinite, pH, özgül ağırlık ve toplam katı madde miktarı değerleri daha yüksektir [65]. Yıkama suyunun klorür muhtevası genellikle şebeke suyununkine yakındır. Şebeke suyunun dezenfeksiyonu sırasında klorlama yapılması yapısındaki klor iyonu varlığını açıklamaktadır. Özellikle betonarme yapı elemanlarında klorür kaynaklı korozyona sebep olma riski göz önünde bulundurulmalıdır. Klor iyonları, donatıda bölgesel korozyon başlatarak kesit kaybına neden olmaktadır [1].

Çizelge 2.3 : Yıkama suyu kimyasal analizi.

Referans	pH	Klorür muhtevası (ppm)	Sülfat muhtevası (ppm)	Katı miktarı (ppm)	Alkali muhtevası (Na ₂ O+0.658K ₂ O) (ppm)	Alkali muhtevası (CaCO ₃) (ppm)
[50]	11,8	836	5172	-	-	-
[64]	8,1	355	1152	630	639	-
[65]	12,8	19	14	56400	515	1874
[66] ¹	11,2	13	210	1530	-	-
[66] ²	11,9	15	235	3930	-	-
[66] ³	11,8	21	203	7130	-	-
[67]	11,4	125	320	2500	-	835
[68]	12,1	45	27	1991	-	2240
[69] ¹	13,5	29	199	50000	-	-
[69] ²	13,0	23	704	181000	-	-
[69] ³	13,0	20	363	103000	-	-
[69] ⁴	13,5	5	522	200000	-	-
[70]	12,0	25	13	63400	-	-
[71] ¹	12,5	216	840	-	-	-
[71] ²	12,9	230	1139	-	-	-
[72] ¹	12,5	<100	-	<800	-	-
[72] ²	12,5	<100	-	<9000	-	-
[73]	11,1	-	-	6240	-	-
[74] ¹	10-11,3	7,5-46,9	108,6-454,9	-	-	-
[74] ²	11-11,9	6,7-28,7	426-289,5	-	-	-
[74] ³	11,6-12,1	19,9-33,7	69,4-475,8	-	-	-
[75]	12,5	183	1702	-	-	-
[76]	12,6	29	31	115000	160	-
Veri Aralığı	8,1-13,5	5-836	13-5172	630-200000	160-639	835-2240

Literatürde filtre malzemesine ait kimyasal bileşim değerleri Çizelge 2.4’de özetlenmiştir.

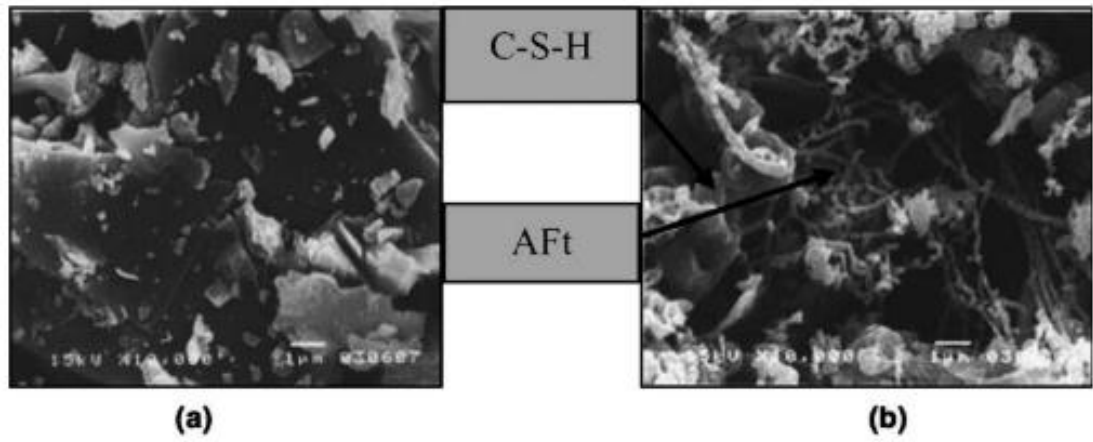
Çizelge 2.4 : Filtre kalıntı malzemesi kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim(%)								
Referans	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	K₂O	SO₃	LOI(%)
[56]	40,8	44,5	2,2	1,7	0,7	0,1	1,0	9,2
[57] ¹	28,9	60,5	1,5	1,3	-	-	0,6	-
[57] ²	40,9	45,8	2,4	1,9	-	-	1,0	-
[57] ³	33,6	54,0	1,7	1,5	-	-	0,8	-
[57] ⁴	34,5	54,0	2,1	1,5	-	-	0,7	-
[64]	42,3	11,5	3,1	1,5	2,0	0,3	1,3	37,9
[65]	31,3	25,1	7,4	4,0	1,6	0,9	0,0	21,1
[70]	3,2	26,9	6,9	3,2	1,5	1,0	3,9	25,5
[77]	36,0	28,0	9,4	7,0	1,6	1,5	3,7	10,7
[78]	32,1	36,5	2,5	1,3	1,1	0,2	0,1	25,2
[79]	36,9	32,8	8,2	6,7	1,9	1,6	2,8	8,6
[80]	47,1	25,9	4,2	3,0	3,8	0,9	2,7	10,9
[81] ¹	35,5	32,5	8,3	6,8	1,2	1,6	3,1	10,0
[81] ²	35,8	31,2	8,0	6,4	1,1	1,5	2,9	12,2
[81] ³	36,9	32,8	8,2	6,7	1,9	1,6	2,7	8,6
[81] ⁴	35,3	33,6	8,7	6,9	1,7	1,7	3,0	8,6
[81] ⁵	32,4	35,2	9,2	6,8	1,4	1,8	2,8	9,9
[81] ⁶	33,7	34,5	9,1	6,0	1,1	1,9	2,8	10,4
[81] ⁷	37,5	33,2	9,0	6,3	1,4	1,7	2,4	8,0
[81] ⁸	32,8	33,7	9,1	6,7	1,5	1,6	3,7	10,4
[81] ⁹	37,4	32,5	8,5	6,7	1,3	1,6	2,7	9,0
[81] ¹⁰	36,8	32,2	8,3	6,6	1,3	1,5	3,4	9,3
Ortalama	34,6	35,3	6,3	4,6	1,5	1,3	2,2	13,6
Standart Sapma	8,1	10,9	3,0	2,4	0,7	0,6	1,2	8,2

Filtre malzemesinin bileşiminin Portland çimentosu ile uçucu kül arasında değerlere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [65]. Portland çimentosuna göre filtre malzemesindeki artan SiO₂ miktarının, hazır beton üretiminde kullanılan kumun yapısından kaynaklanması muhtemeldir. Filtre malzemesindeki CaO miktarının, yıkama işlemi dolayısıyla Portland çimentosundan daha az olması da mümkündür.

Kızdırma kaybı (LOI), 950 +/- 50°C'de yakma işleminden sonra malzemede görülen kütle kaybıdır. Hidratasyon ürünleri (C-S-H, Ca(OH)₂, etrenjit vb.) yapısındaki su miktarının fazla olması nedeniyle, filtre malzemesinin kızdırma kaybı (LOI) Portland çimentosu ve uçucu kül gibi malzemelerden daha fazladır [65].

Şekil 2.10'da çimento ve filtre malzemesinin mikroskop altı görüntüleri verilmiştir. Anhidr çimento tanelerinin köşeli tanecikler, filtre malzemesinin ise uzun ince yapıda iğnemi etrenjit (AFt) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) formunda görüldüğü tespit edilmiştir [65].



Şekil 2.10 : Mikroskop altı görüntüsü. (a) Portland çimentosu ve (b) çamur tozu [65]

Anastasiou, filtre malzemesinin doğru şekilde ezilmesi ve 75 µm'lik bir elekten geçirilmesi halinde, filler olarak iyi özelliklere sahip ince bir malzeme olduğunu belirtmiştir. Filtre malzemesinin çoğunlukla sertleşmiş ve hidrate olmuş çimento tanesi ve ince agregadan oluştuğu tespit edilmiştir. Bu nedenle CaO ve SiO₂ bileşenlerinin reaktif olması beklenmemektedir. Ayrıca, ASTM C593-95'e göre kireç ile yapılan bir dayanım gelişimi testi, 28 günde dayanımda iyileşmenin çok az (< 0.50 MPa) olduğunu ortaya koymuştur, bu da filtre malzemesinin pozolanik özelliğinin olmadığını göstermiştir [78].

Zervaki ve arkadaşları filtre malzemesinin esas olarak kalsit (CaCO₃) ve portlanditten (Ca(OH)₂) oluştuğunu bulmuştur. Ayrıca 90 µm'lik elek üzerinde kalan tanelerin %0,8 kadar az miktarda olduğu tespit edilmiştir [72].

Sandrolini ve Franzoni, yıkama suyunun buharlaşmasından sonra elde edilen kalıntının tane boyut dağılımını incelemiş ve ortalama tane boyutu 20µm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 100 µm üzerinde kalan tanelerin oranı %10-20 arasındadır [69].

Audo ve ekibi, filtre malzemesinin tane boyut dağılımının kalker tozuna yakın olduğu, özgül yüzey alanının çok daha büyük olduğu ve özgül ağırlığının daha düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. X-ışını kırınımı tekniğiyle malzemenin yapısında anhidr kalsiyum silikatların bulunduğu tespit edilmiştir. Anhidr kalsiyum silikatların varlığı hidrolik aktivite potansiyeli göstermektedir [57].

Xuan ve diğerleri, filtre malzemesinde CaO konsantrasyonun oldukça yüksek olduğunu ve ağırlıkça %32'yi aştığını tespit etmişlerdir. Yüksek miktarda CaO, beton üretiminde esas bağlayıcı madde olan çimentonun varlığına atfedilmiştir. Filtre malzemesinin yapısında çimento, hidrasyon ürünleri ve betondan gelen ince kumun biriktiği gözlenmiştir. SiO₂ miktarının ağırlıkça yaklaşık %32 olduğu ve ağırlıkça %19,57 SiO₂ içeren anhidr çimentoya göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Benzer şekilde, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarları çimentodakinden daha fazladır. Beton bileşimindeki uçucu kül, silis dumanı ve kumun filtre malzemesindeki SiO₂ miktarını arttırdığı görülmüştür. Ek olarak, filtre malzemesinin kızdırma kaybının (LOI) çimentodan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu sonuç, filtre malzemesindeki çimentonun hidrate olduğunu ve 1050°C'den sonra ağırlık kaybının temel olarak hidrasyon ürünlerinin (Ca(OH)₂ ve C-S-H) ve kalsitin ayrışmasından kaynaklandığını göstermiştir. Tesisten alındıktan sonra geçen gün sayısı ile beraber gözlenen filtre kalıntı malzemesinin pH değerindeki artış, çimento hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)₂ ile ilişkilendirilmiştir. 28 günlük depolama süresince tespit edilen pH değerleri, pH değeri 13-14 arasında olan karbonatlaşmamış betondan biraz daha düşük bulunmuştur. Bunun nedeni, çimento hidrasyonundan gelen kısmi Ca(OH)₂'in yıkama suyunda çözünmesi ve geri dönüşüm sırasında ayrıştırılmasıdır [81].

Son olarak Audo ve arkadaşları, filtre malzemesini ekonomik ve çevresel açıdan ele almış ve filtre malzemesindeki flor, klor ve sülfat miktarlarının atıkların çöp sahalarında kabulüne ilişkin yönetmeliğin sınır değerlerine uygun olduğunu belirtmişlerdir. Filtre malzemesinin kesin olarak reaksiyona girmeyen madde sınıfında gösterilemeyeceğine dikkat çekmişlerdir [56].

Yapılan çalışmalardan filtre kalıntı malzemesinin hidrolik veya puzolanik özelliği olmayan ince bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Kolayca ezilebilmesi ve çok ince boyutlara öğütülebilmesi, filler malzeme olarak kullanılabileceği fikrini desteklemektedir. Beton bileşiminde tekrar kullanımında kurutma işleminden kaçınmak için filtre malzemesinin orijinal haliyle (ıslak durumda) kullanılması tercih edilebilir.

2.6.2 Yıkama suyu ve filtre malzemesi literatür taraması

Filtre malzemesinden üretilen agregaların beton karışımında doğal kum ile ikamesinin etkilerinin incelendiği çalışmada, agregada bulunan tanelerin çimentodan daha ince olması karışımların su ihtiyacını arttırmıştır. Araştırmacılar yüksek su/çimento oranlarında (0,40-0,60) ve %30'dan daha az ikame oranlarında 28 günlük hedef dayanımın sağlandığını bildirmişlerdir. Ayrıca, agrega oranı arttıkça karışımların kararlılığı olumsuz etkilenmiştir [52].

Kou ve arkadaşları, filtre malzemesini sertleşmesini takiben kırma ve eleme yoluyla 10 mm ve 20 mm boyutlarında agregaya haline getirdikten sonra karışımdaki iri agregaya ile %0, %15, %30 ve %50 oranlarında ikame etme yoluna gitmişlerdir. 0,35 ve 0,50 olarak iki farklı su/çimento oranı belirlenmiştir. Ayrıca, normal karıştırma ve iki aşamalı karıştırma yöntemlerinin etkisi de araştırılmıştır. Filtre malzemesinin doğal agregaya kıyasla yüksek su emme oranı nedeniyle karışımlara aynı kıvamı elde etmek için daha fazla su ilavesi ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, karışım iki aşamalı karıştırma yöntemi ile hazırlandığında çökme değeri azalmıştır. Bu tip karıştırmanın ilk aşamasında, çimento ilave edilmeden önce karma suyun yarısı filtre malzemesi bulunan miksera ilave edilmiş ve sonuç olarak bir miktar su boşluklu yapıdaki filtre malzemesi tarafından emilmiştir. Bu da daha az serbest suyun karışımda mevcut olduğu anlamına gelmektedir. Tek aşamalı karıştırma, çimento ve filtre malzemesinin su ile birleşmeden önce kuru olarak karıştırılması şeklindedir. Bu yöntemde, filtre malzemesi yüzeyinin çimento parçacıkları tarafından kapanması nedeniyle daha az su emilimi gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, serbest su miktarı artmıştır. Betonun birim hacim ağırlığı filtre malzemesi oranının artışıyla iki s/ç oranında da azalmıştır. Karıştırma şeklinin betonun yoğunluğunda bir etkisi olmamıştır. Sertleşmiş betonda su emme miktarı ikili karıştırma yönteminde daha az olmuştur. İkili karıştırma yönteminde etkin su/çimento oranı azaldığından betonun porozitesi de azalmıştır.

Basınç dayanımı da buna paralel olarak tek aşamalı karıştırma yöntemine kıyasla artmıştır. Basınç dayanımı filtre malzemesi kullanımıyla belirgin bir biçimde azalmıştır. Filtre malzemesiyle üretilen agregaların sebep olduğu porozite artışıyla birlikte karışımların E-modülü değeri de azalmıştır [55].

Bir başka deneysel çalışmada çökeltme havuzundan toplanıp tesiste kurumaya bırakılan atık çamur kalker tozuyla ikame edilerek harç üretimleri gerçekleştirilmiş ve harçların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri incelemiştir. Çamur 4 farklı hazır beton tesisinden temin edilmiş ve ortalama tane boyutu $100\ \mu\text{m}$ 'nin altında ve üstünde olacak şekilde kullanılmıştır. Kimyasal aktivitesini ölçmek amacıyla $100\ \mu\text{m}$ 'den küçük tanelerle üretilen karışımlara iletkenlik testi yapılmıştır. İlk dakikalar boyunca, klinker bileşeni ve alçıtaşının yüksek çözünme oranı nedeniyle iletkenliğin katlanarak yükseldiği gözlenmiştir. Hidratasyonun uyku evresinde iletkenlik artmaya devam ederken C-S-H ve etrenjit çökelmeye başlamıştır. Çözelti yavaş yavaş kritik konsantrasyonlara ulaşılan ve portlandit çökmesinin başladığı noktaya kadar Ca^{2+} ve OH^- iyonlarınca daha zengin hale gelmiştir. Hızlanma periyodunda iletkenlik azalmaya başlamıştır. Atık çamurun tıpkı kireçtaşı gibi hidrolik davranış göstermediği belirtilmiştir. Su ile karıştırıldığında iletkenlik ilk saniyeler boyunca artıp daha sonra sabit kalmaktadır. Ancak, çamur ve kalker tozu bir arada kullanıldıklarında iletkenlik çok daha fazladır. Bununla birlikte, çimento ile karıştırıldığında bu iki malzeme de hidratasyon kinetiğini değiştirmektedir. Kireçtaşı portlandit çökmesini geciktirirken, çamur portlandit çökmesini hızlandırmaktadır. Kalker tozu yerine kuru çamur kullanıldığında, karışım suyunun çamur yüzeyinde absorbe edilmesi veya taneler arasında hapsolması nedeniyle kıvamın azaldığı görülmüş ve akışkanlaştırıcı katkı kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Çamur ıslak haldeyken katkı dozajı da beklendiği gibi azalmıştır. Çamurun, içindeki anhidr çimento miktarındaki farklılıklardan dolayı hidratasyona etkisinin değişken olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, çamur kullanıldığında hidratasyon sırasında açığa çıkan ısıнын daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Kireçtaşı yerine çamur kullanıldığında, 28 günlük basınç dayanımı, $-\%30$ ve $+\%17$ aralığındadır. Tane boyutu ve ikame oranının basınç dayanımını etkilediği bildirilmiştir. Çamur $100\ \mu\text{m}$ 'nin altındaki boyutlarda kullanıldığında basınç dayanımında artış gözlenmiştir [57].

Doğan ve Özkul, geri dönüşüm suyu içeren farklı yoğunluklara sahip karışım suyu kullanarak beton üretimleri gerçekleştirmiştir. Geri dönüşüm suyu içindeki katıların

bağlayıcı olarak kabul edilemeyeceği, bu şekilde basınç dayanımını olumsuz etkilediği görülmüştür. Geri dönüşüm suyu içindeki katı hacmi kadar doğal kumdan azaltma yapıldığında ise basınç dayanımı düşmemiştir. Ayrıca, kum yerine karışıma giren ince malzeme oranı arttığından, kılcal su emme katsayıları referans karışıma oranla daha düşük seviyededir [61].

Araştırmacılar yüksek pH değeri ve fazla miktarda katı içeren yıkama sularını HCl ile nötralize edilmiş geri dönüşüm suyu ile karşılaştırmak üzere deneysel çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, yüksek pH değerinin beton basınç dayanımını artırıcı etkisi olduğu yönündedir. Aynı zamanda yıkama suyu, içindeki katı miktarına rağmen betonun işlenebilirliğinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Priz süreleri standartlarla belirlenen sınır değerleri aşmamıştır [64].

Chatveera ve Lertwattanaruk, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı ile üretilen betonda yıkama suyu kullanılmasının uygulanabilirliği üzerine çalışmıştır. Çimento harçları % 0.5, %2.5, ..., %15 oranlarında katı içeren yıkama suyu ve şebeke suyu karışımı ile üretilmiş, böylelikle katı miktarı için en uygun oranın tespiti hedeflenmiştir. Katı miktarının %5-6 üzerinde olduğu durumlarda basınç dayanımında ve priz süresinde standart limitlerini aşan şekilde azalma eğilimi gözlenmiştir. Betonun yıkama suyu ile üretilmesi, aynı kıvamı elde etmek için ilave su gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Yıkama suyu içerdiği ince tanelerin etkin su miktarını azaltması nedeniyle betonun akışkanlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmıştır. Mineral katkı veya kimyasal katkı maddeleri olmadan yıkama suyu kullanmak su ilavesi gerektirdiğinden daha uzun priz sürelerine yol açmıştır. Yıkama suyu kullanımı, mineral veya kimyasal katkı maddesi içermeyen betonlar için basınç dayanımında yaklaşık %4-8, uçucu kül kullanılan betonlar için %10-17 ve süperakışkanlaştırıcı içeren betonlar için %8-13 oranında azalmaya sebep olmuştur. Bununla birlikte, yıkama suyu uçucu kül veya süperakışkanlaştırıcı ile birlikte kullanıldığında elde edilen beton basınç dayanımları Portland çimentosu ve şebeke suyu ile üretilen betonlardan daha yüksek değerlerdedir. Betonda mineral veya kimyasal katkı maddesi olmadan yıkama suyu kullanılması asit direncini olumsuz etkilemiştir. Aksine, uçucu kül veya süperakışkanlaştırıcı ile yıkama suyu birlikte kullanıldığında dayanıklılıkta referans betona göre iyileşme tespit edilmiştir [65].

Başka bir çalışmada farklı karma suyu türlerinin, harç ve betonun basınç dayanımı, priz süreleri ve işlenebilirlik gibi özellikleri üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Şebeke

suyu, yeraltı suyu ve yıkama suyu karışımlarda kullanılmıştır. Ayrıca, yıkama suyu hazır beton tesisindeki çökeltme havuzunun farklı derinliklerinden elde edilip beton üretimine katılmıştır. Çökeltme havuzunun üst ve orta kısmından alınan suların beton kıvamını büyük ölçüde etkilemediği, alt kısımdan alınan suyun içerisindeki artan katı miktariyle birlikte kıvamı düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yeraltı suyu veya üst yıkama suyu ile karıştırılan harçların priz başlangıç süreleri referans harcın priz başlangıç süresine yakinken, alt yıkama suyu ile karıştırılan karışımda bu süre azalmıştır. Alt yıkama suyunun üst yıkama suyundan daha fazla katı madde ve alkali (Ca(OH)_2 , NaOH) içermesi priz süresini kısaltmıştır. Yıkama suyu ile hazırlanan harçların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları %90 sınırını karşılamıştır. Yıkama suyu ile üretilen betonların 7 günlük basınç dayanımları görece daha yüksek değerlerde ölçülmüştür. Bu sonucun çözülmüş kalsiyum ve sodyum hidroksitler içeren yıkama suyunun alkalinitesinden ($\text{pH}=11-12$) kaynaklandığı düşünülmüştür. Yıkama suyunun alkalinitesi, sadece çimento hidratasyonunu hızlandırmakla kalmayıp, aynı zamanda mineral katkıların pozolanik reaksiyonunu da aktive etmektedir [66].

Asadollahfardi ve arkadaşları, genel sonuçların aksine yıkama suyunun priz geciktirici etkisi olduğunu iddia etmişlerdir. Yıkama suyunun %50 oranda şebeke suyuyla ikame edilmesi 3, 7 ve 28. günlerde en yüksek basınç dayanımı değerlerini vermiştir. Beton numunelerinin farklı yaşlarda, farklı çimento dozajında, farklı mineral ve akışkanlaştırıcı katkı oranlarında test edilmesi sonucunda, beton yıkama suyunun basınç dayanımını ve kıvamı önemli ölçüde etkilemediği gösterilmiştir. Bütün karışımların kıvam sınıfının aynı olduğu tespit edilmiştir [67].

S/Ç oranı 0,50 olarak belirlenen karışımlarda yıkama suyu ikame oranı arttıkça betonun slump değerinde önemsenmeyecek miktarda düşüş gözlenmiştir. Yıkama suyu fazla miktarda ince malzeme içerdiğinden etkin S/Ç oranını azaltmaktadır. %100 yıkama suyu oranında, priz başlangıç ve bitiş süreleri sırasıyla 20 ve 35 dk. kısalmıştır. Ayrıca, yıkama suyu oranının artışıyla taze betonun birim ağırlığının da arttığı ortaya çıkmıştır. %30, %50 ve %100 oranlarında yıkama suyu kullanılarak üretilen harçların 28 günlük basınç dayanımları referans harcın üzerinde olup, 8%'e kadar artmıştır. Beton basınç dayanımlarının da referansa yakın veya daha yüksek olduğu görülmüştür. Son olarak araştırmacılar yıkama suyunun betonun geçirimsizliği üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını ortaya koymuşlardır [68].

Yıkama suyunun beton ve harçlarda karma suyu olarak kullanımı fiziksel, mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkiler bakımından araştırılmış ve yıkama suyunun önemli ölçüde kıvam kaybına yol açtığı, bunun da yıkama suyu içindeki katı maddelerin etkin su/çimento oranını azaltmasıyla ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Yıkama suyu ile üretilen betonların 7 günlük basınç dayanımları ortalaması referans betona oranla daha yüksek, 28 günlük basınç dayanımları ortalaması referansın %96,8 seviyesinde olup EN 1008 koşulu olan %90 sınırın üzerinde bulunmuştur. Harç karışımlarında 7 günlük dayanım değerleri referanstan düşük, 28 günlük dayanımlar ise daha yüksektir. Yıkama suyunun, eğilme dayanımı üzerinde ise olumlu bir etkisi gözlenmemiştir. Yine de elde edilen değerler referans harç dayanımının %90'ından fazladır. Yıkama suyu içindeki katı madde miktarı ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. Yıkama suyu kullanımında kılcal su emiliminde bariz bir şekilde azalma görülmüştür. Bu bulgu yıkama suyundaki ince parçacıkların sertleşmiş betonda filler etkisi göstermesi ve gerçek su/çimento oranını azaltmasıyla ilişkilendirilmiştir [69].

Yapılan araştırmada yıkama suyunun şebeke suyu ile ikame oranının arttırılmasının beton kıvamını azaltma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yıkama suyunun anhidr çimento ve boşluklu yapıda ince parçacıklar içermesidir. Yıkama suyunun içindeki katı yoğunluğundan dolayı özgül ağırlığının fazla olması, musluk suyu ile ikame edildiğinde beton birim ağırlığının artmasına neden olmuştur. Yıkama suyu kullanımının taze betonun sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmediği sonucuna ulaşılmıştır. Yıkama suyu yüzdesini arttırmanın betonun basınç dayanımını azaltma eğiliminde olduğu bulunmuştur. Basınç dayanımındaki azalma, hidrasyon işlemi sırasında yıkama suyunda bulunan etrenjitin monosülfoalüminatlar gibi kararsız bileşiklere dönüşmesi sonucu betonun yoğunluğunu azaltan ilave kılcal boşluklar oluşturmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca matristeki yüksek alkalinite ile birlikte çimento hamuru ve agrega arayüzeyindeki çift katlı tabaka kalınlığının arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, agrega ve çimento hamuru arasında daha zayıf bir bağ oluşumu ve betonun daha düşük basınç dayanımına sahip olmasından bahsedilmiştir. İkame oranının arttırılması, kuruma rötresini arttırma eğilimindedir. Yapılan deneyler yıkama suyunun betonun asit direncini olumsuz etkilediğini göstermiştir. Yıkama suyundaki katı maddelerle karışıma giren ilave portlandit ile sülfürik asit arasındaki reaksiyon çözünür yapıda kalsiyum sülfat veya alçıtaşı yapısı oluşturmakta ve sahip

olduğu zayıf bağlar nedeniyle bu tabaka sızıntıya ve bozulmaya karşı dayanıksız hale gelmektedir. Portlandit ile hidroklorik asit arasındaki reaksiyonda, çözünür bir ürün olan kalsiyum klorür oluşmaktadır. Yıkama suyu miktarının artması ile ilave kalsiyum hidroksit daha fazla ağırlık kaybına neden olmaktadır [70].

Geri dönüşüm suyunun %25, %50, %75 ve %100 oranlarında şebeke suyu ile ikame edildiği deneysel çalışmada ikame oranı arttıkça kıvam kaybının arttığı gözlenmiştir. Yıkama suyu kullanımıyla beraber priz başlangıç ve bitiş sürelerinin kısaldığı belirtilmiştir. Bunun nedeninin yıkama suyundaki ince tanelerle beraber klor iyonlarının priz başlangıcını hızlandırması olduğu düşünülmüştür. 28 günlük basınç dayanımları referans betonun basınç dayanımından düşük veya yüksek iken, tüm ikame oranlarında 90 günlük basınç dayanımları referans betonunkinden yüksektir. Sonuçlar yıkama suyunun erken hidrasyonu hızlandırmasına rağmen, 90. günde de etkisini gösterdiği yönündedir [71].

Transmikser yıkama suyunu filtreleme ve farklı tür asitlerle nötrale ederek arıtma işleminin karma suyu olarak kullanımındaki etkilerinin araştırıldığı makalede 4 farklı pH değeri ve farklı miktarlarda katı madde ve klorür içeriği olan 16 adet yıkama suyu ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ağırlıkça yaklaşık %70 oranda su ihtiva eden filtre malzemesi herhangi bir işlem yapılmadan karışım suyuna ilave edilmiş ve harç karışımındaki kumun bir kısmı ve çimentonun çok daha küçük bir kısmıyla ikame edilmiştir. Bu şekilde 4 farklı su numunesi elde edilmiştir. Son olarak harç karışımında çimento yerine az miktarda topaklanmış haldeki kuru filtre malzemesi kullanılarak filtre malzemesinin kalker tozu gibi filler özelliklere sahip olma ihtimali araştırılmıştır. Yıkama suyu harç kıvamını olumsuz etkilemiştir. Bununla birlikte basınç dayanımında artış görülmüştür. Kuru filtre malzemesinin filler olarak %10 oranında kullanılması harçların basınç mukavemetinde hafif bir iyileşmeye neden olarak kalker tozu ile benzer bir davranış göstermiştir. 16 adet yıkama suyu ile üretilen harçlarda basınç dayanımında iyileşme görülmüş ve taze harçların yayılma çapı değerlerindeki sapma yalnızca %4 kadar olmuştur. Bir başka önemli sonuç, yıkama suyunun pH değerini düşürmek için seçilen asitleştirme yönteminin, harcın davranışında çok önemli bir rol oynamasıdır. HCl ile nötrale edilen su numunelerinin çok daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Klorür iyonlarının, çimentonun dayanım kazanımını hızlandırdığı belirtilmiştir. Islak filtre malzemesinin su içinde dağıldığında, ince partiküllerin miktarını arttırdığı ve çoğunlukla ince agregaların yerini alarak basınç dayanımında

artıya yol açan kristal dizilimini geliştirdiği belirtilmiştir. Kuru filtre malzemesi kullanımında dolaylı olarak oluşan %2 çimento ikamesinde basınç dayanımında iyileşme görülmesi malzemenin filler etkisi yaratabileceği düşüncesini güçlendirmiştir. Yıkama suyunun yüksek pH değerinin beton özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır [72].

De Matos ve arkadaşları, beton mikserinin yıkanmasından elde edilen geri dönüşüm suyunu şebeke suyu ile kısmen veya tamamen ikame ederek çimento hamuru ve beton özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Geri dönüşüm suyu miktarının artırılması karışımların viskozitesinde artıya yol açmıştır. Geri dönüşüm suyunda ince katı parçacıkların bulunması, su emilimine sebep olarak karışımdaki serbest su miktarını azaltmaktadır. Ayrıca, ince partiküller çimento taneleri arası mesafeyi azaltarak daha fazla temas neden olmaktadır. Her iki etki de harç viskozitesini ve kayma gerilmesini arttırmaktadır. Yıkama suyunun alkali pH'ı çimento hidratasyonunu ilk dakikalarda hızlandırmaktadır. C-S-H elektriksel olarak negatif yüklü iken, etrenjit pozitif yüklüdür. Bu fazların bir arada bulunması, harç akışkanlığında azalmaya yol açan çekim ve topaklaşma eğilimi ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca, iğne şeklinde etrenjit kristalleri, harcın akışkanlığını engelleyecek şekilde taneler arasında kenetlenme sağlayabilmektedir. Etrenjit ($C_6AS_3H_{32}$) oluşması için 32 mol su gereklidir. Bu nedenle bu fazın taze haldeyken fazla miktarda oluşumu mevcut su miktarını azalttığı için kıvam kaybına sebep olabilmektedir. Kalorimetre deneyi sonuçları, şebeke suyunun geri dönüşüm suyu ile tamamen ikame edilmesinin, deneysel çalışmada kullanılan Portland uçucu kül çimentosunun hidratasyonunu önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. İkame oranının azalmasıyla bu artırma etkisi de azalmaktadır. Geri dönüşüm suyunun alkali pH'ı Portland çimento bileşenlerinin reaktivitesini etkilemiştir. pH değerinin artması, portlandit oluşumunu hızlandırmakta ve boşluk çözeltisindeki Ca^{+2} konsantrasyonunu azaltmaktadır. Çözeltinin Ca^{+2} doygunluğunun azalması anhidr çimento bileşenlerinin hidratasyonunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca C_3A 'nın reaktivitesinin, boşluk çözeltisinin artan pH'ı ile önemli ölçüde arttığı da tespit edilmiştir. Geri dönüşüm suyu içindeki ince katı parçacıklar, çimento hidratasyonu sonucu hidrate ürünlerin çökmesi ve büyümesi için çekirdeklenme noktaları olarak işlev görmektedir. Dolayısıyla hidratasyon hızı ve ısı salınımı artmaktadır. Araştırma, karışıma yıkama suyu dahil edilmesinin Portland çimentosunun hidratasyonunu erken yaşlarda hızlandırdığını ve dolayısıyla erken

dayanımı arttırdığını, uyku periyodunun süresini kısalttığını ve toplam ısı salınımını arttırdığını göstermiştir [73].

Shahidan ve arkadaşları, beton karışımlarında transmikser yıkama suyu ve oto yıkama suyu kullanımını karşılaştırmışlardır. Yıkama suyu ikame oranı arttıkça akışkanlığın arttığı görülmüştür. İki yıkama suyu türü de beton basınç dayanımı için verilen sınır değeri sağlamıştır. Yıkama suları C35 dayanım sınıfı için verilen elastisite modülü sınırını aşmamıştır. Ayrıca bu çalışma, %20 oranında transmikser yıkama suyu ile karıştırılan betonun en yüksek basınç dayanımına ve elastisite modülü değerine ulaştığını göstermiştir [74].

Yıkama suyunun ince katı taneler içermesinden dolayı etkin su/çimento oranını azalttığı, yapısında bulunan klor iyonları nedeniyle priz başlangıcını hızlandırdığı ve kıvamı düşürdüğü belirtilmiştir. Araştırmacılar, bazı yıkama suyu oranlarında beton termal iletkenlik katsayısının azalmasını (termal özelliklerinin iyileşmesini) artan klor miktarı ile açıklamışlardır. Klor iyonları varlığında taze beton karışımında hava sürüklenmesi termal özelliklerde iyileşmeye neden olmuştur. Yıkama suyu varlığında dayanım kazanma hızının ilk 3 günde hızlı olduğu görülmüştür [75].

Özkul ve Doğan, yıkama suyunu şebeke suyu ile karıştırarak farklı yoğunluklara sahip beton karma suyu örnekleri elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada, yıkama suyunun içindeki katının kapladığı hacim kadar su ilave edilip, aynı hacimde kum veya çimento azaltma yoluna gidilerek karışımlar üretilmiş ve optimum karma suyu yoğunluğu tespiti amaçlanmıştır. 3 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, çimento veya kum ikamesi yapılan karışımlarda basınç dayanımının karma suyu yoğunluğu 1.10 kg/l ve daha az ise arttığı, bu değerden fazla olduğunda düşme trendine girdiği görülmüştür. Su içerisindeki katı madde miktarından kaynaklanan kıvam kaybı nedeniyle oluşan yerleştirme probleminin basınç dayanımında olumsuz etki yarattığı belirtilmiştir. Erken yaş basınç dayanımındaki artış, yıkama suyunun içinde bulunan yarı hidrate çimento tanelerinin hidratasyonu hızlandırmasına atfedilmiştir. Öyle ki, çimento ile ikame yapılan karışımlarda gerçek s/ç oranı artmasına rağmen erken yaşta dayanım artmıştır. S/Ç oranındaki artışın olumsuz etkisi 7 ve 28 günlük dayanımlarda görülmüştür. Çimento ikamesi yapılan karışımlara akışkanlaştırıcı ilave edilip yerleşme probleminin ortadan kaldırılmasına rağmen dayanım kaybı engellenememiştir. Kum ile ikame yapılan karışımların basınç dayanımı referans betonun basınç dayanımına oldukça yakındır. Yıkama suyunda bulunan katı maddenin

kum ile ikame edildiği, 1,10 kg/l altında yoğunluklara sahip karma suyu kullanılan karışımlarda kılcal su emme katsayısının azaldığı görülmüştür. Bu sonuç, yıkama suyu içindeki katı tanelerin filler etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Çimento ikamesinde ise çimento dozajının azalması nedeniyle S/Ç oranı arttığından filler etkisi pasif durumdadır [76].

Bir başka çalışmada araştırmacılar filtre malzemesini ıslak durumda kullanmanın beton üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Islak haldeki filtre malzemesinin %50 oranda su içerdiği tespit edilmiştir. %100 filtre malzemesi, %70 filtre malzemesi + %30 Portland çimentosu ve %70 filtre malzemesi + %30 öğütülmüş yüksek fırın cürufu şeklinde hazırlanan karışımların izotermal kalorimetre yöntemi ile hidrasyon özellikleri incelenmiştir. Portland çimentosunda görülen ve C_3S hidrasyonunu temsil eden tepe oluşumu 100% filtre malzemesi içeren karışımda görülmemiştir. Bu sonuç, filtre malzemesindeki çimento hidrasyonunun çoktan gerçekleşmiş olduğuna işaret etmektedir. Filtre malzemesi ve çimento içeren karışımda tepe oluşumu gözlenirken, %30 oranda yüksek fırın cürufu içeren karışım %100 filtre malzemesinden oluşan karışıma yakın bir eğri oluşturmuştur. Açığa çıkan toplam ısı grafiğine bakıldığında ise, filtre malzemesinin içinde bir hidrasyon tepkimesinin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Filtre malzemesinin yüksek fırın cürufu ile birlikte kullanılması, toplam ısıda puzolanik reaksiyondan kaynaklanan artışa yol açmıştır. Yüksek fırın cürufu filtre malzemesindeki $Ca(OH)_2$ (CH) ile tepkimeye girmiştir. Çimentolu karışım beklendiği üzere en fazla ısıyı açığa çıkarmıştır. Filtre malzemesinin 28 günlük basınç dayanımı 3.5 MPa ve 7 günlük basınç dayanımı yaklaşık 2 MPa olarak ölçülmüştür. Kalorimetre sonuçlarında doğrulandığı gibi, filtre malzemesinin dayanım kazanması çimentoya göre çok daha yavaş ilerlemektedir. Bağlayıcı olarak filtre malzemesiyle birlikte çimento, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve kireç kullanılarak üretilen harç karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar, puzolanların çimentoya oranla daha yüksek değerler verdiğini göstermiştir. Ayrıca, filtre malzemesi ve kireç karışımının en düşük dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir [77]. Filtre malzemesinin yapısında fazlaca bulunan CH'nin puzolanik reaksiyonu, filtre malzemesine göre daha düşük oranda karışıma (%70 filtre malzemesi + %30 çimento) dahil edilen çimento hidrasyonuna baskın gelmiş olabilir. Kalkerin dahil edildiği karışımda en düşük basınç dayanımı değerinin elde edilmesi, kalkerin hidrasyon reaksiyonu vermeyen bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Mikserlerin yıkanmasından elde edilen çimento çamuru ile üretimler gerçekleştirilmiş ve çamurun herhangi bir hidrolik bağlayıcı veya puzolanik özellik göstermediği tespit edilmiştir. Dayanımda görülen iyileşme çamurun filler etkisine ve pH değerini düşürmesine bağlanmıştır. Çamurda görülen yüksek orandaki kızdırma kaybının ise yapısındaki bağlı su miktarı ve CO₂ emiliminden kaynaklandığı düşünülmüştür [78].

Bir hazır beton tesisindeki çökeltme havuzunun dip kısmında biriken çimento çamuru kurutulduktan sonra bölme duvar üretiminde kullanılmış ve çevresel açıdan etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, taze çamur ve geri dönüştürülmüş beton agregaları ile hazırlanan bölme duvar bloklarının %59 oranında daha az enerji tükettiğini, %66 oranında daha düşük sera gazı yaydığını göstermiştir. [79].

Çökeltme havuzundan temin edilen ıslak çamur etüv içerisinde 100°C’de kurutulduktan sonra çimento ile %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek harç karışımları hazırlanmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri tüm ikame oranlarında referansa göre daha düşük bulunmuştur ve ikame oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki düşüşü, kuru çamurun içerisinde fazla boşluklu yapıdaki CaCO₃ varlığı ile açıklamışlardır. Aynı zamanda, ikame oranı arttıkça kuru çamurun çimento azaltıcı etkisi de artmıştır. Kuru çamurun hidratasyon ısısını düşürdüğü ve hidratasyonu geciktirdiği tespit edilmiştir. Kuru çamurun yapısında kalsit, etrenjit, portlandit, alit, larnit ve kalsiyum silikat hidrat tespit edilmiştir. Nispeten yüksek miktarda sülfat içeren kuru çamurun C₃A ile reaksiyona girdiği ve ilave miktarda etrenjit ve monosülfat oluşturduğu gözlemlenmiştir. Çimento az miktarda çamur ile ikame edildiğinde hidratasyon sonucu oluşan Ca(OH)₂ miktarı referans karışımına göre kuru çamurda bulunan CaCO₃’ün hidratasyonu hızlandırıcı etkisi ile artmıştır. İkame oranı %30’a çıkarıldığında, azalan toplam çimento miktarı nedeniyle Ca(OH)₂ miktarı azalmıştır. Kuru çamurdaki CaCO₃ ve sülfat iyonlarının, AFm ve AFt hidratasyon fazları ile etkileşime girdiği ve karbonalüminatların oluşumuna ve etrenjit miktarının artmasına neden olduğu düşünülmüştür [80].

Filtre malzemesinde karbonatlaşma etkisi üzerine yapılan bir araştırmada, filtre malzemesinin pH değerinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, filtre malzemesinin pH değerinin başlangıçta 9.4 civarında olduğunu, 1 gün sonra 12.0 seviyesine çıktığını, 28 gün bekletildikten sonra 12.5 ila 13.0 arasında değiştiğini ve hızlandırılmış karbonatlaşmadan sonra pH değerinde ciddi bir düşüş tespit edildiğini göstermiştir. Filtre malzemesinin pH değerindeki artış, yapısındaki çimentonun

portlandit oluşumu sağlayan hidratasyonuna atfedilmiştir. 28 günlük bekletilme süresinin sonunda tespit edilen pH değerleri, pH değeri 13-14 arasında olan standart betondan [81] daha azdır. Bunun nedeninin, çimento hidratasyonundan gelen Ca(OH)_2 'nin yıkama suyunda çözünerek seyrelmesi olduğu düşünülmüştür. Filtre malzemesinin teorik olarak hesaplanan CO_2 tutma oranı %27.05 ile %31.23 arasında bulunmuştur. Taze haldeki filtre malzemesinin su/katı oranı 0.76 ile 1.12 arasında değişmiştir. Su/katı oranının artması basınç dayanımını önemli derecede düşürmüştür. Hızlandırılmış karbonatlaşmaya tabi tutulduktan sonra, hazırlanan beton karışımlarında hızlı erken dayanım gelişimi ve daha düşük kuruma rötresi değerleri görülmüştür [82].

Wasserman, askıda katı madde miktarı 50.000 ppm sınırından daha az olan yıkama suyu ile beton numuneleri üretmiş ve basınç dayanımlarının referans betona oranla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Çökme değeri ve basınç dayanımı arasında tutarlı bir ilişki kurulamamıştır [83].

Kou ve ekibi önceki çalışmalarında [55] betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini göz önünde bulundurarak, filtre malzemesinin taşıyıcı olmayan elemanlarda kullanımının daha elverişli olacağından hareketle bölme duvar üretiminde kullanımını incelemişlerdir. Filtre malzemesini 5 mm'den daha küçük boyutlara öğütüp ince agrega ile %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame etmişlerdir. Beklendiği gibi filtre malzemesi oranındaki artışla üretilen blokların yoğunluğu azalmış ve su emme miktarı artmıştır. Bu sonuç, filtre malzemesinin doğal kuma göre özgül ağırlığının düşük olmasına atfedilmiştir. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, 100% ikame oranında bile referans karışıma oranla daha yüksek ölçülmüştür. Filtre malzemesinin yapısında henüz hidratasyona uğramamış çimento taneleri bulunması dayanımdaki artışı açıklamaktadır. 28 günlük eğilme dayanımları da filtre malzemesi oranı artışıyla artmıştır. Filtre malzemesi, çimento hamuru ile ince agrega arasındaki arayüzey bölgesini güçlendirmektedir. Güçlendirici etki iki şekilde açıklanmıştır. İlk olarak, doğal kum ile karşılaştırıldığında filtre malzemesinin su emme miktarı daha fazladır, bu da suyun terlemesini önemli ölçüde azaltmıştır ve arayüzey daha kompakt hale gelmiştir. İkincisi, filtre malzemesinin yüzeyi daha pürüzlüdür, bu da çimento-agrega aderansını arttırmıştır. Filtre malzemesi agregalarının yüksek su emme değerleri ve karışımdaki toplam çimento miktarını arttırmasından dolayı, ya da daha az agrega içermesinden dolayı blokların nihai kuruma rötresi artan filtre malzemesi

oranı ile artmıştır. Filtre malzemesi ile üretilen blokların yangına karşı dayanıklılığı azalmıştır. Numuneler 800°C'ye kadar ısıtıldığında, referans karışımdaki kütle kaybı en az olmuştur. Daha fazla filtre malzemesi kullanıldığında, hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratlardan daha fazla bağlı suyun açığa çıkması ve kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum hidroksitin ayrışması muhtemeldir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra blokların basınç dayanımları tekrar test edilmiştir. 500°C'ye kadar, basınç dayanımları hidratasyonun hızlanması nedeniyle artış göstermiştir. Ancak, filtre malzemesi içeren bloklarda sıcaklıkla meydana gelen hidrate ürünlerin kaybı daha fazla olduğu için referans karışıma göre basınç dayanımı değerleri daha düşük olmuştur. Eğilme dayanımının sıcaklık artışıyla azalması, basınç dayanımına göre çok daha dramatik şekilde olmuştur [84].

Férriz-Papia filtre malzemesini ilave, çimentoyla ikame ve kumla ikame ederek kullanmanın yanında ilave oranı ve S/Ç oranını birlikte arttırma yöntemiyle karışımlara dahil etmiştir. Ayrıca, yıkama suyu ve geri kazanılan agregalarla da üretim yapmıştır. Transmikserleri yıkama işlemiyle geri kazanılan agregaların orijinal durumlarından temel farkı, ince tanelerin (tozların) suyla ayrışması olmuştur. Çimento tanelerinin yapışması nedeniyle, agrega yüzeylerinin gri renkte olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, agregalardaki kil miktarının da yıkama işlemi sonucu azaldığı görülmüştür. Filtre malzemesinin %5 oranında ilave edilmesi basınç dayanımında artışa yol açarken diğer oranlarda dayanımda düşüş olmuştur. Çimento ikamesinde ise, %5'ten %25'e tüm oranlarda dayanımda düşüş gözlenmiştir. Kumla %15 oranında ikame, basınç dayanımını arttırmıştır. Artan S/Ç oranıyla yapılan ilavede ise, basınç dayanımı azalma eğilimi göstermiştir. Harçların birim ağırlıkları basınç dayanımları ile paralellik göstermiştir. Filtre malzemesi ilave oranı arttıkça karışımların su emmesi de artmıştır. Kumla ikame yapılan karışımlarda su emme miktarı en azdır. Filtre malzemesi oranı arttıkça tüm karışımlarda işlenebilme yeteneğinin azaldığı görülmüştür. Artan S/Ç oranıyla birlikte yapılan ilavede bile bu durum geçerlidir. Harçların kıvamı ve basınç dayanımı ilişkisi incelenmiş ve birim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisine benzer olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, filtre malzemesinin reaktif ve değişken oranlarda anhidr çimento partikülleri içerdiği ifade edilmiştir. Bu şekilde karışıma giren çimento, harcın sertleşmesine ve dayanım artışına katkıda bulunmuştur [85].

Yıkama suyunun basınç dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin incelendiği başka bir çalışmada beton karışımında kullanılan yıkama suyu yüzdesi %0 ile %50 arasında değişmektedir. Elde edilen basınç mukavemeti ve elastisite modülü değerlerine göre, beton karışımlarında karma suyu ikamesi olarak kullanılan yıkama suyunun optimum oranı %20 olarak belirlenmiştir. 7 günlük basınç dayanımı değerleri ASTM C1602 standardında belirtilen %90 sınırının üzerinde ancak %100'ün altında iken, 28 günlük dayanımlar %50 ikame oranı hariç tüm karışımlarda referans betona göre daha yüksektir. Beton karma suyu olarak kullanılan suların pH değeri genellikle 6.0-9.0 arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlar, bu sınırların dışındaki pH değerlerinde basınç dayanımının azaldığı yönündedir [86].

Rughooputh ve arkadaşları, kuru filtre malzemesini belirli oranlarda ince ve iri agregaya ile ikame ettikleri çalışmalarında, ikame oranı arttıkça taze beton birim ağırlığının lineer bir şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Filtre malzemesinin köşeli tane yapısının yerleştirme esnasında karışımdaki fazla suyun yüzeye çıkmasını engellediği ve ilave boşluklara neden olduğu belirtilmiştir. Basınç dayanımı filtre malzemesi miktarındaki artışla azalmıştır. Filtre malzemesinin ikame edildiği agregaya oranla su emmesinin fazla olması, aynı kıvamı elde etmek için karışıma su eklenmesi ihtiyacını doğurmuştur. Dolayısıyla, artan S/Ç oranıyla basınç dayanımı azalmıştır. Aynı şekilde, E-modülü değeri de artan filtre malzemesi oranıyla lineer biçimde azalmıştır [87].

Silva ve ekibi, filtre malzemesinin tane boyut analizini yapmış ve filler olmaktan daha çok ince agregaya olarak değerlendirilebileceğini öne sürmüşlerdir. İzotermal kalorimetre deneyi sonuçları, filtre malzemesinin içinde dikkate değer miktarda anhidrit çimento tanelerinin bulunmadığını göstermiştir. %1 oranında çimento ile ikame ya da %6'dan az oranda kum ile ikame, basınç dayanımını olumsuz etkilememiştir [88].

Bir başka araştırmada, çimento kullanımını kısmen azaltmak amacıyla araştırmacılar yerine kullandıkları yıkama suyu çamuru atıklarını daha ince hale getirmek üzere ıslak öğütme işleminden faydalanmıştır. Islak öğütme, katı maddeleri su ile karıştırarak elekten geçirme yöntemidir. Bu çalışmada çamur, boşlukları doldurması ve hidratasyonu hızlandırarak çimento hamurunun mikro yapısını yoğunlaştırması beklentisiyle bir filler malzeme ve çekirdekleşme noktası olarak kabul edilmiştir. Öğütme işlemine tabi tutulmadan kullanılan çamur, hidratasyon özelliği göstermeyen ve filler etkisi olmayan yapıdadır. Bu nedenle, çimento ile ikame edildiğinde beton dayanımını azaltması beklenmektedir. Ayrıca, uzun depolama süresi nedeniyle

çamurdaki anhidr çimento miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla, taze halde kullanıldığı zaman çimento hamuru özelliği göstermesi daha muhtemeldir. Uzun süre bekletildiğinde CO₂ ile temas etmesi ve yüksek su/katı oranı ile çamurda kalsiyum karbonat ve kalsiyum silikat hidrat oluşumu görülmektedir; bu da potansiyel reaktivitenin ortadan kalkmasına ve çimento ikame oranının sınırlanmasına neden olur. Yapılan analizde, filtre prestan geçtikten sonra bile çamurun içinde kum tanelerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarlarının fazla olduğu, bunun da yapısındaki uçucu külden kaynaklandığı belirtilmiştir. Islak öğütme işleminden önce tane boyut dağılımının geniş bir aralıkta olup maksimum tane boyutunun 400 µm olduğu; öğütme işleminden sonra aralığın daraldığı ve maksimum tane boyutunun 10 µm'ye kadar düştüğü belirtilmiştir. 1 saatlik ıslak öğütme işleminin ardından çamurun pH değerinin 11.53'ten 10.55 değerine düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni, ıslak öğütme işleminin kalsiyum silikat hidratın karbonatlaşma reaksiyonunu hızlandırması sonucu alkalitenin azalması şeklinde yorumlanmıştır. Priz süresinin kısalması çamurun daha ince öğütülmesiyle ilişkilendirilmiştir. Çamurun su/katı oranı 1:1 iken bile tanelerin topaklaşma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu nedenle, karışıma ne kadar çok çamur dahil edilirse, kıvam o derecede azalmakta ve istenen kıvama ulaşmak için daha fazla suya ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Çamur taneleri mikro yapıyı sağlamlaştıran temas noktaları gibi davranarak priz süresini kısaltmaktadır. Yaratmış olduğu filler etkisi, çimento azaltıcı etkisine daha baskın gelmektedir. Ayrıca, önceden hidrate olmuş çimento da prizi hızlandırabilmektedir. İzotermal kalorimetre sonuçları, ısı salınım hızı ve açığa çıkan toplam ısının çamur bulunan karışımlarda arttığını göstermiştir. Ayrıca uyku periyodu süresi belirgin bir biçimde azalmıştır. Hidratasyon hızı grafiğindeki minimum noktanın değeri de artan çamur oranıyla artmıştır. Minimum noktanın oluşma zamanı üzerine belirli bir bağlantı kurulamamıştır. Grafikte C₃S hidratasyonunu temsil eden ana tepe noktası artan çamur dozajıyla daha erken oluşmuş ve değeri artmıştır. Hidratasyonun hızlanması, çamurun içinde bulunan C-S-H ile bağdaştırılmıştır. Çünkü, çamur içinde önceden hidrate olmuş C₃S, uyku periyodu süresini azaltan ve çekirdek etkisi ile hidratasyon sürecini hızlandıran kalsiyum silikat hidrata dönüşmüştür. Çamur ikame oranı %15 (kullanılan en yüksek oran)'e çıkarıldığında, ana tepe noktasının değeri en yüksek iken, tepenin iki kolu arasındaki aralık daralmış (hidratasyon hızı arttığı için hidrate olmamış tane sayısı azaldığından hidratasyonun yavaşlama periyodu daha erken başlamış) ve kümülatif ısı değeri azalmıştır. Bu

durum, artan çamur oranının karışımındaki imento dozajını düşürerek seyreltici etki göstermesiyle açıklanmıştır. ekirdekleşme bölgelerinin sayıca artması ve imento dozajının azalması, hidrasyonun daha kısa süre içinde yoğunlaşmasına ve daha dar bir tepe noktasının oluşmasına neden olmaktadır. Harçlara uygulanan basınç dayanımı deneyi sonuçları, çamurun özellikle erken dayanımı geliştirdiğini göstermiştir. Çamurun ince taneler şeklinde kullanılması sertleşmiş harta daha iyi bir filler etkisine yol açmıştır. İnce malzeme imento taneleri arasındaki veya imento ile agrega arasındaki aderansı arttırmakta, böylece basınç dayanımının artmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, ekirdek etkisi ile hidrasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırmaktadır. 28 günlük dayanım sonuçları referans betona yakın veya onun üzerinde elde edilmiştir. %15 ikame oranı bu araştırma sonuçlarına göre üst sınır olarak kabul edilebilir. Mikroskop altında yapılan incelemede, artan çamur oranıyla birlikte, mikroyapının daha yoğun hale geldiği görülmüştür. İkame oranı arttıkça, yapıdaki boşlukların toplam hacmi ve büyüklüğü azalmaktadır. Araştırmacılar son olarak, atık çamuru kullanmanın evre ve maliyet açısından etkilerini araştırmışlardır. Beton üretiminde hazır beton tesislerindeki atık çamuru kullanmanın atık maliyetini ortadan kaldırmakla kalmayıp, artan katkı ihtiyacının getirdiği ek masrafa rağmen üretim maliyetini düşürdüğünü, imento üretiminden kaynaklı karbon emisyonunu ve enerji tüketimini azalttığını ortaya koymuşlardır [89].



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, bu malzemelerle üretilen harçlar, üretim aşamasında uygulanan metodlar ve gerçekleştirilen deneyler hakkında bilgi verilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda filtre malzemesi kullanımının taze harçların işlenebilirliği ve harçların basınç dayanımına etkileri incelenmiştir. Filtre malzemesi kalker tozu gibi filler olarak karışımlara dahil edilmiş ve bu iki malzemenin birlikte veya ayrı ayrı kullanımının harç özelliklerini ne yönde değiştirdiği analiz edilmiştir. Harçların farklı sabit sıcaklık değerleri altında hidrasyon grafikleri izlenerek filtre malzemesinin ve kalker tozunun soğuk, normal ve sıcak hava şartları altında kullanımının etkileri araştırılmıştır.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu tez kapsamında üretilen harçlarda kullanılan ve detayları aşağıda belirtilen malzemeler sırasıyla çimento, doğal kum, kalker tozu, filtre malzemesi ve karma suyudur. Deneyler esnasında filtre malzemesi ve kalker tozunun etkilerini doğrudan görebilmek amacıyla harç karışımlarında kimyasal veya mineral katkı maddesi kullanımından kaçınılmıştır.

3.1.1 Çimento

Özgül ağırlığı $3,04 \text{ gr/cm}^3$ olan CEM I 42,5 R Portland çimentosu [90] deneylerde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır.

3.1.2 Agrega

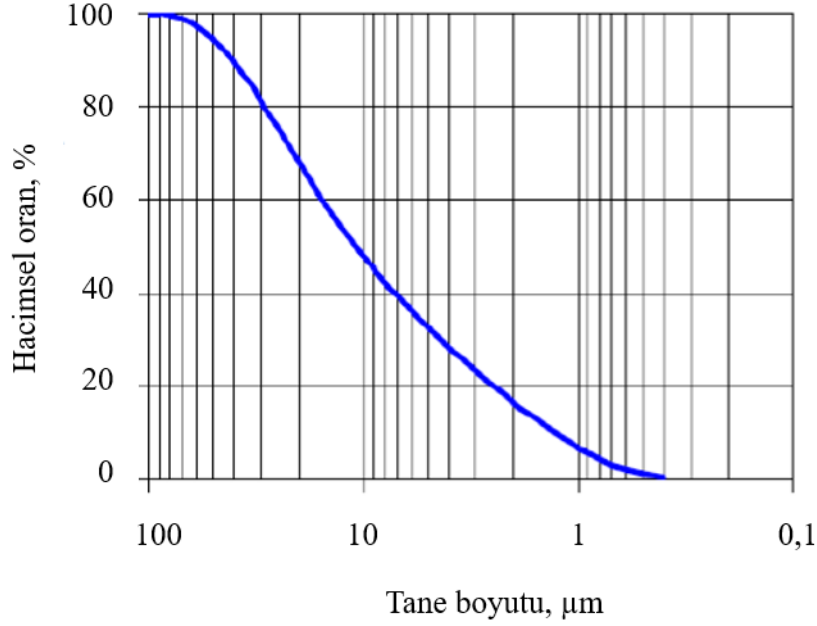
Çizelge 3.1 : Agrega elek analizi.

Elekten Geçen Malzeme Miktarı (%)								
Elek Boyutu (mm)	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
Doğal Kum	6	53	86	98	100	100	100	100

Harçlarda ince agrega olarak $2,60 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip doğal kum kullanılmıştır. Agrega elek analizi Çizelge 3.1’de verilmektedir.

3.1.3 Kalker tozu

Ortalama tane boyutu $11 \mu\text{m}$ ve özgül ağırlığı $2,77 \text{ gr/cm}^3$ olan kalsit karışımlara filler malzeme olarak dahil edilmiştir. Şekil 3.1’de tane boyut dağılımı grafiği görülmektedir.



Şekil 3.1 : Kalker tozu tane boyut dağılımı

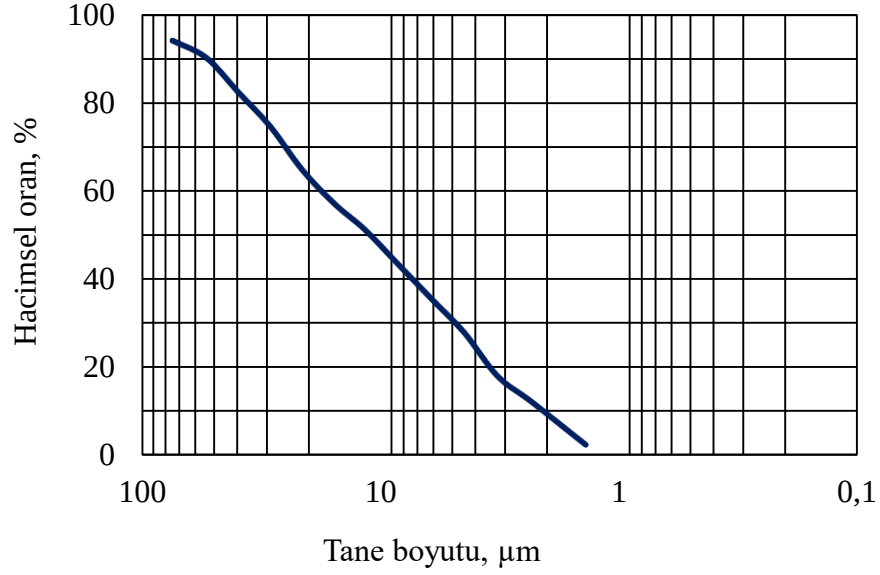
3.1.4 Filtre kalıntı malzemesi

Hazır beton santralinden elde edilen filtre kalıntı malzemesi Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Hazır beton santralinden alınan filtre kalıntı malzemesi

Filtre malzemesinin 24 saat etüvde kurutulduktan sonra ölçülen özgül ağırlığı 2,80 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Ortalama tane boyutu 12 µm'dir. Şekil 3.3'deki hidrometre analizi grafiğine göre filtre malzemesinde 75 µm'den küçük boyutlardaki tanelerin oranı %95'tir.



Şekil 3.3 : Filtre kalıntı malzemesi tane boyut dağılımı

3.1.5 Karma suyu

Harç üretimlerinde karışım suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Filtre Kalıntı Malzemesinin Hazırlanması

Hazır beton santralinden ıslak durumda elde edilen filtre kalıntı malzemesi ilk önce parçalara ayrılarak 110±5°C'ye ayarlanmış etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Kuru durumdaki filtre malzemesinin Şekil 3.4'te görülen öğütme ve elekten geçirme işlemleri ile ortalama tane boyutunun çimento tane boyutuna (<90 µm) düşürülmesi amaçlanmıştır. Etüvde kuruyan filtre malzemesi kol çevirmeli fındık kıracağı ve çekiç yardımıyla küçük parçalar haline getirilmiş ve daha sonra No. 170 (90 µm) elekten geçirilmiştir.



Şekil 3.4 : Filtre kalıntı malzemesinin hazırlanması aşamaları

Filtre malzemesi daha sonra karışımlarda kullanılmak üzere kilitli torbalar içerisinde hava almayacak şekilde depolanmıştır.

3.3 Harç Karışımlarının Tasarımı

Harç karışımlarının tasarlanmasında TS EN 196-1’de belirtilen standart harç karışımındaki oranlardan yola çıkılarak referans harç bileşimleri belirlenmiştir. S/Ç oranı sırasıyla 0,50 ve 0,60 olarak seçilmiştir.

Filtre malzemesi üç farklı şekilde harç hazırlığına dahil edilmiştir. İlk durumda, filtre malzemesi çimento ile %10 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Filtre malzemesi ikinci sette kalker tozu ile birlikte, bu iki malzemenin toplam miktarı karışımındaki çimento miktarının %10’u veya %20’si olacak şekilde, karışımındaki bileşenlerden azaltma yoluna gidilmeden harçlara ilave malzeme olarak dahil edilmiştir. Filtre malzemesi ve kalker tozunun birbirlerine göre karışım oranları ise sırasıyla, %0-100, %33-67, %67-33 ve %100-0 olarak belirlenmiştir. Üçüncü sette ise filtre malzemesi ve kalker tozu birbirlerine göre ikinci sette kullanılan oranlarla karışıma dahil edilerek kum ile ağırlıkça ikame edilmiştir. İkame oranı sırasıyla kum miktarının ağırlıkça %10’u ve %20’si olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2’de harç karışımlarına ait isim kodlamaları ve bileşimleri bulunmaktadır. Çizelge 3.2’de R olarak adlandırılan karışım referans harcını, M harfi ikame işlemini, V ilave işlemini, C işlemin çimento miktarına göre gerçekleştiğini, S işlemin doğal kum miktarına göre gerçekleştiğini, F filtre kalıntı malzemesini, K kalker tozunu, F ve K harflerinin başına eklenen sayılar ise belirtilen işlemin kaç gram filtre malzemesi veya kalker tozu ile gerçekleştiğini ifade etmektedir. Örneğin; VC-30K15F karışımında 30 gram kalker tozu ve 15 gram filtre malzemesinin karışımlara ilave edildiği görülmektedir. İlave oranı ise kalker tozu ve filtre malzemesinin toplam miktarının çimento miktarına bölünmesiyle %10 olarak elde edilir. MS-90K180F karışımı incelendiğinde, 90 gram kalker tozu ve 180 gram filtre malzemesinin karışımındaki doğal kum yerine kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu karışımda, toplamda 270 gram malzeme kum ile ikame edilmiştir ve ikame oranı %20’dir.

Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 sırasıyla 0,50 ve 0,60 S/Ç oranlarında hazırlanan harçlara ait bileşenlerin 1 m³’teki miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Harç karışımlarına ait bileşimler.

Harç bileşen miktarları (gr.)			S/Ç=0.50-0.60	
Karışımlar	Malzemeler			
	Portland Çimentosu	Kalker Tozu	Filtre Malzemesi	Doğal Kum
R	450	-	-	1350
MC-45F	405	-	45	1350
MC-90F	360	-	90	
VC-45K	450	45	-	1350
VC-30K15F		30	15	
VC-15K30F		15	30	
VC-45F		-	45	
VC-90K		90	-	
VC-60K30F		60	30	
VC-30K60F		30	60	
VC-90F		-	90	
MS-135K		450	135	
MS-90K45F	90		45	
MS-45K90F	45		90	
MS-135F	-		135	
MS-270K	270		-	1080
MS-180K90F	180		90	
MS-90K180F	90		180	
MS-270F	-		270	

Çizelge 3.3 : S/Ç= 0,50 oranıyla hazırlanan harçlarda 1 m³'teki bileşen miktarları.

Harç bileşimi (kg/m ³)				S/Ç=0.50
Karışımlar	Malzemeler			
	Portland Çimentosu	Kalker Tozu	Filtre Malzemesi	Doğal Kum
R	499	-	-	1498
MC-45F	449	-	50	1496
MC-90F	398	-	100	1494
VC-45K	490	49	-	1471
VC-30K15F	490	33	16	1471
VC-15K30F	490	16	33	1471
VC-45F	490	-	49	1471
VC-90K	482	96	-	1445
VC-60K30F	482	64	32	1445
VC-30K60F	482	32	64	1445
VC-90F	482	-	96	1446
MS-135K	501	150	-	1353
MS-90K45F	501	100	50	1353

Çizelge 3.3 (devam): S/Ç= 0,50 oranıyla hazırlanan harçlarda 1 m³'teki bileşen miktarları.

MS-45K90F	501	50	100	1353
MS-135F	501	-	150	1354
MS-270K	503	302	-	1207
MS-180K90F	503	201	101	1207
MS-90K180F	503	101	201	1208
MS-270F	503	-	302	1208

Çizelge 3.4 : S/Ç= 0,60 oranıyla hazırlanan harçlarda 1 m³'teki bileşen miktarları.

Harç bileşimi (kg/m ³)				S/Ç=0.60
Karışımlar	Malzemeler			
	Portland Çimentosu	Kalker Tozu	Filtre Malzemesi	Doğal Kum
R	475	-	-	1426
MC-45F	427	-	47	1424
MC-90F	379	-	94	1422
VC-45K	467	47	-	1402
VC-30K15F	467	31	16	1402
VC-15K30F	467	16	31	1402
VC-45F	467	-	47	1402
VC-90K	459	92	-	1378
VC-60K30F	459	61	31	1378
VC-30K60F	460	31	61	1378
VC-90F	460	-	92	1379
MS-135K	477	143	-	1288
MS-90K45F	477	95	48	1288
MS-45K90F	477	48	95	1288
MS-135F	477	-	143	1288
MS-270K	479	287	-	1149
MS-180K90F	479	191	96	1149
MS-90K180F	479	96	192	1149
MS-270F	479	-	287	1150

Kalker tozu ve filtre malzemesinin karışımlara diğer bileşenlerden azaltma yapılmadan ilave edilmesi ve hacimce azaltma yoluna gidilmemesi belirli bir hacimdeki karışıma giren çimento miktarının referans karışımdaki çimento miktarına göre azalmasına neden olmuştur. VC ile kodlanan karışımlara bakıldığında bu durum görülebilir. Aynı şekilde MS ile kodlanan karışımlara ait miktarlar incelendiğinde, kum ile hacimsel yerine kütlece ikame yapılması birim hacimdeki çimento dozajının referans karışımdakine göre artmasını sağlamıştır.

3.4 Harç Numunelerinin Hazırlanması

Harç numuneleri TS EN 196-1 standardına uygun karıştırma yöntemi ve sürelerde 5 litre kapasiteli harç karıştırıcısında üretilmiştir. İlk önce filtre malzemesi ve çimento su ile 30 sn. düşük hızda karıştırılmış ve karıştırmanın devam ettiği ikinci 30 sn. boyunca doğal kum karışıma dahil edilmiştir. Daha sonra karıştırıcı yüksek hıza ayarlanmış ve karıştırmaya 30 sn. daha devam edilmiştir. Karıştırıcı 90 sn. süreliğine durdurulup kabın çeperlerine veya dibine yapışan harç bir kaşık yardımıyla sıyrılarak kabın ortasında toplanmıştır. Karıştırıcı yeniden çalıştırılarak 60 sn. yüksek hızda son kez karıştırma gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemini takiben yayılma tablası deneyi yapıldıktan sonra harç numuneleri 3, 7, 28 ve 90. günlerin sonunda gerçekleştirilecek basınç dayanımı deneyleri için 40 mm × 40 mm × 160 mm boyutlarındaki kalıplara sarsma tablası yardımıyla yerleştirilmiştir. Harçların kalıp değmeyen üst yüzeyine düzeltme işlemi yapılmıştır ve kür havuzunda bozulmadan durmasına yetecek kadar bir sertliğe ulaşıncaya dek (en az 12 saat, en fazla 24 saat) kalıp içerisinde beklemeye bırakılmıştır. Kalıplardan sökülen numuneler 23±2°C sıcaklıktaki kirece doymuş su içerisinde saklanmıştır. İzotermal kalorimetre deneyinde kullanılan harçlara ait malzemeler tartıldıktan sonra, sıcaklığı deney için belirlenen sıcaklığın yaklaşık 5°C üzerindeki (mevsim şartları ve ortam sıcaklığı da dikkate alınarak) bir sıcaklığa ayarlanmış etüvde 24 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra karıştırıcı yardımıyla tekrar üretimler gerçekleştirilmiş ve ilk sıcaklık ölçümü yapıldıktan sonra kalorimetre cihazına ait 125 ml hacmindeki kaplara yerleştirilerek kalorimetre cihazına yerleştirilmiştir. Karıştırma işleminin başladığı andan itibaren geçen süre tutularak, çimentonun su ile temasından 5 dk. sonra kalorimetre cihazında ölçümlere başlanması sağlanmıştır.

3.5 Deney Yöntemleri

3.5.1 Yayılma tablası deneyi

Yayılma tablası deneyi taze harçların işlenebilirliğini ölçmek amacıyla yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında deneyler manuel çevirmeli bir yayılma tablasında gerçekleştirilmiştir. 300 mm çapındaki tablanın merkezine pirinçten yapılmış kesik koni şeklindeki kalıp yerleştirilir. Kalıbın taban çapı 100 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm'dir. Taze harç kalıp içerisinde koyulup tokmak ile yerleştirildikten

sonra kalıp kaldırılır. Yayılma tablası saniyede 1 kez düşme sağlanacak şekilde toplamda 15 kez çevirme kolu yardımıyla düşürülür. Harcın yayıldığı çap birbirine dik iki doğrultuda ölçülür ve yayılma değeri bu iki ölçümün ortalaması olarak not edilir. Deney düzeneği ve taze harç ile yapılan deney Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Yayılma tablası deneyi

3.5.2 Tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç deneyinde belirli bir yüzey alanına sahip numunenin basınç mukavemeti, o yüzeye dik doğrultuda uygulanan maksimum kuvvetin yarattığı gerilmenin hesaplanmasıyla elde edilmektedir. TS EN 196-1'e göre gerçekleştirilen deneylerde numuneler düzeneğe yerleştirilmeden önce yüzeyindeki fazla su kurularak alınmış ve pürüz oluşturan çıkıntılar yok edilmiştir. Yükün etkidiği yüzeyinin (harç döküm yönüne dik yüzeyin) alanı 1600 mm^2 ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$) olan yarım prizma şeklindeki numuneler pres makinasına yerleştirilip teste tabi tutulmuştur. Numune kırılıncaya kadar sabit hızda yükleme yapıldıktan sonra göstergede okunan en büyük yük değeri yüzey alanına bölünerek basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Teste tabi tutulan tüm numunelerin Şekil 3.6'da gösterildiği gibi TS EN 12390-3'e göre küp numunelerde tatmin edici kırılma şekillerine uygun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.6 : Tek eksenli basınç deneyinde küp numunelerin kırılma şekli

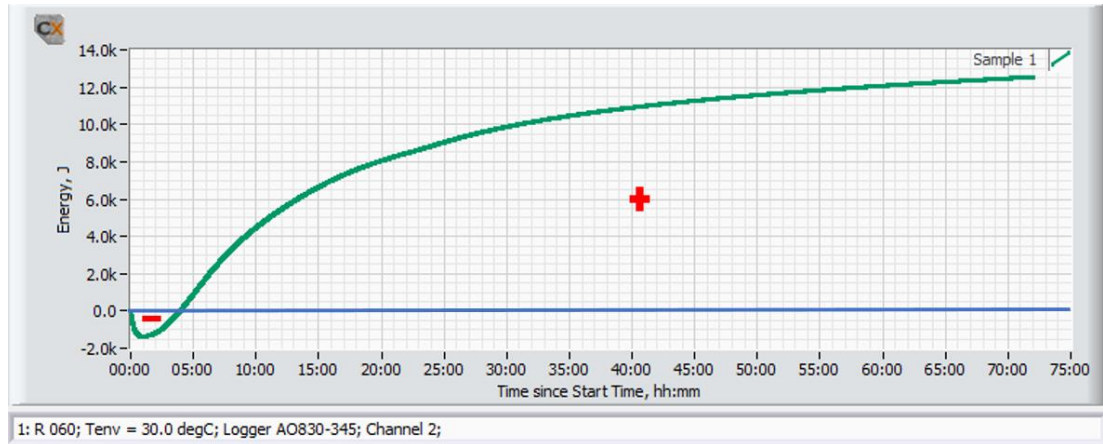
3.5.3 İzotermal kalorimetreyle hidratasyon özelliklerinin belirlenmesi

Harçların hidratasyon özelliklerinin tespiti Calmetrix I-Call 2000 HPC izotermal kalorimetresi yardımıyla yapılmıştır. Kalorimetre Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : İzotermal kalorimetre

Cihaz, deney için seçilen sıcaklığa ulaşması amacıyla harçlar karıştırılmadan en az 12 saat önce çalıştırılır. Böylece deney sırasında gecikmelerin ve sonuçların kalibre edilmesinin önüne geçilmesi sağlanır. Harçların karıştırılması tamamlandıktan sonra termometre ile ilk sıcaklık değerleri ölçülür. Daha sonra 125 ml hacmindeki plastik kaplara 200 gr. ağırlığındaki taze harç numuneleri yerleştirilir. Plastik kapların kapakları düzgün bir şekilde kapatılıp kontrol edildikten sonra çok hızlı bir şekilde cihaz içerisine yerleştirilir. Hidratasyon çimento ve su birbirine temas eder etmez başlayan bir reaksiyon olduğu için harçların kalorimetre dışarısında karıştırılması ilk dakikalardaki hidratasyon ısısının ölçülememesine neden olmaktadır. Bu nedenle harçların karıştırma saati not edilerek cihaz yazılımına ait veri giriş ekranına kaydedilir. Ayrıca karışıma ait ilk sıcaklık değeri, karışımdaki tüm bileşenlerin miktarları, kullanılan bağlayıcı tipi, S/Ç oranı gibi o karışıma ait bilgiler de veri giriş ekranına kaydedilir.



Şekil 3.8 : Endotermik davranıştan dolayı oluşan negatif eğri

Hidratasyon ekzotermik bir reaksiyondur ve reaksiyon süresince açığa çıkan ısı hidratasyon ısısı grafiğinde x-ekseninin üzerinde pozitif değer olarak gösterilir. Numunenin cihaza yerleştirildiği andaki sıcaklığı izotermal kalorimetre haznesinde

ayarlanan sıcaklıktan daha düşük bir değerde olursa ısı dengeye ulaşılması için numune ortamdan ısı alır. Bu durumda ilk dakikalarda açığa çıkan ısınin negatif olduğu, yani endotermik karakter gösterdiği bir davranış ortaya çıkabilir (Şekil 3.8). Bu duruma engel olmak amacıyla karışımda kullanılan malzemeler etüv içerisinde kalorimetrede ayarlanan sıcaklığın üzerinde 24 saat boyunca bekletilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında izotermal kalorimetre ile yapılan ölçümler için belirlenen ortam sıcaklıkları sırasıyla 10°C, 20°C ve 30°C’dir. Test edilen tüm harçların hidratasyonu 72 saat boyunca izlenmiş ve hidratasyon hızı ve hidratasyon ısı salınımı grafikleri elde edilmiştir. İzotermal kalorimetre deneyine tabi tutulan harç karışımları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : İzotermal kalorimetre yöntemiyle test edilen harçlar.

Karışımlar	Malzeme Miktarları (gr.)			
	Portland Çimentosu	Kalker Tozu	Filtre Malzemesi	Doğal Kum
R	450	-	-	1350
VC-90K	450	90	-	1350
VC-90F		-	90	
MS-135K	450	135	-	1215
MS-135F		-	135	

4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

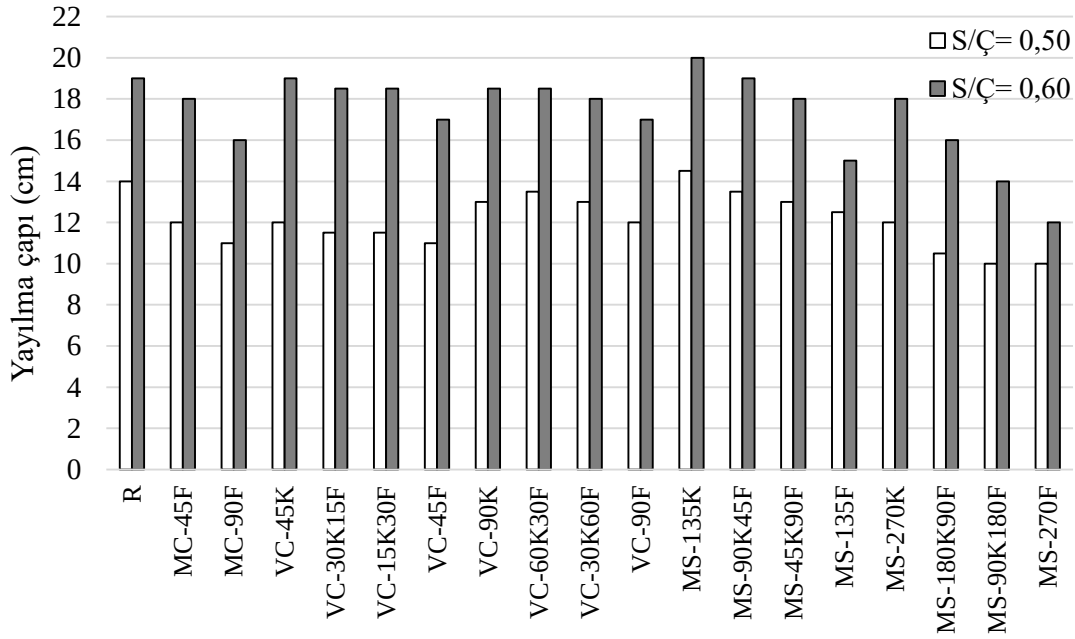
4.1 Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları

Yayılma tablası deneyi sonuçlarına ait değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’de farklı iki S/Ç oranı (0,50 ve 0,60) ile hazırlanan harçların yayılmaları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Harçların yayılma çapı değerleri.

S/Ç	Yayılma Çapı (cm)			
	R			
0,50	14			
0,60	19			
	MC-45F		MC-90F	
0,50	12		11	
0,60	18		16	
	VC-45K	VC-30K15F	VC-15K30F	VC-45F
0,50	12	11,5	11,5	11
0,60	19	18,5	18,5	17
	VC-90K	VC-60K30F	VC-30K60F	VC-90F
0,50	13	13,5	13	12
0,60	18,5	18,5	18	17
	MS-135K	MS-90K45F	MS-45K90F	MS-135F
0,50	14,5	13,5	13	12,5
0,60	20	19	18	15
	MS-270K	MS-180K90F	MS-90K180F	MS-270F
0,50	12	10,5	10	10
0,60	18	16	14	12

Filtre malzemesi çimento ile ikame edildiğinde harçların yayılma çapı değerlerinde azalma görülmüştür. Filtre malzemesinin ortalama tane boyutunun (12 µm) çimentoyla kıyaslandığında çok daha küçük olması bu duruma neden olmaktadır. İnce malzeme miktarının artışı ıslatma suyu miktarını ve dolayısıyla karışımların su ihtiyacını arttırmıştır. İkame oranının %10’dan %20’ye çıkarılması yayılma miktarını düşürmüştür.



Şekil 4.1 : Harçların yayılma çapı değerleri

Kalker tozunun tek başına ilave edildiği karışımlarda (VC-45K ve VC-90K) kıvamda bir değişiklik oluşmamıştır. Kalker tozu çimentoya göre daha ince olmasına rağmen yayılma çapı değerlerinin düşmemesi, kalker tozu tanelerinin küresel şekli nedeniyle karışımların işlenebilirliğini iyileştirmesiyle ilgilidir [91]. Kalker tozu miktarının artmasıyla birlikte yayılma miktarının da artması bu duruma örnek olarak gösterilebilir (Şekil 4.1). Ayrıca, kalker tozu ilavesiyle birim hacimdeki çimento miktarının azalmasına, dolayısıyla karışımdaki serbest su miktarının artmasına neden olmuştur (Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4). Çimento ağırlığınca ilave yapılan karışımlarda kalker tozu miktarının azaltılıp filtre malzemesi miktarının arttırılmasıyla birlikte yayılma kaybı meydana gelmiştir. İki malzemenin kullanımında da karışıma giren çimento miktarı aynı olmasına rağmen oluşan kıvam kaybı filtre malzemesi kullanımında ıslatma suyu ihtiyacının yüksek olduğunu göstermektedir. Filtre malzemesinin ilave oranının arttırılması işlenebilirliğe olan olumsuz etkiyi de arttırmaktadır.

Kalker tozu kum ile %10 oranda ikame edildiğinde kıvam kaybı görülmemiştir. İkame oranının %20'ye çıkmasıyla beraber yayılma miktarı da azalmıştır. Kum ile ikame yapılan karışımlarda hem kalker tozu hem de filtre malzemesi oranı arttıkça yayılma çapı değeri azalmıştır. Kalker tozu ve filtre malzemesinin özgül ağırlıkları karışımda kullanılan kumun özgül ağırlığından daha fazla olduğundan, kütlece yapılan ikame birim hacimde karışıma giren çimento miktarını arttırmıştır. Ayrıca iki malzemenin de ortalama tane boyutu doğal kumla kıyaslandığında oldukça küçüktür. Her iki durum

da harç içerisindeki ince malzeme miktarını arttırdığı için işlenebilirlikte beklendiği gibi azalma görülmüştür.

Şekil 4.1’de, S/Ç oranının artmasıyla karışımların işlenebilirliğinde iyileşme görüldüğü ve filtre malzemesi miktarının artmasıyla birlikte tüm karışımlarda kıvam kaybı gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Tüm karışımlar kıyaslandığında filtre malzemesinin doğal kum ile %20 oranında ikame edildiği harcın (MS-270F) yayılma çapı değeri her iki S/Ç oranı için de en düşüktür. Filtre malzemesinin yüksek su emme kapasitesi, karışımdaki katı tanelerin toplam yüzey alanını arttırması ve çimento dozajını arttırıcı etkisi MS-270F’te görülen kıvam kaybının nedeni olarak görülmüştür.

4.2 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Harçların 7, 28 ve 90. günlerde yapılan basınç dayanımı deneyi sonuçlarına ait değerler sırasıyla Çizelge 4.2 (S/Ç=0,50) ve Çizelge 4.3 (S/Ç=0,60)’te verilmektedir. Aynı deneylere ait bağıl basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.4 (S/Ç=0,50) ve Çizelge 4.5 (S/Ç=0,60)’te görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (S/Ç=0,50).

Basınç Dayanımı (MPa)		S/Ç= 0,50	
Karışım	7 gün	28 gün	90 gün
R	35,2	46,1	49,6
MC-45F	31,8	41,1	49,2
MC-90F	26,5	31,3	39,8
VC-45K	34,6	45,9	51,6
VC-30K15F	34,8	47,6	51,1
VC-15K30F	33,8	49,6	51,7
VC-45F	35,6	47,9	52,0
VC-90K	44,8	52,7	55,9
VC-60K30F	43,9	53,0	58,1
VC-30K60F	43,6	54,4	57,5
VC-90F	42,4	55,4	57,3
MS-135K	46,6	53,6	63,9
MS-90K45F	47,3	54,3	62,3
MS-45K90F	46,8	56,3	65,1
MS-135F	45,8	55,8	63,8
MS-270K	48,7	58,7	65,8
MS-180K90F	46,8	53,8	59,3
MS-90K180F	42,9	52,9	60,6
MS-270F	37,2	49,0	55,1

Çizelge 4.3 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (S/Ç=0,60).

Basınç Dayanımı (MPa)		S/Ç= 0,60	
Karışım	7 gün	28 gün	90 gün
R	22,8	34,1	39,9
MC-45F	20,1	30,3	37,5
MC-90F	15,2	25,2	28,2
VC-45K	28,4	35,4	43,0
VC-30K15F	26,3	31,4	41,5
VC-15K30F	28,2	33,1	41,8
VC-45F	26,9	35,4	41,5
VC-90K	30,1	39,6	40,3
VC-60K30F	28,9	40,1	42,2
VC-30K60F	31,6	41,5	43,6
VC-90F	28,6	39,1	40,1
MS-135K	31,9	44,5	47,2
MS-90K45F	32,6	41,6	45,5
MS-45K90F	29,1	41,5	45,1
MS-135F	29,0	42,3	45,2
MS-270K	34,9	46,5	53,5
MS-180K90F	34,4	45,7	50,4
MS-90K180F	34,2	43,4	52,6
MS-270F	31,0	40,9	47,3

Filtre malzemesinin çimentoyla ikamesi tüm yaşlarda basınç dayanımını düşürmektedir. Azaltıcı etki ikame oranının %20'ye çıkmasıyla daha belirgin hale gelmiştir. Elde edilen sonuçlar filtre malzemesindeki çimentonun büyük oranda hidrate olduğunu göstermektedir. İkameyle oluşan çimento seyreltici etki filtre malzemesinden beklenen hidratasyon tepkimesi, çekirdek etkisi veya filler etkisine baskın gelmiştir. 90. gün sonunda elde edilen basınç dayanımı değerleri %10 ikame oranında S/Ç= 0,50 için referansın %99'u, S/Ç= 0,60 için referansın %94'ü seviyesindedir. Ayrıca, bu ikame oranında elde edilen 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri de %90 sınırına eşit veya çok yakındır.

Çimento ağırlığının %10'u kadar ilave yapılan karışımlarda kalker tozu kullanımı S/Ç= 0,50 olan karışımların 7 günlük basınç dayanımında hafif düşüşe sebep olmuştur. Karışımdaki azalan çimento miktarının yarattığı olumsuz etki, az miktardaki kalker tozunun yarattığı filler etkisiyle telafi edilememiştir. İlave oranının %20'ye çıkmasıyla aynı S/Ç oranı için 7 günlük basınç dayanımında iyileşme görülmüştür. Aynı ilave oranında elde edilen 3 günlük basınç dayanımı değerleri de benzerlik göstermektedir. Çimentodan daha ince öğütülmüş kalker tozunun yeterli oranda kullanıldığında yarattığı çekirdeklenme etkisinin erken yaş dayanımını arttırdığından literatürde daha

önce bahsedilmiştir [92]. Filtre malzemesinin tek başına karışımlara çimento ağırlığınca ilave edilmesi S/Ç oranından bağımsız olarak tüm yaşlarda dayanımda artışa neden olmuştur. İlave oranı artışının özellikle erken yaş dayanımı arttırdığı görülmektedir. Filtre malzemesinin yüksek pH değeri ve yapısında bulunan CH çimento hidrasyonunu ilk saatlerde hızlandırıcı etki göstermektedir. Ayrıca içeriğindeki C-S-H'lar çekirdeklenme etkisi yaratıp anhidr çimento taneleri arasında köprü görevi görerek ilk zamanlardaki dayanım kazanımını hızlandırmaktadır. Karışıma giren birim hacimdeki çimento miktarını yaklaşık %4'e kadar azalttığı düşünülürse, filtre malzemesinin filler etkisi yarattığı veya içerisinde bulunan anhidr çimento tanelerinin hidrasyona uğrayıp dayanım kazanımına katkıda bulunduğu söylenebilir.

Kum ile ikame yapılan karışımlarda basınç dayanımı artışı beklendiği üzere en fazladır. Bu harçlarda bağlayıcı miktarından azaltma yapılmadığı ve karışıma giren toplam ince malzeme miktarı arttığı için daha yoğun bir matris oluşumu ve porozitede azalma sonucu dayanım değerleri artmıştır.

Çizelge 4.4 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük bağıl basınç dayanımları (S/Ç=0,50).

Bağıl Basınç Dayanımı (%)				S/Ç= 0,50
Karışım	7 gün	28 gün	90 gün	Grafik
R	100	100	100	
MC-45F	90	89	99	
MC-90F	75	68	80	
VC-45K	98	100	104	
VC-30K15F	99	103	103	
VC-15K30F	96	108	104	
VC-45F	101	104	105	
VC-90K	127	114	113	
VC-60K30F	125	115	117	
VC-30K60F	124	118	116	
VC-90F	120	120	116	
MS-135K	132	116	129	
MS-90K45F	134	118	126	
MS-45K90F	133	122	131	
MS-135F	130	121	129	
MS-270K	138	127	133	
MS-180K90F	133	117	120	
MS-90K180F	122	115	122	
MS-270F	106	106	111	

Çizelge 4.5 : Harçların 7, 28 ve 90 günlük bağıl basınç dayanımları (S/Ç=0,60).

Bağıl Basınç Dayanımı (%)				S/Ç= 0,60
Karışım	7 gün	28 gün	90 gün	Grafik
R	100	100	100	
MC-45F	88	89	94	
MC-90F	67	74	71	
VC-45K	125	104	108	
VC-30K15F	115	92	104	
VC-15K30F	124	97	105	
VC-45F	118	104	104	
VC-90K	132	116	101	
VC-60K30F	127	118	106	
VC-30K60F	139	122	109	
VC-90F	125	115	101	
MS-135K	140	130	118	
MS-90K45F	143	122	114	
MS-45K90F	128	122	113	
MS-135F	127	124	113	
MS-270K	153	136	134	
MS-180K90F	151	134	126	
MS-90K180F	150	127	132	
MS-270F	136	120	119	

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'e bakıldığında filtre malzemesinin çimentoyla ikame edildiği karışımlar hariç genel olarak erken yaş dayanımını daha çok arttırdığı görülmektedir. Filtre malzemesi yapısında bulunan portlandit (CH), yüksek pH değerleri altında daha hızlı oluşmaktadır. Portlanditin oluşması boşluk çözeltisindeki Ca^{+2} iyonlarının konsantrasyonunu azaltarak anhidr çimento bileşenlerinin daha hızlı çözünmesini sağlamaktadır [93]. Böylece hidrasyon hızlanmakta, erken yaş dayanım değerleri kontrol karışımlarına göre yükselmektedir.

Hidrasyon ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi görmek amacıyla izotermal kalorimetre cihazında test edilen numunelerin ayrıca 3 günlük basınç dayanımları da ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.

Kür süresi 3 günden 90 güne ilerledikçe referans harç ve diğer harçlar arasındaki basınç dayanımı farkı azalmıştır. S/Ç oranının artması tüm karışımların basınç dayanımlarını düşürmektedir. 3 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde (Çizelge 4.6), kalker tozu veya filtre malzemesi kullanımıyla 0,60 S/Ç oranında basınç dayanımındaki artış oranının 90 günlük dayanım değerlerinin aksine 0,50 S/Ç oranındakinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6 : İzotermal kalorimetreyle test edilen harçların 3 günlük basınç dayanımları.

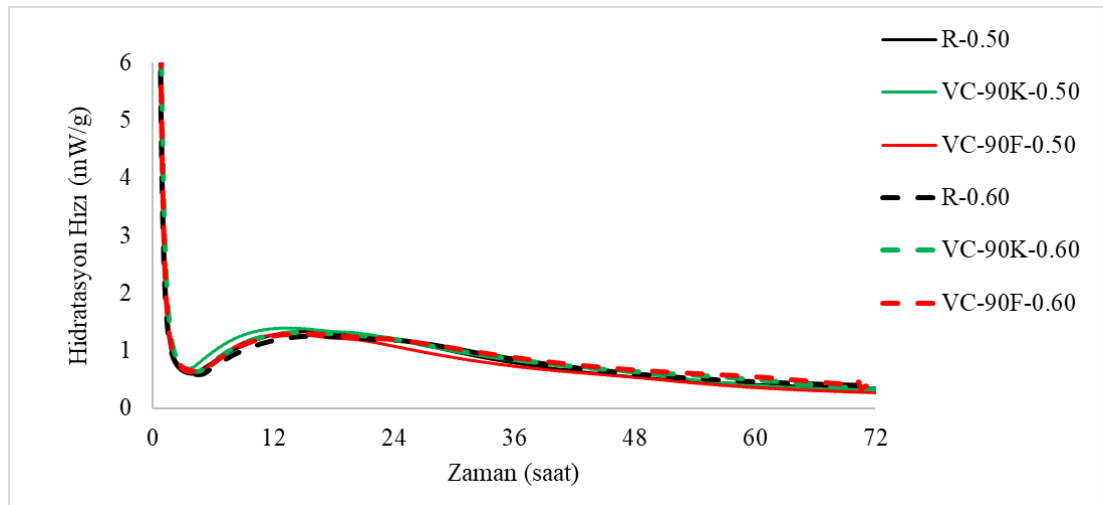
3 Günlük Basınç Dayanımı			
Karışım	MPa	Bağıl (%)	S/Ç
R	15,7	100	0,50
VC-90K	19,7	125	
VC-90F	19,0	121	
MS-135K	19,2	122	
MS-135F	19,4	124	
R	8,9	100	0,60
VC-90K	13,3	149	
VC-90F	13,1	147	
MS-135K	14,1	158	
MS-135F	13,8	155	

4.3 İzotermal Kalorimetre Deneyi Sonuçları

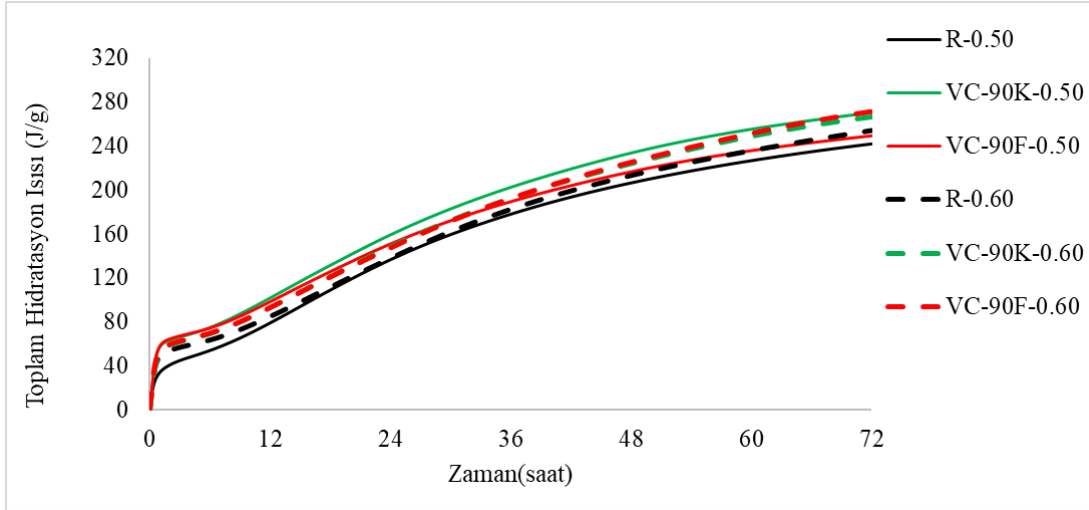
Çizelge 3.5’te verilen karışımlar 0,50 ve 0,60 S/Ç oranlarıyla üretilip, hidrasyon özelliklerinin tespiti için 10°C, 20°C ve 30°C sabit sıcaklıkları altında 72 saat boyunca izotermal kalorimetre yöntemiyle test edilmiştir.

Şekil 4.2’de R, VC-90K ve VC-90F karışımlarına ait 10°C’de yapılan deneylerde elde edilen hidrasyon hızı grafiği, Şekil 4.3’te de aynı karışımlara ait hidrasyon ısısı grafiği gösterilmektedir.

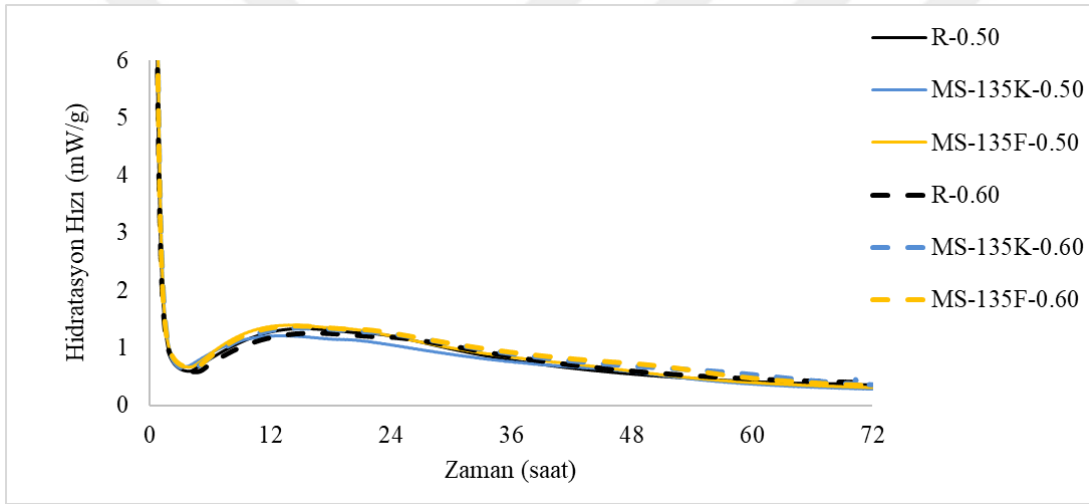
R, MS-135K ve MS-135F karışımlarına ait 10°C sabit sıcaklık değerinde elde edilen hidrasyon hızı grafiği Şekil 4.4’te ve hidrasyon ısısı grafiği Şekil 4.5’te verilmektedir.



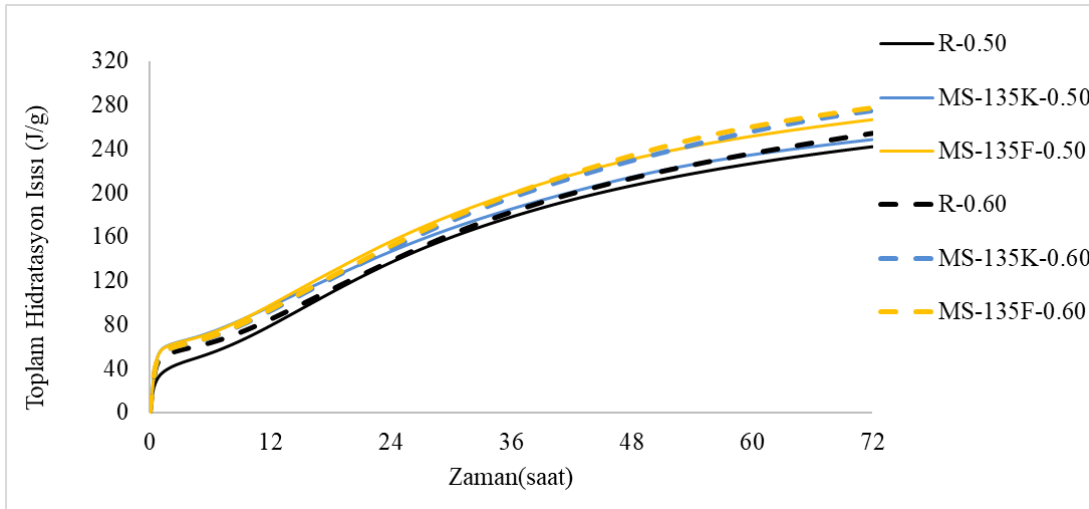
Şekil 4.2 : 10°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidrasyon hızı eğrileri



Şekil 4.3 : 10°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon ısısı eğrileri



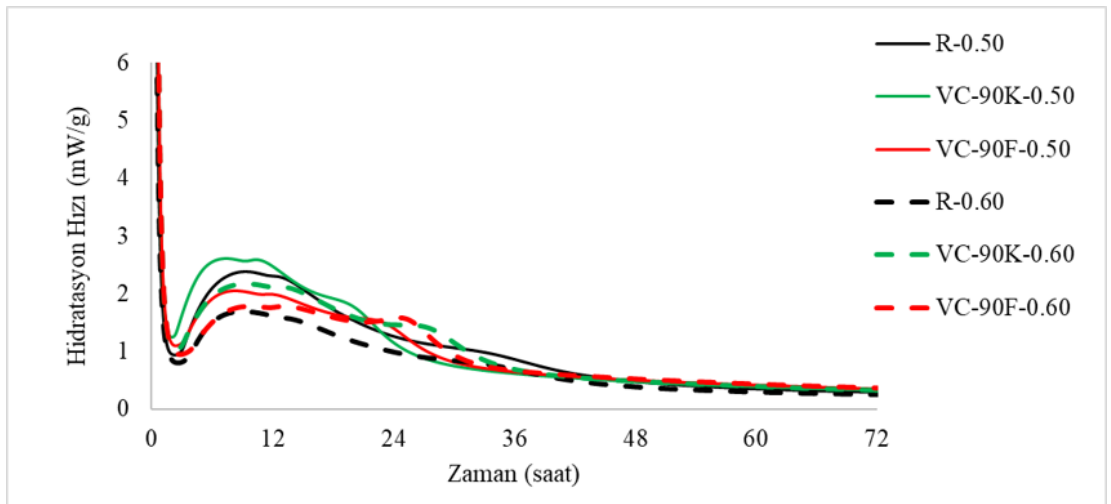
Şekil 4.4 : 10°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon hızı eğrileri



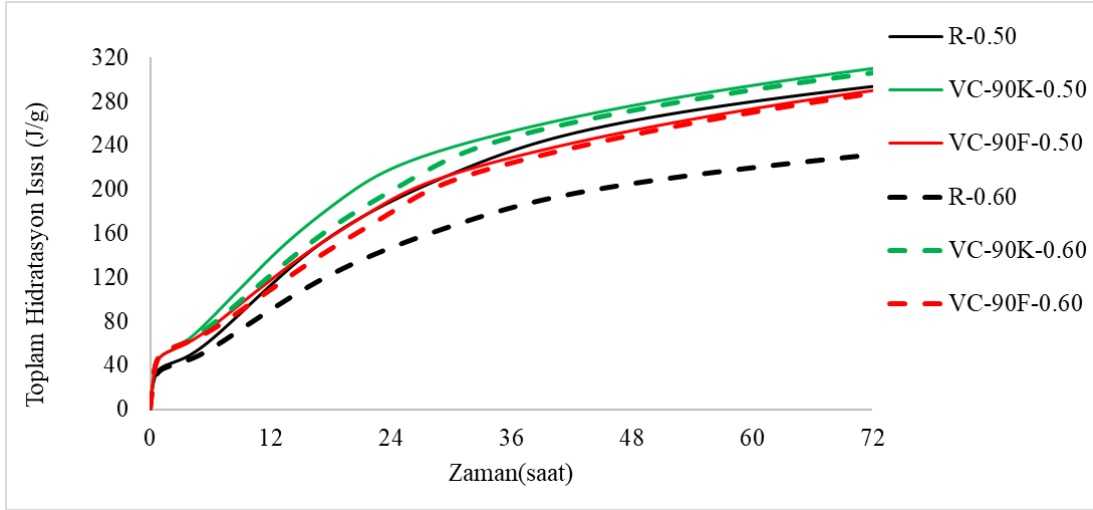
Şekil 4.5 : 10°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon ısısı eğrileri

10°C’de yapılan deney sonuçları incelendiğinde hem kalker tozu hem de filtre malzemesinin düşük sıcaklık değerlerinde hidratasyona etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır. Kalker tozu kullanımında uyku evresinin daha kısa sürede tamamlandığı, priz başlangıç ve bitiş sürelerinin kısaldığı görülmüştür. Buna karşın, ana hidratasyon tepesi değerinde belirgin bir yükseliş sağlayamadığı veya azalmaya neden olduğu söylenebilir. C₃S hidratasyonuna olan etkisi 10°C’de belirgin olarak ortaya çıkmamıştır. Kalker tozu 72 saat sonunda açığa çıkan hidratasyon ısısı değerinin artmasını sağlamıştır. Filtre malzemesi kullanımı da açığa çıkan ısıнын yükselmesine ve priz sürelerinin kısılmasına neden olmuştur. S/Ç oranının artması filtre malzemesinin etkinliğini arttırmıştır. VC-90K harcı hariç tüm harçların toplam hidratasyon ısısı değerleri S/Ç oranının artmasıyla artmıştır. Hidratasyon yavaşlama periyoduna kadar düşük S/Ç oranında daha hızlı, sonrasında ise yüksek S/Ç oranında daha hızlı ilerlemiştir. Şekil 4.14’te bu durum açıklanmaktadır. Grafiğe bakıldığında yaklaşık 13. saatten itibaren yüksek su/çimento oranına sahip harcın hidratasyon hızı düşük su/çimento oranıyla hazırlanan harçtan daha fazladır. S/Ç oranının fazla olması hidratasyonun yavaşlama evresinde hidratasyona girecek daha fazla miktarda su ve matriste hidrate ürünlerin oluşması için daha fazla hacim bulunması anlamına gelmektedir.

R, VC-90K ve VC-90F karışımlarına ait 20°C sabit sıcaklık değerinde elde edilen hidratasyon hızı grafiği Şekil 4.6’da ve 72 saat sonunda elde edilen toplam hidratasyon ısısı grafiği Şekil 4.7’de verilmektedir.

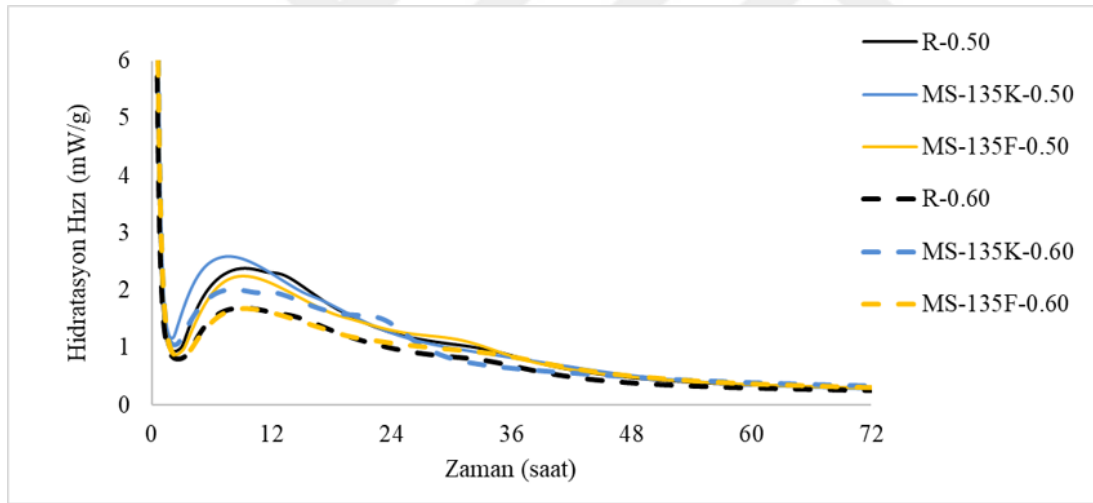


Şekil 4.6 : 20°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon hızı eğrileri



Şekil 4.7 : 20°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon ısısı eğrileri

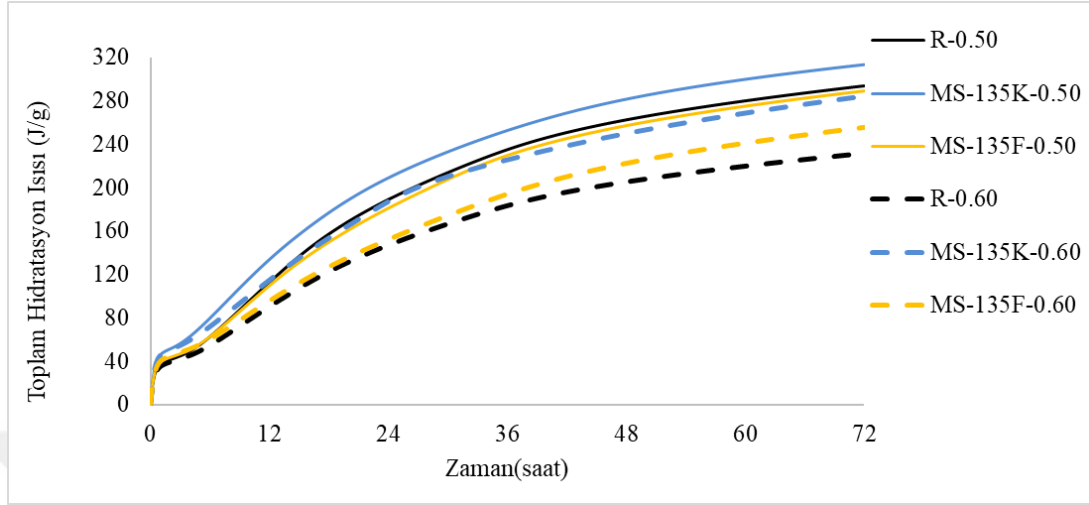
R, MS-135K ve MS-135F karışımlarına ait 20°C sabit sıcaklık değerinde elde edilen hidratasyon hızı grafiği Şekil 4.8’de ve hidratasyon ısısı grafiği Şekil 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.8 : 20°C sıcaklıkta MS-135K, MS-135F hidratasyon hızı eğrileri

20°C’de en yüksek hidratasyon hızı ve açığa çıkan toplam hidratasyon ısısı değeri kalker tozu içeren harçlardadır. Kalker tozu uyku evresinin süresini kısaltmış ve C_3S hidratasyonunun hızlanmasına neden olmuştur. İlk 24 saatte referans harca ve filtre malzemesi içeren harçlara göre tepkime hızı oldukça fazladır. Bileşenlerin ilk saatlerde hızlı tüketimi 24 saatten sonra anhidr tanelerin sayısını azaltmış ve harçların hidratasyon hızında belirgin bir düşüş gözlenmiştir. 0,50 S/Ç oranında filtre malzemesinin toplam hidratasyon ısısını artırmadığı tespit edilmiştir. S/Ç oranı 0,60’a çıkarıldığında ise açığa çıkardığı ısı miktarı 0,50 S/Ç oranındakine göre azalmasına

rağmen referansa göre daha yüksektir. Yüksek S/Ç oranında referans harcın yapısında boşluk miktarının fazla olması ve çimento tanelerinin birbirinden uzaklaşması hidratasyonu yavaşlatmıştır.

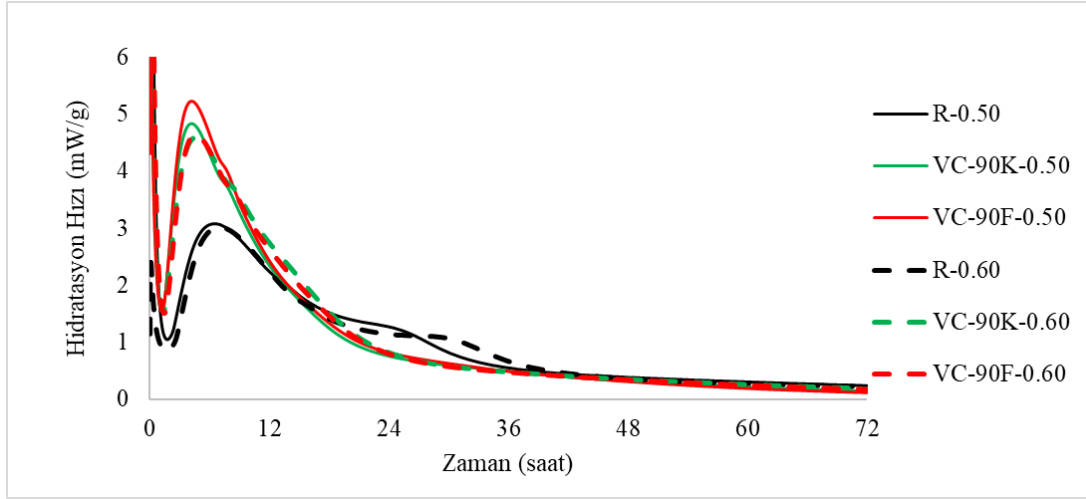


Şekil 4.9 : 20°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon ısısı eğrileri

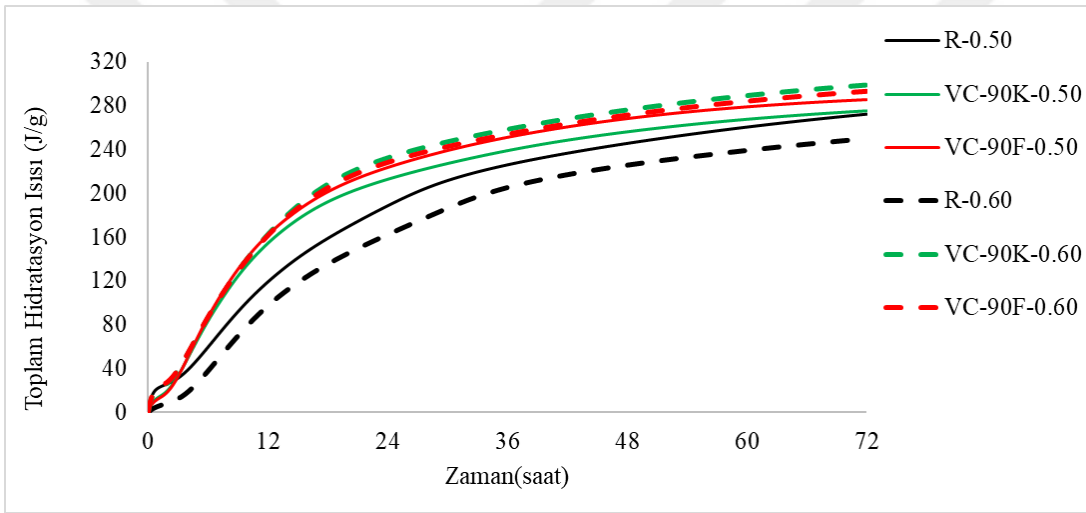
Sıcaklığın 10°C'den 20°C'ye yükselmesi genel olarak harçların hidratasyon hızını arttırmıştır. Uyku evresi daha kısa sürede tamamlanmış, hızlanma eğrisinin eğimi artmış ve ana hidratasyon zirvesi daha erken oluşmuştur. Maksimum hidratasyon hızı değeri de artmıştır. Ana tepe oluşumu daha kısa bir sürede tamamlanmış, sülfat tüketim zirvesi daha belirgin hale gelmiş ve iki zirve arasındaki zaman farkı azalmıştır. 20°C'deki priz başlangıç ve bitiş zamanları ve priz süreleri 10°C'deki değerlerin yaklaşık yarısıdır. Yavaşlama periyodu 10°C'de 12 saatten sonra başlarken, 20°C'de 12 saatten önce başlamıştır. Sıcaklığın ilk saatlerdeki hızlandırıcı etkisi daha fazla bileşenin hidrate olmasını sağladığı için hidratasyon 24 saatten sonra 10°C'ye göre daha düşük hızda ilerlemiştir.

R, VC-90K ve VC-90F karışımlarına ait 30°C sabit sıcaklık değerinde elde edilen hidratasyon hızı grafiği Şekil 4.10'da ve hidratasyon ısısı grafiği Şekil 4.11'de verilmektedir.

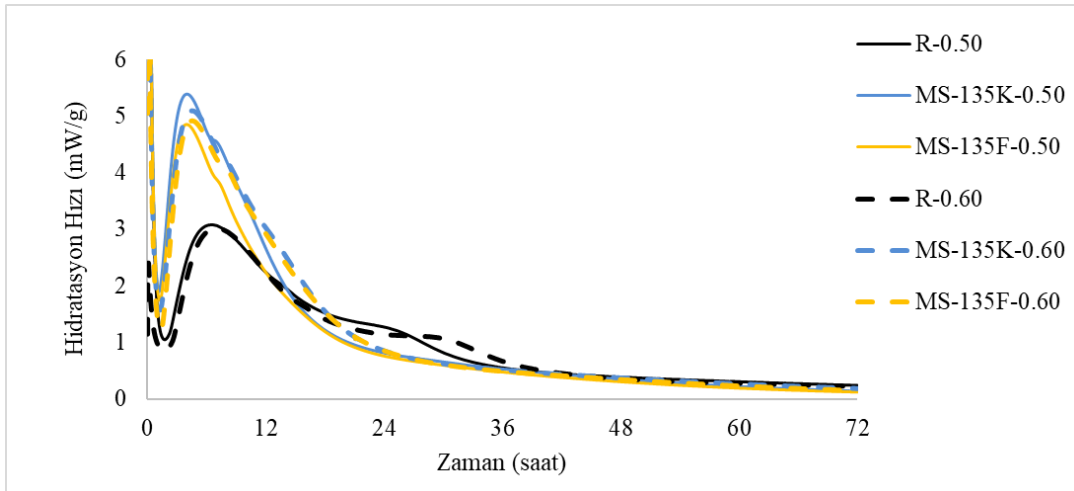
R, MS-135K ve MS-135F karışımlarına ait 30°C sabit sıcaklık değerinde elde edilen hidratasyon hızı grafiği Şekil 4.12'de ve hidratasyon ısısı grafiği Şekil 4.13'de verilmektedir.



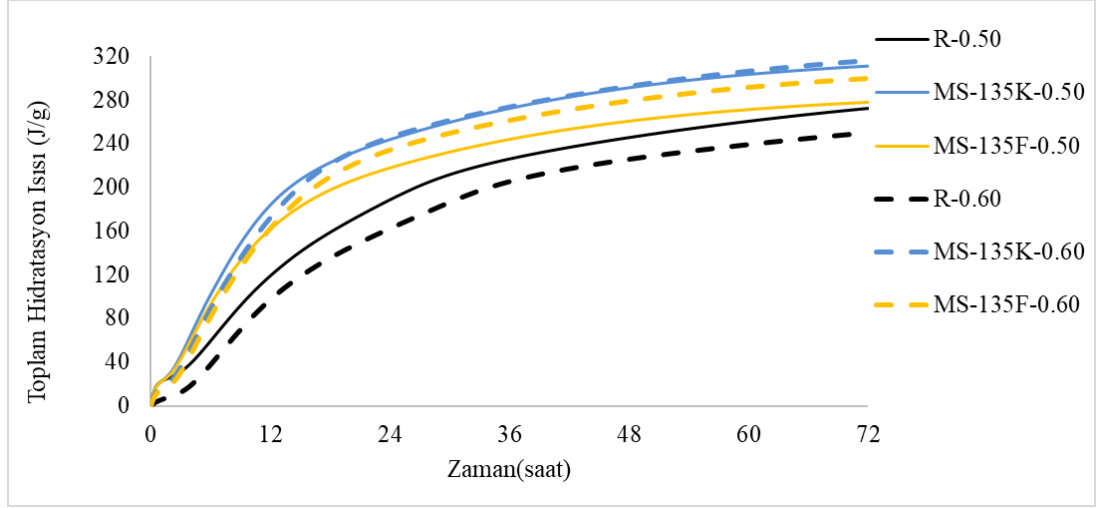
Şekil 4.10 : 30°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon hızı eğrileri



Şekil 4.11 : 30°C sıcaklıkta R, VC-90K, VC-90F hidratasyon ısısı eğrileri

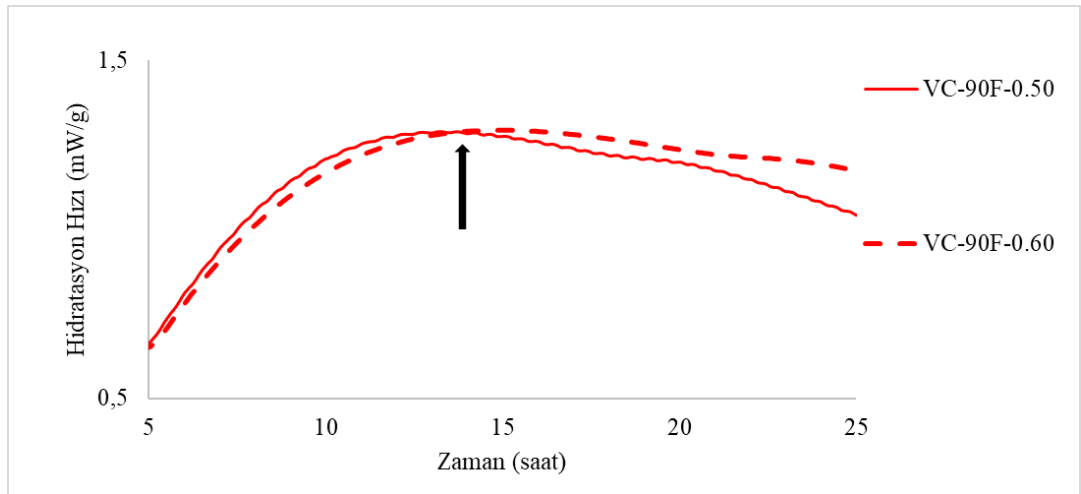


Şekil 4.12 : 30°C sıcaklıkta MS-135K, MS-135F hidratasyon hızı eğrileri



Şekil 4.13 : 30°C sıcaklıkta R, MS-135K, MS-135F hidratasyon ısısı eğrileri

Ortam sıcaklığı 30°C olduğunda hem kalker tozu hem de filtre malzemesinin hidratasyona etkisi oldukça fazladır. Her iki S/Ç oranında ve tüm harç setlerinde, kalker tozu veya filtre malzemesinin karışımlara dahil edilmesiyle hidratasyonun önemli ölçüde hızlandığı görülmüştür. Uyku evresinin normalden çok daha kısa sürede tamamlandığı ve C_3S hidratasyonu ile ilişkilendirilen ana ısı zirvesi değerinin referans harcinkinden en az 1,5 kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Priz başlangıç ve bitiş sürelerinin 1 saatten daha fazla kısaldığı görülmektedir. 72 saatte açığa çıkan toplam ısı miktarı her iki S/Ç oranında da referans harcın üzerindedir. Erken hidratasyonun büyük kısmının ilk birkaç saatte gerçekleştiği ve çok daha dar bir ana tepe oluşumunun gerçekleştiği söylenebilir. Sülfat tükenim zirvesi C_3S hidratasyonu zirvesinden çok kısa bir süre sonra oluşmuş ve iki oluşuma ait maksimum değerler arasındaki fark 20°C'dekine göre artmıştır.



Şekil 4.14 : Farklı S/Ç oranının hidratasyon hızına etkisi

Harçların hidratasyonuna özgü sayısal veriler sırasıyla Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Hidratasyon evreleri ve priz süreleri.

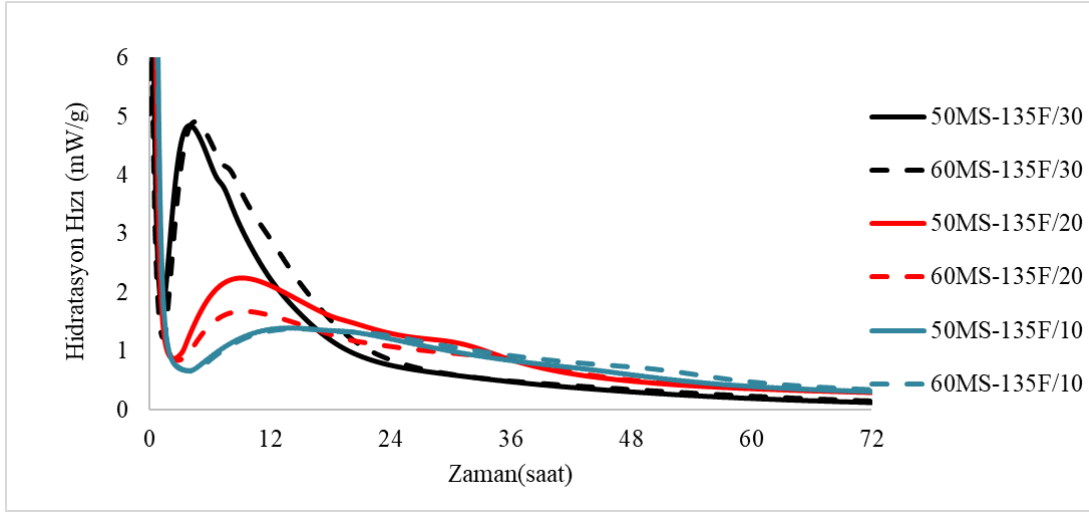
Sıcaklık (°C)	Karışım	S/Ç	Uyku evresi bitiş süresi (saat)	Maksimum hız (mW/g)	Maksimum hızın süresi (saat)	Priz başlangıcı (saat)	Priz sonu (saat)	Priz süresi (saat)
10	R	0.50	4,1	1,40	15,1	6,9	9,3	2,4
10	VC-90K	0.50	3,7	1,40	13,2	5,6	7,6	2,0
10	VC-90F	0.50	4,2	1,29	13,1	6,2	8,1	1,8
10	MS-135K	0.50	3,6	1,21	12,9	5,5	7,5	2,0
10	MS-135F	0.50	3,9	1,40	13,8	6,1	8,2	2,1
10	R	0.60	4,5	1,34	16,0	7,4	9,9	2,6
10	VC-90K	0.60	4,3	1,32	14,7	6,5	8,6	2,1
10	VC-90F	0.60	4,5	1,30	14,6	6,5	8,7	2,1
10	MS-135K	0.60	4,0	1,35	15,0	6,2	8,6	2,3
10	MS-135F	0.60	4,3	1,38	14,3	6,4	8,5	2,1
20	R	0.50	2,3	2,38	9,3	3,9	5,2	1,3
20	VC-90K	0.50	2,0	2,61	7,6	3,2	4,2	1,0
20	VC-90F	0.50	2,4	2,05	8,5	3,9	5,1	1,1
20	MS-135K	0.50	2,1	2,59	7,9	3,1	4,2	1,1
20	MS-135F	0.50	2,4	2,25	9,3	4,2	5,5	1,3
20	R	0.60	2,7	1,69	9,3	4,3	5,4	1,1
20	VC-90K	0.60	2,5	2,17	9,1	3,9	5,2	1,3
20	VC-90F	0.60	2,9	1,78	9,5	4,7	6,0	1,3
20	MS-135K	0.60	2,3	2,01	8,3	3,6	4,8	1,2
20	MS-135F	0.60	2,8	1,68	9,1	4,5	5,8	1,3
30	R	0.50	1,8	3,08	6,6	3,0	3,87	0,9
30	VC-90K	0.50	1,2	4,45	5,6	1,9	2,43	0,5
30	VC-90F	0.50	1,2	5,23	4,2	2,0	2,60	0,6
30	MS-135K	0.50	1,2	5,39	4,0	1,9	2,47	0,6
30	MS-135F	0.50	1,3	4,85	4,0	2,0	2,50	0,6
30	R	0.60	1,8	3,02	7,0	3,3	4,12	0,9
30	VC-90K	0.60	1,4	4,60	4,7	2,1	2,78	0,7
30	VC-90F	0.60	1,4	4,64	4,7	2,3	2,87	0,6
30	MS-135K	0.60	1,3	5,09	4,6	2,1	2,72	0,6
30	MS-135F	0.60	1,3	4,92	4,6	2,2	2,80	0,6

Sıcaklığın ve S/Ç oranının hidratasyona etkisini görmek amacıyla Şekil 4.15’te filtre malzemesinin kum ile ikame edilmesiyle üretilen harçların farklı sıcaklık değerleri altındaki hidratasyon hızı eğrileri ve Şekil 4.16’da kalker tozunun çimento ağırlığınca

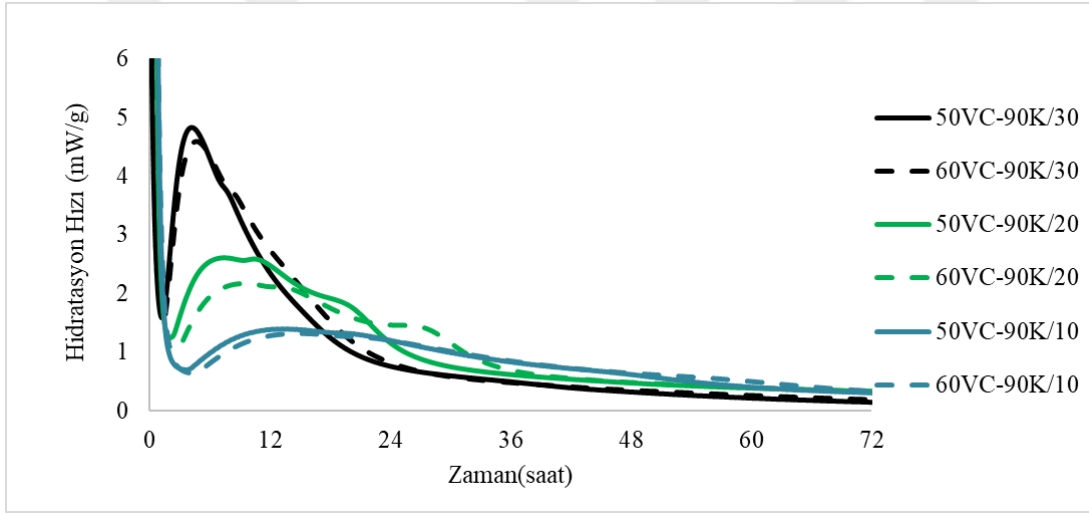
karışımlara ilave edilmesiyle üretilen harçların farklı sıcaklık değerleri altındaki hidratasyon hızı eğrileri verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Hidratasyon ısıları değerleri.

Sıcaklık (°C)	Karışım	S/Ç	Toplam salınan ısı ($\Sigma J/g$)			
			12. sa	24. sa	48. sa	72. sa
10	R	0.50	79	137	207	242
10	VC-90K	0.50	102	159	234	271
10	VC-90F	0.50	99	151	217	249
10	MS-135K	0.50	97	147	215	249
10	MS-135F	0.50	98	156	231	267
10	R	0.60	84	139	212	249
10	VC-90K	0.60	93	149	224	267
10	VC-90F	0.60	93	147	225	272
10	MS-135K	0.60	93	149	229	275
10	MS-135F	0.60	94	152	234	277
20	R	0.50	113	189	263	294
20	VC-90K	0.50	138	219	276	310
20	VC-90F	0.50	118	191	254	290
20	MS-135K	0.50	134	209	282	313
20	MS-135F	0.50	110	181	257	289
20	R	0.60	91	147	205	232
20	VC-90K	0.60	122	199	272	306
20	VC-90F	0.60	109	179	250	288
20	MS-135K	0.60	115	187	250	284
20	MS-135F	0.60	96	152	223	256
30	R	0.50	119	189	246	272
30	VC-90K	0.50	155	213	256	275
30	VC-90F	0.50	162	224	268	286
30	MS-135K	0.50	184	244	291	311
30	MS-135F	0.50	162	218	261	278
30	R	0.60	97	162	226	250
30	VC-90K	0.60	163	232	276	299
30	VC-90F	0.60	162	228	272	293
30	MS-135K	0.60	172	246	293	316
30	MS-135F	0.60	163	234	279	300



Şekil 4.15 : Sıcaklığın ve S/Ç oranının filtre malzemesi içeren harçların hidratasyonuna etkisi



Şekil 4.16 : Sıcaklığın ve S/Ç oranının kalker tozu içeren harçların hidratasyonuna etkisi

Sıcaklığın artmasıyla uyku evresine ait minimum noktanın değerinin arttığı ve uyku evresini temsil eden çukurun sola ötelendiği (daha erken ulaşıldığı) ve daraldığı (daha kısa sürede tamamlandığı) tespit edilmiştir. Hızlanma periyodunu temsil eden eğrinin eğimi sıcaklık artışıyla artmıştır. Daha dar ve daha erken oluşan bir ana tepe sıcaklığın yükselmesiyle elde edilmiştir. Sıcaklık artışıyla ilk saatlerde hızlanan hidratasyon yavaşlama evresinde daha düşük hızda ilerlemiştir. S/Ç oranının artmasıyla karışımdaki alkali konsantrasyonunun azalması nedeniyle ilk saatlerde hidratasyon hızı azalmıştır [94]. Çizelge 4.6'daki harçlara ait 3 günlük basınç dayanımları ile izotermal kalorimetre deneyi sonuçları karşılaştırıldığında filtre kalıntı malzemesinin ve kalker tozunun hidratasyonu hızlandırdığı ve erken yaş dayanımını arttırdığı anlaşılmaktadır.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında yapılan literatür araştırması ve deneyler sonucu elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

1. Filtre kalıntı malzemesinin özgül ağırlığının çimentoya oranla daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Hazır beton tesislerinde transmikserlerin yıkanması sırasında taze betona eklenen oldukça fazla miktardaki su filtre malzemesinin boşluklu yapıda olmasına neden olmaktadır.
2. Filtre malzemesinin ortalama tane boyutunun ($12\ \mu\text{m}$) oldukça küçük ve bu çalışmada kullanılan kalker tozuyla ($11\ \mu\text{m}$) aynı boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Filtre malzemesinin, kalker tozu gibi filler malzeme olarak kullanımı elde edilen deney sonuçlarına göre mümkün görünmektedir.
3. Filtre malzemesinin karışımlara eklenmesi işlenebilirlik açısından problemlere neden olmaktadır. Çimentoya oranla daha ince olması karışımın su ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle, %20 orandan daha fazla eklendiğinde kimyasal katkı kullanımına ihtiyaç duyulabilir.
4. Çimentoyla ikame edildiğinde filtre malzemesinin dayanımda düşüşe neden olduğu görülmüştür. %10 ikame oranında elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ortalaması referans harcın basınç dayanımının %90'ının üzerindedir. Gelecek çalışmalarda çimentoyla %10'dan daha az oranlarda ikame yoluna gidilmesi istenilen dayanımın sağlanması için optimum oranın bulunmasına katkı sunabilir.
5. Filtre malzemesinin ilave malzeme veya kum ile ikame malzemesi olarak kullanımında tüm yaşlarda harçların basınç dayanımları artmıştır. Filtre malzemesinin köşeli tane yapısının çimento-agrega arasındaki ya da çimento taneleri arasındaki aderansı arttırdığı söylenebilir. Özellikle harçların erken yaş dayanımlarında görülen artış daha fazladır. İzotermal kalorimetre deneyinde elde edilen sonuçlar da hidrasyonun ilk saatlerde yoğunlaştığını ve dayanım

kazanımının hızlandığını göstermiştir. Filtre malzemesinin yüksek pH değeri CH oluşumunu hızlandırıp karışımda bulunan Ca^+ iyon konsantrasyonunu düşürmektedir. Uyku evresinin bitişini karakterize eden hidrasyon hızındaki keskin artışın Ca^+ konsantrasyonunun azalmasından kaynaklandığı ve C_3A reaktivitesinin yüksek pH değerlerinde arttığı literatürde daha önce belirtilmiştir [73]. Ayrıca, filtre malzemesi kullanımında hızlanan reaksiyonda ilk dakikalardan itibaren etrenjit miktarının artması, 32 mol su molekülü içeren etrenjitin karışımdaki su miktarını azaltıp erken yaşlarda daha yoğun bir yapı oluşumu sağladığından bahsedilebilir. Filtre malzemesinin taze harcın akışkanlığını azaltması da bu şekilde açıklanabilir [73].

6. 10°C 'de filtre malzemesi içeren harçların 72 saat sonunda elde edilen ısı değerleri referans harca göre daha yüksektir. Filtre malzemesinin yapısında bulunan C-S-H'lar çimento hidrasyonunu hızlandıran çekirdeklenme etkisi yaratarak ilk günlerde açığa çıkan ısı miktarını arttırmaktadır.
7. 30°C 'de gerçekleştirilen izotermal kalorimetre deneyinden elde edilen sonuçlara göre, filtre malzemesinin bu sıcaklıktaki hidrasyon hızını ve hidrasyon sırasında açığa çıkan ısı miktarını arttırıcı etkisi diğer ortam sıcaklıklarına göre en üst seviyededir. Sıcaklık artışıyla birlikte çimento tanelerinin çözünme hızı ve hidrate ürünlerin oluşma hızı artmıştır. Anhidrit tanelerin hızlı tükenmesi hidrasyon hızı grafiğinde daha dar bir ana hidrasyon zirvesi oluşturmuştur. Harçların priz süreleri referans harcınkilere göre çok daha erken gerçekleşmiştir.
8. Kalker tozu tek başına kullanıldığında harçların akışkanlığını azaltmamışken, basınç dayanımını tüm yaşlarda arttırmış ve hidrasyonu tüm sıcaklık değerlerinde hızlandırmıştır. Filtre malzemesi ve kalker tozunun birlikte kullanılması karışımların mekanik özelliklerini olumlu etkilemiş ve filtre malzemesinin tek başına kullanımından kaynaklanan işlenebilirlik problemini azaltmıştır.

Genel olarak, filtre malzemesinin yeterince ince öğütüldüğü takdirde beton üretiminde yeniden kullanılmasının betonun performansını olumlu etkileyeceği söylenebilir. Çimento ile ikame edilmesinin hem ekonomiye hem de sektör içinde gerçekleştirilen sürdürülebilirlik hedeflerine daha fazla

katkıda bulunacağı açıktır. Bu çalışma neticesinde çimento ile ikame oranı için üst sınırın %10'dan daha az olduğu anlaşılmıştır. İnce agrega ile %20'den daha fazla oranda ikame edilmesi basınç dayanımı bakımından optimum oranın elde edilmesi için denenebilir. Ancak yerleştirme problemlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Kalker tozu gibi ince taneler içermesi filtre malzemesinin filler malzeme olarak kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Soğuk hava şartlarında hidratasyonu ve erken yaşlarda dayanım kazanımını hızlandırıcı etkisi olduğu görülmüştür. Kış aylarında üretilen betonlarda özellikle ince agrega yerine kullanılarak beton performansını ilk saatlerde iyileştirebilir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılırsa taze beton akışkanlığının azalmasına, betonun erken priz almasına ve beton sıcaklığının gereğinden fazla artmasına neden olabileceği için önlemler alınması gerekebilir. Hazır beton tesislerinde beton karışımına dahil edilmesinin herhangi bir malzeme veya lojistik maliyeti olmamakla beraber, öğütülmesi ve özellikle etüvde kurutulması için harcanan enerji hesaba katılmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] **Doğan, Ü.A.** (2008). Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Andrew, R. M.** (2019). *Global CO₂ emissions from cement production, 1928 - 2018*. 1675–1710.
- [3] **Guggemos, A. A., & Horvath, A.** (2005). Comparison of environmental effects of steel- and concrete-framed buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2), 93–101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(93))
- [4] **Silva, M., & Naik, T. R.** (2010). Sustainable use of resources - Recycling of sewage treatment plant water in concrete. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, November 1996*, 1731–1740.
- [5] **Lobo, C., Guthrie, W. F., & Kacker, R.** (1995). A Study on the Reuse of Plastic Concrete Using Extended Set-Retarding Admixtures. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 100(5), 575. <https://doi.org/10.6028/jres.100.043>
- [6] **Paolini, M., & Khurana, R.** (1998). Admixtures for recycling of waste concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20(2–3), 221–229. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(97\)00066-8](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(97)00066-8)
- [7] **Borger, J., Carrasquillo, R., Fowler, D.** (1994). Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete, *Advanced Cement Based Materials* 1, 267–274.
- [8] **TS EN 206:2013+A1.** (2017). Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [9] **TS EN 196-1.** (2016). Çimento deney metodları Bölüm: 3 Dayanım Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [10] **Wieslaw Kurdowski.** (2019). Cement and Concrete Chemistry. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [11] **Onaran, K.** (2009). Kırılma. *Malzeme Bilimi* (pp. 247-249). Bilim Teknik Yayınevi.

- [12] **Harrison, T.** (2003). Concrete properties: Setting and hardening. In *Advanced Concrete Technology*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50251-2>
- [13] **Li, L. G., & Kwan, A. K. H.** (2015). Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 60, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.006>
- [14] **Oey, T., Kumar, A., Bullard, J. W., Neithalath, N., & Sant, G.** (2013). The filler effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(6), 1978–1990. <https://doi.org/10.1111/jace.12264>
- [15] **Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, A. E. M., & Mohamed, B.** (2014). Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 53(2), 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>
- [16] **Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L.** (2007). Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>
- [17] **Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, G., & Theodossis, D.** (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1679–1683. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00372-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00372-0)
- [18] **González, M., & Irassar, E. F.** (1998). Effect of Limestone Filler on the Sulfate Resistance of Low. *Cement and Concrete Research*, 28(11), 1655–1667.
- [19] **Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., & Jia, H.** (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>
- [20] **TS 1248.** (2012). Betonun hazırlanması, dökümü ve bakımı kuralları – Anormal hava şartlarında. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [21] **Wang, X., Saifullah, H. A., Nishikawa, H., & Nakarai, K.** (2020). Effect of water–cement ratio, aggregate type, and curing temperature on the fracture energy of concrete. *Construction and Building Materials*, 259, 119646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119646>
- [22] **Beaudoin, J., & Odler, I.** (2019). Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (Fourth Edi). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00005-8>

- [23] **TS EN 13670.** (2010). Beton Yapıların İnşaatı. *Türk Standartlar Enstitüsü*, Ankara.
- [24] **Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J.** (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- [25] **ASTM-C1753/C1753M.** (2015). Standard Practice for Evaluating Early Hydration of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Thermal Measurements. *Astm*, September, 1–19. <https://doi.org/10.1520/C1753>
- [26] **Zákoutský, J., Tydlitát, V., & Černý, R.** (2012). Effect of temperature on the early-stage hydration characteristics of Portland cement: A large-volume calorimetric study. *Construction and Building Materials*, 36, 969–976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.025>
- [27] **Sandberg, P.**, (n.d.). Optimization of cementitious materials. Application note AN-08. *Calmetrix*. Arlington, MA, USA.
- [28] **Šiler, P., Kolářová, I., Novotný, R., Másilko, J., Pořízka, J., Bednárek, J., Švec, J., & Opravil, T.** (2018). Application of isothermal and isoperibolic calorimetry to assess the effect of zinc on cement hydration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(1), 27–40. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6815-1>
- [29] **Scrivener, K.** (2003). Calcium aluminate cements. In *Advanced Concrete Technology*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50278-0>
- [30] **Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J., & Delgado, A. H.** (2002). Introduction to Portland Cement Concrete. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, 35–69. <https://doi.org/10.1016/b978-081551487-9.50004-9>
- [31] **Kumar, M., Singh, S. K., & Singh, N. P.** (2012). Heat evolution during the hydration of Portland cement in the presence of fly ash, calcium hydroxide and super plasticizer. *Thermochimica Acta*, 548, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.028>
- [32] **Quennoz, A., & Scrivener, K. L.** (2013). Interactions between alite and C3A-gypsum hydrations in model cements. *Cement and Concrete Research*, 44, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.018>
- [33] **Aqel, M., & Panesar, D. K.** (2016). Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. *Construction and Building Materials*, 113, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.031>

- [34] Tydlitát, V., Matas, T., & Černý, R. (2014). Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement. *Construction and Building Materials*, 50, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.020>
- [35] Ge, Z., Wang, K., Sandberg, P. J., & Ruiz, J. M. (2009). Characterization and performance prediction of cement-based materials using a simple isothermal calorimeter. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(3), 355–366. <https://doi.org/10.3151/jact.7.355>
- [36] Palou, M. T., Kuzielová, E., Žemlička, M., Boháč, M., & Novotný, R. (2016). The effect of curing temperature on the hydration of binary Portland cement: Slag and Portland cement—metakaolin-blended cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125(3), 1301–1310. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5395-9>
- [37] Bergold, S. T., Goetz-Neunhoffer, F., & Neubauer, J. (2017). Interaction of silicate and aluminate reaction in a synthetic cement system: Implications for the process of alite hydration. *Cement and Concrete Research*, 93, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.12.006>
- [38] Andrade Neto, J. da S., De la Torre, A. G., & Kirchheim, A. P. (2021). Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review. *Construction and Building Materials*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122428>
- [39] Paine, K. A. (2019). Physicochemical and mechanical properties of Portland cements. In *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (Fourth Edi). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00007-1>
- [40] Akkaş, A., Avcı, H., Başığit, C. (2010). Türkiye’de Hazır Beton Maliyetini Etkileyen Parametreler ve Bölgelere Göre Maliyet Analizi, *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 1, 1-8.
- [41] Akakın, T., Kılınç, C., Işık, A., Zengin, H. (2014). Hazır beton sektörü ve kullanımındaki gelişmeler, *Dunya – İnşaat Dergisi*.
- [42] Kazaz, A., Ulubeyli, S., Er1, B., Arslan, A., & Atici, M. (2016). European Journal of Engineering and Natural Sciences Identification of Waste Sources in Ready-Mixed Concrete Plants. *European Journal of Engineering and Natural Sciences CODEN*, 1(1), 9–14.
- [43] Aziz, R. F. (2018). Statistical model for predicting and improving ready mixed concrete batch plants’ performance ratio under different influences. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1797–1809. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.06.016>
- [44] TS 1247 (2019). Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında). *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [45] TS EN 13670 (2010). Beton yapıların inşaatı. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [46] **Cosgun, N., & Esin, T.** (2006). A study regarding the environmental management system of ready mixed concrete production in Turkey. *Building and Environment*, 41(8), 1099–1105. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.012>
- [47] **ERMCO.** (2014). *Ready-mixed concrete industry statistics. Year 2013. July*, 21. <http://www.ermco.eu/documents/statistics/ermco-statistics-y-2013-final-version.pdf>
- [48] **Andaç, M. S., Oral, E.** (2016). Hazır Beton Üretiminde Atık Yönetimi: Türkiye’deki Taze Beton Atığının Durumu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31, 85–92.
- [49] **De Schepper, M., Van den Heede, P., Van Driessche, I., & De Belie, N.** (2014). Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. *Materials*, 7(8), 6010–6027. <https://doi.org/10.3390/ma7086010>
- [50] **Sealey, B. J., Phillips, P. S., & Hill, G. J.** (2001). Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 32(3–4), 321–331. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00069-6)
- [51] **World Business Council for Sustainable Development.** (2012). *The Cement Sustainability Initiative: executive brief*.
- [52] **Correia, S. L., Souza, F. L., Dienstmann, G., & Segadães, A. M.** (2009). Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste Management*, 29(11), 2886–2891. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.014>
- [53] **Vieira, L. de B. P., & Figueiredo, A. D. de.** (2016). Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Management*, 56, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.015>
- [54] **Tam, V. W. Y., & Tam, C. M.** (2007). Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.005>
- [55] **Kou, S. C., Zhan, B. J., & Poon, C. S.** (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 549–556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.027>
- [56] **Audo, M., Mahieux, P. Y., Turcry, P., Chateau, L., & Churlaud, C.** (2018). Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. *Journal of*

Cleaner Production, 183, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.155>

- [57] **Audo, M., Mahieux, P. Y., & Turcry, P.** (2016). Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. *Construction and Building Materials*, 112, 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.044>
- [58] **Xuan, D., Poon, C. S., & Zheng, W.** (2018). Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136 (April), 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.007>
- [59] **Ferrari, G., Miyamoto, M., & Ferrari, A.** (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, 67(PART C), 353–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.008>
- [60] **Koçar, B.** (2014). Sürdürülebilir beton için CLR-S atık su geri dönüşüm sistemi*. *Hazır Beton Dergisi* (Mayıs-Haziran 2014), 58–60.
- [61] **Doğan, Ü. A., & Özkul, M. H.** (2019). Hazır beton tesisinde geri kazanılan suyun beton basınç dayanımı ve kılcalık üzerine etkisi. *Hazır Beton Dergisi* (Temmuz-Ağustos 2019), 73–78.
- [62] **TS EN 1008** (2003). Beton- karma suyu- numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [63] **Türkiye Hazır Beton Birliği.** (2018). Betonda geri kazanılan suyun kullanımı. Retrieved from <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/durum-raporlari/betonda-geri-kazanilan-suyun-kullanimi/>
- [64] **Tsimas, S., & Zervaki, M.** (2011). Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. *Management of Environmental Quality* 22(1), 7–17. <https://doi.org/10.1108/14777831111098444>
- [65] **Chatveera, B., & Lertwattanaruk, P.** (2009). Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1901–1908. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.008>
- [66] **Su, N., Miao, B., & Liu, F. S.** (2002). Effect of wash water and underground water on properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(5), 777–782. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00762-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00762-1)
- [67] **Asadollahfardi, G., Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A., & Asadollahfardi, R.** (2015). Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of

fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.053>

- [68] **Ekolu, S. O., & Dawneerangen, A.** (2010). Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for reuse in concrete. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 52(2), 77–82.
- [69] **Sandrolini, F., & Franzoni, E.** (2001). Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 485–489. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00468-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00468-3)
- [70] **Chatveera, B., Lertwattanakul, P., & Makul, N.** (2006). Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.001>
- [71] **Klus, L., Václavík, V., Dvorský, T., Svoboda, J., & Botula, J.** (2019). Reuse of waste material “waste sludge water” from a concrete plant in cement composites: A case study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(21), 1–13. <https://doi.org/10.3390/app9214519>
- [72] **Zervaki, M., Leptokaridis, C., & Tsimas, S.** (2013). Reuse of by-products from ready-mixed concrete plants for the production of cement mortars. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(2), 152–162. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2013.01.001>
- [73] **de Matos, P. R., Prudêncio, L. R., Pilar, R., Gleize, P. J. P., & Pelisser, F.** (2020). Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties. *Construction and Building Materials*, 230, 116981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116981>
- [74] **Shahidan, S., Abdul Kadir, A., Hai Yee, L., Ramzi, N. I. R., & Sheikh, F.** (2017). Utilizing Slurry and Carwash Wastewater as Fresh Water Replacement in Concrete Properties. *MATEC Web of Conferences*, 103. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710301020>
- [75] **Klus, L., Václavík, V., Dvorský, T., Svoboda, J., & Papesch, R.** (2017). The utilization of wastewater from a concrete plant in the production of cement composites. *Buildings*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/buildings7040120>
- [76] **Özkul, M. H., & Doğan, Ü. A.** (2016). Transmikser yıkama suyunun hazır beton üretiminde geri dönüşümü*. *Hazır Beton Dergisi* (Eylül-Ekim 2016), 82–86.
- [77] **Tang, P., Xuan, D., Poon, C. S., & Tsang, D. C. W.** (2019). Valorization of concrete slurry waste (CSW) and fine incineration bottom ash (IBA)

into cold bonded lightweight aggregates (CBLAs): Feasibility and influence of binder types. *Journal of Hazardous Materials*, 368(January), 689–697. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.112>

- [78] **Anastasiou, E., Papachristoforou, M., Anesiadis, D., Zafeiridis, K., & Tsardaka, E. C.** (2018). Investigation of the use of recycled concrete aggregates originating from a single ready-mix concrete plant. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/app8112149>
- [79] **Hossain, M. U., Xuan, D., & Poon, C. S.** (2017). Sustainable management and utilisation of concrete slurry waste: A case study in Hong Kong. *Waste Management*, 61, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.038>
- [80] **Vaičiukynienė, D., Pundienė, I., Kantautas, A., Augonis, A., Janavičius, E., Vaičiukynas, V., & Alobeid, J.** (2020). Synergistic effect of dry sludge from waste wash water of concrete plants and zeolitic by-product on the properties of ternary blended ordinary Portland cements. *Journal of Cleaner Production*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118493>
- [81] **Ann, K. Y., & Song, H. W.** (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 49(11), 4113–4133. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007>
- [82] **Xuan, D., Zhan, B., Poon, C. S., & Zheng, W.** (2016). Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. *Journal of Hazardous Materials*, 312, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.036>
- [83] **Wasserman, B.** (2012). Wash Water in the Mix: Effects on the Compressive Strength of Concrete. *International Journal of Construction Education and Research*, 8(4), 301–316. <https://doi.org/10.1080/15578771.2011.633974>
- [84] **Kou, S. C., Zhan, B. J., & Poon, C. S.** (2012). Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 36, 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063>
- [85] **Férriz-Papia, J. A.** (2014). Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. *Materiales de Construcción*, 64(313), 1–9. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00113>
- [86] **Kadir, A. A., Shahidan, S., Yee, L. H., Hassan, M. I. H., & Abdullah, M. M. A. B.** (2016). The effect on slurry water as a fresh water replacement in concrete properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/133/1/012041>
- [87] **Rughooputh, R., Rana, J. O., & Joorawon, K.** (2017). Possibility of using fresh concrete waste in concrete for non structural civil engineering works as

a waste management strategy. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(1), 94–99. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0052-1>

- [88] **Silva, D. O. F., Quattrone, M., Romano, R. C. O., & Angulo, S. C.** (2020). Reuse of fines from ready-mix concrete washing slurries. *Resources, Conservation and Recycling*, 155 (March 2019). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104653>
- [89] **He, X., Zheng, Z., Ma, M., Su, Y., Yang, J., Tan, H., Wang, Y., & Strnadel, B.** (2020). New treatment technology: The use of wet-milling concrete slurry waste to substitute cement. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118347>
- [90] **TS EN 197-1.** (2012). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [91] **Sua-iam, G., & Makul, N.** (2013). Use of limestone powder during incorporation of Pb-containing cathode ray tube waste in self-compacting concrete. *Journal of Environmental Management*, 128, 931–940. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.031>
- [92] **Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., & Jia, H.** (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>
- [93] **Vollpracht, A., Lothenbach, B., Snellings, R., & Haufe, J.** (2016). The pore solution of blended cements: a review. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(8), 3341–3367. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0724-1>.
- [94] **Gedik, A. G., Doğan, Ü. A.** (2021). Effects of Washwater Sludge Obtained From Ready-Mixed Concrete Plants on Hydration and Mechanical Properties of Mortar. *ACE 2020-2021, 14th International Congress on Advances in Civil Engineering 2020-2021, vol. 1, pp. 124-130*, September 6-8, 2021, Istanbul, Turkey.



EKLER

EK A: Regresyon analizleri

The regression equation is
7 Günlük Basınç Dayanımı = - 213 + 0,208 C + 0,132 K + 0,109 F + 0,0979 S

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-212,87	19,50	-10,92	0,000
C	0,20846	0,01953	10,67	0,000
K	0,13244	0,01435	9,23	0,000
F	0,10857	0,01370	7,93	0,000
S	0,09786	0,01152	8,50	0,000

S = 2,97663 R-Sq = 88,4% R-Sq(adj) = 87,0%

Şekil A.1 : 7 günlük basınç dayanımı regresyon analizi

The regression equation is
28 Günlük Basınç Dayanımı = - 206 + 0,233 C + 0,122 K + 0,104 F + 0,0926 S

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-206,44	19,77	-10,44	0,000
C	0,23289	0,01980	11,76	0,000
K	0,12177	0,01455	8,37	0,000
F	0,10436	0,01389	7,51	0,000
S	0,09259	0,01168	7,93	0,000

S = 3,01834 R-Sq = 88,8% R-Sq(adj) = 87,5%

Şekil A.2 : 28 günlük basınç dayanımı regresyon analizi

The regression equation is
90 Günlük Basınç Dayanımı = 24,9 - 91,4 W/C + 0,151 C + 0,0362 K + 0,0180 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	24,86	13,99	1,78	0,085
W/C	-91,44	10,86	-8,42	0,000
C	0,15121	0,02195	6,89	0,000
K	0,036165	0,006994	5,17	0,000
F	0,018009	0,006757	2,67	0,012

S = 2,97821 R-Sq = 90,1% R-Sq(adj) = 88,9%

Şekil A.3 : 90 günlük basınç dayanımı regresyon analizi

The regression equation is

$$3 \text{ Günlük Basınç Dayanımı} = 44,9 - 58,3 \text{ W/C} + 0,0298 \text{ K} + 0,0282 \text{ F}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	44,907	1,512	29,69	0,000
W/C	-58,323	2,686	-21,72	0,000
K	0,029827	0,002787	10,70	0,000
F	0,028202	0,002787	10,12	0,000

S = 0,734911 R-Sq = 96,0% R-Sq(adj) = 95,6%

Şekil A.4 : 3 günlük basınç dayanımı regresyon analizi

The regression equation is

$$J(12 \text{ saat}) = 40,7 + 3,03 \text{ T} + 0,236 \text{ K} + 0,163 \text{ F}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	40,679	8,134	5,00	0,000
T	3,0350	0,3116	9,74	0,000
K	0,23639	0,05280	4,48	0,000
F	0,16253	0,05280	3,08	0,005

S = 13,9335 R-Sq = 81,6% R-Sq(adj) = 79,4%

Şekil A.5 : 12 saatlik hidrasyon ısısı regresyon analizi

The regression equation is

$$J(24 \text{ saat}) = 95,0 + 3,52 \text{ T} + 0,245 \text{ K} + 0,147 \text{ F}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	95,004	9,467	10,04	0,000
T	3,5200	0,3626	9,71	0,000
K	0,24545	0,06145	3,99	0,000
F	0,14740	0,06145	2,40	0,024

S = 16,2168 R-Sq = 80,9% R-Sq(adj) = 78,7%

Şekil A.6 : 24 saatlik hidrasyon ısısı regresyon analizi

The regression equation is
 $J(48 \text{ saat}) = 181 + 2,20 T + 0,227 K + 0,192 F$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	180,641	7,192	25,12	0,000
T	2,2000	0,2508	8,77	0,000
K	0,22663	0,05205	4,35	0,000
F	0,19247	0,05205	3,70	0,002

S = 11,2159 R-Sq = 85,9% R-Sq(adj) = 83,3%

Şekil A.7 : 48 saatlik hidratasyon ısısı regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)

The regression equation is
 $J(72 \text{ saat}) = 229 + 1,31 T + 0,226 K + 0,181 F$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	229,110	8,183	28,00	0,000
T	1,3100	0,2854	4,59	0,000
K	0,22591	0,05923	3,81	0,002
F	0,18137	0,05923	3,06	0,007

S = 12,7621 R-Sq = 69,5% R-Sq(adj) = 63,8%

Şekil A.8 : 72 saatlik hidratasyon ısısı regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)

	J(12 saat)	J(24 saat)	J(48 saat)
J(24 saat)	0,974 0,000		
J(48 saat)	0,885 0,000	0,952 0,000	
J(72 saat)	0,728 0,000	0,823 0,000	0,950 0,000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Şekil A.9 : 12, 24, 48 ve 72 saatteki hidratasyon ısısı değerlerinin korelasyonu

The regression equation is
 Uyku Evresi = 3,86 - 0,136 T + 2,95 W/C - 0,00241 K

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,8583	0,4802	8,03	0,000
T	-0,136000	0,005179	-26,26	0,000
W/C	2,9470	0,8458	3,48	0,002
K	-0,0024082	0,0006907	-3,49	0,002

S = 0,231598 R-Sq = 96,5% R-Sq(adj) = 96,1%

Şekil A.10 : Uyku evresi (saat) regresyon analizi

The regression equation is
 Priz Başlangıcı = 6,47 - 0,203 T + 4,16 W/C - 0,00734 K - 0,00367 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,4725	0,7336	8,82	0,000
T	-0,202500	0,007789	-26,00	0,000
W/C	4,158	1,273	3,27	0,003
K	-0,007338	0,001321	-5,56	0,000
F	-0,003666	0,001321	-2,78	0,010

S = 0,348336 R-Sq = 96,6% R-Sq(adj) = 96,1%

Şekil A.11 : Priz başlangıcı (saat) regresyon analizi

The regression equation is
 Priz Sonu = 8,97 - 0,279 T + 5,05 W/C - 0,00862 K - 0,00484 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,972	1,027	8,74	0,000
T	-0,27920	0,01090	-25,61	0,000
W/C	5,051	1,782	2,83	0,009
K	-0,008615	0,001849	-4,66	0,000
F	-0,004841	0,001849	-2,62	0,015

S = 0,487563 R-Sq = 96,5% R-Sq(adj) = 95,9%

Şekil A.12 : Priz sonu (saat) regresyon analizi

The regression equation is
Priz Süresi = 3,11 - 0,0745 T - 0,00215 K - 0,00242 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,11448	0,09149	34,04	0,000
T	-0,074500	0,003191	-23,35	0,000
K	-0,0021479	0,0006622	-3,24	0,005
F	-0,0024151	0,0006622	-3,65	0,002

S = 0,142686 R-Sq = 97,2% R-Sq(adj) = 96,7%

Şekil A.13 : Priz süresi (saat) regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)

The regression equation is
Maks. Hız Süresi = 16,1 - 0,464 T + 6,47 W/C - 0,0115 K - 0,00967 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	16,083	1,600	10,05	0,000
T	-0,46350	0,01699	-27,28	0,000
W/C	6,468	2,777	2,33	0,028
K	-0,011479	0,002881	-3,98	0,001
F	-0,009669	0,002881	-3,36	0,003

S = 0,759767 R-Sq = 96,8% R-Sq(adj) = 96,3%

Şekil A.14 : Maksimum hız süresi (saat) regresyon analizi

The regression equation is
Maksimum Hız = - 0,982 + 0,159 T + 0,00528 K + 0,00421 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,9823	0,3556	-2,76	0,010
T	0,15940	0,01362	11,70	0,000
K	0,005281	0,002308	2,29	0,031
F	0,004213	0,002308	1,83	0,079

S = 0,609148 R-Sq = 84,6% R-Sq(adj) = 82,8%

Şekil A.15 : Maksimum hız (mW/g) regresyon analizi

The regression equation is
Maksimum Hız = - 0,900 + 0,159 T + 0,00673 K + 0,00668 F

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,8997	0,3066	-2,93	0,010
T	0,15940	0,01069	14,91	0,000
K	0,006728	0,002219	3,03	0,008
F	0,006676	0,002219	3,01	0,008

S = 0,478148 R-Sq = 93,6% R-Sq(adj) = 92,4%

Şekil A.16 : Maksimum hız regresyon analizi (20°C’de elde edilen sonuçlar çıkarıldığında)

	J(12 saat)	J(24 saat)
J(24 saat)	0,974 0,000	
Maksimum Hız	0,948 0,000	0,905 0,000

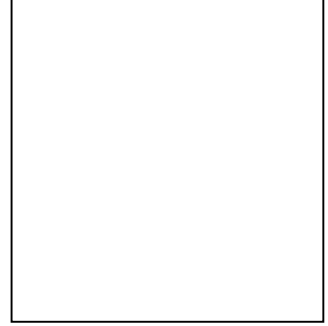
Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Şekil A.17 : Maksimum hız, 12 saatlik ısı ve 24 saatlik ısı korelasyonu

Pearson correlation of Maksimum Hız and Priz Süresi = -0,923
P-Value = 0,000

Şekil A.18 : Maksimum hız ve priz süresi korelasyonu

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad

: Adil Görkem GEDİK



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mühendisliği

YÜKSEKLİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gedik, A. G., Doğan, Ü. A.** (2021). Effects of Washwater Sludge Obtained From Ready-Mixed Concrete Plants on Hydration and Mechanical Properties of Mortar. *ACE 2020-2021, 14th International Congress on Advances in Civil Engineering 2020-2021, vol. 1, pp. 124-130*, September 6-8, 2021, Istanbul, Turkey.