

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAŞIYICI HAFİF BETONLARDA GERİ KAZANILMIŞ AGREGA, METAKAOLİN
VE UÇUCU KÜL KULLANIMININ BETONLARIN PERFORMANSI ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Sinan OKUYAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Doç. Dr. H. Alperen BULUT
Dr. Öğr. Üyesi Memduh NAS
Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Sinan OKUYAN]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL danışmanlığında, Sinan OKUYAN tarafından hazırlanan bu çalışma 25/06/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. H. Alperen BULUT İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Memduh NAS İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL İmza:

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunun / / 2026 tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Taşıyıcı hafif betonlarda geri kazanılmış agrega, metakaolin ve uçucu kül kullanımının betonların performansı üzerine etkisinin incelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 25/06/2026

(İmza)

Sinan OKUYAN

ÖZET

TAŞIYICI HAFİF BETONLARDA GERİ KAZANILMIŞ AGREGA, METAKAOLİN VE UÇUCU KÜL KULLANIMININ BETONLARIN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Sinan OKUYAN

Yüksek Lisans Tezi

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

2026, 70 sayfa

Bu araştırmada, doğal perlit agregası (DPA) ile üretilen hafif betonlarda geri kazanılmış agrega (GKA) ikamesinin ve uçucu kül (UK) ile metakaolin (MK) mineral katkılarının çimento yerine kullanımının betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri ile yüksek sıcaklık altındaki performanslarına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, DPA tüm agrega fraksiyonlarında (iri ve ince aynı zamanda) GKA ile %0, %20 ve %40 oranında ikame edilmiştir. Her bir GKA ikame oranına sahip betonlar, mineral katkı içermeyen, %10 UK ikameli, %10 MK ikameli ve %10 UK + %10 MK ikameli olmak üzere dört farklı içerikte üretilmiştir. Üretilen betonlarda; birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kılcallık, su emme ve elektriksel özdirenç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca betonların yüksek sıcaklık altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklığa tabi tutulan beton numunelerde ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları bulunmuş, ayrıca görsel değerlendirmeler yapılmıştır. Hafif betonlarda GKA kullanım oranının artması mekanik özellikleri, durabilite özelliklerini ve yüksek sıcaklık direncini olumsuz yönde etkilemiştir. Fakat kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ve mineral katkı kullanımı bu olumsuz etkileri büyük ölçüde telafi etmiştir. GKA kullanımı mekanik özelliklerde bir miktar düşüş oluştursa da, %20 GKA + %10 UK + %10 MK karışımı durabiliteyi artırması, atık kullanımına katkı sağlaması ve çimento tüketimini azaltması nedeniyle en dengeli seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif beton, geri kazanılmış agrega, doğal perlit agregası, metakaolin, uçucu kül, yüksek sıcaklık

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING RECYCLED AGGREGATE, METAKAOLIN AND FLY ASH ON THE PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE

Sinan OKUYAN

Master's Thesis

Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Civil Engineering

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ufuk KANDİL

2026, 70 pages

This study investigated the effects of recycled aggregate (RA) substitution and fly ash (FA) and metakaolin (MK) as cement replacements on the mechanical and durability properties of lightweight concrete produced with natural perlite aggregate (NPA), as well as their performance under high temperatures. For this purpose, NPA was replaced with RA at rates of 0%, 20%, and 40% in both coarse and fine aggregate fractions. Four different mixtures were produced for each RA content: a control mixture, 10% FA, 10% MK, and 10% FA + 10% MK. Unit weight, compressive strength, splitting tensile strength, sorptivity, water absorption and electrical resistivity tests were performed on the produced concretes. In addition, to determine the behavior of concretes under high temperatures, weight losses and compressive strength losses were determined in concrete samples subjected to temperatures of 250°C, 500°C and 750°C, and visual evaluations were also carried out. Increasing the RA content generally reduced the mechanical properties, durability performance and high-temperature resistance of the concretes. However, extending the curing period from 28 to 90 days and the use of mineral admixtures helped to compensate for these effects. Higher RA content slightly reduced mechanical properties, but the %20RA + %10FA + %10MK mix is the most balanced option as it improves durability, uses waste materials, and reduces cement use.

Keywords: Lightweight concrete, recycled aggregate, natural perlite aggregate, metakaolin, fly ash, elevated temperature

TEŞEKKÜR

Çalışmam sürecinde benden desteklerini esirgemeyen, her zorlandığım konuda bana bir ışık olan, değerli bilgi ve birikiminden yararlandığım kadar insani ilişkilerde de sonsuz desteğiyle gelişimime katkı sağlayan kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL'e en derin saygılarımla teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmam sürecinde, sağladığı katkılar için yanımda bulunan değerli ailem ve arkadaşlarıma verdikleri destekler için minnettarım.

Sinan OKUYAN

Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı	3
1.2. Araştırmanın Önemi	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Hafif Betonlar	5
2.1.1. Hafif agregalar	6
2.1.2. Hafif betonların avantajları ve dezavantajları	7
2.1.3. Hafif betonların kullanım alanları	8
2.2. Perlit	8
2.3. Geri Kazanılmış Agregalar	9
2.4. Metakaolin	11
2.5. Uçucu kül.....	13
2.6. Kaynak Özetleri.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal.....	22
3.1.1. Çimento	22
3.1.2. Uçucu kül.....	22
3.1.3. Metakaolin	23
3.1.4. Süperakışkanlaştırıcı.....	23
3.1.5. Agregalar	23
3.1.6. Su	25
3.2. Hafif beton üretimleri ve numunelerin hazırlanması.....	26
3.3. Gerçekleştirilen Deneyler	29
3.3.1. Birim ağırlık deneyi.....	29
3.3.2. Çökme deneyi	30
3.3.3. Basınç dayanımı deneyi.....	31
3.3.4. Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	32
3.3.5. Elektriksel özdirenç deneyi	33
3.3.6. Kılcallık deneyi	33
3.3.7. Su emme deneyi	35

3.3.8. Yüksek sıcaklık direncinin belirlenmesi.....	36
4. BULGULAR	37
4.1. Birim ağırlık deneyi bulguları	37
4.2. Çökme deneyi bulguları.....	37
4.3. Basınç dayanımı deneyi bulguları	38
4.4. Yarmada çekme dayanımı deneyi bulguları	38
4.5. Kılcallık deneyi bulguları	39
4.6. Elektriksel öz direnç deneyi bulguları	39
4.7. Su emme deneyi bulguları	40
4.8. Yüksek sıcaklık direnci deneyi bulguları	40
4.8.1. Basınç dayanımı kaybı deneyi bulguları	40
4.8.2. Ağırlık kaybı deneyi bulguları.....	41
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	43
5.1. Birim ağırlık	43
5.2. Basınç dayanımı	44
5.3. Yarmada çekme dayanımı	47
5.4. Kılcallık	49
5.5. Su emme	51
5.6. Öz direnç.....	53
5.7. Yüksek Sıcaklık Direnci.....	55
5.7.1. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında gözlenen basınç dayanımı kayıpları.....	55
5.7.2. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında gözlenen ağırlık kayıpları	57
5.7.3. Yüksek sıcaklık sonrası beton numunelerin görsel olarak incelenmesi	58
6. SONUÇLAR.....	60
KAYNAKÇA	62

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çimento bileşimi ve bazı özellikleri.....	22
Tablo 2. Uçucu külün bileşimi	22
Tablo 3. Metakaolinin bileşimi.....	23
Tablo 4. Üretimde kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri	25
Tablo 5. Üretilen hafif betonların karışım reçetesi (kg/m ³).....	26
Tablo 6. Birim ağırlık deney sonuçları.....	37
Tablo 7. Çökme deney sonuçları	38
Tablo 8. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	38
Tablo 9. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	39
Tablo 10. Kılcallık deney sonuçları.....	39
Tablo 11. Elektriksel özdirenç deney sonuçları.....	40
Tablo 12. Su emme deney sonuçları.....	40
Tablo 13. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanımları	41
Tablo 14. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kaybı.....	41
Tablo 15. Yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Geri kazanılmış agrega.....	11
Şekil 2. Metakaolin.....	13
Şekil 3. Uçucu kül	15
Şekil 4. Hafif betonların üretiminde kullanılan agregalar	24
Şekil 5. Karışımında kullanılan agregaların granülometri eğrileri	25
Şekil 6. Hafif betonların üretiminde kullanılan karıştırıcı.....	27
Şekil 7. Bir seferde üretilen numuneler	28
Şekil 8. Numunelerin kürlendiği kür havuzu	28
Şekil 9. Tartımlarda kullanılan 0,1 g hassasiyetli terazi.....	30
Şekil 10. Deneylerde kullanılan fırın.....	30
Şekil 11. Çökmenin ölçülmesi.....	31
Şekil 12. Basınç dayanımı testi.....	32
Şekil 13. Yarmada çekme dayanımı testi	32
Şekil 14. Elektriksel özdirenç deneyi düzeneği.....	33
Şekil 15. Kılcallık katsayısı tayini deney düzeneği.....	34
Şekil 16. Yüksek sıcaklık fırını	36
Şekil 17. Beton numunelerin birim ağırlıkları.....	43
Şekil 18. Beton numunelerin basınç dayanımları	46
Şekil 19. Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları	48
Şekil 20. Beton numunelerin kılcallık katsayıları	50
Şekil 21. Beton numunelerin su emmeleri.....	52
Şekil 22. Beton numunelerin özdirençleri	54
Şekil 23. Yüksek sıcaklık etkisiyle betonların basınç dayanımında oluşan azalmalar.....	56
Şekil 24. Yüksek sıcaklık etkisiyle betonların ağırlıklarında oluşan azalmalar.....	58
Şekil 25. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı testi sonrası görüntüleri (Soldan sağa; oda sıcaklığı, 250°C, 500°C ve 750°C).....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
°C	Santigrat derece
cm	Santimetre
D _{max}	Betonda kullanılan agreganın en yüksek boyutu
DPA	Doğal perlit agregası
DYK	Doygun yüzey kuru
g	Gram
GDBA	Geri dönüştürülmüş beton agregası
GDTA	Geri dönüştürülmüş tuğla agregası
GKA	Geri kazanılmış agregası
GPa	Giga pascal
İYA	İnşaat ve yıkıntı atığı
kg	Kilogram
m	Metre
MK	Metakaolin
mm	Milimetre
MPa	Mega pascal
NA	Normal agregası
s	Saniye
UK	Uçucu kül

1. GİRİŞ

İnşaat ve yıkım atıkları, kentsel katı atıkların önemli bir bölümünü oluşturmakta olup toplam atık miktarının yaklaşık %13 ila %30'unu kapsamaktadır (Ölmez ve Yıldız, 2008). Normal agrega (NA) yerine geri kazanılmış agrega (GKA) kullanılabilirliği üzerine yoğun araştırmalar son 40-50 yıldır yürütülmektedir. GKA'ların malzeme özellikleri ve betonlardaki etkisi gerçekleştirilen çalışmalarla daha net belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmalardan birini gerçekleştiren, Duan ve Poon (2014) farklı kaynaklardan temin edilen GKA'ların betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş, elde ettikleri sonuçlar iyi kalitedeki GKA'ların yüksek dayanımlı beton üretiminde başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Döndüren ve Şişik (2016), yaptıkları inceleme sonucunda, genel olarak eşit miktarda çimento ve işlenebilirlik için, GKA'lardan oluşturulan betonun mukavemetinin, normal betonun mukavemetinden bir sınıf daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, beton teknolojisinde yapılacak olan birkaç değişiklik (örneğin işleme teknolojisi) ile GKA'nın kalitesinin yükseltilebileceği ve normal agreganın yerine kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Gerçekleştirilen başka bir çalışmada, geleneksel betonun yoğunluğunun $2,4 \text{ g/cm}^3$, GKA içeren betonun yoğunluğunun ise $2,2 \text{ g/cm}^3$ olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, GKA içeren betonun çevre dostu özelliklerinin yanı sıra daha düşük yoğunluğu sayesinde yapıdaki ölü yükün azaltılmasına katkı sağladığını ifade etmişlerdir (Fırat Alemdar ve Kurt, 2022). GKA sadece beton içerikli değil, farklı inşaat ve yıkıntı atığını (İYA) da kapsayabilir. Bu malzemeler üzerine çalışmalar da yapılmıştır. Örneğin, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) ve geri dönüştürülmüş tuğla agregasının (GDTA) betona etkilerinin incelendiği bir çalışmada, %25 ikame oranında, GDBA katkılı betonların su emme oranı daha yüksek bulunurken, %50 ve üzerindeki oranlarda GDTA katkılı betonların daha fazla su emdiği belirlenmiştir. Bu artışın, tuğla agregalarının daha fazla boşluk oluşumuna neden olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Aydın vd., 2021). Literatürde yer alan çalışmalar, GKA'nın farklı beton türlerinde kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak bunun, elde edilen beton özelliklerinin kullanım amacının gerektirdiği performans kriterlerini karşılamasına bağlı olduğu görülmektedir.

Beton malzemesinin de diğer malzemelerde olduğu gibi avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Beton teknolojilerinin gelişimi sayesinde dezavantajların onarılması mümkündür. Betondan istenen farklı ihtiyaçlar zamanla meydana çıktığından, birçok özellikte beton tipi üretilmiştir. Hafif betonlar bu üretilen özel betonlardan biridir. Hafif beton, hafif

agrega, su, çimento ve agrega kullanılarak üretilmektedir. Ayrıca hafif betonlarda, normal betonda kullanılan kimyasal ve mineral katkıları kullanılabilir. (Chandra and Berntsson, 2002). TS EN 206-1 (2002)'ye göre etüv kurusu yoğunluğu 800-2000 kg/m³ aralığında olan betonlar hafif betonlar sınıfına girmektedir. Hafif beton yapımında kullanılan hafif agregalar ikiye ayrılmakta olup bunlar yapay ve doğal agregalardır. Doğal olan hafif agregalar tortul kayaç ve volkanik taşların kırılması ile elde edilebilir. Yapay olan hafif agregalar ise doğal olan kayaçların ısı işlem görmesi sonucu veya endüstriyel atıklardan elde edilmektedir. Volkanik cüruf, volkanik tuf, pomza vb. agregalar doğal hafif agrega olarak adlandırılır. Perlit, vermikülit, genişletilmiş kil vb. agregalar yapay hafif agrega olarak adlandırılır. Ayrıca hafif agregalar işlevlerine göre de sınıflandırılmaktadır. Vermikülit ve perlit hafif agregalarından yalıtım hafif betonu yapılabilir. Volkanik cüruf ve pomza benzeri hafif agregalar kullanılarak yarı taşıyıcı özellikli hafif beton, arduvaz, şist ve genişletilmiş kil benzeri hafif agregalardan ise taşıyıcı özellikli hafif beton yapılabilir (Chandra and Berntsson, 2002).

Son yıllarda, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton ve harç numunelerin üretiminin beraberinde hafif beton üretimi, ferrocement uygulamaları, cam lifli betonların üretimi, tamir harçlarında ve su izolasyonu amacı taşıyan sıvalarda kullanılmakta olan puzolanik malzemelerden biri de metakaolin mineralidir (Siddique and Klaus, 2009). Metakaolin, 650°C ila 800°C arasındaki sıcaklıkta saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesi sonucu üretilen puzolanik bir malzemedir (Sabir et al., 2001). Metakaolin, beyaz renkli, amorf yapılı olup yüksek seviyede puzolanik özellik oluşmaktadır (Zhang and Malhotra, 1995). Metakaolin yüksek oranda SiO₂ ve Al₂O₃ içeren bir mineraldir. Metakaolinin bünyesinde bulunan alümin ve silis çimentonun hidratasyonu sunucunda elde edilen Ca(OH)₂ ile reaksiyon oluşturarak yeni kalsiyum silikat hidrat (CSH) yapıları oluşmaktadır. Ayrıca filler etkisi ile boşluklara yerleşerek doluluk oranının artırmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı ile birlikte üretilen beton veya harçlarda, mekanik özellikler ile dayanıklılık açısından iyileşmeler gözlemlenmektedir (Zhang and Malhotra, 1995; Sabir et al., 2001; Siddique and Klaus, 2009).

Betonda kullanılan mineral katılardan biri de uçucu küllerdir. Uçucu küller yapay puzolandır ve genel olarak saf halde bağlayıcı değildir, fakat sönmüş kireçle beraber hidratasyon reaksiyonuna sokulduğunda suda sertleşmektedir. Uçucu küller genellikle elektrik üreten termik santrallerden temin edilir. Genel olarak endüstriyel olarak tüketilmeyen düşük kalorili kömürler ince bir şekilde parçalanarak termik santral fırınlarında yakılır, fırının bacasından yükselen uçucu küller siklon veya elektrofiltre diye adlandırılan toz tutucularında, elektrostatik

veya mekanik yöntemler yardımı ile tutularak depolanmaktadır. Bu küller 1-300 µm çapında küresel parçacıklardır (Kocataşkın, 1987).

1.1. Araştırmanın Amacı

Bilindiği üzere Türkiye, aktif deprem kuşağında yer alan ülkeler arasında bulunmaktadır. Deprem etkisi altında oluşan kuvvetler, yapı kütlesi ile doğru orantılı olarak artmakta ve yapılar üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Bu çalışmada, deprem kuvvetlerinin yapı üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla hafif beton geliştirilmesi, beton üretiminde maliyetin mümkün olan en düşük seviyeye indirilmesi ve atık malzeme niteliği taşıyan GKA kullanılmasıyla çevre dostu ve sürdürülebilir bir beton üretiminin sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca uçucu kül ve metakaolin gibi mineral katkıların kullanımıyla betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, GKA kullanılarak üretilen hafif betonlarda, doğal perlit agregası (DPA) yerine GKA ikamesinin ve mineral katkıların betonun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. GKA'nın etkisini belirlemek amacıyla, agrega yerine GKA %20 ve %40 oranlarında ikame edilerek hafif beton karışımları hazırlanmıştır. Bununla birlikte, bağlayıcı sisteminde uçucu kül ve metakaolin belirli oranlarda kullanılarak beton karışımları tasarlanmıştır.

Üretilen hafif betonlar üzerinde mekanik, durabilite ve yüksek sıcaklık direncinin belirlenebilmesine yönelik deneyler gerçekleştirilmiş, elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak betonların özelliklerinde meydana gelen değişimler değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca farklı kür sürelerinde deneyler yapılarak, uzatılmış kür süresinin üretilen hafif betonlar üzerindeki etkisinin incelenmesi de çalışmanın temel amaçları arasında yer almaktadır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Günümüzde yapı sektöründe hem deprem güvenliğinin artırılması hem de çevresel etkilerin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin aktif deprem kuşağında yer alması, yapıların deprem etkisi altında daha güvenli tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Deprem sırasında yapıya etki eden kuvvetlerin yapı kütlesi ile doğru orantılı olması, daha hafif ve dayanımı yeterli betonların geliştirilmesini önemli bir araştırma konusu haline getirmektedir.

Ayrıca, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve inşaat sektöründe kullanılan doğal agregaların çevresel etkileri, alternatif ve sürdürülebilir malzeme kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, GKA'ların beton üretiminde değerlendirilmesi hem doğal kaynak tüketiminin azaltılması hem de atık miktarının düşürülmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, uçucu kül ve metakaolin gibi mineral katkıların beton üretiminde kullanılması hem çevresel hem de teknik açıdan betonun performans özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu araştırma, GKA ile üretilen hafif betonlarda uçucu kül ve metakaolin kullanımının betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkilerini birlikte ele alması açısından özgün bir çalışma niteliği taşımaktadır. Literatürde GKA, uçucu kül ve metakaolin kullanımına ilişkin çalışmalar bulunmakla birlikte, bu malzemelerin hafif beton bağlamında birlikte değerlendirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca hem ince hem iri agreganın aynı zamanda ikame edilerek üretildiği betonları inceleyen çalışmaların literatürde oldukça sınırlı olması bu çalışmaların neredeyse tamamına yakının hafif beton dışındaki betonları kapsıyor olması bu çalışmanın diğer bir özgün yanını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bu çalışmadan elde edilen sonuçların hem akademik literatüre katkı sağlayacağı hem de mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek bilimsel veriler sunacağı düşünülmektedir.

Ayrıca, çalışmada elde edilen bulguların sürdürülebilir hafif yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlaması, çevre dostu beton tasarımlarının yaygınlaştırılmasına yardımcı olması ve deprem ile yangın etkilerine karşı daha güvenli yapı sistemlerinin oluşturulmasına bilimsel bir temel oluşturması beklenmektedir. Bu yönüyle araştırmanın hem çevresel hem teknik hem de ekonomik açıdan önemli katkılar sunacağı öngörülmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Hafif Betonlar

Bir çalışmada, literatüre atıfla verdikleri bilgilerde, geçmiş dönem yapıları gözden geçirildiğinde, hafif betonların kullanımının yaklaşık olarak 3000 yıl kadar eskiye dayandığını belirtilmiştir (Yu vd., (2015). Roma İmparatorluğu devrinde yapılan Cosa Limanı ile mimari açıdan ciddi öneme sahip Pantheon kubbesi gibi yapılarda hafif betonun kullanıldığını belirtmişlerdir. Betonun birim hacim ağırlığının düşürülmesiyle hafif beton elde edilmesi için üç farklı yöntem kullanılmaktadır (Neville, 1995). Bu yöntemler şunlardır:

1. Normal ağırlıklı agregalar (kum, kırmataş, çakıl) kullanmak yerine boşluk yapısı fazla olan yapay veya doğal agregaların kullanılmasıyla üretilen hafif betonlar.
2. Beton içerisinde kimyasal veya fiziksel metotlar ile yüksek hacimde boşluk oluşturularak elde edilen köpük ve gaz betonları ile yüksek seviyede hava sürüklenmiş betonlar.
3. Normal agregalı betonlarda kumun atılması ile üretilen kumsuz hafif betonlar.

Ortaya konulan bir derlemede, hafif beton üretiminde sinterlenmiş uçucu kül, killi şist, genleşmiş şeyl, hurma yağı klinkeri gibi farklı agregaların kullanıldığı literatüre atıfla belirtilmiştir. Ayrıca, hafif yüksek dayanımlı beton üretiminde en yaygın kullanılan hafif agreganın genleştirilmiş kil olduğu ve bunu senosfer ve sinterlenmiş uçucu külün takip ettiği belirtilmiştir (Sifan vd., 2023). Ultra hafif betonların yoğunlukları 800 kg/m^3 'ten düşük olduğu için ısı iletim katsayılarının $0.14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ değerinin altında olduğu ve bu nedenle yüksek derecede yalıtım performansı sergilediği sunulmuştur. Ayrıca, ultra hafif betonların basınç dayanımlarının 10 MPa 'nın üzerine çıkabildiği gözlemlenmiştir (Spiesz and Hunger, 2017). Birim ağırlığı çok düşük olan hafif betonlar genel olarak yalıtım betonu olarak kullanılabilir, birim hacim ağırlıkları 2000 kg/m^3 'e yakın olan betonlar ise taşıyıcı hafif beton veya öngerilmeli beton olarak kullanılmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu, 2021). Türkiye'de diğer hafif agregalara kıyasla hatırı sayılır derecede kullanılan hafif agregalardan biri olan volkanik cürufaların hafif beton agregası olarak yararlanıldığı çalışmalarda, betonun birim hacim ağırlığını azaltarak hafif beton yapımında başarılı sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir (Topçu, 1989; Topçu, 1996).

Hafif agregalı betonlar, gözenekli yapıları sayesinde düşük birim ağırlıklarına rağmen oldukça iyi bir dayanım/ağırlık oranı sunmaktadır. Ayrıca düşük ısı genleşme göstermeleri ve ısı ile ses yalıtımı açısından avantaj sağlamaları nedeniyle birçok uygulamada tercih edilmektedir. Bununla birlikte, yarmada çekme dayanımlarının da aynı dayanım sınıfındaki normal betonlara göre daha düşük olduğu belirtilmektedir (Al-Khaiat and Haque, 1998).

2.1.1. Hafif agregalar

Hafif beton üretiminde kullanılan agrega türleri genellikle doğal ve yapay olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğal agregalar, volkanik kayalar veya tortul taşlar kırılarak elde edilmektedir. Pomza, volkanik tüf ve volkanik cüruf bu agregaların başında gelmektedir. Hafif agregalar aynı zamanda kullanım alanlarına göre de farklı gruplara ayrılmaktadır. Örnek olarak perlit ve vermikülit gibi malzemeler genellikle yalıtım amaçlı hafif beton üretiminde daha uygun iken pomza ve volkanik cüruf gibi agregalar ise kısmen taşıyıcı özellik göstermektedir ve betonların yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca, genleştirilmiş kil, arduvaz ve şist gibi agregalarda taşıyıcı hafif betonlarda kullanılmaktadır (Chandra and Berntsson, 2002).

Yapay hafif agregalar, doğal taşların ısı ile işlemle genleştirilmesiyle ya da endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesiyle üretilmektedir. Genleştirilmiş kil, perlit ve vermikülit bu sınıfa dâhil olmaktadır (Chandra and Berntsson, 2002). Literatürdeki çalışmaların kapsamlı bir değerlendirmesine göre, yapay agregalar genellikle ince taneli nemli partiküllerin peletleme veya presleme (sıkıştırma) yöntemleriyle bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Ren vd. (2021) tarafından aktarıldığı üzere, bu yöntemle elde edilen taze peletler, hızlandırılmış karbonatlaşma işlemi aracılığıyla katı kompozit agregalara dönüştürülebilmekte ve özellikle yüksek CO₂ konsantrasyonu altında agregaların mukavemet gelişimi ivme kazanmaktadır. Örnek olarak taze hazırlanmış peletlerin, %20 CO₂ oranına sahip olacak şekilde dört gün süreyle karbonasyon kürü yapılması sonucunda, bazik oksijen fırını cürufu agregalarının mukavemeti, normal kür koşullarında üretilen agregalara göre yaklaşık 2 ila 3 kat artış gösterdiği belirtilmektedir (Jiang and Ling, 2020).

2.1.2. Hafif betonların avantajları ve dezavantajları

Tüm yapı malzemelerinde olduğu gibi betonun da kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Fakat beton teknolojilerindeki gelişmeler, bu dezavantajların büyük bir kısmını azaltmayı mümkün hale getirmiştir. Zamanla yapı mühendisliğinde gelişen farklı ihtiyaçlar, özel beton türlerinin olgunlaşmasını sağlamış ve bu türlerden biri de hafif betonlar olmuştur (Chandra and Berntsson, 2002). Yüksek dayanımlı hafif beton, özellikle yüksek katlı yapılarda ölü yükü azaltmakta ve taşıyıcı eleman kesitlerini küçülterek yapı içi kullanım alanını artırmakta, ayrıca açıklık geçme kapasitesini geliştirmektedir (Chia and Zhang, 2002). Normal ağırlıklı betonlar yüksek yoğunlukları nedeniyle yapıların ağırlığını önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum özellikle deprem etkisi altında yapıya etkiyen yüklerin artmasına neden olmaktadır. Oysa taşıyıcı hafif beton kullanımı, yapının toplam kütlesini düşürerek deprem yüklerini düşürür ve oluşabilecek hasar riskini azaltır.

Hafif betonların öne çıkan avantajları:

- Dayanım/yoğunluk oranlarının genellikle yüksek olması,
- Donatı tüketiminde ekonomi sağlaması,
- Düşük ısı ve ses iletkenliği sunması,
- Kalıba uyguladığı basıncın düşük olması şeklinde sıralanabilir.

Bununla birlikte, hafif betonların elastisite modülünün 6,5–13 GPa aralığında kaldığı, dolayısıyla oldukça düşük bir rijitlik sergilediği görülmektedir. Yüksek porozite ve su emme kapasitesine sahip olan bu betonların su geçirimsizliği de buna bağlı olarak artmakta; bu durum ise olumsuz çevre koşullarına karşı gösterdikleri hassasiyeti belirgin biçimde yükseltmektedir. (Alduaij et al., 1999).

Literatürde hafif betonların özelliklerini ortaya koyan birçok çalışma vardır. Bu çalışmaların bazılarında hafif betonların dezavantajlarını azaltmaya yönelik öneriler de sunulmuştur. Betonun basınç dayanımı agrega miktarı ve özellikleri tarafından etkilenir (Yang and Huang, 1996). Literatürde, pomza agregalı hafif betonların basınç dayanımına ilişkin çalışmalar incelendiğinde, pomza agregalı hafif betonun normal betona karşın daha az mukavemete sahip olduğu, ancak %30-40 oranında daha hafif olduğu öne sürülmüştür. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve yoğunluk gibi mekanik özelliklerin, pomza agregası/çimento yüzdesinin düşük

tutulmasıyla iyileştiği belirlenmiştir. Karbon ve su emme geçirgenliği gibi özellikler de düşük pomza/çimento oranlarında azalmıştır. Çalışmada, ince ve iri taneli pomza agregası kullanılarak yapısal hafif beton üretilebileceği gösterilmiştir (Gündüz and Uğur, 2005). Başka bir araştırmada, pomzanın çimento yerine kullanılması basınç dayanımında başlangıçta bir düşüşe neden olmuş fakat, karışıma silis dumanı eklenmesi bu olumsuz etki büyük ölçüde azaltmıştır ve özellikle %10 silis dumanı kullanılan karışımlarda kontrol betonundan daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu durum, silis dumanının pomza katkılı betonların dayanım özelliklerini iyileştirebildiğini göstermektedir (Yazıcıoğlu ve Demirel, 2005).

2.1.3. Hafif betonların kullanım alanları

Günümüzde yapı mühendisliğinde enerji verimliliği, yangın dayanımı ve yapı elemanlarının ağırlığının azaltılması önemli tasarım kriterleri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda hafif beton ve harçlar, düşük yoğunlukları ve düşük ısı iletkenlikleri sayesinde hem yapısal yüklerin azaltılmasına hem de ısı yalıtımının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu malzemelerin üretiminde genleştirilmiş kil, vermikülit, perlit ve pomza gibi hafif agregalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Nitekim Köksal vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, kalsiyum alüminat çimentosu ve genleştirilmiş vermikülit tozu içeren harçların, yüksek sıcaklık koşullarında Portland çimentolu harçlara göre mekanik özelliklerini daha iyi koruduğu ve daha yüksek termal performans gösterdiği rapor edilmiştir.

Taşıyıcı hafif betonlar; duvar blokları, duvar panelleri, çatı döşemeleri ve prefabrik yapı elemanları gibi birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu betonların en önemli avantajlarından biri, yapıların öz ağırlığını azaltabilmeleridir. Özellikle deprem riski yüksek bölgelerde, yapıya etkiyen deprem yüklerinin azaltılmasına katkı sağlaması nedeniyle hafif agrega betonlarının kullanımı tercih edilmektedir. (Sari and Paşamehmetoğlu, 2005).

2.2. Perlit

Perlit, lavın hızla soğuması ve zamanla obsidyenin meteorik suyu bünyesine almasıyla oluşan amorf bir volkanik camdır. Volkanik aktivite sırasında hapsolmuş su buharının etkisiyle şekillenen doğal bir malzeme olarak da tanımlanabilir. Perlit, ağırlığının %3-5'i kadar olacak şekilde yüksek su içeriğine sahiptir. Oluşturan lavlar genellikle alüminosilikat bileşiminde olmakla birlikte, içeriğinde az miktarda sodyum ile potasyumu da barındırır. Perliti diğer

volkanik kayalardan ayıran asıl özelliği ise genleşme kapasitesidir. 871–1093 °C arasındaki sıcaklıklara maruz kaldığında hacmi 7 ila 20 kat artabilir. Isıtma esnasında yapısındaki su buharlaşarak milyonlarca küçük kabarcık meydana gelir. Bu işlem ile malzeme; beyaz, hafif ve gözenekli bir yapıya dönüşür. Perlit genel olarak güvenli, doğal ve sürdürülebilir bir malzeme olarak tanımlanır. Diğer belirgin özellikleri arasında ise pH nötr, yalıtkan, inert, hafif, gözenekli, steril ve nem tutma kapasitesinin yüksek olması yer alır (Perlite Institute, 2025).

Perlit kullanım alanı oldukça geniş bir malzemedir. Başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir;

- İnşaat sektöründe, düşük birim hacim ağırlığı ve ısı yalıtım özellikleri sayesinde hafif beton üretiminde, sıvalarda, yalıtım malzemelerinde ve tavan karolarında,
- Filtrasyonda, yüzme havuzu bakımı gibi alanlarda filtre yardımcısı olarak,
- Bahçecilikte, toprağın havalandırılmasını ve drenajını artırmak, aynı zamanda nem muhafaza etmek için toprak düzenleyici veya topraksız tarım (hidroponik) ortamı olarak,
- Biyoteknolojide, kararlı ve toksik olmayan yapısıyla biyokatalizörlerin sabitlenmesinde,
- Kozmetikte, ince dokusuyla kozmetik ürünlerde emici ve mekanik eksfoliyant (soyucu) olarak kullanılır.

İşleme süreci de oldukça basittir: Madenden çıkarılan doğal perlit kırılıp sınıflandırılır, ardından yüksek ısıda genleştirilerek ticari kullanıma hazır hale getirilir (Perlite Institute, 2025).

2.3. Geri Kazanılmış Agregalar

Dünya genelinde hızla gelişen inşaat sektörü, Türkiye’de de belirgin bir şekilde büyümektedir. İnşaat sektörü, ulusal ekonomi açısından temel bir sektör olup, en önemli hammaddelerinden biri agregalardır. Konutlar, sanayi yapıları ve hastane gibi yapılar ile köprüler, su yapıları, altyapı sistemleri ve yol yapıları agregalarla ayrılmaz ikilidir. Artan yapılaşma ve altyapı çalışmaları nedeniyle agregaya olan ihtiyaç her geçen yıl yükselmektedir. Bu durum, dünya genelindeki agrega tüketim rakamlarına da yansımaktadır. Freedonia tarafından yayımlanan verilere göre, 2014 yılında inşaat sektöründe kullanılan agrega miktarı yaklaşık 40,2 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Aynı raporda, bu talebin yıllık ortalama %5,2 oranında artış göstereceği ve 2019 yılına gelindiğinde 51,79 milyar metrik tona ulaşacağı öngörülmüştür (Kurad vd.,

2017). Kentsel atıkların yaklaşık %13–30'u inşaat yıkıntılarında meydana gelmektedir (Ölmez and Yıldız, 2008).

Dünya nüfusundaki artış ve sanayi faaliyetlerinin genişlemesi, çevresel etkilerin artmasına neden olduğu ve sürdürülebilirliği tehdit ettiği literatüre atıfla belirtilmiştir (Peña et al., 2022; González-Quintero et al., 2021). İnşaat sektörü, en fazla doğal hammadde tüketen ve en yüksek miktarda atık üreten sektörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Huuhka and Kolkwitz, 2021). Bu bağlamda, beton üretiminde İYA kaynaklı geri kazanılmış beton agregalarının kullanımı hem atık yönetimi hem de doğal kaynak tüketiminin azaltılması açısından oldukça önemlidir (Borghi et al., 2018). Geri dönüştürülmüş beton agregalarının, doğal agregaların yerini kısmen veya tamamen alarak enerji kullanımını, karbon salımını ve çevresel kirliliği azaltmayı amaçladığı çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Majhi et al., 2018). GKA içeren beton, sadece doğal agrega içeren betonla aynı işlenebilirliğe sahip olmak için daha fazla su kullanımı gerekmektedir. Basınç dayanımı ve elastisite modülü, doğal agregalı betonlara kıyasla daha düşük olabilmekte; belirli bir su/çimento oranında ise geçirgenlik ile donatı korozyonu riski artış gösterebilmektedir (Padmini et al., 2009). Bu farklılıklar, GKA'ya yapışan eski harçtan dolayı oluşmaktadır. GKA'ların yoğunluğu ve su emme kapasitesi, yapışan harcın miktarına ve kalitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. GKA üzerinde yaklaşık %30–35 oranında çimento hamuru bulunması, yoğunluklarının 2200–2400 kg/m³ aralığında olması ve su emme oranlarının %5–15 arasında değişmesi özelliklerini etkiler (Poon et al., 2004). GKA ile üretilen betonun taze ve sertleşmiş davranışlarının kontrolü için, betonda kullanılan geri dönüştürülmüş agregaların özelliklerinin önceden bilinmesi gerekmektedir. Özellikle su emme kapasiteleri, GKA'yı doğal agregadan ayıran temel bir parametre olup betonun hem taze hem de sertleşmiş performansı üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır (Etxeberria vd., 2007). GKA agregası üzerinde bulunan eski yapışmış çimento harcının belirgin olarak görülebildiği fotoğraf Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Geri kazanılmış agregat

GKA kullanımının betonda basınç dayanımını düşürdüğüne ilişkin literatürde çalışmalar mevcuttur. Örneğin bir çalışmada, %25 ve %50 GKA kullanım oranlarında basınç dayanımında %10–20 aralığında azalma meydana geldiği raporlanmıştır. Ek olarak, süper akışkanlaştırıcı kullanılan karışımlarda GKA'daki ince taneler ile katkı maddesi arasındaki etkileşim nedeniyle dayanım düşüşlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Medina et al., 2014). Betonun durabilitesi ile ilgili bilgi veren önemli deneylerden biri olan kılcallık katsayısının GKA oranı arttıkça yükseldiği, özellikle yüzen parçacık içeren agregalar da bu artışın daha belirgin olduğu raporlanmıştır. Buna göre %25 GKA ikame oranında emicilikte belirgin bir değişim gözlenmezken, %50 GKA ikame oranında ise su emicilik değerleri referans betona kıyasla %10–20 daha yüksek bulunmuştur (Medina et al., 2014). Su emme oranı yüksek olduğundan, GKA oranının artması ile birlikte betonların ıslanma–kuruma döngülerinden daha fazla etkilendiği gösterilmiştir. En düşük dayanım kaybı kontrol betonunda, en yüksek kayıp ise %100 ince GKA içeren seride meydana geldiği belirtilmiştir (Sefidehkan ve Şimşek, 2018). GKA'nın su emme değerlerinin genel olarak yüksek çıkmasının, agregat yüzeyine yapışık çimento hamuru kalıntılarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Demirel and Şimşek, 2014). %50'ye kadar olan ikame oranlarında, geri kazanılmış agreganın konut tipi beton üretimine uygun olduğu belirtilmiştir (Medina et al., 2014).

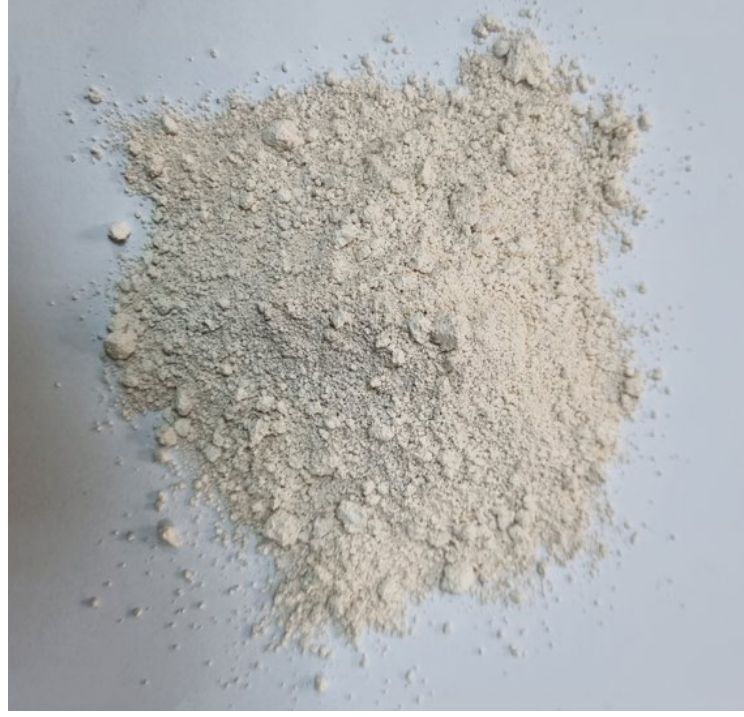
2.4. Metakaolin

Metakaolinin çimento esaslı harçlarda puzolan katkı olarak kullanımı 1960'lı yıllara kadar uzanmakta; özellikle 1990'lardan sonra sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık avantajları nedeniyle beton üretiminde biraz daha yaygınlaşmaya başlamıştır (Bensted and Barnes, 2001). Metakaolin, kaolin kökenli killerin belirli sıcaklıklarda kalsine edilmesiyle elde edilen yapay

bir puzolandır ve çimento esaslı malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hammaddesi olan kaolin, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ kimyasal formülüne sahip bir kil mineral grubudur. Bu grup içerisinde kaolinitin yanı sıra dikit, nakrit ve halloysit gibi mineraller de bulunmaktadır. Kaolinin oluşumu incelendiğinde, feldspat bakımından zengin granitik veya volkanik kayaların zamanla ayrışması sonucu meydana geldiği görülmektedir. Bu ayrışma sırasında kayaç bünyesindeki alkali ve toprak alkali elementler ortamdaki uzaklaşırken, yapı alümina ve silis açısından zenginleşmektedir. Böylece kaolinit mineralinin oluşumu için uygun koşullar ortaya çıkmaktadır (Başpınar ve Kuşçu, 2014).

Metakaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), saflaştırılmış kaolin kilinin yaklaşık 650–800 °C sıcaklık aralığında ısıtılmasına tabi tutulmasıyla elde edilen yapay bir puzolandır ve genellikle beyaz renkli bir mineral olarak bilinmektedir. Isıtma sürecinde kaolin kili, yaklaşık 200 °C’de adsorbe suyunu kaybetmeye başlamakta; 500–600 °C aralığında kimyasal bağlı suyunu kaybederek metakaoline dönüşmekte; 1000 °C civarında ise mullit ve kristobalit fazlarına geçiş göstermektedir. Bu ısıtılma işlemi sonucunda kristal yapı bozulmakta, amorf karakterli ve yüksek puzolanik reaktiviteye sahip bir yapı oluşmaktadır. Metakaolinin içerdiği yüksek orandaki silis ve alümina, çimento hidratasyonu sırasında oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek ikincil C-S-H fazlarının oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucunda beton ve harçların mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler meydana gelmektedir. (Yazıcı vd., 2010; Akçay vd., 2013). Deneylerde kullanılan metakaoline ait fotoğraf Şekil 2’de sunulmuştur.

20 °C sıcaklıkta suda kür edilen ve çimento yerine içeriğinde %5 – %20 oranında metakaolin bulunan harçların, 1 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının kontrol karışımına kıyasla daha düşük seviyede olduğu anlaşılmıştır. Buna karşılık, aynı koşullarda kür edilen ve çimento yerine %5–%20 seviyelerinde metakaolin kullanılan harçların 3 gün ile 180 gün arasındaki kür sürelerinde elde edilen basınç ve eğilme dayanımlarının, kontrol harcının dayanımlarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Yazıcı vd., 2010)



Şekil 2. Metakaolin

2.5. Uçucu kül

Ülkemizdeki elektrik enerjisinin büyük bir kısmı günümüzde hâlâ termik santraller aracılığıyla üretilmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) verilerine göre, Türkiye'de 2007 yılı sonu itibarıyla 40.777,3 MW seviyesine ulaşan toplam kurulu güç kapasitesinin %31,6'sı doğal kaynaklı enerjiye aittir, %25'i kömür ve %32,8'i hidrolik kaynaklara dayanmaktadır. 2007 yılında Türkiye'de elektrik enerjisi üretimi, önceki yıla kıyasla %8,4 oranında artış göstererek 191,2 milyar kWh seviyesinde gerçekleşmiştir. Aynı yıl elektrik üretiminde doğal gazla çalışan santrallerin payı %48,6, hidroelektrik kaynaklı üretimin payı %18,7 ve linyit yakıtlı termik santrallerin payı ise %20 olarak belirlenmiştir (EPDK, 2007).

Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) verilerine göre, Türkiye'de termik santrallerde oluşan uçucu kül miktarı 2003 yılında 11,84 milyon ton, 2004 yılında 13,34 milyon ton ve 2006 yılında ise 16,01 milyon ton olarak belirlenmiştir 2003–2006 yılları arasında ortaya çıkan bu atıkların ortalama %10'u tesis dışında geri dönüşmüş, %90'ı ise atılmıştır. Bertaraf edilen atıkların yaklaşık %79'u kül dağı veya barajlarında istiflenmiştir. Termik santrallerin atık bileşimi içerisinde en büyük payı, cüruf, kül, uçucu kül ve alçıtaşı gibi mineral atıklar oluşturmuştur (TÜİK, 2008).

Termik santrallerde enerji üretimi sırasında yakıt olarak kullanılan düşük kalorili linyit kömürleri ince tane boyutuna gelinceye kadar öğütülerek yakılmaktadır. Toz halindeki kömürün yanması sırasında, baca gazlarıyla birlikte taşınan ve elektrostatik filtreler aracılığıyla bacalarda tutulabilen, tane boyutları yaklaşık 1–150 µm aralığında değişen kül partikülleri oluşmaktadır. Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak kömür tüketiminin yükselmesi, kömürün yanması sonucunda oluşan kül miktarının da artmasına neden olmaktadır. Endüstriyel bir atık niteliği taşıyan ve termik santrallerden elde edilen bu küllere uçucu kül adı verilmektedir (Neville, 1995).

Uçucu küller beton teknolojisinde, betonda direkt kum olarak kullanılabilmesinin yanı sıra çimentoya doğrudan katılarak da kullanılabilir. Çimento üretilirken klinkere eklenip öğütülerek uçucu küllü çimento elde edilebilir. Kum yerine kullanılarak kumdan az da olsa tasarruf elde edilir fakat özgül yüzey artmaktadır. Uçucu küllerin pozolanik özelliklerinden dolayı daha çok çimento yerine kullanılması daha uygun olmaktadır. Uçucu küller genellikle daha fazla incelik ve özgül yüzeye sahip olduklarından çimentodan tasarruf sağlar ve bağlayıcı hacmi artırır. Yine araştırmacılar %20 oranında uçucu kül ikame edildiğinde basınç dayanımının daha yüksek sonuçlar verdiğini göstermiştir (Sümer, 1994). UK kullanımının, betonun rötre miktarını azaltmasının yanı sıra işlenebilirliği artırdığı bilinmektedir. (Berry and Malhotra 1986). Gerçekleştirilmiş bir çalışmada, dayanımın %69'unun kazanıldığı durumda, %20 uçucu kül kullanıldığında bu oran %67'ye, %40 uçucu kül kullanıldığında ise %62'ye düşmektedir. Bu sonuçlar, uçucu kül miktarı arttıkça dayanım kazanımının daha geç gerçekleştiğini göstermektedir. Uçucu küllerin beton basınç dayanımını düşürdüğü ve uçucu kül oranının artması halinde dayanım kazanımının daha da geciktiği anlaşılmaktadır. 2000 yılı birim fiyatlarıyla yapılan maliyet analizine göre, çimento yerine %20 oranında uçucu kül ikamesi beton birim maliyetinde ortalama %10, %40 uçucu kül kullanılması ise yaklaşık %18 oranında daha ekonomik olduğu görülmektedir. Ayrıca uçucu külün endüstriyel bir atık olması nedeniyle, betonda harçlarda kullanılması bu atığın depolanmasına ilişkin maliyetlerin de azalmasına katkı sağlamaktadır (Topçu ve Canbaz, 2001). Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan uçucu küle ait görsel Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Uçucu kül

2.6. Kaynak Özetleri

Bu bölümde, literatürde yer alan hafif betonlar, perlit agregalı betonlar, GKA içeren betonlar ile metakaolin ve uçucu kül kullanımının etkilerini inceleyen çalışmaların yanı sıra yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı bazı çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlar sunulmuştur.

Aşık (2006), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, doğal perlit agregası kullanılarak yapısal hafif agrega beton üretimi incelenmiştir. Düşük birim hacim ağırlığa sahip betonlar ile inşa edilen yapılarda, yapıların ölü yükünün azaldığı ve deprem etkilerinin yapı kütlesiyle orantılı olması nedeniyle deprem yüklerinin ve dolayısıyla deprem hasarı riskinin de azaldığı belirtilmiştir. Çalışmada, doğal perlit agregası kullanılarak 28 günlük silindirik basınç dayanımı 20–40 MPa aralığında değişen yapısal hafif betonların üretilebildiği belirlenmiştir. Ayrıca, doğal puzolanik özellik gösteren perlit tozunun kullanımıyla benzer dayanım aralığında daha ekonomik karışımların elde edilebileceği ortaya koyulmuştur. Yapısal hafif agrega betonların çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının 0,06–0,10 aralığında ve bu değerin normal ağırlıklı betonlara göre daha düşük olduğu, ayrıca normal betonun dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde elastisite modülünün de 13.350–21.300 MPa aralığında değiştiği ve normal betonlara göre daha düşük seviyede olduğu anlaşılmıştır.

Ulus (2007), tarafından yapılan çalışmada, perlit agregası kullanımıyla yüksek dayanımlı hafif beton üretimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı betonlar üretmek için m^3 'te 450 kg çimento, 500 kg bağlayıcı kullanılmasının ve ayrıca üretilen betonların su/çimento oranının 0,3 olmasının uygun olacağını ve bu betonun üretimi için ise süperakışkanlaştırıcı kullanımının gerekliliğini savunulmuştur. Perlit agregalı harçların, normal agregalı beton harca göre %200 daha yüksek ısı yalıtımına, perlit agregalı betonların normal betonlara göre ise ortalama %50 ve daha fazla yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Betonun mekanik veya fiziksel özelliklerine farklı kürün fazla etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin; daha önce iri ve hafif agregaların karışım yapılırken ve daha sonra absorbe ettikleri suyun ortama geri vererek su kürü ihtiyacını azaltması olduğu gösterilmiştir. Üretilen beton numunelerin küp basınç dayanımları 60-110 MPa ve çekme dayanımları ise 4-11 MPa arasında değişkenlik göstermiş olup, normal betonların çekme-basınç dayanımına göre daha yüksek ölçülmüştür. Betonların dinamik elastiklik modülleri 22 ile 35 GPa, statik elastiklik modülleri ise 17-25 GPa ve arasında değişmiştir. Gerilme deformasyon eğrisinden, dayanımın azalmasıyla sünekliğin arttığı, artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı dayanıma sahip normal agregalı betonlara göre iki kat daha fazla birim deformasyon göstermekte olduğu belirtilmiştir. Normal betonlar perlit agregasından üretilmiş betona göre %20-25 daha fazla ağır bulunmuştur. Kuruma rötre değerleri %0,047 ile %0,055 arasında değişim göstermiş, bu değerlerin normal agregalı ve diğer hafif betonlara kıyasla oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Ultrasonik ses geçiş hızı değerlerinin 4310 ile 5100 m/s arasında ölçüldüğü çalışmada, ses geçiş hızı değerlerinin normal agregalı betona göre çok yüksek bir değer olduğu belirtilmiştir. Böylelikle betonun iç yapısında boşluk ve çatlağın daha az olduğu belirtilmiştir.

Tosun (2014) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, geri kazanılmış kaba agreganın betonların donma-çözülme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada %3 NaCl çözeltisi içerisinde, CDF yöntemi esas alınarak uygulanan donma-çözülme döngüleri sonucunda yüzeysel kabuk atma miktarları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hava sürükleyici katkı kullanımının beton bünyesinde ayrı ayrı hava boşlukları oluşturması sayesinde donma-çözülme direncinin artırdığını göstermiştir. Bunun yanı sıra, GKA kullanımının beton içerisinde ilave hava boşluğu yapısı oluşturduğu ve kılcal geçirimsizliği düşürdüğü, bu durumun da yüzeysel kabuk atmaya karşı direnci pozitif yönde etkilediği belirtilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre donma-çözülme dayanımı açısından en uygun karışım parametreleri; maksimum agrega tane çapı (D_{max}) 22,4 mm, GKA oranı %45 ve hava sürükleyici katkı miktarı %0,13 olması şeklinde önerilmiştir. Bu oranlarda dökülen betonların yüksek donma-çözülme verimi göstermesi

nedeniyle, geri kazanılmış agregaların özellikle sert iklim koşullarına sahip bölgelerde yol temellerinde, betonlarda, kaldırım kaplamalarında ve yüksek dayanım gereksiniminin öncelikli olmadığı betonarme yapılarda kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Temiz ve Akçakale (2014) gerçekleştirdikleri çalışmada, yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Numunelerde 900°C'ye kadar herhangi bir çatlağa rastlanmamıştır; fakat bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında çatlak oluşumu kaydedilmiştir. 1050°C'ye ulaşıldığında çatlaklar belirginleşmiş ve ölçüm cihazı ile genişlikleri kaydedilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda çatlakların artış olması, karışım içindeki organik bileşenlerin ve pomza içerisindeki bazı minerallerin yanmasından oluştuğu belirtilmiştir. Organik madde içermeyen numunelerde ise çatlak genişlikleri daha düşük oluşmuştur. Uçucu kül miktarının artmasıyla betonun gevrekliğinin azalması ve bunun sonucunda çatlak boyu ile genişliğinin küçülmesi sonucu deneysel veriler sonucunda gözlemlenmiştir. 1050°C'de pişirilen numunelerin basınç dayanımları tespit edilememiştir. Bu durumun nedeni, yüksek sıcaklıkta kullanılan malzemelerin yanması ve böylece mekanik dayanım özelliklerinin kaybolması olarak gösterilmiştir.

Erdoğan vd. (2017), uçucu kül gibi yaygın olarak betonda kullanılabilen mineral katkıların yangın dayanıklılığını belirlemeye çalışmışlardır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan, çimentonun ağırlıkça %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ile ikame edildiği ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızının araştırıldığı çalışmada, uçucu kül kullanımının yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonların ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımında belirgin bir iyileşme sağlamadığını raporlanmıştır. Özellikle 600°C üzerindeki sıcaklıklarda betonların önemli ölçüde zarar gördüğü, bu etkinin %40 uçucu kül içeren karışımlarda daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, hedeflenen dayanımın sağlanması durumunda 400°C'ye kadar olan sıcaklıklarda uçucu kül kullanımının ekonomik avantaj sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Kandil (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, farklı mineral katkıları içeren geri kazanılmış agregalı kendiliğinden yerleşen betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri değerlendirilmiştir. Ultrases geçiş değerlerinin, iri ve ince agreganın %100 oranında geri kazanılmış agrega ile değiştirildiği karışımlarda, referans betona göre yaklaşık %8'e varan düşüşler yaşandığı belirtilmiştir ayrıca kür süresinin ise oldukça sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Sıcaklık arttıkça betonların hem basınç dayanımının hem de ultrases geçiş hızının

azaldığı görülmüştür. 200°C ve 400°C'ye maruz kalan numunelerin dayanım değerleri referans numunelere yakın kalırken, 600°C'de %20–56, 800°C'de ise %54–88 arasında dayanım kayıpları meydana geldiği tespit edilmiştir. İnce GKA içeren betonların yüksek sıcaklık deneyi sonrası performans kayıplarının, iri GKA kullanılan karışımlara kıyasla bir miktar daha fazla olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca kür süresinin, basınç dayanımı açısından iri GKA'lı betonlarda önemli bir etkisinin olmadığı; ince GKA'lı betonlarda ise olumlu katkı sağladığı belirtilmiştir.

Çınar Resuloğulları vd., (2021), gerçekleştirdikleri çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelerde sıcaklığın artması ile birlikte ağırlık kaybı oluştuğunu açıklamakla birlikte, GKA'nın %25 kullanımının ağırlık kaybını azalttığını, bu oranın üzerinde yapılan ikamelerde kayıpların tekrar arttığını belirtmişlerdir. %25 GKA kullanımında eğilme dayanımında %2.29, basınç dayanımında ise %4,5 düzeyinde bir kayıp raporlamışlardır. GKA oranının yükselmesiyle eğilme ve basınç dayanımlarının paralel bir şekilde azalma eğiliminde hareket ettiğini vurgulamışlardır. Özetle, yüksek sıcaklık altında, %50'nin üzerindeki GKA kullanımında dayanım kayıplarının belirginleştiği, %25 GKA kullanımının, mekanik kayıpların düşük olduğu ve yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği için uygun olduğu ifade edilmiştir.

Elmaağaç (2024) gerçekleştirdiği çalışmada, atık beton agregalarının hafif harç üretimindeki potansiyeli incelenmiştir. Genleştirilmiş perlit kullanılarak üretilen harçlarda eğilme dayanımının 1,56–4,88 MPa; basınç dayanımının ise 6,9–27,2 MPa aralığında değiştiği görülmüştür. Bu değerlerin, söz konusu hafif harçların tesviye betonu, sıva ve kaplama uygulamaları gibi alanlarda kullanılabileceğinin daha mantıklı olduğunu göstermektedir. Su emme ve boşluk oranları incelendiğinde, standart kum ile atık beton agregası kullanılan karışımların benzer davranışlar sergilediği görülmüştür. Ancak genleştirilmiş perlit ilavesi yapıldığında ise su emme oranının yaklaşık %48,4'e, boşluk oranının ise %41,9'a kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında harçların mekanik testlerinde önemli miktarda düşüşler meydana geldiği belirlenmiştir. Eğilme dayanımında %76'ya, basınç dayanımında ise %51'e varan azalmalar gözlenmiştir. Genleştirilmiş perlitin agrega olarak kullanımının yüksek sıcaklık altında eğilme dayanımını olumsuz etkilediği ve basınç dayanımı üzerinde de belirgin bir iyileştirme sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

Anuk (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, metakaolinin beton ve harç özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Standart kür koşullarında üretilen numunelerde en yüksek basınç ve eğilme dayanımları çoğunlukla %15 oranında metakaolin içeren karışımlarda elde

edilmiştir; bu oran arttıkça basınç ve eğilme dayanımı azalmıştır. Hızlandırılmış kür uygulamalarında ise en dikkat çeken dayanım artışı %10 metakaolin içeren karışımlarda oluşmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi değerlendirildiğinde, 200°C'ye maruz bırakılan tüm numunelerde basınç dayanımında belirli bir artış meydana geldiği ve bu artışın özellikle %15 metakaolin içeren numunelerde daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Dayanımdaki bu artış; bünyedeki serbest suyun buharlaşarak uzaklaşması sonucuna bağlı olarak Van der Waals kuvvetlerinin daha etkin hale gelmesi ve tanecikler arası bağların kuvvetlenmesi ile oluştuğu açıklanmıştır. Buna karşın sıcaklık artışı ile 500°C ve 700°C sıcaklık seviyelerinde tüm serilerde dayanım kaybı gözlenmiştir. Ayrıca metakaolin katkılı harçların, kontrol serisine kıyasla yüksek sıcaklık sonrası daha fazla dayanım kaybı yaşadığı ifade edilmiştir. Bu durum, metakaolinli harçların düşük geçirimsizliği sebebi ile oluşan su buharının yapıdan uzaklaşmasının engellenmesi ve iç basınç artışına bağlı olarak çatlak v. hasar oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Bölük (2011) tarafından yapılan araştırmada, metakaolinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Portland çimentosunun ağırlıkça %10 oranında metakaolin ile yer değiştirilmesi sonucunda 28 günlük eğilmede çekme dayanımında normal numunelere göre yaklaşık %5,4 oranında artış olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş metakaolinlerle %10 ikame yapılan serilerde basınç dayanımlarında genel olarak önemli bir farklılık gözlenmemiştir. İkame oranı %20'ye çıkarıldığında ise mekanik performansın daha belirgin şekilde yükseldiği görülmüştür. Bu karışımlarda 28 günlük eğilme dayanımı yaklaşık %9,8, basınç dayanımı ise %15,6 oranında artış göstermiştir.

Şenel (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, metakaolin katkılı kendiliğinden yerleşen betonlarda farklı kür koşullarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre metakaolin oranındaki artış, hem 28 hem de 56 günlük basınç dayanımlarında iyileşme sağlamıştır. Benzer eğilim eğilme ve yarma-çekme dayanımlarında da gözlenmiştir. Sıcak nem kürünün uygulanması, özellikle kısa sürede uygulanabilen, etkili ve pratik bir yöntem olarak betonların dayanım gelişimine önemli katkı sağlamıştır. Ancak bu etkinin metakaolin içermeyen betonlarda daha belirgin olduğu, metakaolin oranı arttıkça sıcak nem kürünün etkisinin daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Yıldırım (2021) çalışmasında, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış normal betonlarda silis dumanı, metakaolin ve uçucu külün birlikte kullanımının dayanım üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Farklı uçucu kül oranlarıyla üretilen numunelerde en uygun ultrases geçiş hızı değerinin %10 uçucu kül içeren karışımlarda olduğu belirlenmiştir. Metakaolin oranının artırılması durumunda uçucu kül miktarının ise kontrollü şekilde ayarlanması gerektiği belirtilmiştir. Metakaolin oranının değiştirildiği numunelerde en yüksek ultrases geçiş hızının %20 metakaolin içeren karışımlarda ölçüldüğü belirtilmiştir. Genel olarak metakaolin ve uçucu kül oranlarının artması porozite değerlerinin yükselmesine neden olmuştur. En yüksek ultrases geçiş hızı, uçucu kül oranının düşük (%10) ve metakaolin oranının yüksek (%20) olduğu numunelerde elde edilmiştir. Bu durum, metakaolinin ince tane yapısı sayesinde boşlukları daha fazla doldurarak kompasiteyi artırması ile açıklanmıştır. %30 uçucu kül içeren serilerde, %10 metakaolin katkılı karışımın özellikle 28 ve 90 günlük dayanımlarda belirginleştiği anlaşılmıştır. Uçucu kül oranının %30 seviyesinde kullanılması durumunda metakaolin oranının %20'ye çıkarılmasının gereksiz olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisine maruz kalacak yapılarda yeterli performans için yaklaşık %15 metakaolin kullanımının yeterli ve uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Bulut (2023) gerçekleştirdiği çalışmada, doğal perlit agregası kullanılarak üretilen hafif betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelemiştir. Betonlarda %10 ile %100 arasında değişen oranlarda doğal perlit kullanılmış ve 28, 56 ve 90 günlük deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, en yüksek basınç dayanımının %10 perlit içeren 90 günlük numunede (62,42 MPa) elde edildiğini göstermiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri perlitli betonların iyi veya mükemmel kalitede olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca kür süresinin artmasıyla dinamik elastisite modülü yükselirken, kılcal su emme değerleri azalmıştır. %100 perlit içeren betonun elektriksel özdirenci kontrol betonundan yaklaşık %140 daha yüksek bulunmuştur. Bunun yanında %75 ve %100 perlit içeren betonların asit ve sülfat etkilerine karşı daha dayanıklı olduğu belirlenmiş, agresif ortamlara karşı kritik perlit oranının ise %30 olduğu ifade edilmiştir.

Ozturk vd. (2026), gerçekleştirdikleri çalışmada, ham perlit ve geleneksel agregası kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. 600°C'ye maruz bırakılan betonların basınç dayanımındaki azalma miktarının geleneksel agregası kullanılan betonlarda yaklaşık %34 ila %42 arasında iken, perlit agregalı betonlarda ise %10 ila %13 arasında olduğunu rapor etmişlerdir. Aynı sıcaklık için kütle kaybının ise geleneksel agregalı betonlarda yaklaşık %25 ila %40 arasında olduğu, perlit agregalı betonda ise %47 mertebesinde olduğu raporlanmıştır. Ultrases geçiş hızı sonuçları incelendiğinde, 600°C'de geleneksel betonlarda %49 ila %60, perlit içerikli betonlarda ise sadece %16 ila %17 oranında

azalma olduğu belirtilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin daha az mikro çatlak ve daha az bozulma sergilediğini ortaya koymuşlardır. Genel olarak elde edilen bulgular, ham perlit agregasının betonun yüksek sıcaklık altındaki performansını olumlu yönde etkilediğini, termal direncini ve iç yapısal kararlılığını artırdığını ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, yüksek sıcaklığa maruz kalan yapılarda sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceği belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Araştırmada icra edilen tüm beton üretimlerinde, TS EN 197-1 (2012) standardında tanımlanan CEM I 42,5 R sınıfı bir çimento kullanılmıştır. Beton üretimlerinde yer alan çimentoya özgü özellikler Tablo 1’de takdim edilmiştir.

Tablo 1. Çimento bileşimi ve bazı özellikleri

Bileşen	%
CaO	61,54
SiO ₂	18,61
Fe ₂ O ₃	3,18
Al ₂ O ₃	4,81
Kızdırma kaybı	3,09
Basınç dayanımı (MPa)	
7 gün	41,5
28 gün	52,3

3.1.2. Uçucu kül

Hafif beton üretimlerinde kullanılan F tipi uçucu kül (UK), Kütahya-Seyitömer termik santralinden tedarik edilmiştir. Kullanılan uçucu külün daha önceki çalışmada (Kandil, 2021) elde edilen kimyasal bileşimi Tablo 2’de verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre kullanılan uçucu kül F tipi bir uçucu küldür.

Tablo 2. Uçucu külün bileşimi

Bileşen	%
CaO	4,35
SiO ₂	49,4
Fe ₂ O ₃	11,3
Al ₂ O ₃	19,9
CO ₂	4,85
MgO	3,86
K ₂ O	2,50
SO ₃	1,73

3.1.3. Metakaolin

Hafif beton üretimlerinde kullanılan metakaolin (MK), özel bir şirketten temin edilmiştir. Kullanılan metakaoline ait kimyasal bileşim daha önceki çalışmada (Kandil, 2021) elde edilmiş olup Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Metakaolinin bileşimi

Bileşen	%
CaO	0,30
SiO ₂	51,4
Fe ₂ O ₃	0,70
Al ₂ O ₃	45,2
V ₂ O ₅	0,28
TiO ₂	1,88
SnO ₂	0,05
P ₂ O ₅	0,08
SrO	0,02
K ₂ O	0,12

3.1.4. Süperakışkanlaştırıcı

Hafif beton üretimlerinde kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi modifiye sülfonat hammaddelerinden elde edilmiş olup yüksek oranda su azaltıcı ve mukavemet artırıcı özelliklere sahiptir. Bu kimyasal katkı maddesinin kullanılmasının amacı betonların işlenebilirliği arttırmak ve çökmeyi belli bir aralıkta tutmaktır. Tüm üretimlerde eşit dozajda kullanılmıştır.

3.1.5. Agregalar

Gerçekleştirilen çalışmada gerçekleştirilen tüm beton üretimlerinde ana agregalar olarak doğal perlit agregası (DPA) kullanılmıştır. 0-4 mm, 4-12 mm ve 12-15 mm olacak şekilde üç farklı tane büyüklüğünde bu agregalar tedarik edilmiştir. Geri kazanılmış agregalarda (GKA), aynı büyüklüğe sahip üç farklı tane boyutunda elde edilmiştir. Beton üretimlerinde kullanılan tüm agregalar tiplerine ait fotoğraf Şekil 4'te verilmiştir.

Beton üretimlerinde TS 802 (1985) standardı baz alınarak karışım agregasının granülometrisi elde edilmiştir. Standarttaki sınır eğrileri arasında kalacak şekilde beton üretimlerine ait granülometri eğrileri oluşturulmaya çalışılmıştır. %25 iri DPA, %25 orta DPA ve %50 ince

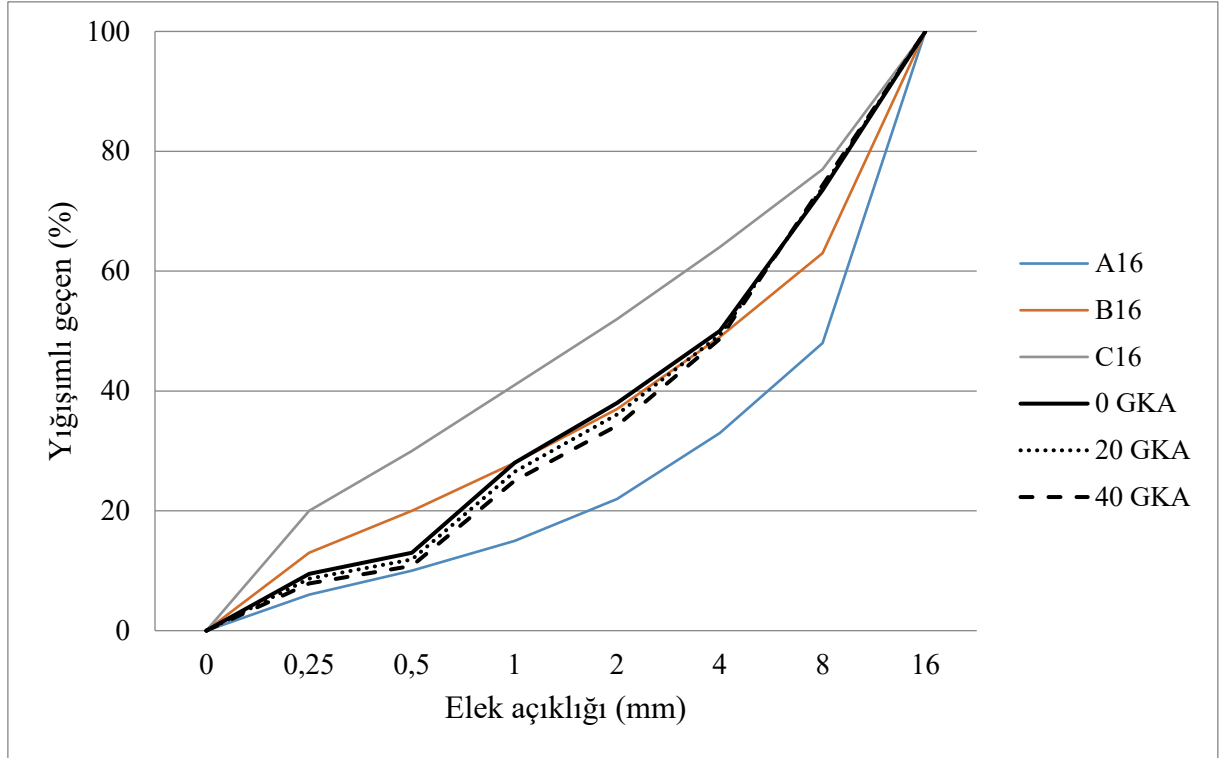
DPA karışımı ile oluşturulan karışım agregası granülometrisinin bu şartı sağladığı görülmüştür. İri, orta ve ince agregaların granülometrileri (örneğin iri DPA ile iri GKA'nın granülometrisi) birbirine oldukça yakın olduğundan ayrıca bir eleme veya ayırma işlemine gerek kalmadan ikame direkt olarak belirtilen oranda hacimce gerçekleştirilmiştir. Agregalar ikame edilirken sadece bir büyüklükteki agrega tipi değil tüm farklı büyüklüklerdeki agrega tipleri aynı anda ikame edilmiştir. Örneğin %20 GKA ikameli beton demek ile, iri, orta ve ince agregaların her birinin, aynı boyuttaki geri kazanılmış agregalarla %20 oranında ikame edildiği kastedilmektedir.



Şekil 4. Hafif betonların üretiminde kullanılan agregalar

Her bir farklı agrega içeriğine sahip hafif betonlardaki agrega granülometrisi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, GKA içermeyen betonun ve farklı oranlarda GKA ikame edilen betonların agrega granülometri eğrileri birbirine oldukça yakın olduğu görülebilir. Agregaların özgül ağırlıkları ve su emmeleri laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler neticesinde bulunmuş olup bu değerler Tablo 4'te sunulmuştur. Çalışmalarda kullanılan

GKA'nın Los Angeles aşınma deneyi sonucunda aşınma kaybı değeri 26,84 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Karışımında kullanılan agregaların granülometri eğrileri

Tablo 4. Üretimde kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri

	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
İri GKA	2,54	4,99
Orta GKA	2,51	5,02
İnce GKA	2,42	8,07
İri DPA	1,89	4,91
Orta DPA	1,95	4,63
İnce DPA	2,00	4,14

3.1.6. Su

Deneysel çalışma kapsamında beton üretimleri için içilebilir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Hafif beton üretimleri ve numunelerin hazırlanması

Gerçekleştirilen çalışmada, doğal perlit agregası kullanılarak imal edilen hafif betonların birim hacim ağırlıkları, mekanik performansları, öz direnç ve kılcal su emme davranışları ile yüksek sıcaklık etkisine karşı dayanıklılıklarının, GKA ikamesiyle nasıl değişim gösterdiği araştırılmıştır. GKA ikamesi hem ince hem iri agregalarda aynı anda yapılmıştır. Ayrıca GKA ikameli hafif betonlarda %10 oranında UK ve MK kullanımının da hafif betonların özelliklerine etkisi de incelenmiştir. Araştırmada üretilen betonların çimento dozajı 350 kg/m^3 , su/çimento oranı ise 0,55 olarak sabit tutulmuştur. Bu değerler ön dökümler neticesinde belirlenmiştir. Beton karışım tasarımlarında TS 2511 (1977) ve TS EN 206-1 (2002) standartlarındaki kriterler dikkate alınmıştır. GKA %0, %20 ve %40 oranlarında DPA ile ikame edilerek üç farklı agrega içeriğinde betonlar üretilmiştir. Ayrıca %20 ve %40 GKA ikameli hafif betonlarda %10 UK, %10 MK ve %10UK+%10MK içeren betonlarda üretilmiştir. Böylece toplamda dokuz farklı karışıma sahip beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Tüm karışımlarda betonların kıvamını artırmak amacıyla süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi çimento ağırlığının %0,5'i oranında karışımlara ilave edilmiştir. Bu şekilde üretilen betonların çökme değerlerinin 3,5 cm – 4,5 cm arasında kalması sağlanabilmiştir. Üretimleri gerçekleştirilen betonlara ait karışım oranları Tablo 5'te gösterilmiştir. Tabloda numuneler kodlarla ifade edilmiştir. Kodlamada, başta yer alan sayı beton karışımında GKA'nın ikame oranını göstermektedir. UK0, karışımda uçucu kül kullanılmadığını; UK10 ise çimentonun %10'unun uçucu kül ile ikame edildiğini ifade etmektedir. Benzer şekilde, MK10 da çimentonun %10'unun metakaolin (MK) ile ikame edildiğini göstermektedir.

Tablo 5. Üretilen hafif betonların karışım reçetesi (kg/m^3)

Üretim Kodu	Çimento	UK	MK	Su	DPA, İri	DPA, Orta	DPA, İnce	GKA, İri	GKA, Orta	GKA, İnce
0-UK0-MK0	350				309	319	655	0	0	0
20-UK0-MK0	350				247	255	524	83	82	158
20-UK10-MK0	315	35			246	254	521	83	82	157
20-UK0-MK10	315		35		247	254	522	83	82	158
20-UK10-MK10	280	35	35	192,5	245	253	519	82	81	157
40-UK0-MK0	350				186	191	393	166	164	317
40-UK10-MK0	315	35			184	190	390	165	163	315
40-UK0-MK10	315		35		185	191	392	166	164	316
40-UK10-MK10	280	35	35		184	190	389	165	163	314

Karışım hazırlama aşamasında öncelikle tartılan iri agregalar, sonrasında orta büyüklükteki agregalar ve en son ince agregalar beton mikserine dökülerek kuru halde yaklaşık bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra agregaları doyumak için gerekli doyma suyu ilave edilerek iki dakika boyunca karıştırılarak agregaların doyma suyunu çekmesi için yaklaşık 15 dakika beklendikten sonra tekrar bir dakika karıştırılmıştır. Beton yapımına hazır hale gelen agregaların üzerine bağlayıcı madde (çimento, uçucu kül, metakaolin) ve kimyasal katkı ilave edilen karışım suyu dökülerek beş dakika boyunca tüm malzemeler karıştırılmıştır. Hafif betonların üretiminde kullanılan karıştırıcı Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Hafif betonların üretiminde kullanılan karıştırıcı

Hazırlanan beton karışımları üzerinde taze halde birim hacim ağırlık ve çökme deneyleri yapıldıktan sonra beton mikserde bir kez daha kısa süreli karıştırıldıktan sonra kalıplara alınmaya hazır hale getirilmiştir. Numune kalıplarının iç kısımları daha önceden yağlanarak döküme hazır hale getirilmiştir. Numuneler kalıplarına iki aşamada dökülmüştür. Önce yarısına kadar beton doldurulan numuneler 25 kez şiş ile şişlenmiş, daha sonra diğer yarısı da doldurulan numune kalıbında beton tekrar 25 kez şişlendikten sonra yüzeyi düzelterek kalıba alma işlemi tamamlanmıştır. Bir üretimde 16 adet 10 cm ayrıtında küp numune ve 4 adet Ø10x20 cm boyutlu silindir numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece bu deneysel çalışma boyunca deneme ön dökümleri hariç toplamda 180 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Tek bir seferde üretilen tek bir içeriğe sahip numuneler Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Bir seferde üretilen numuneler

Numuneler kalıplarında bir gün bekletildikten sonra kompresör yardımı ile kalıplarından çıkarılarak 20°C sıcaklığında ayarlanmış olan kür havuzunda deney yapılacak güne kadar bekletilmiştir. Numunelerin kürlendiği kür havuzu Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Numunelerin kürlendiği kür havuzu

Basınç dayanımı deneyi için 2'si 28 gün sonunda, 2'si 90 gün kür sonunda olacak şekilde toplamda 4 adet numune kullanılmıştır. 2'şer adet 250°C, 500°C ve 750°C olmak üzere toplamda 6 adet numune yüksek sıcaklık deneylerinde kullanılmıştır. 28 gün ve 90 gün kür sonunda olmak üzere 2'şer adet numune kılcallık deneyinde kullanılmıştır. Kılcallık deneyinde kullanılan numunelerden de veri alınarak kalan küp numuneden su emme ve kuru birim ağırlıklar tayin edilmiştir. Üretilen 4 adet silindir numunenin ise 2'si 28 gün 2'si 90 gün kür sonunda önce özdirenç deneyi ve sonrasında yarmada çekme dayanımı deneyinde kullanılmıştır.

3.3. Gerçekleştirilen Deneyler

Bu bölümde üretilen beton numuneler üzerinde yapılan taze ve sertleşmiş haldeki beton deneyleri anlatılacaktır.

3.3.1. Birim ağırlık deneyi

Deneyin gerçekleştirilmesinde 10 cm boyutlu küp numuneler kullanılmıştır. Deney günü kür havuzundan çıkarıldıktan sonra suya doymun durumdaki numunelerin yüzeyleri bez yardımıyla silinerek yüzey suları kurutulmuştur. Ardından numunelerin hacimlerinin belirlenmesi amacıyla Arşimet prensibine dayalı bir terazi kullanılarak su içerisindeki tartımları yapılmıştır. Daha sonra numuneler sabit kütleye ulaşınca kadar fırında kurutulmuş ve kuru haldeki ağırlıkları tartılmıştır. Deneylerde kullanılan tartı Şekil 9'da verilmiştir.

Kuru haldeki ağırlığın ölçülen hacme bölünmesiyle numunelerin kuru birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Deney 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerin kurutulmasında kullanılan fırına ait görsel Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. Tartımlarda kullanılan 0,1 g hassasiyetli terazi



Şekil 10. Deneylerde kullanılan fırın

3.3.2. Çökme deneyi

Çökme deneyi TS EN 12350-2 (2010) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney kapsamında 30 cm yüksekliğe sahip çökme konisi öncelikle hacminin yaklaşık üçte biri oranında taze beton ile doldurulmuş ve yerleştirilen beton 25 kez şişleme çubuğu ile sıkıştırılmıştır. Ardından kalıp hacminin üçte ikisi doldurularak aynı şekilde 25 kez şişleme işlemi tekrarlanmıştır. Son aşamada koni tamamen beton ile doldurulmuş ve tekrar 25 defa şişlenmiştir. Üst yüzey mala

yardımla tesviye edildikten sonra çökme hunisi dikkatli bir şekilde düşey doğrultuda yukarı kaldırılmıştır. Deney esnasında çekilen fotoğraf Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Çökmenin ölçülmesi

3.3.3. Basınç dayanımı deneyi

Çalışmada beton numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) standardı hükümleri çerçevesinde belirlenmiştir. Deneylerde 100 mm kenar uzunluğuna sahip küp numuneler kullanılmıştır. Ölçümler, 28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamlayan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deney öncesinde numuneler kür havuzundan çıkarılmış ve yüzey neminin giderilmesi amacıyla laboratuvar ortamında birkaç saat tamamen kuruması için bekletilmiştir. Yüzeyleri kuruyan numuneler daha sonra yükleme cihazına yerleştirilerek tek eksenli basınç etkisi altında kırılincaya kadar yüklenmiştir. Yüksek sıcaklık uygulamasına tabi tutulan örneklerin dayanım değerleri de aynı deney prosedür izlenerek belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyleri, 100 ton yükleme kapasitesine sahip, ELE marka otomatik kontrollü bir yükleme presisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine ilişkin görsel Şekil 12’de yer almaktadır.



Şekil 12. Basınç dayanımı testi

3.3.4. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Çalışmada betonların yarmada çekme dayanımları TS EN 12390-6 (2010) standardı esas alınarak belirlenmiştir. Deneyler, 100 mm çap ve 200 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler üzerinde ölçülmüştür. Ölçümler hem 28 günlük hem de 90 günlük kür süresini tamamlayan örnekler için gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine ilişkin görsel Şekil 13’te sunulmuştur.



Şekil 13. Yarmada çekme dayanımı testi

Deney 6ncesinde numunelere ait geometrik 6l67ler cihazın yazılım sistemine tanımlanmış, y6kleme işlemi tamamlandıktan sonra yarmada 6ekme dayanımı değerleri dijital ekran 6zerinden doğrudan okunarak kaydedilmiştir.

3.3.5. Elektriksel 6zdiren6 deneyi

6alışmada 6retilen hafif beton numunelerin elektriksel 6zdiren6 değerleri belirlenerek betonun ge6irimsizlik ve dayanıklılık 6zellikleri hakkında değerlendirme yapılmıştır. Deneyler, 28 ve 90 g6n k6r s6resini tamamlayan numuneler 6zerinde uygulanmıştır. 6l676m 6ncesinde numunelerin y6zeyleri bir bez yardımı ile kurutulmuştur. Numuneler deney d6zeneğine yerleştirilmiş ve 60 V elektriksel potansiyel fark altında beton i6inden ge6en akım cihazlar yardımıyla 6l676lm6řt6r. Elde edilen voltaj, akım değerleri ve numune geometrisi kullanılarak numunelerin elektriksel 6zdiren6leri hesaplanmıştır. Deney ASTM C 1760 standardı esasları dikkate alınarak ger6ekleştirilmiştir. 6zdiren6 deneyine ilişkin g6rsel şekil 14'te verilmiştir.



şekil 14. Elektriksel 6zdiren6 deneyi d6zeneği

3.3.6. Kılcallık deneyi

Betonların suyu kılcal etkiyle emme davranışı, ASTM C 1585 (2013) standardı esas alınarak belirlenmiştir. Deneyde 100 mm boyutlu k6p numuneler kullanılmış ve 28 ile 90 g6nl6k k6r s6resini tamamlayan 6rneklerden her yaş grubu i6in ikişer adet olmak 6zere toplam d6rt numune deneye tabi tutulmuştur. Deney 6ncesinde numuneler k6r ortamından 6ıkarılmış,

ardından 70°C sıcaklıkta fırında sabit kütle elde edilinceye kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar koşullarında bekletilerek sıcaklıklarının düşmesi sağlanmıştır.

Kılcal su geçişinin yalnızca tek yüzeyden gerçekleşmesi amacıyla numunelerin yan yüzeyleri su geçirimsiz bant ile izole edilmiştir. Kuru ağırlıkları kaydedilen numuneler, içerisinde su bulunan kapta yer alan metal destekler üzerine yerleştirilmiş ve yalnızca alt yüzeyleri birkaç milimetre su ile temas edecek şekilde konumlandırılmıştır. Zamanla meydana gelen kütle artışları iki saat boyunca belirli aralıklarla tartılarak ölçülmüş ve elde edilen verilerden kılcallık (kılcal su emme) katsayısı hesaplanmıştır. Deney düzeneğine ilişkin görsel Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Kılcallık katsayısı tayini deney düzeneği

Tartımlar numune suyla temas ettirildikten 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60 ve 120. dakikalar sonunda yapılmıştır. Her bir zaman için ölçülen kütle değerlerinden, numunelerin etüv kurusu başlangıç ağırlıkları çıkarılarak ilgili sürede emilen su miktarı belirlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak kılcallık katsayısı hesaplanmıştır. Kılcallık katsayısının belirlenmesinde Eşitlik 1'den yararlanılmıştır.

$$\frac{Q}{A} = kx\sqrt{t} \quad (1)$$

Bu ifadede;

t , numunenin su ile temasından itibaren geçen süreyi (s),

A , suya maruz kalan yüzey alanını (mm^2),

Q , belirli sürede emilen su miktarını (g),

k , ise kılcallık katsayısını ($\text{mm/s}^{0.5}$) temsil etmektedir.

Veriler, ASTM C 1585 (2013) standardında önerilen yöntem doğrultusunda değerlendirilmiş; doğrusal regresyon analizi uygulanarak kılcallık katsayısı $\text{mm/s}^{0.5}$ biriminde hesaplanmıştır.

3.3.7. Su emme deneyi

Sertleşmiş beton numunelerinin su emme davranışının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, TS EN 12390-7 (2019) standardı dikkate alınmıştır. Deneyde kullanılacak numunelerden kürünü tamamlayan numuneler öncelikle yaklaşık 105°C sıcaklıktaki etüvde, nem kalmayacak şekilde bir gün boyunca kurutulduktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerin etüv kurusu kütlelerinin (W_1) hassas terazi ile ölçümü sağlanmıştır.

Kuru kütleleri ölçülen numuneler, tüm yüzeyleri su ile temas edecek şekilde su tankına yerleştirilmiş ve 48 saat süreyle su içerisinde bekletilmiştir. Süre sonunda numuneler sudan çıkarılmış, yüzeylerindeki serbest su dikkatlice alınarak doymuş yüzey kuru (DYK) duruma getirilmiş ve bu durumdaki kütleleri (W_2) hassas terazi ile ölçülmüştür. Beton numunelerinin su emme oranı Eşitlik 2'deki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$Su\ Emme\ (\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

W_1 : Etüv kurusu numune kütlesi (g)

W_2 : 48 saat su içerisinde bekletildikten sonraki doymuş yüzey kuru kütle (g)'dir.

Her karışım grubunda birden fazla numune üzerinde ölçüm yapılmış ve hesaplamalarda ortalama değerler esas alınmıştır.

3.3.8. Yüksek sıcaklık direncinin belirlenmesi

Beton numunelerin yüksek sıcaklığa karşı olan direncinin belirlenmesi için, beton numunelerimizin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki ağırlık kaybı, basınç mukavemeti kaybı değerlendirilmiştir. Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin fiziksel görünüşleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Deneylerde her bir karışım için 2 adet 100 mm boyutundaki küp numuneler kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yüksek sıcaklık fırını Şekil 16’da verilmiştir.



Şekil 16. Yüksek sıcaklık fırını

Yüksek sıcaklık deneylerinde, öncelikle 100°C fırında numuneler kurutulmuştur. Daha sonra numuneler programlanabilir fırın içerisine yerleştirilmiştir. Isıtma işlemi yaklaşık 4°C/dk hızla gerçekleştirilerek, numuneler belirlenen hedef sıcaklıklara (250°C, 500°C ve 750°C) kontrollü olarak yükseltilmiştir. Fırın iç sıcaklığı hedef değere eriştikten sonra numuneler bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Sonrasında fırın kapağı açılmış ve numunelerin laboratuvar ortamında soğuması sağlanmıştır. Oda sıcaklığına ulaşan numuneler üzerinde önce ağırlıkları tartılarak ağırlık kayıpları daha sonra basınç dayanımı deneyi uygulanarak basınç dayanımı kayıpları belirlenmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde yapılan deneylerden elde edilen veriler tablolar halinde sunulmuştur. Veriler sunulurken beton tipleri kodlamalar ile sunulmuştur. Kodlamalarda baştaki sayı GKA ikame oranını, ilk tireden sonraki UK ve yanındaki sayı uçucu külün yüzde kaç oranında çimento ile ikame edildiğini, ikinci tireden sonraki MK ve yanındaki sayı ise metakaolinin yüzde kaç oranında çimento ile ikame edildiğini göstermektedir.

4.1. Birim ağırlık deneyi bulguları

Üretilen beton numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Birim ağırlık deney sonuçları

Beton tipi	Kuru birim ağırlık, g/cm ³
0-UK0-MK0	1,76
20-UK0-MK0	1,83
20-UK10-MK0	1,81
20-UK0-MK10	1,82
20-UK10-MK10	1,79
40-UK0-MK0	1,88
40-UK10-MK0	1,86
40-UK0-MK10	1,87
40-UK10-MK10	1,85

4.2. Çökme deneyi bulguları

Üretilen betonların çökme deney sonuçları ve betonlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı Tablo 7’de verilmiştir. Tablodaki SA kısaltması süperakışkanlaştırıcı kullanım oranını belirtmektedir.

Tablo 7. Çökme deney sonuçları

Beton tipi	Çökme, mm	SA, %
0-UK0-MK0	4	0,5
20-UK0-MK0	3,5	
20-UK10-MK0	4	
20-UK0-MK10	3	
20-UK10-MK10	3,5	
40-UK0-MK0	3	
40-UK10-MK0	4	
40-UK0-MK10	2,5	
40-UK10-MK10	2,5	

4.3. Basınç dayanımı deneyi bulguları

Üretilen betonların basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Basınç dayanımı deney sonuçları

Beton tipi	28 günlük basınç dayanımı, MPa	90 günlük basınç dayanımı, MPa
0-UK0-MK0	46,3	51,8
20-UK0-MK0	41,4	48,9
20-UK10-MK0	40,6	49,3
20-UK0-MK10	41,7	50,8
20-UK10-MK10	40,3	46,5
40-UK0-MK0	39,5	48,1
40-UK10-MK0	38,9	48,3
40-UK0-MK10	39,7	48,9
40-UK10-MK10	38,4	45,6

4.4. Yarmada çekme dayanımı deneyi bulguları

Üretilen betonların yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Beton tipi	28 günlük yarmada çekme dayanımı, MPa	90 günlük yarmada çekme dayanımı, MPa
0-UK0-MK0	3,73	4,45
20-UK0-MK0	3,41	4,29
20-UK10-MK0	3,40	4,21
20-UK0-MK10	3,50	4,31
20-UK10-MK10	3,25	3,75
40-UK0-MK0	3,11	3,75
40-UK10-MK0	3,05	3,92
40-UK0-MK10	3,31	4,26
40-UK10-MK10	3,02	3,40

4.5. Kılcallık deneyi bulguları

Üretilen betonların kılcallık deney sonuçları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Kılcallık deney sonuçları

Beton tipi	28 günlük kılcallık katsayısı, $\text{mm/s}^{0,5} [\cdot 10^{-2}]$	90 günlük kılcallık katsayısı, $\text{mm/s}^{0,5} [\cdot 10^{-2}]$
0-UK0-MK0	2,22	1,81
20-UK0-MK0	2,69	2,45
20-UK10-MK0	2,86	2,32
20-UK0-MK10	2,59	2,14
20-UK10-MK10	2,6	1,99
40-UK0-MK0	3,22	2,76
40-UK10-MK0	2,91	2,63
40-UK0-MK10	2,91	2,29
40-UK10-MK10	2,78	2,21

4.6. Elektriksel öz direnç deneyi bulguları

Üretilen betonların elektriksel öz direnç deney sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Elektriksel özdirenç deney sonuçları

Beton tipi	28 günlük elektriksel özdirenç, $\Omega.m$	90 günlük elektriksel özdirenç, $\Omega.m$
0-UK0-MK0	51,8	142,4
20-UK0-MK0	41,6	91,3
20-UK10-MK0	56,5	158,1
20-UK0-MK10	58,9	169,9
20-UK10-MK10	63,3	179,2
40-UK0-MK0	37,8	68,9
40-UK10-MK0	48,5	127,5
40-UK0-MK10	51,6	130,5
40-UK10-MK10	51,6	131,3

4.7. Su emme deneyi bulguları

Üretilen betonların su emme deney sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Su emme deney sonuçları

Beton tipi	28 günlük su emme, %	90 günlük su emme, %
0-UK0-MK0	8,5	5,3
20-UK0-MK0	9,1	5,5
20-UK10-MK0	8,8	5,4
20-UK0-MK10	8,5	5,4
20-UK10-MK10	7,7	4,8
40-UK0-MK0	9,3	6,1
40-UK10-MK0	9,3	5,9
40-UK0-MK10	9	5,8
40-UK10-MK10	8,8	5,6

4.8. Yüksek sıcaklık direnci deneyi bulguları

4.8.1. Basınç dayanımı kaybı deneyi bulguları

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış numunelerin basınç dayanımları Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanımları

Beton tipi	250°C'ye maruz kalan, MPa	500°C'ye maruz kalan, MPa	750°C'ye maruz kalan, MPa
0-UK0-MK0	50,8	47,5	23,4
20-UK0-MK0	46,8	41,8	17,1
20-UK10-MK0	47,2	36,9	15,8
20-UK0-MK10	48,2	35,8	15,7
20-UK10-MK10	44	32,6	12,6
40-UK0-MK0	46,1	34,8	13,1
40-UK10-MK0	45,9	34,7	13
40-UK0-MK10	46	34,3	13
40-UK10-MK10	42,6	30,5	9,8

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı kaybı değerleri Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kaybı

Beton tipi	250°C'ye maruz kalan, %	500°C'ye maruz kalan, %	750°C'ye maruz kalan, %
0-UK0-MK0	1,9	8,3	54,8
20-UK0-MK0	4,3	14,5	65,0
20-UK10-MK0	4,3	25,2	68,0
20-UK0-MK10	5,1	29,5	69,1
20-UK10-MK10	5,4	29,9	72,9
40-UK0-MK0	4,2	27,7	72,8
40-UK10-MK0	5,0	28,2	73,1
40-UK0-MK10	5,9	29,9	73,4
40-UK10-MK10	6,6	33,1	78,5

4.8.2. Ağırlık kaybı deneyi bulguları

Beton numunelerin ağırlık kaybını ölçmek için, öncelikle 100°C'de değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde bekletilerek kurutulduktan sonra ağırlıkları tartılarak ölçülmüştür (W_k). Bu numuneler daha sonra yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra ağırlıklar tekrar ölçülmüştür (W_y). Daha sonra ağırlık kaybı Denklem 3 yardımıyla bulunmuştur.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \frac{W_k - W_y}{W_k} \times 100 \quad (3)$$

Hesaplanan ağırlık kayıpları Tablo 15'te verilmiştir.

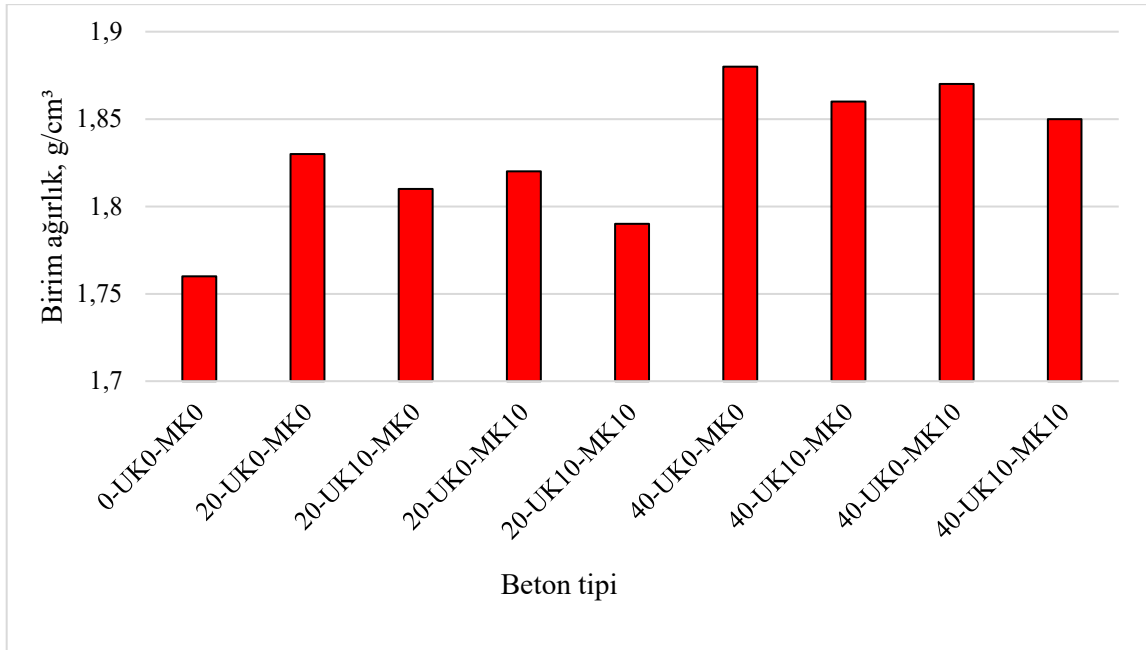
Tablo 15. Yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları

Beton tipi	250 °C ye maruz kalan, %	500 °C ye maruz kalan, %	750 °C ye maruz kalan, %
0-UK0-MK0	3,8	7,9	10,3
20-UK0-MK0	4,6	8,8	11,8
20-UK10-MK0	5,5	8,9	12,2
20-UK0-MK10	5,1	8,8	12,6
20-UK10-MK10	5,6	8,9	13,1
40-UK0-MK0	4,9	8,6	12,7
40-UK10-MK0	6,4	10,8	13,4
40-UK0-MK10	6,4	10,9	13,5
40-UK10-MK10	7,1	11,3	14,6

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Birim ağırlık

Betonlara ait kuru birim ağırlık değerleri Şekil 17’de verilmiştir. Birim ağırlık değerleri 1,76–1,88 g/cm³ aralığında değişmiştir. GKA ikamesinin artışı ile beton birim ağırlıklarında artış meydana gelmiştir. GKA içeren betonlar arasında en düşük birim ağırlık 1,79 g/cm³ değeri ile 20-10UK-10MK betonunda, en yüksek birim ağırlık ise 1,88 g/cm³ değeri ile 40-0UK-0MK betonunda yani mineral katkı içermeyen betonlarda elde edilmiştir. Mineral katkı içermeyen betonlar için, GKA içermeyen betona kıyasla, %20 GKA içeren betonun birim ağırlığındaki artış yaklaşık %4, %40 GKA içeren betonun birim ağırlığındaki artış ise yaklaşık %6,8 bulunmuştur. Uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) mineral katkılarının birim ağırlık üzerindeki azaltıcı etkisinin sınırlı olduğu görülmüştür. Örneğin; 20-UK0-MK0 içerikli beton ile 20-UK10-MK10 içerikli beton arasında 0,04 g/cm³ değerinde yaklaşık %2’lik bir azalma meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 17. Beton numunelerin birim ağırlıkları

Betonun yoğunluğunun azaltılabilmesi için genellikle üç farklı yöntem kullanılabilir. Bunlardan birincisi düşük özgül ağırlığa sahip agregaları betonda kullanmak, ikincisi gaz veya köpüğün beton içinde oluşturulması, üçüncüsü ise ince agregaların karışımdan çıkarılması şeklindedir (Neville and Brooks, 2010). Bu yöntemlerden herhangi biri ile üretilen ve birim

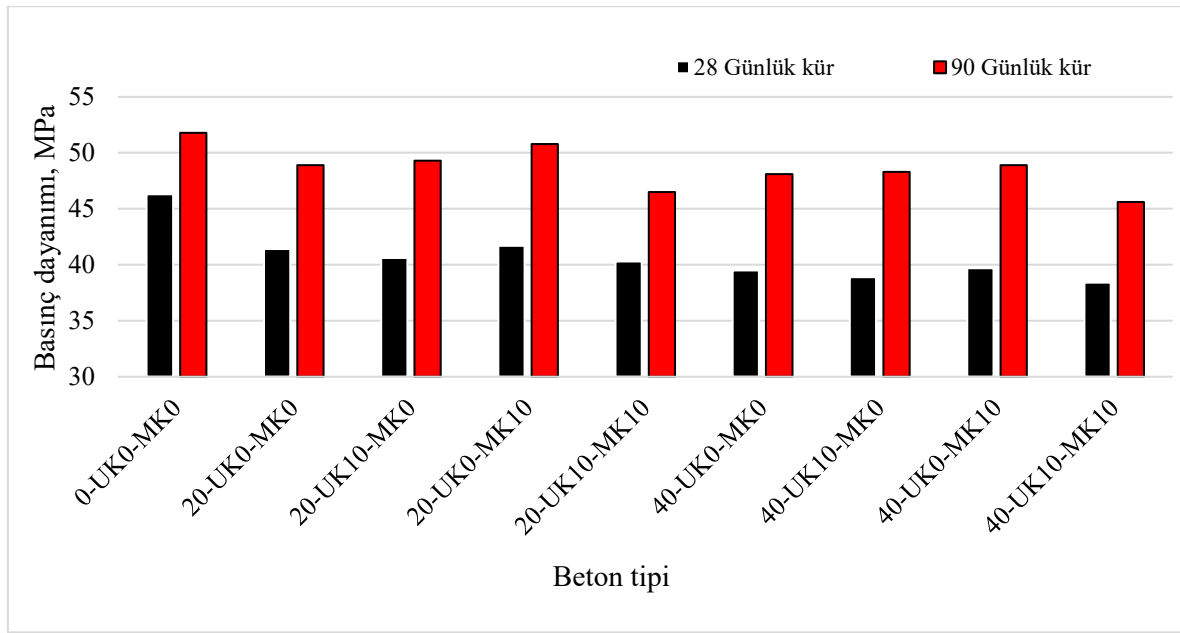
ağırlığı 2000 kg/m³'ten az olan betonlar, hafif beton olarak bilinmektedir (TS EN 206-1, 2002; Eurocode 2, 2004; Omran, 2024). Bu tanıma göre üretilen tüm karışımların kuru birim ağırlıkları 2000 kg/m³'ün altında olduğundan hafif beton sınıfında yer almaktadır. Karışımda DPA'dan daha fazla özgül ağırlığa sahip olan GKA'nın beton üretiminde kullanılmasının neden olduğu birim ağırlıktaki artışlara rağmen hafif betonların üretilebildiği ve GKA'nın da beton içerisinde kullanılması sayesinde sürdürülebilir hafif betonların üretilebileceği görülmüştür. Birim ağırlık açısından irdelendiğinde, UK ve MK kullanımının birim ağırlıkları düşürerek hafif beton üretimine katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca çimento kullanımını azaltmaları, sürdürülebilir beton üretimi açısından da önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Gerek hafif agregaların gerek mineral katkı kullanımının betonların birim ağırlıklarını azalttığı gerçekleştirilen birçok çalışmada görülmüştür (Liao vd., 2026; Timalcina vd., 2026). Hafif betonlarda UK ikame oranı artışı ile betonların yoğunluğunun azaldığı belirtilmiştir (Zhang vd., 2026). MK'nın hafif betonlarda kullanılmasının ise yoğunluk üzerinde farklı etkiler meydana getirdiği görülmüştür. Yapılan bir çalışmada; 0-2 mm boyutunda taban külünün agrega olarak kullanılmasıyla üretilen hafif betonlarda MK ikame oranının %0'dan %20'ye çıkması betonların yoğunluğunu pek fazla değiştirmemiş ve yoğunluk 1790 kg/m³ düzeyinde kalmıştır. Aynı çalışmada taban külünün 0-5 mm boyutunda agrega şeklinde kullanılarak üretildiği hafif betonlarda, %20 MK ikamesi ile beton yoğunluğunun %7 oranında arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, yine aynı çalışmada, 0-5 mm boyutlu yapay genleştirilmiş şistin agrega olarak kullanımı ile üretilen hafif betonlarda ise metakaolin ikamesinin hafif betonların birim ağırlığını düşürdüğü raporlanmıştır (Kim vd., 2012). Sonuç olarak, MK hafif beton üretimlerinde kullanılmasının agrega tipine ve agrega boyutuna göre betonun birim ağırlığını farklı şekilde etkileyebileceği literatürde ortaya koyulmuştur. Bizim çalışmamızda bulunan eğilimlerinde literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

5.2. Basınç dayanımı

Üretilen beton numunelerin 28 ve 90 gün kür sonunda elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 18'de sunulmuştur. Kontrol karışımında (0-UK0-MK0) 28 günlük basınç dayanımı 46,3 MPa olarak ölçülmüştür. 20-UK0-MK0 betonunun 28 günlük basınç dayanımı 41,4 MPa olup kontrol betonuna göre %10,6 oranında daha düşük ölçülmüştür. 40-UK0-MK0 betonunda ise 28 günlük dayanım 39,5 MPa olup kontrol betonuna kıyasla %14,7 civarında azalma göstermiştir. Literatürde, geri dönüştürülmüş agreganın beton üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarda, 28 günlük kür sonuçlarına göre, %25 ve %50 iri GKA kullanım oranlarında

basınç dayanımında %10–20 aralığında azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Çalışmada %25 ve %50 oranları iri agregayı temsil ettiğinden ikame edilen toplam oran aslında bu değerlerin yaklaşık yarısına tekabül etmektedir. Yani %50 ikame denilirken toplam agreganın yaklaşık %25'i ikame edilmiş aslında (Medina, 2014). Çalışmamızdan elde edilen sonuçlar bu sonuçlar ile kıyaslandığında hafif betonlarda GKA ikamesinin basınç dayanımına etkisinin, geleneksel betonlardan daha az olduğu sonucuna varılabilir. GKA kullanımının %40 gibi ciddi bir seviyeye çıkmasıyla basınç dayanımında oluşan %15 azalma sürdürülebilir beton üretiminde GKA kullanımının etkilerinin telafi edilebilecek düzeyde olduğunu göstermektedir. 90 gün kür gören betonların basınç dayanımları incelendiğinde 0-0UK-0MK kodlu kontrol betonunun basınç dayanımının 51,8 MPa elde edildiği, %20 ve %40 GKA ikamesinde ise basınç dayanımlarında sırasıyla %5,6 ve %7,1 düzeylerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bulunan bu oranların 28 gün kür gören numunelere kıyasla daha az olduğu açığa çıkmıştır. Döküm yapılmadan önce suya doymun hale gelmesi için doyma suyu agregalara önceden ilave edilmiştir. Gözenekli yapıya sahip DPA ve GKA nedeniyle agregaların emdiği suyun normal agregalara nazaran fazla olması iç kürlenme etkisini daha fazla artırmaktadır (Agostini vd., 2010). Bu sayede kür süresinin uzamasıyla birlikte arayüzey geçiş bölgesinde, daha mukavim ve daha yoğun bir yapı meydana gelmektedir. Bu durum, kür süresinin artmasıyla birlikte GKA kullanımının basınç dayanımındaki olumsuz etkisinin azaldığını göstermektedir.

Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması betonların basınç dayanımlarında ortalama olarak %19,6 oranında bir artışa neden olmuştur. Bu artış ile 90 gün kür gören numuneler arasında 45,6 MPa ile en düşük dayanıma sahip olan 40-UK10-MK10 numunesinin bile 28 gün kür gören tüm betonlardan (0-UK10-MK10 betonu hariç) daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Yani %40'a varan oranlarda GKA kullanımında bile kür süresinin uzatılmasının basınç dayanımı kaybını ciddi seviyede azalttığı ve GKA kullanımına olanak tanıdığı sonuçlardan görülebilmektedir.



Şekil 18. Beton numunelerin basınç dayanımları

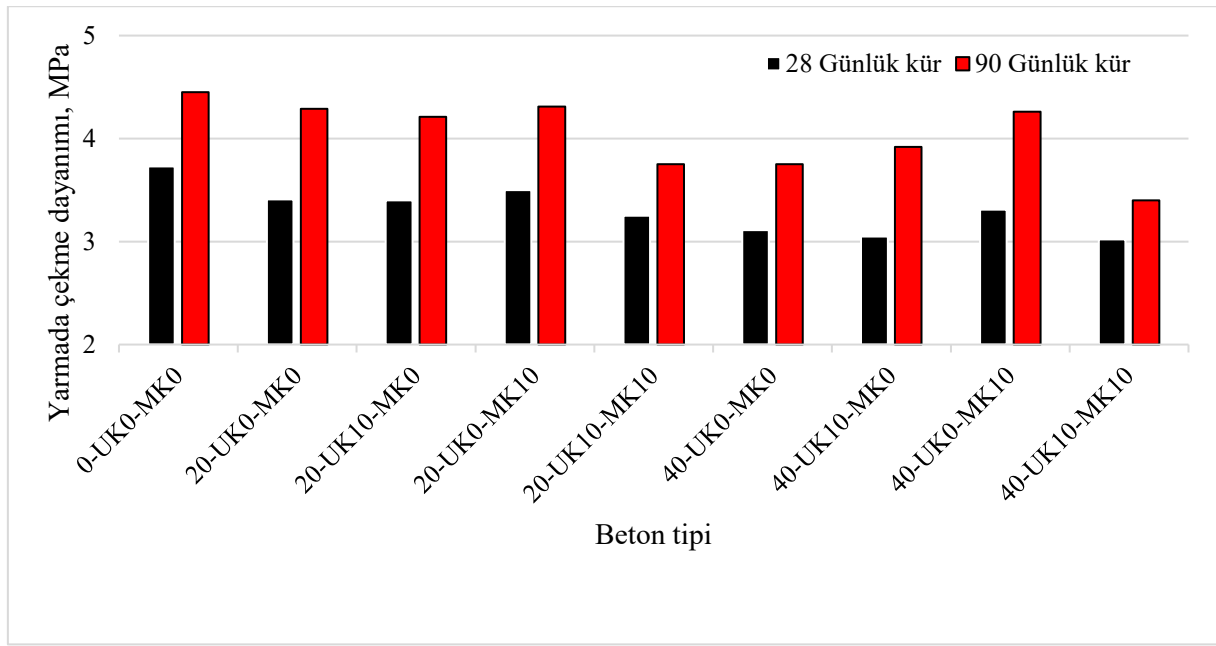
MK kullanımıyla birleşenlerin toplam ağırlığı azalmasına rağmen, daha yoğun bir yapı oluşması nedeniyle betonların birim ağırlıklarının önemli ölçüde etkilenmediği buna karşın %10 MK ikamesinin mukavemetin ortalama olarak %1,72 oranında artmasına neden olduğu hesaplanmıştır. Maghfouri vd. (2021) çalışmasında, uçucu külün düşük özgül ağırlığı ve puzolanik reaksiyonlarının yavaş ilerlemesi nedeniyle, hafif betonlarda özellikle erken yaşlarda dayanım gelişiminin sınırlı kaldığını belirtmişlerdir. Metakaolinin %10 oranında çimento ile ikame edildiği hafif betonlarda basınç dayanımının yaklaşık %10'dan fazla olduğuna literatürdeki çalışmalarda görülmüştür (Balgourinejad vd., 2022; Nabavian vd., 2025). Literatürde görülen yüksek dayanım artışlarının, genellikle genişletilmiş kil agregası gibi gözenekli agregaların metakaolin ile daha güçlü bir mekanik kenetlenme oluşturmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna karşılık doğal perlitin daha pürüzsüz ve camsı yüzey yapısının, matrisin güçlenmesine rağmen agrega-matris arayüzeyindeki aderansı sınırladığı ve bu nedenle dayanım artışının yaklaşık %2 seviyesinde kaldığı düşünülmektedir. Hafif betonlarda %10 oranında UK ikamesinin basınç dayanımını düşürmediğini gösteren çalışmaların olması literatürle paralel sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Suryanita vd., 2026).

%10 UK + %10 MK betonunda çimento kullanım miktarı, mineral katkı içermeyen betona kıyasla %20 düşüş yaşadığından basınç dayanımında azalmalar meydana gelmiştir. Basınç dayanımı açısından genel bir değerlendirme yapıldığında, GKA kullanımı ile basınç

dayanımında kayıp görülmüş olmasına karşın kür süresinin uzatılmasının bu kaybı ortadan kaldırdığı ve ayrıca özellikle %10 oranında metakaolinin çimento ile ikame edilmesiyle de basınç dayanımının bir miktar arttığını söylemek mümkün olmaktadır. Bu bağlamda basınç dayanımı ve sürdürülebilirlik parametreleri birlikte ele alındığında 20-0UK-10MK betonu optimum beton karışımı olarak göze çarpmaktadır.

5.3. Yarmada çekme dayanımı

Şekil 19’da beton numunelerin 28 ve 90 gün kür sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımları verilmiştir. Şekil 19’dan görüleceği üzere, en yüksek yarmada çekme dayanımı kontrol betonu olan 0-UK0-MK0 betonunda olup 28 gün kür süresi sonunda 3,73 MPa, 90 gün kür süresinde sonunda ise 4,45 MPa olarak ölçülmüştür. Kontrol betonuna kıyasla %20 GKA ve %40 GKA ikameli ve mineral katkı içermeyen betonların yarmada çekme dayanımındaki kayıp yaklaşık olarak sırasıyla, 28 gün kür sonrası %9 ve %17 iken, 90 gün kür sonrası ise %4 ve %16 olarak hesaplanmıştır. Ortalama ve yaklaşık olarak %20 GKA ikameli betonlarda %7’lik, %40 GKA ikameli betonlarda ise %17’lik bir azalma meydana gelmiştir diyebiliriz. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması durumunda betonların yarmada çekme dayanımlarında ortalama %22 seviyesinde bir artış meydana gelmiş olduğu hesaplanmıştır. Bu durum kür süresinin uzun tutulmasının hafif betonlarda ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen bir çalışmada, genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda ince agreganın %50 ve %100 oranlarında (tüm agregalara oranla kabaca hesaplanırsa %23 ve %46 oranlarına tekabül eden) ince geri kazanılmış agrega ile ikame edildiği durumda yarmada çekme dayanımlarında sırasıyla %5 ve %15 oranlarında bir azalma meydana geldiği görülmektedir (Al-Jaboury vd., 2026). Çalışmamız kapsamında, doğal perlit agregası ile üretilen betonlarda da literatüre paralel sonuçlar elde edildiği görülmüştür. GKA’nın gözenekli yapısından dolayı, GKA ikamesinin yarmada çekme dayanımını azalttığı düşünülmektedir (Evangelista and Brito, 2007).



Şekil 19. Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları

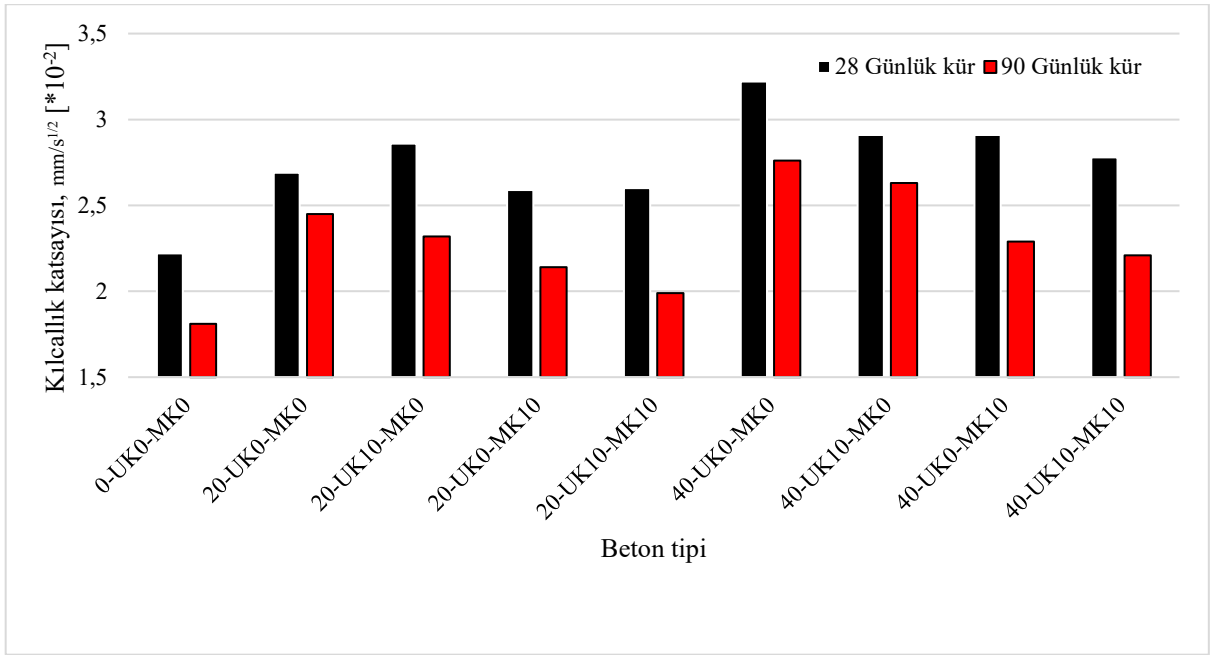
%20 GKA içeren numunelerde en yüksek yarmada çekme dayanımı, 90 gün kür gören 20-UK0-MK10 betonunda ve 4,31 MPa olarak elde edilmiştir. 20-UK0-MK10 betonunun yarmada çekme dayanımı kontrol betonuna göre (her iki kür süresi sonunda bulunan ortalama değerler hesaplandığında) %8,7 oranında azalmakla birlikte, 20-UK0-MK10 betonuna göre ise %4,5 oranında artmıştır. %40 GKA içeren numunelerde ise en yüksek yarmada çekme dayanımı 90 gün küren gören 40-UK0-MK10 betonunda ve 4,26 MPa iken, en düşük yarmada çekme dayanımı 28 gün kür gören 40-UK10-MK10 betonunda ve 3,02 MPa olarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında, %10 MK ikamesinin GKA ikameli betonlarda yarmada çekme dayanımı açısından en iyi oran olduğu görülmüştür. Mineral katkı olarak sadece UK kullanılan betonların yarmada çekme dayanımlarının genel olarak çok fazla etkilenmediği sonucuna varılabilir. Dolayısıyla MK kullanımının mümkün olmadığı fakat UK kullanımının mümkün olduğu durumlarda %10 UK sürdürülebilir bir beton üretimi açısından tercih edilebilir. Genleştirilmiş kil kullanılarak üretilen hafif betonlar üzerine yapılan bir çalışmada, %10 MK ikamesinin yarmada çekme dayanımında yaklaşık %5 seviyesinde bir artış olduğunu raporlamışlardır (Al-Sibahy and Edwards, 2012). Pomza agregası kullanılarak üretilen hafif betonlar üzerine yapılan başka bir çalışmada, %10 UK ikamesinde ise yaklaşık %3 oranında bir değişim olduğu gösterilmiştir (Tanyildizi ve Coskun, 2008). Literatürden elde edilen sonuçların çalışmamızdan elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Her iki mineral katkının birlikte kullanıldığı (20-UK10-MK10 ve 40-UK10-MK10 betonlarında) durumda yarmada çekme

dayanımın düşük çıkmasının başlıca nedeninin, çimento bileşenini fazlaca düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yarmada çekme dayanımı açısından genel bir değerlendirme yapıldığında; sürdürülebilir bir beton üretimi de göz önüne alındığında, %20 GKA ikameli ve %10 MK ikameli beton üretiminin en uygun üretim olacağı görülmektedir. GKA kullanımının dayanım üzerinde oluşturduğu olumsuz etkinin, kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ve mineral katkı kullanımıyla önemli ölçüde azaltılabileceği tespit edilmiştir.

5.4. Kılcallık

28 gün ve 90 gün kür gören beton numunelerin kılcallık katsayıları Şekil 20’de verilmiştir. Grafikten, GKA ikame oranının artmasıyla kılcallık katsayılarının arttığı görülmektedir. Her iki kür süresindeki kılcallık katsayılarında meydana gelen artışın ortalaması alındığında mineral katkı içermeyen betonlarda %20 GKA ikamesi ile %33, %40 GKA ikame ile ise %44 düzeylerinde bir artış meydana geldiği hesaplanmıştır. Literatürde, GKA ikame artışının kılcallık katsayısını artırdığına yönelik yapılmış çalışmalar vardır. Yapılan bir çalışmada, farklı tür GKA’ların kullanıldığı betonlar üretilmiş ve %30 GKA ikameli betonlarda kılcallık katsayılarında agrega tipine göre yaklaşık %5 ila %30 gibi geniş aralıkta bir artış meydana geldiğini raporlanmıştır (Bao vd., 2020). Bu çalışmadan kılcallık katsayısının kullanılan GKA özelliklerinden ciddi düzeyde etkileneceği sonucuna varılmıştır. Duan vd. (2023), GKA’daki yapışmış harç ve gözenekli yapının kılcal su emme değerini artırdığını belirtmişlerdir. Literatürde, kılcallık etkisinin hafif betonlar ve normal ağırlıklı betonlar için benzer olduğu bildiren çalışmalar da mevcuttur (Bogas vd., 2015). Özellikle kılcal gözeneklerin artmasıyla birlikte suyun beton içerisine daha kolay ilerlediği ifade edilmiştir. Kılcallık katsayılarında ortalama olarak kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile yaklaşık %17 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Kür süresinin uzun tutulması ile oluşan bu pozitif etki %20 ve %40 GKA ikamesinden oluşan negatif etkiyi tamamen ortadan kaldıramasa bile dikkate değer oranda bir azalmaya neden olduğu ifade edilebilir.



Şekil 20. Beton numunelerin kılcallık katsayıları

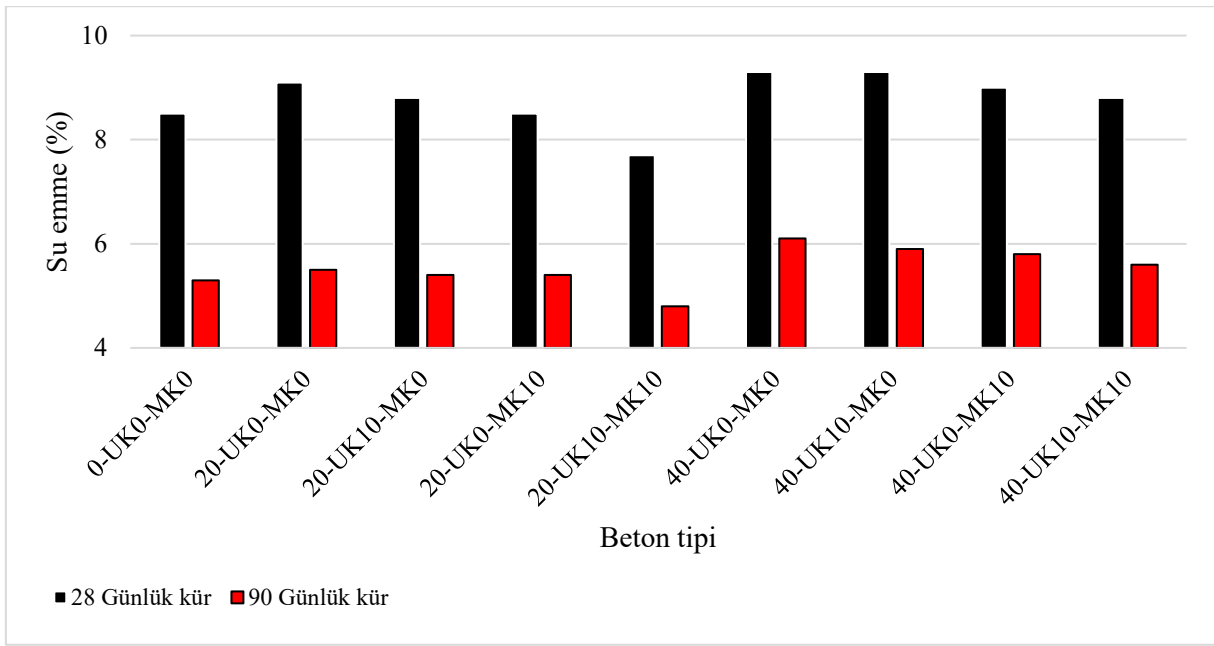
Mineral katkıların kılcallık katsayıları üzerindeki etkileri incelendiğinde, %10 oranında UK ikamesinin azalttığı veya arttırdığı ile ilgili net bir sonuca varılamamıştır. Çünkü %10 UK kullanımı ile, %20 GKA içerikli betonlarda bir artış meydana gelirken %40 GKA içerikli betonlarda ise bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Buna karşın %10 MK'nın pozitif etki gösterdiği sonucu net bir şekilde sonuçlardan çıkarılmaktadır. 20-UK0-MK10 ve 40-UK0-MK10 betonlarında MK kullanılması ile ortalama olarak kılcallık katsayısında %10,7 oranında bir azalma meydana geldiği hesaplanmıştır. Azalma miktarının özellikle 40-UK0-MK10 betonunda baskın olduğu tespit edilmiştir. Fakat en büyük azalma yani pozitif yönde etkilenme mekanik deneylerdekinin aksine sadece MK içeren betonlarda değil hem MK hem UK içeren betonlarda görülmüştür. Yani MK ve UK %10'ar oranlarda ikame edildiği betonlar en düşük kılcallık katsayısına sahip beton olmuşlardır. Mineral katkı içermeyenlere kıyasla kılcallık katsayısındaki azalma oranları ortalama ve yaklaşık olarak, 20-UK0-MK10 betonunda %11, 40-UK0-MK10 betonunda ise %17 düzeylerinde bulunmuştur. Gerçekleştirilen bir çalışmada, %10 MK ve %10 UK kullanımlarının, %19 olan kılcal gözeneklilik oranını sırasıyla %6 ve %2'ye düşürmüş olduklarını bulunmuştur. Buradan mineral katkıların genel olarak kılcallık katsayısını azalttığını söylemek mümkündür (Papp vd., 2025). S. Wang vd. (2023), uçucu kül ve metakaolin içeren üçlü bağlayıcı sistemlerinde uygun oranlarda mineral katkı kullanımının betonun gözenek yapısını iyileştirdiğini, mikro çatlak oluşumunu azalttığını ve daha yoğun bir iç yapı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bu daha yoğun iç yapının ve azalan mikro çatlakların, beton içerisindeki su geçişini sınırlandırarak kılcallık katsayısının düşmesine

katkı sağladığını belirtmişlerdir. Böylece betonun durabilite performansının olumlu yönde etkilendiği düşünülmektedir. Ayrıca araştırmacılar, uçucu kül kullanımının hidrasyon ürünlerinin yapısını değiştirerek bağlayıcı matrisin gelişimine de katkı sağladığını ifade etmiştir. Bu durum, %10 UK + %10 MK içeren betonların en düşük kılcallık katsayısına sahip olmasının nedeni olarak değerlendirilebilir.

Kılcallık katsayısı genel olarak değerlendirildiğinde, GKA kullanımının oluşturduğu olumsuz etkilerin; kür süresinin artırılması ve farklı oranlarda mineral katkı kullanımı sayesinde önemli ölçüde azaltılabileceği söylenebilir.

5.5. Su emme

Şekil 21’de 28 ve 90 gün kür sonunda test edilen numunelerin su emme değerleri sunulmuştur. Grafik incelendiğinde GKA ikamesinin artışı ile su emme değerlerinin arttığı, mineral katkı kullanımı ve kür süresinin artışı ile ise su emme değerlerinin azaldığı görülmektedir. 28 ve 90 gün kür süresi sonunda elde edilen değerlerin ortalaması alındığında, %20 ve %40 GKA ikamesinin su emme oranında meydana getirdiği artış sırasıyla %5 ve %12 olarak tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada, %30 GKA içeren bir betonun su emme kapasitesinin %17 arttığı belirtilmiştir (Evangelista and Brito, 2010). Başka bir çalışmada, hafif agrega kullanılarak yapılan betonlarda %50 GKA ikamesi ile yaklaşık %6 oranında bir artış olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmadan hafif betonun yüksek yoğunluklu betona kıyasla yaklaşık %70 oranında daha fazla su emme değerine sahip olduğu da çıkarılabilir (Al-Jaboury vd., 2026). GKA kullanımıyla birlikte betonun su emme ve gözeneklilik özelliklerinde meydana gelen artışın çeşitli nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumun; GKA yüzeyinde kalan eski harç kalıntıları, agregaların yüksek boşluklu yapısı ve GKA kullanımına bağlı olarak daha zayıf, mikro çatlaklar içeren karmaşık bir arayüzey geçiş bölgesi oluşmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir (Sharaky vd., 2021; Tam vd., 2005). Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması pozitif bir etki meydana getirmiş ve betonların su emme kapasitelerini düşürmüştür. Kür süresinin artması ile birlikte oluşan hidrasyon ürünlerindeki artış betondaki boşluk oranını azaltarak su emme oranını düşürmektedir. Su emme oranındaki bu düşüş miktarı ortalama olarak %37 olarak hesaplanmıştır. Kür süresinin etkisi o kadar belirgindir ki, 90 gün kür uygulanan tüm betonların su emme değerlerinin, 28 gün kür uygulanan betonların su emme değerlerinin tamamından daha düşük olduğu görülmüştür.



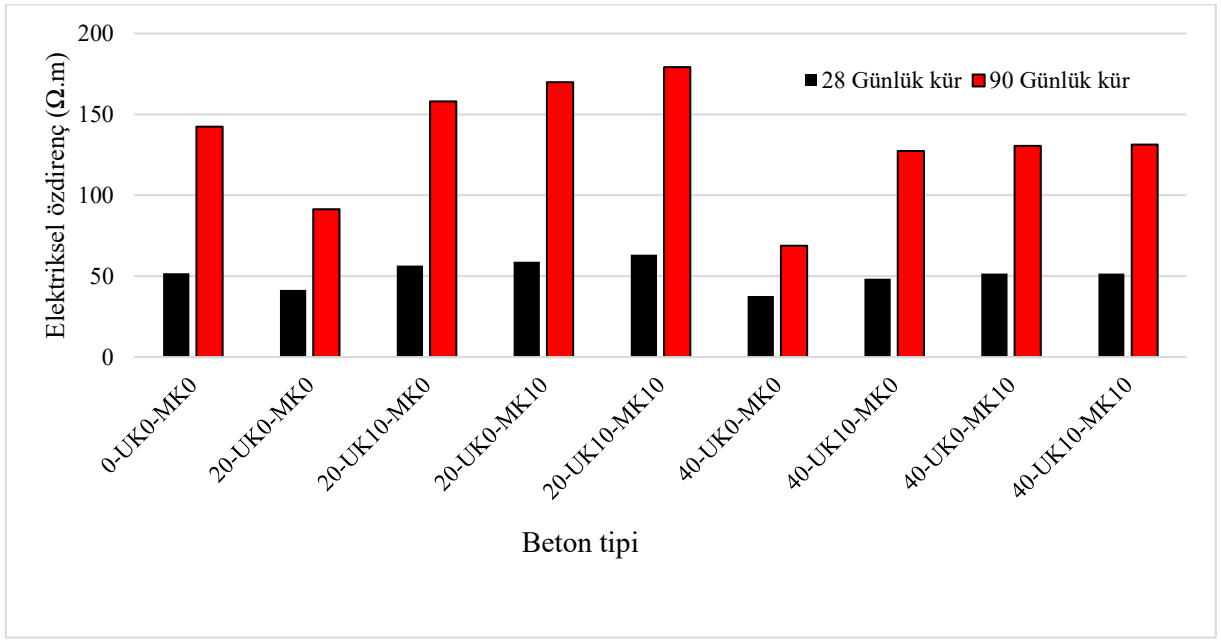
Şekil 21. Beton numunelerin su emmeleri

Su emme oranını azaltmada MK mineral katkısının, UK'ya göre daha etkili olduğu söylenebilir. GKA içerikli betonlar incelendiğinde, sadece %10 UK ikameli betonların su emmesindeki azalma miktarı ortalama yaklaşık %2,1 hesaplanırken, sadece %10 MK ikameli betonların su emmesindeki azalma ise ortalama %4,1 olarak hesaplanmıştır. Fakat en düşük su emme oranlarına %10 UK + %10 MK karışımlarında elde edilmiş olup mineral katkı içermeyen betona kıyasla %10,5 olarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bir çalışmada %10UK veya %10MK ikamesi ile betonların su emme kapasitelerinin yaklaşık %6 oranında azaldığı UK ve MK'nın benzer etki gösterdiği sunulmuştur. Ayrıca kür süresinin pozitif bir etki gösterdiği de çalışmada vurgulanmıştır (Sajeev vd., 2025). MK ve UK gibi mineral katkıların betonun iç yapısında oluşturduğu dolgu etkisi, puzolanik reaksiyonlar sayesinde meydana gelen ek C-S-H oluşumu ve boşluk yapısındaki iyileşmeler literatürde ortaya konulmuştur. (J. Wang vd., 2023).

Su emme deneyi sonucunda doğal perlit agregası ile üretilen hafif betonlarda genel bir değerlendirme yapıldığında, en düşük su emme oranlarının 20-UK10-MK10 betonunda elde edildiği görüldüğünden %20 GKA ikamesi ve %10 UK + %10 MK içerikli karışım hem su emme açısından hem sürdürülebilirlik açısından en iyi karışım olarak belirtilebilir.

5.6. Özdirenç

28 gün ve 90 gün kür gören beton numunelerin elektriksel özdirençleri Şekil 22’de verilmiştir. Şekil 22’den, GKA ikamesi ve artışı ile betonların elektriksel özdirençlerinin azaldığı buna karşın mineral katkı kullanımı ve kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile özdirenç değerlerinde ciddi bir artış meydana geldiği görülmektedir. %20 GKA ve %40 GKA ikamesi ile elektriksel özdirenç değerlerinde meydana gelen azalma (her iki kür süresi için hesaplanan değerlerin ortalaması alındığında) sırasıyla %27,8 ve %39,3 olarak hesaplanmıştır. Betonlarda normal ağırlıklı agregaya yerine %25 oranında iri GKA ikame edildiğinde (toplam agregaya hacmine oranlar %19,33 olan) elektriksel özdirenç değerlerinde artışa (yaklaşık %8) neden olduğunu gösteren çalışmalar olmasına karşın (Panghal and Kumar, 2024), literatürdeki birçok çalışmada ise GKA ikamesinin betonun elektriksel özdirençini azalttığı bildirilmiştir. Bir çalışmada iri ve ince GKA’nın %25 oranının birlikte ikame edildiği bir çalışmada yaklaşık %7,7 seviyesinde bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. GKA içermeyen betonun elektriksel özdirenç değeri yaklaşık 52 $\Omega.m$, %25 GKA ikameli betonun ise 48 $\Omega.m$ bulunması bizim çalışmamızdan elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir (Sasanipour and Aslani, 2020). Fakat yaptığımız çalışmada, GKA kullanım oranının elektriksel özdirenç değerlerini daha çok düşürmesi, hafif betonlarda GKA ile etkileşimin daha çok olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. GKA’nın betonların içine dahil edilmesi ile GKA üzerindeki yapışmış harç ile birlikte betonlarda daha fazla çimento hamuru fazı bulunmakta ve bu durumda beton içinden daha fazla akımın geçmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca GKA kullanımı ile karmaşık gözenek ağı artış göstermektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı GKA kullanılan betonlarda elektriksel özdirenç değerleri azalmaktadır. Fakat kür süresinin artmasıyla birlikte zamanla tüm beton tiplerinde gözenek yapısı inceler. Buna bağlı olarak betonların elektriksel özdirençleri kür süresine bağlı olarak artış gösterir (Russo and Lollini, 2022). Bu sebepten dolayı kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması sonucu betonların özdirenç değeri ortalama olarak %155,3 oranında artmıştır. Böylece 90 gün kür sonunda en düşük özdirenç değerine sahip olan 40-UK0-MK0 betonunun elektriksel özdirenç değeri bile 28 gün kür gören tüm betonlardan yüksek bulunmuştur. Kür süresinin uzatılması ile birlikte, hidrasyon reaksiyonlarının devam etmesi betonun gözenekli yapısını azaltmış, betondaki geçirimsizliği azaltarak iyon geçişini azaltmıştır.



Şekil 22. Beton numunelerin özdirençleri

Hafif betonlarda mineral katkı kullanımına bağlı olarak özdirenç değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Mineral katkıların özdirenç gelişimlerine sağladıkları katkı bakımından MK katkısının UK katkısından daha etkili olduğu saptanmıştır. Fakat en yüksek özdirenç değerlerinin ise %10 UK + %10 MK kullanımı durumunda elde edildiği görülmüştür. Bu betonların özdirenç değerlerinin, mineral katkı içermeyen betonlara kıyasla yaklaşık %70 oranında arttığı belirlenmiştir. Çok küçük boyutlu olan uçucu kül gibi mineral katkıları, betonda gözenek yapısını değiştirerek, çimento hamuru- agrega arayüzeyini iyileştirerek ve gözenek çözeltisinin iletkenliğini değiştirerek betonun özdirenç değerini artırmaktadır (Oliveira and Cascudo, 2018).

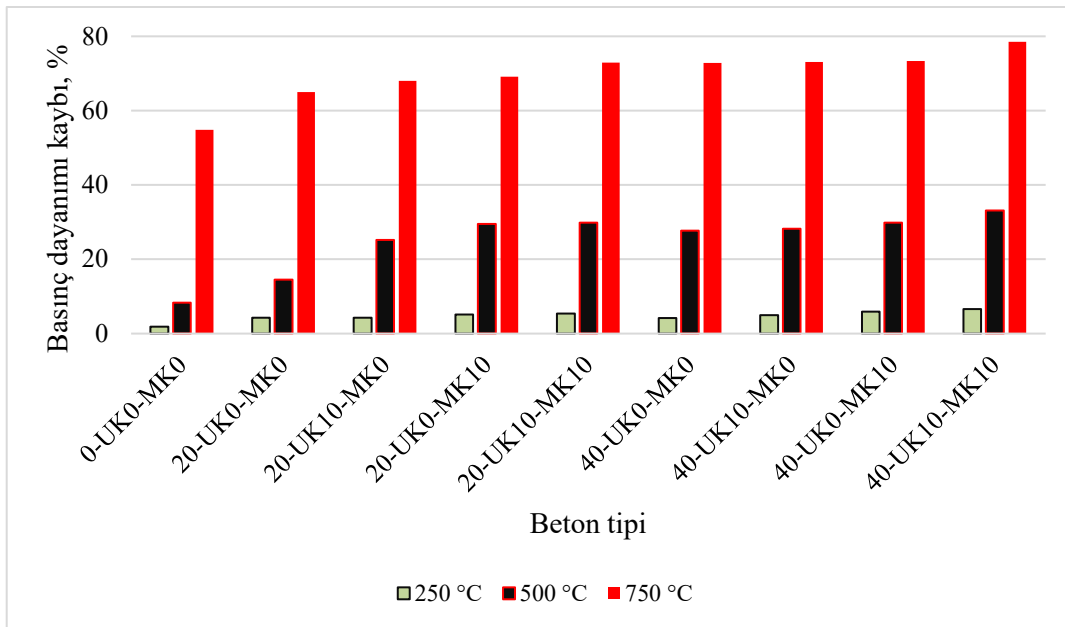
Betonların elektriksel özdirenci hakkında genel bir değerlendirme yapılacak olursa %20 GKA ikameli olan hafif betonlarda %10UK + %10 MK mineral katkı ikamesi ile üretilen betonlar hem özdirenç hem sürdürülebilirlik açısından en iyi karışım olarak göze çarpmaktadır. 20-UK10-MK10 betonunu ise 20-UK0-MK10 betonu takip etmektedir. Kür süresinin uzatılması ile de daha yüksek GKA ikamesi yapılarak beton üretimlerine özdirenç kaybı olmadan imkan tanınmaktadır.

5.7. Yüksek Sıcaklık Direnci

5.7.1. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında gözlenen basınç dayanımı kayıpları

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelerde yaşanan basınç dayanımı kayıpları Şekil 23'te verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların basınç dayanımlarında dikkate değer ölçüde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu azalma miktarı maruz kalınan sıcaklık düzeyine ve karışımın bileşenine göre değişiklik göstermiştir. Sıcaklığın artması ile birlikte dayanım kayıplarının da ciddi bir miktarda arttığı gözlenmiştir. Buna göre, dayanım kayıpları 250°C'de %1,9–6,6 ile sınırlı kalırken, 500°C'de %8,3–33,1 aralığına yükselmiş, 750°C'de ise %54,8–78,5 seviyelerine ulaşarak oldukça belirgin bir hal almıştır. Referans karışım olan 0-UK0-MK0 betonunda basınç dayanımı kayıpları, artan sıcaklık seviyelerine bağlı olarak sırasıyla %1,9, %8,3 ve %54,8 olarak belirlenmiş olup, incelenen tüm karışımlar arasında en düşük dayanım kayıplarını göstermiştir. Yüksek sıcaklığın çimento hamurunda oluşturduğu bozulmalar ve gözenek yapısındaki değişiklikler sonucunda betonun basınç dayanımının önemli ölçüde düştüğü belirlenmiştir (Chan vd., 2000). Basınç dayanımı kaybı açısından, GKA ikamesi artışı ile yüksek sıcaklığa direnç azalmıştır. Düşük sıcaklık maruziyeti oransal olarak daha yüksek kayıp artışına neden olurken yüksek sıcaklık uygulamalarında ise oransal olarak görece daha az kayıp gözlenmiştir. Örneğin; GKA içermeyen betona kıyasla, %40 GKA ikameli betonda basınç dayanımı kaybında 250°C'de %115 oranında artış meydana gelirken, 750°C'de ise %33 düzeyinde bir artış meydana gelmiştir. Her üç sıcaklık maruziyeti için ise ortalama olarak; %20 GKA içerikli betonda %72, %40 GKA içerikli betonda ise %127 oranında bir artış meydana gelmiştir. GKA içeriğinin artması ile basınç dayanımlarında oluşan kayıplarda ciddi seviyelerde artış göstermiştir. Uçucu kül agregası ile üretilen hafif betonların ve normal ağırlıklı betonların yüksek sıcaklığa karşı direncinin kıyaslandığı bir çalışmada, 500°C sıcaklığa kadar hafif betonların dayanım koruma oranlarının normal betonlara kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür. Özellikle 600°C sıcaklıkta yaklaşık %45,3 gibi dayanımda keskin düşüşler yaşandığı da bu çalışmada belirtilmiştir (Xu vd., 2025). Başka bir çalışmada, normal agregası içeren betonlardaki dayanım kaybının %50 iri GKA içeren betonlardaki ile benzer düzeylerde olmasına karşın bazı sıcaklık değerlerinde GKA içeren betonların dayanım kaybının daha fazla olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Örneğin; 700°C sıcaklık için GKA içermeyen betonlardaki dayanım kaybı %54 iken, GKA içeren betonun dayanım kaybı ise %62 düzeylerine çıkmıştır (Rafi and Aziz, 2022). Bu çalışmada elde edilen bulguların literatürdeki verilerle büyük ölçüde paralellik gösterdiği

görülmektedir. Literatür bulguları ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklık etkisi altında GKA kullanımının hafif betonlarda normal betonlara kıyasla daha fazla olumsuz sonuçlara yol açtığı söylenebilir. Yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte betonda meydana gelen termal gradyanlar, fiziksel ve mekanik bütünlüğün azalması, suyun buharlaşması ile artan gözenek iç basıncı ve termal nedenli bileşenlerin ayrışması gibi faktörler betonun bozulmasına ve buna bağlı olarak basınç dayanımının azalmasına yol açmaktadır. Yangın altındaki betonun davranışı, büyük ölçüde karışım oranları ve bileşenleri tarafından belirlenir ve ısıtma sırasındaki karmaşık fizikokimyasal dönüşümler sonucunda ortaya çıkar. Yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen basınç dayanımı azalması betonda fiziksel ve kimyasal dönüşümler nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisi ile öncelikle betonlarda serbest suyun buharlaştığı sonrasında ise Ca(OH)_2 'nin ayrıştığı ve daha yüksek sıcaklıklarda CO_2 kaybı ile birlikte agregalarda dekompozisyonun meydana geldiği bilinmektedir. Bu değişimler esnasında harç yapısında mikroçatlaklar oluşmakta ve ara yüzey geçiş bölgesi bozulmakta ayrıca agregalarda meydana gelen dönüşümler ile iç gerilmeler artmaktadır. Kalsiyum karbonatın (CaCO_3) kirece dönüşmesi şeklinde tanımlanan kalsinasyon olayı da yüksek sıcaklığın beton üzerindeki bozucu etkilerinin önemli göstergeleri arasında yer almaktadır (Rafı and Aziz, 2022; Xu vd., 2025).



Şekil 23. Yüksek sıcaklık etkisiyle betonların basınç dayanımında oluşan azalmalar

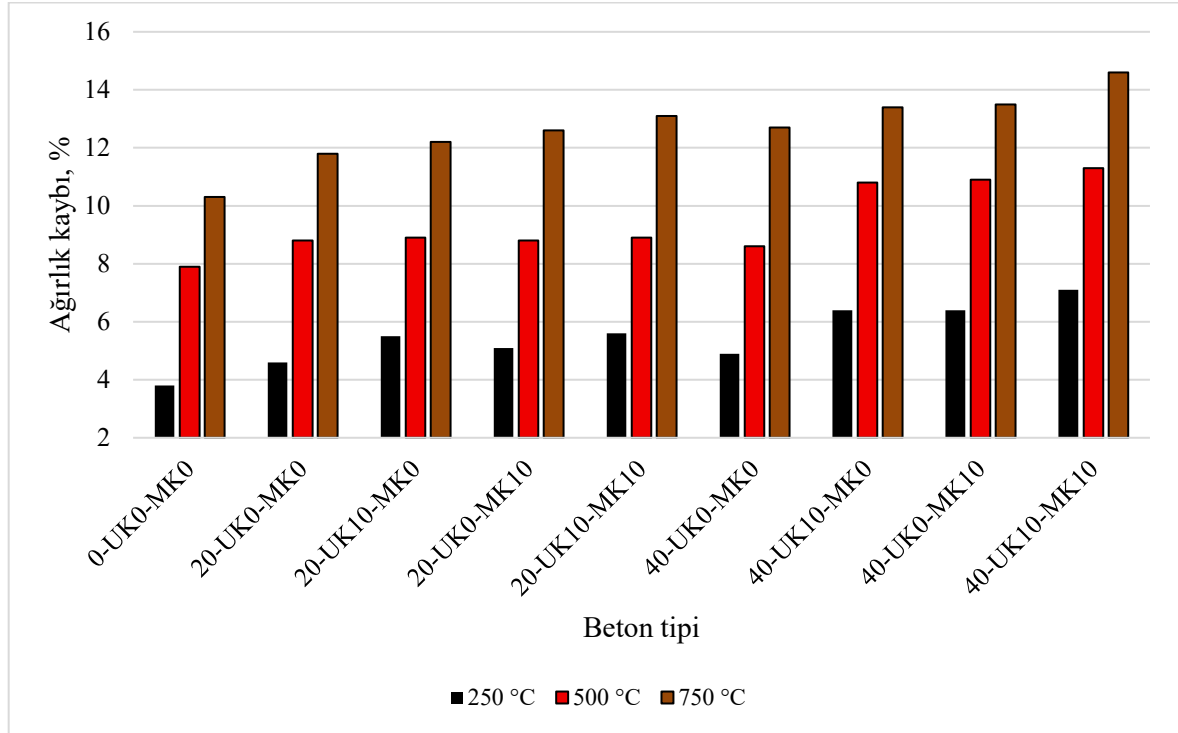
Çalışmada UK ve MK mineral katkılarının çimento ile ikame edilerek kullanımının hafif betonların basınç dayanımı kaybını artırdıkları görülmüştür. 750°C sıcaklığa maruz kalan betonlar için grafikte inceleme yapıldığında, mineral katkı içermeyen betona kıyasla, %20 GKA

ikameli betonlarda, %10 UK, %10 MK ve %10 UK + %10 MK ikame edilmesi durumunda basınç dayanımındaki azalma miktarındaki artış sırası ile %4,6, %6,3 ve %12,1 olarak hesaplanmıştır. Aynı hesaplama, %40 GKA ikameli betonda ise %0,4, %0,8 ve %7,8 olarak yapılmıştır. Bu sonuçlardan mineral katkı içeriğinin artışının yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımının azalmasında negatif bir etki meydana getirdiği gösterilmiş olmakla beraber, MK'nın UK'dan daha fazla olumsuzluk meydana getirmiş olduğu da görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisinde betonlarda UK kullanımının MK kullanımından daha iyi sonuçlar ortaya koyduğunu gösteren çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu durumun nedeni ise MK ile oluşan daha yoğun mikroyapının termal çatlamaya daha çok meyilli olması olarak gösterilmiştir (Nadeem vd., 2014). MK'nın betonun iç yapısını belirgin şekilde yoğunlaştırdığı literatürde ortaya konulmuştur (Khatib ve Clay, 2004; Siddique ve Klaus, 2009).

5.7.2. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında gözlenen ağırlık kayıpları

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 24'te sunulmuştur. Hafif betonların maruz kaldığı sıcaklığın yükselmesi ile birlikte ağırlık kayıplarının da basınç dayanımı kayıplarındaki gibi arttığı gözlenmiştir. Beton numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları; 250°C sıcaklıkta %3,8-7,1, 500°C sıcaklıkta %7,9-11,3, 750°C sıcaklıkta ise %10,3-14,6 arasında olmuştur. Gerçekleştirilen bir çalışmada beton numunelerin yüksek sıcaklık altında kütle kayıpları şu şekilde bulunmuştur; 200°C de yaklaşık %2,6, 400°C de %7,1, 600°C de %8,0 ve 800°C'de %9,9 (Shumuye vd., 2021). Bu bulgular, çalışmamızdan elde edilen ağırlık kayıplarının normal ağırlıklı betonlarda rapor edilen değerlerle benzerlik göstermekle birlikte, bir miktar daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Çok hafif çimento esaslı kompozitler üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, 30°C – 400°C sıcaklık aralığında meydana gelen ağırlık kaybının serbest, kılcal ve fiziksel bağlı suyun buharlaşmasından kaynaklandığı, 400°C ve 600°C'de gözlenen ilave ağırlık kayıplarının ise literatür bulgularına dayanarak sırasıyla CSH ve CH fazlarının ayrışmasıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen XRD analizleri sonucunda 400°C'de CSH fazının, 600°C'de ise CH fazının ortadan kalktığı deneysel olarak ortaya konmuştur (Huang vd., 2017). GKA ikame oranının artmasına paralel olarak betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıplarının arttığı görülmektedir. Mineral katkı içermeyen betonlarda, her bir sıcaklıkta elde edilen ağırlık kayıplarının ortalaması alındığında %20 ve %40 GKA ikame oranları için ağırlık kayıplarındaki artış miktarı, GKA içermeyen betona kıyasla, sırasıyla %16 ve %20 olarak hesaplanmıştır. GKA ikamesi ile yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonların daha fazla ağırlık kaybı gösterdiği,

bunun nedeninin de GKA'nın su emme kapasitesinin daha yüksek olması ve yüksek sıcaklık altında daha çok suyun buharlaşmasına neden olduğu literatürde vurgulanmıştır (Masne and Suryawanshi, 2023). GKA kullanımına bağlı olarak ağırlık kaybındaki artışın, geri kazanılmış agregaların bünyesinde bulunan mikro çatlaklı eski yapışmış harç ile eski ve yeni arayüzey bölgelerinin yapısal özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 24. Yüksek sıcaklık etkisiyle betonların ağırlıklarında oluşan azalmalar

Basınç dayanımı kayıplarının irdelendiği bölümdeki sonuçlara benzer olarak, yüksek sıcaklık etkisindeki betonlarda UK ve MK mineral katkılarının çimento ile ikame kullanılması sonucu ağırlık kayıplarının genel bir eğilim olarak arttığı görülmektedir. Genel olarak %10 UK ikamesi ile %10 MK ikamesinin ağırlık kaybında meydana getirdiği artış yakın olmasına rağmen genel olarak MK'nın UK'dan bir miktar daha fazla artış meydana getirdiği görülebilir. Mineral katkı kullanımı ile betonların yüksek sıcaklıklardaki ağırlık kaybının artmasındaki temel sebebin, mineral katkıların betonun mikro yapısını değiştirerek yüksek sıcaklık altında betonda daha fazla gözenek oluşmasına yol açmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Nadeem vd., 2014).

5.7.3. Yüksek sıcaklık sonrası beton numunelerin görsel olarak incelenmesi

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelerin basınç dayanımı deneyi sonrası görüntüleri Şekil 25'te verilmiştir. Verilen görüntüler GKA veya mineral katkı içermeyen

betonlara aittir. Şekilde soldan sağa doğru; oda sıcaklığında, 250°C, 500°C ve 750°C'ye maruz kalmış betonların görüntüleri görülmektedir. Numunelerin basınç dayanımı deneyi sonrası artan sıcaklıkla birlikte kırılmaları incelendiğinde, kırılma karakterlerinin ve hasar mekanizmalarının önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık görmemiş ve 250°C sıcaklığa maruz kalan beton numunelerin kırılması incelendiğinde numune şeklinin bütünlüğünü büyük oranda koruduğu ve kırılmanın sınırlı olduğu görülmektedir. Buradan düşük sıcaklığa maruz kalan hafif betonların iç yapısının büyük ölçüde korunabildiği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan 500°C ve 750°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin bütünlüğünün ciddi oranda bozulduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte agrega-hamur ara yüzey geçiş bölgesindeki zayıflamalar ve termal gerilmeler nedeniyle oluşan mikro çatlaklar ve bu çatlakların büyümesi numunelerde yoğun zayıflama ve parçalanma meydana getirmiştir. Bu görüntülerden betonun yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı sonucuna varılabilir. Yapısal bütünlüğün özellikle 750°C sıcaklıkta önemli ölçüde azaldığı dikkate değerdir.



Şekil 25. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı testi sonrası görüntüleri (Soldan sağa; oda sıcaklığı, 250°C, 500°C ve 750°C)

Sonuç olarak, sıcaklık seviyesinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı deneyi sonrasında oluşan hasarın daha belirgin hale geldiği, kırılma davranışının sınırlı çatlak oluşumundan yaygın parçalanmaya doğru evrildiği ve numunelerin yapısal bütünlüğünü koruma kapasitesinin giderek azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu görüntülerin gerçekleştirilen diğer deney sonuçlarını destekler nitelikte olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, doğal perlit agregası (DPA) kullanılarak üretilen hafif betonlarda, geri kazanılmış agregası (GKA), uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) ikamesinin betonun fiziksel, mekanik, durabilite ve yüksek sıcaklık direnci özelliklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular özetle aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Üretilen tüm betonların kuru birim ağırlıkları $1,76-1,88 \text{ g/cm}^3$ aralığında olduğundan ilgili standart ve yönetmelikler çerçevesinde tüm betonların hafif beton hatta taşıyıcı hafif beton sınıfında yer aldığı değerlendirilmiştir. GKA ikame oranının artması betonların birim ağırlığını artırırken UK ve MK ikamesi birim ağırlığı azaltmıştır.
- Mekanik özellikler GKA ikame oranı artışı ile azalmıştır. 28 gün kür sonunda, %40 GKA ikameli betonun basınç dayanımı %14,7, yarmada çekme dayanımı ise %17 seviyelerinde bir azalma göstermiştir. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması dayanım kayıplarını büyük ölçüde telafi etmiştir. Genel olarak, çimento ile %10 MK ikame edilerek üretilen betonların dayanımlarında artışlar meydana gelmesine karşın %10 UK ikamesinin dayanımlar üzerinde nötre yakın bir etki oluşturduğu söylenebilir. %10 UK + %10 MK kombinasyonunda ise dayanımlarda düşüşler olduğu gözlenmiştir. Sürdürülebilirlik ve mekanik performans birlikte değerlendirildiğinde 20-UK0-MK10 beton karışımı öne çıkan karışım olmuştur.
- GKA ikame oranı arttıkça betonların kılcallık katsayısı ve su emme değerlerinde genel olarak bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, kullanılan mineral katkıların bu olumsuz etkiyi belirli ölçüde azalttığı görülmüştür. Özellikle MK ikamesinin kılcallık davranışı üzerindeki olumlu etkisi daha belirgindir. En düşük kılcallık katsayısı ve su emme değerleri ise %10 UK + %10 MK içeren karışımlarda elde edilmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu katkı kombinasyonunun betonun durabilite performansını önemli ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir. Ayrıca kür süresinin uzaması da durabilite özelliklerini olumlu yönde etkileyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir.
- Elektriksel özdirenç değerlerinin, GKA ikamesi ile azaldığı görülmüştür. %40 GKA ikameli betonun elektriksel özdirencinde meydana gelen azalma %39,3 olarak elde edilmiştir. Elektriksel özdirenci artırma açısından, MK mineral katkısının UK mineral katkısından daha

etkili olduğu söylenebilir. %10 UK + %10 MK içerikli betonların ise en yüksek özdirence sahip betonlar olduğu tespit edilmiştir. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması elektriksel özdirenç değerlerinin %155,3 gibi ciddi bir oranda artmasına neden olmuştur.

- Hafif beton numunelerinin maruz kaldığı sıcaklığın artışına bağlı olarak basınç dayanımı ve ağırlık kayıplarının belirgin bir şekilde arttığı görölmüştür. 750°C'de dayanım kayıpları %54,8–78,5 aralığına ulaşmıştır. GKA ikamesinin artışı ile birlikte genel olarak basınç dayanımı kayıpları ve ağırlık kayıpları artmış dolayısıyla yüksek sıcaklığa karşı direnç azalmıştır. Yüksek sıcaklık direncini daha az azaltma açısından, UK mineral katkısının MK mineral katkısına oranla daha avantajlı olduğu söylenebilir.
- DPA içeren hafif betonlarda GKA kullanımının betonun mekanik ve durabilite özelliklerinde bir miktar azalmaya neden olduğu görölse de kür süresinin uzatılması ve mineral katkıların kullanılmasıyla bu olumsuz etkilerin önemli ölçüde giderilebildiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar sürdürülebilirlik açısından da değerlendirildiğinde, %20 GKA ile %10 UK ve %10 MK içeren 20-UK10-MK10 karışımının; atık malzemelerin geri kazanımı, imento tüketiminin azaltılması ve yeterli mekanik ile durabilite performansının sağlanması bakımından dengeli ve uygulanabilir bir alternatif olduğu düşünölmektedir.

KAYNAKÇA

- Agostini, F., Davy, C. A., Skoczylas, F. ve Dubois, T. (2010). Effect of microstructure and curing conditions upon the performance of a mortar added with treated sediment aggregates (TSA). *Cement and Concrete Research*, 40(11), 1609-1619.
- Akçay, B., Peker, Ö., Şengül, C. ve Taşdemir, M. A. (2013). *Metakaolin içeren betonun kırılma davranışı*. Beton Kongresi, İstanbul, 424-435.
- Alduaij, J., Alshaleh, K., Haque, M. N. ve Ellaithy, K. (1999). Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cement & Concrete Composites*, 21, 453-458.
- Al-Jaboury, M. F., Abo Dhaheer, M. S. ve Dhahir, M. K. (2026). Development of sustainable structural lightweight concrete with fine recycled aggregates. *Results in Engineering*, 29, 109358.
- Al-Khaiat, H. ve Haque, M. N. (1998). Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 28, 859-866.
- Al-Sibahy, A. ve Edwards, R. (2012). Mechanical and thermal properties of novel lightweight concrete mixtures containing recycled glass and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 31, 157-167.
- Anuk, D. (2011). *Metakaolin kullanımının çimento harçlarının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 291164). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- ASTM C 1585. (2013). *Hidrolik çimentolu betonlarda su emme hızının (sorptivite) ölçülmesi için standart deney yöntemi*. ASTM International, West Conshohocken, PA, ABD.
- Aşık, M. (2006). *Structural lightweight concrete with natural perlite aggregate and perlite powder* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 180901). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Aydın, Ş., Çelik, A. G. ve Güneş, İ. (2021). Geri dönüştürülmüş beton ve tuğla agregalarının beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *MT Bilimsel*, 20, 11-22.
- Balgourinejad, N., Haghighifar, M., Madandoust, R. ve Charkhtab, S. (2022). Experimental study on mechanical properties, microstructural of lightweight concrete incorporating polypropylene fibers and metakaolin at high temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 5238-5256.
- Bao, J., Li, S., Zhang, P., Ding, X., Xue, S., Cui, Y. ve Zhao, T. (2020). Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117845.

- Başpınar, E. ve Kuşçu, M. (2014). Karaçayır (Uşak) kaolen yatağı kaolen üretim yöntemi. *SDUGEO E-Dergi*, 27-35.
- Bensted, J. ve Barnes, P. (2001). *Structure and performance of cements* (2. baskı). London: E & FN Spon.
- Berry, E. E. ve Malhotra, V. M. (1986). *Fly ash in concrete*. Ottawa: Canadian Government Publishing Centre.
- Bogas, J. A., Gomes, M. G. ve Real, S. (2015). *Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. Materials and Structures*, 48, 2869-2883.
- Borghi, G., Pantini, S. ve Rigamonti, L. (2018). Life cycle assessment of non-hazardous construction and demolition waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 184, 815-825.
- Bölük, D. (2011). *Metakaolenin beton özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 284519). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Bulut, H. A. (2024). Examination of mechanical, permeability, and durability properties of sustainable lightweight concrete composites with natural perlite aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48, 1329-1352.
- Chan, Y. N., Luo, X. ve Sun, W. (2000). Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 247-251.
- Chandra, S. ve Berntsson, L. (2002). *Lightweight aggregate concrete: Science, technology, and applications*. William Andrew Publishing.
- Chia, K. S. ve Zhang, M. H. (2002). Water permeability and chloride penetrability of high strength lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(4), 639-645.
- Çınar Resuloğulları, E., Dündar, B. ve Uygunoğlu, T. (2021). Geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak üretilen harçlarda yüksek sıcaklık etkisinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 108-115.
- Demirel, C. ve Şimşek, O. (2014). C30 sınıfı atık betonun geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği. *S.Ü. Mühendislik Bilimleri ve Teknoloji Dergisi*, 2(2), 46-54.
- Döndüren, M. S. ve Şişik, Ö. (2016). Geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen betonların özellikleri. *Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Teknik Online Dergi*, 15(2), 125-137.

- Duan, Z. H. ve Poon, C. S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*, 58, 19-29.
- Duan, Z., Deng, Q., Xiao, J., Zhang, H., Nasr, A., Li, L. ve Zou, S. (2023). Early-stage water-absorbing behavior and mechanism of recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 394, 132138.
- Elmaağaç, M. Y. (2024). *Atık beton agregalarının hafif harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 895794). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- EPDK. (2007). *2007 yılı faaliyet raporu*. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.
- Erdoğan, Ş., Kandil, U., Nas, M., Kurbetci, Ş. ve Nayır, S. (2017). Yüksek sıcaklığa maruz uçucu kül içeren betonun ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımının değerlendirilmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 314-325.
- Etcheberria, M., Vázquez, E., Marí, A. ve Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742.
- Eurocode 2. (2004). *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN 1992-1-1:2004).
- Evangelista, L. ve de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397-401.
- Evangelista, L. ve de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.
- Fırat Alemdar, Z. ve Kurt, Y. (2022). Geri kazanılmış agregalı betonun betonarme binaların deprem performansına etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 1077-1090.
- González-Quintero, R., Bolívar-Vergara, D. M., Chirinda, N., Arango, J., Pantevez, H., Barahona-Rosales, R. ve Sánchez-Pinzón, M. S. (2021). Environmental impact of primary beef production chain in Colombia: Carbon footprint, non-renewable energy and land use using life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 773, 145573.
- Gündüz, L. ve Uğur, İ. (2005). The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1859-1864.

- Huang, Z., Liew, J. Y. R. ve Li, W. (2017). Evaluation of compressive behavior of ultra lightweight cement composite after elevated temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 148, 579-589.
- Huuhka, S. ve Kolkwitz, M. (2021). Stocks and flows of buildings: Analysis of existing, demolished, and constructed buildings in Tampere, Finland, 2000–2018. *Journal of Industrial Ecology*, 25, 948-960.
- Jiang, Y. ve Ling, T. C. (2020). Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing. *Journal of CO₂ Utilization*, 36, 135-144.
- Kandil, U. (2021). *Farklı mineral katkı içeren geri kazanılmış agregalı kendiliğinden yerleşen betonların bazı mekanik ve durabilite özellikleri* (Doktora tezi, Tez No. 665190). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Khatib, J. M. ve Clay, R. M. (2004). Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 19-29.
- Kim, H. K., Hwang, E. A. ve Lee, H. K. (2012). Impacts of metakaolin on lightweight concrete by type of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 36, 719-726.
- Kocataşkın, F. (1987). *Yeni gelişen beton malzemeleri: İleri beton teknolojisi ders notları*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- Köksal, F., Nazlı, T., Benli, A., Gencel, O. ve Kaplan, G. (2021). The effects of cement type and expanded vermiculite powder on the thermo-mechanical characteristics and durability of lightweight mortars at high temperature and RSM modelling. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00709.
- Kurad, R., Silvestre, J. D., de Brito, J. ve Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 485-502.
- Liao, Q., Lu, S. Y., Lu, J. X., Li, B. X., Wu, W. W., Duan, Z. H. ve Poon, C. S. (2026). Fracture behaviour and enhancement mechanism of bamboo-inspired functionally-graded high performance lightweight aggregate concrete incorporating eco-friendly lightweight aggregate after sub-high temperature. *Construction and Building Materials*, 519, 145925.
- Maghfouri, M., Alimohammadi, V., Azarsa, P., Asadi, I., Doroudi, Y. ve Balakrishnan, B. (2021). Impact of fly ash on time-dependent properties of agro-waste lightweight aggregate concrete. *Journal of Composites Science*, 5, 156.
- Majhi, R. K., Nayak, A. N. ve Mukharjee, B. B. (2018). Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 159, 417-430.

- Masne, N. ve Suryawanshi, S. (2023). Effect of wastewater curing and elevated temperature on recycled concrete aggregates from construction and demolition wastes. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 14(2), 153-159.
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Sánchez de Rojas, M. I. ve Frías, M. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical–mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, 216-225.
- Nabavian, S., Shirvani, M. A. ve Gholampour, A. (2025). Influences of elevated temperature and re-curing on the compressive performance of lightweight concrete containing metakaolin: Experiments and prediction models. *Construction and Building Materials*, 489, 142111.
- Nadeem, A., Memon, S. A. ve Lo, T. Y. (2014). The performance of fly ash and metakaolin concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 62, 67-76.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. New York: Longman.
- Neville, A. M. ve Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2. baskı). Harlow: Pearson.
- Oliveira, A. M. ve Cascudo, O. (2018). Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 192, 467-477.
- Omran, Ş. (2024). A review of lightweight concrete in civil engineering. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 14(4), 378-404.
- Ozturk, A. B., Turan, A. İ., Kumbasaroglu, A., Yalciner, H., Ayaz, Y. (2026). The effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with raw perlite aggregate. *Journal of Building Engineering*, 118, 115093.
- Ölmez, E. ve Yıldız, Ş. (2008). *İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli*. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları 2008 Sempozyumu, İstanbul.
- Padmini, A. K., Ramamurthy, K. ve Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 829-836.
- Panghal, H. ve Kumar, A. (2024). Structural aspects of concrete incorporating recycled coarse aggregates from construction and demolished waste. *Materiales de Construcción*, 74(353), e337.
- Papp, V., Ardelean, I., Bulátkó, A., László, K., Csík, A., Janovics, R. ve Kéri, M. (2025). Effect of metakaolin and fly ash on the early hydration and pore structure of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 196, 107928.

- Peña, L. V. D. L., Taelman, S. E., Pr  at, N., Boone, L., Van der Biest, K., Cust  dio, M., Lucas, S. H., Everaert, G. ve Dewulf, J. (2022). Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: Review of the integration of life cycle assessment, environmental risk assessment and ecosystem services assessment. *Science of the Total Environment*, 808, 152125.
- Perlite Institute. (2025). *Everything you need to know about the origins of perlite*. <https://www.perlite.org/everything-you-need-to-know-about-the-origins-of-perlite/> adresinden 02 Mayıs 2026 tarihinde edinilmiştir.
- Poon, C. S., Shui, Z. H. ve Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, 461-468.
- Rafi, M. M. ve Aziz, T. (2022). Experimental testing of fly ash containing recycled aggregate concrete exposed to high temperatures. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(1), 1-16.
- Ren, P., Ling, T. C. ve Mo, K. H. (2021). Recent advances in artificial aggregate production. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125215.
- Russo, N. ve Lollini, F. (2022). Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 51, 104290.
- Sabir, B. B., Wild, S. ve Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 441-454.
- Sajeev, P. S., Rajagopal, V. S. G. ve Arasu, N. A. (2025). Investigation of concrete durability enhancement using supplementary cementitious materials. *MethodsX*, 15, 103527.
- Sari, D. ve Paşamehmetoğlu, A. G. (2005). The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 936-942.
- Sasanipour, H. ve Aslani, F. (2020). Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540.
- Sefidehkhani, H. P. ve şimşek, O. (2018). Farklı oranlarda geri d  n  ş  m agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 83-91.
- Sharaky, I., Issa, U., Alwetaishi, M., Abdelhafiz, A., Shamseldin, A., Al-Surf, M., Al-Harhi, M. ve Balabel, A. (2021). Strength and water absorption of sustainable concrete produced with recycled basaltic concrete aggregates and powder. *Sustainability*, 13, 6277.

- Shumuye, E. D., Zhao, J. ve Wang, Z. (2021). Effect of the curing condition and high-temperature exposure on ground-granulated blast-furnace slag cement concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15, 15.
- Siddique, R. ve Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400.
- Sifan, M., Nagaratnam, B., Thamboo, J., Poologanathan, K. ve Corradi, M. (2023). Development and prospectives of lightweight high strength concrete using lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 362, 129628.
- Spiesz, P. R. ve Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete: From laboratory research to field trials. In *Eleventh High Performance Concrete (11th HPC)*, Tromsø, Mart 2017.
- Suryanita, R., Firzal, Y., Maizir, H. ve Harnedi, R. A. (2026). Mechanical performance of cellular lightweight concrete using fly ash as partial cement replacement. *Geomate Journal*, 30(140), 148-155.
- Sümer, M. (1994). *Uçucu kül atıklarının beton üretiminde değerlendirilmesi*. I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Salihli, 179-185.
- Şenel, Ç. (2017). *Metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen betonlarda kür koşullarının mekanik özelliklere etkisi* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 474082). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Tam, V. W. Y., Gao, X. F. ve Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195-1203.
- Tanyildizi, H. ve Coskun, A. (2008). The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(11), 2269-2275.
- Temiz, H. ve Akçakale, A. H. (2014). Hafif agregalı betonun mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 7-20.
- Timalsina, S. Lau, K., C., Yu, H., Ng, K. (2026). Lightweight coal char-based aggregates for concrete applications. *Journal of Building Engineering*, 120, 115470.
- Topçu, İ. B. (1989). *Volkanik cürufların hafif beton agregası olarak kullanılma olanaklarının incelenmesi*. İMO X. Teknik Kongresi, Cilt 1, 437-451, Ankara.
- Topçu, İ. B. (1996). *Volkanik cüruflarla üretilen yarı hafif betonların özellikleri*. IX. Mühendislik Sempozyumu, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Isparta, 95-97.

- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 11-23.
- Topçu, İ. B. ve Uygunoğlu, T. (2021). *Yapı malzemesi*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Tosun, Y. (2014). *Geri kazanılmış agregalı betonların CDF yöntemi ile donma-çözülme (yüzeysel kabuk atma) dirençlerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 376321). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- TS 2511. (1977). *Taşıyıcı hafif betonların hesap esasları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 802. (1985). *Beton karışımı hesap esasları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-2. (2010). *Beton-taze beton deneyleri-bölüm 2: çökme (slump) deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-6. (2019). *Beton-taze beton deneyleri-bölüm 6: birim hacim kütlesi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-3. (2019). *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-6. (2010). *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-7. (2019). *Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 197-1. (2012). *Çimento-bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 206-1. (2002). *Beton-bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TÜİK. (2008). Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri (2002-2006), TÜİK HABER BÜLTENİ, Sayı:30, (www.tuik.gov.tr).
- Ulus, İ. (2007). *Ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliğinin araştırılması* (Doktora tezi, Tez No. 200791). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Wang, J., Che, Z., Zhang, K., Fan, Y., Niu, D. ve Guan, X. (2023). Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): Mechanical properties, pore structure, and water absorption. *Construction and Building Materials*, 368, 130455.
- Wang, S., Gu, X., Liu, J., Zhu, Z., Wang, H., Ge, X., Xu, X. ve Nehdi, M. L. (2023). Modulation of the workability and Ca/Si/Al ratio of cement-metakaolin cementitious material system

- by using fly ash: Synergistic effect and hydration products. *Construction and Building Materials*, 404, 133300.
- Xu, S., Fu, P., Liu, Y., Huang, T., Wang, X. ve Li, Y. (2025). Experimental and 3D simulation research on the mechanical properties of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concrete exposed to different high temperatures. *Materials*. 18, 4991.
- Yang, C. C. ve Huang, R. (1996). A two-phase model for predicting the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1567-1577.
- Yazıcı, Ş., Anuk, D. ve Arel, H. Ş. (2010). Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi. *S.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 13-24.
- Yazıcıoğlu, S. ve Demirel, B. (2005). *Elazığ yöresi pomzasının katkı maddesi olarak betonda kullanılabilirliğinin araştırılması*. Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 245.
- Yıldırım, B. (2021). *Yüksek sıcaklığa maruz kalmış normal betonlarda silis dumanı, metakaolin ve uçucu külün dayanıma kombine etkisi* (Yüksek lisans tezi, Tez No. 665080). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Yu, Q. L., Spiesz, P. ve Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 61, 18-28.
- Zhang, M. H. ve Malhotra, V. M. (1995). Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1713-1725.
- Zhang, Z., Li, B., Li, J., Nong, Q. ve Li, L. (2026). A new insight into moisture transport in foamed concrete: Coupled effects of density and fly ash. *Construction and Building Materials*, 506, 144925.