



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI KÜR KOŞULLARININ ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ
BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

FATİH BEKAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSİLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÜMİT YURT**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KÜR KOŞULLARININ ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ
BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fatih BEKAR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Ümit YURT

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Ümit YURT

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 20/08/2020

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

20 Ağustos 2020

Fatih BEKAR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ümit YURT'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na ve Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY'e şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime, oğluma ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

20 Ağustos 2020

Fatih BEKAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	10
2.1. MATERYAL	10
2.2. YÖNTEM	12
2.2.1. Karışımların Hazırlanması	12
2.2.2. Numunelerin Kalıba Yerleştirilmesi	13
2.2.3. Sıcaklık Aktivasyonu	13
2.2.4. Kür İşlemi	14
2.2.5. Deneysel Çalışma.....	14
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	17
3.1. METAKAOLİN İKAMELİ ALKALİ AKTİVASYONLU BETON	17
3.1.1. Basınç Dayanımı Sonuçları	17
3.1.2. Aşınma Dayanımı Sonuçları.....	23
3.1.3. Kılcal Su Emme Deney Sonuçları.....	28
3.2. FINDIK KABUĞU KÜLÜ İKAMELİ GEOPOLİMER BETON.....	31
3.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları	31
3.2.2. Aşınma Dayanımı Sonuçları.....	38
3.2.3. Kapilarite Deney Sonuçları	42
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	45
5. KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Çimento üretim miktarı ...	2
Şekil 1.2. Dünyada'da çimento kaynaklı CO ₂ salınımı.	3
Şekil 1.3. Çimento ticareti ve dağılımı	4
Şekil 1.4. Enerji tüketimi ve CO ₂ salınımı.	4
Şekil 1.5. Çimento üretim maliyeti	5
Şekil 2.1. Granülometri eğrisi.	12
Şekil 2.2. Numune kalıpları ve karışıma giren malzemeler.	13
Şekil 2.3. Sıcaklık aktivasyonunun gerçekleştirdiği etüv	14
Şekil 2.4. Aşınma deneyi	15
Şekil 2.5. Basınç dayanımı test düzeneği	15
Şekil 2.6. Arşimet deney düzeneği	16
Şekil 3.1. Metakaolin içeren hava kürü 25 °C numunelerinin dayanım değerleri	18
Şekil 3.2. Metakaolin içeren su kürü 25 °C numunelerinin dayanım değerleri	19
Şekil 3.3. Metakaolin içeren hava kürü 60 °C numunelerinin dayanım değerleri	20
Şekil 3.4. Metakaolin içeren numunelerin beton yaşı 3 gün -dayanım ilişkisi	21
Şekil 3.5. Metakaolin içeren numunelerin beton yaşı 7 gün -dayanım ilişkisi	22
Şekil 3.6. Metakaolin içeren numunelerin beton yaşı 28 gün -dayanım ilişkisi	23
Şekil 3.7. Farklı metakaolin oranlarına sahip olan hava kürü 25 °C numunelerinin aşınma değerleri	24
Şekil 3.8. Farklı metakaolin oranlarına sahip olan su kürü 25 °C numunelerinin aşınma değerleri	25
Şekil 3.9. Farklı metakaolin oranlarına sahip olan su kürü 60 °C numunelerinin aşınma değerleri	26
Şekil 3.10. Metakaolin içeren gepolimer betonların regrasyon analizi	27
Şekil 3.11. Kapiler su emme deney sonuçları YFC	30
Şekil 3.12. Kapiler su emme deney sonuçları M5	30
Şekil 3.13. Kapiler su emme deney sonuçları M10	30
Şekil 3.14. Kapiler su emme deney sonuçları M15	31
Şekil 3.15. Fındık kabuğu külü içeren hava kürü 25 °C numunelerinin dayanım değerleri	32
Şekil 3.16. Fındık kabuğu külü içeren su kürü 25 °C numunelerinin dayanım değerleri	33
Şekil 3.17. Fındık kabuğu külü içeren su kürü 60 °C numunelerinin dayanım değerleri	34
Şekil 3.18. Fındık kabuğu külü içeren numunelerin beton yaşı 3 gün -dayanım ilişkisi	35
Şekil 3.19. Fındık kabuğu külü içeren numunelerin beton yaşı 7 gün -dayanım ilişkisi	36
Şekil 3.20. Fındık kabuğu külü içeren numunelerin beton yaşı 28 gün -dayanım ilişkisi	37
Şekil 3.21. Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip, hava kürü 25 °C numunelerinin aşınma değerleri	38
Şekil 3.22. Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip, su kürü 25 °C numunelerinin aşınma değerleri	39
Şekil 3.23. Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip, su kürü 60 °C numunelerinin aşınma değerleri	40

Şekil 3.24. Fındık kabuğu külü içeren gepolimer betonların regrasyon analizi	41
Şekil 3.25. Kapiler su emme deney sonuçları H5	42
Şekil 3.26. Kapiler su emme deney sonuçları H10	43
Şekil 3.27. Kapiler su emme deney sonuçları H15	44



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Çimento üreten ülkeler sıralaması	2
Çizelge 2.1. NaOH ve Na ₂ SiO ₃ ait fiziksel ve kimyasal özellikler	10
Çizelge 2.2. Karışımda kullanılan mineral katkılara ait kimyasal özellikler	11
Çizelge 2.3. Fındık kabuğu tozunun ağır metal miktarları	11
Çizelge 2.4. Karışım miktarları 1 m ³	12
Çizelge 3.1. Metakaolin içeren numunelere ait denklemler ve r ² değerleri	28
Çizelge 3.2. Fındık kabuğu külü içeren numunelere ait denklemler ve r ² değerleri	42



KISALTMALAR

A 25	25 °C Hava Koşulunda Kürülenmiş Numune
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AŞ	Anonim Şirketi
EN	(European Norm), Avrupa Standartları
F	Fındık kabuğu Külü
H5	Fındık kabuğu Külü Karışım Oranı %5
H10	Fındık kabuğu Külü Karışım Oranı %10
H15	Fındık kabuğu Külü Karışım Oranı %15
İÖYFC	İnce Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
M	Metakaolin
M5	Metakoalin Karışım Oranı %5
M10	Metakoalin Karışım Oranı %10
M15	Metakoalin Karışım Oranı %15
Ref	Referans Numune
TS	Türk Standartları
W25	25 °C Suda Kürülenmiş Numune
W60	60 °C Suda Kürülenmiş Numune
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

SİMGELER

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
CEM I 42,5 R	Dayanım Sınıfı 42.5 Olan Yüksek Erken Dayanımlı Portland Çimentosu.
Fe_2O_3	Demir Oksit
G	Gram
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
CaO	Kalsiyum Oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
CO_2	Karbondioksit
kg	Kilogram
MgO	Magnezyum Oksit
MPa	Mega Paskal
m^3	Metreküp
K_2O	Potasyum Oksit
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
SiO_2	Silisyum Dioksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2O	Sodyum Oksit
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
H_2O	Su

ÖZET

FARKLI KÜR KOŞULLARININ ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fatih BEKAR
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ümit YURT
Ağustos 2020, 50 sayfa

Günümüzde alkali aktivatörler ve atık malzemeler (cüruf, uçucu kül ve silis dumanı vb) birlikte kullanılarak kompozit malzeme üretimi mümkün olabilmektedir. Bu alternatif çevre dostu yapı malzemeleri çimento üretim miktarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada mineral katkı olarak metakaolin, fındık kabuğu külü ve YFC içeren farklı karışımlar hazırlanarak alkali aktivasyonlu beton numuneler üretilmiştir. Üretilen alkali aktivasyonlu beton numuneler 20 saat süren sıcaklık aktivasyonu (60 °C) sonrasında farklı kür koşullarında (Su-25 °C, Su-60 °C ve Hava-25 °C) dayanım kazanmıştır. Dayanım kazanan sertleşmiş numuneler üzerinde 3, 7, 28 günlük basınç dayanımı, aşınma deneyi ve yoğunluk deneyleri gerçekleştirilmiştir. Alkali aktivasyonlu beton numunelerin dayanım ve aşınma özellikleri istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Genel olarak kür süresinin artışı ile dayanım özelliklerinin gelişimi doğru orantılı olarak gerçekleşmiştir. Su kürü (60 °C) uygulamasının dayanım gelişimine katkı sağladığı ve diğer kür yöntemlerine kıyasla daha yüksek dayanım değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Ayrıca su kürü (60 °C) uygulanan numunelerde daha düşük aşınma değerleri elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Alkali aktivasyonlu beton, Aşınma, Dayanım, Fındık kabuğu külü, Metakaolin.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF USAGE OPPORTUNITIES OF WASTE MARBLE POWDER IN ALKALI ACTIVATED MORTAR PRODUCTION

Fatih BEKAR

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Ümit YURT

August 2020, 50 pages

Today, it is possible to produce composite materials by using alkali activators together with waste materials (slag, fly ash and silica fume etc.). Environmentally friendly alternative materials produced can contribute to reducing the amount of cement production. In this study, alkali activated concrete samples were produced by preparing different mixtures containing metakaolin, hazelnut shell ash and YFC as mineral additives. The produced alkali activated concrete samples were resistant to different curing conditions (Su-25 °C, Su-60 °C and Air-25 °C) after 20 hours of temperature activation (60 °C). After the curing, compressive strength, density and abrasion tests were carried out on the hardened alkali activated concrete samples for 3, 7, 28 days. As a result, time - dependent changes of strength and abrasion properties of alkali activated concretes with different mixing and curing properties were evaluated comparatively. In addition, changes in abrasion values depending on curing conditions and abrasion cycles were investigated using statistical methods. In general, strength values increased with increasing curing time. Samples with hot water curing (60 °C) reached the highest strength. The lowest abrasion values were obtained in hot water cured samples.

Keywords: Alkali activated concrete, Abrasion, Strength, Hazelnut shell ash, Metakaolin.

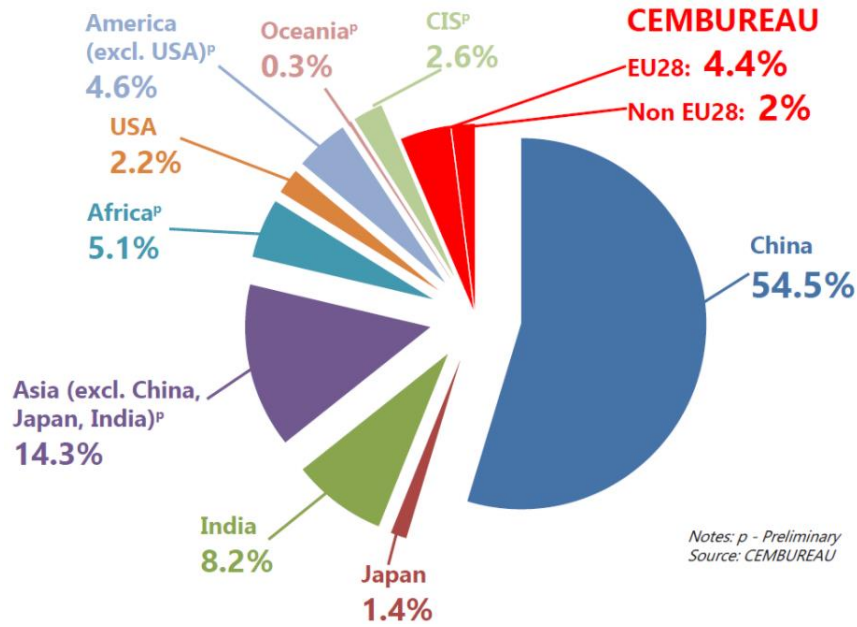
1. GİRİŞ

İnsanoğlunun gereksinim duyduğu yapıların inşası, kentlerin büyümesi, hızlı ekonomik ve uzun ömürlü yapıların oluşturulmasında beton önemli bir paya sahiptir. Geçmişten günümüze inşa edilen yapılar aynı zamanda ülkeler için ekonomik refah seviyesinin artışı ve gelişmişlik göstergesi olarak değerlendirilmektedir. İnşaat sektörünün büyümesi, yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerin çeşitliliğini beraberinde getirmektedir. Artan malzeme talebi ise yüksek miktarlarda enerji harcanmasına neden olmaktadır. Endüstrileşme ile birlikte enerji talebi sürekli artış eğilimindedir. Enerjiye duyulan talep ile birlikte üretim ve tüketim sürecinin çıktısı olarak istenmeyen atıklar, çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Enerji üretiminde ve tüketiminde ortaya çıkan çevresel atıkların kullanılabilir farklı ürünlere dönüştürülmesi süreci olumlu etkilemektedir. Son zamanlarda, atık maddelerin kullanışlı yeni kompozit malzemelere dönüşümü üzerine gerçekleştirilen araştırmalar giderek yaygınlaşmaktadır [1]-[17]. Enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan çimento, en önemli bağlayıcı yapı malzemelerinden biridir [18]. Çimento üretiminin beraberinde ortaya çıkan CO₂ salınımı ve yüksek enerji maliyeti göz önünde bulundurulması gereken sonuçlardır [19]. Enerji talebi CO₂ salınımı arttırdığı gibi, doğal kaynakların tüketimi ve çevreye olumsuz etkileri bulunmaktadır [20]. Ülkelerin çimento üretim miktarı Çizelge 1.1'de görülmektedir. Tablo incelendiğinde en yüksek üretimin Çin'de gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 1.1. Ülkelerin çimento üretim miktarları [21].

Çimento Üretimi (milyon ton)				
Ülkeler	2001	2010	2014	2018
Çin	661	1881,9	2480	2176,7
Hindistan	102,9	220	260	327,7
AB Ülkeleri	225,6	192,1	166,8	179,8
ABD	88,9	65,20	83,20	87,8
Rusya	28,7	50,4	68,40	83,7
Türkiye	30	62,7	71,20	72,5
Endonezya	31,10	39,5	65	70,8
Japonya	79,5	56,6	53,8	55,3
Güney Kore	52	47,4	63,2	55
Brezilya	39,4	59,10	72	53,5

Türkiye bu tabloda 72,5 milyon ton üretim miktarı ile Şekil 1.1’de görüldüğü üzere 6. sırada yer almaktadır [20], [21]. Teknolojik gelişmelere paralel olarak inşaat sektöründe kullanılan çimento talebi artış göstermiştir. Tüm dünyada 2018 yılında üretilen çimento miktarı yaklaşık 4 milyar tona ulaşmıştır [21]. Çimento üretim miktarının istisnalar olmakla birlikte sürekli artış eğiliminde olduğu Çizelge 1.1’de görülmektedir.

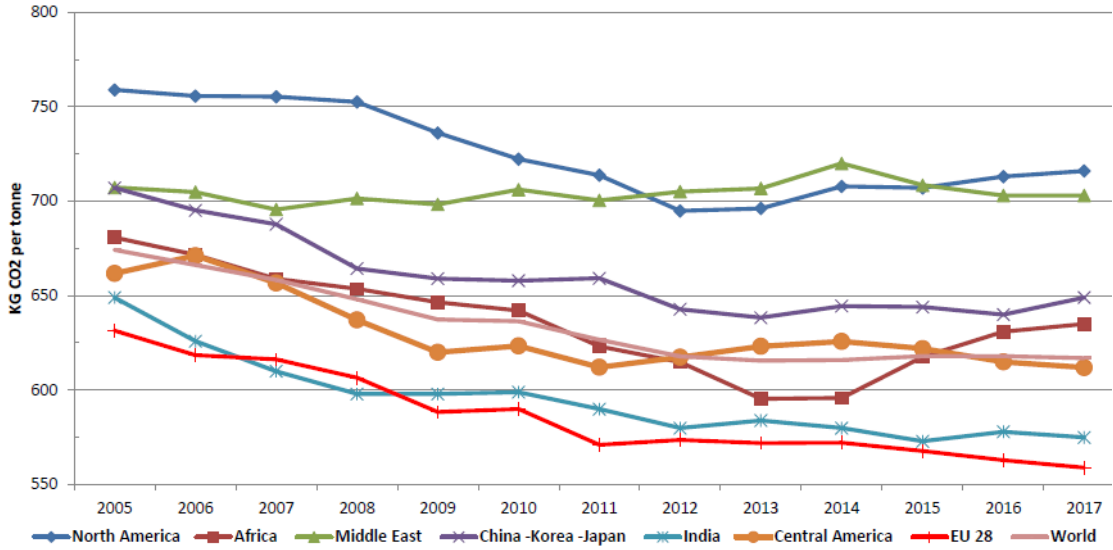


Şekil 1.1. Çimento üretim miktarı [21].

Şekil 1.1 incelendiğinde çimento üretiminin büyük bir bölümünün Asya’da gerçekleştiği ve üretimin miktarı bakımından Çin’inin önemli bir paya sahip olduğu görülebilir.

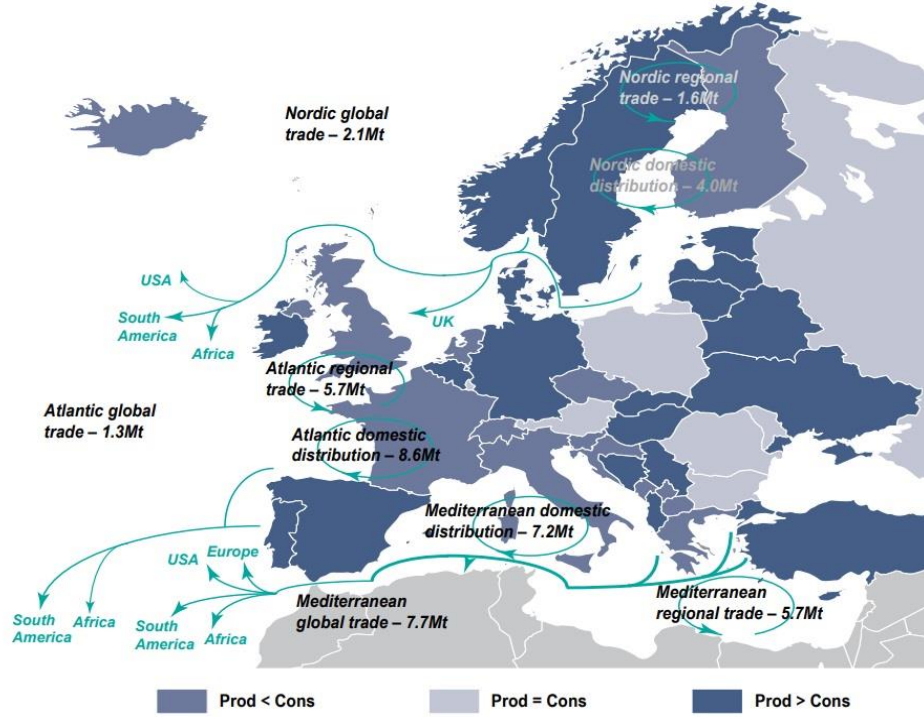
Çimento üretiminin, yapı ihtiyacına paralel olarak artış göstereceği ve atmosfere salınan CO₂ miktarında önemli bir artış olacağı düşünülmektedir.

Şekil 1.2'deki grafik incelendiğinde çimento üretiminin artışına bağlı olarak CO₂ salınımının azaltılmasına yönelik önlemlerin kısmen işe yaradığı düşünülebilir. Şekil 1.2'de çimentolu ürünlerin (gri ve beyaz) üretimi sonucunda ortaya çıkan CO₂ salınımı verilmiştir.



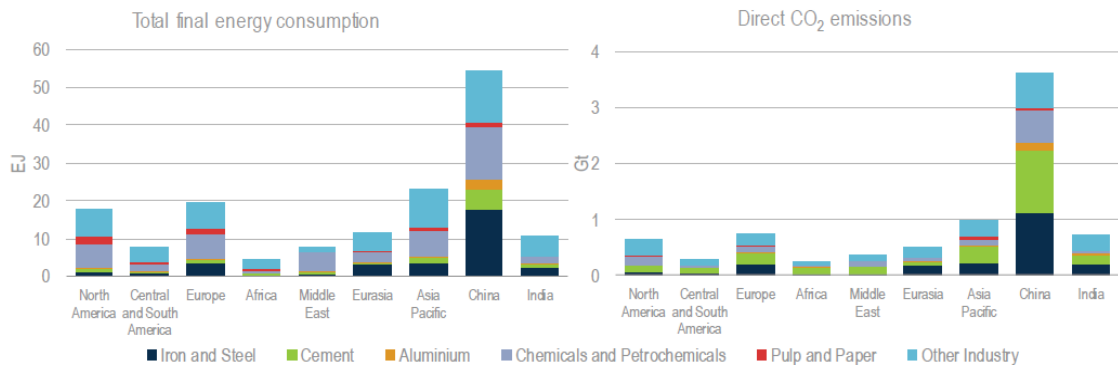
Şekil 1.2. Dünyada çimento (gri ve beyaz) kaynaklı CO₂ salınımı [21].

Çimento üretilmesinden dağıtılmasına kadar hemen hemen her aşamada farklı maliyetler ortaya çıkmaktadır. Özellikle çimento üretimi için yüksek sıcaklık gerekmektedir. Bu sıcaklığın elde edilebilmesi için harcanan yakıt giderleri çimento üretim maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır [22]. Çimentonun üretim sonrası ticareti Şekil 1.3'de görülmektedir.



Şekil 1.3. Çimento ticareti ve dağılımı [23].

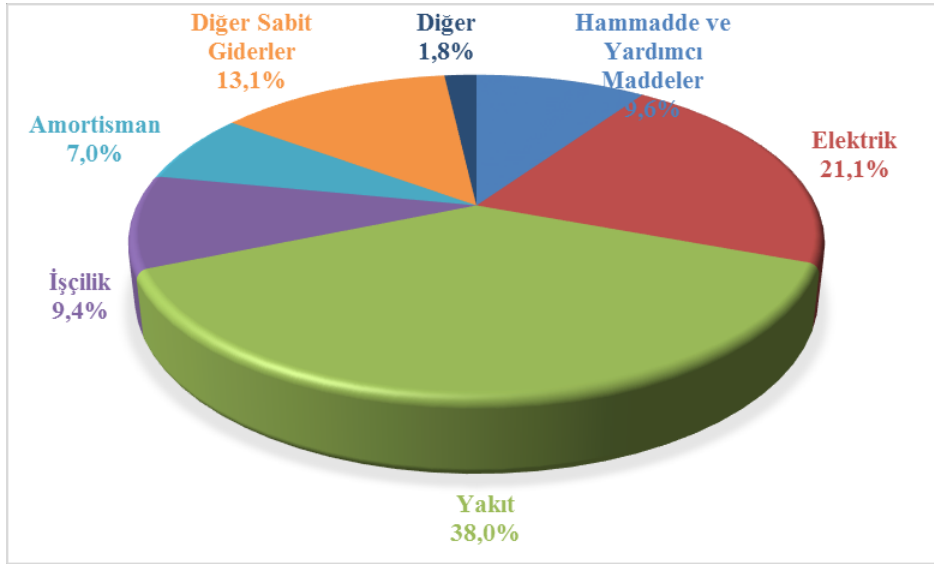
Şekil 1.3 incelendiğinde üretim sonrası nakliye maliyetlerinin göz önünde bulundurulması ve önemli bir paya sahip olduğu düşünülmektedir. Çimento sektörünün maliyet bileşenleri Şekil 1.3’de görüldüğü gibi üretimin yanında dolaylı olarak diğer harcamalarında ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çimento üretimi her ne kadar olumsuz çevresel etkileri bulunsada günümüzün önemli yapı malzemesi olma özelliğini sürdürmektedir. Bu nedenle, tüketilen çimento miktarının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Çimento içerisine doğal ya da yapay puzolanların belirli oranlarda karıştırılması ile çimento miktarını azaltılması sağlanırken aynı zamanda daha iyi özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilmektedir.



Şekil 1.4. Enerji tüketimi ve CO₂ salınımı [24].

Şekil 1.4’de temel endüstri alanlarının 2017 yılına ait enerji tüketimleri ve CO₂ salınımları verilmiştir. Tüm ülkelerde çimento üretimi için harcanan enerjinin önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Çimento üretimi, tüketimin, dağıtımının vb. gereksinimlerin küresel ölçekte planlanarak yapılmasının küresel ısınmanın zararlı etkilerinin azaltılmasında etkili olacağı söylenebilir.

Çizelge 1.5’ te çimento üretim maliyetlerin bileşenleri yüzde olarak verilmiştir. En yüksek orana sahip bileşeni yakıt oluşturmaktadır. Çimento üretiminde kullanılan yakıtların büyük çoğunluğu fosil kaynaklı olup küresel ısınma ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 1.5. Çimento üretim maliyeti [22].

Çimento üretimi için yüksek miktarlarda enerjiye gereksinim duyulması, çimento üretimin doğal kaynaklara ve çevreye verdiği zarar, CO₂ salınımı, çimento üretim maliyetinin yüksek olması vb. nedenler araştırmacıları alternatif arayışlara yönlendirmiştir. Çimento üretimin olumsuz etkileri bulunmakla birlikte çimento kullanılarak elde edilen kompozit ürünler, insanlığın ihtiyaç duyduğu yapıların inşası mümkün kılmıştır. Nitekim araştırmacılar çimento talebini karşılayabilmek, maliyetini azaltabilmek, çimentodan elde edilen kompozit ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirilmesine yönelik araştırmalar gerçekleştirmektedirler. Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan, ince öğütülerek çimento içerisinde kullanılan alümin ya da silis içerikli malzemeler puzolan olarak isimlendirilir. Bu malzemeler elde edildikleri kaynağa göre doğal ve yapay olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Doğal puzolanlar (volkanik tüfler, diatomlu topraklar, volkanik camlar, bazı killer ve traslar) direkt olarak doğal olarak elde edilip öğütülerek kullanılabilir.

Yapay puzolanların en yaygın kullanılanları YFC, uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstrinin atık ürünleridir [25]. Doğal ve yapay puzolanların belirli oranlarda çimento içerisinde kullanılması ile daha üstün özelliklerde yapı malzemeleri elde edilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Fakat tek başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan bu puzolanlar alkali aktivatörler kullanılarak yapı malzemelerinin üretilmesi üzerine yapılan çalışmalar çimentolu kompozitlere göre nispeten daha azdır. Literatürde bu konu ile ilgili farklı isimlendirmeler (alkali aktivasyonlu beton, geopolimer beton, jeopolimer beton, çimentosuz beton vb.) yapılmaktadır. Yapısında CaO, Al₂O₃ ve SiO₂, bulunan YFC, uçucu kül, taban külü, silis dumanı, metakaloin, pirinç kabuğu külü vb. puzolanlar alkali aktivatörler kullanılarak beton üretimi mümkün olabilmektedir. Alüminosilikat içerikli küllerin alkali aktivasyonu sonucunda beton oluştururken, YFC ile yapılan karışımların sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır [26]. Alkali aktivatörler kullanılarak üretilen betonların, çevre koşullarına dirençli olması, asit saldırılarına dayanıklı olması, erken yaşlarda yüksek dayanım, düşük ısı iletkenliği vb. üstün özellikleri bulunmaktadır [27]. Dayanım ve durabilite özellikleri bakımından daha üstün malzemelerin elde edilmesinde kullanılan puzolanlar mineral katkı olarak da isimlendirilmektedir [28].

Dünyada çevreci politikalar kapsamında yapılan çalışmalarda yeni atık materyaller betonda kullanılmıştır. Bölgesel kirlilik oluşturan atık deniz kabuklarını toz haline getirip çimento yerine kullanarak çalışmalar yürütmüşlerdir [29].

Yine başka bir çalışmada bir atık puzolan olan pirinç kabuğu külünden yüksek dayanımda beton elde etmeyi başarmışlardır [30].

Alkali aktivasyonlu beton üretiminde %100 YFC kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, farklı aktivasyon sıcaklığı (25 °C, 60 °C, 90 °C) sonrasında hava küründe 90 gün dayanım kazanan numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sıcaklık aktivasyonu ile birlikte fiziksel ve mekanik özelliklerde artış görülmüştür [1].

Çimento kullanılarak üretilen betona kıyasla dayanım ve durabilite özelliklerini bakımından daha üstün özelliklere sahip olan ve atık malzemelerin nitelikli yapı malzemelerine dönüşümüne olanak sağlayan alkali aktivasyonlu kompozitler son dönemde ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. Alkali aktivasyonlu kompozitlerin en önemli özelliklerinden birisi uygulanan sıcaklık ile dayanım kazanmasıdır. İnşaat

sektörünün ihtiyaç duyduğu nitelikli kompozit ürünlerin üretilmesinde metakaolin yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle metakolinin mühendislik özelliklerin araştırılması ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmektedir [31]-[42].

Metakaolin beyaz renkli olup, kaolin kilin 650-800 C sıcaklıkta kalsine edilerek üretilen puzolonik bir üründür. Kimyasal bileşimde SiO_2 ve Al_2O_3 çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek güçlü bağlar oluşturur.

Yapı malzemesi üretiminde, özellikle yüksek dayanım ve durabilite özelliklerinin elde edilmesinde, özel beton üretimlerinde, özel sıvalarda kullanılan puzolonik malzemelerden biri olan metakaolinin kullanım alanı oldukça geniştir [31].

Geçmişten günümüze üretilen kompozit ürünler sanayinin ve teknolojinin gelişimine paralel olarak sürekli değişim ve dönüşüm içerisinde. Bu ürünlerin, fiziksel kimyasal termal ve mekanik özelliklerinin daha iyi olması, daha düşük maliyetli olması, kullanımının daha kolay olması vb. sıralanabilir. Geçmişte doğal malzemeler belirli oranlarda karıştırılarak daha iyi özelliklere sahip ürünler elde edilmiştir. Örneğin, ev yapımında kullanılan kerpiç, kil içerisine ikame olarak kullanılan saman ile doğal kompozit bir yapı malzemesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Günümüzde seramik, plastik ve metal matris veya farklı mineral katkılarında eklendiği matrisler içerisine cam, karbon, bazalt, aramid, polipropilen vb. lif ikamesi ile uzay, havacılık, otomotiv inşaat vb. sektörler için üstün özellikli ürünler geliştirilmektedir [43]. Ancak bu kompozitlerin doğada geri dönüşümlerinin çok uzun zaman alması, çevresel etkileri, CO_2 salınımı vb zararlı etkiler düşünüldüğünde, doğal malzemeler kullanılarak üretilebilecek ürünler çevreci yönüyle ilgi uyandırmaktadır. Bu nedenle doğal ürünlerin, özellikle tarımsal atıkların insanlığın yararına sunulabilecek faydalı ürünlere dönüşümü üzerine çalışmalar da yapılmaktadır [44].

Türkiye fındık üretiminde önemli bir paya sahiptir. Tarımsal ekonomi ve politika geliştirme Enstitüsü 2018 verilerine göre dünyadaki fındık üretiminin %67 'si Türkiye'de gerçekleşmektedir. Dünya'da tüketilen fındığın büyük bir bölümü ülkemizde üretilmektedir. Ülkemizde üretilen fındığın yaklaşık %50'lik bölümünü kabuk oluşturmaktadır. Ortaya çıkan kabuk yaklaşık 300000 ton'a ulaşmaktadır [45].

Tarımsal ürünlerin (Fındık, fıstık ve kayısı) kabuklarının kompozit malzeme üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada, toz ve kül haline getirilen doğal malzemeler poliester matris içerisine ikame edilerek fiziksel, kimyasal, termal ve

mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak fındık kabuğunun yapısında karbon ve oksijen elementinin sırasıyla %48,5 ve %43,5 oranında yer aldığı ve fındık kabuğu tozunun rutubet miktarının yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca poliestere matris fındık kabuğu ve külü ile üretilen kompozit ürünlerin ısı iletkenlik katsayısının saf poliestere matrisli karışımlara nazaran daha yüksek olduğu ve mekanik özellikleri düşürdüğü bildirilmiştir [43].

Kauçuk matrisli kompozit üretiminde dolgu malzemesi olarak fındık külünün kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada, %20 oranına kadar kullanılan fındık kabuğu külünün maliyet avantajının yanında mekanik özelliklerde artış sağladığı bildirilmiştir [46].

Granüle edilmiş fındık kabuğunun hafif beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir diğer çalışmada, fındık kabuğu miktarı arttıkça birim ağırlık ve basınç dayanımında azalmalar olduğu görülmüştür. Granüle fındık kabuğunun %50 oranında kullanıldığı karışımlarda 20 MPa basınç dayanımı elde edildiği ve hafif beton üretiminde kullanılabilirliğin mümkün olduğu bildirilmiştir [47]. Granüle fındık kabuğunu kullanıldığı başka bir çalışmada %2, %5, %7,5, ve %10 ikame oranları ile harç numunesi üretilmiştir. Sonuç olarak fındık kabuğunun öğütülerek çimento içerisinde kısıtlı oranlarda yer değiştirilerek kullanılabileceği bildirilmiştir [48]. Granüle fındık kabuğu ikameli üretilen briketlerin yalıtım özelliklerini iyileştirdiği ve enerji tüketimine olumlu katkı sağlayacağı bildirilmiştir [49]. Araştırmacılar fındık kabuğu külünün CEM I 42,5 R portland çimentosu ile %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında yer değiştirilerek üretilen harçların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak basınç dayanımı değerlerin kül ikame oranının artışına bağlı olarak azaldığını, puz hızlandırıcı olarak kullanılabileceğini ve su talebini azalttığını bildirmişlerdir [50].

Bitkisel atık küllerin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir başka çalışmada, harç karışımı içerisinde %2, %4, %6, %8 ve %10 oranında fındık kabuğu külü kullanılmıştır. Karışımda kül oranının artışı ile su emme değerlerinin arttığı, mekanik özelliklerin ise azaldığı bildirilmiştir. Referans numuneye göre en fazla ikame oranına sahip harçlarda basınç dayanımı değerinin yaklaşık 17 MPa olarak elde edilmiştir [51].

Literatür incelendiğinde alkali aktivasyonlu beton üretiminde metakaolin kullanımı ile

ilgili çalışmalar bulunmakla birlikte, fındık kabuk külünün beton içerisinde kullanımı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca alkali aktivasyonlu betonların kr Şartlarının mühendislik özelliklerine etkisinin karşılaştırmalı olarak incelendiği bu çalışmanın bu yönüyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.. Gerçekleştirilen bu çalışmada 2 farklı mineral katkı ağırlıkça (Fındık kabuğu külü ve Metekaolin), % 0, % 5, % 10 ve % 15 oranında YFC ile yer değiştirerek alkali aktivasyonlu beton karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan alkali aktivasyonlu beton karışımlar kalıba yerleştirilmesinin ardından 20±4 saat süren sabit sıcaklık (60 C) aktivasyonu uygulanmıştır. Aktivasyon sonrasında 3 farklı kür ortamında 3, 7 ve 28 gün boyunca dayanım kazanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, aşınma dayanımı, yoğunluk, kılcal su emme gibi fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sıcak su kürü (60 C) uygulanmasının alkali aktivasyonlu betonun dayanım değerleri üzerine olumlu katkı sağladığı grlmştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MATERYAL

Bu çalışmada kullanılan fındık kabuğu külü, Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan kül fırınında fındık kabukları yakılarak elde edilmiştir. Metakaolin Fibrobeton A.Ş' den temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan alkaliler Koruma Klor A.Ş' den temin edilmiş olup bu alkalilere ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. NaOH ve Na₂SiO₃ ait fiziksel ve kimyasal özellikler [52].

Özellikler	Sodyum hidroksit	Sodyum silikat
Molekül Formülü	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül Ağırlığı (g/mol)	40.02	181.92
Renk	Beyaz	Beyaz
pH	13,2-14,12	11-12.63
Yoğunluk (g/cm ³)	2.14	1.35-1.46
Na ₂ O (%)	-	8.85
SiO ₂ (%)	-	28.65
H ₂ O (%)	-	64.72

Sodyum hidroksit (NaOH) katı olarak temin edilerek laboratuvar ortamında 10 mol sulu çözelti olarak hazırlanmıştır. Cam suyu olarak isimlendirilen sodyum silikat (Na₂SiO₃) ise ilgili firmadan sulu çözelti olarak temin edilmiştir. Karışımda kullanılan İnce Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (İÖYFC) Bolu Çimento Fabrikasının Alaplı'da bulunan öğütme tesisinden temin edilmiştir. Karışımda kullanılan İÖYFC, Metakaolin, Fındık kabuğu külüne ait kimyasal bileşim Çizelge 2.2'de verilmiştir. Çizelge 2.2 incelendiğinde karışımda kullanılan SiO₂ değerlerin %40'tan daha yüksek oranlarda olduğu görülmektedir. En yüksek SiO₂ değeri (72,74) fındık kabuğu külünde görülmektedir.

Çizelge 2.2. Karışımda kullanılan mineral katkılara ait kimyasal özellikler [51].

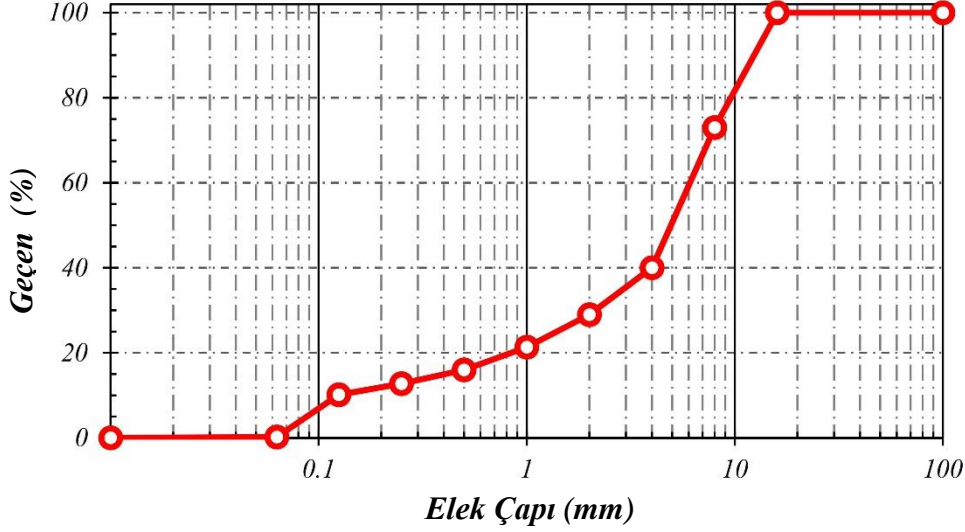
Kimyasal Bileşim (%)	İÖYFC	Metakaolin	Fındık kabuğu külü
SiO ₂	40,41	59,27	72,74
CaO	34,18	9,91	13,9
MgO	7,14	1,54	-
Al ₂ O ₃	14,29	10,34	4,33
Fe ₂ O ₃	1,16	0,47	0,56
K ₂ O	1,1	0,94	2,92
TiO ₂	0,98	0,185	0,28
Na ₂ O	0,58	0,066	-
SO ₃	0,16	1,247	1,05
P ₂ O ₅	-	-	3,98
MnO	-	-	0,23
Kızdırma Kaybı		16,037	

Çizelge 2.3’de fındık kabuğunda bulunan ağır metal miktarları verilmiştir. Genel olarak fındık kabuğunda yüksek sıcaklık ile birlikte değişimler gözlemlenmiştir. Fındık kabuğu içerisinde Ca, K, Fe, ve Si metalleri diğerlerine nazaran daha yüksek oranlarda bulunmaktadır.

Çizelge 2.3. Fındık kabuğu tozunun ağır metal miktarları [43].

Ağır metal miktarları (mg/kg)	Fındık kabuğu tozu	Fındık kabuğu külü 600 °C	Fındık kabuğu külü 900 °C
Sn	1,52	0,77	-
Ca	556,40	842	1126
K	1530	894	260,10
Na	130,33	93,63	55,80
Mg	24,67	83,08	141,45
Fe	176	140,81	105,30
Ni	21,22	10,3	1,36
Mn	5,10	5,05	5,00
Cu	6,45	14,20	6,47
Zn	0,06	0,16	-
Si	171,86	105,47	38,84

Karışımda kullanılan iri ve ince agrega kireçtaşı kökenli olup Düzce’de bulunan yerel bir firmadan temin edilmiştir.



Şekil 2.1. Granülometri eğrisi.

Alkali aktivasyonlu beton üretiminde kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 2.1' de verilmiştir [1].

2.2. YÖNTEM

2.2.1. Karışımların Hazırlanması

Alkali aktivasyonlu beton karışımlarında mineral malzeme olarak fındık kabuğu külü ve metakaolin kullanılmıştır. Her bir mineral katkı ağırlıkça %0, %5, %10, %15 oranlarında İÖYFC ile yer değiştirerek karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Çizelge 2.4' de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.4. Karışım miktarları (1 m³).

Karışımlar	Kod	İÖYFC (kg/m ³)	Mineral Katkı (kg/m ³)	İri agrega (kg/m ³)	İnce agrega (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)
Referans	Ref	672	-	904	608	32	157	105
Metakaolin	M5	638,40	33,6	904	608	32	157	105
Metakaolin	M10	604,80	67,20	904	608	32	157	105
Metakaolin	M15	571,20	100,80	904	608	32	157	105
Fındık külü	H5	638,40	33,6	904	608	32	157	105
Fındık külü	H10	604,80	67,20	904	608	32	157	105
Fındık külü	H15	571,20	100,80	904	608	32	157	105

Çizelge 2.4' de verilen malzemelerden ilk önce iri ve ince agrega beton mikserinde kuru

olarak karıştırılmış daha sonra karışım türüne göre diğer mineral katkıları eklenerek iyi bir dağılım oluşuncaya kadar kuru olarak karıştırılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat Çizelge 2.4’ de belirtilen miktarlarda hazırlanarak karışımdan hemen önce birbiri ile karıştırılarak karışıma yaklaşık iki dakika içerisinde yavaş yavaş eklenmiştir. Alkalilerin eklenmesinin ardından, karışım suyu bir dakika içerisinde eklenerek taze alkali aktivasyonlu beton karışımları elde edilmiştir.

2.2.2. Numunelerin Kalıba Yerleştirilmesi

Homojene yakın bir dağılım elde edilmesini takiben alkali aktivasyonlu beton karışımı böhme aşınma deneyi için TS EN 14157’e uygun olarak hazırlanmış olan 71 mm ± 1,5 mm kenar uzunluklarına sahip küp şeklinde numune kalıplarına, basınç dayanımı için (TS EN 12390-4) için 100x100x100 mm küp kalıplara hava boşlukları kalmayacak şekilde vibrasyon uygulanarak yerleştirilmiştir.



Şekil 2.2. Numune kalıpları ve karışıma giren malzemeler.

Farklı özelliklere sahip her bir karışım ve deney için üç adet standart numune kalıbı hazırlanmıştır. Böhme aşınma deneyi ve basınç dayanımı deneyi için hazırlanan kalıplar ve karışıma giren malzemeler Şekil 2.2’de görülmektedir. Hazırlanan taze alkali aktivasyonlu beton karışım kalıplara vibrasyon uygulanarak üç aşamada yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirme işlemi bir dakika süre boyunca sarma tablası kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Sıcaklık Aktivasyonu

Numunelerin kalıba yerleştirilmesini takiben kalıp üst yüzeyleri örtülerek kalıp ile birlikte Şekil 2.3’de görülen etüve yerleştirilmiştir. Etüve yerleştirilen numuneler 60 °C sabit sıcaklıkta 20 ± 4 saat boyunca sıcaklık aktivasyonuna tabi tutulmuştur. Sıcaklık

aktivasyonunun tamamlanmasının ardından kalıplardan çıkarılan numuneler hava kürü (25 °C), su kürü (25 °C) ve su kürü (60 °C) olmak üzere 3 farklı kür işlemi 3, 7, 28 gün süresince uygulanmıştır.



Şekil 2.3. Sıcaklık aktivasyonunun gerçekleştirdiği etüv.

2.2.4. Kür İşlemi

Sıcaklık aktivasyonu sonrasında, beton yaşının ve kür şartlarının değişiminin alkali aktivasyonlu beton numuneler üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amacıyla üç farklı kür ortamı ve 3 farklı kür süresi oluşturulmuştur. Bu kür şartları su (25 °C), hava (25 °C) ve sıcak su (60 °C) küründen oluşmaktadır.

2.2.5. Deneysel Çalışma

Farklı kür şartlarının alkali aktivasyonlu betonların su (25 °C), hava (25 °C) ve sıcak su (60 °C) kürünü takiben 3,7 ve 28. günlerde fiziksel ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. Sertleşmiş beton numuneler üzerinde aşınma kaybı Şekil 2.4'de görülen sürtünme ile aşınma kaybı (böhme) test cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Aşınma deneyi.

Şekil 2.5’ de görülen 300 ton kapasiteli beton basınç test cihazı ile belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Basınç dayanımı test düzeneği.

Şekil 2.6’da görülen arşimet deney düzeneği ile yoğunluklar belirlenmiştir. Deneysel verilerin elde edilmesini takiben mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişim, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen verilerin birbiri ile ilişkisi istatistiksel yöntemler kullanılarak irdelenmiştir.



Şekil 2.6. Arşimet deney düzeneği.

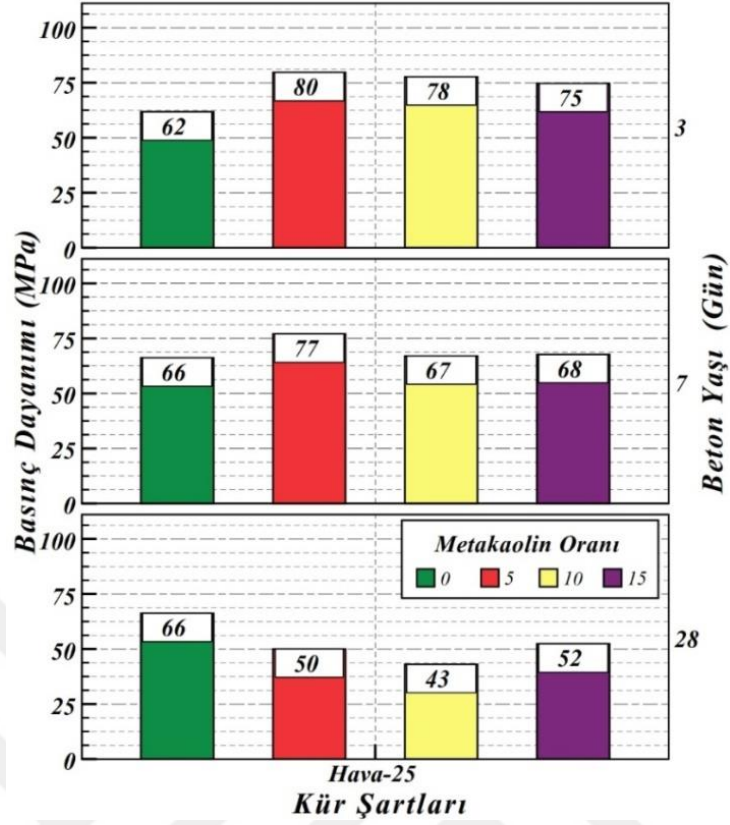
Kılcal su emme deneyi farklı kür koşullarında 28 gün dayanım kazanan numuneler üzerinde belirlenmiştir. Farklı karışım oranlarında hazırlanan beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden numunelerin yan yüzeyleri eritilmiş parafin ile izole edilmiştir. Başlangıç ağırlığı olarak numunelerin parafinli etüv kurusu ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler içinde 10 mm su olan deney havuzuna yerleştirilmiştir. Belirli zaman aralıklarında ağırlıkları ölçülerek su emme miktarları (Q) hesaplanmıştır. Emilen su miktarının temas eden yüzey alanına bölünmesi ile (Q/A) geçen zamanın (t) saniye cinsinden değerinin karekökü arasında lineer bir ilişki kurulmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. METAKAOLİN İKAMELİ ALKALİ AKTİVASYONLU BETON

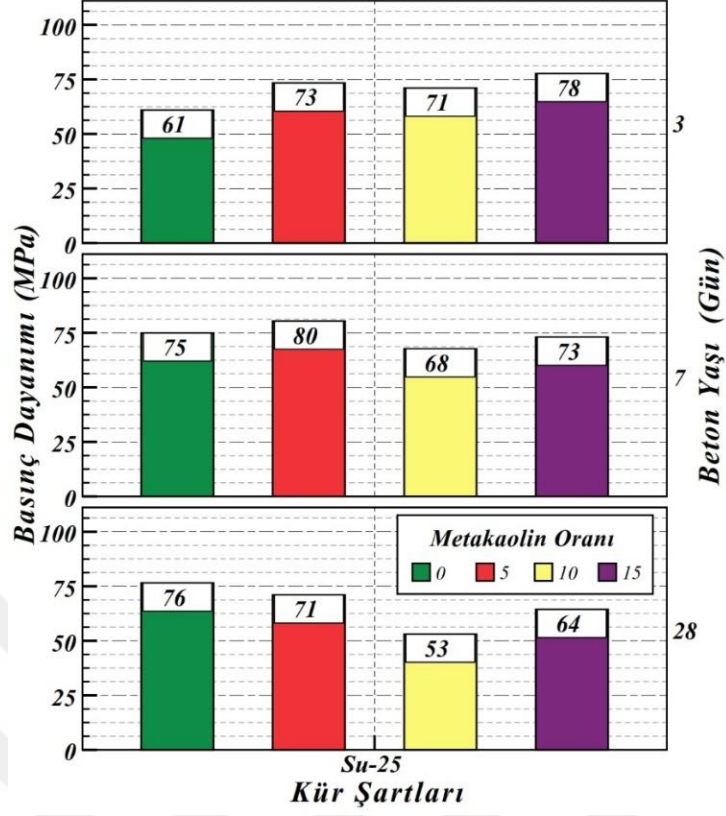
3.1.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Genel olarak hava küründe (25 °C) dayanım kazanmış numunelerin kür süresinin artışı ile basınç dayanımı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 3.1). Basınç dayanım değerleri 43 MPa – 80 MPa aralığında değişmektedir. Hava kürü numunelerinde en yüksek dayanım değeri (80 MPa) erken yaşlarda gözlemlenmiştir. Metakaolin oranının değişimi ile basınç dayanımı değerleri arasında önemli bir değişim görülmemiştir. Hava kürü numunelerinde gözlemlenen bu durumun ilerleyen yaşlarda oluşan büzülme çatlaklarının yol açtığı düşünülmektedir. İÖYFC (% 100) içeren numuneler hariç, hava kürü süresinin artışı ile basınç dayanımı değerleri düşmüştür. Her bir beton yaşı kendi içinde % 100 YFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde, 3,7,28 günlük kür sürelerinde sırasıyla, %5, %10, %15 mineral katkı oranlarına göre sırayla %20, %25, %23, 7 günlük numuneler; %17, %2, %3 artış, 28 günlük numunelerde ise sırasıyla %24, %35, %21 azalma olduğu görülmüştür.



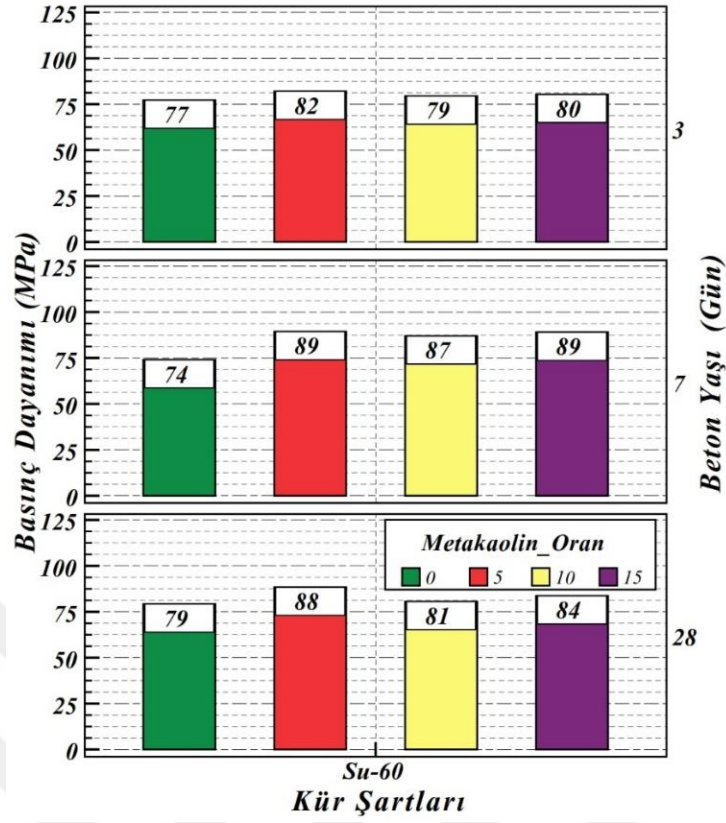
Şekil 3.1. Metakaolin içeren hava kürü (25 °C) numunelerinin dayanım değerleri.

Şekil 3.1 incelendiğinde genel olarak referans numuneler ve 7 günlük %5 metakaolin içeren numuneler hariç, su küründe (25 °C) dayanım kazanan numunelerin kür süresinin artışı ile basınç dayanımı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Su küründe (25 °C) dayanım kazanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı değerlerine (80 MPa) % 5 metakaolin içeriğine sahip 7 günlük numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük değer ise % 10 metakaolin katkılı 28 günlük numunede 53 MPa olarak gözlemlenmiştir.



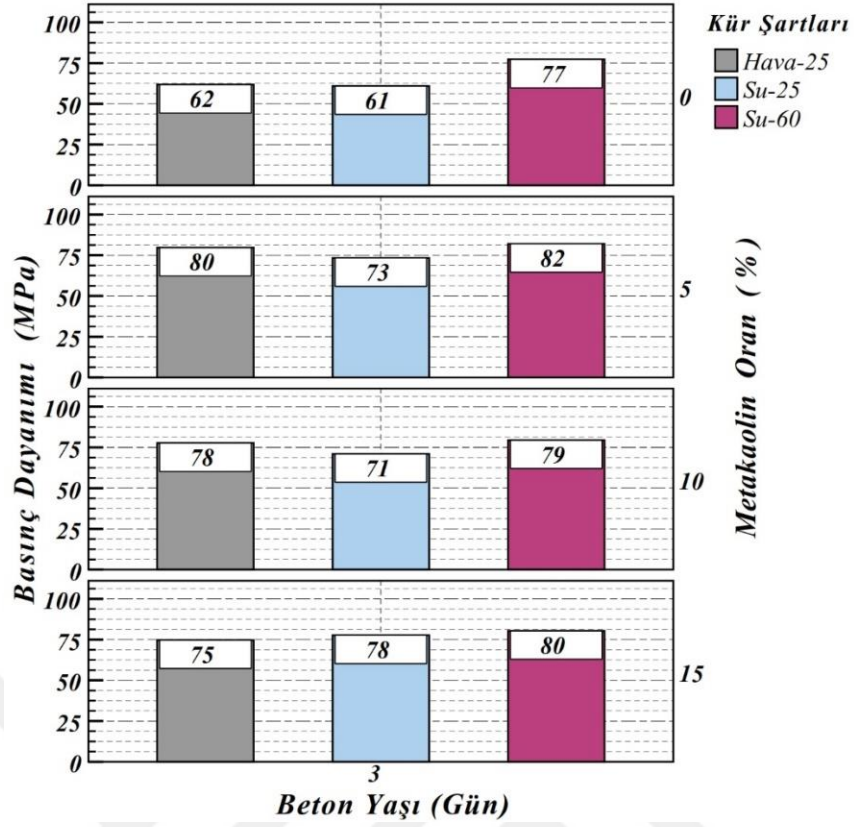
Şekil 3.2. Metakaolin içeren su kürü (25 °C) numunelerinin dayanım değerleri.

Basınç dayanımı-kür şartları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler incelendiğinde sıcak su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerlerinin farklı karışım özelliklerine sahip tüm serilerde olumlu bir etki gösterdiği ve basınç dayanımı değerlerinin diğer kür yöntemlerine göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Şekil 3.3 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değerlerine % 5 ve %15 metakaolin içeren 7 günlük numunelerde 89 Mpa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise %100 İÖYFC içeren 7 günlük numunelerde 74 MPa olarak ölçülmüştür. %100 İÖYFC içeren numuneleri referans alınarak değerlendirilirse; %5, %10, %15 metakaolin içeren numuneler 3 günlük dayanımlarında sırayla %6, %3, %4 artış görülmüştür. 7 günlük numunelerde sırayla; %20, %18, %20 dayanım artışı gözlenmiştir. 28 günlük numunelerde ise sırayla; %11, %3, %6 oranlarında dayanım artışı gözlenmiştir. Metakaolin katkılı tüm numunelerde sıcak su kürü sonrası referans numuneye göre dayanım artışı elde edilmiştir.



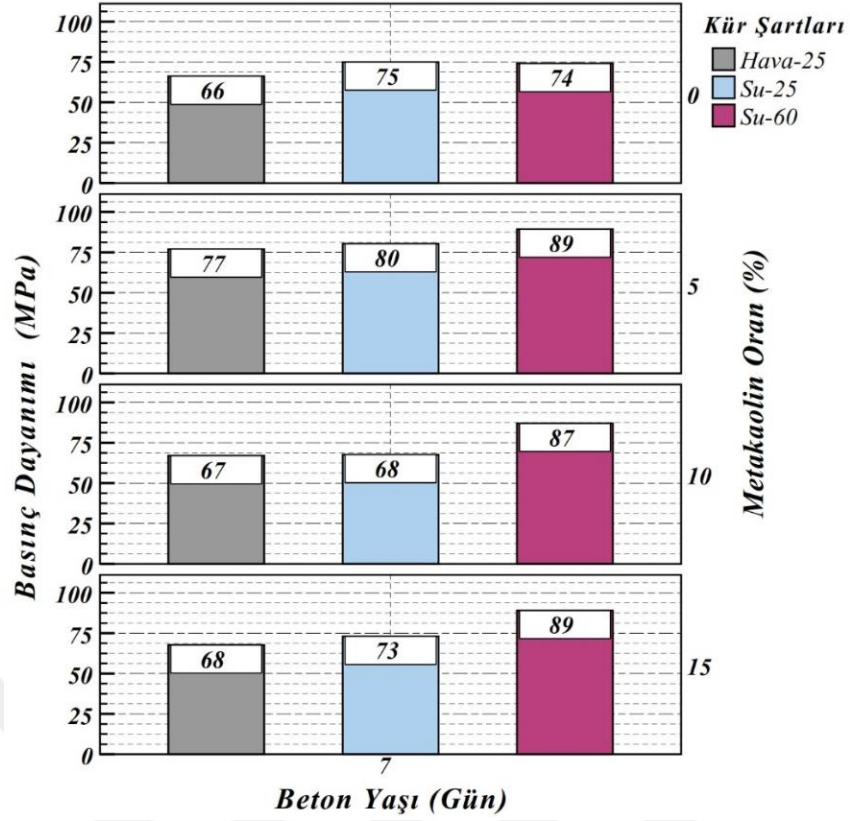
Şekil 3.3. Metakaolin içeren su kürü (60 °C) numunelerinin dayanım değerleri.

Genel olarak Şekil 3.4 incelendiğinde tüm kür şartlarında metakaolin oranının artışı ile basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Uygulanan tüm kür şartları incelendiğinde 3 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı (82 MPa) değerine % 5 metakaolin içeriğine sahip sıcak su kürü (60 °C) uygulanmış numunede görülmüştür. En düşük dayanım ise (61 MPa) ile %0 Metakoalin oranı ile 25 °C su küründe bekletilen numunelerde görülmüştür. 3 günlük numunelerde kür koşulları karşılaştırıldığında en yüksek dayanımlar 60 °C su küründe bekletilen numunelerde görülmüştür. %100 İÖYFC kullanılan numuneler referans olarak alındığında % 5 metakolin içerikli numuneler sırayla %29, %20, %6 artış göstermiştir. % 10 metakoalin içerikli numuneler sırayla %26, %16, %3 artış göstermiştir. %15 metakoalin içerikli numuneler sırayla %21, %28, %4 artış göstermiştir.



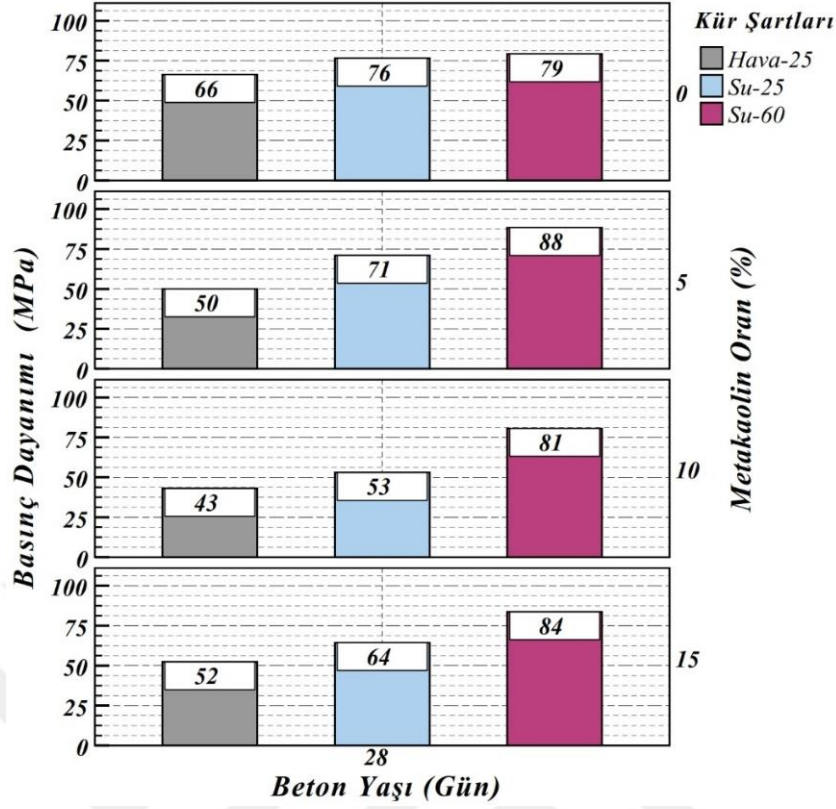
Şekil 3.4. Metakaolin içeren numunelerin beton yaşı (3 gün)-dayanım ilişkisi.

Şekil 3.5 değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı (89 Mpa) değerine % 5 ve 15 metakaolin içeriğine sahip sıcak su (60 °C) kürü uygulanmış numuneler ulaşmıştır. En düşük dayanım (66 MPa) ise 25 °C hava koşullarında kürlenmiş %100 İÖYFC içerikli numunelerde gözlenmiştir. Tüm kür koşulları karşılaştırıldığında en yüksek dayanıma su kürü (60 °C) uygulanmış numuneler ulaşmıştır. Referans numuneye kıyasla her kür türü Hava-25, Su-25, Su-60 kendi içinde değerlendirildiğinde, %5 metakaolin ikameli numunelerde sırasıyla; %17, %7, %20 artış, %10 metakaolin içerikli numuneler sırasıyla %2 artış, %10 azalma ve %18 artış, %15 metakaolin içerikli numunelerde ise sırasıyla %3 artış, %3 azalma, %20 dayanımda artış görülmüştür.



Şekil 3.5. Metakaolin içeren numunelerin beton yaşı (7 gün)-dayanım ilişkisi.

Tüm karışım oranları kür şartları ile birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek dayanım (60 °C) su kürü uygulanmış numunelerde gözlemlenmiştir. (Şekil 3.6). Şekil 3.6 incelendiğinde en düşük dayanımların hava küründe görüldüğü su kürü uygulanması ile birlikte dayanım gelişimine önemli katkı sağladığı görülmüştür. Referans numuneye göre, %5 metakoalin içerikli numunelerde sırasıyla %6, %7 azalma, %11 artış, %10 metakoalin içerikli numunelerde %34, %30 azalma, %2 artış, %15 metakoalin içerikli numunelerde ise %12, %15 azalma ve dayanımda %6 artış görülmüştür.

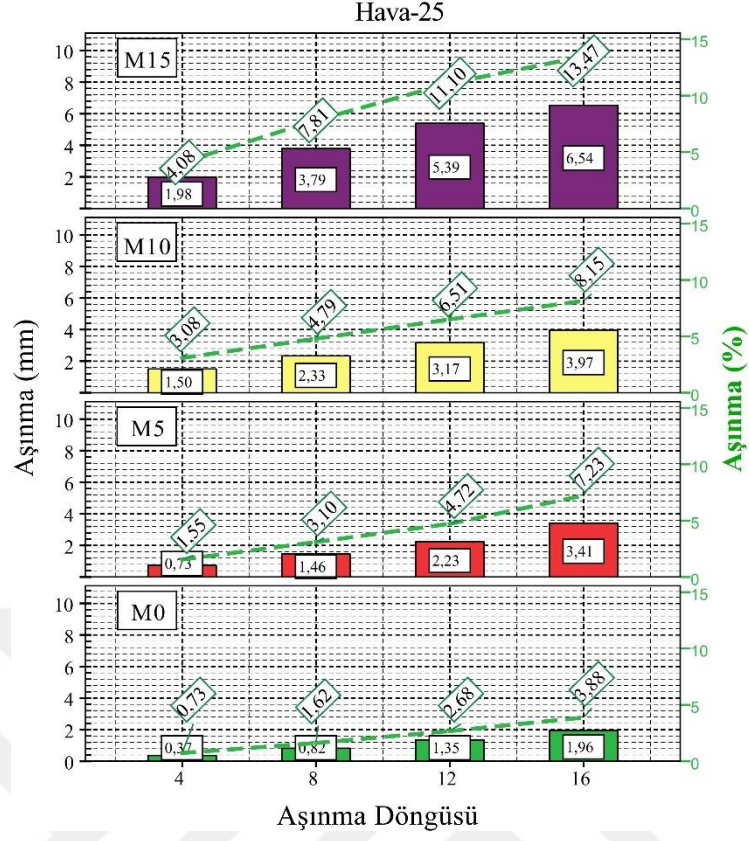


Şekil 3.6. Metakaolin içeren numunelerin beton yaşı (28 gün)-dayanım ilişkisi.

Benzer beton yaşına sahip numuneler kendi içerisinde değerlendirildiğinde %5, %10 ve %15 metakaolin içeren numunelerdeki basınç dayanımı değerlerindeki artış küçükten büyüğe doğru sıralandığında hava kürü (25 °C), su kürü (25 °C), ve sıcak su kürü (60 °C) şeklinde gerçekleşmiştir. Genel olarak hava kürü uygulanan numuneler diğerlerine nazaran daha düşük dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Su kürünün dayanım gelişimine olumlu katkı sağladığı ve su kürü sıcaklığının artışı ile dayanım gelişiminin ilerleyen yaşlarda gelişim gösterdiği görülmüştür.

3.1.2. Aşınma Dayanımı Sonuçları

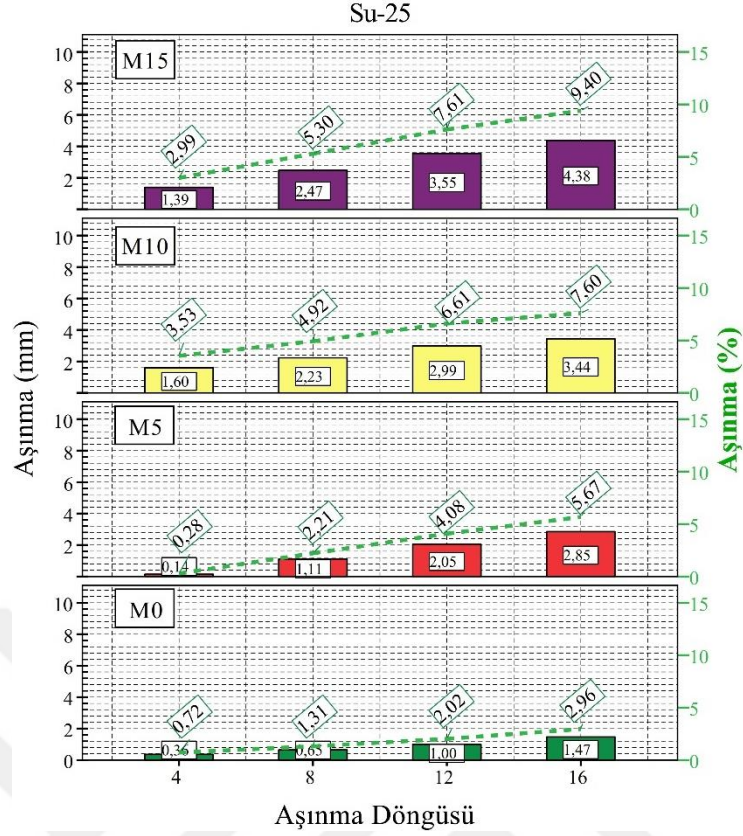
Hava kürü uygulanan serilerde aşınma kayıplarının aşınma döngüsü ile ilişkisini gösteren Şekil 3.7' deki grafik incelendiğinde hava kürü uygulanmış tüm serilerde aşınma kayıplarının aşınma döngüsüyle değişiminin doğrusal bir şekilde artış gösterdiği gözlemlenmiştir. En yüksek aşınma kaybı %15 metakaolin içeriğine sahip hava kürü numunelerinde gözlemlenmiştir. Alkali aktivasyonlu karışım içerisindeki metakaolin miktarının artışı ile aşınma kayıplarının artışı arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmüştür.



Şekil 3.7. Farklı metakaolin oranlarına sahip olan hava kürü (25 °C) numunelerinin aşınma değerleri.

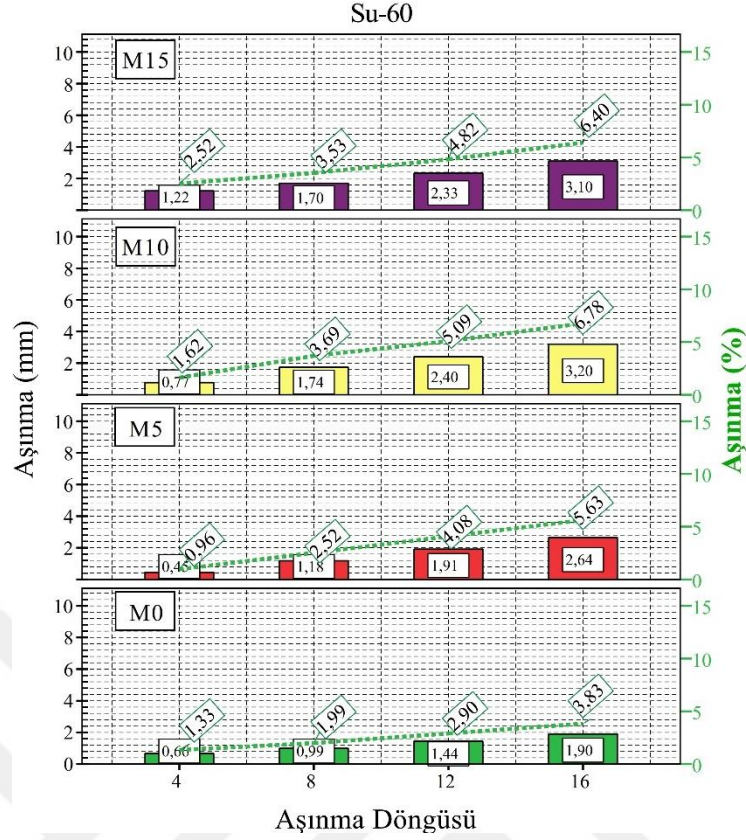
En yüksek aşınma kaybı 16 çevrim sonucunda değerlendirildiğinde metakaolin oranı en yüksek numunede %13,47, en düşük aşınma kaybı ise metakaolin içermeyen numunelerde %3,88 olarak gerçekleşmiştir.

Su küründe (25 °C) dayanım kazanan numunelerin aşınma kayıpları (Şekil 3.8) incelendiğinde genel olarak metakaolin içeriğinin artışı ile aşınma kayıplarının arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma deneyi sonucunda en yüksek ve en düşük aşınma yüzdesi su kürü (25 °C) numunelerinde sırasıyla %9,40 ve %2,96 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.8. Farklı metakaolin oranlarına sahip olan su kürü (25 °C) numunelerinin aşınma değerleri.

Genel olarak su kürü uygulanan numunelerin aşınma kayıplarının hava kürü uygulanan numunelere kıyasla daha az olduğu, su kürü uygulanan numunelerin aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 3.9 incelendiğinde metakaolin oranının artışı ile aşınma kayıplarının arttığı, metakaolin oranı ve aşınma döngünün artışı ile aşınma yüzdelerinin değişimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. En yüksek aşınma değerine %10 metakaolin içeriğine sahip numune, en düşük aşınma değerine %100 YFC içeriğine sahip numunede elde edilmiştir. Tüm kür şartları beraber değerlendirildiğinde %100 YFC kullanılarak üretilen alkali aktivasyonlu betonların aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu ve sıcak su kürü uygulanan numunelerin aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Aşınma değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Su kürü (60 °C) ile kürlenmiş alkali aktivasyonlu betonların aşınma ve basınç dayanım değerlerinin diğer kür şartlarına göre daha yüksek olduğu ve dayanım gelişimine katkı sağladığı görülmektedir.



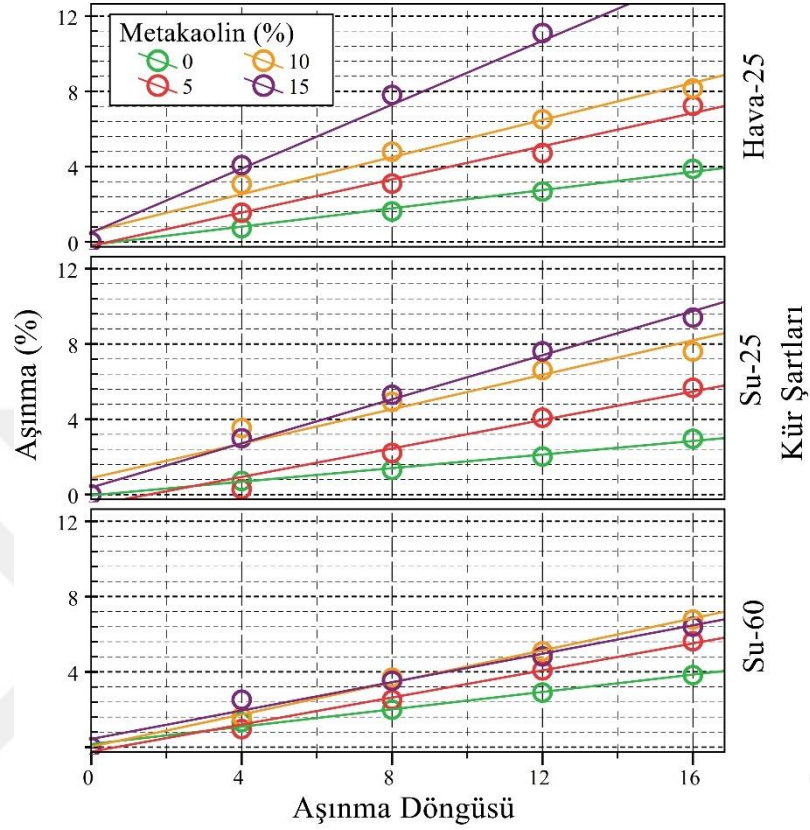
Şekil 3.9. Farklı metakaolin oranlarına sahip olan su kürü (60 °C) numunelerinin aşınma değerleri.

Tüm serilerde genel olarak aşınma kayıplarının artışı ile aşınma döngüsü arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Grafikler incelendiğinde (Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9) En fazla aşınma kaybı hava kürü ile dayanım kazanan numunelerde gözlemlenmiştir. En az aşınma kaybı ise sıcak su küründe dayanım kazanan numunelerden elde edilmiştir. Aşınma kayıpları başlangıçta çok küçük değerler almış, aşınma döngüsünün artışı ile kayıp yüzdeleri artmıştır. Aşınmaya karşı en yüksek direnç gösteren numunelerde aşınma kayıpları en çok %4 civarında gerçekleşmiştir.

Genel olarak %100 İÖYFC içeren numunelerdeki aşınma miktarının metakaolin içeren numunelere göre daha düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir. Metakaolin oranının artışı ile aşınma yüzdelerindeki artış arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir.

Farklı karışım oranlarına sahip alkali aktivasyonlu betonların aşınma kaybı ve aşınma döngüsü arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla Şekil 3.10'daki saçılma grafiği oluşturulmuştur. Tüm veriler dikkate alınarak farklı kür ve karışım özelliklerine sahip numunelerden yararlanılarak aşınma yüzdesi ve aşınma döngüsü arasındaki ilişki Şekil

3.10'da görülmektedir. Tüm kür şartları ve karışım oranları kendi içerisinde değerlendirildiğinde yüksek oranda pozitif doğrusal determinasyon katsayısı (Değişim aralığı: $r^2 = 0.943-0.997$) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.10. Metakaolin içeren alkali aktivasyonlu betonların regrasyon analizi.

Determinasyon katsayısı (r^2) 0,90 değerinden yüksek olduğundan aşınma direnci ile aşınma çevrimi arasında çok yüksek bir ilişki elde edilmiştir. Bu durum üretilen numunelerin homojen bir karışıma sahip olduğu ve gerçekleştirilen deneysel çalışmanın her aşamasında karışımı oluşturan malzemelerin iyi bir dağılıma sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

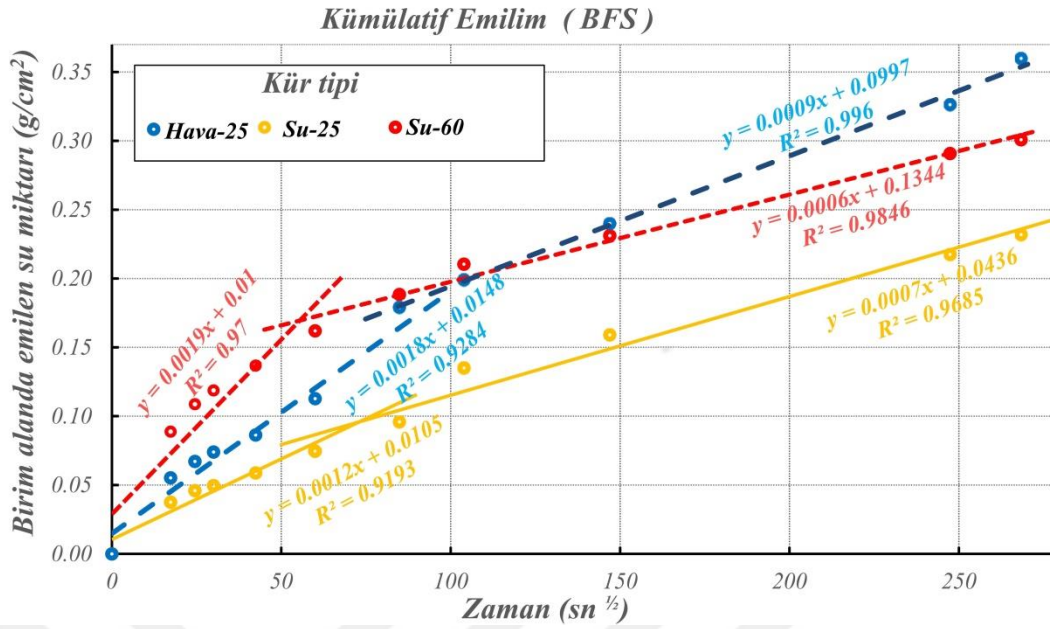
Çizelge 3.1. Metakaolin içeren numunelere ait denklemler ve r^2 değerleri.

Numune Kodu	Kür Şartları (°C)	Denklem	R^2
YFC-A25	Hava (25)	$Y=-0,16+0,24x$	0,991
YFC-W25	Su (25)	$Y=-0,04+0,18x$	0,993
YFC-W60	Su (60)	$Y=0,16+0,23x$	0,990
M5-A25	Hava (25)	$Y=-0,21+0,44x$	0,988
M5-W25	Su (25)	$Y=-0,58+0,38x$	0,963
M5-W60	Su (60)	$Y=-0,24+0,36x$	0,993
M10-A25	Hava (25)	$Y=0,56+0,49x$	0,980
M10-W25	Su (25)	$Y=0,88+0,46x$	0,943
M10-W60	Su (60)	$Y=0,03+0,43x$	0,997
M15-A25	Hava (25)	$Y=0,5+0,85x$	0,991
M15-W25	Su (25)	$Y=0,38+0,59x$	0,992
M15-W60	Su (60)	$Y=0,43+0,38x$	0,976

Üretilen numunelerin test sonuçlarının kullanılması ile elde edilen saçılma grafiklerinden elde edilen denklemler ve r^2 değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. En yüksek ilişki M10-W60 kodlu numuneden elde edilmiştir. Genel olarak aşınma yüzdelерinin aşınma döngüsü ile değişimi arasında güçlü bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

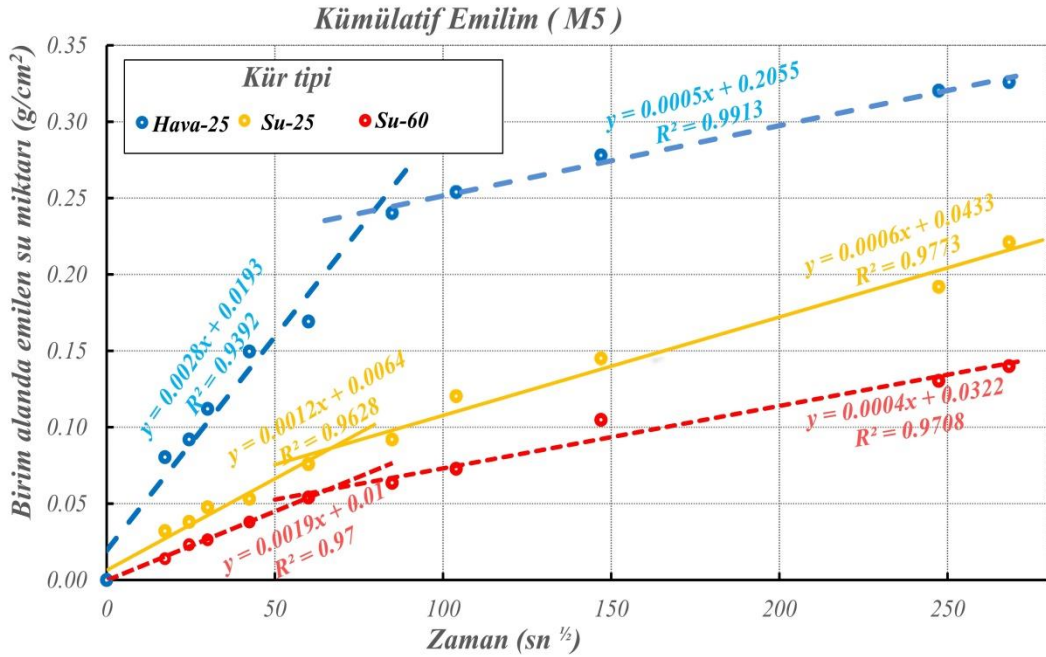
3.1.3. Kılcal Su Emme Deney Sonuçları

Çok küçük çaplı boşluklar için su kılcallık etkisi ile yükselir. Özellikle donma-çözülme etisine maruz kalan malzemelerde, kapillarite ile emilen su donma-çözülme çevrimin tekrarı ile malzemede hasara yol açar. Bu nedenle su emme kapasitesi ve miktarı önemlidir. Bu çalışmada alkali aktivasyonlu betonda bulunan kapiler boşluklarda absorbe edilen su miktarının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, çalışma kapsamında gerçekleştirilen diğer malzeme özellikleri değerlendirilmiştir.



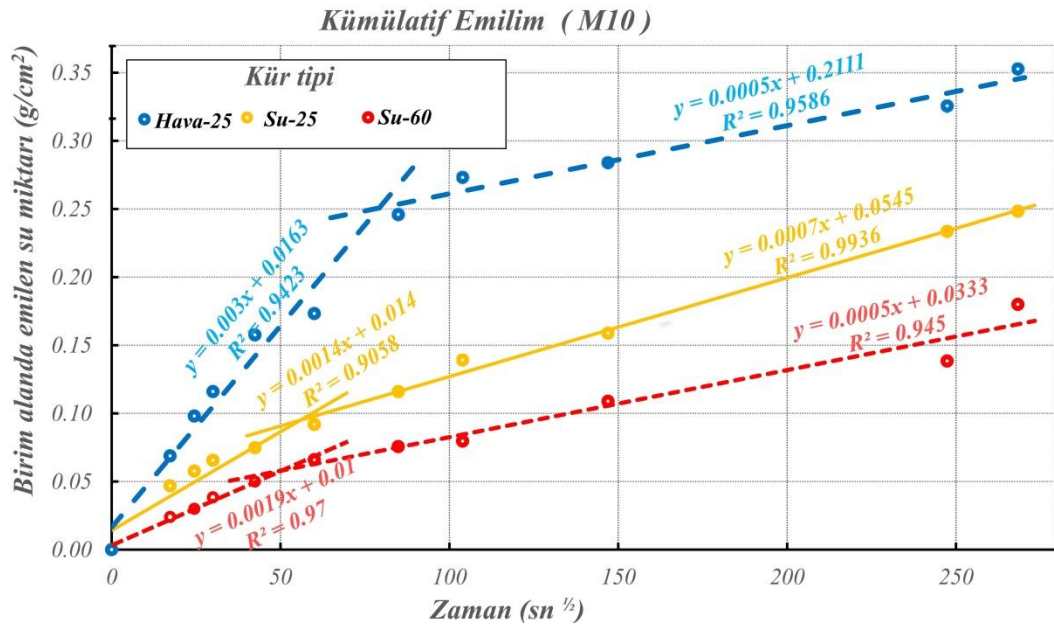
Şekil 3.11. Kapiler su emme deney sonuçları (YFC).

Deneyin 1. kısmında %100 YFC içerikli numunelerde en çok 60 derece su küründe kalan numuneler su emse de 2. kısımda hava ile kürlenene numuneler daha fazla su emdiği gözlenmiştir. Bu da hava ile kürlenene numunede kapiler boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir.



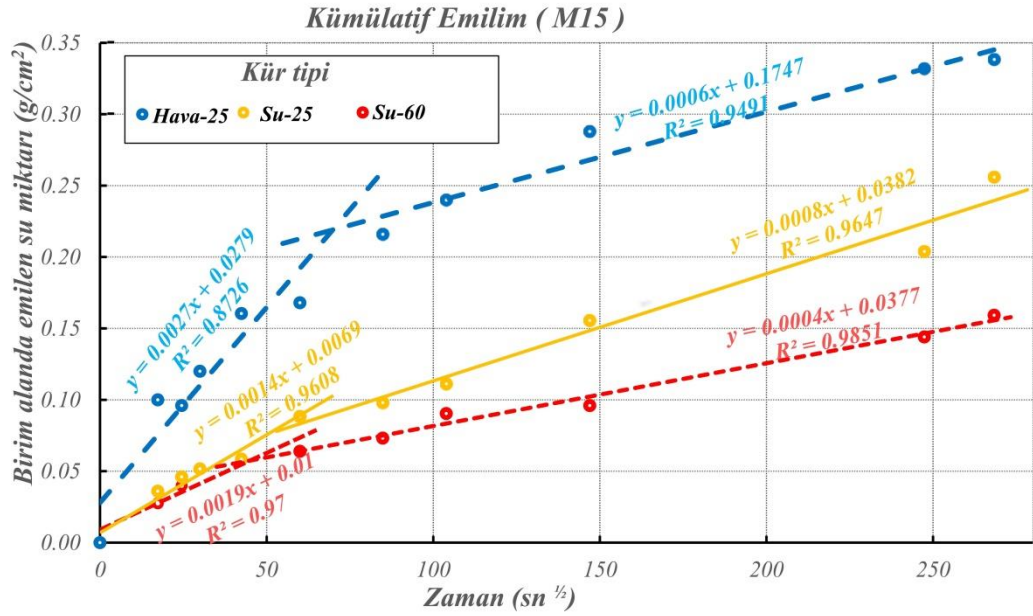
Şekil 3.12. Kapiler su emme deney sonuçları (M5).

Deneyin 1. kısmında %5 Metakaolin içerikli numunelerde en çok 25 derece hava küründe kalan numuneler su emdiği gözlenmiştir. 2. Kısımda da hava ile yine kürlenmiş numuneler daha fazla su emdiği gözlenmiştir. Bu da hava ile kürlenmiş numunede kapiler boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir. (Şekil 3.13). Bu durum yapısında bulunan kılcal boşlukların fazla olduğunu ve basınç ve aşınma dayanımında elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğunu göstermektedir. En düşük kapilarite değerleri su kürü (60 °C) uygulanan numunelerde gözlemlenmiştir. Bu durumun basınç dayanımı değeri (88 MPa) ile doğrudan ilişki olduğu, numune bünyesinde bulunan boşlukların diğer numunelere göre daha az olmasından kaynakladığı düşünülmektedir.



Şekil 3.14. Kapiler su emme deney sonuçları (M10).

Şekil 3.13 değerlendirildiğinde kür türünün kapierite katsayısı ile ilişkili sonuçlar ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Metakaolin ikamesi ile kapilarite katsayısının daha düşük değerler aldığı, fakat mineral katkı oranının dar bir aralıkta değişmesinde dolayı büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.15. Kapiler su emme deney sonuçları (M15).

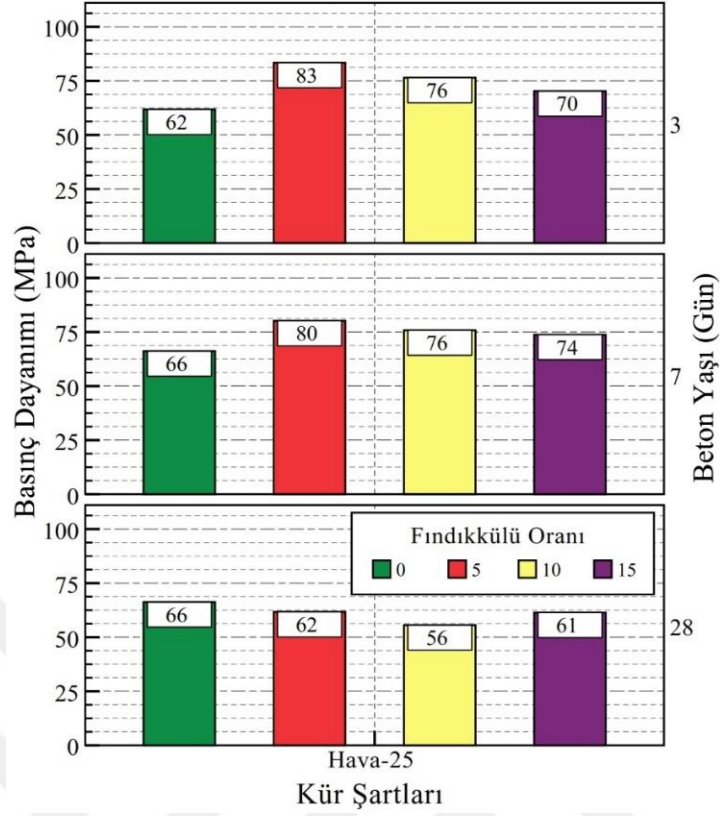
%15 Metakaolin içerikli numunelerde deneyin tamamında en çok 25 derece hava küründe kalan numuneler su emdiği gözlenmiştir. Bu da hava ile kürlen numunede kapiler boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir. 60 derecede kürlen numune ile 25 derecede kürlen numuneler 1. kısımda yakın su emme değerlerine sahip olsa da deney sonunda 60 derece suda kürlen numunenin daha az su emdiği gözlenmiştir.

3.2. FINDIK KABUĞU KÜLÜ İKAMELİ GEOPOLİMER BETON

3.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

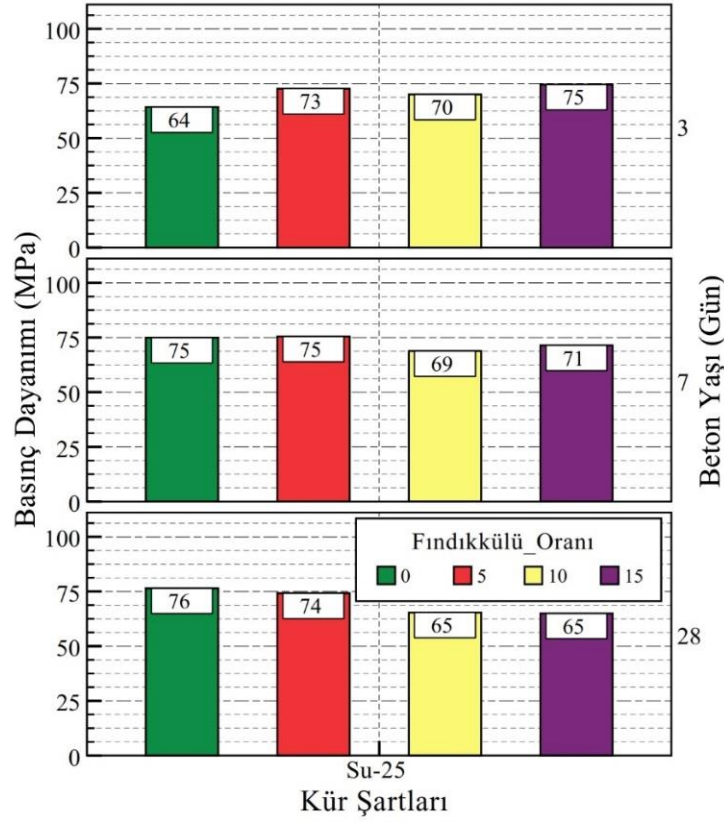
Dünya fındık üretimin yaklaşık %70'i Ülkemizde gerçekleşmektedir. Kabuklu fındığın kırılarak iç fındığa döndürülmesinde yaklaşık %50 fındık kabuk atığı oluşmaktadır. Ortaya çıkan bu tarımsal atığın kullanışlı yeni kompozit ürünleri dönüşümü çevresel ve ekonomik katkı sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında fındık kabuğu külünü alkali aktivasyonlu beton üretiminde mineral katkı olarak kullanılabilirliği karşılaştırmalı araştırılmıştır.

Fındık kabuğu külü ikamelı alkali aktivasyonlu betonların basınç dayanımları 56 MPa-83MPa aralığında değişen değerler almıştır. Mineral katkı olarak geniş bir kullanım alanına sahip metakaoline yakın değerler elde edilmesi umut vericidir.



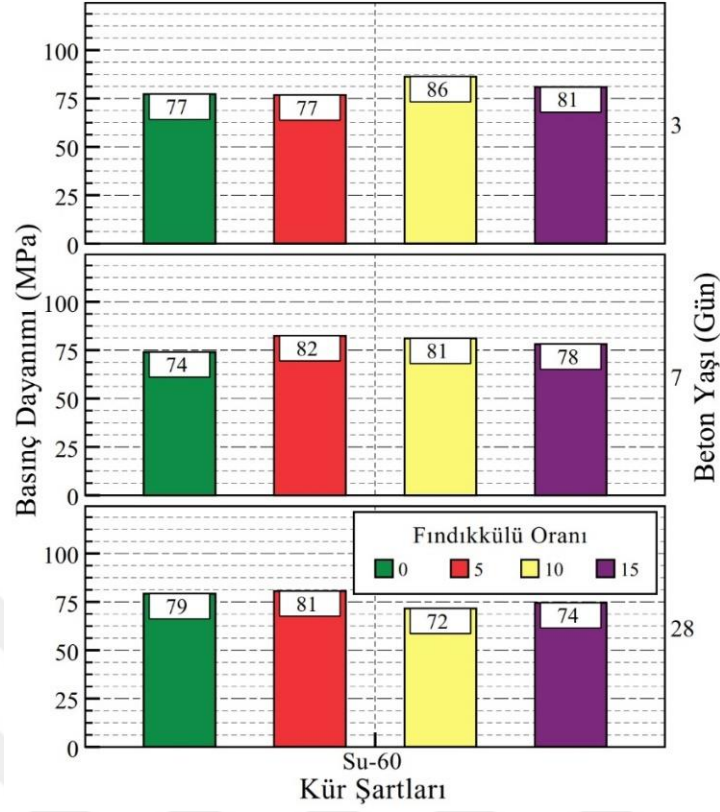
Şekil 3.16. Fındık kabuğu külü içeren hava kürü (25 °C) numunelerinin dayanım değerleri.

Genel olarak değerlendirildiğinde hava küründe (25 °C) dayanım kazanmış numunelerin kür süresinin artışı ile basınç dayanımı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 3.15). Hava küründe dayanım kazanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı (83 MPa) değerlerine %5 fındık kabuğu külü içeriğine sahip 3 günlük hava kürü uygulanmış numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük değer (56 MPa) ise %10 fındık kabuğu külü katkılı 28 günlük numunede gözlenmiştir. %100 İÖYFC içeren numunelerde ise 3. günden 7. güne yaklaşık %6 dayanım artışı 7. günden 28. güne kadar ise sabit kaldığı gözlenmiştir. Erken dayanımda (3 günlük) %100 İÖYFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde, 25 °C hava kürü koşullarında %5, %10, %15 mineral katkılı numuneler sırasıyla %34, %23, %13 daha fazla dayanıma değerine ulaşmıştır. 7 günlük dayanımlarında %100 YFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde ise sırasıyla %21, %15, %12 artış gözlenmiştir. 28 günlük dayanımda ise %100 YFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde sırayla %6, %15, %8 azalma olduğu görülmüştür.



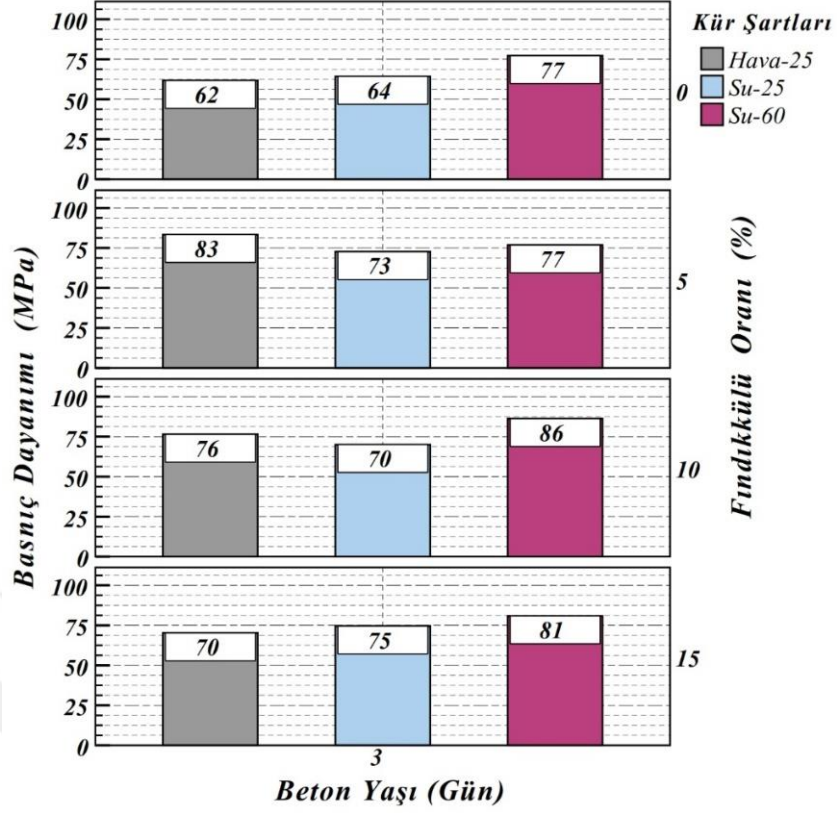
Şekil 3.17. Fındık kabuğu külü içeren su kürü (25 °C) numunelerinin dayanım değerleri.

Genel olarak su küründe (25 °C) dayanım kazanmış fındık kabuğu külü içerikli numunelerin kür süresinin artışı ile basınç dayanımı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 3.16). Su küründe (25 °C) dayanım kazanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı değerlerine (76 MPa) %100 İÖYFC içeriğine sahip 28 günlük hava kürü uygulanmış numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük değer ise %100 İÖYFC katkılı 3 günlük numunede 64 MPa dayanım gözlenmiştir. %100 YFC içeren numunelerde yaklaşık %17 dayanım artışı gözlenirken diğer numunelerde genel olarak düşüş gözlenmiştir. Erken dayanımda (3 günlük) %100 YFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde, 25 °C su küründe dayanım kazanan %5, %10, %15 mineral katkılı numuneler sırayla %14, %9, %17 daha fazla dayanıma sahiptirler. 7 günlük dayanımlarında %100 YFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde ise sırasıyla %0 artış, %8 ve %5 azalma gözlenmiştir. 28 günlük dayanımda ise %100 YFC içeren numuneler referans olarak değerlendirildiğinde sırayla %3, %12, %15 azalma olduğu görülmüştür.



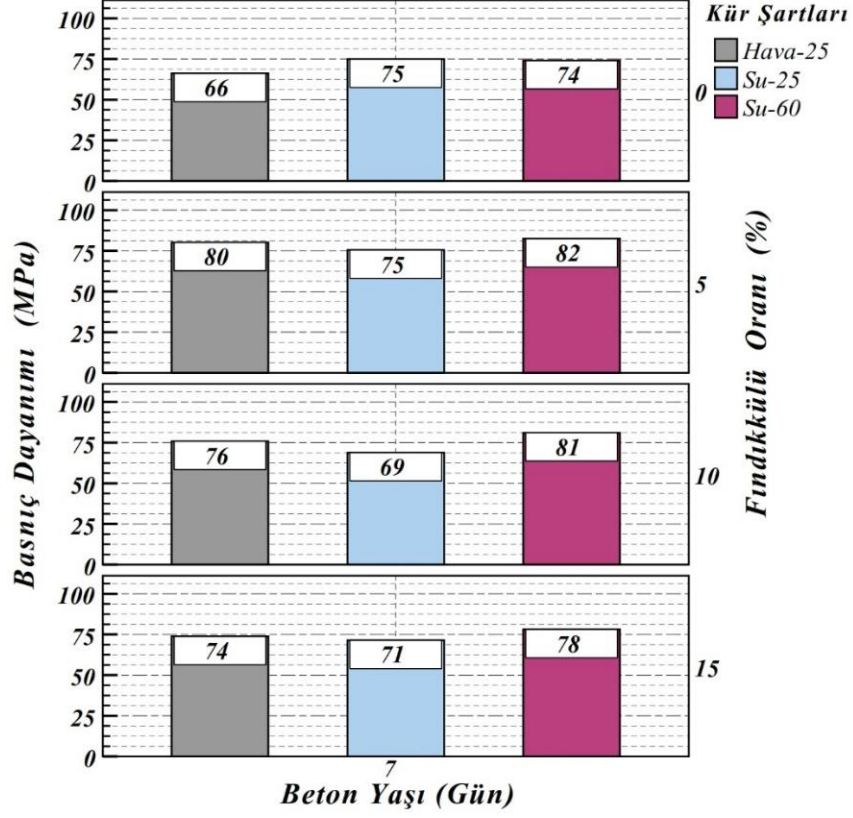
Şekil 3.18. Fındık kabuğu külü içeren su kürü (60 °C) numunelerinin dayanım değerleri.

Basınç dayanımı-kür şartları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Şekil 3.3) incelendiğinde su kürü (60 °C) uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerlerinin farklı karışım özelliklerine sahip tüm serilerde olumlu bir etki gösterdiği ve basınç dayanımı değerlerinin yüksek değerler aldığı görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı (86 MPa) değerlerine %10 fındık kabuğu külü içeren 7 günlük numunede elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı (72 MPa) ise %10 fındık kabuğu külü içeren 28 günlük numunede ölçülmüştür. %100 İÖYFC kullanılarak üretilen numuneleri referans alındığında; %5, %10, %15 fındık kabuğu külü içeren numuneler 3 günlük dayanımlarında sırayla %0, %12, %5 artış gözlenmiştir. 7 günlük numunelerde sırasıyla; %11, %9, %5 artışı gözlenmiştir. 28 günlük numunelerde ise sırasıyla; %3 artış, %8 ve %6 dayanımda düşüş gözlenmiştir. Kür sürelerinin artışına bağlı olarak ise %100 İÖYFC kullanılan numunelerdeki basınç dayanımı değerlerindeki artış sırası hava kürü (25 °C), su kürü (25 °C), ve sıcak su kürü (60 °C) şeklinde gerçekleşmiştir.



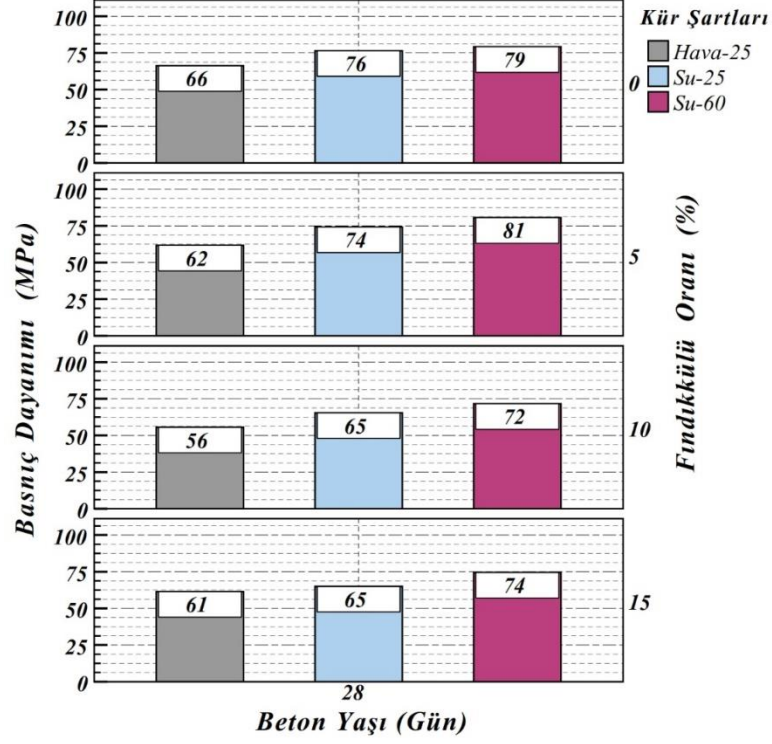
Şekil 3.19. Fındık kabuğu külü içeren numunelerin beton yaşı (3 gün)-dayanım ilişkisi.

Genel olarak Şekil 3.4 incelendiğinde 3 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı (86 MPa) değerine %10 fındık kabuğu külü içeriğine sahip sıcak su kürü (60 °C) uygulanmış numunede görülmüştür. En düşük dayanım ise (62 MPa) ile %0 fındık kabuğu külü (%100 İÖYFC) oranı ile 25 °C hava küründe bekletilen numunelerde görülmüştür. 3 günlük numunelerde kür koşulları karşılaştırıldığında genel olarak en yüksek dayanımlar 60 °C su küründe bekletilen numunelerde görülmüştür. %100 İÖYFC kullanılan numuneler referans olarak alınarak hava-25, Su-25 ve su-60 kür koşullarında sırasıyla %5 fındık kabuğu külü içerikli numunelerde, %34, %14, %0 artış, %10 fındık kabuğu külü içerikli numunelerde; %23, %9, %12 artış, %15 fındık kabuğu külü içerikli numunelerde; %13, %17, %5 artış göstermiştir.



Şekil 3.20. Fındık kabuğu külü içeren numunelerin beton yaşı (7 gün)-dayanım ilişkisi.

Farklı fındık kabuğu külü içeriğine sahip tüm numuneler 7 günlük kür süresi sonunda değerlendirildiğinde (Şekil 3.5) en yüksek basınç dayanımı (82 Mpa) değerine %5 fındık kabuğu külü içeriğine sahip sıcak su (60 °C) kürü uygulanmış numuneler ulaşmıştır. En düşük dayanım ise 25 °C hava koşullarında kürlenmiş numunelerde 66 MPa olarak gözlenmiştir. Referans numuneye göre, hava-25, Su-25 ve su-60 kür koşullarında sırasıyla %5 fındık kabuğu külü içerikli numuneler; %21, %0, %11 artış, %10 fındık kabuğu külü içerikli numuneler; %15 artış, %8 azalma, %9 artış, %15 fındık kabuğu külü içerikli numuneler; %12 artış, %5 azalma, %5 artış görülmüştür.



Şekil 3.21. Fındık kabuğu külü içeren numunelerin beton yaşı (28 gün)-dayanım ilişkisi.

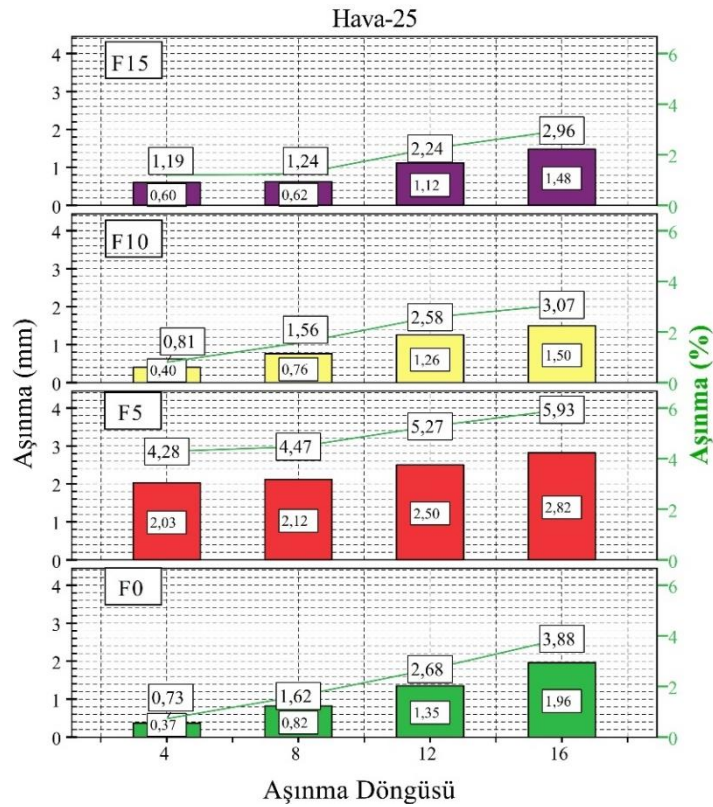
Farklı fındık kabuğu külü içeriğine sahip tüm numuneler 28 günlük kür süresi sonunda değerlendirildiğinde (Şekil 3.5) en yüksek basınç dayanımı (81 Mpa) değerine %5 fındık kabuğu külü içeriğine sahip sıcak su (60 °C) kürü uygulanmış numuneler ulaşmıştır. En düşük dayanım ise 25 °C hava koşullarında kürlenen %10 fındık kabuğu külü içerikli numunelerde 56 MPa olarak gözlenmiştir.

Referans numuneye göre, hava-25, Su-25 ve su-60 kür koşullarında sırasıyla %5 fındık kabuğu külü içerikli numuneler; %6 ve %3 azalma, %3 artış, %10 fındık kabuğu külü içerikli numuneler; %15, %14 artış ve %8 düşüş, %15 fındık kabuğu külü içerikli numuneler; %8, %14, %6 düşüş görülmüştür.

Genel olarak hava kürü uygulanan numuneler diğerlerine nazaran daha düşük dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Su kürünün dayanım gelişimine olumlu katkı sağladığı ve su kürü sıcaklığının artışı ile dayanım gelişiminin ilerleyen yaşlarda gelişim gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç metakaolin katkılı gepolimer betonlardan elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir.

3.2.2. Aşınma Dayanımı Sonuçları

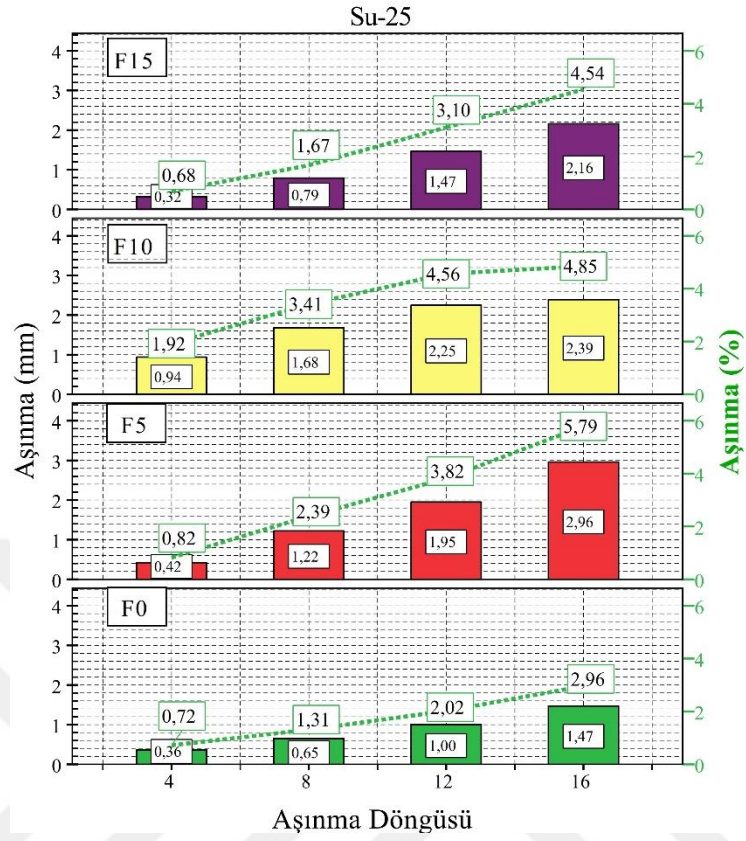
Aşınma etkisi inşaat sektöründe özellikle sürtünme etkisinde kalan hafif yaya ve araç trafiğinin olduğu alanlarda, cephe kaplamalarında, zemin kaplamalarında, kaldırımlarda yollarda önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada aşınma kayıpları-ve aşınma döngüsü arasındaki ilişki 28 günlük kür uygulanan alkali aktivasyonlu beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22’de incelendiğinde fındık kabuğu külü oranının artışı ile aşınma değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. En düşük aşınma kaybı %15 kül oranına sahip numunelerden elde edilmiştir. Bu değer yaklaşık %3 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum metakaolin ikameli betonlara kıyasla farklı sonuçlar ortaya koymaktadır.



Şekil 3.22. Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip, hava kürü (25 °C) numunelerinin aşınma değerleri.

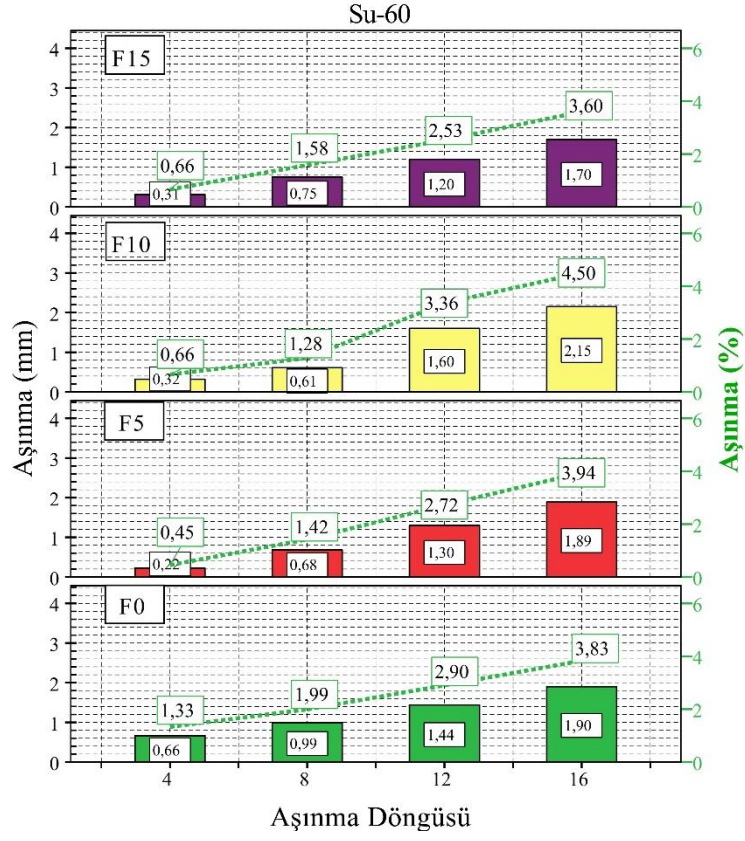
Birbirinden farklı oranlarda fındık kabuğu külü içeren numuneler, su kürü (25 °C) sonrasında gerçekleştirilen aşınma deneyinde aşınma kayıplarının aşınma döngüsü ile değişiminin doğrusal olduğu Şekil 3.23’de görülmektedir. Aşınmaya karşı en yüksek dirence sahip alkali aktivasyonlu betonların %15 fındık kabuğu külü içeriğine sahip numuneler olduğu ve aşınma kayıplarının yaklaşık %3 olarak gerçekleştiği

belirlenmiştir.



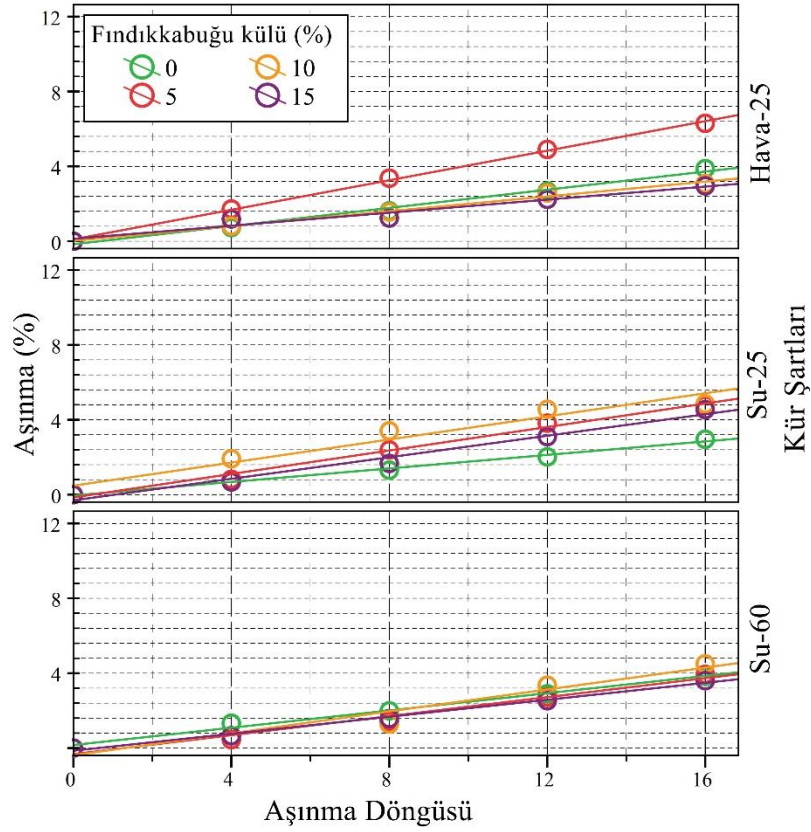
Şekil 3.23. Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip, su kürü (25 °C) numunelerinin aşınma değerleri.

Şekil 3.24 incelendiğinde %100 YFC içeriğe sahip betonların aşınma kayıpları mineral katkı içeriğine sahip numunelere göre daha yüksek değerler aldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24. Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip, su kürü (60 °C) numunelerinin aşınma değerleri.

Genel olarak tüm kür şartlarında fındık kabuğu külünün aşınma dayanımı üzerine olumlu katkı sağladığı ve aşınma kayıplarını azaltarak aşınma direncini arttırdığı görülmüştür (Şekil 3.24). Böhme aşınma deneyi sonucunda sıcak su kürü uygulanan numunelerde en az aşınma yüzdesi %15 mineral katkı içeriğine sahip alkali aktivasyonlu betonlardan elde edilmiştir.



Şekil 3.25. Fındık kabuğu külü içeren alkali aktivasyonlu betonların regrasyon analizi.

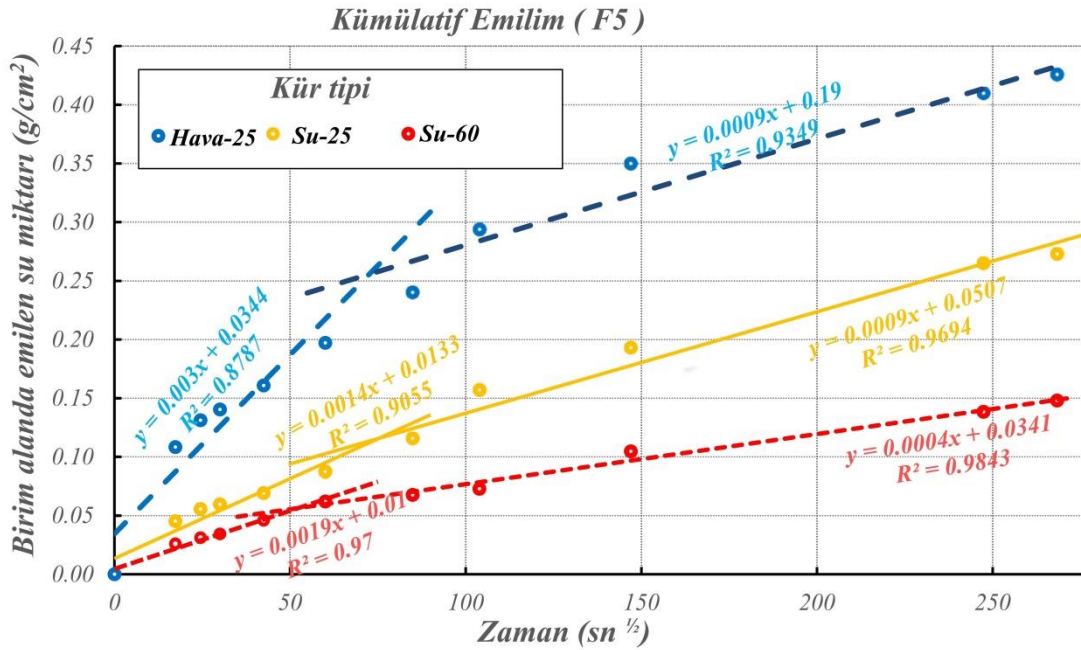
Farklı fındık kabuğu külü oranlarına sahip alkali aktivasyonlu beton karışımlar üzerinde yapılan böhme aşınma deney sonuçlarından yararlanılarak elde edilen aşınma kaybı ve aşınma döngüsü arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla Şekil 3.25'deki saçılma grafiği oluşturulmuştur. Tüm karışımlar ve kür şartları kendi içerisinde değerlendirildiğinde yüksek oranda pozitif doğrusal determinasyon katsayısı (Değişim aralığı: $r^2 = 0.941-0.998$) olduğu belirlenmiştir. Determinasyon katsayısı genel olarak (r^2) 0,90 değerinden yüksek olduğundan aşınma direnci ile aşınma çevrimi arasında çok yüksek bir ilişki olduğu saptanmıştır.

Çizelge 3.2. Fındık kabuğu külü içeren numunelere ait denklemler ve r^2 değerleri.

Numune Kodu	Kür Şartları (°C)	Denklem	R^2
YFC-A25	Hava (25)	$Y=-0,16+0,24x$	0,991
YFC-W25	Su (25)	$Y=-0,04+0,18x$	0,993
YFC-W60	Su (60)	$Y=0,16+0,23x$	0,990
H5-A25	Hava (25)	$Y=0,16+0,24x$	0,998
H5-W25	Su (25)	$Y=-0,15+0,31$	0,990
H5-W60	Su (60)	$Y=-0,32+0,25x$	0,973
H10-A25	Hava (25)	$Y=0,02+0,20x$	0,992
H10-W25	Su (25)	$Y=0,48+0,31x$	0,941
H10-W60	Su (60)	$Y=-0,38+0,29x$	0,950
H15-A25	Hava (25)	$Y=0,13+0,17x$	0,955
H15-W25	Su (25)	$Y=-0,30+0,29x$	0,979
H15-W60	Su (60)	$Y=-0,14+0,23x$	0,993

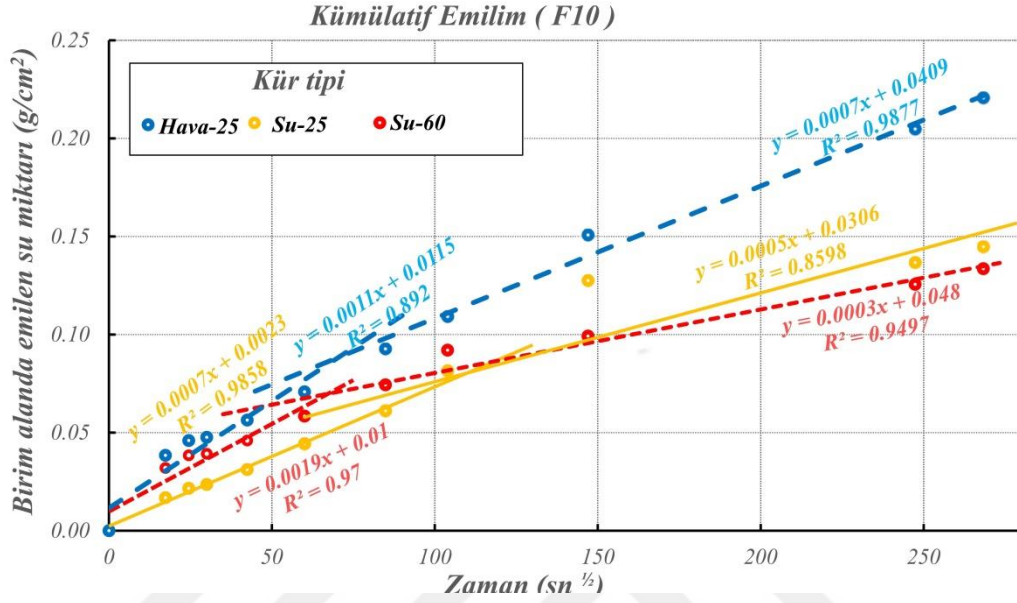
3.2.3. Kapilarite Deney Sonuçları

Kapiler su emme deney sonuçları incelendiğinde metakaloin katkıli alkali aktivasyonlu betonlara benzer şekilde fındık kabuğu külü ile üretilen betonlardan elde edilen verilerde basınç dayanımı değerleri ile ilişki olduğu görülmüştür.



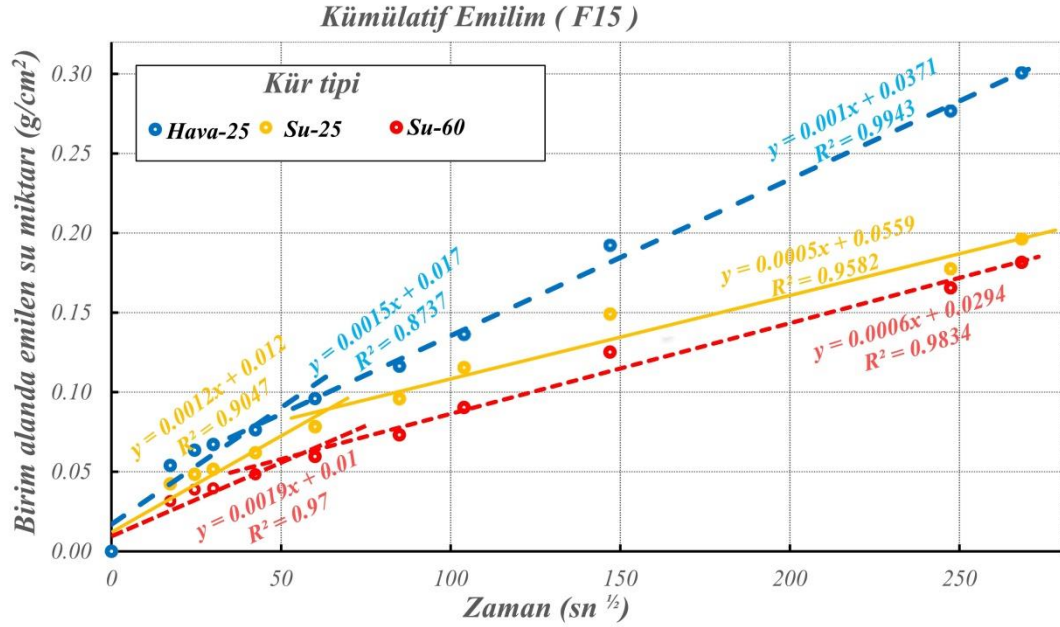
Şekil 3.26. Kapiler su emme deney sonuçları (F5).

Şekil 3.25 incelendiğinde %5 Fındık kabuğu külü içerikli numunelerde deneyin tamamında en çok 25 derece hava küründe kalan numuneler su emdiği gözlenmiştir. Bu da hava ile kürlen numunede kapiler boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir. En az su emme ise 60 derecede kürlen numune de gözlenmiştir.



Şekil 3.27. Kapiler su emme deney sonuçları (F10).

Şekil 3.26 incelendiğinde %10 Fındık kabuğu külü içerikli numunelerde deneyin tamamında en çok 25 derece hava küründe kalan numuneler su emdiği gözlenmiştir. Birinci kısımda kapiler boşluklar tüm kür koşullarında yakın su emme gösterirken, ikinci kısımda doygunluğa erken ulaşan 25 derece ve 60 derece su kürlerine nazaran 25 derece hava kürü daha çok su emdiği gözlenmiştir. Bu da hava ile kürlen numunede kapiler boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.28. Kapiler su emme deney sonuçları (F15).

%15 Fındık kabuğu külü içerikli numunelerde deneyin tamamında en çok 25 derece hava küründe kalan numuneler su emdiği gözlenmiştir. Bu da hava ile kürlenmiş numunede kapiler boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir. Deneyin başında tüm kür koşullarındaki numunelerin su emme değeri birbirine yakın olsa da deney sonucunda 60 derece suda kürlenmiş numunenin en az su emdiği dolayısıyla daha az kapiler boşluk oluştuğu gözlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında çimento kullanılmadan alkali aktivasyonlu betonlar üretilmiştir. Farklı karışım özelliklerine sahip numuneler hava su ve sıcak su kürü etkisine maruz bırakılmıştır. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve 28 günlük numuneler üzerinden gerçekleştirilen kapiler su emme ve böhme aşınma deneyi verileri istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- En yüksek basınç dayanımı değeri 89 MPa olarak elde edilmiştir.
- Hava küründe dayanım kazanan numuneler beton yaşı artışıyla ters orantılı olarak dayanım değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir.
- Tüm kür şartları beton yaşına bağlı olarak değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımı değerleri sıcak su kürü (60°C) uygulanan numunelerde elde edilmiştir.
- Sıcak su kürü uygulanan tüm karışımlarda beton yaşının artışı ile dayanım değerlerinde artış gerçekleşmiştir.
- %100 İÖYFC içeren alkali aktivasyonlu beton numuneler beton yaşının ve kür sıcaklığının artışıyla dayanım değerlerinde artış gerçekleşmiştir.
- Genel olarak aşınma kayıplarının artışı ile aşınma döngüsü arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.
- En fazla aşınma kaybı hava kürü ile dayanım kazanan numunelerde görülmüştür.
- Aşınma kayıpları başlangıçta çok küçük değerler almış, aşınma döngüsünün artışı ile kayıp yüzdeleri artmıştır.
- Aşınmaya karşı en yüksek direnç gösteren fındık kabuğu külü ikmali numunelerde aşınma kayıpları maksimum %3,60 civarında gerçekleşmiştir.
- Genel olarak %100 İÖYFC içeren numunelerdeki aşınma direncinin metakaolin içeren karışım özelliklerine sahip betonlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Tüm karışım oranlarında aşınma kayıpları ve aşınma döngüsü arasında çok güçlü bir ilişki olduğu ve r^2 değerlerinin 1'e çok yakın değerler aldığı görülmüştür.

- Alkali aktivasyonlu beton numunelerin yoğunluk değerleri değişim aralığı 2250 kg/m³ – 2420 kg/m³ arasında geręekleşmiştir.



5. KAYNAKLAR

- [1] Ü. Yurt, "High performance cementless composites from alkali activated GGBFS," *Construction and Building Materials*, c. 264, ss. 120-222, 2020.
- [2] Y. Ding, J. G. Dai, ve C. J. Shi, "Mechanical properties of alkali activated concrete: A state of the art review," *Construction and Building Materials*, c. 127, ss. 68-79, 2016.
- [3] R. J. Thomas, ve S. Peethamparan, "Alkali activated concrete: Engineering properties and stress strain behavior," *Construction and Building Materials*, c. 93, ss. 49-56, 2015.
- [4] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, ve Y. B. Cheng, "Resistance of alkali activated slag concrete to acid attack," *Cement and Concrete Research*, c. 33, sayı 10, ss. 1607-1611, 2003.
- [5] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, ve Y. B. Cheng, "Effect of admixtures on properties of alkali activated slag concrete," *Cement and Concrete Research*, c. 30, sayı 9, ss. 1367-1374, 2000.
- [6] F. G. Collins, ve J. G. Sanjayan, "Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete," *Cement and Concrete Research*, c. 29, sayı 3, ss. 455-458, 1999.
- [7] D. Xuan, P. Tang, ve C. S. Poon, "MSWIBA-based cellular alkali activated concrete incorporating waste glass powder," *Cement and Concrete Composites*, c. 95, ss. 128-136, 2019.
- [8] R. J. Thomas, D. Lezama, ve S. Peethamparan, "On drying shrinkage in alkali activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing," *Cement and Concrete Research*, c. 91, ss. 13-23, 2017.
- [9] N. K. Lee, ve H. K. Lee, "Setting and mechanical properties of alkali activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature," *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 1201-1209, 2013.
- [10] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, ve C. D. Atış, "The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer," *Construction and Building Materials*, c. 264, sayı 120268, 2020.
- [11] Ü. Yurt, "An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers," *Journal of Building Engineering*, c. 32, sayı 101519, 2020.
- [12] T. S. Keertan, J. Bommisetty, A. Ravi Theja, ve K. Mahendra, "Experimental investigation on improving properties of concrete with OPC as geopolymer

- binder," *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [13] G. Mathew, ve B. M. Issac, "Effect of molarity of sodium hydroxide on the aluminosilicate content in laterite aggregate of laterised geopolymer concrete," *Journal of Building Engineering*, c. 32, sayı 101486, 2020.
- [14] R. R. Bellum, K. Muniraj, C. S. Reddy Indukuri, ve S. R. Chand Madduri, "Investigation on Performance Enhancement of Fly ash-GGBFS Based Graphene Geopolymer Concrete," *Journal of Building Engineering*, sayı 101659, 2020.
- [15] Z. Cheng, R. Zhao, Y. Yuan, F. Li, A. Castel, ve T. Xu, "Ageing coefficient for early age tensile creep of blended slag and low calcium fly ash geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, c. 262, sayı 119855, 2020.
- [16] S. Mesgari, A. Akbarnezhad, ve J. Z. Xiao, "Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties," *Construction and Building Materials*, c. 236, sayı 117571, 2020.
- [17] P. Saranya, P. Nagarajan, ve A. P. Shashikala, "Behaviour of GGBS-dolomite geopolymer concrete short column under axial loading," *Journal of Building Engineering*, c. 30, sayı 101232, 2020.
- [18] L. N. Assi, K. Carter, E. Deaver, ve P. Ziehl, "Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete," *Journal of Cleaner Production*, c. 263, sayı 121477, 2020.
- [19] K. H. Yang, J. K. Song, ve K. I. Song, "Assessment of CO2 reduction of alkali activated concrete," *Journal of Cleaner Production*, c. 39, ss. 265-272, 2013.
- [20] İ. İ. Atabey, "F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması," Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi, Türkiye, 2019.
- [21] Cembureau The European Cement Association, "Activity Report," Belçika, Rap. D/2020/5457, 2019.
- [22] Y. Köleli, "Tr 63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu 2015," Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, Türkiye, Rap. 1, 2015.
- [23] C. D. Consultants, *The ICR handbook on Global Cement Trade and Distribution*, 1. baskı, Tradeship Yayıncılık, 2014, 4.1, 40-43.
- [24] I. E. Agency (2020, 15 Ağustos) *Material efficiency in clean energy transitions* [Online] Erişim: <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>.
- [25] C. Bilim, "Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği," Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2006.
- [26] S. Aydın, "Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit

- geliştirilmesi," Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2010.
- [27] İ. B. Topçu, ve M. U. Toprak, "Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi," *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, c. 22, no. 2, ss. 153-164, 2009.
- [28] A. Yakupoğlu, "Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların özellikleri," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2010.
- [29] J. Wang, E. Liu, ve L. Li, "Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials," *Journal of Cleaner Production*, c. 220, ss. 235-252, 2019.
- [30] M.-H. Zhang, ve V. M. Malhotra, "High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material," *Materials Journal*, c. 93, ss. 629-636, 1996.
- [31] Ş. Yazıcı, A. Didem, ve H. Ş. Arel, "Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi," *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 25, sayı 2, ss. 13-24, 2010.
- [32] B. B. Sabir, S. Wild, ve J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review," *Cement and Concrete Composites*, c. 23, sayı 6, ss. 441-454, 2001.
- [33] N. M. Al-Akhras, "Durability of metakaolin concrete to sulfate attack," *Cement and Concrete Research*, c. 36, sayı 9, ss. 1727-1734, 2006.
- [34] R. Siddique, ve J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Applied Clay Science*, c. 43, sayı 3, ss. 392-400, 2009.
- [35] J. M. Khatib, ve R. M. Clay, "Absorption characteristics of metakaolin concrete," *Cement and Concrete Research*, c. 34, sayı 1, ss. 19-29, 2004.
- [36] K. A. Gruber, T. Ramlochan, A. Boddy, R. D. Hooton, ve M. D. A. Thomas, "Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin," *Cement and Concrete Composites*, c. 23, sayı 6, ss. 479-484, 2001.
- [37] J.-T. Ding, ve Z. J. M. J. Li, "Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete," c. 99, sayı 4, ss. 393-398, 2002.
- [38] C. S. Poon, L. Lam, S. C. Kou, Y. L. Wong, ve R. Wong, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes," *Cement and Concrete Research*, c. 31, no. 9, ss. 1301-1306, 2001.
- [39] J. J. Brooks, ve M. A. Megat Johari, "Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete," *Cement and Concrete Composites*, c. 23, sayı 6, ss. 495-502, 2001.
- [40] Z. Qin, C. Ma, Z. Zheng, G. Long, ve B. Chen, "Effects of metakaolin on properties and microstructure of magnesium phosphate cement," *Construction and*

Building Materials, c. 234, sayı 117353, 2020.

- [41] R. Muduli, ve B. B. Mukharjee, "Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach," *Construction and Building Materials*, c. 233, sayı 117223, 2020.
- [42] J. Salimi, A. M. Ramezaniyanpour, ve M. J. Moradi, "Studying the effect of low reactivity metakaolin on free and restrained shrinkage of high performance concrete," *Journal of Building Engineering*, c. 28, sayı 101053, 2020.
- [43] R. Yalçın, "Fındık, fıstık ve kayısı çekirdeği kabuğu tozları ile küllerinin karakterizasyonu ve kompozit özelliklerinin belirlenmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, Batman Üniversitesi, Batman, 2020.
- [44] D. B. Dittenber, ve H. V. S. GangaRao, "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 43, sayı. 8, ss. 1419-1429, 2012.
- [45] E. Z. Hoşgün, ve B. Bozan, "Düşük Sıcaklık Düşük Zaman Alkali Ön İşlemlerin Fındık Kabuğunun Bileşimi ve Enzimatik Hidroloji Üzerine Etkisinin İncelenmesi," *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 32, sayı. 2, 2017.
- [46] S. Bülbül, "Doğal Atık Malzemelerle Yeni NBR Bazlı Bileşiklerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu," *BSEU Journal of Science* c. 6, ss. 42-49, 2019.
- [47] K. Yıldırım, M. Sümer, ve S. Subaşı, "Hafif beton üretiminde granüle edilmiş fındık kabuğunun kullanılabilirliğinin araştırılması," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, c. 5, no. 2, ss. 501-511, 2018.
- [48] A. Demirbaş, ve A. Aslan, "Effects of ground hazelnut shell, wood, and tea waste on the mechanical properties of cement 2," *Cement and Concrete Research*, c. 28, sayı. 8, ss. 1101-1104, 1998.
- [49] B. J. B. Çuhadaroğlu, ve Environment, "Thermal conductivity analysis of a briquette with additive hazelnut shells," *Building and Environment*, c. 40, sayı. 7, ss. 942-948, 2005.
- [50] Y. Baran, H. S. Gökçe, ve M. Durmaz, "Physical and mechanical properties of cement containing regional hazelnut shell ash wastes," *Journal of Cleaner Production*, c. 259, sayı 120965, 2020.
- [51] H. Kumaş, "Bitkisel atık küllerinin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilimdalı, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ 2019.
- [52] Y. Ümit, B. Dündar, ve E. Çınar, "Jeopolimer Betonlarda Sülfürik Asit Etkisinin Araştırılması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, no. 2, ss. 1548-1561.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Fatih BEKAR
Doğum Tarihi ve Yeri : 17/09/1993 Kdz.Ereğli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : fbekar67@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2020
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Sakarya Üniversitesi	2015
Lise		Kdz. Ereğli Anadolu Lisesi	2011

YAYINLAR

Ü. Yurt & F. Bekar, "Farklı Kür ve Karışım Özelliklerine Sahip Geopolimer Betonların Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması," 3rd International Engineering Research Sempozyumu'nda sunuldu, Düzce, 2019.