T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TRANSMİKSER YIKAMA SUYUNUN GEOPOLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

BURAK BODUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

TEMMUZ - 2022
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Burak BODUR tarafından hazırlanan "**Transmikser Yıkama Suyunun Geopolimer Kompozit Üretiminde Kullanılması**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **19.07.2022** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr.Öğr.Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç.Dr. Sadık Alper YILDIZEL Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr.Öğr.Üyesi Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V. Prof. Dr. İzzet ŞENER .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Burak BODUR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRANSMİKSER YIKAMA SUYUNUN GEOPOLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

BURAK BODUR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Bu çalışmada, transmikser yıkama suyu ve uçucu kül katkılı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Karışımlarda bağlayıcı dozajı 1000 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Karışımların ana bağlayıcısı olan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun yerine %25 ve %50 oranında uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum metasilikat tozu, toplam bağlayıcının %7,5 ve %15'i oranında kullanılmıştır. Karışımların priz sonu süreleri 165-230 dakika arasında değişmektedir. UK oranı arttıkça priz sonu süreleri uzamıştır. Tüm karışımların yayılma çapı 150 mm'den fazladır. Karışımların etüv kurusu yoğunlukları 2000 kg/m^3'den düşüktür. UK oranı arttıkça taze ve etüv kurusu yoğunluklar azalmıştır. UK oranı arttıkça karışımların porozite ve su emme değerleri artmıştır. Transmikser yıkama suyunun karışımların taze ve fiziksel özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır. 3. Günde yaklaşık 20 MPa basınç dayanımı elde edilirken 180. Günde 80 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. UK oranı arttıkça genellikle basınç ve eğilme dayanımı azalmıştır. UK oranı arttıkça yüksek sıcaklık sonrasında kütle kaybı azalmıştır. Ancak UK'lı karışımlarda yüksek sıcaklık sonrasında daha düşük basınç ve eğilme dayanımı elde edilmiştir. 120 donma-çözülme döngüsü sonrası karışımlarda %7-15 arasında kütle kaybı oluşmuştur. Karışımların basınç dayanımı ise 50 MPa'nın altına düşmüştür. UK oranının artması asit direncine katkı sağlamazken sülfat etkisine olumlu katkı sağlamıştır. Ayrıca NaCl etkisine maruz UK'lı karışımlarda daha fazla ağırlık kaybı oluşmuştur. UK oranının artması genellikle ASR genleşmelerini azaltmıştır. Sonuç olarak UK oranı arttıkça kompozitlerin performansı düşmüştür. Ancak sürdürülebilirlik açısından %25 oranında UK kullanılabilir. Ayrıca transmikser yıkama suyunun da %100'e kadar kullanılabileceği gözlenmiştir. Elde edilen kompozitler sayesinde çevre kirliliği oldukça azaltılarak sürdürülebilir bir yapı malzemesinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Geopolimer, Sürdürülebilirlik, Sodyum metasilikat, Uçucu kül, Durabilite

Temmuz 2022, 131 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

USE OF TRANSMIXER WASHING WATER IN GEOPOLYMER COMPOSITE PRODUCTION

BURAK BODUR

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR:ASSIST. PROF. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

In this study, physical, mechanical and durability properties of transmixer wash water and fly ash added geopolymers were investigated. Binder dosage in the mixtures was chosen as 1000 kg/m^3. 25% and 50% fly ash (UK) was used instead of ground blast furnace slag, which is the main binder of the mixtures. Sodium metasilicate powder was used as alkali activator at the rate of 7,5% and 15% of the total binder. Setting end times of the mixtures vary between 165-230 minutes. As the UK ratio increased, the final setting times increased. All mixtures have a flow diameter of more than 150 mm. Oven-dry densities of the mixtures are less than 2000 kg/m^3. As the UK ratio increased, the fresh and oven-dry densities decreased. As the UK ratio increased, the porosity and water absorption values of the mixtures increased. The mixer washing water did not have a significant effect on the fresh and physical properties of the mixtures. A compressive strength of about 20 MPa was obtained on the 3rd day, while a compressive strength of more than 80 MPa was obtained on the 180th day. As the UK ratio increased, the compressive and flexural strengths generally decreased. As the UK ratio increased, the mass loss decreased after high temperature. However, lower compressive and flexural strengths were obtained after high temperature in mixtures with UK. After 120 freeze-thaw cycles, a mass loss of 7-15% occurred in the mixtures. The compressive strength of the mixtures decreased below 50 MPa. While the increase in UK ratio did not contribute to acid resistance, it contributed positively to the sulfate effect. In addition, more weight loss occurred in mixtures with UK exposed to the effect of NaCl. Increasing the UK ratio generally decreased the ASR expansions. As a result, the performance of the composites decreased as the UK ratio increased. However, in terms of sustainability, 25% UK can be used. In addition, it has been observed that the transmixer washing water can be used up to 100%. Thanks to the obtained composites, it has been shown that a sustainable building material can be obtained by reducing the environmental pollution considerably.

KEYWORDS: Geopolymer, Sustainability, Sodium metasilicate, Fly ash, Durabiliy

July 2022, 131 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yapan, bilgi birikimiyle çalışmama ışık tutan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a, çalışmalarım boyunca tecrübelerinden yararlandığım ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN'a, tez jürime katılan bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL'e şükranlarımı sunarım. Çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım. Yaptığım tez çalışmasının, bilim dünyasına yararlı olmasını temenni ederim.

Burak BODUR

Kastamonu, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **i**
TAAHHÜTNAME ..... **ii**
ÖZET ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **x**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR TARAMASI **5**
2.1 Uçucu Kül 5
2.1.1 Genel 5
2.1.2 Uçucu Küllerin Üretimi ve Piyasa Arzı 5
2.1.3 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması 7
2.1.3.1 ASTM C 618 sınıflandırması 7
2.1.3.2 TS EN 197-1 sınıflandırması 9
2.1.4 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri 10
2.1.5 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri 10
2.1.6 Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Kullanımı 11
2.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC) 13
2.2.1 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 13
2.2.2 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Kullanım Alanları 15
2.3 Hazır Beton Tesislerinde Geri Dönüşüm 15
2.3.1 Yıkama Suyu ve Filtre Kalıntı Malzemesi 20
2.3.2 Yıkama Suyu ve Filtre Kalıntı Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 20
2.3.3 Yıkama Suyu ve Filtre Malzemesi Literatür Taraması 25
2.4 Geopolimer Harçlar 41
2.4.1 Geopolimer Harçların Özellikleri 43
2.4.1.1 Sülfat saldırısı ve deniz suyu saldırısına karşı direnç 44
2.4.1.2 Asit saldırısına karşı direnç 46
2.4.1.3 Çelik donatı korozyonuna karşı direnç 48
2.4.1.4 Yüksek sıcaklık ve yangına karşı dayanım 49
2.4.2 Geopolimer ile alakalı yapılan çalışmalar 51
3. DENEYSEL PROGRAM **61**
3.1 Malzemeler 61
3.2 Karışım Tasarımı 63
3.3 Karıştırma, Döküm ve Kür 64
3.4 Testler 65
3.4.1 Priz Süresi ve Kıvam 65
3.4.2 Fiziksel Özellikler 65
3.4.3 Mekanik Özellikler 65

3.4.4 Yüksek Sıcaklık Etkisi 66
3.4.5 Donma-Çözülme Etkisi 66
3.4.6 Kuruma Büzülmesi 66
3.4.7 Kapilerite (Su işleme derinliği) 66
3.4.8 Asit (HCl) Etkisi 67
3.4.9 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Etkisi 67
3.4.10 NaCl Etkisi 67
3.4.11 Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) 67
4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR 68
4.1 Taze Özellikler 68
4.1.1 Priz Başlangıç ve Priz Sonu Süreleri 68
4.1.2 Yayılma Çapı 70
4.2 Fiziksel Özellikler 72
4.2.1 Taze, Sertleşmiş ve Etüv Kurusu Yoğunluk 72
4.2.2 Görünür Porozite 74
4.2.3 Su Emmesi 76
4.3 Mekanik Özellikler 78
4.3.1 Basınç Dayanımı 78
4.3.2 Eğilme Dayanımı 80
4.4 Durabilite 83
4.4.1 Yüksek Sıcaklık Direnci 83
4.4.2 Donma-Çözülme Dayanıklılığı 89
4.4.3 Kuruma Büzülmesi 94
4.4.4 Kapilerite (Su İşleme Derinliği) 96
4.4.5 Asit (HCl) Dayanıklılığı 97
4.4.6 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Dayanıklılığı 102
4.4.7 NaCl Etkisi 104
4.4.8 Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) 110
5. SONUÇLAR 113
KAYNAKLAR 116
ÖZGEÇMİŞ 131

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Türkiye'de Enerji Üretiminde Kaynak Dağılımı 6
Şekil 2. 2 Kömür Arzının Sektörlere Göre Tüketim Dağılımı 6
Şekil 2. 3 C sınıfı uçucu kül (x5000) SEM görüntüsü 8
Şekil 2. 4 F sınıfı uçucu kül (x5000) SEM görüntüsü 8
Şekil 2. 5 Soma C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x8000) 10
Şekil 2. 6 Türkiye'deki bir hazır beton tesisinde geri dönüşüm sistemi 18
Şekil 2. 7 Hazır beton tesisinde yıkama suyunun geri kazanımı işlemi 19
Şekil 2. 8 Çökeltme havuzu yapısı 20
Şekil 2. 9 Mikroskop altı görüntüsü. (a) Portland çimentosu ve
(b) çamur tozu 23
Şekil 2. 10 Betonun yüksek sıcaklıkla renk değişimi 54
Şekil 3. 1 YFC ve UK'ün XRD modeli 61
Şekil 3. 2 Hazır beton santralinde çökeltme havuzu 63
Şekil 4. 1 %7,5 SMT kompozitlerin ilk ve son priz süreleri 69
Şekil 4. 2 %15 SMT kompozitlerin ilk ve son priz süreleri 70
Şekil 4. 3 %7,5 SMT kompozitlerin yayılma çapı 71
Şekil 4. 4 %15 SMT kompozitlerin yayılma çapı 72
Şekil 4. 5 %7,5 SMT kompozitlerin taze, sertleşmiş ve
etüv kurusu yoğunlukları 73
Şekil 4. 6 %15 SMT kompozitlerin taze, sertleşmiş ve
etüv kurusu yoğunlukları 74
Şekil 4. 7 %7,5 SMT kompozitlerin görünür poroziteleri 75
Şekil 4. 8 %15 SMT kompozitlerin görünür poroziteleri 76
Şekil 4. 9 %7,5 SMT kompozitlerin su emmesi 77
Şekil 4. 10 %15 SMT kompozitlerin su emmesi 78
Şekil 4. 11 %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 79
Şekil 4. 12 %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı ve standart sapması 80
Şekil 4. 13 %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı ve standart sapması 81
Şekil 4. 14 %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı ve standart sapması 82
Şekil 4. 15 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin
ağırlık kaybı %'si 84
Şekil 4. 16 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %15 SMT kompozitlerin
ağırlık kaybı %'si 85
Şekil 4. 17 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin
basınç dayanımı 86
Şekil 4. 18 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %15 SMT kompozitlerin
basınç dayanımı 87
Şekil 4. 19 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin
eğilme dayanımı 88
Şekil 4. 20 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %15 SMT kompozitlerin
eğilme dayanımı 88
Şekil 4. 21 Donma-çözülmeye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin
ağırlık kaybı %'si 90

Şekil 4. 22 Donma-çözülmeye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si 90
Şekil 4. 23 Donma-çözülmeye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 91
Şekil 4. 24 Donma-çözülmeye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 92
Şekil 4. 25 Donma-çözülmeye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı 93
Şekil 4. 26 Donma-çözülmeye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı 94
Şekil 4. 27 %7,5 SMT kompozitlerin kuruma büzülmesi 95
Şekil 4. 28 %15 SMT kompozitlerin kuruma büzülmesi 95
Şekil 4. 29 %7,5 SMT kompozitlerin kapilerite özelliği 96
Şekil 4. 30 %15 SMT kompozitlerin kapilerite özelliği 97
Şekil 4. 31 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin kütle kaybı %'si 98
Şekil 4. 32 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin kütle kaybı %'si 99
Şekil 4. 33 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 100
Şekil 4. 34 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 101
Şekil 4. 35 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı 101
Şekil 4. 36 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı 102
Şekil 4. 37 %7,5 SMT kompozitlerin sülfat ($MgSO_4$) direnci 103
Şekil 4. 38 %15 SMT kompozitlerin sülfat ($MgSO_4$) direnci 103
Şekil 4. 39 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si 105
Şekil 4. 40 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si 106
Şekil 4. 41 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 107
Şekil 4. 42 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı 108
Şekil 4. 43 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı 109
Şekil 4. 44 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı 110
Şekil 4. 45 %7,5 SMT kompozitlerin alkali-silika reaksiyon direnci 111
Şekil 4. 46 %15 SMT kompozitlerin alkali-silika reaksiyon direnci 112

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2. 1 ASTM C 618 standardına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri 7
Tablo 2. 2 TS EN 197-1'e göre W ve V sınıfı uçucu küllerin kimyasal özellikleri 9
Tablo 2. 3 Farklı kömür türlerinden üretilen uçucu küllerin kimyasal bileşenleri 11
Tablo 2. 4 TS EN 450-1'e göre uçucu külün kimyasal özellikleri 13
Tablo 2. 5 Taze beton atığı geri dönüşüm sistemleri 17
Tablo 2. 6 Yıkama suyu kimyasal analizi. 21
Tablo 2. 7 Filtre kalıntı malzemesi kimyasal bileşimi. 22
Tablo 2. 8 Geopolimerlerin kullanım alanları ve uygulamaları 42
Tablo 2. 9 Farklı kimyasallar içeriklere sahip geopolimerlerin uygulama alanları 42
Tablo 3. 1 YFC ve UK'ün kimyasal bileşimi (kütle olarak yüzde) 61
Tablo 3. 2 SMT'nin kimyasal bileşimi (% kütlece) ve fiziksel özellikleri 62
Tablo 3. 3 Silis agregasının fiziksel özellikleri 62
Tablo 3. 4 Musluk suyu ve yıkama suyunun kimyasal ve fiziksel özellikleri 63
Tablo 3. 5 Karışım tasarımı 64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	**:** Alüminyum Oksit
CaO	**:** Kalsiyum Oksit
Fe_2O_3	**:** Demir Oksit
K_2O	**:** Potasyum Oksit
MgO	**:** Magnezyum Oksit
$MgSO_4$	**:** Magnezyum Sülfat
Na_2O	**:** Sodyum Oksit
SiO_2	**:** Silisyum Dioksit
SO_3	**:** Kükürt Trioksit

Kısaltmalar

AACK	**:** Alkali ile Aktive Edilmiş Cüruf Kompoziti
ASR	**:** Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	**:** American Society for Testing and Materials
D-Ç	**:** Donma-Çözülme
HCl	**:** Hidroklorik Asit
MPa	**:** Megapascal
NaCl	**:** Sodyum Klorür
SMT	**:** Sodyum Metasilikat Tozu
TYS	**:** Transmikser Yıkama Suyu
UK	**:** Uçucu Kül
XRD	**:** X-Işını Kırınım Yöntemi
YFC	**:** Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Geri dönüştürülmüş su, su kıtlığının getirdiği zorlukların üstesinden gelmek için alternatif bir su kaynağı olarak kullanılabilir (Paul vd., 2019). 2009 yılında endüstriyel su tüketimi 800 milyar m^3 olmuştur. Vajnhandl ve Valh'a göre 2030 yılına kadar 1500 milyar m^3'e ulaşması bekleniyor (Vajnhandl ve Valh, 2014). Buna ek olarak, küresel kentleşme, dünya nüfusunun şehirlerde yaşayan yüzdesinin artmasına yol açarak bu bölgelerde temiz ve erişilebilir su ihtiyacını artırdı. Örneğin Avrupa'da, nüfusun %73,4'ü şu anda kentsel alanlarda yaşıyor ve bu oranın 2050 yılına kadar %81'e çıkması bekleniyor (Makropoulos vd., 2018). Su arıtımı ve yeniden kullanımı şu anda hem endüstriyel (Ahmad vd., 2016; Tong vd., 2013; Yerri ve Piratla, 2019), hem kentsel (Makropoulos vd., 2018; Russo vd., 2019; Smith vd., 2018) hem de çiftçilik bağlamlarında çok sayıda çalışmanın konusudur (Matos vd., 2020). Atık betonu bertaraf etmek ve hazır beton kamyonlarından gelen suyu yıkamak giderek zorlaşıyor. Bu kamyonların temizliği sırasında ortaya çıkan atık su ilk akla gelen konudur. İkinci soru, bu tehlikeli maddelerin kirlenmiş yüzey suları veya yeraltı suları üzerinde herhangi bir etkisinin olup olmayacağıdır. Beton karıştırma kamyonlarından gelen yıkama suyunun uygun şekilde nasıl atılacağı konusu giderek daha sorunlu hale geliyor. Beton ve kamyon yıkama suyu artık geçmişte olduğu gibi boş arsalara, yağmur kanalizasyonlarına, hazır beton tesislerine veya şantiyelere dökülememektedir (Botton vd., 2018). 10 metreküp kapasiteli hazır beton kamyonu, yükü boş olarak bir şantiyeden beton santraline döndüğünde, tambura ve karıştırma bıçaklarında hala yaklaşık 600 kg beton sıkışmıştır (Ekolu ve Dawneerangen, 2010). Yeraltı suyu kirliliği ve yüzey suyu kirliliği bariz çevresel kaygılardır. Beton atık malzemeleri suda yaşayan organizmalara zarar verebilir, içme ve eğlence amaçlı suyun kalitesini bozabilir (Meyer, 2009). Hazır beton santrali sahasında, şantiye sahasında, depolama sahasında veya bir ıslah ünitesinde, hazır beton üreticileri için kullanılmayan beton ve yıkama suyunun bertarafı için temel olarak iki seçenek bulunmaktadır. Birincisi, atık malzemeler yetkili bir depolama sahasına veya atık bertaraf sahasına bırakılabilir. İkinci olarak bir hazır beton kamyonundan gelen yıkama suyu ve artık beton, bir yıkama çukuruna veya mekanik bir geri kazanım ünitesine atılabilir (Botton vd., 2018). İlk harcama önemli ve bu seçenekleri sürdürmek için gereken devam eden maliyetler

ve işçilik de önemlidir. Azalan seçeneklerin, beton üreticilerini bunları elden çıkarmak için alternatif yollar bulmaya zorlayacağı açıktır (Johnson ve Mehrvar, 2019). De Matos vd. (de Matos vd., 2020) transmikser yıkama suyunun (TYS) yeniden kullanımının çimento macunları ve beton üzerindeki etkilerini incelemiştir. Katı partiküller ve yüksek alkalinite nedeniyle artan TYS içeriği akışkanlığını azaltmıştır. TYS içeren macunlar, 0-60 dakika daha düşük akışkanlık kayıplarına sahiptir. Artan TYS seviyesi, hedef çökme aralığına ulaşmak için su talebini arttırmıştır, ancak zamanla çökme kayıplarını azaltmıştır. İzotermal kalorimetri, TYS'nin indüksiyon süresini azalttığını ve 72 saat sonra ısı salınımını ve kümülatif ısıyı arttırdığını göstermiştir. Termogravimetrik (TG) analiz, 3 günde daha fazla hidratlı ürün ve kalsiyum hidroksit oluşumunu göstermiştir. 28 günde tüm macunlar benzer özellik göstermiştir. TYS içeren betonlar, izotermal kalorimetri ve TG sonuçlarıyla uyumlu olarak, 3 ve 7 günde daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu gözlenmiştir. 28 günde, TYS içeren betonun daha yüksek S/B oranları (hedef çökme aralığına ulaşmak için daha yüksek su ihtiyacı nedeniyle) referanstan daha düşük dayanımlara yol açmıştır. TYS içeren betonlar, referans ile karşılaştırılabilir basınç dayanımlarına sahiptir, %100 TYS için %92 genel olarak, taze veya sertleştirilmiş özelliklerden ödün vermeden içme suyunun kısmen ve tamamen geri dönüştürülmüş su ile değiştirilmesiyle beton üretmek mümkün olmuştur. Büyük ölçekli kullanım için kimyasal katkılar ve farklı çimento türleri ile kullanımının araştırılması ve beton dayanıklılığının değerlendirilmesi önerilir. Asadollahfardi vd. (Asadollahfardi vd., 2015) taze beton yapmak için beton yıkama suyu kullanılarak test edilmiştir. Hidrolik çimentonun priz süresi ve basınç dayanımı düşürülmüştür. Yıkama suyu numuneleri işlenebilir ve nüfuz edilebilirdir. Yıkama suyu çekme, eğilme ve basınç dayanımlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Sulu alkali ile aktifleştirilmiş, alkali aktifleştirilmiş malzemeler olarak adlandırılan inorganik polimerler, belirli endüstriyel atıkların veya silisli-alüminli kaynakları içeren maden atıklarının geopolimerizasyonundan elde edilir ve betonu klinkersiz üreterek ve betonun karbon ayak izini azaltmak için sürdürülebilir bir yol sağlar (Bajpai vd., 2020; Li vd., 2020; Noushini vd., 2020; Rożek vd., 2019; Singh ve Middendorf, 2020; Thakur vd., 2019). Bu hammaddelerin bazıları çelik cürufu (Huang vd., 2022; Katpady vd., 2020), metakaolin (Sun vd., 2019), uçucu kül (Shi vd., 2018) ve kumdan (Cai vd., 2020) yapılır. Geopolimerizasyon, çözünme, jelleşme, katılaşma, polikondenzasyon ve kristalleşmeyi içerir (Ghosh ve Ghosh,

2018). Bu dört aşama, Portland çimentosuna göre üstün mukavemet ve dayanıklılığa sahip katı bir malzeme oluşturmak için aynı anda veya ayrı ayrı gerçekleşebilir (Van Deventer vd., 2010; Van Deventer vd., 2012). İsmail ve arkadaşları, J Oh ve arkadaşları, alkali ile aktive olan uçucu kül-cüruf jeopolimerlerinin cüruf kompozitlerine benzediğini bildirdi (Ismail vd., 2014; Oh vd., 2010). Cürufa eklenen alkali çözelti, kalsiyumu çözer ve alüminyum çökeltileri oluşturarak bir C-A-S-H jeli oluşturur (Ismail vd., 2014; Kumar vd., 2010; Oh vd., 2010). Bu jel, mekanik mukavemeti artıran, gözenekliliği azaltan ve dayanıklılığı artıran ana bağlayıcı ajandır. Uçucu kül geopolimerizasyonu, sodyum alümina-silikat jel N-A-S-H'den oluşur (Kumar vd., 2010). Cüruf içeren harmanlanmış bir öncünün alkali aktivasyonu, C-A-S-H ve N-A-S-H jelleri ile bir hibrit bağlayıcı sistemi oluşturur. Çapraz bağlama, öncülerin kimyasal bileşimine ve alkalin aktivatör solüsyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Ghosh ve arkadaşları, cürufun eklenmesinin, birbirine bağlı alüminyum iyonları ile C-S-H reaksiyon ürünleri ürettiğini öne sürdü (Ghosh ve Ghosh, 2018). Kumar ve arkadaşları, uçucu kül jeopolimerlerinde cüruf ikamesinin reaksiyon kinetiği üzerindeki etkisini inceledi ve C-S-H jeli ve alümina-silikat jellerinin ana reaksiyon ürünleri olduğunu buldu. Bu ikili jel oluşumu, erken sertleşmeye ve daha iyi mekanik özelliklere yol açar (Woolard, 2000). Provis ve arkadaşları, X-ışını mikrotomografi verileri cüruf bazlı reaksiyon ürünlerinin mikroyapısal baskınlığını doğruladı (Provis vd., 2012). Yang ve arkadaşları, sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimerlerine cüruf eklenmesinin, jel oluşumundaki ana kontrol faktörlerinden biri olan reaksiyon mekanizmasını etkilediğini bulmuşlardır (Yang vd., 2012). Alkali ile aktive edilmiş cüruf kompozitleri (AACK) önemli ilerleme kaydetmiştir, ancak AACK'nin kendi kendine sertleşme özelliklerini inceleyen az sayıda çalışma vardır (Mithun ve Narasimhan, 2014). Ayrıca, transmikser yıkama suyunun kendi kendine kürlenen AACK ile tek parça kullanımına ilişkin sistematik bir araştırma yayınlanmamıştır. Bu çalışma, transmikser kamyonu yıkamasından kaynaklanan atık su (TYS) kullanımının, kısmen (%50) ve tamamen musluk suyu (MS) ikamesi içeren kendi kendine kürlenen alkali-aktive cüruf kompozitlerinin (AACK) özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Karışımlarda bağlayıcı dozajı 1000 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Karışımların bağlayıcısı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu yerine %25 ve %50 oranında UK kullanılmıştır. Tek aktivatör bileşeni (SMT), toplam bağlayıcının %7,5 ve %15'i olarak kullanılmıştır. Taze özellikler (Priz

başlangıç, priz sonu süreleri ve kıvamı), fiziksel (taze, sertleştirilmiş ve etüv kuru yoğunluk, görünür porozite ve su emme), basınç ve eğilme (3, 7, 28, 90 ve 180 gün) ve yüksek sıcaklık direnci, donma-çözülme direnci, kuruma büzülmesi, su işleme derinliği (kapilerite), HCl ve $MgSO_4$ dirençleri, NaCl etkisi ve alkali-silika reaksiyonu (ASR) testlerine tabi tutulmuştur. Bu çalışma, AACK'de transmikser yıkama suyunun kullanım ufkunu genişletmekte ve ortam kürünü ve uygulanan kendi kendine kürleme yöntemini içeren diğer davranışların anlaşılmasına ışık tutmaktadır. Karışımların hazırlanmasında işlenebilirliği artırmak için yeni nesil polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Uçucu Kül

2.1.1 Genel

Uçucu küller, modern termik santrallerde toz kömürün yanması sonucu ortaya çıkan, baca gazlarıyla havada sürüklenebilecek kadar ince, hafif kül tanecikleridir. Bu kül tanecikleri elektro filtrelerde ve siklonlarda tutulmakta ve havaya karışması engellenmektedir. Uçucu kül tanecikleri genellikle küre şeklindedir. Boyutları l-200 µm arasındadır. Uçucu küllerin tane boyutları kül toplama yöntemine bağlıdır. Siklonlarda elde edilen küller, elektro filtrelerde elde edilenlerden daha iri tanelidirler. Uçucu küllerin renkleri açık bej, kahverengi, gri ve siyah arası tonlarda olabilirken içerisindeki yanmamış karbon esaslı bileşik miktarı artıkça uçucu küllerin renginin koyulaştığı tespit edilmiştir (Ünal ve Uygunoglu, 2004).

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallarında ortaya çıkan bir atık üründür (Yeğinobalı, 2011)

Uçucu küller tek başına kullanıldığında bir bağlayıcılık etkisi olmayıp sönmüş kireç ile hidratasyon tepkimesine girerek suyla sertleşip bağlayıcılık özelliği kazanan bir toz malzemedir (Hamalı, 2007). Dolaylı yolla atık olarak elde edilen ve yapay bir puzolan olan uçucu küller betonda mineral katkı olarak kullanılır (Şinik, 2019).

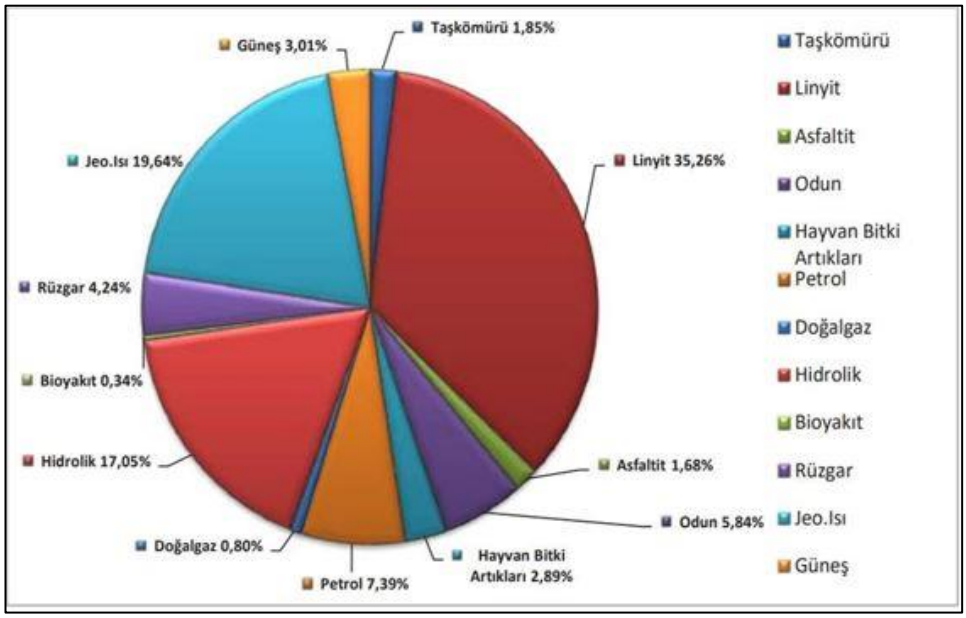
2.1.2 Uçucu Küllerin Üretimi ve Piyasa Arzı

Türkiye'de başlıca enerji kaynaklarından linyit kömürü düşük ısıl değere sahiptir ve termik santrallerde ufak taneli boyutlara getirilerek yakılmaktadır. Termik santrallerde kömürlerin yakılmasıyla inorganik toz atıklar olan uçucu küller meydana gelir. Cüruflardan farkı ise uçucu küllerin tane büyüklükleri 1–200 µm arasındadır. Toz kömürün yakılması esnasında (1200°C civarlarında) baca gazları ile hareket eden ve ani soğurken elektrofiltreler aracılığı ile bacalarda yakalanan ve genellikle çapları 100 µm'den daha küçük uçucu kül partikülleri ortaya çıkmaktadır. Enerji ihtiyacına bağlı

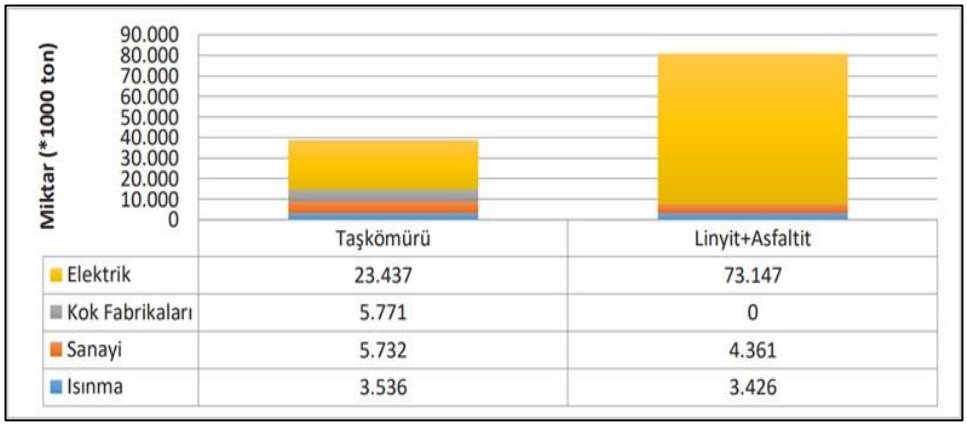
olarak artan doğal enerji kaynağı kömürün tüketimi elde edilen kül miktarının da doğrudan artmasına neden olmaktadır (Aruntaş, 2006; Yazıcı, 2004).

Enerji kaynakları bazında bakıldığında;

Linyit, 1970'li yıllarda toplam üretim payının %12'sini oluştururken, 2009 yılında %50'nin üzerine çıkmış ilerleyen yıllara göre azalma eğilimine girerek 2017 yılında %36,2'ye kadar düşmüştür (Kömür ve Enerji Raporu, 2020). Türkiye birincil enerji üretiminin kaynaklara dağılımı Şekil 2.1'de, Kömür arzının sektörlere göre tüketim dağılımı Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Türkiye'de Enerji Üretiminde Kaynak Dağılımı (Kömür ve Enerji Raporu, 2020)



Şekil 2.2 Kömür Arzının Sektörlere Göre Tüketim Dağılımı, (Kömür ve enerji raporu, 2020)

Şekil 2.2'de belirtildiği gibi 2020 yılında yayınlanan Kömür ve Enerji Raporu'nda 2018 yılında 80,9 milyon ton olan toplam linyit arzının miktar olarak %73,14'ü elektrik üretiminde tüketilmiştir.

Türkiye'de şu anda Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralları başta olmak üzere 11 termik santral kömürden enerji üretmektedir. Bu santrallerin uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon/yıl kadar olmakta, ancak elektrik üretimi için doğalgaz santrallerinin devreye girmesi yıllık üretim miktarlarını değiştirmektedir. Düşük kalorili linyit kömürlerinin enerji üretiminde kullanılması ülkemizin dışa bağımlılığını azaltacağından ileriki yıllarda linyit kömürü tüketiminin artmasıyla birlikte üretilen kül miktarının da artması öngörülmektedir (Yeğinobalı, 2011).

2.1.3 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Ülkemizde uçucu küller ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır.

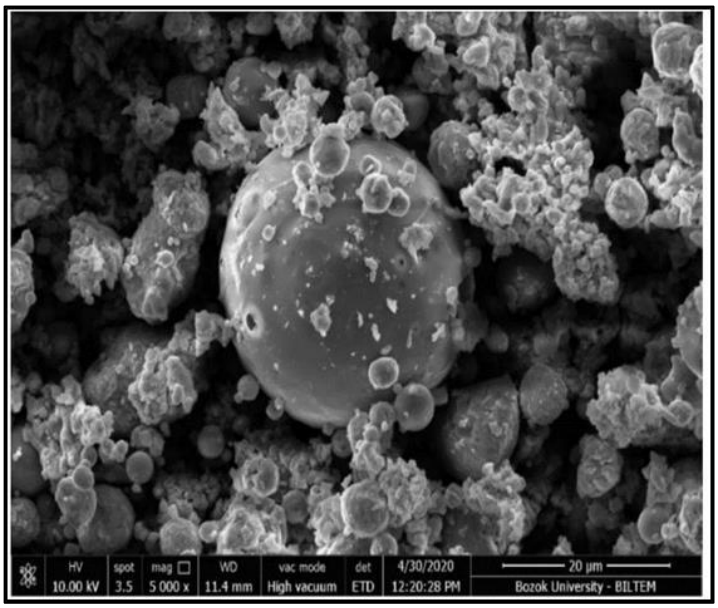
2.1.3.1 ASTM C 618 sınıflandırması

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller kimyasal özelliklerine göre F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilir ve puzolanik özelliğe sahiptir. C sınıfı uçucu küller ise kalorisi düşük olan linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilir ve puzolanik özelliğine ek olarak bağlayıcı özelliğe de sahiptir. F ve C sınıfı küllerin sınır değerleri Tablo 2.1'te verilmiştir.

Tablo 2.1 ASTM C 618 standardına göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri

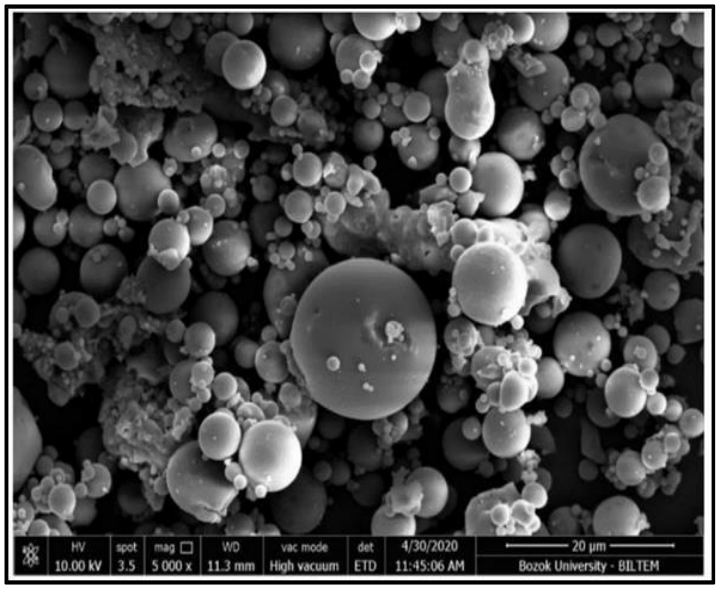
Kimyasal Özellikler	F Sınıfı	C Sınıfı
Max. SO_3	-	-
Max. MgO	-	-
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%)	>70	>50
CaO (%)	<10	>10
Isı Kaybı (%)	<12	<6

F Sınıfı ve C Sınıfı arasındaki farklardan biride C Sınıfı uçucu küllerdeki alkalilerin (birleşik sodyum ve potasyum) ve sülfatların (SO_4) miktarının F Sınıfı uçucu küllerden genellikle daha yüksek olmasıdır (Kaya, 2016).



Şekil 2.3 C sınıfı uçucu kül (x5000) SEM görüntüsü (Kaya, 2016)

Resim 2.3'te taramalı elektron mikroskobu ile fotoğraflanmış olan C sınıfı uçucu külün 1-20 mikron boyutlarında değişen küresel tanecikleri görünmektedir. Fotoğrafta görüldüğü gibi tanecikler pürüzlü yüzeylere sahiptir ve amorf bir yapıdadır (Kaya, 2016).



Şekil 2.4 F sınıfı uçucu kül (x5000) SEM görüntüsü (Kaya, 2016)

Resim 2.4'te taramalı elektron mikroskobu ile fotoğraflanmış olan F sınıfı uçucu külün tanecik boyutları C sınıfı ile aynı olup, yüzeyleri C sınıfının aksine pürüzsüz ve belirgin olmasına karşın benzer şekilde dağınık haldedir (Kaya, 2016).

2.1.3.2 TS EN 197-1 sınıflandırması

TS EN 197-1 standartlarına göre uçucu küller silis yoğunluklu (V) ve kalker yoğunluklu (W) olmak üzere ikiye ayrılır.

V sınıfı uçucu küller sahip oldukları puzolanik karakteri ile tek başına bağlayıcılığı olamayan ancak aktifleştiricilerle birlikte kullanıldığında bağlayıcı özellik kazanan hafif uçucu tozlar olup; kimyasal yapısı ağırlıklı olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşurken demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri de içerir. Standarda göre V sınıfı uçucu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'ten fazla olmalıdır.

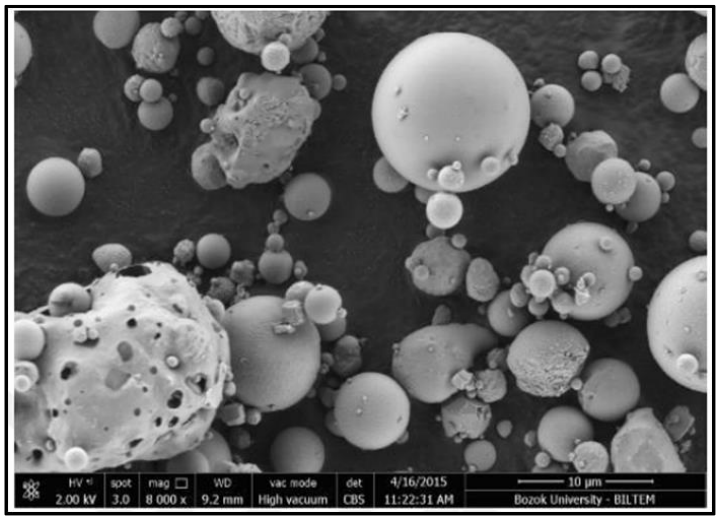
W sınıfı uçucu sahip oldukları küller puzolanik karakterlerinin yanı sıra hidrolik karakterde sahip olup; kimyasal yapısı ağırlıklı olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3'ten oluşurken demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içerir. Standartta göre W sınıfı uçucu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'ten fazla olması gerekmektedir. Standarda göre limit değerler Tablo 2.2'de verilmiştir (Yeğinobalı, 2011)

Tablo 2.2 TS EN 197-1'e göre W ve V sınıfı uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	W Sınıfı	V Sınıfı
SO_3	-	-
MgO	-	-
SiO_2	-	-
Al_20_3	-	-
Fe_2O_3	-	-
Reaktif CaO (%)	>10	<10
Reaktif SiO_2 (%)	>25	>25

2.1.4 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin dane çapları termik santralde bulunan sistemlerin kül toplama yöntem ve araçlarına bağlıdır. Siklonlarda toplanan küller, elektro filtrelerde toplananlara oranla daha iri tanelidirler. Uçucu küllerin renkleri, muhteva ettikleri yanmamış karbon miktarı ile değişmektedir. Uçucu küllerin renkleri açık bej, kahverengi, gri ve siyah arası tonlarda olabilirken içerisindeki yanmamış karbon esaslı bileşik miktarı artıkça uçucu küllerin renginin koyulaştığı tespit edilmiştir (Ünal ve Uygunoglu, 2004). İçindeki yanmamış karbon miktarı artıkça uçucu küllerin rengi koyulaşır. Çapları 1-150 μm aralığındadır. Elde edilen uçucu küllerin çoğu 45 mikrondan küçüktür (Çakır, 1999). Yoğunlukları ise 2,0-2,7 g/cm^3 aralığında değişmektedir (Aruntaş, 2006). Kaya 2016 yılında Soma C sınıfı uçucu külünün özgül ağırlığını 2,65 ton/m^3, 45 mikron elek bakiyesini %8,8 ve blain özgül yüzeyini 2360 cm^2/gr olarak hesaplamıştır (Kaya ve Köksal, 2021). Soma C sınıfı uçucu külünün tanecik boyutlarını gösteren SEM görüntüsü Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Soma C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x8000), (Kaya, 2016)

2.1.5 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu külün kimyasal özellikleri, büyük ölçüde yakılan kömürün özellikleri ile işleme ve depolama için kullanılan tekniklerden etkilenir. Temel olarak; ısıtma değeri, kimyasal bileşimi, kül içeriği ve jeolojik kökeni açısından değişen dört tip kömür vardır. Bunlar; antrasit, bitümlü, yarı bitümlü ve linyittir (Samal, 2019). Bu kömürlerin

yakılması sonucu ortaya çıkan uçucu küllerin kimyasal bileşenleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 Farklı kömür türlerinden üretilen uçucu küllerin kimyasal bileşenleri (Ağırlıkça yüzde olarak ifade edilmiştir) (Samal, 2019).

Bileşenler	Bitümlü Kömür	Yarı Bitümlü Kömür	Linyit Kömür
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4
Kızdırma kaybı	0-15	0-3	0-5

Temel oksitler olan SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO' in miktarları, uçucu küllerin ana bileşenlerinden olan silissi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külde SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_5 %1-15 olarak ve CaO, %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır (ACI Committee 226, 1987; Hewlett, 1998).

Yanmamış miktarın bir ölçüsü olan kızdırma kaybı, uçucu külde yanmadan kalan karbon miktarını ifade eder ve uçucu külün en önemli kimyasal özelliklerinden biridir, özellikle betonda çimento ikamesi olarak kullanıma uygunluğunun bir göstergesidir (Samal, 2019).

Kızdırma kaybı, kömürün içeriğindeki yanmayıp kalan karbondur. Bununla birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, %1,0 ve %10 arasında değerler alır (Yeğinobalı, 2011).

2.1.6 Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Kullanımı

Uçucu küller inşaat sektöründe; çimento üretiminde, beton içerisinde hafif agrega olarak, öngerilmeli beton yapımında, kerpiç, tuğla, gazbeton gibi yapı malzemelerinin üretiminde, zemin iyileştirme çalışmalarında, yol inşaatlarında beton ve asfalt

içerisinde mineral filler olarak, atık depolama alanlarında katılaştırma işleminde ve tarımsal bazı alanlarda hali hazırda kullanılırken gelişen teknolojilerin yardımı ile izole paneller, ses bariyerleri ve peyzaj elemanlarının üretimi gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır (Aruntaş, 2006; Baradan, 1995; Bayazıt, 1970).

Uçucu küller çimento üretiminde ana hammadde olan kil ve kalkerle karıştırılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küllerin çimentoda kullanılması çimento ihtiyacını azaltarak hem enerji maliyetini düşürüp hem de betonun durabilite özelliklerini iyileştirmiştir (Aruntaş, 2006). Uçucu küller betonda ince agrega yerine kullanılabilmektedir. Agrega olarak kullanılan uçucu küller kimyasal içerikleri farklı olduğundan betonda farklı özelliklere etki ederler. Betonda F sınıfı uçucu küllerin kullanılması işlenebilirliği arttırmakta, betonun dayanımını iyileştirmekte ve büzülme gibi olumsuz etkileri azaltmaktadır. Betonda bağlayıcı yerine %40'a kadar değişen oranlarda uçucu kül ikamesi betonun fiziksel özelliği olan aşınma direncini artırmaktadır (Görhan vd., 2008). Uçucu küllerin yüksek dayanımlı betonların imalatında çimento ikamesi olarak değişen oranlarda kullanılması basınç dayanımını artırmıştır. Buna ek olarak eğilme ve çekme dayanımını da olumlu etkilerken betonun sülfürik asit haricinde kimyasal etkilere karşı direncini artırmaktadır (Topçu ve Demir, 2007). Uçucu küller betonun hidratasyon ısısını düşürmesi sayesinde Ülkemizde ve Dünyada birçok barajın yapımında da kullanılmıştır (Tokyay, 1993).

Uçucu küllerin hazır beton sektöründe ikame malzemesi olarak kullanılması için bazı değerleri sağlaması gerekmektedir. Hazır betonlarda kullanılacak uçucu küllerin TS EN 197-1 standartlarını sağlaması gerekir, TS EN 206 ve TS 13515 standartları kullanılacak uçucu külün TS EN 450-1 standartına uygunluk şartı ister. TS EN 206 standartını destekleyici nitelikte olan yönetmelik tamamlayıcı standart TS 13515 standartı uçucu kül hakkında daha detaylı bilgiler içerir. TS EN 450-1'e göre uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 TS EN 450-1'e göre uçucu külün kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellik	Kütlece Yüzde (%)
Kızdırma kaybı	Kategori A<%5; Kategori B<%7; Kategori C <%9
Cl	≤0,1
SO_3	≤3
Serbest CaO	≤1,5
Reaktif CaO	≤10
Reaktif SiO_2	≥25
$(SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3)$	≥70
Toplam alkali muhtevası	≤5
MgO	≤4
Fosfat	≤5

TS 13515 standartına göre; kızdırma kaybı A kategoride olmalıdır. Çimento içerisindeki kalkerli ve silisli uçucu külün kızdırma kaybı %5'i aşmamalıdır. ASR reaksiyonlarına karşı önlem alınacaksa kalkersi uçucu kül (W) sınıfı içeren katkılı çimentoların kullanımından kaçınılmalıdır.

2.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Yüksek fırın cürufu, çimentoya ek olarak yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Yüksek fırın sıcaklığı 1350-1550℃'ye ulaştığında yüksek sıcaklık reaksiyonu ile üretilen, %95'ten fazla cam fazı içeren ve potansiyel hidrolik özelliklere sahip bir yan üründür (Taylor, 1997).

Yüksek fırın cürufu kullanımının ise üretimi aşırı derecede kirletici bir malzeme olan Portland çimentosunun potansiyel bir ikamesi olan aktif alkali çimentoların üretimi için uygun bir alternatif olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Marvila vd., 2021).

2.2.1 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Demir-çelik fabrikalarında ham demirin üretimi sırasında meydana gelen atık bir yan ürün olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu beton veya harç içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan yapay bir puzolandır. Erimiş cüruf, suyla hızla söndürüldüğünde veya güçlü su jetleri ile soğutulduğunda granül cüruf olarak bilinen ince taneli camsı bir yapı oluşturur. Bir miktar kristalize yapıya sahip olmakla birlikte camsı yapıda olan yapay bir puzolandır (Pal vd., 2003).

Yüksek fırından eriyik halde atık malzeme olarak dışarı atılan cüruf yaklaşık 1500°C sıcaklıkta olduğundan, cürufun yapı malzemesi olarak kullanımı, soğutulduktan sonra mümkündür. Yüksek fırın cürufunun yaklaşık %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, magnezyum, alüminyum ve oksijenden oluşmaktadır (Escalante vd., 2001).

Yüksek oranda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan yüksek fırın cürufları bu özelliklerinden dolayı puzolanik özellik gösterirler ve uygulanan soğutma tekniğine göre değişik yapısal karakteristikler göstermektedirler (Erdoğan, 1995). YFC'ye has bir özellik olarak, döküm işlemini takip eden sonraki iki veya dört gün içerisinde betonda yeşile yakın mavi bir rengin oluştuğu gözlenebilir. Bu renk değişimine cürufun içerdiği sülfitle bir araya gelen çimentonun tepkimesi neden olmaktadır. Zamanla meydana gelen bileşen oksitlenmesiyle bu renk ortadan kaybolur. Betonda geçici olarak oluşan bu renk değişiminin mekanik özelliklere olumsuz bir etkisi görülmemiştir (Committee 233, 2001).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun uygun alkali aktivatörlerle birleştirildiğinde çözünmeye girip katılaşması sayesinde çimentosuz harç üretimi yapılabilir. Alkaliler ile aktive edilmiş cüruflu harçlarda en yüksek dayanımlar sodyum silikat ile aktive edilmiş harçlarda elde edilmiştir (Bilim, 2006).

Türkiye'de YFC vb. endüstriyel atıkların kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. YFC kullanılması ile endüstriyel bir atık değerlendirildiği için bu tarz ürünlerin ekonomiye yeniden kazandırılması sağlanmış olacak ve çevreye etkilerinin azaltılıp çevre kirliliği önlenmiş olacaktır (Topçu ve Canbaz, 2008).

YFC'nin ilk kez bağlayıcı olarak kullanılması 1774 yılındadır. YFC, 1889 yılında Paris metrosu inşaatında kullanılmıştır. YFC ilk kez 1892'de Almanya'da, 1896 yılında ABD'de, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1950'li yıllardan sonra betona katkı maddesi olarak eklenmeye başlanmıştır (Ünal ve Güçlüer, 2016).

2.2.2 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Kullanım Alanları

Endüstriyel atık olarak ortaya çıkan YFC inşaat sektöründe yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir. YFC, beton veya harç karışımlarında çimento yerine kullanılabilir. YFC içeren ürünlerde erken yaşta düşük ve geç yaşta ise yüksek dayanım olduğu gözlenmiştir. Betonda priz süresini uzatıp su ihtiyacını ve hidratasyon ısısını azalttığı, işlenebilirlikte artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra YFC'nin sertleşmiş betonda durabilite değerlerini kuvvetlendirdiği bilinmektedir. Ayrıca beton veya harçta puzolanik katkılardan uçucu kül, yüksek fırın cürufu çimento ile birlikte sülfat dayanıklılığını arttırmak için kullanılabilir.

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harçların, yüksek kuruma büzülmesine sahip olması inşaat malzemesi olarak kullanımını kısıtlayan bir özelliktir. Nano-TiO_2'yi alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harçların içerisine ilave ederek, mekanik özellikleri ve kuruma büzülmesini incelenmiş ve deneysel sonuçlar Nano-TiO_2 ilavesinin basınç dayanımını artırdığını, kuruma büzülmesini ise azalttığını göstermektedir (Yang vd., 2015).

2.3 Hazır Beton Tesislerinde Geri Dönüşüm

İnşaat endüstrisi dünya genelinde doğal kaynakların yaklaşık %50'sini tüketmekte ve atıkların da %50'sini oluşturmaktadır (De Schepper vd., 2014). 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 (Sealey vd., 2001). Dünya genelinde kabaca her yıl 125 milyon ton atık beton oluştuğu söylenebilir. 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 (Khan vd., 2009). ABD'de ise bu oran %6'dır. Japonya ve Hong Kong'da, üretilen toplam betonun sırasıyla ağırlıkça yaklaşık %1-2'si (Shiba ve Ntuli, 2017) ve %1,5'i (Tam ve Tam, 2007) 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 m^3 atık betondan yaklaşık 1,7 ton agrega tekrar kullanılmak üzere elde edilmektedir (Andaç ve Emel, 2016). Günlük ortalama 300 m^3 hazır beton üretimi yapan bir tesiste gün sonunda 0,5-1 m^3 hacimdeki betonun atık haline geldiği söylenebilir (Kou vd., 2012a). 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 m^3 betondan yaklaşık 30 kg atık çamur oluşmaktadır (Audo vd., 2018). Bununla beraber bu sürece dahil olan maliyetler vardır. Atık çamur içerisinde bulunabilen arsenik ve krom gibi maddelerin çevreyi kirletme riski de bulunmaktadır (Audo vd., 2016). Bu nedenle, depolama alanına gönderilmesini önlemek için bu atığı en aza indirgemek ve hatta ortadan kaldırmak gerekir.

Taze beton atığının geri dönüşümünü sağlamak üzere uygulanan 4 farklı yöntem Tablo 2.5'te özetlenmiştir.

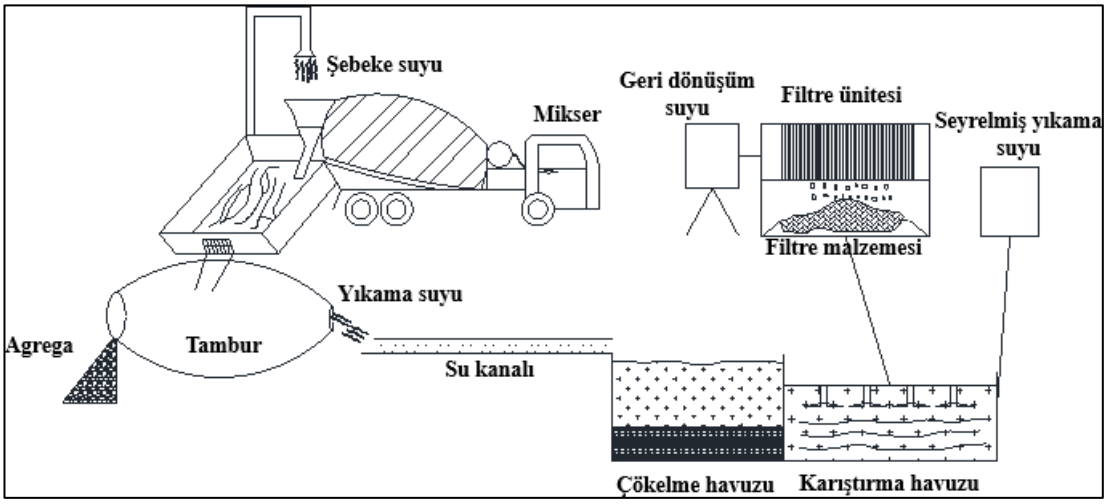
Atık yönetimlerinin uygulanabilirliği hazır beton tesislerinde farklılık gösterebilir. İlk iki yöntem, taze beton atığından yeni ürünler elde etmek amacıyla doğrudan kullanım süreçleri olarak değerlendirilebilir. Ancak bu iki yöntemde; taşıma ve kimyasal katkılarla karıştırma işlemleriyle oluşan ek maliyetler ve zaman kısıtlılığı söz konusudur. Diğer iki geri dönüşüm yöntemi dolaylı kullanım süreçleri olarak kabul edilebilir (Xuan vd., 2018). Üçüncü yöntem, hem atık su hem de katı atık oluşumunun engellenmesini sağlar (Ferrari vd., 2014). 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.

Tablo 2.5 Taze beton atığı geri dönüşüm sistemleri (Xuan vd., 2018)

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 belirlifabrikalara taze beton atıkları verilmesi
2. Yeni üretilen betonda doğrudan kullanım	Taze beton atıklarının priz geciktirici ve hidratasyon 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 çökelmesi 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 ayrışan 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 çökeltme havuzuna iletilir. Bazı tesislerde yağmur suyu da yıkama suyu ile aynı havuza yönlendirilir (Muştu, 2019). Çökeltme havuzunda askıda katı maddeler yerçekimi etkisiyle dibe doğru çökelir ve yıkama suyu kısmi seyrelmiş hale

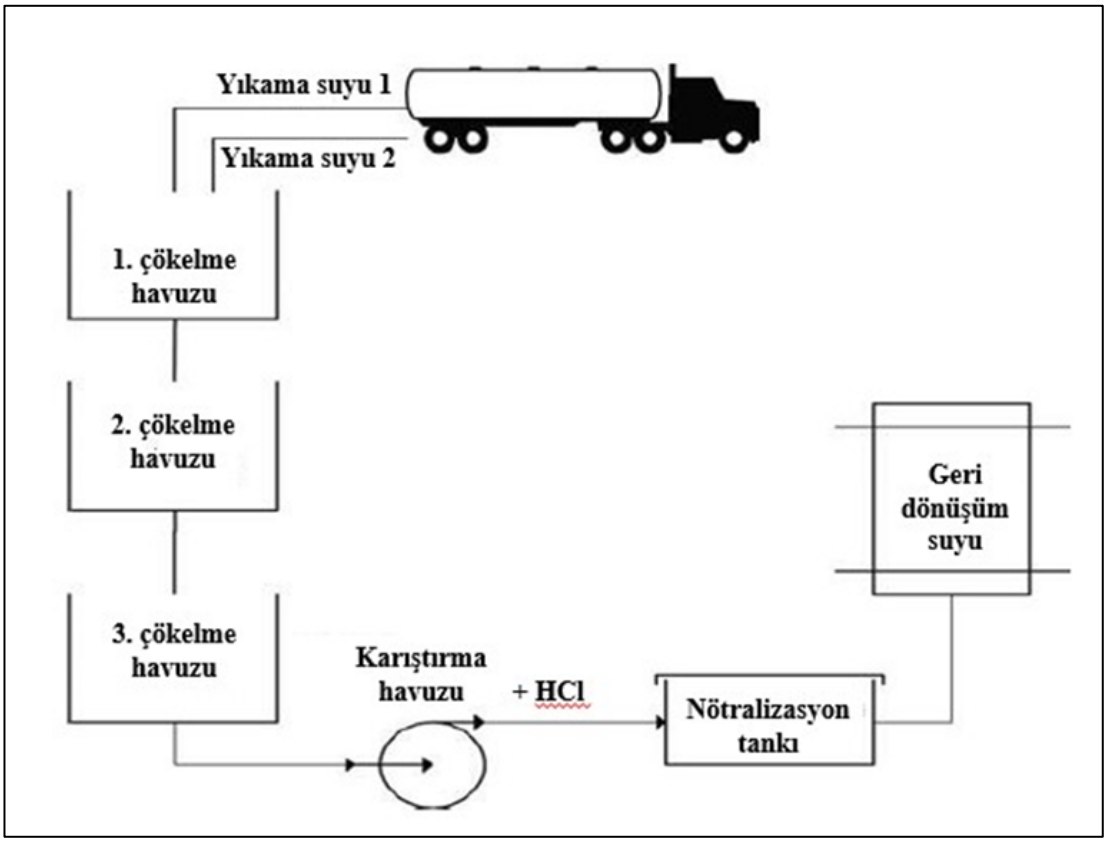
gelir. Makine yağı vb. maddeler de su yüzeyine çıkar. Kısmi seyreltilmiş yıkama suyu, karıştırıcıların bulunduğu ikinci bir havuza yönlendirilir. Karıştırıcıların çalıştırılmasıyla katı maddelerin su içinde askıda kalarak değişen su seviyesi boyunca eşit bir şekilde dağılımı amaçlanır (Doğan ve Özkul, 2019). Karıştırma işleminden sonra yıkama suyu filtre pres ünitesine pompalanır. Burada, basınçlandırmayla 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 karışımda doğrudan kullanılabilmektedir. 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 (TS EN, 2003) Üretimde yeniden kullanılabilirliği kanıtlandıktan sonra yıkama suyunun birim ağırlığı ölçülerek beton karışımına ilave edilecek su miktarı ve eksiltilecek kum kütlesi belirlenir (Coşkun vd., 2017). Karıştırma havuzundan doğrudan alınan yıkama suyu teste tabi tutulmadan beton karma suyu olarak kullanılamamaktadır. Şekil 2.6'da Türkiye'de bir hazır beton tesisinde kullanılan geri dönüşüm sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Türkiye'deki bir hazır beton tesisinde geri dönüşüm sistemi

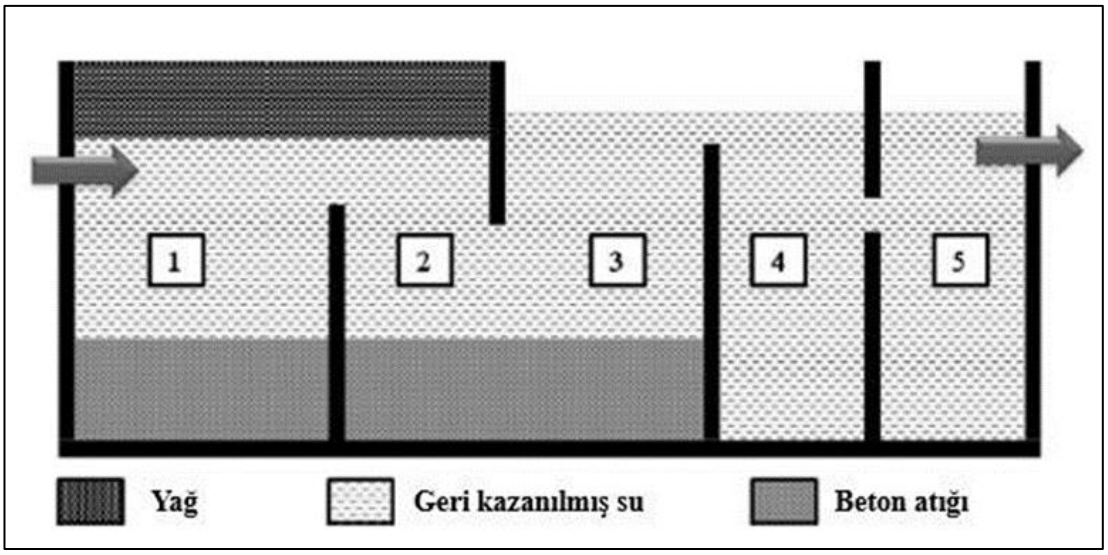
Başka bir hazır beton tesisinde uygulanan yıkama suyunun geri kazanılması yöntemi Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Bu yöntemde filtre pres kullanmak yerine, yıkama suyunun katı tanelerden ayrılması için transmikserlerin iki kez yıkanması ve üç kez çökeltilmesi tercih edilmiştir. Yıkama suyu 1. havuzdan 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 2.7 Hazır beton tesisinde yıkama suyunun geri kazanımı işlemi (Tsimas ve Zervaki, 2011)

Brezilya'da yapılan bir araştırmada, çalışmaların yapıldığı iki farklı tesisteki çökeltme havuzlarının yapısı Şekil 2.8'deki gibidir. Geri kazanılmış suda dağılan partiküllerin miktarını azaltmak amacıyla Şekil 2.8'deki 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 2.8 Çökeltme havuzu yapısı (Vieira ve de Figueiredo, 2016)

2.3.1 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.

2.3.2 Yıkama Suyu ve Filtre Kalıntı Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Tablo 2.8'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 (Su vd., 2002). Geri dönüşüm sisteminde nötralizasyon işlemi varsa yıkama suyunun pH değeri düşmekte; ayrıca, nötralizasyon işlemi HCl gibi bir asitle yapılıyorsa yapısındaki klorür muhtevası da artmaktadır (Tsimas ve Zervaki, 2011).

Tablo 2.6'da 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 (Chatveera vd., 2006). 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 (Ekolu ve Dawneerangen, 2010; Su vd., 2002). Şebeke suyu ile karşılaştırıldığında; yıkama suyunun alkalinite, pH, özgül ağırlık ve toplam katı madde miktarı değerleri daha yüksektir (Chatveera vd., 2006). 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 (Doğan, 2008).

Tablo 2.6 Yıkama suyu kimyasal analizi.

Referans	**pH**	**Klorür muhtevası (ppm)**	**Sülfat muhtevası (ppm)**	**Katı miktarı (ppm)**	**Alkali muhtevası (Na_2O+0.658K_2O) (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	-	-	-

Tablo 2.6 Devamı

	11,6-12,1	**19,9-33,7**	**69,4-475,8**	-	-	
[74][3]	12,5	183	1702	-	-	-
[75]	12,6	29	31	115000	160	-
[76]	8,1-13,5	5-836	13-5172	630-200000	160-639	-
Veri Aralığı						835-2240

Literatürde filtre malzemesine ait kimyasal bileşim değerleri Tablo 2.7'de özetlenmiştir.

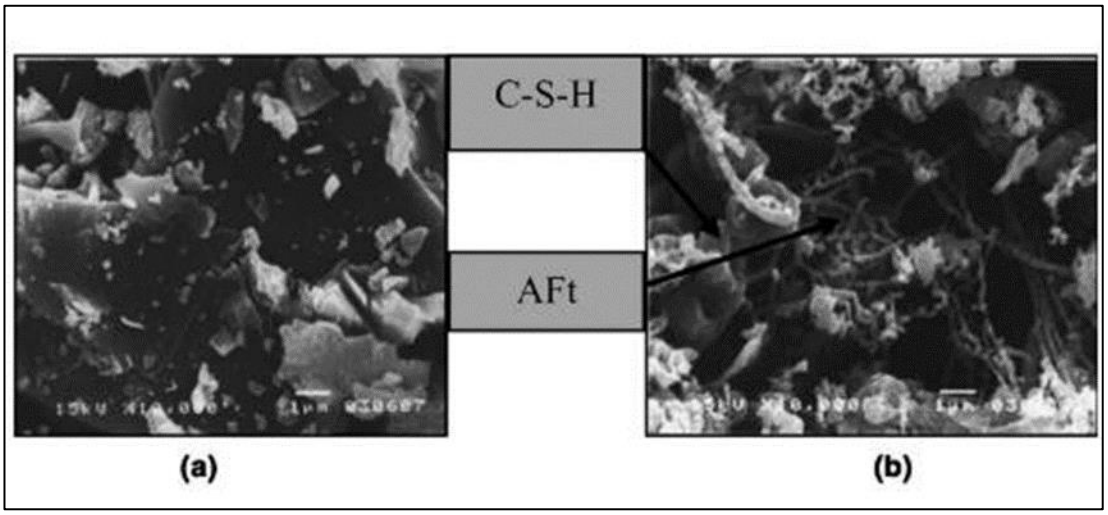
Tablo 2.7 Filtre kalıntı malzemesi kimyasal bileşimi.

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 (Chatveera vd., 2006). Portland çimentosuna göre filtre malzemesindeki artan SiO_2 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 (Chatveera vd., 2006).

Şekil 2.9'da çimento ve filtre malzemesinin mikroskop altı görüntüleri verilmiştir. Anhidr çimento tanelerinin köşeli tanecikler, filtre malzemesinin ise uzun ince yapıda iğnemsi etrenjit (AFt) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) formunda görüldüğü tespit edilmiştir (Chatveera vd., 2006).



Şekil 2.9 Mikroskop altı görüntüsü. (a) Portland çimentosu ve (b) çamur tozu (Chatveera vd., 2006)

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 SiO_2 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 puzolanik özelliğinin olmadığını göstermiştir (Anastasiou vd., 2018).

Zervaki ve arkadaşları filtre malzemesinin esas olarak kalsit ($CaCO_3$) ve portlanditten ($Ca(OH)_2$) oluştuğunu bulmuştur. Ayrıca 90 µm'lik elek üzerinde kalan tanelerin %0,8 kadar az miktarda olduğu tespit edilmiştir (Zervaki vd., 2013).

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 (Sandrolini ve Franzoni, 2001).

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 (Audo vd., 2016).

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, hidratasyon ürünleri ve betondan gelen ince kumun biriktiği gözlenmiştir. SiO_2 miktarının ağırlıkça yaklaşık %32 olduğu ve ağırlıkça %19,57 SiO_2 içeren anhidr çimentoya göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Benzer şekilde, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarları çimentodakinden daha fazladır. Beton bileşimindeki uçucu kül, silis dumanı ve kumun filtre malzemesindeki SiO_2 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 hidratasyon ürünlerinin ($Ca(OH)_2$ ve C-S-H) ve kalsitin ayrışmasından kaynaklandığını göstermiştir. Tesisten alındıktan sonra geçen gün sayısıyla beraber gözlenen filtre kalıntı malzemesinin pH değerindeki artış, çimento hidratasyonu 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 hidratasyonundan gelen kısmi $Ca(OH)_2$'in yıkama suyunda çözünmesi ve geri dönüşüm sırasında ayrıştırılmasıdır (Ann ve Song, 2007).

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 (Audo vd., 2018).

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.

2.3.3 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 (Correia vd., 2009).

Kou ve arkadaşları, filtre malzemesini sertleşmesini takiben kırma ve eleme yoluyla 10 mm ve 20 mm boyutlarında agrega haline getirdikten sonra karışımdaki iri agrega 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 miksere 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 (Kou vd., 2012a).

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 μm'nin altında ve üstünde olacak şekilde kullanılmıştır. Kimyasal aktivitesini ölçmek amacıyla 100 μm'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 çökelmesinin 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 çökelmesini geciktirirken, çamur portlandit çökelmesini 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 ısının 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 μm'nin altındaki boyutlarda kullanıldığında basınç dayanımında artış gözlenmiştir (Audo vd., 2016).

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 (Doğan ve Özkul, 2019).

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 arttırıcı etkisi olduğu yönündedir. Aynı zamanda yıkama suyu, içindeki katı miktarına rağmen betonun işlenebilirliğinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Priz süreleri standartlarla belirlenen sınır değerleri aşmamıştır (Tsimas ve Zervaki, 2011).

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 (Chatveera vd., 2006).

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 miktarıyla birlikte kıvamı düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yeraltı suyu veya üst yıkama suyu ile karıştırılan harçların priz başlangıç süreleri referans harcın priz başlangıç süresine yakınken, 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 çözünmüş kalsiyum ve sodyum hidroksitler içeren yıkama suyunun alkalinitesinden (pH=11-12) kaynaklandığı düşünülmüştür. Yıkama suyunun alkalinitesi, sadece çimento hidratasyonunu hızlandırmakla kalmayıp, aynı zamanda mineral katkıların puzolanik reaksiyonunu da aktive etmektedir (Su vd., 2002).

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 (Asadollahfardi vd., 2015).

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 geçirimliliği üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını ortaya koymuşlardır (Ekolu ve Dawneerangen, 2010).

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 (Sandrolini ve Franzoni, 2001).

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, hidratasyon 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 olmasınddan 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 (Chatveera vd., 2006).

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 hidratasyonu hızlandırmasına rağmen, 90. günde de etkisini gösterdiği yönündedir (Klus vd., 2019).

Transmikser yıkama suyunu filtreleme ve farklı tür asitlerle nötralize 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. HCI ile nötralize 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 artışa 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 (Zervaki vd., 2013).

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 arttırılması karışımların viskozitesinde artışa 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 temasa 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 arttırma 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 çökelmesi 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 (De Matos vd., 2020).

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 (Shahidan vd., 2017).

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 (Klus vd., 2017).

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 (Özkul ve Doğan, 2016).

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 hidratasyon özellikleri incelenmiştir. Portland çimentosunda görülen ve C_3S hidratasyonunu temsil eden tepe oluşumu 100% filtre malzemesi içeren karışımda görülmemiştir. Bu sonuç, filtre malzemesindeki çimento hidratasyonunun 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 hidratasyon 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 (Tang vd., 2019). Filtre malzemesinin yapısında fazlaca bulunan CH'ın puzolanik reaksiyonu, filtre malzemesine göre daha düşük oranda karışıma (%70 filtre malzemesi + %30 çimento) dahil edilen çimento hidratasyonuna baskın gelmiş olabilir. Kalkerin dahil edildiği karışımda en düşük basınç dayanımı değerinin elde edilmesi, kalkerin hidratasyon 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 CO_2 emiliminden kaynaklandığı düşünülmüştür (Anastasiou vd., 2018).

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 (Hossain vd., 2017).

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 $CaCO_3$ 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 C_3A 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 karışımdakine göre kuru çamurda bulunan $CaCO_3$'ın hidratasyonu hızlandırıcı etkisi ile artmıştır. İkame oranı %30'a çıkarıldığında, azalan toplam çimento miktarı nedeniyle $Ca(OH)_2$ miktarı azalmıştır. Kuru çamurdaki $CaCO_3$ ve sülfat iyonlarının, AFm ve AFt hidratasyon fazları ile etkileşime girdiği ve karbonalüminatların oluşumuna ve etrenjit miktarının artmasına neden olduğu düşünülmüştür (Vaičiukynienė vd., 2020).

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 ile 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 daha azdır (Ann ve Song, 2007). 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 ila %31,23 arasında bulunmuştur. Taze haldeki filtre malzemesinin su/katı oranı 0,76 ila 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 (Xuan vd., 2016).

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 (Wasserman, 2012).

Kou ve ekibi önceki çalışmalarında betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini göz önünde bulundurarak, filtre malzemesinin taşıyıcı olmayan elemanlarda kullanımının daha elverişli olacağından hareketle bölme duvar üretiminde kullanımını incelemişlerdir (Kou vd., 2012a). 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 (Kou vd., 2012b).

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 (Papí, 2014).

Yıkama suyunun basınç dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin incelendiği başka bir çalışmada beton karışımında kulanılan 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 (Kadir vd., 2016).

Rughooputh ve arkadaşları, kuru filtre malzemesini belirli oranlarda ince ve iri agrega 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 (Rughooputh vd., 2017).

Silva ve ekibi, filtre malzemesinin tane boyut analizini yapmış ve filler olmaktan daha çok ince agrega olarak değerlendirilebileceğini öne sürmüşlerdir. İzotermal kalorimetre deneyi sonuçları, filtre malzemesinin içinde dikkate değer miktarda anhidr çimento tanelerinin bulunmadığını göstermiştir. %1 oranında çimento ile ikame ya da %6'dan az oranda kum ile ikame, basınç dayanımını olumsuz etkilememiştir (Silva vd., 2020).

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 CO_2 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 presten geçtikten sonra bile çamurun içinde kum tanelerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 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 alkalinitenin 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 C_3S 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 C_3S, 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 karışımdaki çimento dozajını düşürerek seyreltici etki göstermesiyle açıklanmıştır. Çekirdekleşme bölgelerinin sayıca artması ve çimento dozajının azalması, hidratasyonun 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 harçta daha iyi bir filler etkisine yol açmıştır. İnce malzeme çimento taneleri arasındaki veya çimento ile agrega arasındaki aderansı arttırmakta, böylece basınç dayanımının artmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, çekirdek etkisi ile hidratasyon 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 çevre 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, çimento üretiminden kaynaklı karbon emisyonunu ve enerji tüketimini azalttığını ortaya koymuşlardır (He vd., 2020).

2.4 Geopolimer Harçlar

Çağımızda hava kirliliğine sebep olan sera gazlarından biri de karbondioksit (CO_2) gazıdır. Amerika Meteoroloji Derneğinin yayımladığı 2020 iklim değişikliği raporunda CO_2 salınımının 2019 yılına göre %0,6 arttığını belirtmiştir. İnşaat sektörünün temel malzemelerinden olan çimentonun üretimi ise CO_2 salınımına sebep olan ana unsurlardan biridir. Bu sebeple inşaat sektörü, çevreye sürekli ve artarak zarar vermektedir. Yeşil çevre fikrinin giderek yaygınlaşmasıyla yenilenebilir enerji kullanımı, mevcut kaynakların tasarruflu kullanılması ve çevreye zararlı atıkların geri dönüşümü konuları önem kazanmaktadır. Bu bilgiler ışığında çimentonun yerine alternatif malzemeler araştırılmış ve çimentosuz beton adıyla geopolimerler üretilmiştir. Geopolimer üretiminde salınan CO_2 miktarı çimento üretiminde salınandan 9 kat daha azdır (Davidovits, 1991).

Geopolimerizasyon, ısıtılmış kilin muhteva ettiği alüminat ve silikatların oksijen atomları yardımıyla kovalent bağlı bileşik oluşturması olarak ifade edilebilir.

Geopolimer, serbest silikat ve alüminat barındıran malzemelerin sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat ve potasyum hidroksit (KOH) gibi alkalilerle reaksiyonu sonrası oluşan bağlayıcı malzeme olarak tanımlanmaktadır. Geopolimerlerin kristal ya da amorf kimyasal yapıya sahip oldukları ayrıca doğal kayaç özellikleri taşıdıkları belirtilmiştir (Polat, 2019).

Geopolimer malzemelerin yapısındaki çoğunlukla ısı ile aktifleştirilmiş olan doğal silikon ve alümin mineraller, alkalin ile aktifleştirilen moleküller arası bağları güçlendirilmekte ve polimer meydana getirmektedir. Alkali aktivasyonlu çimentolar veya inorganik polimer çimentolar adını buradan alırlar.

Geopolimer oluşumunda kullanılan su işlenebilirliği arttırmak için kullanılır ve kür-kurutma aşamasında geopolimerin yapısından uzaklaşarak süreksiz nano boşluklu bir yapı oluşturur. Boşluklu yapı geopolimere hafiflik, yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi olumlu etkiler kazandırır (Şinik, 2019).

C-S–H, hidrasyon yoluyla dayanım kazanırken, geopolimerleşme dehidroksilasyon ile dayanım kazanır. Bunlar tersine süreçlerdir. Bununla birlikte, C-S-H ve geopolimerin dayanım kazanması SiO_2 içeren bağları oluşturmasıyla gerçekleşir (Kaya, 2016). Geopolimerlerin kullanım alanları ve uygulamaları ve Farklı kimyasallar içeriklere sahip geopolimerlerin uygulama alanları Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.8 Geopolimerlerin kullanım alanları ve uygulamaları

Kullanım Alanı	**Uygulama**
İnşaat mühendisliği	Düşük CO_2 , hızlı prizlenen çimento, prekast beton ürünleri ve hazır beton
Yapı malzemeleri	Tuğlalar, bloklar, döşeme taşları, camlı fayanslar, akustik paneller, borular
Arkeoloji	Arkeolojide onarım ve restorasyon çalışmaları
Kompozit malzeme	Havacılık kullanılan aletler, yapısal seramikler
Yangına dayanıklı malzeme	Ateşe ve ısıya dayanıklı fiber kompozit malzeme, Karbon fiber kompozit
Refrakter uygulama	Metal döküm için refrakter kalıplar, Geopolimer yapıştırıcıda refrakter olarak kullanımı, Refrakter
Atık kullanımı	Geopolimerlerde atık olarak
Toksik materyalin immobilizasyonu	Evsel, tehlikeli, radyoaktif ve kontamine malzemelerin çok geçirimsiz, yüksek mukavemetli
Diğerleri	Boyalar, kaplamalar, yapıştırıcılar

Tablo 2.9 Farklı kimyasallar içeriklere sahip geopolimerlerin uygulama alanları

Si/Al Oranı	**Uygulama Alanı**
1	Tuğla, seramik, ısı yalıtımı
2	Düşük CO_2 salınımlı çimento, beton, toksik atık depolama
3	Isıya dayanıklı kompozitler, hazır beton elemanları, cam elyafkompozitleri
>3	Sızdırmazlık uygulamaları
20<Si/Al<35	Yangına dayanım uygulamaları ve cam elyaf kompozitleri

2.4.1 Geopolimer Harçların Özellikleri

Alkali aktifleştirilmiş uçucu küller veya alkali aktifleştirilmiş metakaolin olarak tanımlayabileceğimiz geopolimer Portland çimentosuna (OPC) benzer dayanıma sahip olan bir malzemedir. Geopolimerlerin farklı çevresel şartlardaki dayanıklılık özellikleri (asidik saldırıya karşı direnç, yüksek sıcaklıklardaki davranış özellikleri) OPC'den daha iyi olabilmektedir.

Geopolimerlerin bileşimsel mikroyapısal özellikleri ile farklı agresif koşullara tepkileri arasında doğru ilişkiler kurabilmesi için yoğun araştırmalar yapılması gerekmektedir. Geopolimer ile ilgili yapılabilecek en doğru araştırma yöntemleri mümkünse zamana bağlı olan deney yöntemleridir (John ve Jannie, 2009). Geopolimerler için uygun bir standart prosedürü oluşturmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Geopolimerler mevcut OPC endüstri altyapısı ile küresel ölçekte rekabet eden bir ürün olarak değil, bunun yerine çimento üreticileri tarafından pazara daha geniş bir çimento ürün yelpazesi sunmak için kullanılabilecek bir teknoloji olarak görülebilir. Buna karşılık, iki bileşenli geopolimer beton üretimi, uygun teknolojiye erişim sağlamak için yeterli uzmanlığın mevcut olması nedeniyle ticarileştirme için hazırdır. Geopolimer beton üretimi, 2008 yılının başlarında Avustralya'da orta ölçekli üretime başlamıştır (Nowak, 2008). Üretimleriyle ilişkili olarak, düşük sera gazı emisyonlarına sahip yeni inşaat malzemelerine artan bir talep vardır. Bu nedenle, geopolimerik beton potansiyel olarak Portland çimento betonunun yerini almak için yaygın olarak kullanılabilir, ancak bu sadece hem hammaddeler için etkili bir tedarik zinciri hem de ürünler için bir dağıtım ağı mevcut olduğunda gerçekleşecektir. Geopolimer betonun küresel bazda ölçeklenebilir bir meta haline getirilmesi biraz zaman alacaktır. Bu arada, özellikle kömür külünü düşük karbon ayak izine sahip betona dönüştürmek için geopolimer teknolojisindeki çalışmalar devam etmektedir (John ve Jannie, 2009).

Sertleştirilmiş geopolimer betonun elastik özellikleri ve güçlendirilmiş geopolimer beton yapı elemanlarının davranışı ve mukavemeti, Portland çimento betonu durumunda gözlemlenenlere benzemektedir (Chang, 2009; Sofi vd., 2007). Üretilen

GPC numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları, Portland çimentosu ile hazırlanan beton yapı elemanları için kullanılan hesaplama yöntemlerinin GPC beton yapı elemanları için de uygulanabilir olduğunu göstermiştir (D. M. J. Sumajouw vd., 2007; M. Sumajouw ve Rangan, 2006). Yüksek kürleme sıcaklıklarında yüksek mukavemet kazancı, geopolimer betonu prekast yapısal uygulamalarda kullanılabilir kılmaktadır.

Isıyla sertleşen, düşük kalsiyumlu uçucu kül esaslı geopolimer beton, aynı zamanda sülfat saldırısına karşı mükemmel direnç, iyi bir asit direnci göstermekte ve çok az kuruma büzülmesine maruz kalmaktadır (M. Sumajouw ve Rangan, 2006).

Geopolimer betondaki donatı çubuğunun bağlanma özellikleri araştırılmış ve Portland çimento betonu ile karşılaştırılabilir veya daha üstün olduğu belirlenmiştir (Chang, 2009; Sarker vd., 2007; Sofi vd., 2007).

Geopolimer betonun sunduğu mekanik özellikler, yapısal uygulamalarda dayanım ve özellikle yangına dayanıklılık perspektifinden faydalı olmaktadır.

GPC'lerin çevresel etkilere karşı dayanım özellikleri ile ilgili araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.4.1.1 Sülfat saldırısı ve deniz suyu saldırısına karşı direnç

Alkali aktif metakaolin ve uçucu kül dahil olmak üzere alkalin inorganik polimer çimentolar, yüksek kalsiyum fazlarının bulunmaması nedeniyle geleneksel sülfat saldırısına ve deniz suyuna çok iyi direnç göstermektedir. Geopolimer ürünleri genellikle çok az kalsiyum içeren veya hiç içermeyen kaynak malzemelerden oluştuğu için $Ca(OH)_2$ ve monosülfoalüminat içermez. Bu nedenle, bu malzemeler sodyum sülfat çözeltisine maruz kaldığında, matriste genleşmeye neden olacak şekilde alçıtaşı ve etrenjit büyümesi olmaz, yani geopolimer harç bu mekanizmalara göre sülfat saldırısı ile bozunmaya uğramaz.

Farklı araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar alkali aktifleştirilmiş uçucu kül macunlarının ve harçlarının sülfatlara ve deniz suyuna maruz kaldıklarında iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Yapılan çalışmalarda tuzlu su çözeltileri ile

temastan sonra jel bileşiminde veya mikroyapıda önemli bir fark gözlenmemiştir. Bununla birlikte, bazı durumlarda sodyum sülfat mevcudiyeti tespit edilmiştir (Bakharev, 2005; Fernández-Jiménez vd., 2007a; Mehta, 2000).

Hardjito ve arkadaşları tarafından uçucu kül bazlı GPC'nin sülfat saldırısına karşı direnci üzerine bir dizi test yapılmıştır. Örneklerin 12 hafta boyunca %5 sodyum sülfat (Na_2SO_4) solüsyonunda ıslatıldıktan sonra basınç dayanımlarında, kütlelerinde ve test numunelerinin uzunluğunda önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür (Hardjito vd., 2003).

Palomo ve arkadaşları metakaolin bazlı geopolimer harçların 9 ay boyunca deniz suyu, sodyum sülfat çözeltisi (kütlece %4,4) ve sülfürik asit çözeltilerine (0,001 M) ıslatılmasından sonra mikroyapı ve mukavemetlerinde ihmal edilebilir düzeyde bozulmalar olduğunu belirtmişlerdir. Bu daldırma olayı süresi zarfında meydana gelen bir çözünme-çökelme olayı nedeniyle sadece bükülme mukavemeti dalgalanmaları gözlenmiştir (Palomo vd., 1999).

Sülfat saldırısı, çimentoya bazı doğal veya kirli yeraltı suları gibi sülfat içeren çözeltiler tarafından saldırıldığında ortaya çıkabilir. OPC'de bu tür bir saldırı dayanım kaybına, hacim artışına, yüzey tabakalarının parçalanmasına ve nihayetinde parçalanmaya yol açabilir (Neville, 1995; Taylor, 1997).

Bakharev, agresif ortamlarda (%5 sodyum sülfat çözeltisi, %5 magnezyum sülfat çözeltisi ve her iki çözeltinin bir karışımı) alkali aktif uçucu kül macunlarının stabilitesinin bileşenlerin iç düzenine bağlı olduğunu belirtmiştir. NaOH kullanılarak hazırlanan geopolimer malzemelerin, Na_2SO_3 aktivatörleri ile hazırlanan geopolimerlerden daha fazla kristalli yapıya sahip olduğunu ifade etmiştir (Bakharev, 2005).

Provis ve Van Deventer; geopolimerlerin kristalli yapısının fazla olması durumunda agresif ortamlarda daha kararlı olduklarını belirtmişlerdir. Bu durumu; kullanılan aktivatörün NaOH olması durumunda geopolimerin daha kararlı bir çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapısına sahip olmasına bağlamışlardır. Her halükarda, alkali ile aktive edilmiş uçucu kül harcının normal Portland çimentosu harçlarından daha iyi

performans gösterdiği ve görsel bir bozulma belirtisinin olmadığı gözlemlenmiştir (Provis ve Van Deventer, 2009).

Aktive edici çözeltide çözünür silikatların varlığının genellikle alkalin silikoalüminat kristalizasyon derecesini azalttığı ve zeolit kristalleşmesini geciktirdiği bilinmektedir (Engelhardt ve Michel, 1987; Klinowski, 1984). Ayrıca, silikat iyonlarının varlığı, Si açısından daha zengin jeller ile daha kompakt yapıların oluşumuna yol açmaktadır (Criado vd., 2007; Duxson vd., 2005; Fernández-Jiménez vd., 2006; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005). Bu durum, Na_2SO_3 çözeltisi ile aktive edilmiş harçlarda mekanik mukavemetin neden NaOH ile aktive edilmiş harçlarınkinden daha yüksek olduğunu açıklamaktadır.

2.4.1.2 Asit saldırısına karşı direnç

Geopolimer betonun önemli bir özelliği asidik ortamda nispeten yüksek direnç göstermesidir. Araştırmacılarca, alkalilerce aktive edilmiş metakaolin veya uçucu külün nitrik, sülfürik veya hidroklorik asitler tarafından kimyasal saldırıya karşı direncinin Portland çimento harcı veya betondan çok daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Yüksek asidik koşullarda, geopolimer betonun üstün asit direncine sahip olduğu ve madencilik, bazı imalat endüstrileri ve kanalizasyon sistemleri gibi uygulamalar için uygun olabileceği gösterilmiştir. Davidovits ve arkadaşları, geopolimer malzemelerin yüksek alkali içeriğinde bile herhangi bir tehlikeli alkali-agrega reaksiyonu oluşturmadığını belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar, metakaolin bazlı geopolimer numunelerin 4 hafta boyunca %5'lik bir sülfürik asit çözeltisine daldırıldığında sadece %7'lik kütle kaybına uğradığını belirtmişlerdir (Davidovits vd., 1999). Silverstrim; 3 ay boyunca hacimce %70 nitrik aside maruz kalan alkali aktifleştirilmiş uçucu kül numunesinin yoğun mikro yapısını koruduğunu belirtmiştir (Silverstrim, 1997).

Rostami ve Brendley; GPC'nin kütle kaybı açısından yüksek asit direncine sahip olduğunu, asit direnci testinden önce ve sonra SEM mikrograflarında benzer mikro yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Song ve ark. (2005) tarafından 8 hafta boyunca %10 sülfürik aside maruz kalan F sınıfı uçucu kül bazlı bir geopolimer betonun yaklaşık %3 kütle kaybı ve %35 basınç dayanımı azalması gösterdiği bildirilmiştir.

Aynı araştırmacılar, geopolimer jelin pH değeri 3'e kadar olan bir asit ortamında bağlayıcılık özelliğini koruyabildiğini belirtmişlerdir (Rostami ve Brendley, 2003).

Bakharev, %5 asetik (pH = 2,4) ve sülfürik asit çözeltilerine (pH = 0,8) maruz kaldığında uçucu kül ve alkalin aktivatörleri kullanılarak üretilen geopolimerin dayanıklılığını incelemiştir. En iyi performans NaOH çözeltisi ile aktive edilerek oluşturulan geopolimer numuneler için elde edilmiştir. Sülfürik ve asetik asit çözeltilerinin agresif ortamına maruz bırakılan numunelerden, NaOH ile hazırlanan daha fazla kristalli yapıya sahip olan geopolimer numunelerin, Na_2SO_3 aktivatörü ile hazırlanan amorf geopolimer numunelerine göre daha kararlı bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir (Bakharev, 2005).

Geopolimerin konsantre bir zayıf asit (örneğin, asetik asit) ile etkileşmesi, geopolimer çevresindeki değiştirilebilir katyonların (Na, K) hidrojen veya hidronyum iyonları ile değiştirilmesine neden olabilmektedir. Bununla birlikte, bir geopolimerin güçlü bir asitle (örneğin, sülfürik asit) etkileşmesi; Si-O-Al bağlarının kırılmasına, geopolimerde artan sayıda Si-OH ve Al-OH grubu bağların oluşmasına ve çözeltide artan miktarda silisik asit iyonları ve dimerlerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu nedenle, bu işlem geopolimer malzemelerde bir kütle kaybına yol açmaktadır. Si/Al oranı = 1 olan inorganik polimer yapıları, silis oranı yüksek olan polimerlere göre asitler tarafından daha fazla saldırıya maruz kalmaktadır (Bakharev, 2005). Portland çimentosu (OPC) kullanılarak hazırlanan beton örnekleri, sülfürik veya asetik asit çözeltisine maruz bırakıldığında ise testin ilk ayı içerisinde tamamen bozularak iyi performans göstermemişlerdir. Asidik ortamlardaki OPC'li beton örneklerinin bozulması malzemenin yüksek kalsiyum içeriğine bağlıdır.

Wallah ve arkadaşları; geopolimer beton örneklerinin (alkali aktifleştirilmiş uçucu külden türetilmiş) sülfürik asit çözeltisine (%2 konsantrasyon) batırıldıktan sonra örneklerin yüzeyinde oyulma ve bozulmaların oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, basınç dayanımlarında önemli azalmalar gözlenmiştir. Bununla birlikte, basınç dayanımındaki azalmalar %1 ve %0,5'lik sülfürik asit konsantrasyonlarında daha küçük olmuştur. Asit çözeltilerine maruz kalan örneklerin görsel olarak incelenmesi sonucunda, GPC örneklerinin 90 gün sonra sağlıklı göründüğü, OPC örneklerinin ise

56 günlük daldırma işleminden sonra göze çarpan bir renk değişikliği ve küp numunlerinin kenarlarındaki kütle kaybı ile ciddi şekilde bozulduğu belirtilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları, NaOH veya Na_2SiO_3 çözeltileri ile aktive edilen GPC harçlarında, mukavemetin yaklaşık %23-25 azaldığını, OPC harç mukavemetindeki azalmanın ise bu oranın neredeyse iki katı %47 olduğunu göstermiştir (Wallah vd., 2005).

Geopolimerlerin asit direnci için yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar, kullanılan alkali türünün asit direncinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Na içeren alkalilerin asitlerle hidratlanmış tuzlar oluşturma eğilimi nedeniyle, K içeren silikatlar genellikle sülfürik asit veya karbondioksite karşı daha iyi direnç sergilemektedirler. Bununla birlikte, K içeren matrisler daha düşük kristallik derecesine sahip olduklarından, bu durum bu matrislerin HCl asit saldırısına karşı doğal olarak daha düşük bir dirence sahip olmaları sonucunu getirmektedir (van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999).

2.4.1.3 Çelik donatı korozyonuna karşı direnç

Portland çimento betonlarında, betonarme yapıların dayanımında meydana gelen başarısızlığının ana nedenlerinden bir tanesi donatının korozyonudur. Bilimsel literatürde mevcut olan geopolimer betonda donatı korozyonu hakkında sadece birkaç çalışma vardır (Bastidas vd., 2008; Fernández-Jiménez vd., 2010; Miranda vd., 2005). Değişen çevresel koşullarda stabilitenin büyük ölçüde kullanılan aktifleştirici çözeltiye bağlı olmasına rağmen, uçucu kül harçlarının çelik donatıyı pasifleştirebildiği görülmüştür.

Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre;

1. Etkinleştirilmiş uçucu kül harçları, çelik donatıyı Portland çimento harçları kadar hızlı ve etkili bir şekilde pasifleştirir.

2. Pasif durumun uzun ömürlülüğü veya stabilitesi büyük ölçüde uçucu külü aktifleştirmek için kullanılan bileşiklere bağlıdır.

3. Kritik depassivasyon eşiğinden daha yüksek konsantrasyonlarda aktifleştirilmiş uçucu kül harçlarında klorürlerin varlığı, korozyon oranlarını geleneksel Portland çimento harçlarında gözlemlendiği gibi yaklaşık 100 kat artırmaktadır.

Yodmunee ve Yodsudjai, benzer basınç mukavemetine sahip malzemeler için geopolimer betonun donatı çubuk korozyonuna geleneksel betondan daha iyi direnç gösterdiğini belirtmiştir. Araştırmacılar daha yüksek basınç mukavemetli geopolimer betonlarının donatı çubuk korozyonuna daha iyi direnç sağladığını belirtmişlerdir (Yodmunee ve Yodsujai, 2006).

Morris ve Hodges diğer metal türlerinin korozyonuna ilişkin olarak, uçucu kül bazlı geopolimer ve harçlara gömülü bir dizi temsili mühendislik metalinin OPC beton sistemlerinde beklenen duruma benzer elektrokimyasal ve korozyon davranışı gösterdiğini bulmuşlardır (Morris ve Hodges, 2005).

2.4.1.4 Yüksek sıcaklık ve yangına karşı dayanım

Farklı araştırmacılar alkali-aktifleştirilmiş alüminosilikatların yüksek sıcaklıktaki davranışları ile ilgili olarak çalışmalar yapmışlardır. Geopolimerlerin Portland çimentosu harçlarından veya betondan daha iyi direnç gösterdiklerine dair genel bir fikir birliği vardır. 1200-1400°C'ye kadar termal kararlılığa sahip olan sodyum silikat, potasyum silikatlar ve metakaolin kullanılarak hazırlanan malzemelerin çok iyi ısı direnci özellikleri olduğu bildirilmiştir (Davidovits vd., 1999). Barbosa ve Mackenzie geopolimer malzemenin ateşe maruz kaldığında artan miktarda su / sodyum silikat oranına bağlı olarak termal direncinin azalabileceğini belirtmişlerdir (Barbosa ve MacKenzie, 2003).

Geopolimer malzemelerin termal özellikleri, 700-1000°C ısıya maruz kaldıklarında Portland çimentosu betonlarınkinden daha üstün bulunmuştur. Bakharev alkali ile aktifleşen uçucu küller için, K içeren alkalin çözeltisi ile aktifleştirilen geopolimerlerin Na ile aktifleştirilenlerden daha iyi yangın direncine sahip olduğunu belirtmiştir. Na içeren aktivatörlerle aktive edilen uçucu kül numunelerinde 800°C'de, oluşan büzülme çatlağına bağlı olarak ortalama gözenek büyüklüğünde önemli bir artış ve

mukavemette hızlı bir bozulma gelmiştir. Mukavemet kaybı alüminosilikat jelin bozulmasına bağlanmıştır. Alüminosilikat jelin ayrışması ile sodyum, silikon ve alüminyumdan arındırılarak Na-feldispat üretilmiştir. Örneklerin sodyum içeriği arttığında erime noktası daha düşük bir sıcaklıkta meydana gelmiştir. Potasyum silikat ile aktive edilen materyaller için, ısıtma sonucu basınç dayanımı önemli ölçüde artmıştır ve mukavemet kaybı sadece 1000°C'de başlamıştır. Bu durum, ateşleme sırasında matristeki Na'un, K'dan daha yüksek bir difüzyon katsayısına atfedilebilir (Bakharev, 2006). Elde edilen bu sonuçların diğer yazarların sonuçlarıyla karşılaştırılmasıyla, Na içeren aktivatörlerle alkali aktifleştirilmiş uçucu kül malzemelerinin performansının, muhtemelen uçucu külün düşük dereceli reaksiyonu, geopolimerlerin eksik polimerizasyonu ve uçucu külün içinde bulunan safsızlıklar nedeniyle (yani demir içeriği) metakaolin kullanılarak hazırlanan malzemelerinkinden daha düşük olduğu sonucuna varılabilir (Barbosa ve MacKenzie, 2003).

Skvara ve arkadaşları alkali aktifleştirilmiş uçucu kül çimentosu için sıcaklığa karşı dayanım ile ilgili ana problemlerin 500-700°C aralığında oluştuğunu belirtmişlerdir (Škvára vd., 2005). Bununla birlikte, ısıl işlemden sonra alkali ile aktive edilen uçucu külün mukavemeti, Portland çimentosu bazındakinden nispeten daha yüksektir (Palomo vd., 2008).

Gourley ve Johnson, ana hat raylarında güçlendirilmiş geopolimer beton demiryolu traverslerinin performansının yüksek ve geopolimer harç duvar panellerinin yangına karşı mükemmel direncinin olduğunu belirtmiştir (Gourley ve Johnson, 2005).

Palomo ve arkadaşları numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklıkta yerinde bir yüke maruz bırakıldığında malzemenin davranışını incelemişlerdir. Bir fırının içine yerleştirilmiş bir Instron servo-mekanik makinede eğilme ve basınç dayanımını (25°C ile 600°C arasında) belirlemek için farklı prizmatik numuneler kullanılmıştır. Örnekler 4°C / dakika oranında ısıtılmıştır. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, numune testi gerçekleştirmeden önce 20 dakika stabil bekletilmiştir. Ayrıca, numuneleri ısıtma sırasında test cihazına güvenli bir şekilde sabitlemek için ısıtma sırasında numuneler 5 N ön yüke maruz bırakılmıştır. Hem OPC (referans sistemi) hem de NaOH alkali çözeltisi ile aktive edilen uçucu kül ile

oluşturulamün beton numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları için elde edilen sonuçlar ortam sıcaklığında yüksek değerlerde iken, artan sıcaklıklarla bu değerler azalmıştır. 600°C'de eğilme mukavemeti, ortam sıcaklığında elde edilen değerin sadece %20'si olmuştur. Bunun tam tersine, aktif uçucu külden elde edilen çimentonun eğilme mukavemeti sıcaklıkla çok değişmemiştir ve hatta bir miktar yükselmiştir. Basınç dayanımı şaşırtıcı bir şekilde 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli ölçüde yükselmiştir. 600°C'de Portland çimentosu numunelerinde (mukavemeti artan sıcaklıklarla aniden düşerken) makroskopik çatlaklar gözlenirken ve fırında malzeme kırıntıları bulunmuştur. Bununla birlikte 600°C'de alkali ile aktive edilen uçucu kül numunelerinde, çatlaksız çok kompakt bir matris oluşmuştur. Geopolimer malzemeler; yanıcı olmamaları, toksik duman yaymamaları ve yangına dayanıklı polimer nanokompozitler için %5-12 arasında çok düşük bir ağırlık kaybına sahip olmaları nedeniyle organik polimerler ile karşılaştırılabilirler (Palomo vd., 2008). Literatürde, F sınıfı uçucu kül kullanılarak oluşturulan geopolimer malzemelerin yüksek büzülme ve basınç dayanımındaki büyük değişikliklerden dolayı refrakter uygulamalar için uygun olmadığı belirtilmiştir (Bakharev, 2006; Fernández-Jiménez vd., 2007b; Krivenko ve Kovalchuk, 2002; Palomo vd., 2008).

Yangından korunma bağlamında yapılan çalışmalar, geopolimer malzemelerin yüksek sıcaklıklara karşı nispeten iyi bir stabilite ve mukavemete sahip olduklarını göstermektedir ki, bu da yangına dayanıklılığın bir göstergesidir. Bununla birlikte, geopolimer malzemeler kullanılarak hazırlanmış numunelerin ISO 834 tarafından tanımlanan standart bir yangına maruz kalması durumunda, ısı iletiminin yanı sıra koruma katmanının termal direnci ile eşdeğer bir beton korumanın kalınlığı arasındaki ilişkiyi belirlemek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

2.4.2 Geopolimer ile alakalı yapılan çalışmalar

Geopolimerlerin birçok özellik bakımından portland çimentolu betonlardan daha iyi performans gösterdikleri günümüze kadar yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır. Bu özelliklerden biri ise yapılarda kalıcılık problemlerine sebep olarak, yapının kullanım dışı kalmasına yol açabilecek kadar önemli olan yüksek sıcaklık etkisidir (Kaplan vd., 2022).

Lea and Stradling 1920'lerde betonda yüksek sıcaklık etkisi araştırmalarıyla öncü olmuştur. Bu bilim insanları 800℃'de beton dayanımını üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Agrega ile hamur ara yüzeyinde ısıl uyuşmazlığın yıkıcı etkilerinden bahsetmişlerdir. Arayüzeydeki ısıl uyuşmazlığın bozucu etkileri üzerine öncü çalışmalar yapmışlardır. Bir kayaç parçasını hamur ile sarma temeline dayalı gerçekleştirdikleri elastik gerilme analizi ile betonun 100℃'de deforme olacağını fakat 300℃'ye kadar mukavemetinde artışlar olabileceğini öne sürmüştür (Peng vd., 2006).

Yangın gibi ani yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun mekanik özellikleri kullanılan agrega türü, nem muhtevası, çimento/agrega oranına ve yüklenme miktarına bağlı olarak değişir (Butcher ve Parnell, 1983).

Yüksek sıcaklık etkisi betonun yapısın büyük değişikliklere sebep olur. Betonda jel suyu, emilmiş suyu ve serbest su durumlarında bulunan sular, sıcaklığın artışı ile buharlaşarak beton yapısından uzaklaşır. Yangın etkisinde bozulma öncelikle beton yüzeyinde başlar. Beton içinde bulunan suların buharlaşarak uzaklaşması beton yüzeyine çıkması ve uzaklaşması zordur. Ancak yangın etkisi gibi ani yüksek sıcaklık etkisinde bu sularda buharlaşır ve buhar betonu tahrip ederek dışarı çıkar (Yalçın ve Gürü, 2006).

Sancak ve Şimşek yüksek sıcaklık etkisini ölçmek için silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcılar kullanarak ürettikleri hafif betonlarda silis dumanı ve akışkanlaştırıcıların yüksek sıcaklıklarda kütle kaybını önlediğini gözlemlemişlerdir. Silis dumanlı hafif betonların 800℃ üstünde, normal betonlara göre daha iyi dayanım verdiği saptanmıştır (Sancak ve Şimşek, 2006).

Hossain betona farklı oranlarda volkanik kül ekleyerek hazırladığı yüksek dayanımlı betonları yüksek sıcaklıklara tabi tutarak incelendiği bu çalışmada 200℃'ye kadar dayanımda artış gözlemlenirken, 200℃-400℃ arası %4-15 dayanım kaybı ve 400℃-600℃ arasında kayıplar %32 ile %48 oranlarına kadar çıkmıştır (Hossain, 2006).

Xiao ve König yaptığı çalışmada yüksek sıcaklık betonun basınç, eğilme dayanımı ve elastite modülü gibi birçok mekanik özelliğini etkilemektedir. Bu değerler genel olarak

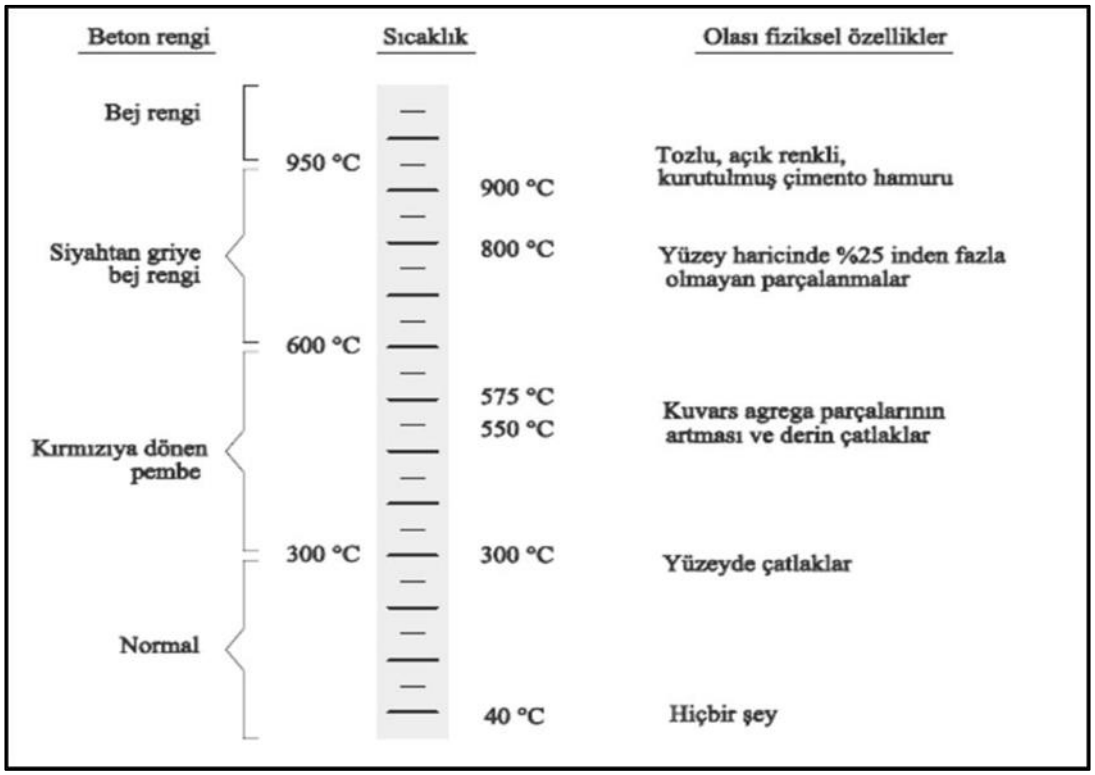
sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Çalışmada yapı elemanlarından çelik ve beton kıyaslandığında çeliğin ani bozulma sıcaklığı 300°C iken bu değer beton için 400°C olduğu ifade edilmiştir (Xiao ve König, 2004).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların havada ve suda soğutma olmak üzere iki farklı soğutma yöntemi vardır. Yapılan çalışmada literatürdeki birçok çalışmanın aksine suda soğutulan betonların dayanım kaybının havada soğutulan betonlarınkine göre daha düşük olduğu ifadesi kullanılmıştır. Bunun sebebinin ise su ile soğutmada betonun kaybettiği suyun bir miktarını soğutma esnasında geri alması olduğu ifade edilmiştir (Şimşek, 2009).

Bingöl ve Gül yangının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, yüksek sıcaklık ve soğutma metotları parametreleri kullanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisiyle agrega yapısında genleşme, çimento harcında büzülmeler, beton yapısındaki suyun dehidrasyonu ve farklı fiziksel ve kimyasal süreçler nedeni ile betonun mekanik özelliklerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Su ortamında soğutmanın betonun dayanım kaybını, betona tekrar hidratasyon imkânı sağlayacak suyu temin etmesinden dolayı azalttığı ifade edilmiştir (Bingöl ve Rüstem, 2009).

Yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan deformasyonları değerlendirmenin farklı yöntemleri vardır. Bunlardan en kolayı malzeme üzerinde gözlem yapmaktır. Betonda oluşan renk değişimi, çatlaklar, dökülmeler malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri hakkında güçlü tahminlerde bulunmaya yardımcı olur. Yüksek sıcaklıktan doğabilecek zararlar da bu şekilde tespit edilebilir. Betonda oluşan çatlaklar, dökülmeler ve renk değişiklikleri kolayca görülebilir (Durmuş ve Arslan, 2009).

Geagali ve Tsakiridis 2005 yılında Şekil 2.10'da görüldüğü gibi betonun sıcaklık etkisinde renk değişimi ve fiziksel özelliklerini vermiştir.



Şekil 2.10 Betonun yüksek sıcaklıkla renk değişimi (Georgali ve Tsakiridis, 2005)

Betonda pembe ile kırmızı tonlar sıcaklığın 300℃- 600℃, gri ve grinin tonları 600-900℃'ye, sarımtırak tonlar veya bej ise 900℃-1000℃ sıcaklığa maruz kaldığını göstermektedir (Kızılkanat ve Yüzer, 2008).

Yüzer ve arkadaşları yüksek sıcaklık etkisiyle pembe renk alan betonun, dayanımının ve elastisite modülünün çok azaldığı, beyaza çalan gri veya sarı-bej arası renkli betonun ise mukavemetsiz ve kırılgan olduğu bildirilmiştir. Renklerdeki ton değişikliklerinin görülmesinin sebebi içerdikleri metal bileşenlere bağlanmıştır (Yüzer vd., 2007).

Yüksek sıcaklık etkisiyle, 600℃'de sıcaklıkta beton, başlangıçtaki dayanımının %50'sini, 800℃ sıcaklıkta ise hemen hemen %80'ini kaybettiği düşünülürse, betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, renk incelemesi yaparak tahmin edilir. Bu yöntem basınç dayanımı ve diğer fiziksel özellikler hakkında fikir verir. Bu sayede renk değişiminin beton özellik tayininde önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde meydana gelen değişimlerin silis dumanı gibi ikamelerle yoğunlaştırılan betonlarda daha bariz belli olduğu ifade edilmiştir (Kızılkanat ve Yüzer, 2008).

İnşaat sektöründe kullanılan agregaların büyük çoğunluğu yüksek sıcaklıklarda fiziksel değişimlere uğrar. Kumların çoğunluğunun bileşenlerini meydana getiren kuvartz kumu 570℃'de morfolojik değişimlere uğrar, bazalt agregaları ve kalker agregaları 650℃'de kalıcı ısıl genleşmeler yapar. Karbonat içerikli agregalar 700℃ ve üzerinde CaO ve CO_2'e dönüşür. Sıcaklık etkisi agregada meydana gelen bu kimyasal, morfolojik ve fiziksel değişimler betonda önemli sorunlara sebep olur (Topçu ve Demir, 2007).

Silisli agrega ve kireç taşı kullanılarak hazırlanan betonların 200-800℃ aralığında sıcaklıklarda ısıtarak basınç dayanımları kıyaslanmıştır. Çalışmada kireçtaşı ve silis agregası ile hazırlanan numunelerin 200℃'de dayanımlarını sırasıyla %99 ve %100 oranlarında koruyabildikleri; 400℃'de sırasıyla %95 ve %87 oranlarında koruyabildikleri; 600℃'de sırasıyla %85 ve %56 oranlarında koruyabildikleri; 800 ℃'de sırasıyla %62 ve %0 (numune dağılmıştır) oranlarında koruyabildikleri gözlemlenmiştir (Zega ve Di Maio, 2009).

Kocabeyoğlu, bazalt lifli betonlar üzerinde yaptığı çalışmada sıcaklık etkisiyle içyapı bozulmalarından kaynaklı ultrases geçiş hızlarında, eğilme ve basınç dayanımların azalma tespit etmiştir (Kocabeyoğlu, 2016).

Kaya, genleştirilmiş vermikülit, silis dumanı ve çimento kullanarak yaptığı bu çalışmada silis dumanının numunelerin birim hacim ağırlıklarını artırırken eğilme dayanımını %26-62 oranlarında azalttığını, yüksek sıcaklık etkisinin basınç, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızını genel olarak azalttığını gözlemlemiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığa (900℃) maruz bırakılan numunelerde göze yapılan incelemede çatlat kırılma ve kopmalar tespit etmiştir (Kaya, 2011).

Sancak ve Şimşek, normal ve hafif agregalı betonlara silis dumanı ekleyerek 20℃, 100℃, 400℃, 800℃, 1000℃ sıcaklıklara maruz bırakmıştır. 100℃ sıcaklığa kadar tüm numunelerin basınç dayanımlarında azalma görmemiş hatta bir miktar artış gözlemlemiştir. 800℃ üzerinde ise hafif agregalı betonların normal agregalı betonlara göre daya iyi basınç dayanımı sağladığını belirtmiştir (Sancak ve Şimşek, 2006).

Abdulkareem ve arkadaşları, uçucu kül ve hafif agrega kullanarak hazırladıkları numuneleri 800°C'ye kadar sıcaklıklara maruz bırakarak geopolimerlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada alkali aktifleştiricilerin geopolimer betonun mekanik dayanımlarına mükemmel katkı sağladığını ancak yüksek sıcaklık etkisinde tepkimeye girmemiş alkalilerin bozulması ile betonun mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiğini, hafif agrega kullanımının geopolimerlerin yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmiştir (Abdulkareem vd., 2014).

Zhang, geopolimer harçlar üzerine yaptığı araştırmada, harcın basınç, eğilme, çekme ve yapışma dayanımlarının 100°C'ye kadar arttığını ancak 300 ila 700°C arasında azaldığını belirtmiştir. Bunun sebebini ise geopolimerlerin yüksek sıcaklılarda dehidrasyon ve dehidraksilasyondan kaynaklı külte kaybı ve geopolimer macununun agregalar ile termal uyumsuzluklar sebebi ile mikro yapı hasarlarının oluşmasına bağlamıştır (Zhang vd., 2016).

Zhang, %50 metakaolin, %50 uçucu kül ile yapılan geopolimer harçlarda hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda optimum basınç ve eğilme dayanımları sağladığını, 800°C'de dayanımlar azalmakta ve kütle kayıpları olduğunu bildirmiştir. Geopolimer harçlarda yüksek sıcaklıklarda termal büzülmesi ile genleşmeleri arasındaki uyumsuzluktan kaynaklı çatlakların oluştuğunu gözlemlemiştir. Bunun sonucunda metakaolin ve uçucu kül ile hazırlanan geopolimerlerin hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda portland çimento harçlarıyla kıyaslanabilecek dayanım sergilediğini söylemektedir (Zhang vd., 2014).

Subaşı, çalışmasında %0-5-10-20 oranlarında uçucu kül eklenerek hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarındaki çimentolu numunelerinin her bir serisi 100-200-300-400-500-600°C sıcaklıklara tabi tutulmuş daha sonra numuneler üzerinde eğilme, basınç dayanımı ve kütle kaybı deneyleri yapışmıştır. Hazırlanan numunelerinin birim ağırlıkları da hesaplanmıştır. Sıcaklık ve uçucu kül miktarına bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımı ile kütle kaybı değerleri kıyaslanmış ve %5 ve %10 uçucu kül ikame eden numunelerin mekanik ve fiziksel davranışları referans numuneye göre daha iyi sonuçlar verirken %20 uçucu kül ikameli numune daha düşük dayanım sonuçları vermiştir. 300°C'ye kadar önemli dayanım ve kütle kayıpları gözlemlenmezken

400°C'den sonra önemli kayıplar gözlenmiş ve en yüksek kayıpların %20 uçucu kül ikameli numunelerde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Subaşı çevresel faktörler hesaba katılarak tasarlanan betonların sürdürülebilir olduğunu, yangının muhtemel ve etkili bir çevresel unsur olduğunu ve bu sebeple tasarımlarda göz önünde bulundurulması gerektiğini tavsiye etmiş ve %10 uçucu kül katkılı harçların yüksek sıcaklıklarda daha az zarar göreceğini söylemiştir (Subaşı vd., 2011).

Sivasakthi ve Jeyalakshmi, uçucu kül ve mikro silika kullanılarak ürettikleri geopolimerlerin SEM görüntülerinden elde ettikleri verilerde mikro silikanın daha kompakt ve yoğun bir mikro iç yapı oluşması sağladığını belirtmiştir. Deneyler Al ve Si bakından zengin N-A-S-H jellerinin ilave reaksiyonlar göstererek yeni ürünler oluşturduğunu bu ürünlerin ise hem oda sıcaklığında hem 800°C'de harçtaki mukavemeti iyileştirdiğini göstermiştir. Harçlar üzerinde ısıl iletkenlik deneyi yapılmış ve oda sıcaklığında 0,7-1,1(W/m.k) arasında değişen değerler bulunmuş bu değerler sıcaklığın artmasıyla düşmüştür. Çalışma sonucunda geleneksel standart kum, %5 silis dumanı ve uçucu küllerle hazırlanan harçlar 800°C'ye kadar termal kararlılık göstermiştir (Sivasakthi vd., 2018).

Kantarcı, Elazığ ferrokrom cürufu ve farklı agregaları kullanarak alkali aktivasyon ile ürettiği geopolimer beton ve normal çimentolu betonları 700°C'ye kadar ısıtmış ve aşağıdaki sonuçları elde etmiştir. Çalışmanın neticesinde dere kumlu geopolimer betonların en iyi dayanım sonuçlarını verirken geopolimerlerin normal portland çimentolu betonlardan daha yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermiştir (Kantarcı, 2013).

Samal, güçlendirilmiş geopolimer kompozitleri üzerinde yaptığı araştırmada cam elyafı, bazalt elyafı ve karbon elyafı kullanarak geopolimer kompozitler üretmiştir. Bu numuneleri 1000°C'ye kadar sıcaklıklarda bozulana kadar maruz bırakarak dayanım özelliklerini incelemiştir. Cam elyafı ve bazalt elyafı ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklıklarda seramik özellikler göstermiştir ancak doğal şartlarda kırılganlık kazanmıştır. Karbon elyaflı numuneler yüksek sıcaklığa maruz kaldığında koruyucu bir oksit tabaka oluşturmuştur. Bu malzemenin bu davranışının yüksek sıcaklıklara karşı koymaya yardımcı olabileceğini ifade etmiştir (Samal, 2019).

Lahoti, Si/Al molar oranının, yüksek sıcaklığa etkisinde kalan metakaolin geopolimerlerinin dayanıklılığı ve hacim stabilitesi üzerindeki etkilerini incelediği çalışma sonucunda silisçe zengin olan nefelit kayacının yüksek sıcaklıklarda kristalleşmesinin geopolimer matrisinin genişleyerek çatlakları tetikleyerek mukavemeti olumsuz etkilediğini düşünmektedir. Metakaolin esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklıklarda çatlak hasarları ve düşük mukavemet sergilemeleri üzerine, bu geopolimerlerin yapısal yangınlarda kullanılabilmesi için dayanım stabilizasyon araştırmalarının genişletilmesi gerektiğini söylemiştir (Lahoti vd., 2018).

Atalar ve Ersoy, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde yapılarda yaygın olarak kullanılan kalker esaslı kayaçları üzerinde yapılan yüksek sıcaklığa dayanım araştırmasında kalker kayaçlar 200℃ - 1000℃'ye kadar 2 saat süre ile sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılıp sonra dayanım özellikleri incelenmiştir. 600℃'de yoğunluk ve ağırlık kaybı değerlerinde büyük değişmeler olmazken çekme dayanımında %40 azalmıştır. Bunun sebebini ise ince daneli kristalleşmelerin içsel gerilim oluşturmasına bağlamıştır. Bu sıcaklıktan sonra ağırlık ve yoğunlukta %50 azalma, boyuna dalga hızı ve çekme dayanımında %80 oranında azalma gözlemlenmiştir. Kalkerenitlerin dış yangınlarda (680℃) mühendislik özelliklerini büyük ölçüde koruyacağını ancak iç yangın durumlarında (1000℃ civarı) dayanım özelliklerini büyük oranda kaybedeceğini bildirmiştir (Atalar ve Ersoy, 2021).

Luhar, yapmış olduğu bilimsel çalışmasında uçucu kül ve atık lastik parçaları, uygun miktar ve derişimde aktifleştirici çözelti ile doğal dere kumu kullanarak geopolimer betonlar üreterek numunelerin oda sıcaklığında ve 200-400-600-800℃ sıcaklıklarda 2 saat tutarak külte, dayanım, yoğunluk ve mikro yapısal karşılaştırmalar yapmıştır. Çalışmanın sonunda hem uçucu kül ile üretilen hem de kauçuklaştırılmış numunelerin sıcaklık artışlarından benzer şekilde etkilendiği, 600℃ sıcaklıkta her 2 tip geopolimer beton için özelliklerinde azalmalar görüldüğü ancak 600℃'den 800℃'ye kadar basınç dayanımının arttığını, 600℃'den sonra kauçuklaştırılmış geopolimer betonlarda kılcal çatlaklar gözlemlendiği belirtilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde hem uçucu kül hem de atık lastikle hazırlanan numunelerde N-A-S-H (alüminasilikat) oluşmuş, yüksek sıcaklık etkisinde hidrosodalite ($Na_4Al_3Si_3O_{12}OH$) dönüşen zeolit oluşmuş ve zeolit

ise 600℃'den 800℃'ye kadar sıcaklığa maruz bırakıldığında nefelin ve albit olarak yeniden kristalleşme göstermiştir (Luhar vd., 2018).

Kut ve Işık, Seyitömer Termik Santralinden elde edilen uçucu külü, potasyum hidroksit kullanarak aktifleştirmiş, köpük ajanı olarak metalik alüminyum, viskozitenin sağlanması için silis dumanı kullanarak geopolimer numuneler üretmiştir. Neticede bu termik santralin atık uçucu küllerinin yapıların ısı yalıtımında kullanılabilecek geopolimerin üretiminde kullanılması ekonomi ve endüstriyel bakımdan mümkün olacağı saptanmıştır. Üretilen geopolimer ısı yalıtım malzemesi, nitelik ve ekonomik açıdan piyasa ürünlerinden üstünlüğünü göstermiştir (Kut ve Işık, 2021).

Kaolin kullanılarak üretilen geopolimer harçlara silis dumanı ve mikro silis (SiO_2) katılarak dayanım özellikleri incelenmiştir. Kaolin içerisine ağırlıkça %3-6-9 oranlarında silis dumanı ve mikro silis ayrı ayrı katılıp, bağlayıcı malzeme, ağırlıkça %11-13-15-17 sodyum ihtiva eden NaOH ile aktifleştirilmiştir. Elde edilen numuneler 24 saat boyunca 110℃'de küre tabi tutulmuştur. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında bırakılmıştır. Çalışmanın sonucunda, ağırlıkça %11-13 sodyum içeren numunelerde SD ile MS katılması birim ağırlıkta azalamaya ancak su emme ve boşluk oranında artmaya yardımcı olmuştur. %15-17 oranında sodyum içeren numunelerde bu durum tam tersi olmuştur. Ağırlıkça %11-13 sodyum içeren numunelerde SD ile MS katılması ultrasonik geçiş hızı, basınç ve eğilme dayanımlarında azalmaya sebep olurken; %15-17 oranında sodyum içeren numunelerde bu dayanım özellikleri artmıştır. Çalışmada basınç dayanımı üzerinde aktivatör oranının artışı, silis dumanı ve mikro silis oranlarındaki artıştan daha etkili olduğu söylenmektedir. Kaolin esaslı geopolimerlerde MS ilavesinin mekanik ve fiziksel özelliklere SD ilavesinden daha tesirli olduğu belirtilmiştir (Kaya ve Köksal, 2021).

Çalışma hacimsel ana bileşen olarak uçucu kül; mineral katkı olarak ise silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve metakaolin ayrıca 2 farklı alkali aktifleştirici kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 20-40-60℃ sıcaklıklarda kürlenmiştir. Erken yaş dayanım özellikleri incelenen numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ise basınç

dayanımları ve mikro yapısı incelenmiştir. Çalışma sonucunda yüksek fırın cürufu ve metakaolinin erken yaş dayanımını ve mekanik özellikleri önemli bir ölçüde iyileştiren puzolanik katkıları temsil edebileceği söylenmektedir. Silis dumanı içeriğinin kademeli artışı aglomera oluşumu, kısmi köpürmeler gibi çeşitli etkenlerle mekanik özelliklerde giderek bozulan bir etki yapmıştır. Çalışmadaki tüm numuneler çimentolu muadillerine göre yüksek sıcaklıklara karşı daha iyi direnç göstermişleridir (Messina vd., 2018).

Kalker kırmataş kullanılarak üretilip 800℃'ye kadar ısıtılan örnekler suda ve havada soğutulduktan sonra basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, su emme ve pH değerleri incelenmiştir. Çalışma neticesinde ilk göze çarpan 800℃ sıcaklık etkisinde kalan kalkersi numuneler suda ve havada soğutma uygulamalarından sonra çok fazla hasar görüp dağıldıkları için mekanik ve fiziksel özellikleri ölçülememiştir. Kalsiyum karbonat bileşiğinin 900℃ civarlarında kalsiyum oksite dönüşmesi, daha bir sıcaklık olan 700℃'nin altında kalkersi numunelerin suyla soğutma aşaması sırasında CaOH oluşturmamıştır. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra numunelerin; Ultrases geçiş hızlarında düşme, kapilaritelerinde artma, basınç dayanımlarında düşme, ince agregaların erimesi hamurda büzülmeler gözlemlenmiştir. Beton yapısında sıcaklık etkisiyle oluşan boşluklar nedeni ile basınç dayanımı kaybının %60 civarlarına ulaştığı sıcaklık değeri 500℃ olarak tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri, düşük sıcaklıklarda (20-300℃ arası) havada soğutulanlar için suda soğutulanlardan yüksek ölçülürken, yüksek sıcaklıklarda (500-700℃ arası) bu durumun tersi gözlenmiştir (Bekem, 2010).

3. DENEYSEL PROGRAM

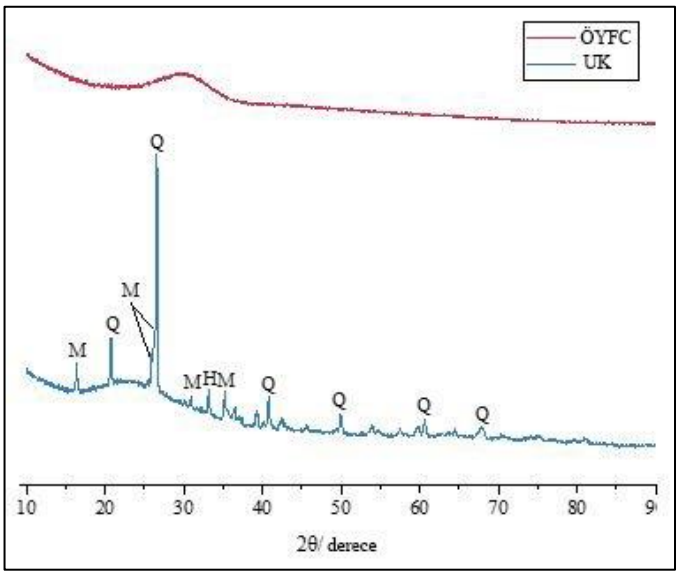
3.1 Malzemeler

Bu çalışmada ana bağlayıcı olarak ASTM C989 standardına uygun öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. YFC'nin özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı (Blaine inceliği) sırasıyla 2,83 ve 4400 cm^2/g'dir. YFC'nin ortalama parçacık boyutu 39 um'dir. Karışımların hazırlanmasında, YFC yerine alüminosilikat malzemesi olarak uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Kullanılan UK, ASTM C618 standardına göredir ve düşük kalsiyuma (F-Sınıfı) sahiptir. UK'nin özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı sırasıyla 2,23 ve 3300 cm^2/g'dir. YFC ve UK'nin kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de sunulmaktadır. Şekil 3.1, YFC ve UK'nin mineralojik özelliklerini göstermektedir. Şekil 3.1'deki XRD modeline göre, YFC'nin yüksek bir amorf faza sahip olduğu görülmektedir. UK'nin kuvars, hematit ve mullit gibi minerallere sahip olduğu gözlenmiştir.

Tablo 3.1 YFC ve UK'ün kimyasal bileşimi (kütle olarak yüzde)

Oksit	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**Na_2O**	**K_2O**	**SO_3**	**KK***
YFC	34,3	15,8	0,7	38,5	8,6	0,4	0,5	<0,1	<0,1
UK	55,6	27,5	6,3	3,2	1,8	0,3	0,4	1,8	2,5

*Kızdırma kaybı



Şekil 3.1 YFC ve UK'ün XRD modeli (Q:Quartz, M:Mullite; H:Hematit)

YFC ve UK'nin kimyasal aktivasyonu için sodyum metasilikat tozu (SMT) kullanıldı. SMT'nin teknik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 SMT'nin kimyasal bileşimi (% kütlece) ve fiziksel özellikleri

Moleküler Formül	**Moleküler Agırlık (g/mol)**	**Renk**	**Yoğunluk (g/cm^3)**
Na_2SiO_3	122,06	Beyaz	2,61
Na_2O	**SiO_2**	**H_2O**	**Şekil**
8,9	28,7	64,8	Toz

Bu çalışmada, agrega olarak %95'ten fazla SiO_2 içeriğine sahip silika agrega kullanılmıştır. Agreganın tane boyutu 0-2 mm aralığındadır. Silika agreganın diğer özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Karışımların hazırlanmasında işlenebilirliği arttırmak için yeni nesil polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının katı içeriği %37 ve özgül ağırlığı 1,07±2'dir.

Tablo 3.3 Silis agregasının fiziksel özellikleri

Özellikleri	**Değer**
Özgül ağırlık	2,72
Su emme (%)	3,41
Maksimum parçacık boyutu (mm)	2,36
İncelik modülü	2,82

Karışımların hazırlanmasında iki farklı su kullanılmıştır. Referans karışım Kastamonu musluk suyu ile hazırlanmıştır. Kastamonu musluk suyu içilebilir niteliktedir. Ancak diğer karışımlarda musluk suyu yerine atık su kullanılmıştır. Atıksu Kastamonu'da bulunan hazır beton tesisinden elde edilmiştir. Atıksu, hazır beton tesisinde açığa çıkan transmikser yıkama suyudur. Transmikser yıkama suyu Şekil 3.2'de gösterilen çökeltme havuzlarından elde edilmiştir. Musluk suyu ile yıkama suyunun ASTM C94 standardına göre karşılaştırması Tablo 3.4'te verilmiştir. Tablo 3.4'te görüldüğü gibi karışımlarda kullanılan sular limit değerlerine uygundur. ASTM C94 standardında belirtilen değerler.



Şekil 3.2 Hazır beton santralinde çökeltme havuzu

Tablo 3.4 Musluk suyu ve yıkama suyunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Parametreler	Musluk suyu	Yıkama suyu	ASTM C94
pH	8,2	12,4	-
Toplam Alkalilik (mg/l $CaCO_3$)	105	908	<600
Sülfat (mg/l)	97	268	<3000
Toplam katı madde (mg/l)	490	2870	<50000
Klor (mg/l)	103	115	<1000
Kalsiyum (mg/l)	55,8	296	-
Bulanıklık	-	710	-

3.2 Karışım Tasarımı

Karışımlarda bağlayıcı dozajı 1000 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Karışımlar ortam kürüne tabi tutulacağı ve self kürleme yöntemi uygulanacağı için ana bağlayıcı olarak YFC seçilmiştir. Ayrıca çimento esaslı kompozitlerde uygulanan su kürü de tatlı su kaynaklarında azalmaya neden olduğu için self-cure veya ortam kür yöntemi tercih edilmektedir. Karışımların aktivasyonu için kuru karışım yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda yalnızca tek bir etkinleştirici bileşen olan SMT kullanılmıştır. Toplam bağlayıcının (YFC+UK) %7,5 ila %15'i için SMT kullanıldı. UK, YFC yerine %25 ve %50'de kullanıldı. Karışımların bağlayıcı/su oranı 0,25'tir. Musluk suyu yerine %50 ve %100 oranında yıkama suyu kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı, toplam

bağlayıcının %5'i oranında kullanılmıştır. Bu kapsamda 18 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışım oranları ve malzeme miktarları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Karışım tasarımı

Karışım Numaraları	Karışım oranları (%)			Malzeme miktarı (kg/m^3)						
	SMT	UK	TYS	UK	YFC	Musluk Suyu	TYS	Süperakışkanlaştırıcı	SMT	Silis Agregası
M1	7,5	0	0	0	1000	250	0	50	75	785
M2			50	0	1000	125	125	50	75	785
M3			100	0	1000	0	250	50	75	785
M4		25	0	250	750	250	0	50	75	759
M5			50	250	750	125	125	50	75	759
M6			100	250	750	0	250	50	75	759
M7		50	0	500	500	250	0	50	75	733
M8			50	500	500	125	125	50	75	733
M9			100	500	500	0	250	50	75	733
M10	15	0	0	0	1000	250	0	50	150	709
M11			50	0	1000	125	125	50	150	709
M12			100	0	1000	0	250	50	150	709
M13		25	0	250	750	250	0	50	150	683
M14			50	250	750	125	125	50	150	683
M15			100	250	750	0	250	50	150	683
M16		50	0	500	500	250		50	150	657
M17			50	500	500	125	125	50	150	657
M18			100	500	500	0	250	50	150	657

3.3 Karıştırma, Döküm ve Kür

İlk olarak, YFC ve UK, 1 dakika boyunca 145 rpm'de karıştırıldı. Bağlayıcılar karıştırıldıktan sonra karışıma suyun 3/4'ü eklenmiş ve 145 rpm'de 2 dakika karıştırılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı eklendi ve karıştırmaya 145 rpm'de 1 dakika ve 285 rpm'de 2 dakika devam edildi. Daha sonra karışım 1 dakika dinlenmeye bırakıldı. Dinlenme aşamasından sonra karışıma SMT ve kalan su ilave edildi ve 285 rpm'de 2 dakika karıştırıldı. Son aşamada karışıma silika agregası eklenmiştir. Agrega ilave edildikten sonra karışım 145 rpm'de 1 dakika ve 285 rpm'de 2 dakika karıştırılmıştır. Karışım toplam 12 dakika sonra hazırlandı. Hazırlanan yaş karışımlar kalıplarına yerleştirildi. Karışımların kendiliğinden yerleşme özelliği olduğundan vibrasyon uygulanmamıştır. Kalıplar laboratuvar koşullarında 24 saat saklandı. Kalıplarından çıkarılan numuneler deney gününe kadar yaklaşık 23°C ve %65 nemli ortamda

muhafaza edilmiştir. Karışımlara su kürü uygulanmadan ortamda kendi kendine kürlenmesi sağlanmıştır.

3.4 Testler

Deneysel çalışmalarda en az üç numune üzerinde testler yapılmıştır.

3.4.1 Priz Süresi ve Kıvam

Farklı oranlarda UK, SMT ve yıkama suyu kullanılan macunların priz süreleri ASTM C191 standardına göre belirlendi. Pastaların priz süreleri Vicat aparatı ile ölçülmüştür. Hobart mikseri ile elde edilen taze karışımların işlenebilirliği için akış tablosu kullanılmıştır. Taze karışımların işlenebilirliği ASTM C1437 standardına göre belirlendi. Karışımların X ve Y yönlerindeki akış çapları ölçülmüştür.

3.4.2 Fiziksel Özellikler

Karışımların yoğunlukları (taze, sertleştirilmiş ve etüv kurusu yoğunluk), porozite ve kapilerite gibi fiziksel özellikleri ölçülmüştür. Karışımların fiziksel özellikleri için ASTM C642 standardı kullanılmıştır. Numuneler 50°C'de 3 gün kurutulduktan sonra fırın kuru yoğunluğu ölçülmüştür. Karışımların su emmesi ve görünür gözenekliliği için 50x50x50 mm küp numuneler kullanılmıştır. 28 günlük kürlenen numunelerde su emme ve görünür gözenekler belirlendi.

3.4.3 Mekanik Özellikler

Karışımların basınç ve eğilme dayanımları 3., 7., 28., 90. ve 180. günlerde belirlenmiştir. Eğilme dayanımı ASTM C348'e göre, basınç dayanımı ise ASTM C349 standardına göre belirlendi. İlk olarak 40x40x160 mm numuneler üzerinde eğilme testi yapılmıştır. Kırılan numuneler üzerinde de basınç dayanımı belirlenmiştir.

3.4.4 Yüksek Sıcaklık Etkisi

28 gün kürlenen numuneler 200, 400, 700 ve 900°C 'de yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulamasında 10°C/dk ısıtma hızına sahip bir kül fırını kullanılmıştır. Numuneler hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra 2 saat bekletildi. Süre sonunda numuneler fırında yavaş yavaş soğutulmuştur. Yüksek sıcaklık dayanımı için 40x40x160 mm prizma numuneleri üretilmiştir. Numuneler üzerinde kütle kaybı ve mekanik özellikler belirlendi.

3.4.5 Donma-Çözülme Etkisi

Numuneler 40, 80 ve 120 döngüden oluşan bir donma-çözülme etkisine maruz bırakıldı. Donma-çözülme direncinin belirlenmesi için ASTM C666 standardı kullanıldı. Numuneler 28 günlük kürlemeden sonra donma-çözülme odasına yerleştirildi. Numuneler -20°C'de 5 saat donma ve 7 saat +4°C'de çözülme işlemine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme etkisine maruz kalan 40x40x160 mm numunelerde kütle kaybı ve mekanik özellikler ölçülmüştür.

3.4.6 Kuruma Büzülmesi

Karışımların kuruma büzülmesi için 25x25x285 mm harç çubukları ASTM C596 standardına göre üretilmiştir. Karışımların ilk boy ölçümleri dökümden 24 saat sonra (kalıptan çıkarıldıktan sonra) yapılmıştır. Numunelerin boyut değişimleri için dijital komparatör kullanılmıştır. Karışımların 90. güne kadar kuruma büzülmesi ölçülmüştür. Uzunluk değişiklikleri 56. güne kadar her 7 günde bir ölçülmüştür.

3.4.7 Kapilerite (Su işleme derinliği)

Karışımların taşıma özellikleri için su penetrasyon derinlikleri (I) ölçülmüştür. Su arıtma derinliklerini belirlemek için 50x50x50 mm küp numuneler üretilmiştir. Bu kapsamda ASTM C1585 standardı kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 50°C'de 3 gün süreyle kurutuldu. Numunelerde su penetrasyon derinliği 28. güne kadar ölçülmüştür. Ayrıca su geçirimsizliği için numunelerin yan yüzeylerine silikon esaslı bir ajan uygulanmıştır.

3.4.8 Asit (HCl) Etkisi

Numunelerin asit direncini belirlemek için %5 asit çözeltisi (HCl) kullanıldı. Numuneler, 28 günlük kürlemeden sonra asit çözeltisine maruz bırakıldı. Örnekler 180 gün süreyle HCl solüsyonunda tutuldu. 180. günün sonunda numunelerin kütle kaybı ve mekanik özellikleri ölçüldü. Asit solüsyonda bekletilen numunelerin boyutları 40x40x160 mm'dir. Ayrıca HCl solüsyonu her 15 günde bir yenilendi.

3.4.9 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Etkisi

Karışımların sülfat direncini belirlemek için %5 $MgSO_4$ çözeltisi hazırlandı. Sülfat direncini belirlemek için ASTM C1012 standardı kullanıldı. Ayrıca sülfat direncini belirlemek için 25x25x285 mm harç çubukları üretilmiştir. Harç çubuklarının genişlemesi 180. güne kadar dijital komparatör yardımı ile ölçülmüştür. $MgSO_4$ çözeltisi 15 günde bir yenilendi.

3.4.10 NaCl Etkisi

Numunelerin NaCl etkisindeki bozulmalarını belirlemek için %5'lik bir çözelti hazırlandı. Bu kapsamda 40x40x160 mm prizma örnekleri üretilmiştir. Numuneler, 28 günlük kürlemeden sonra %5 NaCl çözeltisine maruz bırakıldı. 180 gün süreyle NaCl çözeltisinde tutulan numunelerde kütle kaybı ve mekanik özellikler ölçülmüştür. Ayrıca NaCl çözeltisi 15 günde bir yenilendi.

3.4.11 Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR)

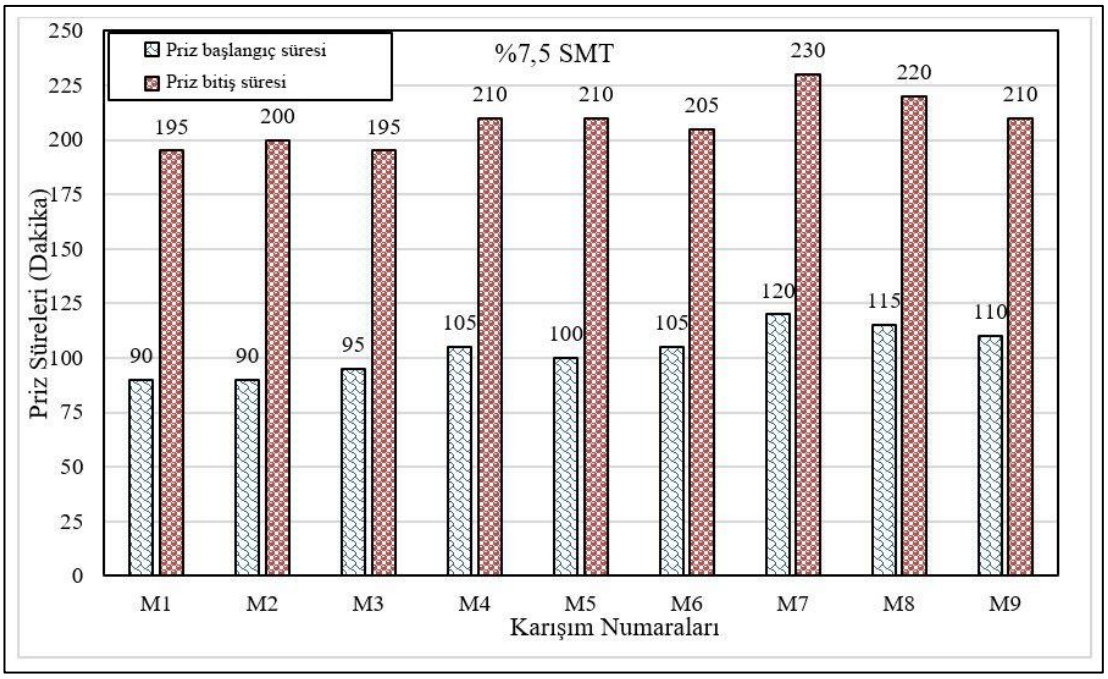
Numunelerin ASR potansiyelini belirlemek için ASTM C1260 standardı kullanıldı. 25x25x285 mm harç çubukları ASTM C1260 standardında belirtildiği şekilde üretilmiştir. 28 gün kürlendikten sonra numuneler 80°C suda 24 saat bekletilmiştir. Bu işlemden sonra numunelerin sıfır (0) okuması alınmıştır. Daha sonra numuneler 80°C'de 1N NaOH çözeltisine yerleştirildi. 14. günden sonra numuneler 23°C'de 1N NaOH solüsyonunda bekletildi. Numunelerin 90. güne kadar genişleme davranışları dijital bir komparatör ile ölçülmüştür.

4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

4.1 Taze Özellikler

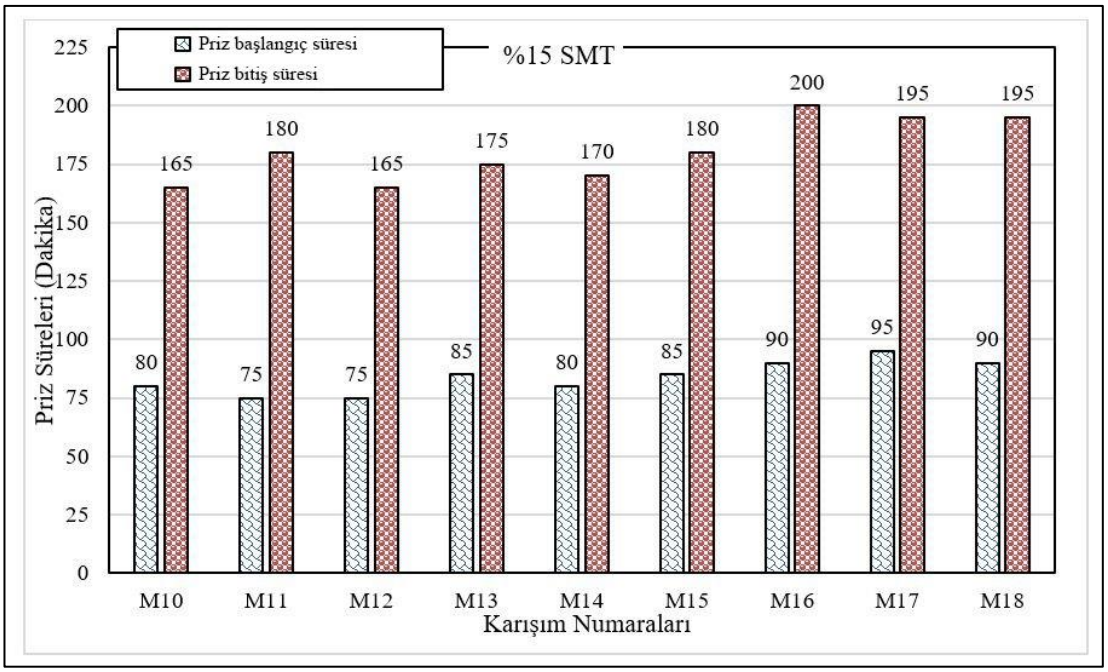
4.1.1 Priz Başlangıç ve Priz Sonu Süreleri

Şekil 4.1, %7,5 oranında SMT kullanılarak üretilen numunelerin priz başlangıç ve priz sonu sürelerini göstermektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde en kısa priz başlangıç süresinin M1 ve M2 karışımlarına ait olduğu gözlenmiştir. M1 ve M2 karışımları incelendiğinde ise UK oranının %0 olduğu gözlenmiştir. Karışıma eklenen UK oranı arttığında ise priz başlangıç sürelerinin uzadığı tespit edilmiştir. Örneğin, UK ve TYS oranı %0 olan M1 referans olarak alındığında, UK oranı %25 ve TYS %0 olan M4 karışımının priz başlangıç süresi yaklaşık %17 artarken, UK oranı %50 ve TYS %0 olan M7 karışımı ise yaklaşık %33 oranında artış göstermiştir. YFC ve UK'nın puzolonik aktivitesi karşılaştırıldığında UK'nın daha pasif olması nedeniyle UK oranı arttıkça priz süresinin uzaması açıklanabilmektedir (Öz vd., 2022). Aynı şekilde priz sonu süreleri incelendiğinde, en düşük priz sonu süresinin M1 ve M3 karışımlarına ait olduğu gözlenmektedir. Priz başlangıç süresinde olduğu gibi priz sonu süresinde de UK kullanılmayan karışımların daha kısa sürede priz sonu sürelerine ulaştığı gözlenmiştir. Örneğin, UK ve TYS oranı %0 olan M1 referans olarak alındığında, UK oranı %25 ve TYS %0 olan M4 karışımının priz sonu süresi yaklaşık %8 artarken, UK oranı %50 ve TYS %0 olan M7 karışımı ise yaklaşık %18 oranında artış göstermiştir. %100 oranında TYS priz süreleri için etkisi incelendiğinde ise karışımların priz başlangıç ve priz sonu sürelerini ya kısaltmıştır ya da olumsuz bir etki oluşturmamıştır. Örneğin, UK oranı sabit ve %0, TYS değişken kabul edildiğinde M1 ve M3 karışımları için priz süreleri hemen hemen aynı olarak gözlemlenirken, UK oranı sabit ve %25, TYS değişken olduğunda M4 ve M6 karışımları için priz başlangıç süreleri aynı kalmış priz sonu süreleri için TYS %100 olduğunda yaklaşık %2'lik bir azalma gözlemlenirken, UK oranı sabit ve %50, TYS değişken olduğunda M7 ve M9 karışımlarının priz başlangıç sürelerinde yaklaşık %8'lik bir azalma meydana geldiği ve priz sonu sürelerinde ise yaklaşık %9'luk bir azalma meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.1 %7,5 SMT kompozitlerin ilk ve son priz süreleri

Şekil 4.2, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin priz başlangıç ve priz sonu sürelerini göstermektedir. Şekil 4.2. incelendiğinde, en kısa priz başlangıç süreleri UK oranı %0 olan M11 ve M12 karışımlarında gözlenmiştir. Priz başlangıç süreleri için %15 SMT kullanılan karışımlarda UK oranı arttıkça süreler bir miktar uzamış olduğu gözlenmektedir. Örneğin, UK ve TYS oranı %0 olan M10 referans olarak alındığında, UK oranı %25 ve TYS sıfır olan M13 karışımının priz başlangıç süresi yaklaşık %6 artarken, UK oranı %50 ve TYS %= olan M16 karışımı ise yaklaşık %12 oranında artış göstermiştir. Priz sonu süreleri değerlendirildiğinde ise, UK oranı arttıkça süreler uzamıştır (Kaplan, 2021). Örneğin, UK ve TYS oranı %0 olan M10 referans olarak alındığında, UK oranı %25 ve TYS %0 olan M13 karışımının priz sonu süresi yaklaşık %6 artarken, UK oranı %50 ve TYS %0 olan M16 karışımı ise yaklaşık %21 oranında artış göstermiştir. %100 oranında kullanılan TYS nispeten priz sürelerini azaltmıştır. Örneğin, UK oranı sabit ve %0, TYS değişken kabul edildiğinde M10 ve M12 karışımları için priz süreleri hemen hemen aynı olarak gözlemlenirken, UK oranı sabit ve %25, TYS değişken olduğunda M13 ve M15 karışımları için priz başlangıç süreleri aynı kalmış priz sonu süreleri için TYS %100 olduğunda yaklaşık %3'lük bir artış gözlemlenirken, UK oranı sabit ve %50, TYS değişken olduğunda M16 ve M18 karışımlarının için priz başlangıç süreleri aynı kalmış, priz sonu sürelerinde ise yaklaşık %3'lük bir azalma meydana geldiği gözlenmiştir.



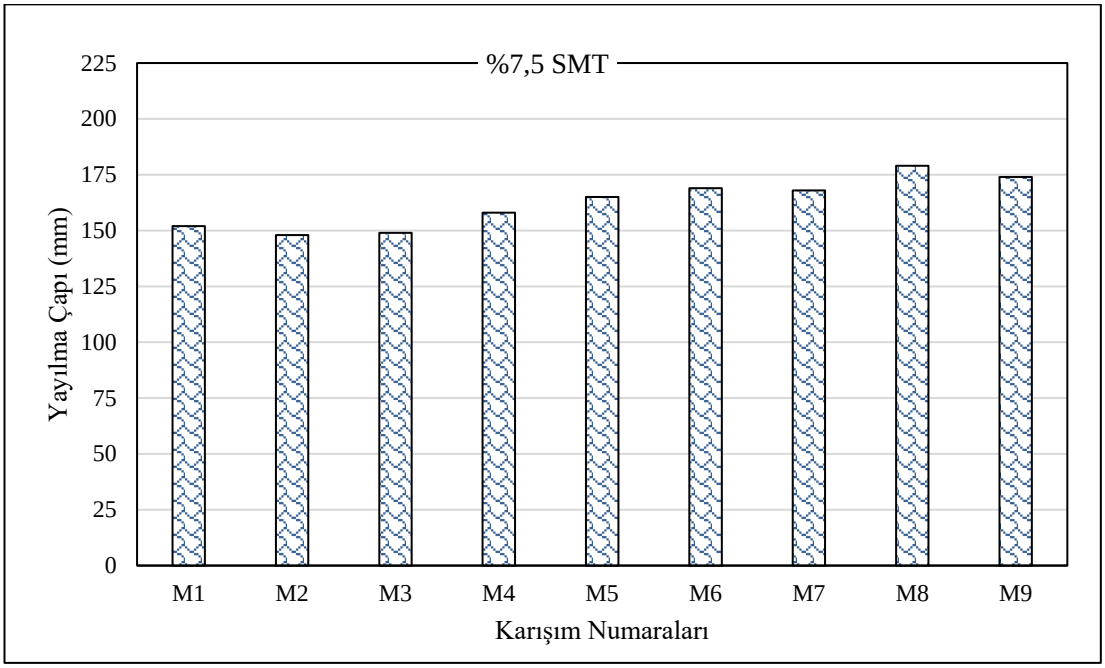
Şekil 4.2 %15 SMT kompozitlerin ilk ve son priz süreleri

%7,5 ve %15 SMT oranlarındaki karışımlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, nispeten transmikser yıkama suyu priz başlangınç ve priz sonu sürelerini azaltmıştır. Uçucu kül kullanılması halinde ise priz başlangıç ve priz sonu sürelerini uzatmıştır. SMT oranının artması priz başlangıç ve priz sonu sürelerini azaltmıştır.

4.1.2 Yayılma Çapı

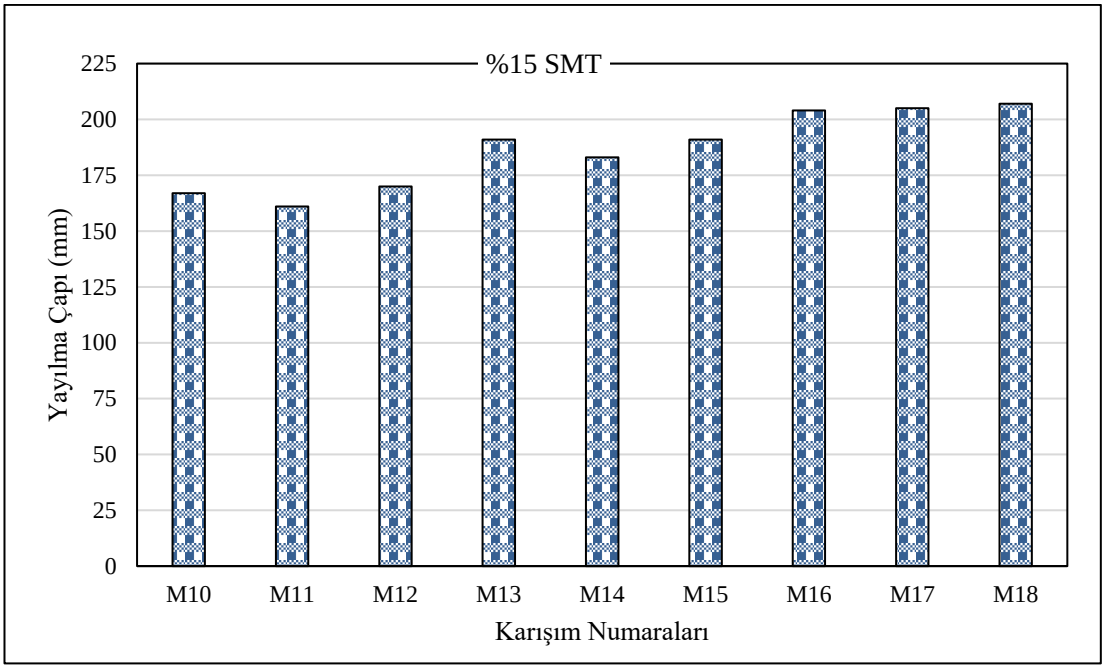
Şekil 4.3, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yayılma çaplarını göstermektedir. Yayılma çapları incelenerek karışımların işlenebilirliği değerlendirilmiştir (Kaplan vd., 2021). UK oranı artması yayılma çapını dolayısıyla işlenebilirliği artırmıştır (Demircan vd., 2021). Örneğin, TYS oranı %0 ve sabit olarak kabul edilerek UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının yayılma çapı yaklaşık %4 artış gösterirken, UK oranı %50 olan M7 karışımında ise yaklaşık %10 artış gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak UK'nın YFC'ye göre daha büyük tane çapına sahip olması gösterilebilmektedir (Gencel vd., 2021). %100 TYS kullanımı nispeten yayılma çapını arttırmıştır. Örneğin, UK oranı sabit ve %0, TYS değişken kabul edildiğinde M1 ve M3 karışımlarının yayılması yaklaşık %2 azalma gösterirken, UK oranı sabit ve %25 olduğunda ise M4 ve M6

karışımlarının yayılmaları yaklaşık %7 artmış ayrıca UK oranı sabit ve %50 olduğunda ise M7 ve M9 karışımlarının yayılması yaklaşık %4 oranında artış göstermiştir.



Şekil 4.3 %7,5 SMT kompozitlerin yayılma çapı

Şekil 4.4, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yayılma çaplarını göstermektedir. %7,5 SMT oranında olduğu gibi UK oranı artması ile yayılma çapı dolayısıyla işlenebilirlik artırmıştır. Örneğin, TYS sabit ve %0 olarak kabul edilerek UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının yayılma çapı yaklaşık %14 artış gösterirken, UK oranı %50 olan M16 karışımında ise yaklaşık %22 artış gözlenmiştir. %100 TYS kullanımı genel olarak yayılma çapını arttırmıştır. Örneğin, UK oranı sabit ve %0, TYS değişken kabul edildiğinde M10 ve M12 karışımlarının yayılması yaklaşık %2 artış gösterirken, UK oranı sabit ve %25 olduğunda ise M13 ve M15 karışımlarının yayılmaları aynı kalmış ayrıca UK oranı sabit ve %50 olduğunda ise M16 ve M18 karışımlarının yayılması yaklaşık %2 oranında artış göstermiştir.



Şekil 4.4 %15 SMT kompozitlerin yayılma çapı

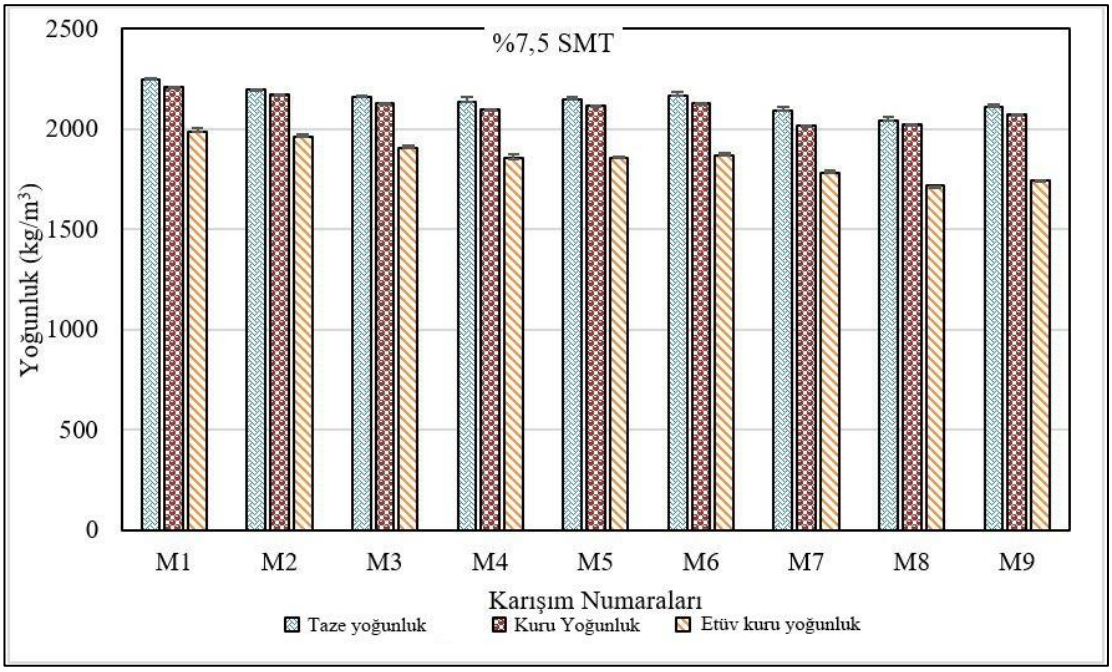
%7,5 ve %15 SMT oranları birlikte değerlendirildiğinde, uçucu kül oranı arttıkça yayılma çapı artmıştır. TYS işlenebilirlik üzerinde çok ciddi sonuçlar doğurmamıştır. Hacim sabit kaldığı için SMT oranının artması agrega içeriğini azaltıp pasta içeriğini arttırdığı için yayılma çapını arttırmıştır (Kaplan vd., 2022).

4.2 Fiziksel Özellikler

4.2.1 Taze, Sertleşmiş ve Etüv Kurusu Yoğunluk

Şekil 4.5, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin taze, sertleşmiş ve etüv kuru yoğunluklarını göstermektedir. Taze yoğunluklar değerlendirildiğinde, %7,5 SMT oranındaki karışımların hemen hemen sabit bir yoğunluğa sahip olduğu gözlenmektedir. Detaylı incelendiğinde ise UK kullanımı yoğunluğu azalttığı gözlenmektedir. Örneğin TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının taze yoğunluğu yaklaşık %5 oranında azaldığı, UK oranı %50 olan M7 karışımının ise yaklaşık %7 azaldığı gözlenmektedir. Kuru yoğunluklar değerlendirildiğinde, UK kullanımı yoğunluğu azalttığı gözlenmektedir. Örneğin TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının kuru yoğunluğu yaklaşık %5 oranında azaldığı, UK oranı %50 olan M7 karışımının ise yaklaşık %9

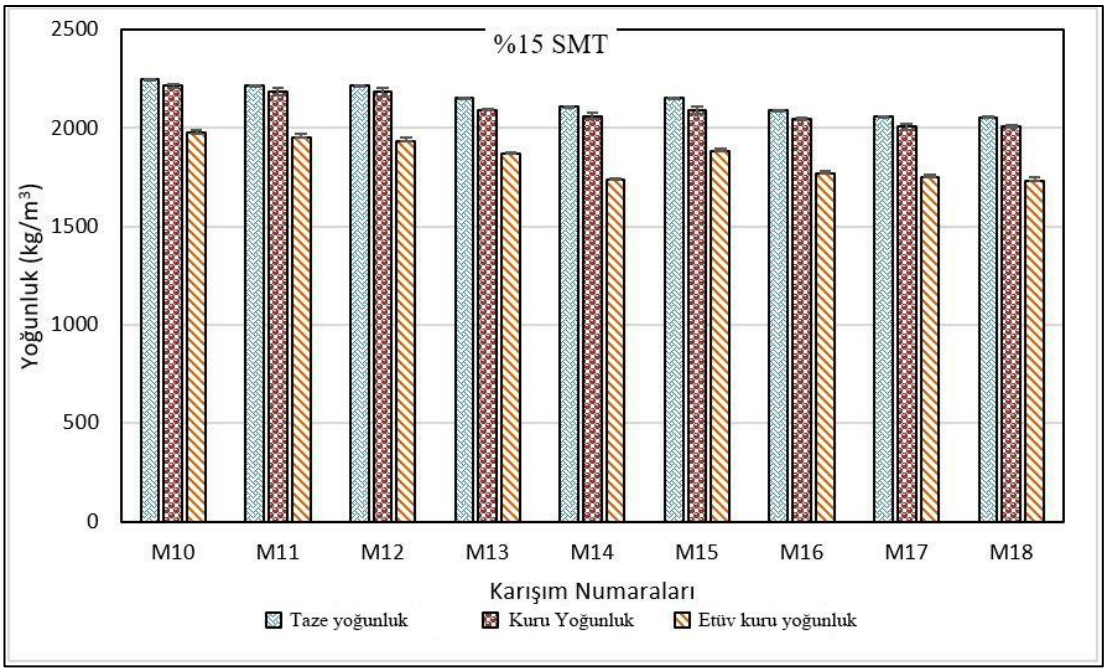
azaldığı gözlenmektedir. Etüv kuru yoğunluklar değerlendirildiğinde ise, diğer yoğunluklarda olduğu gibi UK kullanımı yoğunluğu azalttığı gözlenmektedir. Örneğin TYS %0 ve sabit, UK oranı sıfır olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının etüv kuru yoğunluğu yaklaşık %7 oranında azaldığı, UK oranı %50 olan M7 karışımının ise yaklaşık %10 oranında azaldığı gözlenmektedir.



Şekil 4.5 %7,5 SMT kompozitlerin taze, sertleşmiş ve etüv kurusu yoğunlukları

Şekil 4.6, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin taze, sertleşmiş ve etüv kuru yoğunluklarını göstermektedir. Taze yoğunluklar değerlendirildiğinde, %15 SMT oranındaki karışımların hemen hemen sabit bir yoğunluğa sahip olduğu gözlenmektedir. Detaylı incelendiğinde ise UK kullanımı yoğunluğu azalttığı gözlenmektedir. Örneğin TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının taze yoğunluğu yaklaşık %4 oranında azaldığı, UK oranı %50 olan M16 karışımının ise yaklaşık %7 azaldığı gözlenmektedir. Kuru yoğunluklar değerlendirildiğinde, UK kullanımı yoğunluğu azalttığı gözlenmektedir. Örneğin TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının kuru yoğunluğu yaklaşık %6 oranında azaldığı, UK oranı %50 olan M16 karışımının ise yaklaşık %8 azaldığı gözlenmektedir. Etüv kuru yoğunluklar değerlendirildiğinde ise, diğer

yoğunluklarda olduğu gibi UK kullanımı yoğunluğu azalttığı gözlenmektedir. Örneğin TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının etüv kuru yoğunluğu yaklaşık %5 oranında azaldığı, UK oranı %50 olan M16 karışımının ise yaklaşık %10 oranında azaldığı gözlenmektedir.



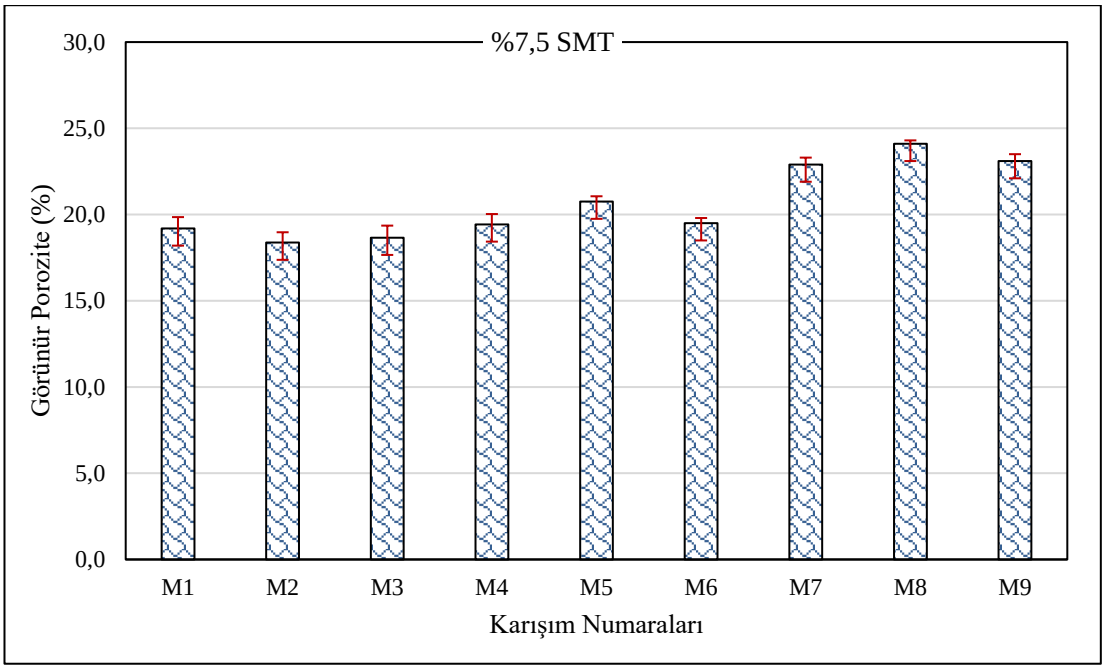
Şekil 4.6 %15 SMT kompozitlerin taze, sertleşmiş ve etüv kurusu yoğunlukları

%7,5 ve %15 SMT oranlarına sahip tüm karışımlar birlikte değerlendirildiğinde karışımların taze birim ağırlıkları 2200 kg/m^3'ün üzerindedir. Etüv kurusu yoğunlukları ise 2000 kg/m^3'ün altındadır.

4.2.2 Görünür Porozite

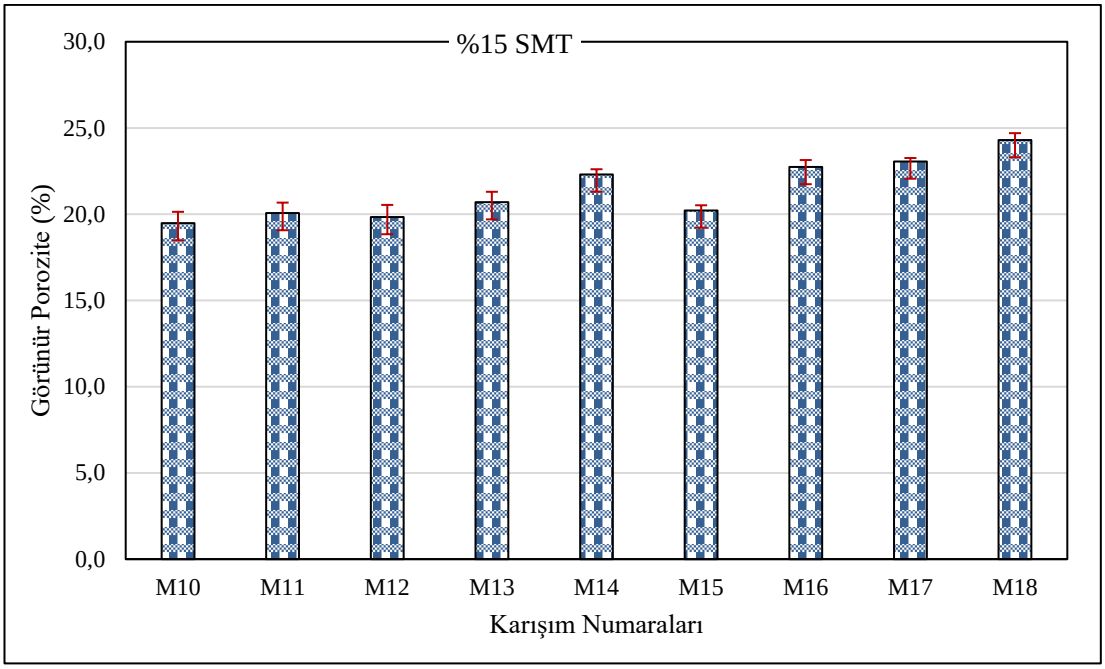
Şekil 4.7, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin görünür porozitelerini göstermektedir. Genel itibarıyla UK oranının artması görünür poroziteyi arttırmıştır (Altera vd., 2020). Özellikle %50 oranında UK kullanımı oldukça fazla farklar oluşturmuştur. Örneğin, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının görünür porozitesi yaklaşık %1 oranında artarken, UK oranı %50 olan M7 karışımının ise yaklaşık %19 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M2 karışımı

referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M5 karışımının görünür porozitesi yaklaşık %13 oranında artarken, UK oranı %50 olan M8 karışımının ise yaklaşık %31 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M3 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M6 karışımının görünür porozitesi yaklaşık %4 oranında artarken, UK oranı %50 olan M9 karışımının ise yaklaşık %24 oranında arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.7 %7,5 SMT kompozitlerin görünür poroziteleri

Şekil 4.8, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin görünür porozitelerini göstermektedir. %7,5 SMT oranında olduğu gibi UK oranının artması görünür poroziteyi arttırmıştır. Örneğin, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının görünür porozitesi yaklaşık %6 oranında artarken, UK oranı %50 olan M16 karışımının ise yaklaşık %16 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M11 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M14 karışımının görünür porozitesi yaklaşık %11 oranında artarken, UK oranı %50 olan M17 karışımının ise yaklaşık %15 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M12 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M15 karışımının görünür porozitesi yaklaşık %2 oranında artarken, UK oranı %50 olan M18 karışımının ise yaklaşık %23 oranında arttığı gözlenmektedir.

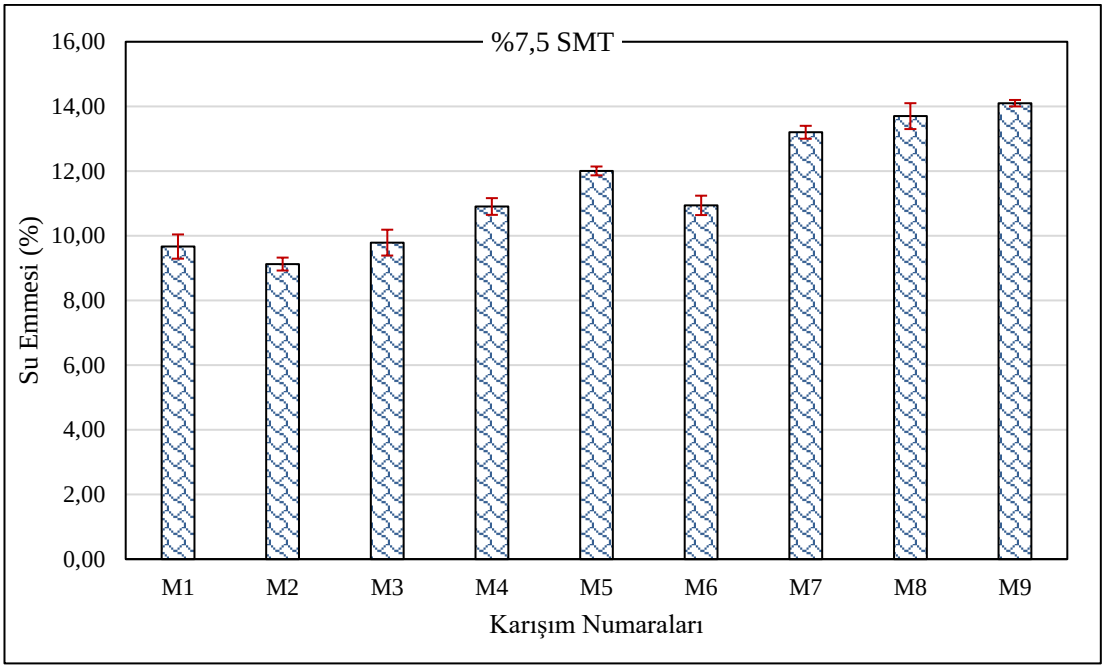


Şekil 4.8 %15 SMT kompozitlerin görünür poroziteleri

%7,5 ve %15 SMT oranları birlikte değerlendirildiğinde ise SMT ve TYS'nin porozite ve su emme özelllikleri üzerinde çok ciddi etkisi yoktur. Ancak UK oranı arttıkça karışımların poroziteleri artmıştır.

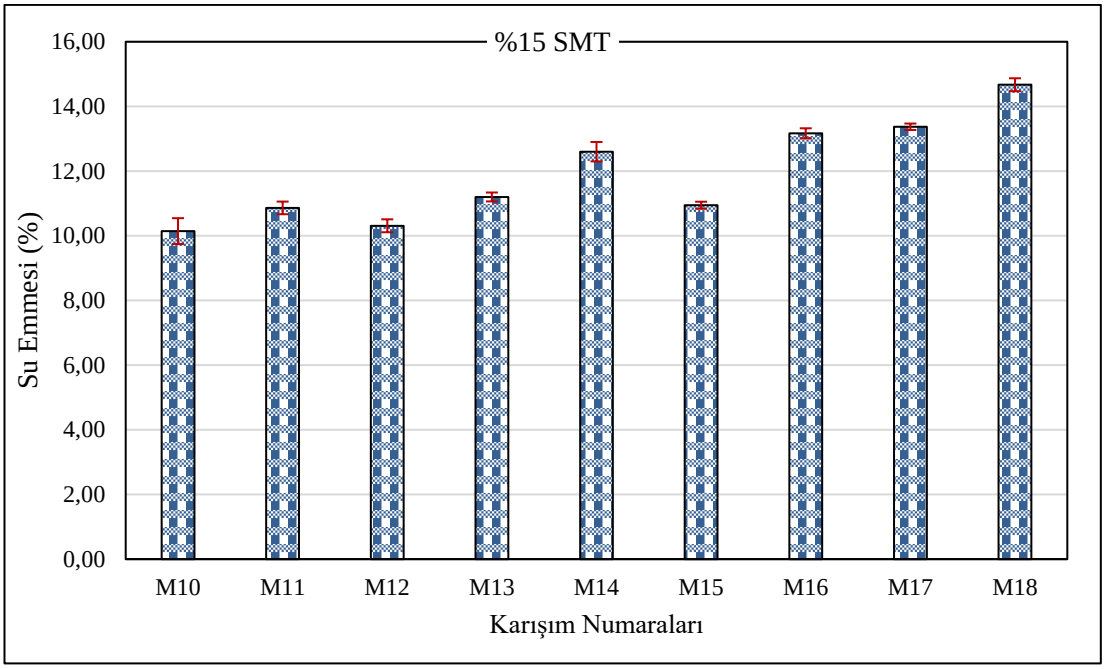
4.2.3 Su Emmesi

Şekil 4.9, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin su emmelerini göstermektedir. Genel itibarıyla karışımlar üzerinde görünür porozite ne kadar yüksekse su emmesi de numunenin içindeki boşluklu yapıdan dolayı o kadar yüksek olduğu gözlenmiştir (O. Y. Bayraktar, 2019). Karışım içerisindeki UK oranı arttıkça numunelerin su emmeleri de artmıştır. Örneğin, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının su emmesi yaklaşık %13 oranında artarken, UK oranı %50 olan M7 karışımının ise yaklaşık %37 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M2 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M5 karışımının su emmesi yaklaşık %32 oranında artarken, UK oranı %50 olan M8 karışımının ise yaklaşık %50 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M3 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M6 karışımının su emmesi yaklaşık %12 oranında artarken, UK oranı %50 olan M9 karışımının ise yaklaşık %44 oranında arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.9 %7,5 SMT kompozitlerin su emmesi

Şekil 4.10, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin su emmelerini göstermektedir. %7,5 SMT oranında olduğu gibi UK oranının artması numunelerin su emmelerini arttırmıştır. Örneğin, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının su emmesi yaklaşık %10 oranında artarken, UK oranı %50 olan M16 karışımının ise yaklaşık %30 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M11 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M14 karışımının su emmesi yaklaşık %16 oranında artarken, UK oranı %50 olan M17 karışımının ise yaklaşık %23 oranında arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M12 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M15 karışımının su emmesi yaklaşık %6 oranında artarken, UK oranı %50 olan M18 karışımının ise yaklaşık %42 oranında arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.10 %15 SMT kompozitlerin su emmesi

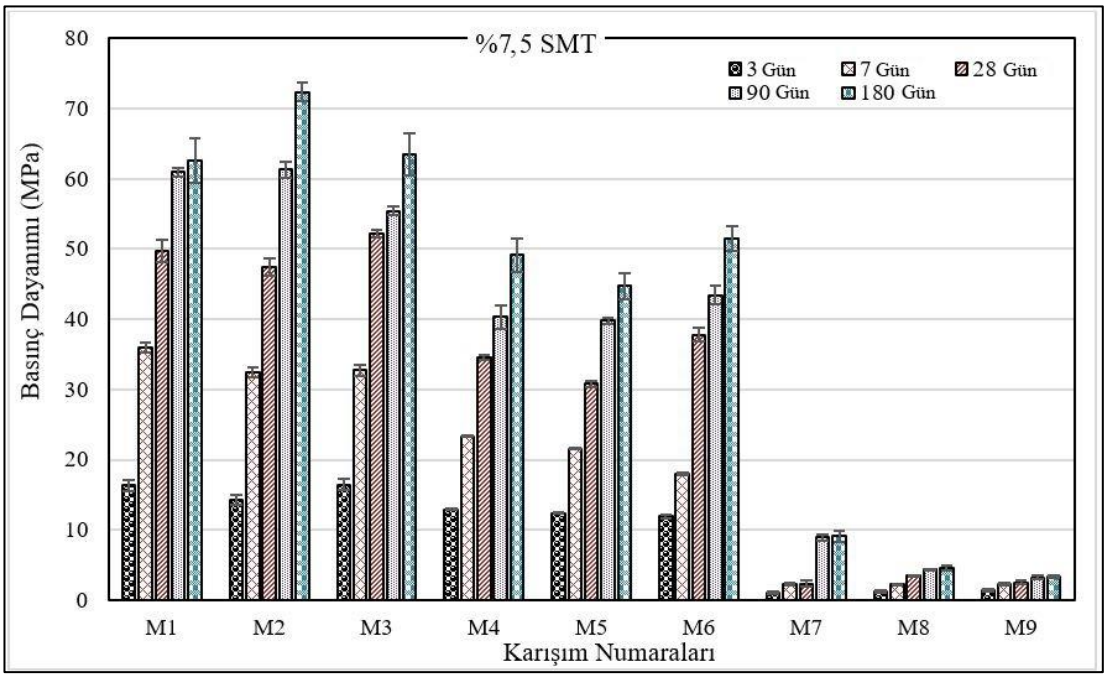
%7,5 ve %15 SMT oranları birlikte değerlendirildiğinde ise numunelerin su emme değerleri, görünür porozite ile benzer özellik göstererek SMT ve TYS'nin su emme özelllikleri üzerinde de çok ciddi etkisinin olmadığını ancak UK oranının artması karışımların su emmelerini de arttırdığını göstermiştir (Özkul ve Doğan, 2016).

4.3 Mekanik Özellikler

4.3.1 Basınç Dayanımı

Karışımların basınç dayanımları 3., 7., 28., 90. ve 180. günlerde belirlendi. Şekil 4.11, sodyum metasilikat tozunun %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımlarını MPa biriminden değerlerini göstermektedir. UK oranı %0 ve %25 oranlarında olan karışımların basınç dayanımı gelişimlerini 180.güne kadar sürdürdüğü ancak UK oranı %50 olan karışımların ise nihai dayanımlarını hemen hemen 90. günde tamamladığı gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak UK'nın pozolanik aktivitesinin daha erken yaşlarda tamamlamasından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir (Güner, 2018). Kendi kendine kürlenen kompozitlerin 3 günde nihai dayanımlarının yaklaşık % kaçı kadar dayanım kazandığı şu şekilde tespit edilmiştir; M1 karışımı için %26; M2 karışımı için %20; M3 karışımı için %26; M4 karışımı için %26; M5 karışımı için %28; M6 karışımı için %23; M7 karışımı için %11; M8 karışımı için %26; M9

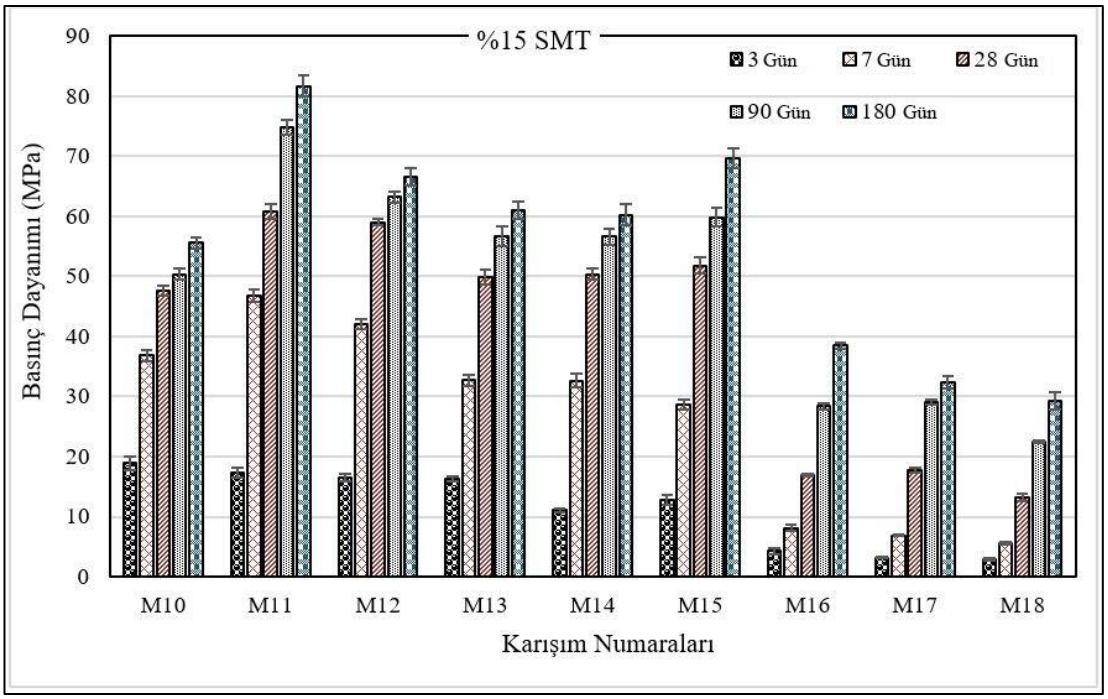
karışımı için %41'dir. %100 TYS kullanımı genellikle basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M1 ve M3 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %1,5 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M4 ve M6 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %5 artış gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M7 ve M9 için nihai basınç dayanımı ise yaklaşık %63'lük bir azalma tespit edilmiştir.



Şekil 4.11 %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

Şekil 4.12, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımlarını MPa biriminden değerlerini göstermektedir. UK oranı %0 ve %25 oranlarında olan karışımların basınç dayanımı gelişimlerini 180.güne kadar sürdürdüğü ancak %7,5 SMT oranından farklı olarak UK oranı %50 olan karışımlarda da 180.güne kadar basınç dayanımı gelişimi sürdüğü gözlenmiştir. Kendi kendine kürlenen kompozitlerin 3 günde nihai dayanımlarının yaklaşık % kaçı kadar dayanım kazandığı şu şekilde tespit edilmiştir; M10 karışımı için %34; M11 karışımı için %21; M12 karışımı için %25; M13 karışımı için %27; M14 karışımı için %18; M15 karışımı için %18; M16 karışımı için %11; M17 karışımı için %10; M18 karışımı için %10'dur. %100 TYS kullanımı %7,5 SMT oranındaki karışımlarda olduğu gibi basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS

değişken kabul edildiğinde M10 ve M12 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %20 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M13 ve M15 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %14 artış gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M16 ve M18 için nihai basınç dayanımı ise yaklaşık %24'lük bir azalma tespit edilmiştir.



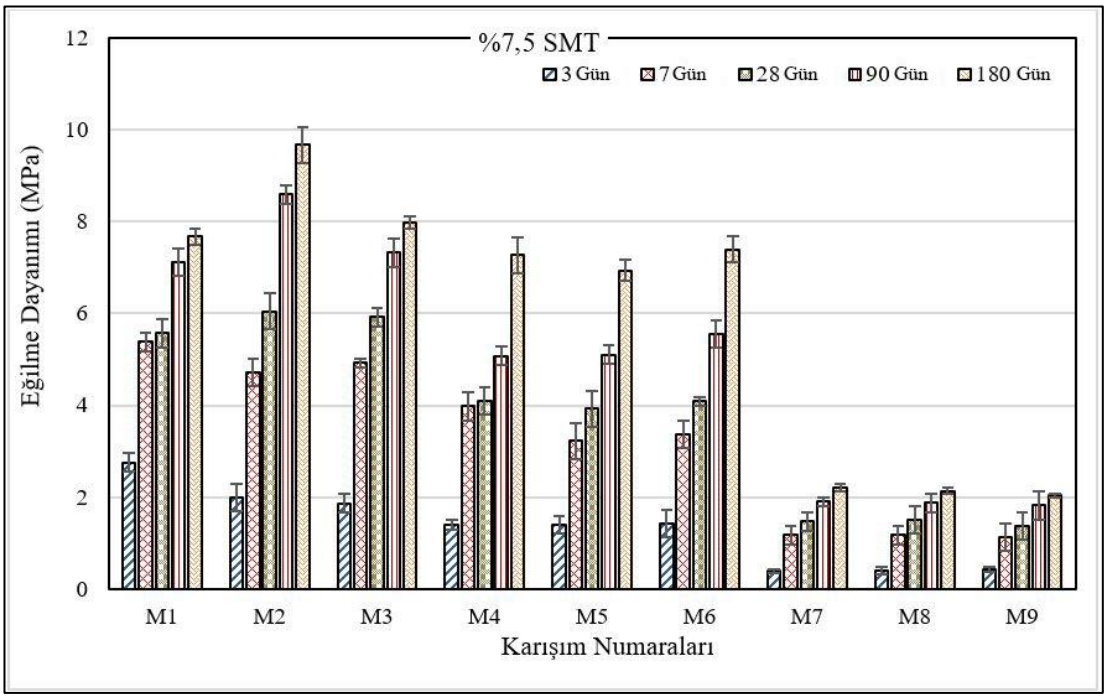
Şekil 4.12 %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı ve standart sapması

%7,5 ve %15 SMT oranına sahip karışımlar birlikte değerlendirildiğinde, %7,5 SMT oranında %50 UK kullanımı çok uygun değildir. Genellikle UK oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır (Calis vd., 2021). TYS genellikle basınç dayanımını arttırmıştır. 180.günde %7,5 SMT kullanılan karışımlarda 70 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. %15 SMT kullanılan karışımlarda ise 80 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir.

4.3.2 Eğilme Dayanımı

Karışımların eğilme dayanımları 3., 7., 28., 90. ve 180. günlerde belirlenmiştir. Şekil 4.13, sodyum metasilikat tozunun %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin eğilme dayanımlarını MPa biriminden değerlerini göstermektedir. UK oranı %0 ve %25 oranlarında olan karışımların basınç dayanımı gelişimlerini 180.güne kadar

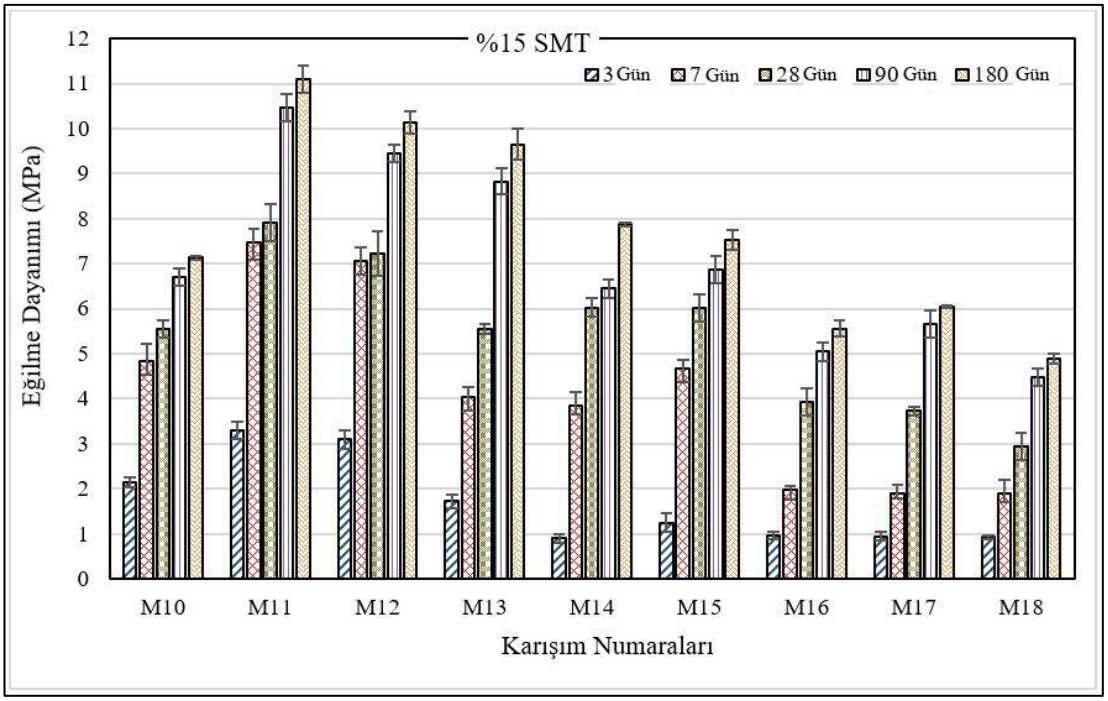
sürdürdüğü ancak UK oranı %50 olan karışımların diğer UK oranlarına kıyasla nihai dayanımlarını hemen hemen 90.günde tamamladığı gözlenmiştir. Kendi kendine kürlenen kompozitlerin 3 günde nihai dayanımlarının yaklaşık % kaçı kadar eğilme dayanımı kazandığı şu şekilde tespit edilmiştir; M1 karışımı için %36; M2 karışımı için %21; M3 karışımı için %23; M4 karışımı için %19; M5 karışımı için %20; M6 karışımı için %19; M7 karışımı için %22; M8 karışımı için %19; M9 karışımı için %21'dir. %100 TYS kullanımı genellikle eğilme dayanımını olumlu etkilemiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M1 ve M3 için nihai eğilme dayanımı yaklaşık %4 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M4 ve M6 için nihai eğilme dayanımı yaklaşık %2 artış gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M7 ve M9 için nihai eğilme dayanımı ise yaklaşık %8'lik bir azalma tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı ve standart sapması

Şekil 4.14, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin eğilme dayanımlarını MPa biriminden değerlerini göstermektedir. Kompozitlerin eğilme dayanımı gelişimi %15 SMT oranına sahip karışımların eğilme dayanımı gelişimine benzer özellik gösterdiği gözlenmiştir. Kendi kendine kürlenen kompozitlerin 3 günde nihai eğilme dayanımlarının yaklaşık % kaçı kadar dayanım kazandığı şu şekilde tespit edilmiştir; M10 karışımı için %30; M11 karışımı için %30;

M12 karışımı için %31; M13 karışımı için %18; M14 karışımı için %11; M15 karışımı için %17; M16 karışımı için %17; M17 karışımı için %16; M18 karışımı için %19'dur. %100 TYS kullanımı UK'sız karışımlarda eğilme dayanımını olumlu etkilerken UK'lı karışımlarda nispeten olumsuz etkilemiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M10 ve M12 için nihai eğilme dayanımı yaklaşık %42 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M13 ve M15 için nihai eğilme dayanımı yaklaşık %22 azalma gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M16 ve M18 için nihai eğilme dayanımı ise yaklaşık %12'lük bir azalma tespit edilmiştir.



Şekil 4.14 %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı ve standart sapması

%7,5 ve %15 SMT oranlarındaki karışımlar birlikte değerlendirildiğinde, %7,5 SMT kullanılan karışımlarda 10 MPa'dan fazla eğilme dayanımı elde edilmiştir. %15 SMT kullanılan karışımlarda ise 11 MPa'dan fazla eğilme dayanımı elde edilmiştir. Genel olarak eğilme dayanımları da basınç dayanımlarına paralellik göstermiştir.

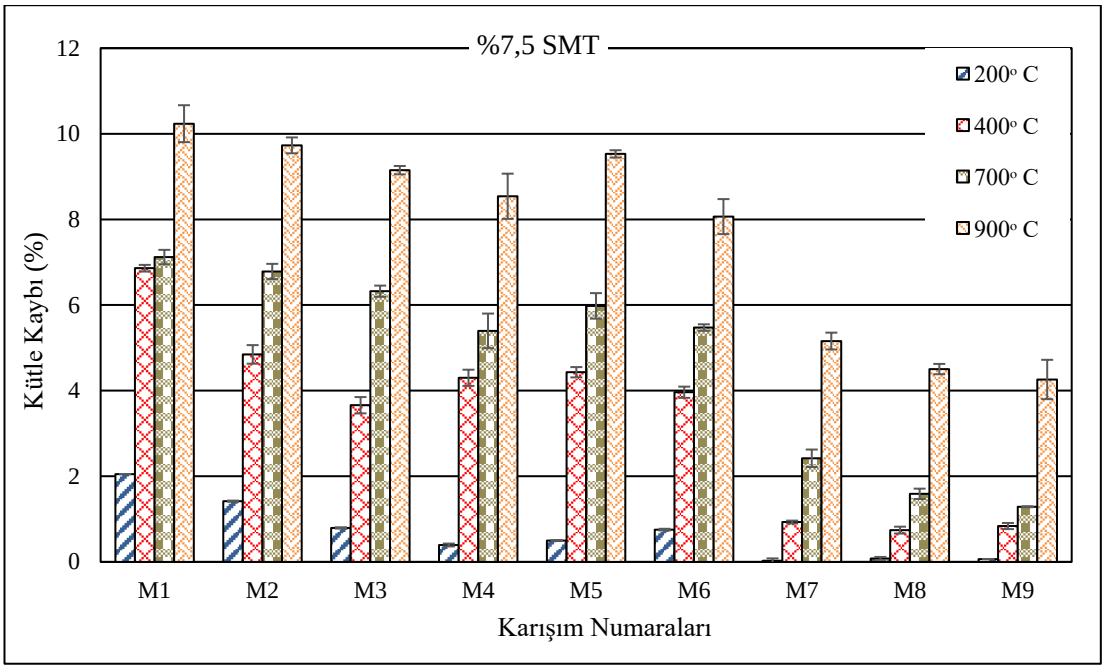
4.4 Durabilite

4.4.1 Yüksek Sıcaklık Direnci

Üretilen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 30℃'de %65 rutubet nem oranına sahip odada kendi kendine kürlenen numuneler 28 gün sonunda 200, 400, 700 ve 900℃ olmak üzere 4 farklı yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık direnci ölçülmek istenen numuneler üzerinde kütle kayıplarının, basınç dayanımlarının ve eğilme dayanımlarının direnci gözlenmiştir.

Şekil 4.15, sodyum metasilikat tozunun %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Uygulanan sıcaklık derecesinin artmasıyla kütle kayıpları da artmıştır. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması kütle kaybını azaltmıştır. Özellikle %50 UK oranına sahip numuneler minimum kütle kaybı yüzdelerine sahiptir. Bunun nedeni olarak UK belirli sıcaklıklarda reaksiyona girme isteğinin artması ile açıklanabilmektedir (Yildizel ve Arslan, 2018). Özellikle %50 UK oranına sahip numuneler 200℃ yüksek sıcaklık sonrası hemen hemen hiç kütle kaybetmemiştir. 200℃ kendi içerisinde değerlendirildiğinde, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının kütle kaybı farkı %1,66 azalırken, UK oranı %50 olan M7 karışımının farkı ise %2,02 azaldığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M2 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M5 karışımının kütle kaybı farkı %0,92 azalırken, UK oranı %50 olan M8 karışımının farkı ise %1,34 azaldığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M3 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M6 karışımının kütle kaybı farkı %0,04 azalırken, UK oranı %50 olan M9 karışımının farkı ise %0,72 azaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla 200℃ yüksek sıcaklık sonrasında %7,5 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça ağırlık kaybı azalmıştır. 900℃ kendi içerisinde değerlendirildiğinde, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının kütle kaybı farkı %1,7 azalırken, UK oranı %50 olan M7 karışımının farkı ise %5,08 azaldığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M2 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M5 karışımının kütle

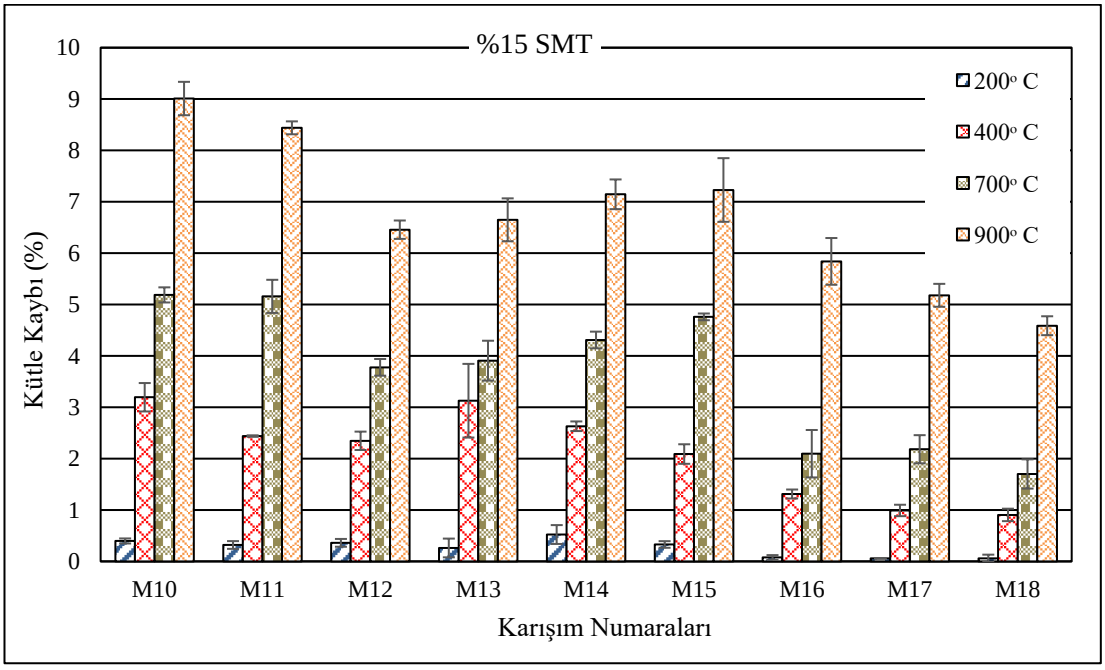
kaybı farkı %0,2 azalırken, UK oranı %50 olan M8 karışımının farkı ise %5,23 azaldığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M3 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M6 karışımının kütle kaybı farkı %1,08 azalırken, UK oranı %50 olan M9 karışımının farkı ise %4,89 azaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla 900°C yüksek sıcaklık sonrasında da 200°C'de olduğu gibi %7,5 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça ağırlık kaybı azalmıştır.



Şekil 4.15 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si

Şekil 4.16, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması kütle kaybını azaltmıştır. 200°C kendi içerisinde değerlendirildiğinde, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının kütle kaybı farkı %0,14 azalırken, UK oranı %50 olan M16 karışımının farkı ise %0,32 azaldığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M11 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M14 karışımının kütle kaybı farkı %0,2 artarken, UK oranı %50 olan M17 karışımının farkı ise %0,26 azaldığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M12 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M15 karışımının kütle kaybı farkı %0,03 azalırken, UK oranı %50 olan M18 karışımının farkı ise %0,3 azaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla 200°C yüksek sıcaklık

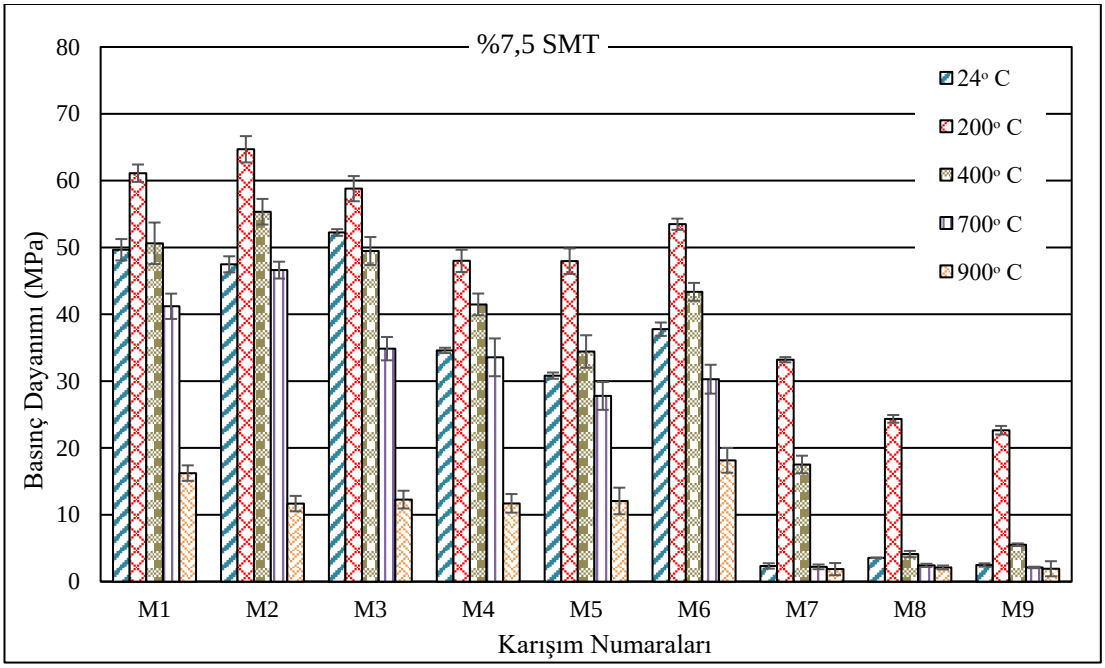
sonrasında %15 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça genellikle ağırlık kaybı azalmıştır. 900°C kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının kütle kaybı farkı %2,36 azalırken, UK oranı %50 olan M16 karışımının farkı ise %3,17 azaldığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M11 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M14 karışımının kütle kaybı farkı %1,29 azalırken, UK oranı %50 olan M17 karışımının farkı ise %3,26 azaldığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M12 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M15 karışımının kütle kaybı farkı %0,77 artarken, UK oranı %50 olan M18 karışımının farkı ise %1,87 azaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla 900°C yüksek sıcaklık sonrasında da 200°C'de olduğu gibi %15 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça genellikle ağırlık kaybı azalmıştır.



Şekil 4.16 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %15 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si

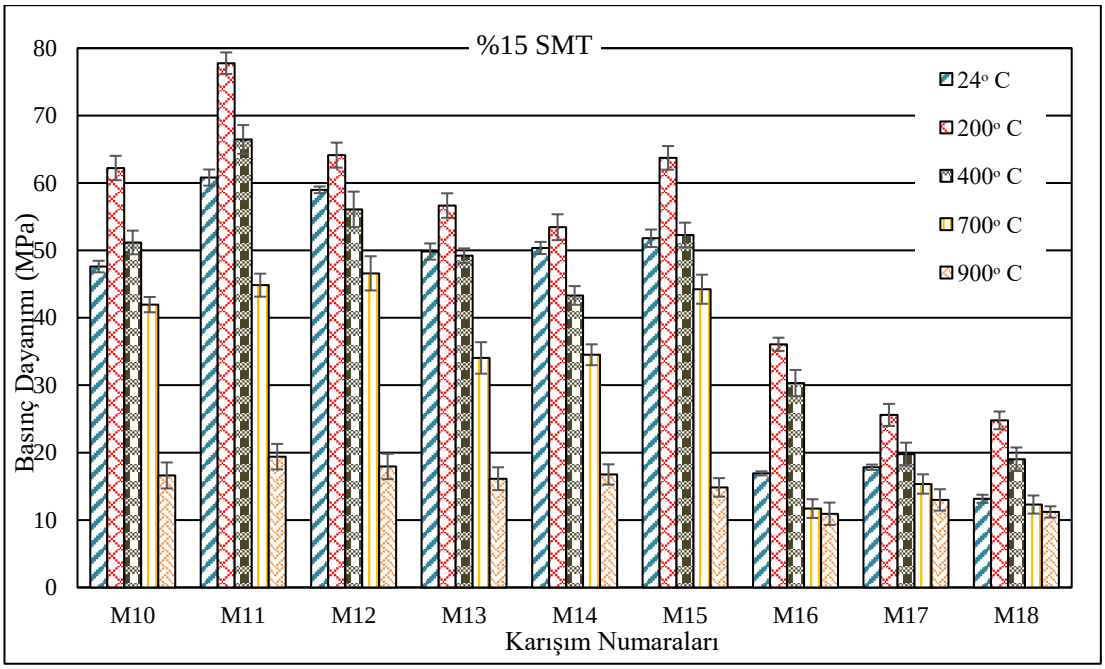
%7,5 ve %15 SMT oranlarına sahip karışımlar birlikte değerlendirildiğinde UK ve TYS oranı arttıkça yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı oranı genellikle azalmıştır. UK yüksek sıcaklık direncini arttırmaktadır (Kaya ve Köksal, 2022). Sıcaklık derecesi arttıkça ağırlık kaybı artmaktadır. 900°C'de genellikle %5'ten fazla ağırlık kaybı oluşmuştur.

Şekil 4.17, sodyum metasilikat tozunun %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık testi sonrasında basınç dayanımlarını göstermektedir. 24℃ sıcaklık sonrası olarak gösterilen değerler 28 günlük basınç dayanımları olup referans değerlerdir. Şekil incelendiğinde özellikle 200℃ sonrasında basınç dayanımlarında artış görülmedir. Kendi kendine kürlenen bu numuneler sıcaklığın makul ölçüde artması ile beraber numuneler içerisinde reaksiyonlar meydana gelerek basınç dayanımını arttırmıştır (Kaplan vd., 2021). 200℃'den sonra yüksek sıcaklık derecesi arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Kütle kayıplarıyla beraber basınç dayanımları değerlendirildiğinde 200℃'de minimum hasar oluştuğu gözlenmişti dolayısıyla kendi içerisinde minimum hasarda maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık derecelerinin artması kütle kayıpları ile beraber değerlendirildiğinde sıcaklık derecesi arttıkça numunelerin kütle kayıtları artmış yani daha fazla hasar almıştı, daha fazla hasar alan numunelerin basınç dayanımları da aynı ölçüde düşmüş olduğu gözlenmiştir. Özellikle %50 oranında UK kullanılan M7, M8 ve M9 numuneleri 24℃ ve 200℃ basınç dayanımları farkları incelendiğinde, diğer UK oranlı karışımlara göre daha fazla basınç dayanımı artışı göstermiştir. Bunun nedeni olarak kendi kendine kürlenen kompozitler içerisindeki UK belirli bir sıcaklıkta daha fazla reaksiyona girmiştir denilmektedir (Kaya ve Köksal, 2021a).



Şekil 4.17 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

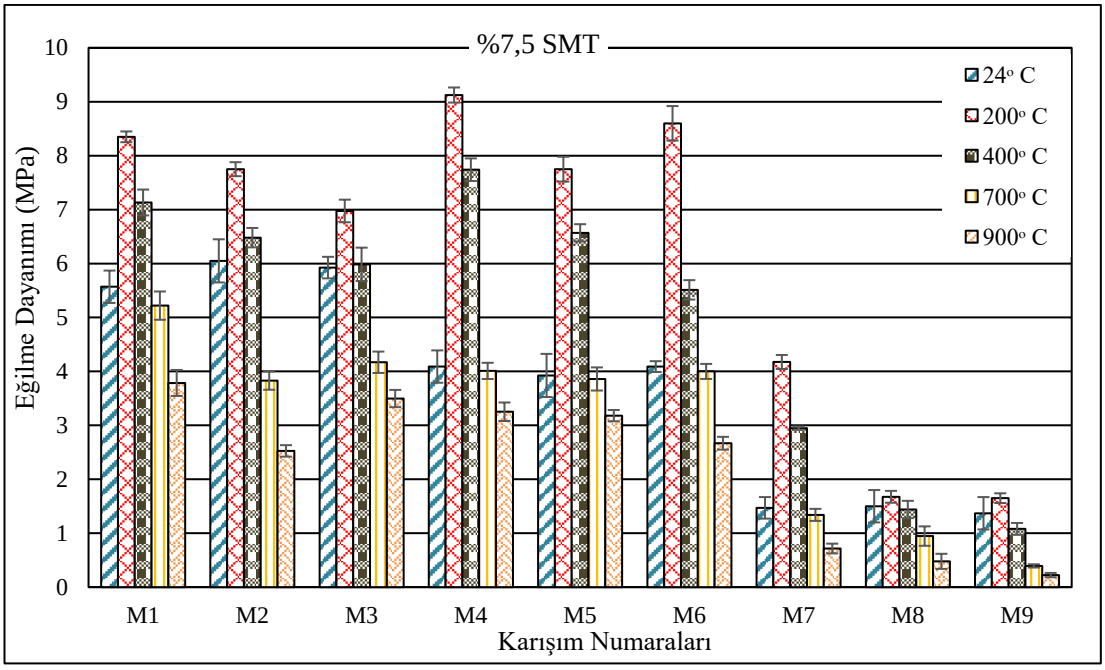
Şekil 4.18, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık testi sonrasında basınç dayanımlarını göstermektedir. %7,5 SMT oranına sahip numunelerde olduğu gibi 200°C sonrasında basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanımları için her bir değişken ayrı ayrı incelendiğinde UK oranı artan numunelerin basınç dayanımları azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.18 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

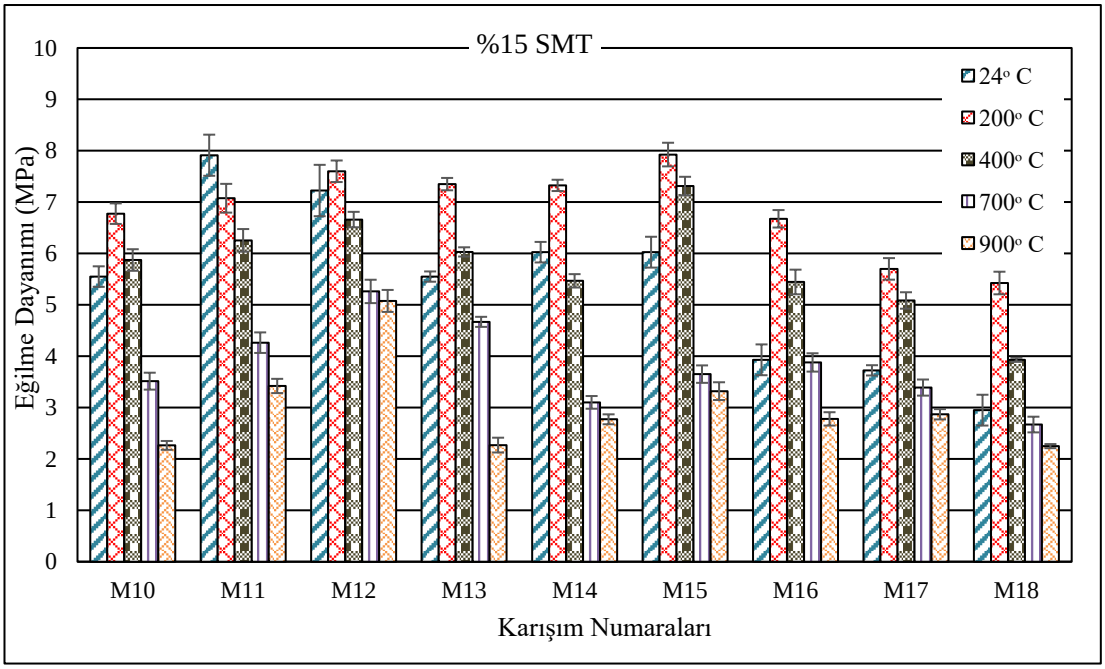
900°C yüksek sıcaklık testi sonrasında %7,5 SMT oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek basınç dayanımı M1karışımından 16,24 MPa olarak elde edilmiştir. Yine %7,5 SMT oranında UK oranı %50 olan M7-M8-M9'da ise 5 MPa'dan düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. 900°C yüksek sıcaklık testi sonrasında %15 SMT oranına sahip numunelerin basınç dayanımları 10 MPa'nın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Genel itibarıyla tüm karışımların yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanımları için TYS kullanım oranı için olumlu ya da olumsuz bir etki gözlenmemiştir.

Şekil 4.19, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. Eğilme dayanımları incelendiğinde, yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanımları özellikleri ile paralellik göstermektedir. UK oranı %50 olarak kullanılan numunelerin minimum eğilme dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.19 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

Şekil 4.20, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. Yüksek sıcaklık sonrasındaki eğilme dayanımları için %7,5 SMT oranına sahip numunelerden farklı olarak UK oranı %50 kullanılan karışımlarda bariz bir düşüş olmadı gözlenmiştir.

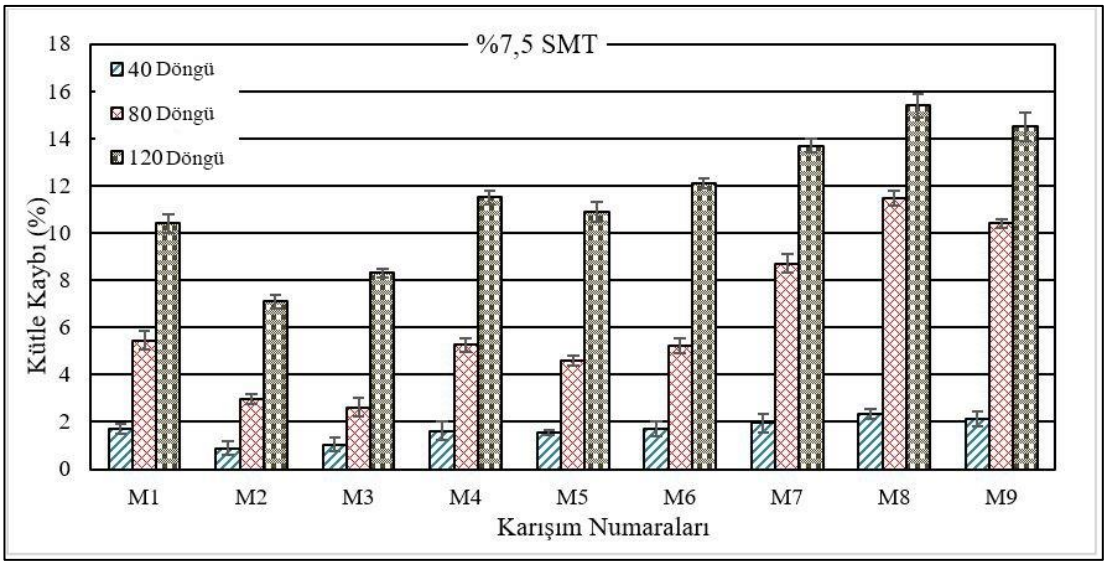


Şekil 4.20 Yüksek sıcaklığa maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

900℃ yüksek sıcaklık testi sonrasında %7,5 SMT oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek eğilme dayanımı, basınç dayanımında tespit edildiği gibi M1 karışımından 3,79 MPa olarak elde edilmiştir. Yine %7,5 SMT oranında UK oranı %50 olan M7-M8-M9'da ise 1 MPa'dan düşük eğilme dayanımları elde edilmiştir. 900℃ yüksek sıcaklık testi sonrasında %15 SMT oranına sahip numunelerin eğilme dayanımları 2 MPa'nın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Genel itibarıyla %7,5 SMT oranına sahip karışımların yüksek sıcaklık sonrasındaki eğilme dayanımları için TYS kullanım oranı için olumlu ya da olumsuz bir etki gözlenmemiştir. Fakat %15 SMT oranında, UK ise %0 ve %25 oranına sahip karışımlar için 900℃ sonrasındaki eğilme dayanımları incelendiğinde TYS oranının artması eğilme dayanımlarında da artış meydana getirmiştir.

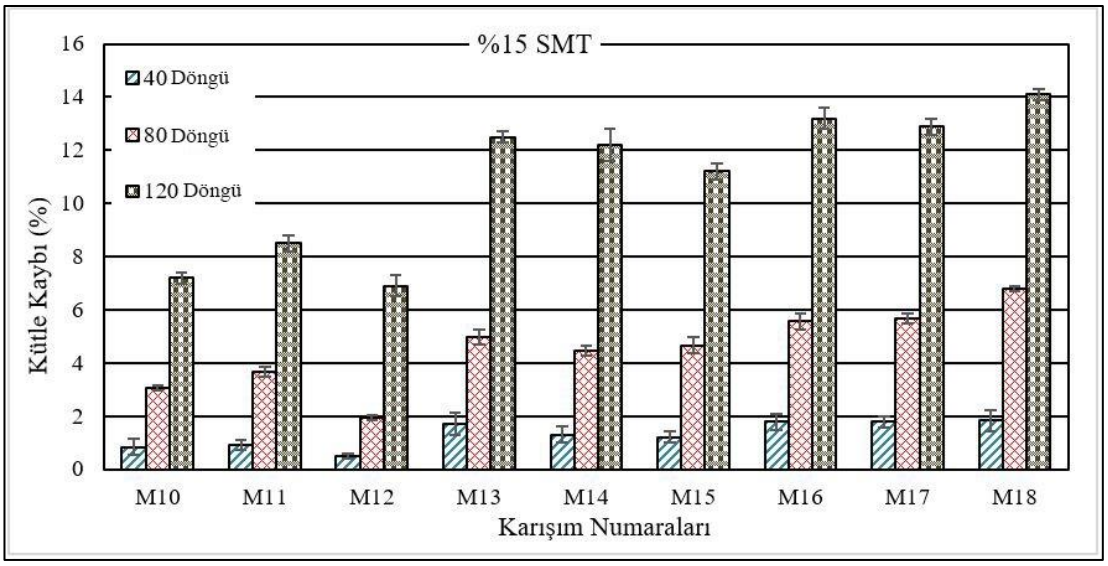
4.4.2 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Şekil 4.21, sodyum metasilikat tozunun %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Uygulanan D-Ç döngülerinin artmasıyla kütle kayıpları da artmıştır. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması ile kütle kaybını artmıştır. Bunun nedeni olarak UK oranı artması görünür poroziteyi arttırmış dolayısıyla su emme değerlerini de arttırmıştı, D-Ç döngüleri esnasında bünyesine daha fazla su alıp sonrasında donmasıyla beraber daha fazla hacim genleşmelerine maruz kalarak daha fazla hasar alarak kütle kayıplarında daha fazla artış görülmüştür olarak açıklanabilmektedir (Bayraktar vd., 2021). Özellikle 40 D-Ç döngüsü sonrasın kütle kayıpları hemen hemen %2'nin altında olarak gözlenmiştir.



Şekil 4.21 Donma-çözülmeye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si

Şekil 4.22, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Yine %7,5 SMT oranına sahip numunelerde gözlendiği gibi 40 D-Ç döngüsü sonrası kütle kayıpları %2'nin altında olduğu gözlenmiştir. Maksimum kütle kayıplarının 120 D-Ç döngüsü sonrasında olduğu gözlenmiştir.

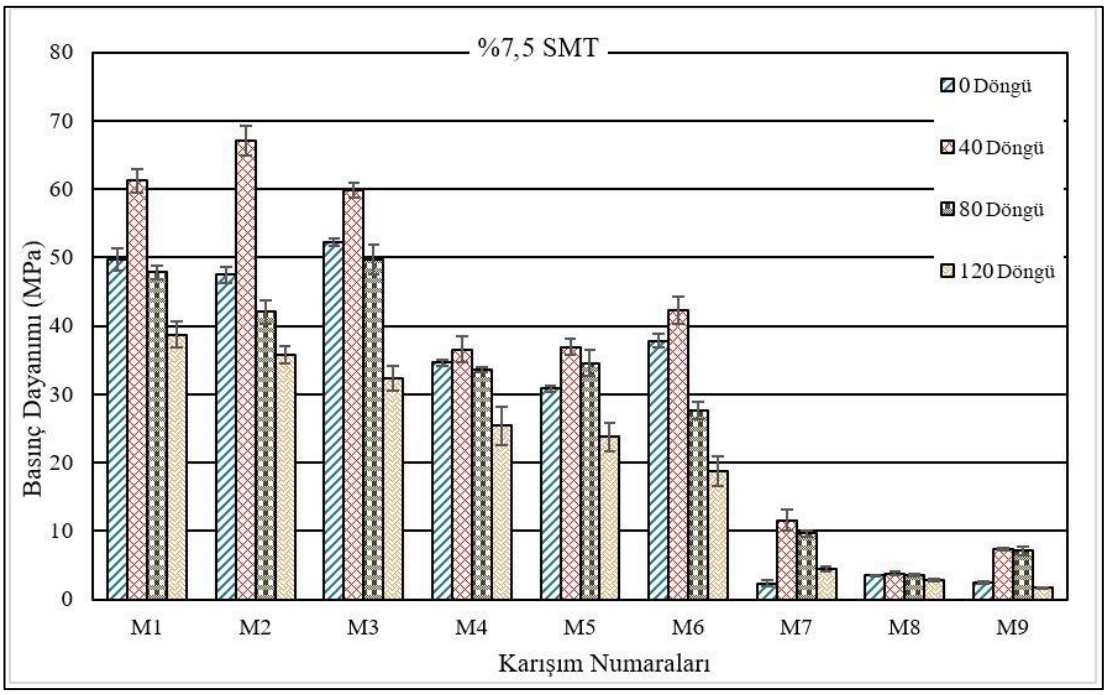


Şekil 4.22 Donma-çözülmeye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si

%7,5 ve %15 SMT oranına sahip tüm karışımlarda 40 D-Ç döngüsü sonrası ağırlık kaybı %2'nin altında olduğu gözlenmiştir. 120 D-Ç döngüsü sonrasında ise %7 ve

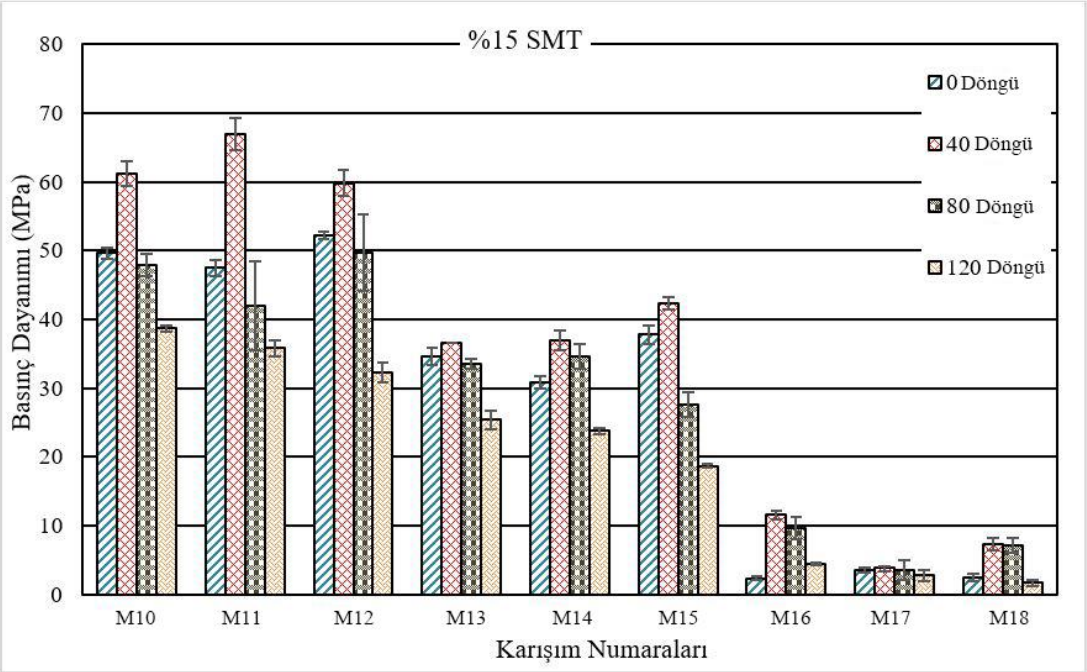
üzeri ağırlık kaybı oluşmuştur. UK oranı arttıkça ağırlık kaybı artmıştır. Karışımlarda TYS nispeten ağırlık kaybını azaltmıştır.

Şekil 4.23, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme testi sonrasında basınç dayanımlarını göstermektedir. 0 Döngü sonrası olarak gösterilen değerler 28 günlük basınç dayanımları olup referans değerlerdir. Şekil incelendiğinde özellikle 40 D-Ç döngüsü sonrasında basınç dayanımlarında artış görülmedir. Kendi kendine kürlenen bu numuneler bir donma-çözülme döngüsünde çözülmede yani su içerisinde 420 dakika, donmada 300 dakika beklemesiyle ile beraber numuneler içerisinde reaksiyonlar meydana gelerek basınç dayanımını arttırmıştır. 40 D-Ç döngüsü sonrasında döngü sayısı arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Kütle kayıplarıyla beraber basınç dayanımları değerlendirildiğinde 40 D-Ç döngüsünde minimum hasar oluştuğu gözlenmişti dolayısıyla kendi içerisinde minimum hasarda maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. D-Ç döngülerinin artması kütle kayıpları ile beraber değerlendirildiğinde döngü sayıları arttıkça numunelerin kütle kayıtları artmış yani daha fazla hasar almıştı, daha fazla hasar alan numunelerin basınç dayanımları da aynı ölçüde düşmüş olduğu gözlenmiştir. Özellikle %50 oranında UK kullanılan M7, M8 ve M9 numuneleri için maksimum kütle kaybı minimum elde edilen basınç dayanımı gözlenmiştir.



Şekil 4.23 Donma-çözülmeye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

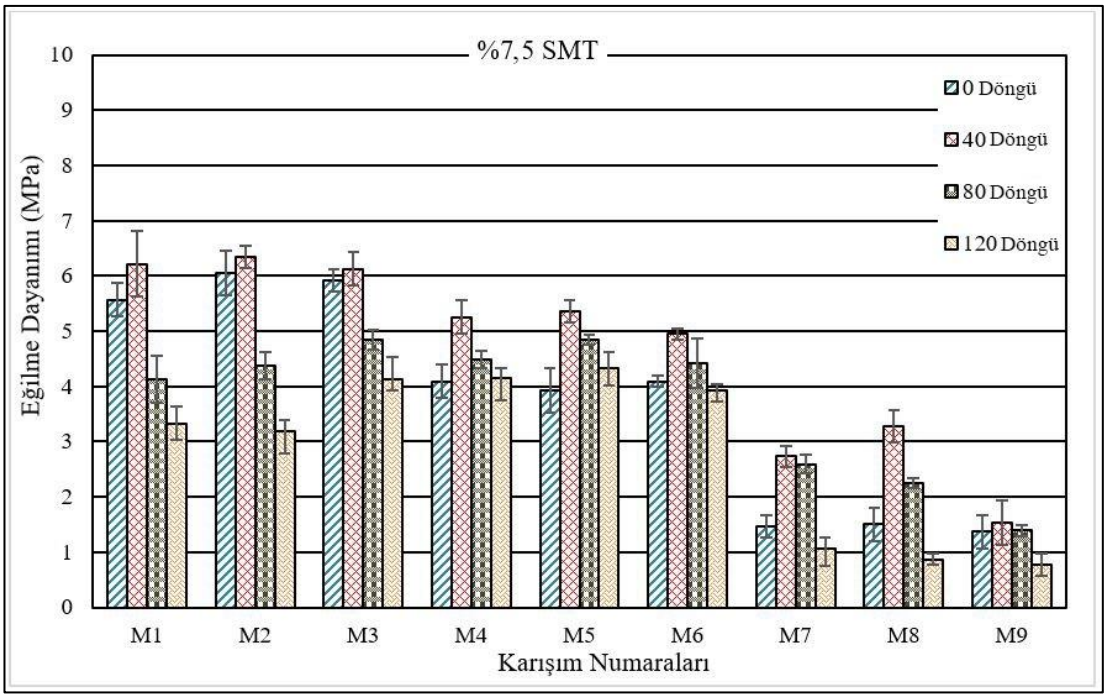
Şekil 4.24, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme testi sonrasında basınç dayanımlarını göstermektedir. %7,5 SMT oranına sahip numuneler ile benzer değerler gözlenmiştir. UK oranı artması basınç dayanımlarında düşüşler meydana getirdiği gözlenmiştir (Bayraktar vd., 2021).



Şekil 4.24 Donma-çözülmeye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

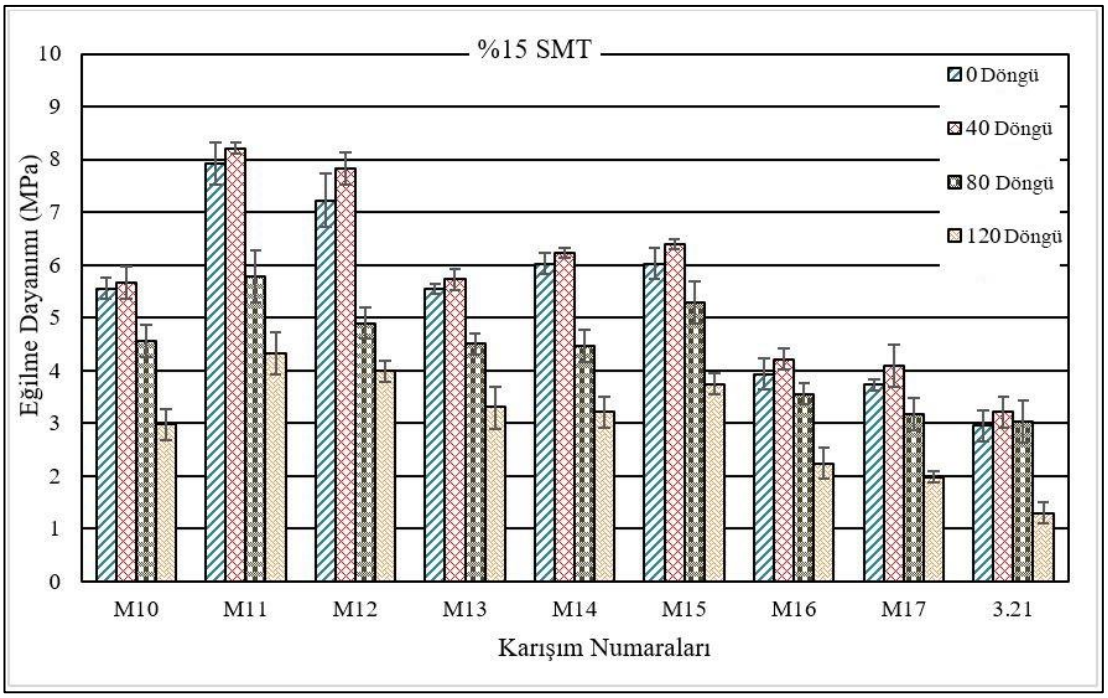
40 D-Ç döngüsü sonrası basınç dayanımı artışları gözlenmiştir ancak 120 D-Ç döngüde azalmıştır. %7,5 SMT oranına sahip numuneler değerlendirildiğinde, M1 karışımında 120 döngü sonrasında yaklaşık 40 MPa elde edilirken M9 karışımında yaklaşık 3 MPa elde edilmiştir. D-Ç döngü sonralarında UK oranı arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır (Gencel vd., 2022).

Şekil 4.25, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. Eğilme dayanımları incelendiğinde, donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımları özellikleri ile paralellik göstermektedir. UK oranı %50 olarak kullanılan numunelerin minimum eğilme dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.25 Donma-çözülmeye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

Şekil 4.26, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. Donma-çözülme sonrasındaki eğilme dayanımları için %7,5 SMT oranına sahip numunelerden farklı olarak UK oranı %50 kullanılan karışımlarda bariz bir düşüş olmadı gözlenmiştir.

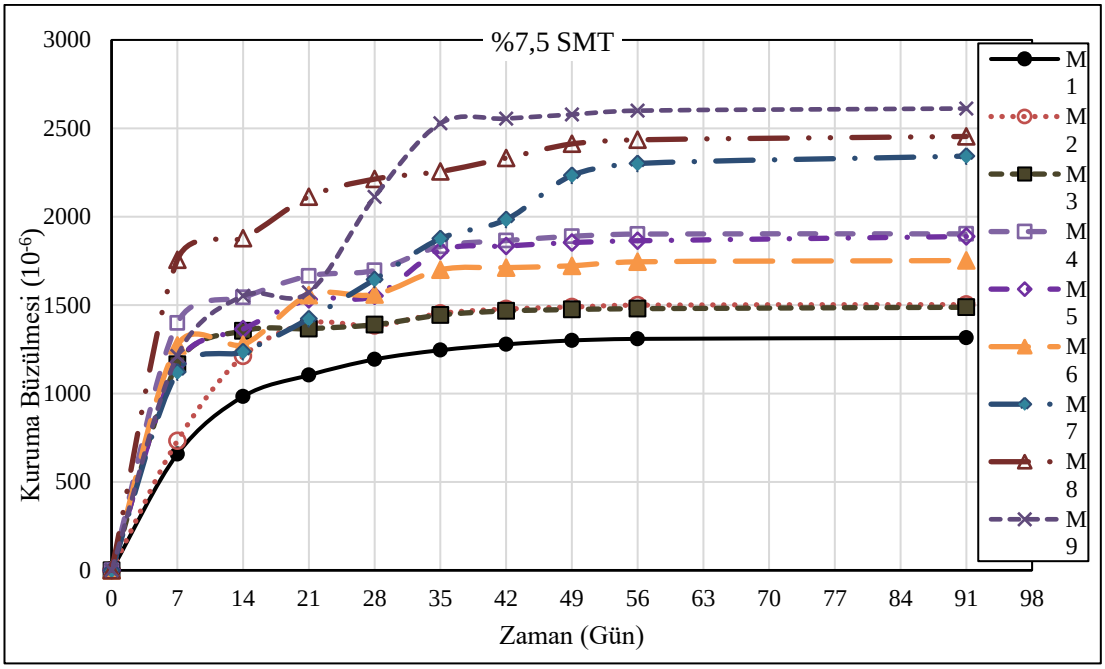


Şekil 4.26 Donma-çözülmeye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

Donma-çözülme testi sonrasındaki basınç dayanımları ile eğilme dayanımları paralel özellik gösterdiği gözlenmiştir.

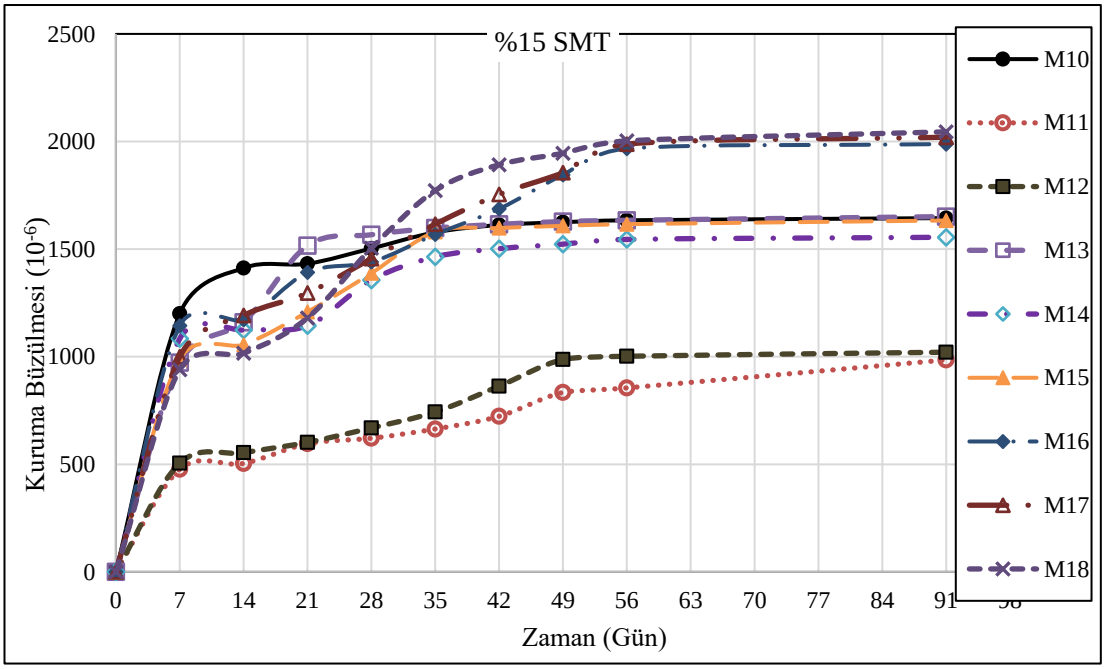
4.4.3 Kuruma Büzülmesi

Şekil 4.27, %7,5 SMT oranına sahip numunelerin 90 günlük kuruma büzülmelerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde kompozitlerin ilk 42 günde daha hızlı büzülme gösterdiği sonraki günlerde ise daha üniform bir büzülme gösterdiği gözlenmektedir. En düşük kuruma büzülmesi değeri M1 karışımında görülürken, en yüksek kuruma büzülmesi değeri ise M9 karışımında olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.27 %7,5 SMT kompozitlerin kuruma büzülmesi

Şekil 4.28, %15 SMT oranına sahip numunelerin 90 günlük kuruma büzülmelerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde kompozitlerin ilk 56 günde daha hızlı büzülme gösterdiği sonraki günlerde ise daha üniform bir büzülme gösterdiği gözlenmektedir. En düşük kuruma büzülmesi değeri M11 karışımında görülürken, en yüksek kuruma büzülmesi değeri ise M18 karışımında olduğu gözlenmiştir.

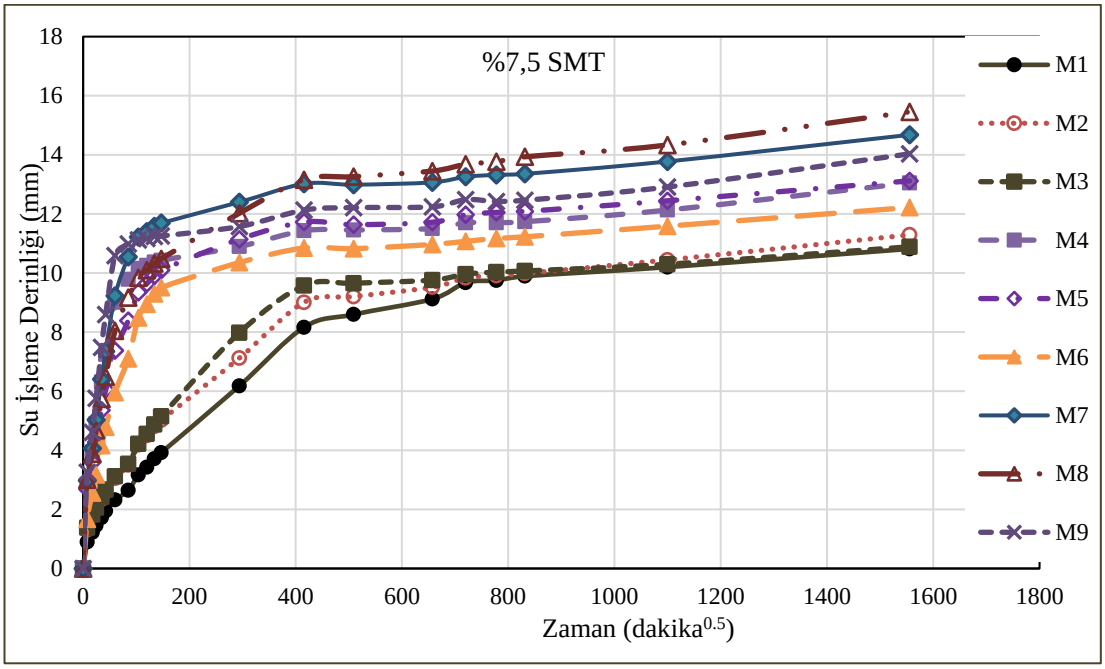


Şekil 4.28 %15 SMT kompozitlerin kuruma büzülmesi

M1 karışımında kuruma büzülmesi değeri $1300x10^{-6}$ değeri gözlenirken M9 karışımında ise yaklaşık $2600x10^{-6}$ değeri gözlenmiştir. M11 karışımında kuruma büzülmesi değeri $1000x10^{-6}$ değeri gözlenirken M18 karışımında ise yaklaşık $2000x10^{-6}$ değeri gözlenmiştir. Basınç dayanımı azaldıkça karışımların kuruma büzülmesi artmıştır (Benli, 2019). Genellikle yıkama suyu kuruma büzülmesini arttırmaktadır. SMT oranı arttıkça kuruma büzülmesi değerleri azalmıştır.

4.4.4 Kapilerite (Su İşleme Derinliği)

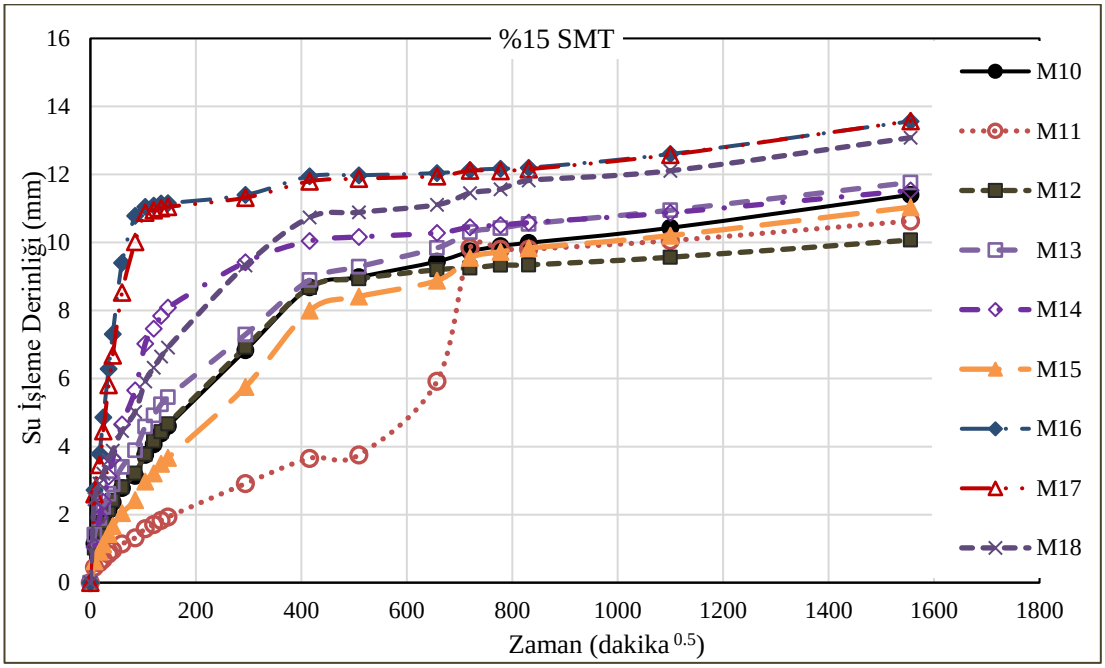
Şekil 4.29, %7,5 SMT oranına sahip karışımların su işleme derinliklerini, kapilerite özelliklerlerini göstermektedir. En yüksek su işleme derinliği UK oranı %50 olan M8 numunesinde 15,45 mm olarak gözlenmiştir. UK oranının artması görünür poroziteyi de arttırmıştı dolasıyla numune içerisindeki boşluklarda su daha kolay ve daha hızlı ilerlediği gözlenmiştir. En düşük su işleme derinliği UK oranı %0 ve TYS oranı %100 olan M3 numunesinde 10,82 mm olarak gözlenmiştir.



Şekil 4.29 %7,5 SMT kompozitlerin kapilerite özelliği

Şekil 4.30, %15 SMT oranına sahip karışımların su işleme derinliklerini, kapilerite özelliklerini göstermektedir. En yüksek su işleme derinliği UK oranı %50 olan M16 ve M17 numunelerinde 13,57 mm olarak gözlenmiştir. En düşük su işleme derinliği

ise UK oranı %0 ve TYS oranı %100 olan M12 numunesinde 10,07 mm olarak gözlenmiştir.



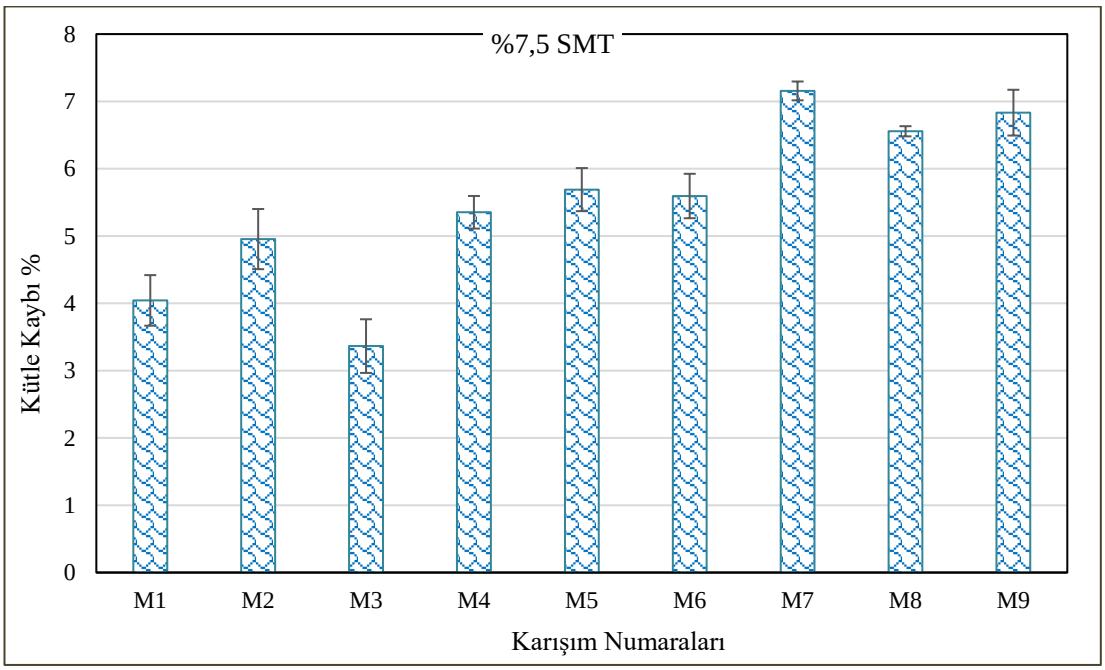
Şekil 4.30 %15 SMT kompozitlerin kapilerite özelliği

SMT oranının artması nispeten su işleme derinliğini azaltmıştır. Karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça su işleme derinlikleri artmıştır. Karışımlarda kullanılan TYS oranının artması genellikle su işleme derinliklerini azaltmıştır (Andaç ve Emel, 2016).

4.4.5 Asit (HCl) Dayanıklılığı

Şekil 4.31, sodyum metasilikat tozunun %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin asit (HCl) direnci testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması kütle kaybını artmıştır. Özellikle %50 UK oranına sahip numuneler maksimum kütle kaybı yüzdelerine sahiptir. Bunun nedeni olarak UK'nın görünür poroziteyi arttırdığı dolayısıyla numunelerin bünyesine daha fazla HCl çözeltisi alıp daha fazla kütle kaybına uğraması ile açıklanabilmektedir (Bodur vd., 2021). TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının kütle kaybı farkı %1,31 artarken, UK oranı %50 olan M7 karışımının farkı ise %3,12 arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M2 karışımı referans olarak

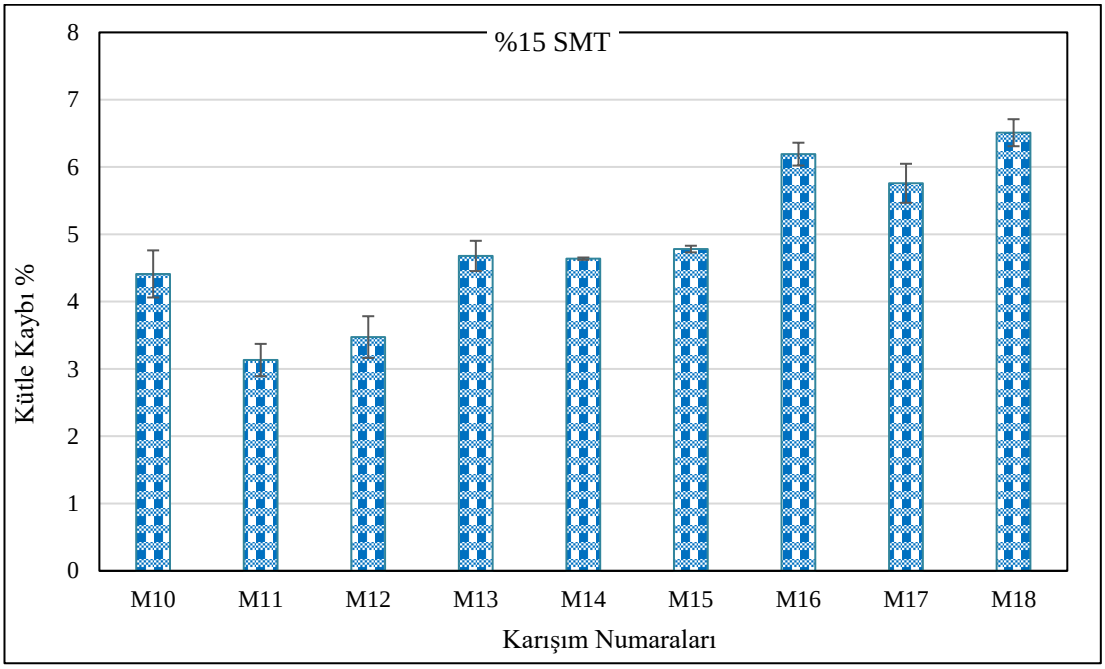
alındığında, UK oranı %25 olan M5 karışımının kütle kaybı farkı %0,74 artarken, UK oranı %50 olan M8 karışımının farkı ise %1,61 arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M3 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M6 karışımının kütle kaybı farkı %2,23 artarken, UK oranı %50 olan M9 karışımının farkı ise %3,47 arttığı gözlenmektedir. Dolayısıyla HCl testi sonrasında %7,5 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça ağırlık kaybı artmış olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.31 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin kütle kaybı %'si

Şekil 4.32, SMT %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin asit (HCl) direnci testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması kütle kaybını artmıştır. TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının kütle kaybı farkı %0,27 artarken, UK oranı %50 olan M16 karışımının farkı ise %1,78 arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M11 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M14 karışımının kütle kaybı farkı %1,51 artarken, UK oranı %50 olan M17 karışımının farkı ise %2,63 arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M12 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M15 karışımının kütle kaybı farkı %1,31 artarken, UK oranı %50 olan M18 karışımının farkı ise %3,04 arttığı gözlenmektedir. Dolayısıyla HCl testi sonrasında

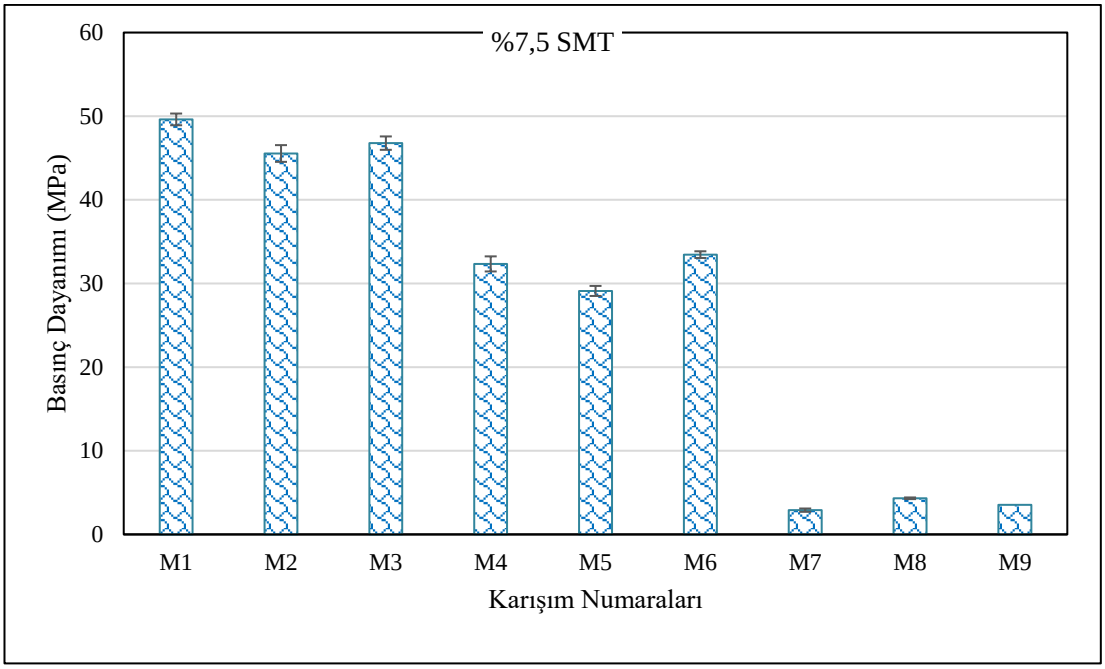
%15 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça genellikle ağırlık kaybı artmıştır.



Şekil 4.32 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin kütle kaybı %'si

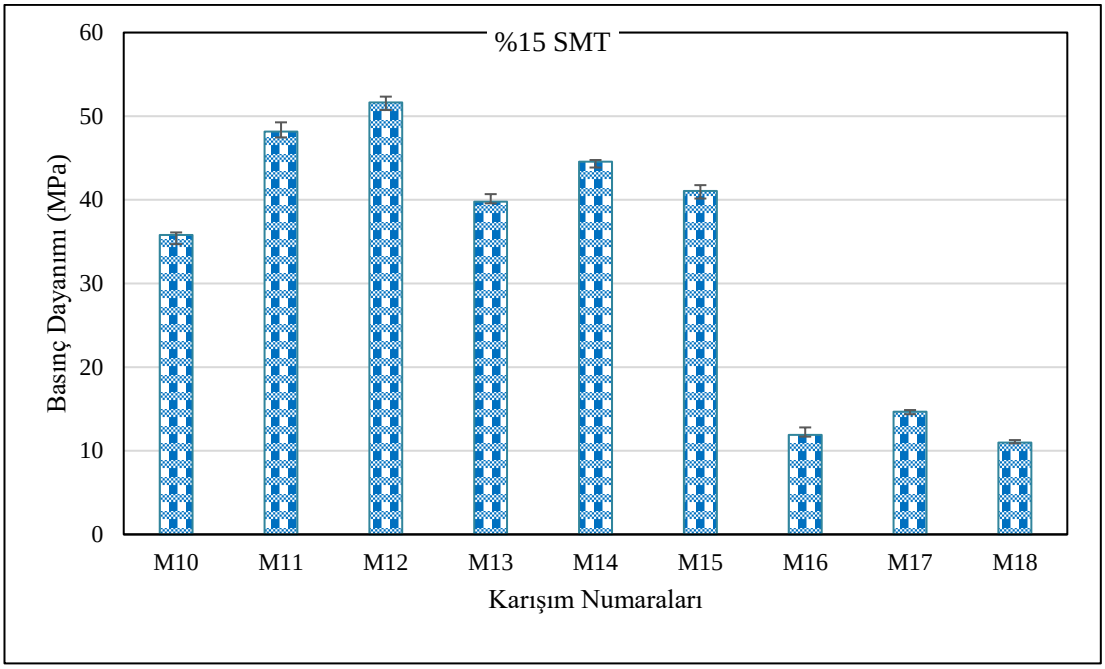
Karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça görünür porozite arttırmaktadır ve numune bünyesine daha fazla HCl girmektedir dolayısıyla numune daha fazla tahribata uğrayarak ağırlık kaybetmiş olduğu gözlenmektedir (Altera vd., 2021). %15 oranında SMT kullanıldığında yıkama suyu ağırlık kaybını azaltmıştır. Buna bağlı olarak ağırlık kaybı fazla olan karışımların basınç dayanımları daha düşüktür.

Şekil 4.33, 180 gün HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir. Kütle kayıplarıyla zıt özellik gösteren numunelerin kütle kayıpları arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü gözlenmektedir. Karışımlarda kullanılan TYS ise olumsuz bir etki oluşturmadığı gözlenmiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M1 ve M3 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %6 azalma gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M4 ve M6 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %3 artış gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M7 ve M9 için nihai basınç dayanımı ise yaklaşık %22'lik bir artış tespit edilmiştir.



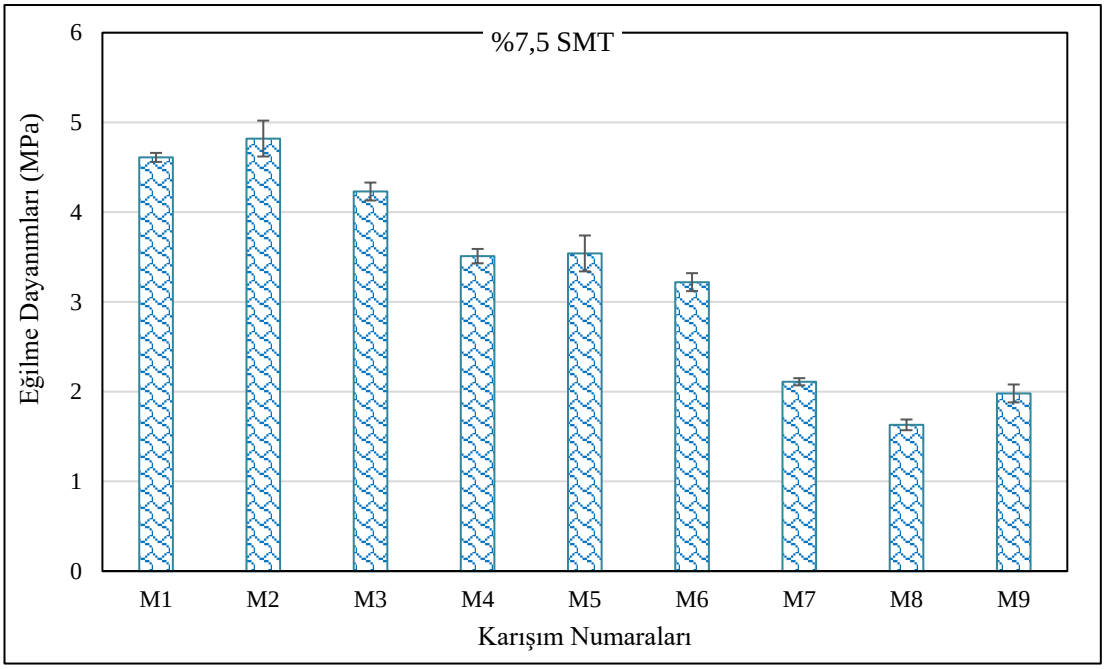
Şekil 4.33 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

Şekil 4.34, 180 gün HCl'ye maruz kalan %15 SMT oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir. %7,5 SMT oranında olduğu gibi karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü gözlenmektedir. Karışımlarda kullanılan TYS ise olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M10 ve M12 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %44 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M13 ve M15 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %3 artış gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M16 ve M18 için nihai basınç dayanımı ise yaklaşık %8'lik bir azalış tespit edilmiştir.



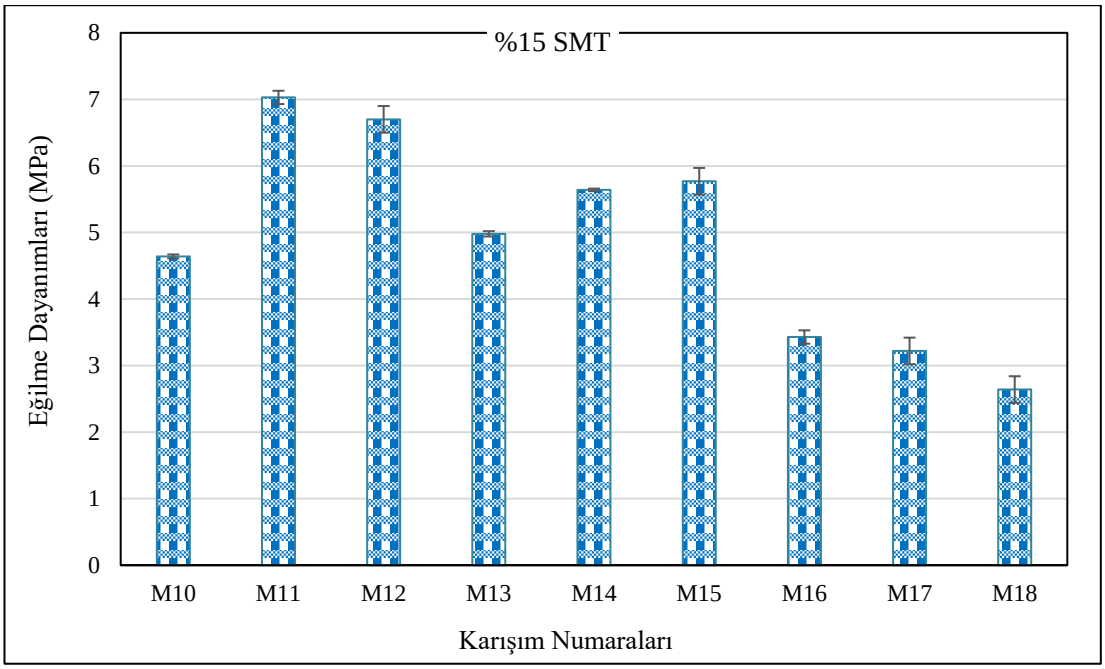
Şekil 4.34 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

Şekil 4.35, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin HCl testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. Eğilme dayanımları incelendiğinde, HCl sonrasındaki basınç dayanımları özellikleri ile paralellik göstermektedir. UK oranı %50 olarak kullanılan numunelerin minimum eğilme dayanımı gösterdiği gözlenmiştir. TYS kullanımının olumsuz bir etki oluşturmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.35 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

Şekil 4.36, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin HCl testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. HCl sonrasındaki eğilme dayanımları için %7,5 SMT oranına sahip numunelerden farklı olarak UK oranı %50 kullanılan karışımlarda bariz bir düşüş olmadığı gözlenmiştir. UK oranı %0 ve %25 olan karışımlarda TYS kullanımı eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir.

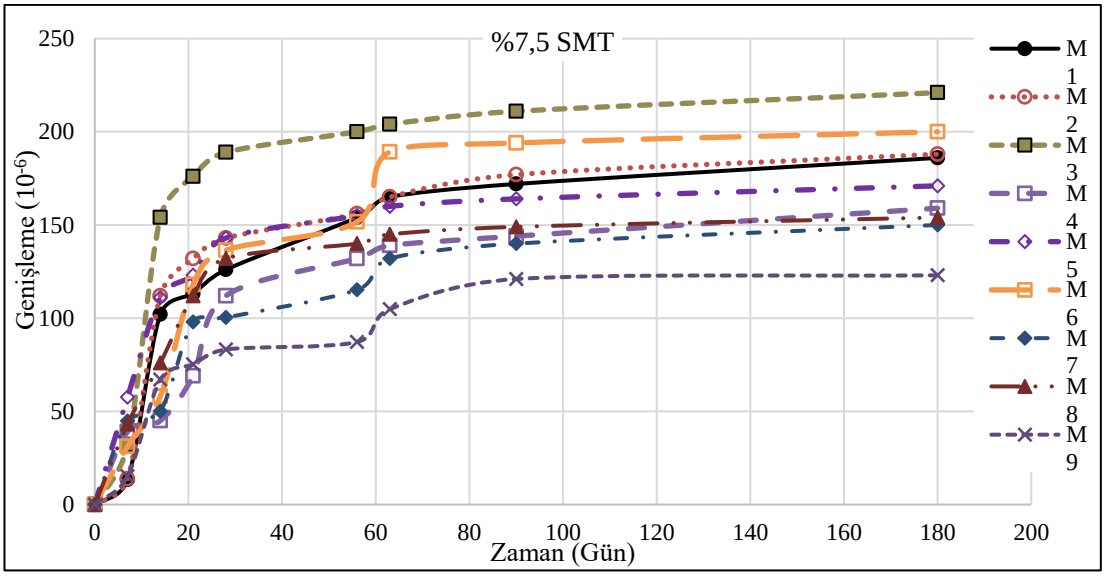


Şekil 4.36 180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

180 gün boyunca HCl'ye maruz kalan numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının paralel özellik gösterdiği gözlenmiştir.

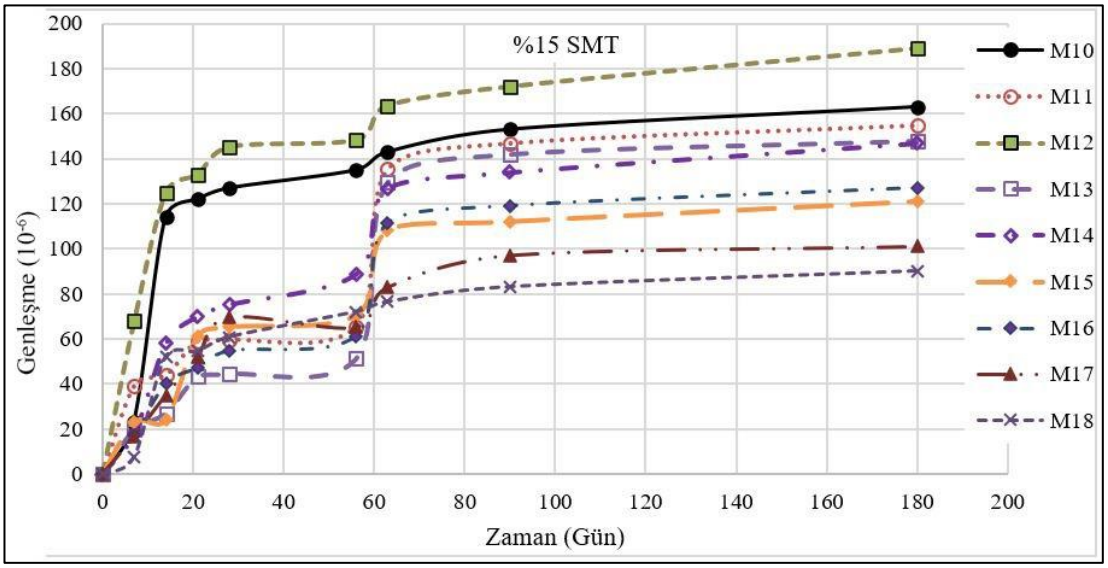
4.4.6 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Dayanıklılığı

Şekil 4.37, %7,5 SMT oranına sahip numunelerin 180 günlük sülfat ($MgSO_4$) genleşmelerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde kompozitlerin ilk 60 günde daha hızlı genleşme gösterdiği sonraki günlerde ise daha üniform bir genleşme gösterdiği gözlenmektedir. En düşük genleşme değeri UK oranı %50 ve TYS oranı %100 olan M9 karışımında $123x10^{-6}$ değeriyle görülürken, en yüksek genleşme değeri ise UK oranı %0 ve TYS oranı %100 olan M3 karışımında $221x10^{-6}$ değerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.37 %7,5 SMT kompozitlerin sülfat ($MgSO_4$) direnci

Şekil 4.38, %15 SMT oranına sahip numunelerin 180 günlük sülfat ($MgSO_4$) genleşmelerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde kompozitlerin ilk 60 günde daha hızlı genleşme gösterdiği sonraki günlerde ise daha üniform bir genleşme gösterdiği gözlenmektedir. En düşük genleşme değeri UK oranı %50 ve TYS oranı %100 olan M18 karışımında $90x10^{-6}$ değeriyle görülürken, en yüksek genleşme değeri ise UK oranı %0 ve TYS oranı %100 olan M12 karışımında $189x10^{-6}$ değerinde olduğu gözlenmiştir.

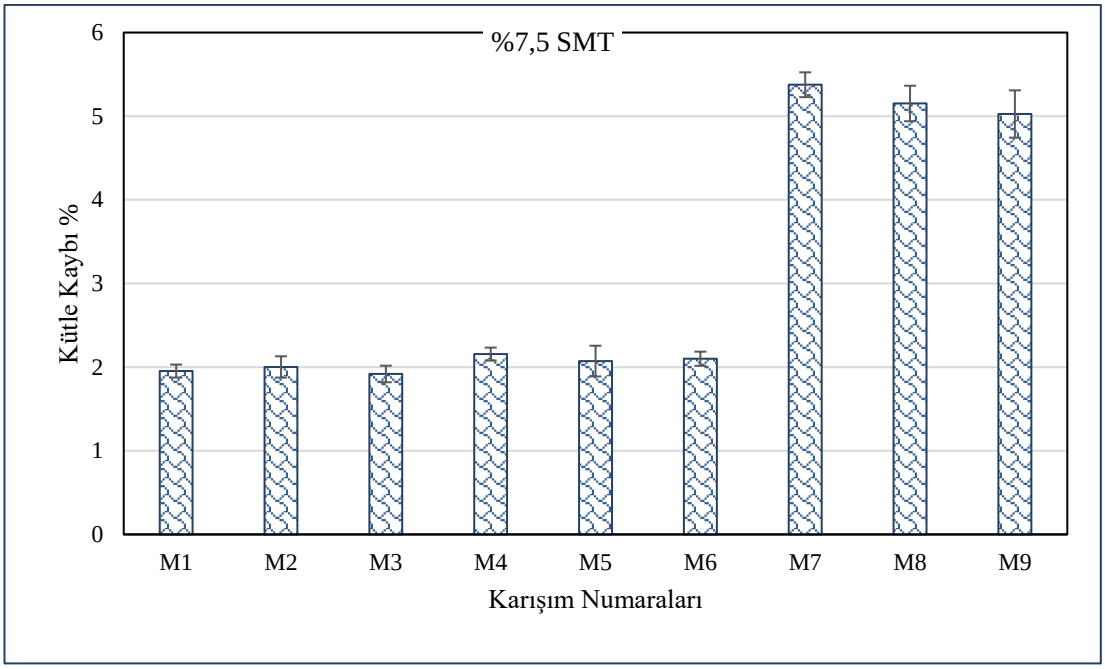


Şekil 4.38 %15 SMT kompozitlerin sülfat ($MgSO_4$) direnci

UK arttıkça $MgSO_4$'e bağlı genleşmeleri genellikle azaldığı gözlenmektedir (Bayraktar vd., 2022). SMT oranı arttıkça genleşmeler azaldığı gözlenmektedir. TYS oranı arttıkça genellikle genleşmeler artış göstermiştir.

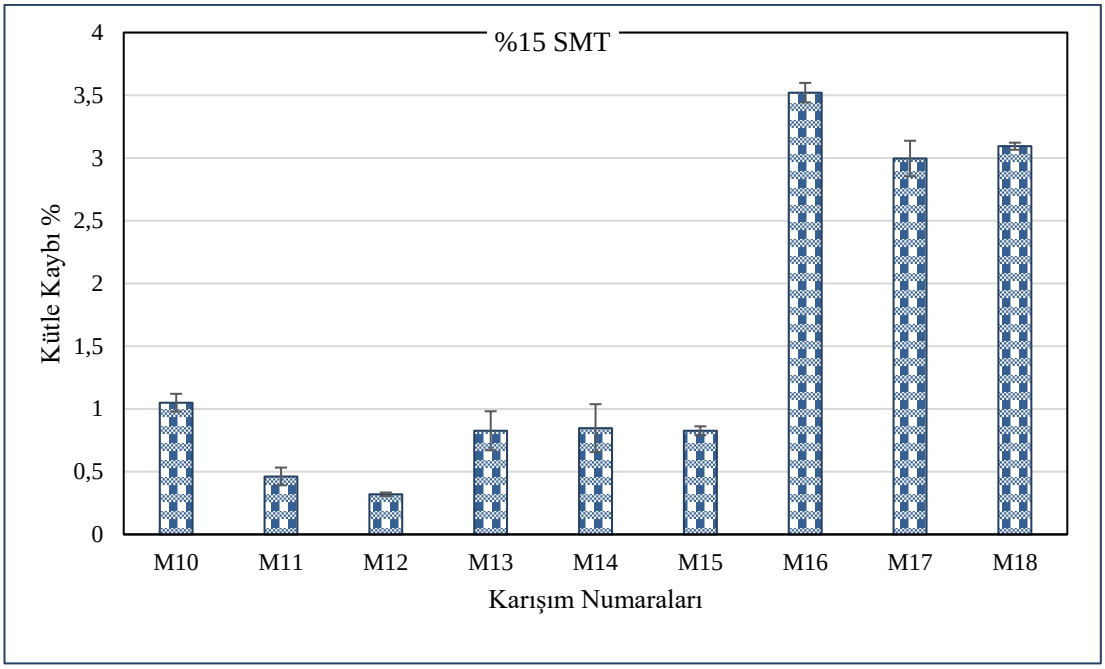
4.4.7 NaCl Etkisi

Şekil 4.39, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin asit (NaCl) direnci testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması kütle kaybı artmıştır. Özellikle %50 UK oranına sahip numuneler maksimum kütle kaybı yüzdelerine sahiptir. Bunun nedeni olarak UK'nın görünür poroziteyi arttırdığı dolayısıyla numunelerin bünyesine daha fazla NaCl çözeltisi alıp daha fazla kütle kaybına uğraması ile açıklanabilmektedir (Bodur vd., 2021). TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M1 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M4 karışımının kütle kaybı farkı %0,21 artarken, UK oranı %50 olan M7 karışımının farkı ise %3,43 arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M2 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M5 karışımının kütle kaybı farkı %0,07 artarken, UK oranı %50 olan M8 karışımının farkı ise %3,15 arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M3 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M6 karışımının kütle kaybı farkı %0,18 artarken, UK oranı %50 olan M9 karışımının farkı ise %3,11 arttığı gözlenmektedir. Dolayısıyla HCl testi sonrasında %7,5 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça ağırlık kaybı artmış olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.39 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si

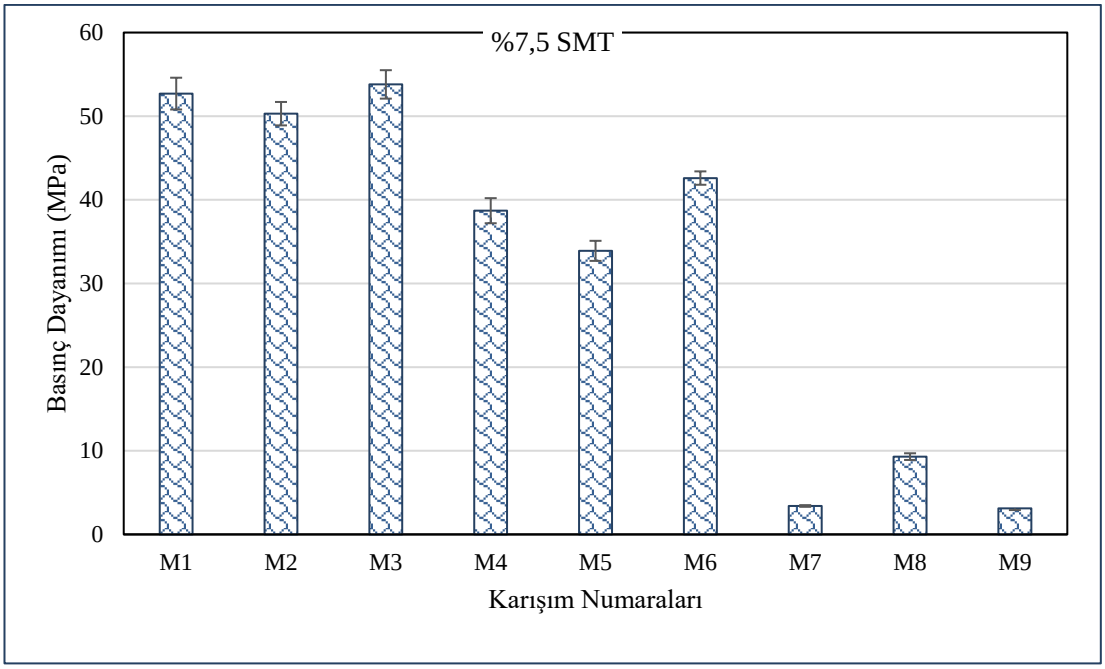
Şekil 4.40, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin asit (NaCl) direnci testi sonrasında kütle kayıplarının %'lerini göstermektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranının artması kütle kaybını artmıştır. TYS %0 ve sabit, UK oranı %0 olan M10 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M13 karışımının kütle kaybı farkı %0,22 artarken, UK oranı %50 olan M16 karışımının farkı ise %2,47 arttığı gözlenmektedir. TYS %50 ve sabit, UK oranı %0 olan M11 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M14 karışımının kütle kaybı farkı %0,39 artarken, UK oranı %50 olan M17 karışımının farkı ise %2,54 arttığı gözlenmektedir. TYS %100 ve sabit, UK oranı %0 olan M12 karışımı referans olarak alındığında, UK oranı %25 olan M15 karışımının kütle kaybı farkı %0,51 artarken, UK oranı %50 olan M18 karışımının farkı ise %2,77 arttığı gözlenmektedir. Dolayısıyla HCl testi sonrasında %15 SMT içeren karışımlarda TYS sabit tutulduğunda UK oranı arttıkça genellikle ağırlık kaybı artmıştır.



Şekil 4.40 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin ağırlık kaybı %'si

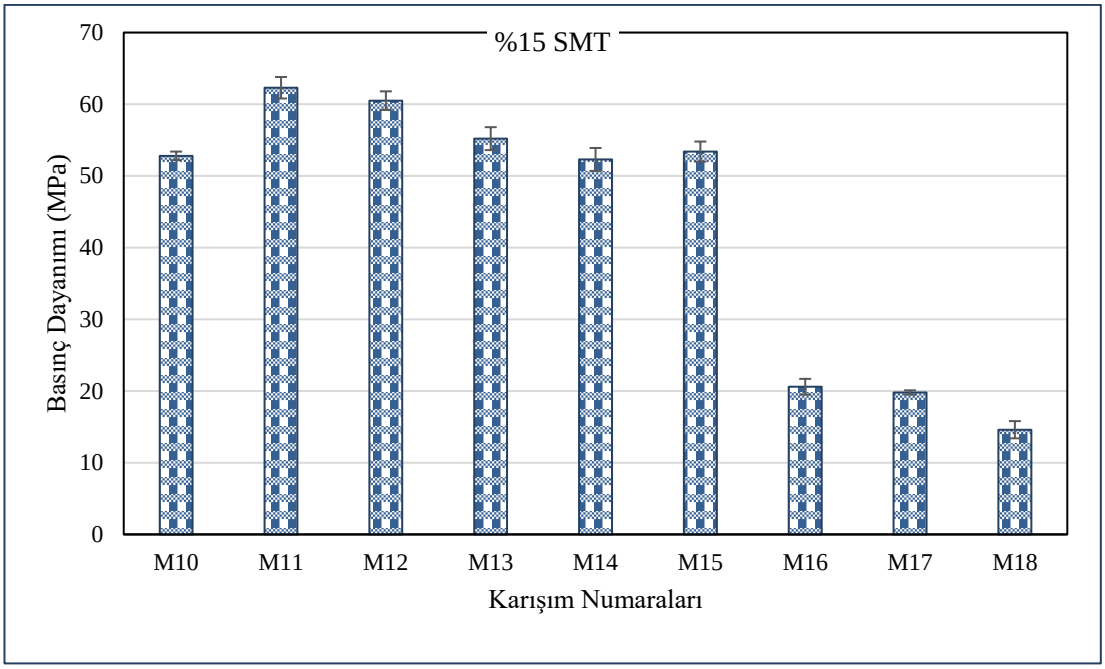
Karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça ağırlık kaybı artmıştır. SMT içeriği arttıkça ise ağırlık kaybı azalmıştır.

Şekil 4.41, 180 gün NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir. Kütle kayıplarıyla zıt özellik gösteren numunelerin kütle kayıpları arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmektedir. Karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü gözlenmektedir. Karışımlarda kullanılan TYS genellikle olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M1 ve M3 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %2 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M4 ve M6 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %10 artış gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M7 ve M9 için nihai basınç dayanımı ise yaklaşık %8'lik bir azalma tespit edilmiştir.



Şekil 4.41 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

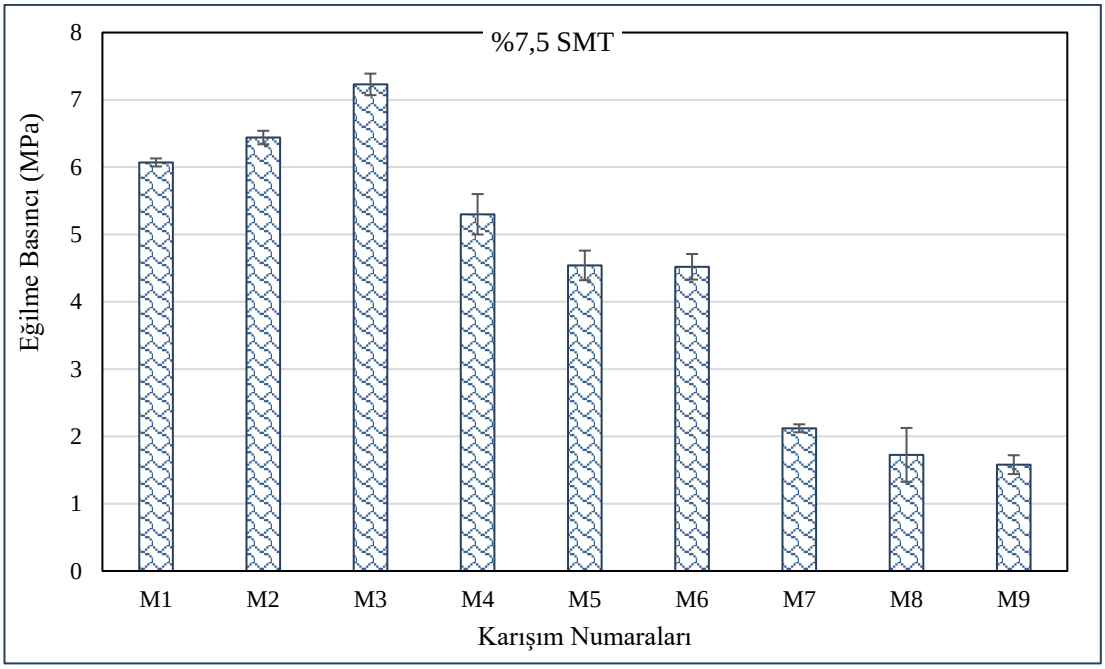
Şekil 4.42, 180 gün NaCl'ye maruz kalan %15 SMT oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir. %7,5 SMT oranında olduğu gibi karışımlarda kullanılan UK oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü gözlenmektedir. Karışımlarda kullanılan TYS ise UK'sız karışımlarda olumlu bir etki oluşturduğu fakat UK içeren karışımlarda nispeten olumsuz bir etki gösterdiği gözlenmiştir. Örneğin, UK oranı %0 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M10 ve M12 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %15 artış gösterirken, UK oranı %25 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M13 ve M15 için nihai basınç dayanımı yaklaşık %3 azalma gösterirken, UK oranı %50 ve sabit olarak TYS değişken kabul edildiğinde M16 ve M18 için nihai basınç dayanımı ise yaklaşık %29'luk bir azalış tespit edilmiştir.



Şekil 4.42 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin basınç dayanımı

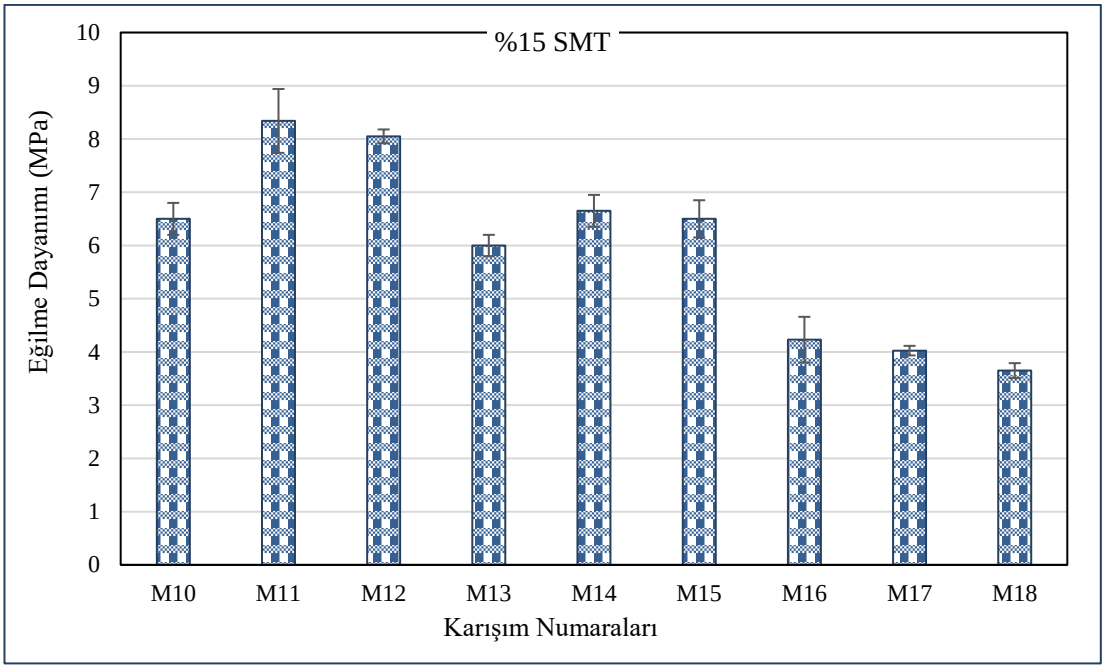
NaCl'ye maruz karışımlarda UK kullanılmadığı taktirde 50 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. %7,5 SMT oranında UK %50 oranında kullanılırsa basınç dayanımı 10 MPa'nın altına düşmektedir. %15 SMT kullanıldığında ise bu değer 15 MPa'nın üzerine çıkmaktadır.

Şekil 4.43, SMT %7,5 oranında kullanılarak üretilen numunelerin NaCl testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. Eğilme dayanımları incelendiğinde, NaCl sonrasındaki basınç dayanımları özellikleri ile paralellik göstermektedir. UK oranı %50 olarak kullanılan numunelerin minimum eğilme dayanımı gösterdiği gözlenmiştir. TYS kullanımının olumsuz bir etki oluşturmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.43 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %7,5 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

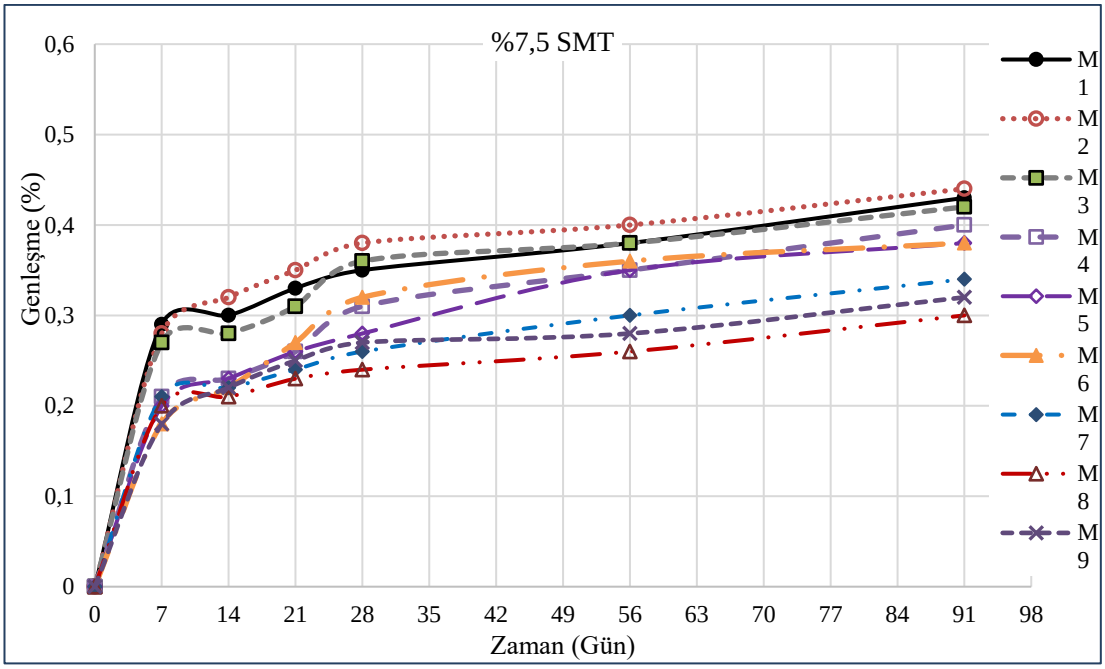
Şekil 4.44, sodyum metasilikat tozunun %15 oranında kullanılarak üretilen numunelerin NaCl testi sonrasında eğilme dayanımlarını göstermektedir. NaCl sonrasındaki eğilme dayanımları için %7,5 SMT oranına sahip numunelerden farklı olarak UK oranı %50 kullanılan karışımlarda ciddi bir düşüş olmadığı gözlenmiştir. UK oranı %0 ve %25 olan karışımlarda TYS kullanımı eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.44 180 gün boyunca NaCl'ye maruz kalan %15 SMT kompozitlerin eğilme dayanımı

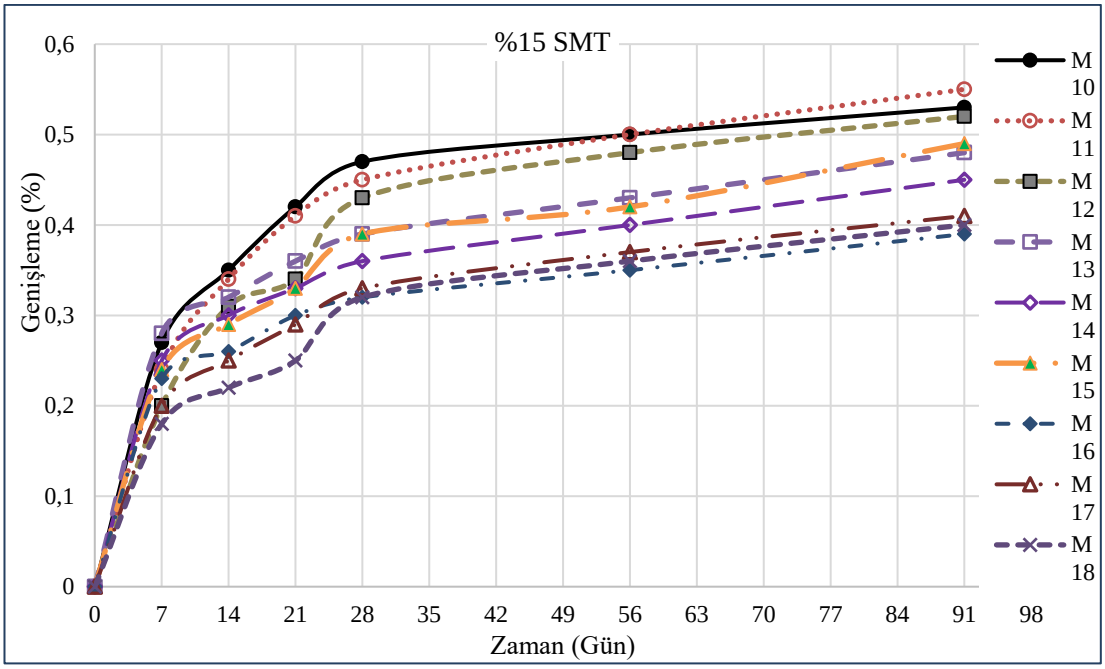
4.4.8 Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR)

Şekil 4.45, %7,5 SMT oranına sahip numunelerin 90 günlük alkali-silika reaksiyonu (ASR) genleşmelerini % olarak göstermektedir. Şekil incelendiğinde kompozitlerin ilk 28 günde daha hızlı genleşme gösterdiği sonraki günlerde ise daha üniform bir genleşme gösterdiği gözlenmektedir (Gencel vd., 2022). En düşük genleşme yüzdesi UK oranı %50 ve TYS oranı %50 olan M8 karışımında %0,3 değeriyle görülürken, en yüksek genleşme değeri ise UK oranı %0 ve TYS oranı %50 olan M2 karışımında %0,44 değerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.45 %7,5 SMT kompozitlerin alkali-silika reaksiyon direnci

Şekil 4.46, %15 SMT oranına sahip numunelerin 90 günlük alkali-silika reaksiyonu (ASR) genleşmelerini % olarak göstermektedir. Şekil incelendiğinde kompozitlerin ilk 28 günde daha hızlı genleşme gösterdiği sonraki günlerde ise daha üniform bir genleşme gösterdiği gözlenmektedir. En düşük genleşme yüzdesi UK oranı %50 ve TYS oranı %0 olan M16 karışımında %0,39 değeriyle görülürken, en yüksek genleşme değeri ise UK oranı %0 ve TYS oranı %50 olan M11 karışımında %0,55 değerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.46 %15 SMT kompozitlerin alkali-silika reaksiyon direnci

%7,5 ve %15 SMT oranındaki kompozitler birlikte değerlendirildiğinde, ASR genleşmeleri arasında çok belirgin bir fark gözlenmemiştir. Karışımda kullanılan UK oranı arttıkça ASR genleşmeleri azalmıştır (Bayraktar vd., 2021). SMT oranı arttıkça ASR genleşmeleri artmıştır. TYS'nin ise çok belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

5. SONUÇLAR

- Uçucu kül kullanılması priz başlangıç ve priz sonu sürelerini uzatmıştır. Nispeten yıkama suyu bu süreleri azaltmıştır. SMT oranı arttıkça ise bu süreler kısalmıştır.

- Uçucu kül oranı arttıkça yayılma çapı artmıştır. Yıkama suyu işlenebilirlik üzerinde çok ciddi sonuçlar doğurmamıştır. SMT oranının artması yayılma çapını arttırmıştır.

- Tüm karışımların taze birim hacim ağırlıkları 2200 kg/m^3'ün üzerindedir. Etüv kurusu yoğunluklar ise 2000 kg/m^3'ün altındadır.

- SMT ve yıkama suyunun porozite ve su emme özellikleri üzerinde çok bir etkisi yoktur. Ancak UK oranı arttıkça karışımların poroziteleri ve su emmeleri artmıştır.

- Karışımların 3., 7., 28., 90. ve 180. gün eğilme-basınç verileri incelendiğinde %7,5 SMT oranında %50 UK kullanımı çok uygun değildir. Genellikle UK oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Yıkama suyu genellikle basınç dayanımını arttırmıştır. 180. günde %7,5 SMT kullanılan karışımlarda 70 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. %15 SMT kullanılan karışımlarda ise 80 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir.

- Eğilme dayanımları da basınç dayanımlarına paralellik göstermiştir. %7,5 SMT kullanılan karışımlarda 10 MPa'dan fazla eğilme dayanımı elde edilmiştir. %15 SMT kullanılan karışımlarda ise 11 MPa'dan fazla eğilme dayanımı elde edilmiştir.

- UK ve yıkama suyu oranı arttıkça yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı oranı genellikle azalmıştır. Sıcaklık derecesi arttıkça ağırlık kaybı artmaktadır. 900°C'de genellikle %5'ten fazla ağırlık kaybı oluşmuştur.

- Yüksek sıcaklık sonrası en yüksek basınç dayanımı M1 karışımında elde edilmiştir. 900°C'den sonra M1 karışımında yaklaşık 17 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. %7,5 SMT oranında M7-M8-M9'da ise 5 MPa'dan düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. %15 SMT oranında ise 900°C'de 10 MPa'yı geçmiştir. Tüm karışımlar için yıkama suyu kullanım oranı için olumlu ya da olumsuz bir etki gözlenmemiştir.

- Tüm karışımlarda 40 D-Ç döngüsü sonrası ağırlık kaybı %2'nin altında gözlenmiştir. 120 D-Ç döngüsü sonrasında ise %7 ve üzeri ağırlık kaybı oluşmuştur. UK oranı arttıkça ağırlık kaybı artmıştır. UK'sız karışımlarda ise yıkama suyu ağırlık kaybını azaltmıştır.

- 40 D-Ç döngüsü sonrası eğilme ve basınç dayanımı artışları gözlenmiştir ancak 120 döngüde azalmıştır. M1 karışımında 120 döngü sonrasında 40 MPa elde edilirken M9 karışımında yaklaşık 3 MPa elde edilmiştir. D-Ç döngü sonralarında UK oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımları azalmaktadır.

- M1 karışımında kuruma büzülmesi değeri $1200x10^{-6}$ değeri gözlenirken M9 karışımında ise yaklaşık $2600x10^{-6}$ değeri gözlenmiştir. Basınç dayanımı azaldıkça karışımların kuruma büzülmesi artmıştır. Genellikle yıkama suyu kuruma büzülmesini arttırmaktadır. SMT oranı arttıkça kuruma büzülmesi azalmıştır.

- UK arttıkça görünür porozite arttığı için numune bünyesine daha fazla HCl girdiği için numune daha fazla tahribata uğrayarak ağırlık kaybetmiştir. %15 SMT kullanıldığında yıkama suyu ağırlık kaybını azaltmıştır. Buna bağlı olarak ağırlık kaybı fazla olan karışımların basınç dayanımları daha düşüktür.

- UK arttıkça $MgSO_4$'e bağlı genleşmeleri genellikle azaltmaktadır. SMT oranı arttıkça genleşmeler azalmıştır. Yıkama suyu oranı arttıkça genellikle genleşmeler artış göstermiştir.

- UK oranı arttıkça NaCl etkisindeki numunelerin ağırlık kaybı artmıştır. SMT içeriği arttıkça ağırlık kaybı azalmıştır.

- NaCl'ye maruz karışımlarda UK kullanılmadığı taktirde 50 MPa'dan fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. %7,5 SMT oranında UK %50 oranında kullanılırsa basınç dayanımı 10 Mpa'nın altına düşmektedir. %15 SMT kullanıldığında ise bu değer 15 MPa'nın üzerine çıkmaktadır.

- ASR genleşmeleri arasında çok belirgin bir fark gözlenmemiştir. UK oranı arttıkça ASR genleşmeleri azalmıştır. SMT arttıkça ASR genleşmeleri artmıştır. Yıkama suyunun ise çok belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

Sonuç olarak UK oranı arttıkça kompozitlerin performansı düşmüştür. Ancak sürdürülebilirlik açısından %25 oranında UK kullanılabilir. Ayrıca yıkama suyunun da %100'e kadar kullanılabileceği gözlenmiştir. Elde edilen kompozitler sayesinde çevre kirliliği oldukça azaltılarak sürdürülebilir bir yapı malzemesinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Abdulkareem, O. A., Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Nizar, I. K., & Ala'eddin, A. S. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and building materials*, *50*, 377-387.

ACI Committee 226. (1987). *Use of fly ash in concrete*.

Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R'concept. *Journal of Cleaner Production*, *124*, 1-13.

Altera, A., Bayraktar, O., Bodur, B., & Kaplan, G. (2020). *Investigation of Properties of Concrete Produced with Recycled Aggregates*. 26-34.

Altera, A., Bayraktar, O., Bodur, B., & Kaplan, G. (2021). *Investigation of the Usage Areas of Different Fiber Reinforced Concrete*. *7*, 7-18.

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*, *8*(11), 2149.

Andaç, M. S., & Emel, O. (2016). Hazır beton üretiminde atık yönetimi: Türkiye'deki taze beton atığının durumu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *31*(2), 85-92.

Ann, K. Y., & Song, H.-W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion science*, *49*(11), 4113-4133.

Aruntaş, H. (2006). Uçucu Küllerin Inşaat Sektöründe Kullanim Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *21*(1).

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.

Atalar, C., ve Ersoy, H. (2021). Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Kalkarenitlerin Fiziksel ve Dayanım Özelliklerindeki Değişimin Araştırılması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, *45*(1), 29-40.

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.

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.

Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., & Singh, M. (2020). Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, *254*, 120147.

Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, *35*(6), 1233-1246.

Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *cement and Concrete Research*, *36*(6), 1134-1147.

Baradan, B. (1995). Kerpiç yapıların korunması için uygun puzolanik karışımlar. *End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara*, *73*, 79.

Barbosa, V. F., & MacKenzie, K. J. (2003). Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials research bulletin*, *38*(2), 319-331.

Bastidas, D. M., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & González, J. A. (2008). A study on the passive state stability of steel embedded in activated fly ash mortars. *Corrosion Science*, *50*(4), 1058-1065.

Bayazıt, Ö. (1970). Application of fly ash in gökçekaya dam and economy. *Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash, Paper A-2*.

Bayraktar, O., Kaplan, G., Gencel, O., Benli, A., & Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials, 288,* 123128. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123128

Bayraktar, O. Y. (2019). The possibility of fly ash and blast furnace slag disposal by using these environmental wastes as substitutes in portland cement. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(9), 560. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7741-4

Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., & Benli, A. (2022). The effect of recycled fine aggregates treated as washed, less washed and unwashed on the mechanical and durability characteristics of concrete under MgSO4 and freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering, 48,* 103924. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103924

Bayraktar, O. Y., Soylemez, H., Kaplan, G., Benli, A., Gencel, O., & Turkoglu, M. (2021). Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H2SO4 and freeze–thaw. *Construction and Building Materials, 302,* 124229. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124229

Bekem, İ. (2010). Kalker Kırmataş İle Üretilen Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisine Dayanıklılığı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara*.

Benli, A. (2019). Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, *20*(3), 1096-1108. https://doi.org/10.1002/suco.201800302

Bilim, C. (2006). Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği. *Do tora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çu urova Üniversitesi, Adana, Tür iye*.

Bingöl, A., & Rüstem, G. (2009). Donatı-beton aderansı, yüksek sıcaklıkların beton dayanımına ve aderansa etkileri konusunda bir derleme. *Tübav Bilim Dergisi*, *2*(2), 211-230.

Bodur, B., Bayraktar, O., & Kaplan, G. (2021). *Kalsiyum Alüminat Çimentolarının Köpük Beton Üretiminde Kullanımının Incelenmesi*.

Bodur, B., Kaplan, G., & Bayraktar, O. (2021). *Köpük Betonlarda Taban Külünün Hafif Agrega Olarak Değerlendirilmesi*.

Botton, J., Stankievicz, L. L., Gheller, R., de Mello, J. M. M., Dalconton, F., & Onofre, S. B. (2018). Reuse of the Concrete Mixer Truck Wash Water in the Production of Concrete-A Clean Production Proposal. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, *5*(3), 237391.

Butcher, E. G., & Parnell, A. C. (1983). Designing for fire safety. *T/C Publıc., P. O. Box 842, El Segundo, CA 90245, USA, 1983, 368*.

Cai, J., Li, X., Tan, J., & Vandevyvere, B. (2020). Fly ash-based geopolymer with self-heating capacity for accelerated curing. *Journal of Cleaner Production*, *261*, 121119.

Calis, G., Akpinar, M. E., Yildizel, S. A., & Çöğürcü, M. T. (2021). Evaluation and optimization Of PVA reinforced cementitious composite containing metakaolin and fly ash. *Revista Romana de Materiale*, *51*(1), 53-66.

Chang, E. H. (2009). *Shear and bond behaviour of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams* [PhD Thesis]. Curtin University.

Chatveera, B., Lertwattanaruk, 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.

Committee 233, A. C. I. (2001). Ground, Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete (ACI 233R-95). İçinde *ACIManual of Concrete Practice, Part 1*. American Concrete Institute Farmington Hills,, USA.

Correia, S. L., Souza, F. L., Dienstmann, G., & Segadaes, A. M. (2009). Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste management*, *29*(11), 2886-2891.

Coşkun, İ., Tandırcı, E., & Kurt, S. (2017). Geri dönüşüm suyu ikamesinin beton üretimine etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, *144*, 73-80.

Criado, M., Fernández-Jiménez, A., De La Torre, A. G., Aranda, M. A. G., & Palomo, A. (2007). An XRD study of the effect of the SiO2/Na2O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and concrete research*, *37*(5), 671-679.

Çakır, M. (1999). *Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: İnorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, *37*(8), 1633-1656.

Davidovits, J., Buzzi, L., Rocher, P., Gimeno, D., Marini, C., & Tocco, S. (1999). Geopolymeric cement based on low cost geologic materials. Results from the european research project geocistem. *Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer*, *99*, 83-96.

De Matos, P. R., Prudencio Jr, 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.

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.

Demircan, R. K., Kaplan, G., & Çelik, D. N. (2021). High temperature resistant restoration mortar with fly ash and GGBFS. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, *0*(0), 1-32. https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1992682

Doğan, Ü. A. (2008). *Beton bileşim parametrelerinin geçirimlilik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Doğan, Ü. A., & Özkul, M. H. (t.y.). *Hazır beton tesisinde geri kazanılan suyun beton basınç dayanımı ve kılcallık üzerine etkisi*. 9.

Durmuş, G., & Arslan, M. (2009). *Yüksek Sıcaklığın Beton Boşluk Yapısına Etkileri*.

Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & Van Deventer, J. S. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *269*(1-3), 47-58.

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= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese*, *52*(2), 77-82.

EN, T. (2003). 1008. *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*.

Engelhardt, G., & Michel, D. (1987). *High-resolution solid-state NMR of silicates and zeolites*.

Erdoğan, T. Y. (1995). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Bildiriler Kitabı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, 1-13.

Escalante, J. I., Gomez, L. Y., Johal, K. K., Mendoza, G., Mancha, H., & Mendez, J. (2001). Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions. *Cement and Concrete Research*, *31*(10), 1403-1409.

Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., & Palomo, A. (2007a). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 3055-3065.

Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., & Palomo, A. (2007b). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 3055-3065.

Fernández-Jiménez, A., Miranda, J. M., González, J. A., & Palomo, A. (2010). Steel passive state stability in activated fly ash mortars. *Materiales de Construcción*, *60*(300), 51-65.

Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research*, *35*(10), 1984-1992.

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous materials*, *91*(1-3), 111-119.

Ferrari, G., Miyamoto, M., & Ferrari, A. (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, *67*, 353-359.

Gencel, O., Yavuz Bayraktar, O., Kaplan, G., Arslan, O., Nodehi, M., Benli, A., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. *Construction and Building Materials*, *320*, 126187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126187

Gencel, O., Yavuz Bayraktar, O., Kaplan, G., Benli, A., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., Tek, M., & Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, *294*, 123607. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123607

Georgali, B., & Tsakiridis, P. E. (2005). Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement and Concrete composites*, *27*(2), 255-259.

Ghosh, K., & Ghosh, P. (2018). Effect of variation of slag content on chemical, engineering and microstructural properties of thermally cured fly ash-slag based geopolymer composites. *Rasayan J. Chem*, *11*, 426-439.

Gourley, J. T., & Johnson, G. B. (2005). Developments in geopolymer precast concrete. *World congress geopolymer*, 139-143.

Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., & Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *4*(2), 85-94.

Güner, A. (2018). *Hazır Beton Santrallerinde Oluşan Çamur ve Atıksuyun Tekrar Kullanımı*. http://openaccess.hacettepe.edu.tr:8080/xmlui/handle/11655/4605

Hamalı, Y. (2007). *Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2003). Geopolymer concrete: Turn waste into environmentally friendly concrete. *International Conference on Recent Trends in Concrete Technology and Structures (Incontest)*, 10-11.

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.

Hewlett, P. C. (1998). Lea's. *Chemistry of Cement and Concrete, 4th ed., Arnold, London*.

Hossain, K. M. A. (2006). High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, *28*(6), 535-545.

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.

Huang, Y., Tan, J., Xuan, X., Wei, S., Liu, L., Yu, S., & Zheng, G. (2022). Durability of plant fiber reinforced alkali activated composites. *Construction and Building Materials*, *314*, 125501.

Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, *45*, 125-135.

Johnson, M. B., & Mehrvar, M. (2019). An assessment of the grey water footprint of winery wastewater in the Niagara Region of Ontario, Canada. *Journal of cleaner production*, *214*, 623-632.

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), 012041.

Kantarcı, F. (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması* [Master's Thesis]. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Gholampour, A., Gencel, O., Koksal, F., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*, *22*(5), 2791-2812.

Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., & Memis, S. (2021). Effect of high volume fly ash and micro-steel fiber on flexural toughness and durability properties in self-compacting lightweight mortar (SCLM). *Construction and Building Materials, 307*, 124877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124877

Kaplan, G., Öz, A., Bayrak, B., Alcan, H. G., Çelebi, O., & Aydın, A. C. (2022). Effect of quartz powder on mid-strength fly ash geopolymers at short curing time and low curing temperature. *Construction and Building Materials*, *329*, 127153.

Kaplan, G., Turkoglu, M., Bodur, B., & Bayraktar, O. Y. (2021). Usage of recycled fine aggregates obtained from concretes with low w/c ratio in the production of masonry plaster and mortar. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01551-5

Katpady, D. N., Takewaka, K., Yamaguchi, T., & Akira, Y. (2020). Performance of slag based Shirasu geopolymer cured under ambient condition. *Construction and Building Materials*, *234*, 117210.

Kaya, M. (2011). *Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen silis dumanı katkılı-çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dirençleri* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaya, M. (2016). *Farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi*.

Kaya, M., & Köksal, F. (2021a). Effect of cement additive on physical and mechanical properties of high calcium fly ash geopolymer mortars. *Structural Concrete*, *22*(S1), E452-E465. https://doi.org/10.1002/suco.202000235

Kaya, M., & Köksal, F. (2021b). Influences of high temperature on mechanical properties of fly ash based geopolymer mortars reinforced with PVA fiber. *Revista de la construcción*, *20*(2), 393-406.

Kaya, M., & Köksal, F. (2022). Physical and mechanical properties of C class fly ash based lightweight geopolymer mortar produced with expanded vermiculite aggregate. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, *21*(1), 21-35.

Khan, M. A. I., Ueno, K., Horimoto, S., Komai, F., Someya, T., Inoue, K., Tanaka, K., & Ono, Y. (2009). CIELAB color variables as indicators of compost stability. *Waste Management*, *29*(12), 2969-2975.

Kızılkanat, A. B., & Yüzer, N. (2008). Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi. *Teknik Dergi*, *19*(92), 4381-4392.

Klinowski, J. (1984). Nuclear magnetic resonance studies of zeolites. *Progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy*, *16*, 237-309.

Klus, L., Václavík, V., Dvorskỳ, 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*, *9*(21), 4519.

Klus, L., Václavík, V., Dvorskỳ, T., Svoboda, J., & Papesch, R. (2017). The utilization of waste water from a concrete plant in the production of cement composites. *Buildings*, *7*(4), 120.

Kocabeyoğlu, E. T. (2016). *Bazalt lif içeren yüksek dayanımlı harçların yüksek sıcaklık dirençleri* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kou, S., Zhan, B., & Poon, C. (2012a). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 549-556.

Kou, S., Zhan, B., & Poon, C. (2012b). Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction and Building Materials*, *36*, 566-571.

Krivenko, P. V., & Kovalchuk, G. Y. (2002). Heat-resistant fly ash based geocements. *Proceed. Intern. Conf."Geopolymers*.

Kumar, S., Kumar, R., & Mehrotra, S. P. (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of materials science*, *45*(3), 607-615.

Lahoti, M., Wong, K. K., Yang, E.-H., & Tan, K. H. (2018). Effects of Si/Al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature. *Ceramics International*, *44*(5), 5726-5734.

Li, J., Sun, P., Li, J., Lv, Y., Ye, H., Shao, L., & Du, D. (2020). Synthesis of electrolytic manganese residue-fly ash based geopolymers with high compressive strength. *Construction and Building Materials*, *248*, 118489.

Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2018). Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, *19*, 420-428.

Makropoulos, C., Rozos, E., Tsoukalas, I., Plevri, A., Karakatsanis, G., Karagiannidis, L., Makri, E., Lioumis, C., Noutsopoulos, C., & Mamais, D. (2018). Sewer-mining: A water reuse option supporting circular economy, public service provision and entrepreneurship. *Journal of environmental management*, *216*, 285-298.

Marvila, M. T., de Azevedo, A. R. G., de Oliveira, L. B., de Castro Xavier, G., & Vieira, C. M. F. (2021). Mechanical, physical and durability properties of activated alkali cement based on blast furnace slag as a function of% Na2O. *Case Studies in Construction Materials*, *15*, e00723.

Mehta, P. K. (2000). Sulfate attack on concrete separating myths from reality. *Concrete International*, *22*(8), 57-61.

Messina, Ferone, Colangelo, Roviello, & Cioffi. (2018). Alkali activated waste fly ash as sustainable composite: Influence of curing and pozzolanic admixtures on the early-age physico-mechanical properties and residual strength after exposure at elevated temperature. *Composites Part B-Engineering*, *132*, 161-169.

Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*, *31*(8), 601-605.

Miranda, J. M., Fernández-Jiménez, A., González, J. A., & Palomo, A. (2005). Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, *35*(6), 1210-1217.

Mithun, B. M., & Narasimhan, M. C. (2014). SELF-cured alkali activated slag concrete mixes-an experimental study. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, *8*(4), 477-482.

Morris, J., & Hodges, S. (2005). Corrosion of metals in fly ash-based geopolymers. *Geopolymer: Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*, 51-55.

Muştu, H. (2019). *Hazır beton üretim tesislerinde oluşan atıksuyun proseste yeniden kullanım Veriminin değerlendirilmesi* [Master's Thesis]. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete (vol. 4): Longman london*.

Noushini, A., Castel, A., Aldred, J., & Rawal, A. (2020). Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, *105*, 103290.

Nowak, R. (2008). Geopolymer concrete opens to reduce CO2 emissions. *The New Scientist*, *197*(2640), 28-29.

Oh, J. E., Monteiro, P. J., Jun, S. S., Choi, S., & Clark, S. M. (2010). The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, *40*(2), 189-196.

Öz, A., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G., Çelebi, O., Alcan, H. G., & Aydın, A. C. (2022). The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, *342*, 127923. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127923

Özkul, M. H., & Doğan, U. A. (2016). Transmikser Yıkama Suyunun Hazır Beton Üretiminde Geri Dönüşümü. *Hazır Beton Dergisi*, *137*, 82-86.

Pal, S. C., Mukherjee, A., & Pathak, S. R. (2003). Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and concrete research*, *33*(9), 1481-1486.

Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., Pastor, J. Y., Martin, A., & Llorca, J. (2008). Alcali activated fly ash: Mechanical behaviour at high temperatures. *3rd International Symposium "Non-Traditional Cement & Concrete ", Brno University of Technology, Brno, Czech Republic*, 525-535.

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, *29*(8), 1323-1329.

Papí, J. F. (2014). Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. *Materiales de Construcción*, *64*(313), e004-e004.

Paul, R., Kenway, S., & Mukheibir, P. (2019). How scale and technology influence the energy intensity of water recycling systems-An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, *215*, 1457-1480.

Peng, G. F., Chan, S. Y. N., Song, Q. M., & Yi, Q. X. (2006). Effect of high temperature on concrete: A literature review. *Key Engineering Materials*, *302*, 138-149.

Polat, B. (t.y.). *Geopolimer harcın mikro organizmalar yardımıyla kendiliğinden iyileşmesinin araştırılması*.

Provis, J. L., Myers, R. J., White, C. E., Rose, V., & Van Deventer, J. S. (2012). X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders. *Cement and concrete research*, *42*(6), 855-864.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.

Rostami, H., & Brendley, W. (2003). Alkali ash material: A novel fly ash-based cement. *Environmental science & technology*, *37*(15), 3454-3457.

Rożek, P., Król, M., & Mozgawa, W. (2019). Geopolymer-zeolite composites: A review. *Journal of cleaner production*, *230*, 557-579.

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.

Russo, N., Marzo, A., Randazzo, C., Caggia, C., Toscano, A., & Cirelli, G. L. (2019). Constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants. *Science of the total environment*, *656*, 558-566.

Samal, S. (2019). Effect of high temperature on the microstructural evolution of fiber reinforced geopolymer composite. *Heliyon*, *5*(5), e01779.

Sancak, E., & Şimşek, O. (2006). Yüksek sıcaklığın silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkılı hafif betona etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *21*(3), 443-450.

Sandrolini, F., & Franzoni, E. (2001). Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cement and concrete research*, *31*(3), 485-489.

Sarker, P. K., Grigg, A., & Chang, E. H. (2007). Bond strength of geopolymer concrete with reinforcing steel. *Proceedings of Recent Development in Structural Engineering, Mechanics and Computation, The Netherlands*, 1315-1320.

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.

Shahidan, S., Kadir, A. A., Yee, L. H., Ramzi, N. I. R., & Sheikh, F. (2017). Utilizing Slurry and Carwash Wastewater as Fresh Water Replacement in Concrete Properties. *MATEC Web of Conferences*, *103*, 01020.

Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z., & Ou, Z. (2018). Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, *108*, 10-19.

Shiba, N. C., & Ntuli, F. (2017). Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge. *Waste Management*, *60*, 191-200.

Silva, D. O., Quattrone, M., Romano, R. C., & Angulo, S. C. (2020). Reuse of fines from ready-mix concrete washing slurries. *Resources, Conservation and Recycling*, *155*, 104653.

Silverstrim, T. (1997). Microstructure and properties of chemically activated fly ash concrete. *Fuel and Energy Abstracts*, *5*(38), 319.

Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, *237*, 117455.

Sivasakthi, M., Jeyalakshmi, R., Rajamane, N. P., & Jose, R. (2018). Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *499*, 117-130.

Škvára, F., Jílek, T., & Kopeckỳ, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, *49*(3), 195-204.

Smith, H. M., Brouwer, S., Jeffrey, P., & Frijns, J. (2018). Public responses to water reuse–Understanding the evidence. *Journal of Environmental Management*, *207*, 43-50.

Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (2007). Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC). *Journal of Materials Science*, *42*(9), 3107-3116.

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.

Subaşı, S., İşbilir, B., & Ercan, İ. (2011). Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi. *Politeknik Dergisi*, *14*(2), 141-148.

Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2007). Fly ash-based geopolymer concrete: Study of slender reinforced columns. *Journal of materials science*, *42*(9), 3124-3130.

Sumajouw, M., & Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Reinforced beams and columns*.

Sun, Z., Vollpracht, A., & van der Sloot, H. A. (2019). PH dependent leaching characterization of major and trace elements from fly ash and metakaolin geopolymers. *Cement and Concrete Research*, *125*, 105889.

Şimşek, O. (2009). Beton ve beton teknolojisi (5. Baskı). *Seçkin Yayıncılık, Ankara*.

Şinik, O. (2019). *Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması* [Master's Thesis].

Tam, V. W., & Tam, C. M. (2007). Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, *52*(2), 208-218.

Tang, P., Xuan, D., Poon, C. S., & Tsang, D. C. (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*, 689-697.

Taylor, H. F. W. (1994). Delayed ettringite formation, advances in cement and concrete. *Proceedings, Engineering Foundation Conference, Durham, New Hampshire*.

Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry, 2nd editionThomas Telford Publishing. *Great Britain*.

Thakur, A. K., Pappu, A., & Thakur, V. K. (2019). Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, *230*, 11-20.

Tokyay, M. (1993). Betonda uçucu kül kullanımı (Türkiye Deneyimi). *End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara*, *29*(36), 18-19.

Tong, L., Liu, X., Liu, X., Yuan, Z., & Zhang, Q. (2013). Life cycle assessment of water reuse systems in an industrial park. *Journal of environmental management*, *129*, 471-478.

Topçu, İ. B., & Canbaz, M. (2008). Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harçlarda donma çözüme. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *21*(2), 1-16.

Topçu, İ. B., & Demir, A. (2007). Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özeliklerine etkisi, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, 455-463.

Tsimas, S., & Zervaki, M. (2011). Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. *Management of Environmental Quality: An International Journal*.

Uğur, K. U. T., & İskender, I. (2021). Kütahya Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Külünden Isı Yalıtım Özellikli Geopolimer Malzeme Üretimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *29*(1), 49-63.

Ünal, O., & Güçlüer, K. (2016). Gazbeton Üretiminde Yüksek Fırın Cürufu Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Özel Sayı*, *218*, 221.

Ünal, O., & Uygunoglu, T. (2004). *Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi*.

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*, 118493.

Vajnhandl, S., & Valh, J. V. (2014). The status of water reuse in European textile sector. *Journal of environmental management*, *141*, 29-35.

Van Deventer, J. S., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, *29*, 89-104.

Van Deventer, J. S., Provis, J. L., Duxson, P., & Brice, D. G. (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste and Biomass Valorization*, *1*(1), 145-155.

Van Jaarsveld, Jgs., & Van Deventer, J. S. J. (1999). Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. *Industrial & engineering chemistry research*, *38*(10), 3932-3941.

Vieira, L. de B. P., & de Figueiredo, A. D. (2016). Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Management*, *56*, 337-351.

Wallah, S. E., Hardjito, D., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2005). Performance of fly ash based geopolymer concrete under sulfate and acid exposure. *Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer*, *153*.

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.

Woolard, M. (2000). The use of a modified fly ash as an adsorbent for lead. *Water SA, 26*(4), 531-536.

Xiao, J., & König, G. (2004). Study on concrete at high temperature in China—An overview. *Fire safety journal, 39*(1), 89-103.

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*, 238-247.

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.

Yalçın, H., & Gürü, M. (2006). *Çimento ve beton*. Palme Yayıncılık.

Yang, L. Y., Jia, Z. J., Zhang, Y. M., & Dai, J. G. (2015). Effects of nano-TiO2 on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes. *Cement and Concrete Composites, 57*, 1-7.

Yang, T., Yao, X., Zhang, Z., & Wang, H. (2012). Mechanical property and structure of alkali-activated fly ash and slag blends. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 1*(4), 167-178.

Yazıcı, H. (t.y.). Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve Sülfürik Asit Dayanıklılığı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11*(3), 443-448.

Yeğinobalı, A. (2011). *Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı*.

Yerri, S., & Piratla, K. R. (2019). Decentralized water reuse planning: Evaluation of life cycle costs and benefits. *Resources, Conservation and Recycling, 141*, 339-346.

Yildizel, S. A., & Arslan, Y. (2018). Flexural strength estimation of basalt fiber reinforced fly-ash added gypsum based composites. *Journal of Engineering Research and Applied Science, 7*(1), 829-834.

Yodmunee, S., & Yodsujai, W. (2006). Study on corrosion of steel bar in fly ash based geopolymer concrete. *International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, Thailand*, 78-85.

Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L. D., Akbaş, B., Çakır, Ö., Kızılkanat, A. B., & Kabay, N. (2007). Yangına maruz kalan yapılarda beton basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisinin araştırılması. *TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje, 103I040*.

Zega, C. J., & Di Maio, A. A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Construction and building materials*, *23*(5), 2047-2052.

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.

Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L., & Wu, B. (2014). Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. *Construction and Building Materials*, *55*, 38-45.

Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Wang, F. (2016). Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, *109*, 17-24.