

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN BETONLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Ufuk KANDİL**

**OCAK 2021  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN BETONLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

**İnş. Yük. Müh. Ufuk KANDİL**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 12 / 2020**

**Tezin Savunma Tarihi : 06 / 01 / 2021**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada farklı mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen betonlarda geri kazanılmış agrega (GKA) kullanarak, bu betonların mekanik, durabilite ve yüksek sıcaklık etkisinde özellikleri incelenmiştir.

Doktora danışmanlığımı üstlenerek ders ve konu seçiminde yardımcı olan, çalışmalarımın yürütülmesi esnasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya teşekkür eder saygılarımı sunarım. Kıymetli vakitlerini ayırarak tez izleme jürimi oluşturan ve fikirleri ile bana yön veren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şirin KURBETCİ ve Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU hocama teşekkür ederim.

GKA temini aşamasında ki katkılarından dolayı Trabzon Büyükşehir Belediyesine ve Bazalt Beton firmasına, ayrıca malzeme temini aşamasında yardımlarını esirgemeyen Bursa Çimento ve BASF firmasına teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yardımlarından dolayı başta Arş. Gör. Safa NAYIR ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Tevfik SEFEROĞLU olmak üzere Muhammet ÇELİK, Hasan Tahsin SELİM, Ömer GEBİÇ, Arş. Gör. Memduh NAS ve Akif TÜRK'e teşekkür ederim.

Doktora çalışmam boyunca her koşulda yanımda olan, sevincimi ve üzüntümü beraber paylaştığım hayat arkadaşım ve biricik eşim Hacer KANDİL'e ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Salime KANDİL, babam Osman KANDİL ve kardeşim Duygu KANDİL'e teşekkürlerimi sunarım.

Ufuk KANDİL

Trabzon 2021

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Farklı Mineral Katkı İçeren Geri Kazanılmış Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Bazı Mekanik ve Durabilite zellikleri’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/01/2021.

Ufuk KANDİL

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
TABLOLAR DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
1.3. Beton ve Özellikleri.....	4
1.3.1. Agregalar .....	6
1.3.2. Çimento .....	7
1.3.3. Su.....	9
1.3.4. Kimyasal Katkılar.....	10
1.3.5. Mineral Katkı Maddeleri (Puzolanlar).....	12
1.3.5.1. Uçucu Kül.....	13
1.3.5.2. Silis Dumanı .....	17
1.3.5.3. Metakaolin.....	19
1.4. Geri Kazanılmış Agregalar (GKA).....	22
1.4.1. GKA Tanımı ve Önemi .....	23
1.4.2. GKA Üretimi ve Kullanım Önerileri.....	25
1.4.3. GKA Özellikleri ve Sınıflandırılması .....	27
1.4.4. GKA'nın Geleneksel Betonda Kullanılması.....	29
1.5. Betonun Durabilitesi.....	31
1.5.1. Betonların Boşluk Yapısı ve Geçirimsizliği .....	33
1.5.2. Betonda Çatlaklar .....	34

1.5.3.	Betonda Bozulma Mekanizmaları .....	35
1.5.4	Çelik Donatı Korozyonu.....	37
1.5.5.	Karbonatlaşma Etkisi.....	39
1.6.	Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi .....	39
1.7.	Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB).....	41
1.7.1.	KYB’lerde Mineral Katkı Kullanımı.....	45
1.8.	KYB’lerde Geri Kazanılmış Agrega (GKA) Kullanımı .....	47
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	55
2.1.	GKA Temini ve Kaynak Betonun Özellikleri .....	55
2.2.	Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	60
2.2.1.	Agregalar .....	60
2.2.2.	Çimento .....	66
2.2.3.	Su .....	67
2.2.4.	Uçucu Kül.....	67
2.2.5.	Metakaolin.....	68
2.2.6.	Silis Dumanı .....	69
2.2.7.	Kimyasal Katkı Maddesi .....	70
2.3.	Beton Karışımları .....	70
2.4.	KYB Üretimi, Numune Hazırlama ve Kür Süreci.....	72
2.5.	Gerçekleştirilen Deneyler .....	76
2.5.1.	Taze Beton Deneyleri .....	76
2.5.1.1.	Çökme-Yayıma ve T <sub>500</sub> Deneyi .....	76
2.5.1.2.	J Halkası Deneyi.....	77
2.5.1.3.	Elek Ayrışma Deneyi.....	77
2.5.1.4.	Taze Beton Birim Ağırlık Deneyi .....	78
2.5.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri .....	79
2.5.2.1.	Basınç Dayanımı Deneyi .....	79
2.5.2.2.	Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi.....	79
2.5.2.3.	Eğilme Dayanımı Deneyi .....	80
2.5.2.4.	Böhme Aşınma Deneyi.....	81
2.5.2.5.	Dinamik Elastisite Modülü Tayini Deneyi .....	83
2.5.2.6.	Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	85
2.5.2.7.	Hızlı Klorür Geçirimsizlik Deneyi.....	86

2.5.2.8.	Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği Deneyi .....	89
2.5.2.9.	Kılcallık Deneyi.....	91
2.5.2.10.	Sertleşmiş Beton Doygun Birim Ağırlık Deneyi .....	94
2.5.3.	Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	95
3.	BULGULAR .....	98
3.1.	Taze Beton Üzerinde Elde Edilen Deney Sonuçları.....	98
3.2.	Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları .....	100
3.2.1.	Basınç Dayanımı Ölçümleri .....	100
3.2.2.	Yarmada Çekme Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Ölçümleri .....	101
3.2.3.	Böhme Aşınma Ölçümleri.....	102
3.2.4.	Rezonans Frekans ve Dinamik Elastisite Modülü Ölçümleri.....	103
3.2.5.	Hızlı Klorür Geçirimsizliği Ölçümleri.....	104
3.2.6.	Kılcallık Ölçümleri .....	105
3.2.7.	Su Emme Ölçümleri .....	106
3.2.8.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Ölçümleri .....	107
3.2.9.	Yüksek Sıcaklığa Maruz Betonlara Ait Basınç Dayanımı Ölçümleri.....	109
3.2.10.	Yüksek Sıcaklığa Maruz Betonlara Ait Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri .....	110
4.	İRDELEME.....	113
4.1.	Kimyasal Katkı Maddesi Miktarı Değerlendirmesi.....	113
4.2.	Basınç Dayanımı Değerlendirmesi .....	115
4.3.	Yarmada Çekme Dayanımı Değerlendirmesi .....	121
4.4.	Eğilme Dayanımı Değerlendirmesi .....	125
4.5.	Böhme-Aşınma Değerlendirmesi .....	128
4.6.	Dinamik Elastisite Modülü Değerlendirmesi.....	130
4.7.	Hızlı Klorür Geçirimsizliği Değerlendirmesi .....	134
4.8.	Kılcallık Değerlendirmesi.....	139
4.9.	Su Emme Değerlendirmesi.....	143
4.10.	Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği Değerlendirmesi .....	147
4.11.	Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi.....	150
4.12.	KYB'lerde Yüksek Sıcaklık Etkisi .....	153
4.12.1.	Yüksek Sıcaklığa Maruz KYB'lerin Basınç Dayanımı Değerlendirmesi.....	154
4.12.1.1.	28 Gün Kür Gören Betonlar İçin Basınç Dayanımı Değerlendirmesi .....	154
4.12.1.2.	90 Gün Kür Gören Betonlar İçin Basınç Dayanımı Değerlendirmesi .....	160

4.12.2.	Yüksek Sıcaklığa Maruz KYB'lerin Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi..	166
4.12.2.1.	28 Gün Kür Sonunda Ölçülen Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi.....	166
4.12.2.2.	90 Gün Kür Sonunda Ölçülen Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi.....	171
4.13.	ANOVA Değerlendirmesi .....	177
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	181
6.	KAYNAKLAR.....	185
ÖZGEÇMİŞ		





Doktora Tezi

ÖZET

FARKLI MİNERAL KATKI İÇEREN GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI  
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİ

Ufuk KANDİL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU  
2021, 201 Sayfa

Çalışmanın amacı geri kazanılmış agregası (GKA) ve farklı mineral katkıları kullanarak kendiliğinden yerleşen beton (KYB) tasarlamak ve üretmek, bu betonların bazı taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek ve aynı zamanda bu betonların yüksek sıcaklık etkisinde davranışlarını araştırmaktır. Bu amaçla iri GKA ve ince GKA, normal iri ve ince agregası ile %35, %70 ve %100 oranlarında ikame edilerek KYB'ler üretilmiş ve bunlar GKA içermeyen KYB ile karşılaştırılmıştır. Tasarımda toplam bağlayıcının %30'u oranında kullanılan mineral katkı; %30 uçucu kül, %20 uçucu kül + %10 metakaolin, %20 uçucu kül + %10 silis dumanı ve %20 uçucu kül + %5 metakaolin + %5 silis dumanı olacak şekilde dört farklı kombinasyonda belirlenmiştir. Taze halde beton üzerinde çökme-yayıma, T<sub>500</sub> süresi, J halkası ve elek ayrışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş halde beton üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, Böhme aşınma, dinamik elastisite modülü tayini, hızlı klorür geçirimsizliği, kılcallık, basınç altında maksimum su işleme derinliği tayini ve ultrases geçiş hızı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu betonlar 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'ye maruz bırakılmış ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ölçümleri gerçekleştirmek suretiyle yüksek sıcaklık etkisinde davranışları incelenmiştir. Üretilen betonların GKA içermeyen betona kıyasla mekanik ve durabilite özelliklerindeki değişimin anlamlı olup olmadığı ANOVA testi vasıtasıyla test edilmiştir. ANOVA testi ile %35 iri GKA ve %35 ince GKA ikameli betonların özelliklerinde GKA içermeyenlere nazaran anlamlı bir farkın olmadığı görülmektedir. Ayrıca %10 silis dumanı ve %5 metakaolin + %5 silis dumanı içeren betonların en iyi performans gösterdiği söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Geri kazanılmış agregası, KYB, Dayanım, Durabilite, Yüksek sıcaklık, ANOVA testi

PhD Thesis

SUMMARY

SOME MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF SELF-COMPACTING  
CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATE CONTAINING DIFFERENT  
MINERAL ADDITIVES

Ufuk KANDİL

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU  
2021, 201 Pages

The aim of the study is to design and produce self-compacting concrete (SCC) by using different proportions of recycled aggregate (RA) and mineral additives, to determine some of the fresh and hardened properties of these concretes, and to investigate the behavior of these concretes at high temperatures. For this purpose, SCCs were produced by replacing coarse RA and fine RA with normal coarse and fine aggregate at 35%, 70% and 100% ratios and these were compared with SCC without RA. Mineral additive used at the rate of 30% of the total binder in the design; 30% fly ash, 20% fly ash + 10% metakaolin, 20% fly ash + 10% silica fume and 20% fly ash + 5% metakaolin + 5% silica fume were arranged in four different combinations. The tests carried out on fresh concrete were slump flowing,  $T_{500}$  time, J ring and sieve separation. Testing of compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, Bohme abrasion, determination of dynamic elasticity modulus, rapid chloride permeability, capillarity, maximum water penetration depth under pressure and ultrasound transmission velocity tests were carried out on the hardened concrete. These concretes were exposed to 200°C, 400°C, 600°C and 800°C and their behavior under high temperature was investigated by performing compressive strength and ultrasound transmission velocity tests. The ANOVA test shows that there is no significant difference in the properties of 35% coarse RA and 35% fine RA substituted concretes compared to those without RA. It can also be concluded that concretes containing 10% silica fume and 5% metakaolin + 5% silica fume perform best.

**Keywords:** Recycled aggregate, SCC, Strength, Durability, High temperature, ANOVA test

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Ülkelere göre çimento üretimi miktarları (%) .....	9
Şekil 1.2.	(a) Yüksek silisli uçucu kül (pulverize uçucu kül) (b) ve (c) Yüksek kireçli uçucu kül.....	14
Şekil 1.3.	Silis dumanına ait SEM görüntüsü .....	18
Şekil 1.4.	Metakaoline ait SEM görüntüsü .....	20
Şekil 1.5.	Dünya çapında agregaya olan talep .....	22
Şekil 1.6.	İnşaat ve yıkım atıklarında bulunan malzemeler .....	23
Şekil 1.7.	Ülkelerin ürettikleri ve geri dönüştürerek kullandıkları inşaat ve yıkım atıklarının miktarı .....	24
Şekil 1.8.	GKA üretim tesisi şeması .....	25
Şekil 1.9.	Geri kazanılmış agreganın şematik gösterimi.....	29
Şekil 1.10.	Porozite ve geçirimsizlik arasındaki ilişki .....	34
Şekil 1.11.	Betonun fiziksel bozulma nedenleri .....	36
Şekil 1.12.	Betonun kimyasal bozulma nedenleri.....	36
Şekil 1.13.	Yanmış bir binaya ait fotoğraf.....	41
Şekil 1.14.	Kendiliğinden yerleşen betonların akıcılığı .....	42
Şekil 1.15.	KYB ve geleneksel beton için tipik karışım oranları.....	44
Şekil 2.1.	Beton yol plaklarını kırma işlemine ilişkin görseller.....	55
Şekil 2.2.	Kırılmış beton plak blokların kamyonlara yüklenmesi.....	56
Şekil 2.3.	Beton bloklarının GKA haline getirilmesi .....	56
Şekil 2.4.	Beton plak ve beton parçalar üzerinde Schmidt okuması .....	57
Şekil 2.5.	Beton plaktan ve kırılmış parçalardan karot alma işlemi .....	58
Şekil 2.6.	Ultras ses geçiş hızı tayini.....	58
Şekil 2.7.	Başlıklanmış karot numuneler ve basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi	59
Şekil 2.8.	Agrega eleme cihazı (solda) ve öğütme cihazı (sağda) .....	61
Şekil 2.9.	İri GKA ikame edilerek üretilen KYB'lere ilişkin granülometri eğrileri .....	62
Şekil 2.10.	İnce GKA ikame edilerek üretilen KYB'lere ilişkin granülometri eğrileri .....	62

Şekil 2.11. İnce taneleri uzaklaştırmak için agregaların 1.6 mm elek üzerinde yıkanması.....	64
Şekil 2.12. Elenmiş, yıkanmış ve kurutulmuş agrega numuneleri.....	64
Şekil 2.13. Los Angeles cihazı.....	65
Şekil 2.14. Uçucu küle ait XRD analizi.....	67
Şekil 2.15. Metakaoline ait XRD analiz .....	68
Şekil 2.16. Çalışmada kullanılan bağlayıcı malzemelere ait görsel .....	69
Şekil 2.17. Beton üretimlerinde kullanılan karıştırıcı .....	73
Şekil 2.18. Numunelere ilişkin şematik gösterim .....	73
Şekil 2.19. Tek üretimde denenmek üzere hazırlanan KYB numuneler.....	74
Şekil 2.20. Su dolu kür tankında tutulan numuneler.....	75
Şekil 2.21. T <sub>500</sub> ve çökme-yayılanın ölçülmesi.....	76
Şekil 2.22. J halkası deneyinin gerçekleştirilmesi .....	77
Şekil 2.23. Elek ayırma deneyi ve deneyde kullanılan elek .....	78
Şekil 2.24. Basınç dayanımı test cihazı .....	79
Şekil 2.25. Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	80
Şekil 2.26. Eğilme deneyi düzeneği.....	81
Şekil 2.27. Böhme aşınma deneyi aparatı.....	82
Şekil 2.28. Zımpara (korundum) tozu ve aşınan deney numunesi.....	83
Şekil 2.29. Rezonans frekans deney düzeneği .....	83
Şekil 2.30. Rezonans frekans deney kontrol ünitesinde ekran görüntüsü.....	84
Şekil 2.31. Ultrases geçiş hızı tayini cihazı .....	85
Şekil 2.32. Ultrases geçiş hızı deneyi.....	86
Şekil 2.33. Deney düzeneğine ait hücrelerin iç kısmının görünümü .....	87
Şekil 2.34. Hızlı klorür geçirimsizlik deneyi hazırlama aşaması .....	87
Şekil 2.35. Hızlı klorür geçirimsizliği test düzeneği .....	88
Şekil 2.36. Basınçlı su işleme derinliği hücresi .....	90
Şekil 2.37. Su işleme derinliği deneyi sonrası numunenin yarılmış hali .....	90
Şekil 2.38. Yarma işlemi sonrası su işleme seviyesinin belirlenmesi .....	91
Şekil 2.39. Basınçlı su işleme derinliği tayini deneyi cihazı.....	91
Şekil 2.40. Kılcallık deneyi numuneler kurutmak için kullanılan etüv.....	92
Şekil 2.41. Kılcallık deney düzeneği .....	93
Şekil 2.42. 0.1 g hassasiyetli terazi .....	93

Şekil 2.43.	Birim ağırlığı belirlemede kullanılan Arşimet terazisi .....	95
Şekil 2.44.	Uygulanan sıcaklık rejiminin şematik gösterimi .....	96
Şekil 2.45.	Yüksek sıcaklık fırını.....	97
Şekil 2.46.	Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler (soldan sağa sıcaklık artmakta).....	97
Şekil 4.1.	İri GKA ikameli KYB'lerde kullanılan kimyasal katkı miktarları .....	113
Şekil 4.2.	İnce GKA ikameli KYB'lerde kullanılan kimyasal katkı miktarları .....	114
Şekil 4.3.	7 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları .....	115
Şekil 4.4.	7 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları .....	116
Şekil 4.5.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları .....	117
Şekil 4.6.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları .....	117
Şekil 4.7.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları .....	118
Şekil 4.8.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları .....	119
Şekil 4.9.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları .....	121
Şekil 4.10.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları .....	122
Şekil 4.11.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları .....	123
Şekil 4.12.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları .....	123
Şekil 4.13.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları.....	125
Şekil 4.14.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları.....	126
Şekil 4.15.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları.....	126
Şekil 4.16.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları.....	127
Şekil 4.17.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin aşınma değerleri .....	129
Şekil 4.18.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin aşınma değerleri .....	129
Şekil 4.19.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri.....	130
Şekil 4.20.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri.....	131
Şekil 4.21.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri.....	132
Şekil 4.22.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri.....	132
Şekil 4.23.	GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen dinamik elastisite modülleri.....	133

Şekil 4.24.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri .	134
Şekil 4.25.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri	135
Şekil 4.26.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri .	136
Şekil 4.27.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri	137
Şekil 4.28.	GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen hızlı klorür geçirimsizlikleri .....	138
Şekil 4.29.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları .....	139
Şekil 4.30.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları .....	140
Şekil 4.31.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları .....	141
Şekil 4.32.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları .....	141
Şekil 4.33.	GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen kılcallık katsayıları.....	142
Şekil 4.34.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri .....	143
Şekil 4.35.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri .....	144
Şekil 4.36.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri .....	144
Şekil 4.37.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri .....	145
Şekil 4.38.	GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen su emme değerleri .....	146
Şekil 4.39.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri.....	147
Şekil 4.40.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri.....	148
Şekil 4.41.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri.....	148
Şekil 4.42.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri.....	149
Şekil 4.43.	GKA içermeyen KYB'ler için kür süresine ilişkin MSİD ölçümlerinin grafiksel gösterimi .....	150
Şekil 4.44.	28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı .....	151
Şekil 4.45.	28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı .....	151
Şekil 4.46.	90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı .....	152
Şekil 4.47.	90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı .....	152
Şekil 4.48.	GKA içermeyen KYB'ler için kür süresine ilişkin ultrases geçiş hızı değişiminin grafiksel gösterimi.....	153
Şekil 4.49.	%30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	154
Şekil 4.50.	%10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı.....	155
Şekil 4.51.	%10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	155
Şekil 4.52.	%5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .	156
Şekil 4.53.	%30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı	157

Şekil 4.54.	%10 MK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı.....	157
Şekil 4.55.	%10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	158
Şekil 4.56.	%5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	159
Şekil 4.57.	%100 oranında GKA içeren 800°C`ye maruz KYB'lerin basınç dayanımları .....	159
Şekil 4.58.	%30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	160
Şekil 4.59.	%10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı.....	161
Şekil 4.60.	%10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	161
Şekil 4.61.	%5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .	162
Şekil 4.62.	%30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	162
Şekil 4.63.	%10 MK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı.....	163
Şekil 4.64.	%10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	164
Şekil 4.65.	%5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı .....	164
Şekil 4.66.	%100 oranında GKA içeren 800°C`ye maruz KYB'lerin basınç dayanımları .....	165
Şekil 4.67.	%30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	166
Şekil 4.68.	%10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	167
Şekil 4.69.	%10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları.....	167
Şekil 4.70.	%5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	168
Şekil 4.71.	%30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	168
Şekil 4.72.	%10 MK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .	169
Şekil 4.73.	%10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları ..	170
Şekil 4.74.	%5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	170
Şekil 4.75.	%100 oranında GKA içeren 800°C`ye maruz KYB'lerin ultrases geçiş hızları .....	171
Şekil 4.76.	%30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	172
Şekil 4.77.	%10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	172
Şekil 4.78.	%10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları.....	173
Şekil 4.79.	%5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .....	173
Şekil 4.80.	%30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızı .....	174

Şekil 4.81. %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları .	174
Şekil 4.82. %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları ..	175
Şekil 4.83. %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları.....	175
Şekil 4.84. %100 oranında GKA içeren 800°C`ye maruz KYB'lerin ultrases geçiş hızları.....	176





## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Portland çimentosunun ana bileşenleri .....	8
Tablo 1.2. Karma suyunda bulunabilecek yabancı maddeler için sınır değerler .....	10
Tablo 1.3. Bazı ülkelerde betonda izin verilen geri kazanılmış agrega kullanımını .....	26
Tablo 1.4. EFNARC'a göre KYB'lerin sağlaması gereken özellikler ve kullanılan deneyler .....	45
Tablo 2.1. GKA'nın elde edildiği betona ait kırım öncesi ve sonrası Schmidt okumaları (R değeri).....	59
Tablo 2.2. Beton yol plaklar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı değerleri (km/s).....	60
Tablo 2.3. Beton yol plağına ait karotlar üzerinde belirlenen basınç dayanımları (MPa).....	60
Tablo 2.4. Agregalara ilişkin DYK özgül ağırlıklar ve su emme değerleri .....	63
Tablo 2.5. Los Angeles deneyinde kullanılacak agrega miktarları .....	63
Tablo 2.6. Tambura konulması gereken bilye sayısı .....	65
Tablo 2.7. Los Angeles katsayısına göre agrega kategorileri .....	66
Tablo 2.8. Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler .....	66
Tablo 2.9. Uçucu külün kimyasal bileşimi .....	67
Tablo 2.10. Metakaoline ilişkin kimyasal bileşim .....	68
Tablo 2.11. Silis dumanına ait kimyasal bileşim .....	69
Tablo 2.12. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesine ilişkin fiziksel özellikler .....	70
Tablo 2.13. Çalışmada gerçekleştirilen beton karışımları (kg/m <sup>3</sup> ).....	72
Tablo 3.1. Çökme-yayılmaya göre KYB'lerin sınıflandırılması.....	98
Tablo 3.2. Viskoziteye göre KYB'lerin sınıflandırılması .....	98
Tablo 3.3. Elek ayrışma direncine göre KYB'lerin sınıflandırılması .....	99
Tablo 3.4. KYB'lere ait taze beton özellikleri, birim ağırlıklar ve kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı oranları.....	99
Tablo 3.5. KYB'lere ilişkin basınç dayanımı değerleri .....	100
Tablo 3.6. KYB'lerin yarmada çekme ve eğilme dayanımları .....	101
Tablo 3.7. KYB'lere ait Böhme aşınma ölçümleri .....	102
Tablo 3.8. KYB'lere ait rezonans frekansları ve dinamik elastisite modülleri .....	103

Tablo 3.9.	ASTM C 1202 standardına göre betonların geçirimsizlik sınıfları.....	104
Tablo 3.10.	Hızlı klorür geçirimsizliği ölçümleri .....	105
Tablo 3.11.	KYB'lere ilişkin ölçülen kılcallık katsayıları .....	106
Tablo 3.12.	KYB'lere ilişkin ölçülen su emme değerleri .....	107
Tablo 3.13.	Betonda su işleme derinliğine göre betonun geçirimsizlik sınıflaması.....	108
Tablo 3.14.	Basınçlı su geçirimsizliği deneyine ilişkin ölçümler .....	108
Tablo 3.15.	28 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası basınç dayanımları .....	109
Tablo 3.16.	90 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası basınç dayanımları .....	110
Tablo 3.17.	28 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası ölçülen ultrases geçiş hızları.....	111
Tablo 3.18.	90 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası ölçülen ultrases geçiş hızları.....	112
Tablo 4.1.	Karışımlara ilişkin kısaltmalar ve kısaltmaların tanımları.....	113
Tablo 4.2.	Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımları için ANOVA testi .....	178
Tablo 4.3.	Aşınma ve ultrases geçiş hızı ölçümleri için ANOVA testi .....	178
Tablo 4.4.	Kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme derinliği ölçümleri için ANOVA testi .....	179
Tablo 4.5.	Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ölçümleri için ANOVA testi .....	180

## SEMBOLLER DİZİNİ

C	: Coulomb
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
EFNARC	: European Federation of National Trade Associations (Avrupa Yapı ve Beton Sistemleri Uzmanları)
GKA	: Geri Kazanılmış Agregata
GKAB	: Geri Kazanılmış Agregalı Beton
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
MK	: Metakaolin
MKİ	: Mineral katkı ikamesi
MSİD	: Maksimum Su İşleme Derinliği
NA	: Normal Agregata
OSİD	: Ortalama Su İşleme Derinliği
RCA	: Recycled Concrete Aggregate
SD	: Silis Dumanı
S/B	: Su/Bağlayıcı
UK	: Uçucu Kül
THBB	: Türkiye Hazır Beton Birliği

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

İnsanların en temel ihtiyaçlarından birini barınma oluşturmaktadır. Bu sebepten ötürü insanlar eski çağlardan beri doğada var olan malzemeleri kullanarak veya bu malzemeleri geliştirerek yaşayabilecekleri yerler inşa etmeye çalışmışlardır. Yapılan araştırmalar ve denemelerle yapı inşasında kullanılan malzemeler ve inşaat yapım teknikleri çeşitlenmiş ve gelişme kaydetmiştir. Tüm bu gelişmelere rağmen iyi bir planlamanın ve işçiliğin yapının kalitesi açısından önemli olduğu tespit edilmiştir. Günümüze dek geliştirilen malzemeler içerisinde şüphesiz beton dünyada en çok tüketilen yapı malzemesi olup sudan sonra en çok kullanılan malzeme konumundadır [1-6]. Dünyada yıllık ortalama beton üretiminin insan başına yaklaşık 1 ton olduğu ifade edilmektedir [7]. Betonun en önemli bağlayıcı bileşeni olarak Portland çimentosu yaygın olarak kullanılmaktadır. Portland çimentosu üretiminde fazla miktarda enerji tüketilmektedir. Çimento üretiminde çoğunluğu klinkerin ön işlenmesi aşamasında kalkerden ortaya çıkan CO<sub>2</sub> salınımı nedeniyle büyük miktarda sera gazı emisyonu meydana gelmektedir. Çeşitli biçimlerde atmosfere yayılan sera gazları iklim değişikliği gibi büyük sorunlara neden olmaktadır. 2017 yılında yıllık toplam sera gazı emisyonu 53,5 Gt karbondioksit eşdeğeri ile (CO<sub>2</sub>-e) rekor seviyeye ulaşmıştır. İnsanlığın ve dünyanın geleceği açısından altyapı sektörü gibi sera gazı oluşumunda büyük bir yere sahip sektörlerde sürdürülebilir alternatifler benimsenerek sera gazı emisyonlarının azaltılması gerekli olmuştur [8]. Karbondioksit emisyonu nedeniyle inşaat sektörü çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve çevre kirliliği dünyada başlıca çevre sorunlarından biridir. Bir ton çimento üretimi için yaklaşık 0.8 ton CO<sub>2</sub> emisyonu meydana geldiği rapor edilmektedir [9].

Hızla artan dünya nüfusu ile birlikte artan tüketim ve bundan kaynaklı üretim talebi hızla artmaktadır. Artan üretim talebi ile üretimde maliyetler düşürülmeye çalışılmaktadır. Üretimde maliyeti düşürmenin bir yolu bir üretimden arta kalan atık malzemeleri başka bir sektörde kullanmakla mümkündür. Bu şekilde bir taraftan malzeme israfı önlenirken diğer taraftan enerji tasarrufu sağlanabilmekte hem de atık malzemenin üretimde kullanımı ile daha iyi özelliklere sahip yeni malzeme elde edilebilmektedir. Bu nedenle çimento yerine kullanılabilir veya kısmen çimento ile ikame edilebilecek alternatif malzemelerin

araştırılmasına ve geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde beton üretiminde çimento ile ikame edilmek üzere çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi puzolanik özelliğe sahip ince öğütülmüş malzemelerdir. Bu malzemeler betonun dayanımına ve dayanıklılığına belli oranda katkı sağlayan özellikte malzemelerdir [10].

Geleneksel betonda en fazla miktarda kullanılan malzeme agregası olup betonun hacimce yaklaşık %70-80'ini oluşturur. Betonda bu kadar fazla miktarda kullanılması nedeniyle doğal olarak agregası kaynakları hızla tükenmektedir. Bu sebeple tüketilen doğal kaynak miktarını azaltmak ve katı atıkları geri kazanmak zorunlu hale almıştır. Betonda kullanılan doğal agregası yerine daha önceki beton üretimlerinde kullanılmış ve ömrünü tamamlamış veya beton üretiminden artı kalan betonları öğüterek yeni üretilecek olan betonda doğal agregası yerine ikame edilerek kullanımı son zamanların yaygın araştırma konusu haline gelmiştir. Doğal ve geri kazanılmış agregası (GKA) arasındaki temel fark beton kalitesine önemli derecede etkiyen GKA'ların yüzeyine yapışan eski harcın varlığıdır [11]. Son zamanlarda sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı esasında kabul edilen geri kazanılmış agregaların beton üretiminde kullanımı artmaktadır. Hatta bazı uluslararası betona ilişkin yönetmeliklerde yeni betonda doğal iri agregasının tamamının veya kısmen geri kazanılmış iri agregası ile yer değiştirilmesi önerilmektedir [12].

Karmaşık yapıların tasarımında, sık donatılı yapı elemanlarında betonun vibrasyonu işleminin sağlıklı yapıp yapılamaması noktasında endişeler ortaya çıkmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi beton tasarımında da çeşitli gelişmelere neden olmuş ve yeni tip betonların ortaya çıkmasına yol açmıştır. Araştırmacılar kendi ağırlığı altında kalıbına kolayca yerleşebilen, özellikle donatı yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde kolayca şekil alabilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretmeyi başarmışlardır. Kendiliğinden yerleşen beton gün geçtikçe ilgi odağı olmuş ve son 10 yılda küresel çapta tanınırlığa sahip olmuştur. KYB ile normal betonun aksine yerleştirme ve sıkıştırmadan kaynaklı gürültü ve diğer olumsuz etkiler ortadan kalkmaktadır. Ayrıca KYB'nin kullanıldığı inşaatların çoğunda genel olarak inşaat süresinin kısaldığı gözlemlenmektedir. KYB sahip olduğu taze beton özellikleri sayesinde yerçekimi etkisi altında kuma ve segregasyon göstermeden uniform olarak akan yeterli viskoziteye sahip bir betondur [13].

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun dayanımını normal kür gören betona bir miktar düşük olur. İnşaat malzemeleri 1200°C'ye kadar ısıtıldığında, ahşap yanar, çelik yumuşar ve direncini kaybeder, beton veya taş yapıları malzemeler parçalanır. Yapı malzemelerinin hiçbiri

bu kadar yüksek sıcaklıklara dayanamaz. Ancak, diğer inşaat malzemelerine kıyasla beton daha dayanıklıdır ve daha uzun süre yangına dayanıklılık gösterir [14]. Tüm bu nedenlerden dolayı beton yapıları malzemeler başta olmak üzere tüm yapı malzemelerine ilişkin yüksek sıcaklık etkisi araştırılmaktadır.

## 1.2. Amaç ve Kapsam

Beton yapıların yıkımı veya inşası aşamasında oldukça fazla yapım ve yıkım atıkları meydana gelmekte ve bu atıklar eğer yeniden başka bir imalatta kullanılmazsa çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Yıkım atıklarının deniz olan yerlerde deniz dolgu malzemesi olarak kullanılması bu atıkların yönetimini kısmen kolaylaştırmaktadır. Ancak özellikle ülkemizde kentsel dönüşüm kapsamında betonarme yapılardan oldukça fazla miktarda beton atık malzeme meydana gelmektedir. Bu atıkların özellikle betondan oluşan kısımlarının başka bir betonda agrega olarak kullanımı konusunda literatürde oldukça fazla çalışma gerçekleştirilmiş ve halen çeşitli araştırmalar devam etmektedir. Geri kazanılmış agrega (GKA) olarak tabir edilen inşaat molozlarından elde edilen agreganın geleneksel betonlarda kullanımına ilişkin literatür verisi fazla olmasına rağmen bu agregaların kendiliğinden yerleşen betonda (KYB) kullanımına ilişkin yapılan çalışmalar son 10 yılda sınırlı olmak kaydıyla artış göstermiştir.

GKA'ların çoğunlukla beton özelliklerine olumsuz etki yaptığı bilinmektedir. GKA üzerinde yapışan eski harcın betonda daha boşluklu ve daha geçirgen bir yapı oluşturduğu bilinmektedir. Bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için literatürde genellikle su/bağlayıcı oranı düşürülmekte, çimento miktarı artırılmakta veya en çok tercih edileni mineral katkı maddesi kullanma gibi çözümler aranmaktadır.

Bu çalışmada, iri ve ince GKA normal iri ve ince agrega ile %35, %70 ve %100 oranlarında ikame edilerek kendiliğinden yerleşen betonlar üretilmiştir. Ayrıca GKA içermeyen şahit beton olmak üzere toplam 7 farklı agrega içeriğine sahip KYB'ler üretilmiştir. Literatürde KYB üretiminde çimento ile ikame olacak şekilde mineral katkı maddeleri kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca Avrupa Yapı ve Beton Sistemleri Uzmanları (EFNARC) tarafından da önerilmektedir. Toz miktarı bu çalışmada  $550 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Tüm karışımlarda toz miktarının %70'i çimento olarak alınmıştır. %30'luk kısım farklı oranlarda olmak üzere uçucu kül, silis dumanı ve metakaolinden oluşmaktadır.

Bu şekilde çalışma kapsamında 28 farklı KYB tasarımı yapılmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu üretimlerde KYB şartlarının sağlanıp sağlanmadığı EFNARC tarafından öngörülen deneylerle kontrol edilmiştir. Betonların öngörülen işlenebilirlik özellikleri süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlanmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri 7, 28 ve 90 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilmiştir. 7 gün sonunda yalnızca basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilirken 28 gün sonunda tüm deneyler, 90 gün sonunda Böhme deneyi hariç diğer tüm deneyler yapılmıştır.

Taze beton karışımları üzerinde çökme yayılma, çökme yayılmada  $T_{500}$ , J-halkası, elek ayrışma ve taze beton birim hacim ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş beton deneyleri olarak; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, aşınma (Böhme), rezonans frekansı ile elastisite modülü tayini, kılcalık, su emme, maksimum su işleme derinliği tayini, sertleşmiş beton birim ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yukarıda belirtildiği üzere gerçekleştirilen 28 farklı beton karışımının her biri için yüksek sıcaklık etkisi de araştırılmıştır. Bu amaçla betonlara 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklar uygulanmış ve betonların basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızlarının sıcaklığa bağlı olarak değişimleri incelenmiştir.

KYB'lerde GKA agrega kullanımının başta durabilite olmak üzere betonun çeşitli özellikleri üzerine etkisine ilişkin literatürde oldukça az sayıda araştırma mevcuttur ancak konuya son yıllarda ilginin önemli derece artmış olduğu görülmektedir. Ayrıca GKA'nın kullanıldığı KYB'lere yüksek sıcaklık etkisinin incelendiği ilişkin herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan bakıldığında gerçekleştirilen çalışma özgünlük açısından oldukça değerli ve literatürde var olan boşlukları kısmen dolduracağı veya bu boşluklara ışık tutacağı düşünülen bir çalışmadır.

### **1.3. Beton ve Özellikleri**

Beton, dayanımına bağlı olarak farklı miktarda agrega, çimento, su ve istenildiğinde betonun özelliğine göre çeşitli mineral ve/veya kimyasal katkıları içeren ve tüm bu malzemelerin homojen karışımından oluşan kompozit bir malzemedir. Beton üretildikten sonra kolay şekil verilebilen ve sertleştikten sonra yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmesi nedeniyle oldukça yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Betonun çekme dayanımı düşük olduğundan çekme gerilmelerinin olduğu yapı elemanlarında donatı kullanılır. Betonu

diğer yapı malzemelerine göre üstün kılan önemli bir özellik plastik kıvamı sayesinde kolayca şekil verilebilmesidir [15].

Betona olan talep artan dünya nüfusuyla birlikte daha da artmaktadır [16]. Beton, barajlar, kaldırımlar, bina çerçeveleri, köprü ve viyadük gibi birçok farklı yapıda diğer tüm inşaat malzemelerinden oldukça fazla miktarda kullanılmaktadır. Beton kalitesi önemli ölçüde değişebilen bir malzemedir. Betonun bağlayıcısı olan çimentonun kalitesi üretici firma tarafından donatı çeliğine benzer bir şekilde garanti edilirken, agregalar, karıştırma prosedürü, üretim, yerleştirme ve sıkıştırma gibi işlemler nedeniyle betonun kalitesi tam manasıyla garanti edilemez. Bir hazır beton tedarikçisinden belirtilen kalitede beton elde etmek mümkündür ancak bu durumda bile nakliye, yerleştirme ve her şeyden önce sıkıştırma gibi işlemler betonun kalitesini büyük ölçüde etkiler. Ayrıca donatıdan farklı olarak beton karışım malzemelerinin ve oranlarının kombinasyonları neredeyse sınırsızdır ve bu nedenle malzemelerin ve oranlarının seçimleri betonun özellikleri üzerinde oldukça etkilidir [17]. Betonun yapısal performansı ve kullanım aşamasındaki davranışını belirlemede basınç dayanımı testi en önemli testtir. Bu test betonun birçok özelliği hakkında tahmini bir fikir verebilir. Betonun dayanım gelişimine etkiyen bazı faktörler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir [9]:

- 1) Çimento tipi,
- 2) Su/bağlayıcı oranı,
- 3) Betonda kullanılan mineral katkı maddelerinin kimyasal ve puzolanik reaktiflik gibi özellikleri,
- 4) Çimentonun mineral katkı maddesi ile ikame yüzdesi,
- 5) Betonun kür derecesi,
- 6) Sıcaklık.

Beton kullanımında karşılaşılan en büyük dezavantajlardan biri dayanıklılık (durabilite) yönünden karşılaşılan problemlerdir. Farklı türdeki zararlı ajanların bulunduğu ortamlara maruz kalan betonun zamanla durabilite ve mukavemet özelliklerinde zayıflamalar görülmektedir. Olumsuz çevre koşullarına direnmek ve sürdürülebilir bir yapı geliştirmek için güçlü ve dayanıklı beton üretimi hedeflenmektedir. Beton için durabilite kaybına neden olan zararlı ajanların başında asitli ortamlar gelmektedir. Betonda asit saldırısının başlıca nedenleri yeraltı suyu, kanalizasyon boru hatları, asit yağmuru ve çeşitli endüstriyel ortamlardır. Asitli ortamlarda beton özelliklerini çok hızlı bir şekilde kaybeder ve mukavemetinde önemli azalma meydana gelir. Ayrıca asitler gözenek suyuna yerleşen



çözünmez tuzlar oluşturur ve bu tuzlar beton içerisinde genleşmeye ve çatlaklara neden olur. Bazı asitler betonda sürekli çözünmelere yol açarak konsantre iyonlar üreterek kompleks bileşikler oluştururlar. Böylece, asidik çözeltinin betonun gözenekleri içine nüfuz etmesi, C-S-H jelinin dekalsifikasyonuna yol açarak beton mukavemetinin azalmasına yol açar. Sülfürik asit, sülfat atağı ile birlikte saldırdığı için tüm asit türleri arasında en tehlikeli olanıdır [16].

Dünyada atıklar ve doğaya salınan CO<sub>2</sub> miktarı hızla artmaktadır. Bu olumsuz etkileri en aza indirmek için üretimi azaltmak ve/veya ortaya çıkan atıkları yeni ürünlerin üretiminde kullanmak önem arz etmektedir. Bu perspektiften bakıldığında dünyada sudan sonra en çok kullanılan malzeme olan betonun çevreye verdiği zararları azaltmak için birçok çalışma yapılmış ve pratikte bazı uygulamalar geliştirilmiş, uygulanmış ve hala geliştirilerek uygulanmaya devam etmektedir. İnşaat yapım ve yıkım süreçlerinden meydana gelen atıkların agrega olarak geri dönüşümü ve yeniden kullanımı ile çevre kirliliğini en aza indirilebilir ve doğal agrega kaynaklarının kullanımı azaltılarak doğa korunabilir [18]. Ayrıca mineral katkı maddelerinin betonda kullanılmasıyla çimentodan tasarruf sağlanarak çimento üretimi boyunca ortaya çıkan zararlı gazların salınımı ciddi miktarda azaltılmış olur. Sadece bununla kalmayıp mineral katkı maddelerinin çevreye atılması önlenmiş olur ve bu maddelerin betonda kullanılmasıyla betonun bazı özellikleri (özellikle dayanıklılık) iyileştirilmiş olur.

Yüksek performanslı beton olarak adlandırılan yüksek dayanım ve daha iyi dayanıklılığa sahip olan betonlar gün geçtikçe geleneksel beton ile yer değiştirmektedir [19]. Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) da bu sınıfa girmektedir. Son zamanlarda popülerlik kazanan KYB yüksek yayılma kapasitesi ile karakterize edilir ve bu nedenle sık donatılı yapı elemanlarında kullanılabilir, kalıp şeklinin tüm açık ve kapalı köşelerini doldurabilir ve kendi ağırlığı altında sıkışabilir. KYB genellikle daha yüksek çimento hamuru oranına sahiptir ve cüruf, doğal puzolan ve silis dumanı gibi bazı mineral katkıları içeren özel bir betondur [18].

### **1.3.1. Agregalar**

Agregalar hacimsel olarak betonun %60-80'ini oluştururlar. Agregalar karayolları gibi yapılarında temel malzemedir. Bitümlü yol kaplamalarının hacimce %75-85'ini agregalar oluşturmaktadır. Dolayısıyla betonların ve yolların ömründe ve kalitesinde agregaların sahip

olduğu özellikler önemli rol oynarlar. Beton agregaları standardı TS 706 EN 12620+A1 standardına göre agrega yapılarında kullanılan taneli malzeme olarak tanımlanmaktadır [20]. Amerikan standardı ASTM D8 ise agregayı harç veya beton üretmek için bir bağlayıcı madde ile kullanılan veya temel tabakaları, demiryolu balastları vb. işlerde tek başına kullanılan kum, çakıl, cüruf ya da kırmataş gibi mineral kompozisyonlu granüler bir malzeme olarak tanımlamaktadır [21]. Agregalar genellikle çimento hamurunda dağılmış inert bir malzeme olarak görülür. Fakat aslında agregalar gerçek manada inert olmayıp fiziksel, termal hatta bazı durumlarda kimyasal özellikleri bile betonu etkileyebilen malzeme durumundadır [22].

Agregalar betonda çimento hamurunun zamanla gösterebileceği hacim değişikliği (büzülme-genleşme gibi) ve buna bağlı oluşabilecek çatlakları azaltır. Sert ve yüksek dayanımlı olmalarından dolayı betonun dayanımını ve çevre koşullarına dayanıklılığı artırır. Agrega dayanımının beton dayanımına olan katkısı özellikle yüksek mukavemetli betonlarda daha belirgin olarak göze çarpar. Betona ait birçok mekanik ve fiziksel özellikler betonda kullanılan agrega özellikleri tarafından belirlenir [23]. TS 706 EN 12620+A1 standardına göre 4 mm göz açıklıklı elek üstünde kalan agregalar iri agrega, bu elekten geçen agregalar ise ince agrega (kum) olarak tanımlanmaktadır [20].

Agregalar kolay temin edilebilmesi, ucuz olması, aşınmaya ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olması ve hacimsel değişimlerinin neredeyse olmaması gibi özelliklerinden dolayı betonda kullanımı vazgeçilmez olmaktadır [24].

### **1.3.2. Çimento**

Portland çimentosu kireç, alümin, demir oksit ve silis içerikli maddelerin belirli oranlarda karıştırılıp yüksek fırınlarda pişirilmeleri sonucunda ortaya çıkan klinkerin ince öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır [25]. TS EN 197-1'e göre çimento su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları sonucu priz alarak sertleşen bir hamur oluşturan ve bu sertliğini, dayanımını ve kararlılığını suyun altında bile koruyan inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcı olarak tanımlanmaktadır [26].

Portland çimentosunun ana maddeleri kalker ve kildir. Kalkerli malzemeler olarak kireçtaşı ve marn; killi malzemeler olarak ise bol silisli kil, şeyl, şist gibi hammaddeler kullanılır. Bu hammaddeler ince bir şekilde öğütölüp 1450°C'ye varan sıcaklıkta döner fırınlarda pişirilirler. Yüksek sıcaklıkta kalkerin ayrışması sonucunda kalsiyum oksit (CaO),

kilin ayrışması sonucunda ise silis ( $\text{SiO}_2$ ), alümin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) meydana gelir. Meydana gelen bu oksitler yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek silikatları ve alüminatları oluşturur [27]. Oluşan silikat ve alüminatların en önemlileri ve yaklaşık miktarları Tablo 1.1’de verilmektedir.

Tablo 1.1. Portland çimentosunun ana bileşenleri [17]

Bileşim	Kısa Gösterimi	Renk	Ağırlıkça Yüzdesi
Trikalsiyum Silikat	$\text{C}_3\text{S}$	Beyaz	50
Dikalsiyum Silikat	$\text{C}_2\text{S}$	Beyaz	25
Trikalsiyum Alüminat	$\text{C}_3\text{A}$	Beyaz / Gri	12
Tetrakalsiyum Alüminoferrit	$\text{C}_4\text{AF}$	Siyah	8

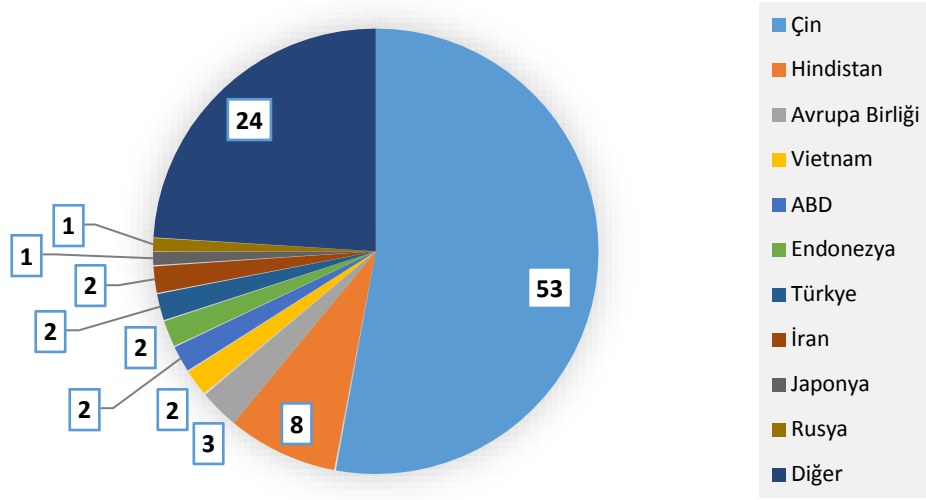
Silikatların su ile hidratasyonu sonucunda C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeli ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  portlandit oluşur. C-S-H ayrıca tobermorit olarak da adlandırılır.  $\text{C}_3\text{A}$  ve alçıtaşının birleşmesiyle etrenjit (Candlot tuzu) oluşur. C-S-H jeli çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran ve çimento taneciğinden 1000 kat daha küçük olan bir yapıdır. Bu yapı Van der Waals kuvvetleri ile bağlayıcılık oluşturur [23].

Çimentolar TS EN 197-1 [26] standardına göre aşağıda verildiği gibi 5 tiptir.

- CEM I Portland çimentosu
- CEM II Portland kompoze çimento
- CEM III Yüksek fırın cürufllu çimento
- CEM IV Puzolanlı çimento
- CEM V Kompoze çimento

Bu çimentolar 27 farklı alt sınıfa ayrılmaktadır. Ayrıca CEM I çimentosu için 32.5, 42.5 ve 52.5 olmak üzere üç farklı dayanım sınıfına ayrılmaktadır [26].

Fosil yakıtların yanması, ormanların yok edilmesi gibi nedenlerden sonra çimento üretimi karbondioksit emisyonunun üçüncü en büyük kaynağıdır [2,3].  $\text{CO}_2$  emisyonu 1 ton çimento üretimi için 0.8-1.3 ton mertebesindedir. Kullanılan yakıt türüne bağlı olarak  $\text{SO}_2$  emisyonu da çok yüksektir. Çimento üretimi için enerji tüketimi de oldukça yüksektir. 1 ton çimento üretimi için 100-150 KWT enerji harcanmaktadır [28]. 2015 yılında dünya çimento üretimi miktarının 4.1 milyar ton olduğu belirtilmektedir [29]. 2018 yılı için dünyada gerçekleştirilen çimento üretiminin ülkelere göre dağılımı Şekil 1.1’de verilmektedir.



Şekil 1.1. Ülkelere göre çimento üretimi miktarları (%) [30]

### 1.3.3. Su

Su, beton için önemli bir bileşen olup beton üretiminde tipik olarak hacimce %15-25 orana sahiptir. Su sertleşmiş beton için gerekli dayanım ve sertliği sağlamadaki işlevinin yanı sıra taze beton için istenen işlenebilirliğin elde edilmesi görevini de görür. Betondaki toplam su miktarı ve su/çimento oranı, kaliteli beton üretiminde en kritik faktörler olabilir. Fazla su beton mukavemetini azaltırken, az su betonu çalışamaz hale getirir. Beton hem mukavim hem de işlenebilir olması gerektiğinden, üretilirken su/çimento oranının ve toplam su miktarının dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir [31].

Beton üretiminde kullanılan suyun belli bir kalitede olması gerekmektedir. TS EN 1008 standardında betonda kullanılacak suyun özellikleri verilmektedir. İlgili standarda göre içilebilir şebeke suyu beton üretimi için uygun olarak görülmektedir. Dolayısıyla deney yapılmasına gerek görülmemektedir [32]. Beton karma suyunda bulunabilecek yabancı maddelere ait sınır değerler Tablo 1.2'de verilmektedir.

Tablo 1.2. Karma suyunda bulunabilecek yabancı maddeler için sınır değerler [33]

Yabancı Madde	Bulunabilecek Maksimum Konsantrasyon
Kil ve silt gibi katı maddeler (Suyun bulanıklığı)	%0.2
Yağ	Çimento ağırlığının %2'si
Yosunlu maddeler	%0.05-0.1
Şeker	%0.05
Kalsiyum ve magnezyum bikarbonatlar	%0.04
Alkali karbonatlar ve bikarbonatlar	%0.1
Kalsiyum klorür	Çimento ağırlığının %2'si
Sodyum klorür	%2.0
Magnezyum klorür	%4.0
Sodyum sülfat	%1.0
Magnezyum sülfat	%4.0
Fosfat, arsenat, borat	%0.05
Demir tuzları	%4.0
Hidroklorik ve sülfürik asitler	%1.0
Sodyum hidroksit	Çimento ağırlığının %0.5'i
Potasyum hidroksit	Çimento ağırlığının %1.2'si

#### 1.3.4. Kimyasal Katkılar

Katkılar (kimyasal katkı ve mineral katkı) çağdaş beton teknolojisi için önemli ve gerekli bileşenlerdir. Hem taze hem de sertleşmiş durumdaki beton özellikleri, katkılarla modifiye edilebilir veya iyileştirilebilir [17]. Kimyasal katkı 1940'lı yıllardan itibaren gelişme göstermektedir. O yıllarda Almanya'da 340 çeşit, İngiltere'de ise 275 çeşit kimyasal katkı kullanılmaktaydı. Türkiye'de 1990'lı yılların başlarında hazır beton sektöründe kimyasal katkı kullanımı %20 seviyelerine bile ulaşmazken günümüzde hazır betonda kimyasal katkı kullanımı vazgeçilmez olmuştur [34].

Kimyasal katkı; taze ve/veya sertleşmiş betonun özelliklerini değiştirmek için betona karıştırma esnasında eklenen ve çimento miktarının ağırlıkça %5'ini geçmeyen kimyasal maddelerdir [35]. Bu katkı betonda tavsiye edilen miktarlardan fazla kullanıldıklarında betonun çökmesi ve stabilitesini olumsuz etkilerler [36].

Kimyasal katkı maddeleri TS EN 934-2 [35] standardına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

1. Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları
2. Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkıları
3. Su tutucu katkıları
4. Hava sürükleyici katkıları
5. Priz hızlandırıcı katkıları
6. Sertleşmeyi hızlandırıcı katkıları
7. Priz geciktirici katkıları
8. Su geçirimsizlik katkıları
9. Priz geciktirici/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları
10. Priz geciktirici/yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkıları
11. Priz hızlandırıcı/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları

Tüm bu kimyasal katkıları daha genel manada ve çalışma mekanizmalarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Su azaltıcı katkı maddeleri: Kimyasal yapılarında linyosülfonatlar, hidrosikarboksilik asitler ve karbonhidratlar bulunur. Betonların su gereksinimini %6.5'dan daha fazla miktarda azaltabilen bu katkıların basınç dayanımı üzerinde %10'dan fazla artışa neden olabilmektedir.
- Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri: Kimyasal yapıları modifiye linyosülfonatlar, akrilik kopolimerler, amino aromatik sülfoneik asitler, sülfone melamin formaldehit polikondanse katkılardan oluşan maddelerdir. Betonların su gereksinimini %12'den daha fazla miktarda azaltabilen bu katkıları basınç dayanımı üzerinde %15'den fazla artışa neden olabilmektedir.
- Priz hızlandırıcı katkıları: Kimyasal bileşimleri kalsiyum nitrat ve nitritler, tiosülfatlar formatlardır. Betonların donma riskini azaltmak için kullanılırlar.
- Priz geciktirici katkıları: Kimyasal bileşimleri glükonat, salisik asit, kalsiyum linyosülfonatlardır. Betonların geç priz alması istenen durumlarda kullanılır. Çoğunlukla sıcak havalarda kullanılırlar.
- Hava sürükleyici katkıları: Kimyasal bileşimlerinde ağaç reçine tuzları, yağlı asit tuzları ve silfene hidrokarbonik asit tuzları bulundururlar. Donma-çözülme direncini arttırmak ve su geçirimsizliğini azaltmak için kullanılırlar [37].

Lignosülfonatlar genellikle 1. nesil süperakışkanlaştırıcılar olarak kabul edilirken, naftalin sülfonat formaldehitler 2. nesil süperakışkanlaştırıcılar ve polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcılar ise 3. nesil süperakışkanlaştırıcılar olarak kabul görmektedir [17]. Süperakışkanlaştırıcı endüstrisindeki muazzam gelişmeler ile betonda istenen kıvamı sağlamak için gereken su gereksinimini %40'a kadar azaltmak mümkündür. Bu ise betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine olumlu yansımaktadır.

### **1.3.5. Mineral Katkı Maddeleri (Puzolanlar)**

ASTM C 615'e göre puzolan kendi başına bağlayıcılığı olmayan ya da çok az olan ancak uygun şartlar altında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcılık özelliği kazanan silis ve alümin içerikli malzeme olarak tanımlanır [38]. Puzolanlar inşaat mühendisliği endüstrisinde mineral katkı maddesi veya ek çimento malzemeleri (EÇM) olarak da adlandırılmaktadır.

Portland çimentosu üretimi için harcanan enerji dünyanın kullandığı endüstriyel enerjinin yaklaşık %13'lük kısmını oluşturduğundan ve toplam CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık %7'sinden sorumlu tutulması nedeniyle beton endüstrisinin neden olduğu çevresel etkinin azaltılması son yıllarda büyük önem arz etmektedir. Çimento üretimi için gerekli olan hammaddelerin kazılıp çıkarılması ve taşocakları nedeniyle çevre ve çevre denge olumsuz etkilenmektedir. Dolayısıyla yeşil veya çevre dostu betonların araştırılması şu anda çok sayıda çalışmanın konusudur. Çevre dostu malzeme arayışında, endüstriyel atıkların [39, 40], geri dönüştürülmüş malzemelerin veya inşaat esnasında oluşan atıkların yeniden kullanılması yoluyla çevresel etkileri azaltmak noktasında çeşitli alternatifler gündeme getirilmektedir. Bununla birlikte, Portland çimentosu kullanımının azaltılması, beton üretiminden kaynaklanan emisyonları azaltmak için en etkili çözüm olarak görünmektedir [41]. Dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar, tamamen veya kısmen çimentonun yerini alabilecek yeni malzemeler aramaktadır [42]. Mineral katkı maddelerinin kullanımı bu bağlamda yaygın bir seçenek olabileceği ifade edilmektedir çünkü bu malzemeler çimento ile ikame edilerek kullanıldıklarında çimento tüketimi önemli miktarda azalmaktadır [43, 44]. Bu atık ürünlerin çimento ile ikame edilmesi sadece puzolanik atık bertaraf etme endişesini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda betonun dayanıklılığı hatta bazı durumlarda mukavemet dahi olumlu etkilenmektedir [45-47]. Mineral katkı maddelerinin beton üretiminde kullanılması bazı durumlarda betonda oluşan aşırı yüzey çatlamasını önlemek, ekonomik faydalar ve artan sürdürülebilirlik gibi birçok avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca

kaliteli bir beton üretmenin yolu işlenebilir beton üretmekten geçer. İşlenebilirliğin sağlanması kadar korunması da önemlidir. Uygulamada özellikle uzun teslimat sürelerinde çökme kaybı göz ardı edilmektedir. Betonlarda mineral katkıların kullanılması ile çökme kaybında azalmalar görülmektedir [48]. Portland çimentosunun mineral katkı maddeleri ile ikame miktarı, bu maddelerin puzolanik aktivitelerine de bağlıdır [1].

Çimento ile ikame edilerek kullanılan endüstriyel yan ürünler (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) ve doğal puzolanlar (kırmızı kil, metakaolin) yaygın olarak kullanılan mineral katkı maddeleridir [47]. Uçucu kül ve cüruf en sık kullanılanları olmakla birlikte dünyanın bazı bölgelerinde ise silis dumanı sıklıkla çimento yerine kullanılmaktadır. Ayrıca özellikle Bangladeş gibi pirinç üreten ülkelerde pirinç kabuğu külü kompozit çimento üretiminde kullanılma potansiyeline sahiptir [49]. ABD`de beton üretimi genellikle çimentolu malzemelerin eklenmesi ile üretilir. Hazır beton santrallerinde mineral katkı maddeleri oldukça fazla kullanılmaktadır [50]. Ancak katkı maddelerinin reaktifliği genellikle çimentoya kıyasla daha düşük olduğundan bu maddelerin kullanımında bazı sınırlamalar getirilmiştir [51].

Puzolanik malzemelerin yeterli bağlayıcılık özelliğine sahip olması için aşağıda belirtilen şartları sağlaması istenir:

- Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlarda  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarının en az %70 olması,
- Amorf (kristal olmayan) bir yapıda olmaları,
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda olmaları veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmaları [52].

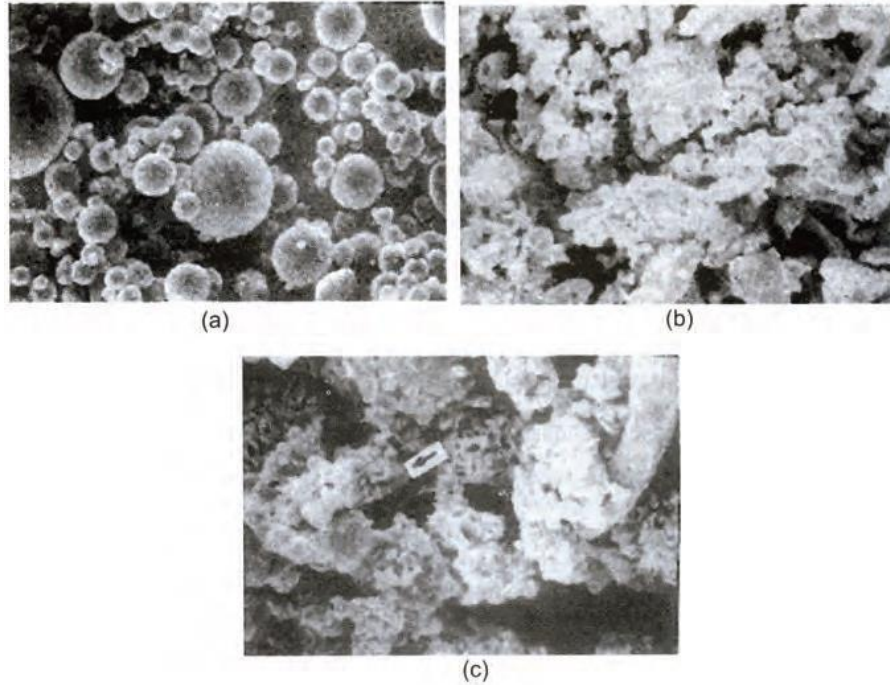
Çalışmada mineral katkı maddelerinden uçucu kül, metakaolin ve silis dumanı kullanılmıştır. Kullanılan mineral katkılara ilgili detaylı bilgi aşağıda alt başlıklar halinde verilmektedir.

#### **1.3.5.1. Uçucu Kül**

Uçucu kül (UK) termik santrallerde kömürün yanması sonucu açığa çıkan ve birincil atık olarak kabul edilen bir maddedir. Kömürün bazı mineralleri yanma sırasında kaynaşır ve yukarıya doğru yükselir. Bu kaynaşmış malzeme zamanla soğur ve küresel partiküller halinde sertleşir, bu camsı yapıya sahip partiküller uçucu kül olarak bilinir [53]. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri, mineralojik bileşimleri ve fiziksel özellikleri termik santralde



kullanılan kömürün kaynağına, yakma yöntemine, yanma ekipmanına, kül toplama yöntemlerine vb. bağlıdır [54]. Puzolanik özelliği genellikle silisli ve alüminli olan bileşiminden kaynaklanır. İnce ve küresel taneciklere sahip olmasından dolayı taze betonda işlenebilmeyi artırır. Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcılık özelliği kazanır ve betona dayanım ve dayanıklılık kazandırır [55, 56]. Nemli bir ortamda beton 100°C'nin üzerinde ısıtıldığında bu işlem hızlandırılabilir ve CH miktarı faydalı bir şekilde hızla azalırken betonun iskeletini oluşturan C-S-H miktarı da artar. Böylece beton hızlı bir şekilde daha güçlü ve daha az geçirgen bir hale gelir [57]. Linyit kömürünün yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı yüksektir ve bu nedenle bağlayıcılık özelliği gösterir [58]. Uçucu külün tane boyutu 0.2 µm ila 200 µm arasında değişmekle birlikte genellikle 35 µm'den küçüktür [59, 60]. Genel olarak UK parçacıklarının yüzey alanı 300 m<sup>2</sup>/kg-500 m<sup>2</sup>/kg arasında olmakla birlikte minimum ve maksimum değeri sırasıyla 170 m<sup>2</sup>/kg ve 1000m<sup>2</sup>/kg arasında değişir. Özgül ağırlıkları 2.1 ila 3.0 arasındadır [61]. Uçucu küllerde %85`den fazlası silis (SiO<sub>2</sub>), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) bulunmaktadır [62]. Uçucu küle ait SEM görüntüleri Şekil 1.2`de verilmektedir.



Şekil 1.2. (a) Yüksek silisli uçucu kül (pulverize uçucu kül) (b) ve (c) Yüksek kireçli uçucu kül [58]

Küresel çapta yıllık uçucu kül üretiminin 800 milyon tondan fazla olduğu tahmin edilmektedir. Uçucu küller inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [63, 64]. Bu alanda uçucu küllü çimento üretimi, beton üretimi, zemin stabilizasyonu, tuğla, hafif agrega üretimi ve dolgu işlerinde kullanılmaktadır [65]. Fakat en iyi bilinen kullanım şekli ise çimento ve beton üretimindeki kullanımıdır. Vibrasyon gerektiren veya gerektirmeyen tüm betonlarda çimento ile düşük veya yüksek hacimde ikame edilen ürünlerin başında UK gelmektedir. Çimento üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması ve betonların işlenebilirliklerinin iyileştirilmesi UK kullanımının başlıca avantajlarıdır [53]. Bu avantajlara ek olarak uçucu kül kullanımının özellikle barajlar, iskeleler, köprü ayakları gibi kütle betonu uygulamalarında yüksek hacimde ( $\geq\%30$ ) kullanılması ile birlikte geleneksel betondan daha düşük hidratasyon ısıya ortaya çıkması ile sonuçlanır. Hazır beton, beton bloklar ve tuğlalar, beton kaldırımlar, demiryolu traversleri vb. uçucu kül ikameli betonların yaygın olarak kullanıldığı alanlara örnek olarak verilebilir. Uçucu kül ayrıca geopolimer beton, zeolit, asit madeni drenajı arıtması, dolgu, tarımsal kullanım vb. alanlarda kullanım imkânına sahiptir. Uçucu kül kullanımının ayrıca KYB'deki en büyük avantajı istenen kıvamı elde etmek için gereken süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi dozajını azaltmasıdır. KYB'de UK kullanımı ile betonun reolojik özelliklerini geliştirmesinin yanı sıra hidratasyon ısını düşürdüğü için ileriki yaşlarda meydana gelebilecek muhtemel çatlakların minimize edilmesi sağlanır [66]. Uçucu küller üretimlerinde enerji ihtiyacı duyulmayan ya da çok az enerji ihtiyacı ile beton üretiminde kullanılacak hale getirilebilen malzemeler oldukları için birçok araştırmacı tarafından çevre dostu bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Betonda oluşturdukları düşük su emme oranı ve hızı ve ek bağlayıcılık özellikleri nedeniyle uçucu küllü betonlar gerek normal koşullarda gerekse ağır koşullarda kullanılmaya elverişlidir [13]. 2015 yılında ABD'de uçucu külün çeşitli sektörlerde etkili kullanımı toplam üretimin (yaklaşık 117 MT) yaklaşık %55'ini oluşturmaktadır [63].

Türkiye'de uçucu kül kullanımı ile ilgili yapılan ilk çalışmalar Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 1968 yılında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Tunçbilek termik santralinden elde edilen uçucu kül üzerinde yapılan araştırmalardan sonra bu kül Gökçekaya ve Porsuk barajlarında kullanılmıştır. Çimento üretiminde ilk olarak uçucu külün kullanımı ise Soma ve Seyitömer termik santrallerinden elde edilen uçucu külün Afyon ve Balıkesir çimento fabrikalarında 1970 yılında kullanımı ile gerçekleşmiştir [23].

Uçucu küller içeriklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflama TS EN 197-1 [26] standardına ve ASTM C 618 [38] standardına göre aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

TS EN 197-1 standardına göre:

- V sınıfı uçucu küller: Genellikle puzolanik özelliğe sahip küresel taneciklerden oluşan ve çoğunlukla reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan küllerdir. Bu tip uçucu küllerin reaktif silis miktarı %25'den fazladır.
- W sınıfı uçucu küller: Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan çoğunluk olarak reaktif kireç  $\text{CaO}$ , reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan küllerdir. Bu tip uçucu küllerin reaktif kireç miktarı %10'dan fazla, reaktif silis miktarı da %25'den fazladır.

ASTM C 618 standardına göre:

- F sınıfı uçucu küller: Bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %70'den fazla olan uçucu küllerdir. Ayrıca bu sınıfa giren uçucu küllerin  $\text{CaO}$  miktarı %10'un altındadır. Bu nedenle düşük kireçli olarak da adlandırılır. Bu tip uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir.
- C sınıfı uçucu küller: Linyit ve yarı bitümlü kömürden elde edilen ve toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %50'den fazla olan uçucu küllerdir. Ayrıca bu sınıftaki uçucu küllerde  $\text{CaO}$  miktarı %10'dan fazla olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. Puzolanik özellik ve bağlayıcı özelliğe sahiptirler.

Uçucu küllerin betonların üretimlerinde kullanımıyla ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir:

Yapılan bir çalışmada C sınıfı uçucu külün çimento ile ikame edilerek üretilen betonların basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların basınç dayanımlarından daha yüksek çıkarken [67], başka bir çalışmada 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımı kontrol betonundan daha düşük olduğu görülmüştür [68]. Uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer çalışmada %10 silis dumanı ilavesinde ve çimentoyla %25, %50 ve %75 oranlarında uçucu kül ikamesi durumunda mineral katkılı tüm beton gruplarının bir yılsonundaki basınç dayanımlarının kontrol betonunkinden daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır [69].

Betonda Portland çimentosunun yüksek hacimde uçucu kül ile ikame edilmesi ile ilgili çalışmalar 1980'lerin sonlarından beri devam etmektedir [70, 71]. Uçucu kül kullanımı ile ilgili en iyi mekanik performans %40-%60 ikame oranında elde edildiği çalışmalarda görülmektedir [72, 73].

Pitroda ve ark. [74] betonun mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla uçucu külü çimento ile ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame ederek betonlar üretmiş ve birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda %10 uçucu kül

ikameli betonun normal betona göre daha iyi özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. %10'dan daha fazla uçucu kül içeren betonların ise mekanik özelliklerinin kötüye gittiğini rapor etmişlerdir.

Oner ve ark. [75] uçucu kül harmanlanmış betonun mukavemet gelişimini değerlendirmek için deneysel bir program gerçekleştirmiş ve uçucu külün %40 ikame oranında betonda kullanımının basınç mukavemetinin artması ile sonuçlandığını görmüşlerdir. UK/çimento oranının UK'nın verimliliğinin belirlenmesinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir.

Atis [76], gerçekleştirdiği çalışmada betonda uçucu kül kullanımının kuruma büzülmesini azalttığı sonucuna varmıştır.

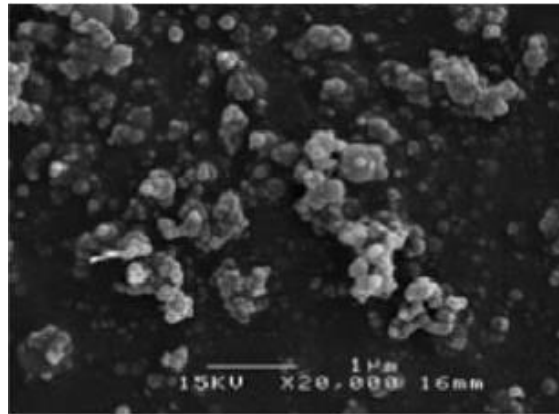
Fan ve ark. [77], uçucu külün betonda kullanılmasının yangında beton özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini belirtmişler ve yangında güvenliği etkileyip etkilemeyeceğine dair bazı endişelerini paylaşmışlardır.

### **1.3.5.2. Silis Dumanı**

Silis dumanı (SD) metal silisyum ve silisyum alaşımlarının üretimi esnasında elektrik fırınlarındaki indirgenme reaksiyonları sonucunda oluşan baca gazlarından elde edilen bir maddedir. Puzolanik özelliği yüksektir. Silis dumanı %85-95 kristal olmayan silis içeren, %75 veya daha fazla silikon içeriğine sahip mikro silis olarak da bilinen ultra ince bir tozdur. Üretim biriminde üretilen alaşım tipi silis dumanında bulunan  $SiO_2$  içeriğinin miktarı üzerinde etkilidir [78]. Ultra inceliği nedeniyle silis dumanı ile üretilen betonlar için su ihtiyacı artar. Bu nedenle süperakışkanlaştırıcılar genellikle silis dumanının yüksek su ihtiyacını dengelemek için kullanılır [79]. Diğer taraftan silis dumanının küresel şekli su azaltıcı etkiyi bir miktar indükler. Tanecikler küresel şekli nedeniyle küçük yataklar olarak hareket ettikçe taneler arası sürtünme azalır. Araştırmalara göre çimentonun %5'i civarında betonda kullanılan silis dumanının su ihtiyacını fazla değiştirmedeği fakat bundan daha fazla miktarlarda kullanılan silis dumanının su ihtiyacını artırdığı ifade edilmektedir [80]. Silis dumanı kullanılırken, genellikle su azaltıcı katkı maddesi silis dumanının çimento taneleri ile paketlenmesi ve etkili bir yağlayıcı olarak işlev görmesi için kullanılmaktadır [81]. Literatürde sıradan betonların üretimi için silis dumanı içeriğinin genellikle %10'dan daha az seçildiğini, ancak yüksek mukavemetli betonların üretimi için %10-15 silis dumanı ile birlikte çökmeyi korumak için süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanıldığı

gözlemlenmiştir [82, 83]. Silis dumanlarının özgül ağırlıkları 2.2-2.3 mertebesindedir. Genelde siyah ve beyaz renk aralığında grimsi renktedir [84]. Silis dumanı tane büyüklükleri 0.1-0.2  $\mu\text{m}$  arasındadır. Bu büyüklük çimentodan yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Yüzey alanları 20,000  $\text{m}^2/\text{kg}$  civarındadır [23]. Silis dumanına ait tipik SEM görüntüsü Şekil 1.3’de verilmektedir. Silis dumanının kullanıldığı betonun su kusması azalır; gözenekliliği ve geçirgenliğe düşer. Çünkü silis dumanı oksitleri çimento hidrasyonu sonucu meydana gelen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek bu maddeyi beton içinde tüketir. Puzolanik reaksiyon sonucu beton dayanım kazanır, düşük ısı yayılımı, küçük gözenek boyutu dağılımı ve kireç tüketici aktiviteler meydana gelir [85]. Yapıdaki CH kristallerinin tükenmesi sonucu betonun homojenliği artarak agrega ve çimento matrisi arasındaki ara yüzey bölgesi kusurları azalır [86, 87]. Basınç dayanımı artışında diğer bir faktör ise silis dumanının eklenmesiyle betonda bulunan sürekli gözeneklerin çoğunun büyük gözenekler azaldıkça süresiz olanlara dönüşmesidir. Tüm bu faktörler mikro yapıyı daha homojen ve yoğun hale getirmektedir [88]. Silis dumanı agrega ve çimento hamuru arayüzey geçiş bölgesinin gözenekliliğini dolgu etkisi nedeniyle azaltır. Geçiş bölgesindeki kalsiyum hidroksit puzolanik etki ile elimine edilir ve C-S-H oluşumundan kaynaklı bağ oluşumu artar. Böylece betonun mukavemeti artar [81].

Çoğu zaman yüksek dayanımlı beton silis dumanı ilave edilerek veya çimento ile ikame edilerek üretilebilir. Ayrıca silis dumanı ve uçucu külün betonda birlikte kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır. Silis dumanı ile üretilen betonlarda uçucu kül kullanımı ile betonunun uzun süreli dayanımı arttırılır [89]. Tipik bir silis dumanına ait SEM görüntüsü Şekil 1.3’de verilmektedir.



Şekil 1.3. Silis dumanına ait SEM görüntüsü [17]

Silis dumanının betonda kullanımı ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

Rachel ve ark. [90], silis dumanı içeren betonların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerinin geliştiğini ve basınç dayanımı gelişimi açısından silis dumanı ile optimum çimento ikamesinin %12 olduğu belirtilmiştir.

Santosh ve ark. [91], ise yaptıkları çalışma sonucunda basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı açısından çimento ile %15 SD ikame oranının optimum değer olduğu belirtilmiş, SD ikame oranının artışı ile işlenebilirlik arasında ters bir ilişki olduğu ifade edilmektedir. Benzer sonuçların Kadri ve ark. [92] tarafından da bulunmuş olduğu ifade edilmektedir.

Mahalingam ve ark. [93], SD içeren betonların basınç dayanımlarının artan kür süresi ile (56 gün) 28 gün standart küre göre C-S-H miktarında meydana gelen artıştan ötürü dikkate değer biçimde arttığı belirtilmiştir.

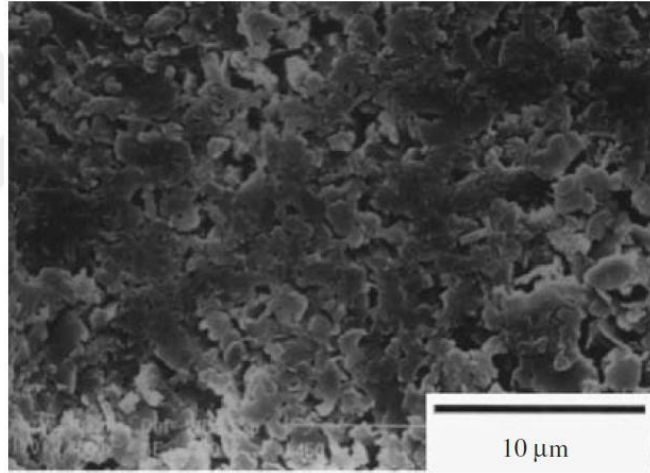
Karthikeyan ve Dhinakaran [94] %15'e kadar çimento yerine silis dumanı kullanılan beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı testi yapmışlardır. Silis dumanının sırasıyla %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile ikame edilmesi durumunda betonların basınç dayanımlarında sırasıyla yaklaşık %11, %21 ve %15 artış; yarmada çekme dayanımlarında ise %11, %37 ve %32 artış olduğu görülmüştür.

### **1.3.5.3. Metakaolin**

Metakaolin (MK) 1990'lı yılların ortalarından itibaren inşaat sektöründe ticari olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda metakaolinin bir mineral katkı maddesi olarak kullanımı farklı ülkelerde yaygın olarak incelenmiştir ve bu çalışmalar metakaolinin, betonun hem kısa hem de uzun vadede betonun mekanik özelliklerini geliştiren oldukça reaktif bir puzolan olduğunu ortaya koymuştur. Betonda metakaolin kullanımının mikro yapıyı geliştirdiği ve böylece dayanıklılığı arttırdığı gözlemlenmiştir [95]. Metakaolinin son yıllarda beton özelliklerine etkisinin yoğun bir şekilde araştırılmasının ve betonda daha çok kullanılmasının bir nedeni de son yıllarda fiyatının düşmesidir [96].

Metakaolin, kaolinit kilinin kalsinasyon işleminden elde edilen ve yüksek derecede puzolanik aktiviteye sahip olan bir malzemedir [1]. Metakaolin diğer puzolanların aksine ikincil bir yan ürün değildir. Kaolinit kilinin 700°C ila 900°C'ye kadar ısıtılması sonucunda %14 oranında hidroksil suyu yapıdan ayrılır ve bu oluşan yapıya metakaolin adı verilir [97].

Metakaolin aktif bir puzolanik yapıya sahip olan alümina ( $Al_2O_3$ ) ve silika ( $SiO_2$ ) bileşimine sahiptir [98]. Metakaolinin kimyasal yapısı  $Al_2Si_2O_7$ 'dir. Metakaolin ortam sıcaklığında  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyona girdiğinde C-S-H jeli meydana gelir ve  $C_4AH_{13}$ ,  $C_2ASH_8$  ve  $C_3AH_6$  dâhil olmak üzere alümin içeren fazlar üretmek için CH ile reaksiyona girer [99]. Courard [100], betonda yeterli konsantrasyonda kullanılan metakaolinin çimento matrisinden kalsiyum hidroksitin neredeyse tamamen uzaklaştırılabileceğini göstermiştir. MK'nin portlandit ( $Ca(OH)_2$ ) ile pozzolanik reaksiyonu kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinde yüksek Al ve düşük Ca içeren bir yapı oluşturur. CASH olarak bilinen bu jel bileşimi düşük Ca/(Al + Si) oranı ve yüksek Al/Ca oranına sahiptir [99]. Beton endüstrisinde kullanılan geleneksel metakaolinlerin özgül yüzey alanları genellikle  $12000 \text{ m}^2/\text{kg}$  üzerinde olduğu belirtilmiştir [101]. Tipik bir metakaoline ait SEM görüntüsü Şekil 1.4'de verilmektedir.



Şekil 1.4. Metakaoline ait SEM görüntüsü [17]

Metakaolin üretiminde; uygulanan farklı sıcaklıklar, ısıtma hızı, kalsinasyon süreci ve ısıtma işlemi oluşacak olan metakaolinin yapısını etkiler [102]. MK üretimi çimentoya kıyasla daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir, bu da MK üretiminin daha düşük maliyetli olmasına yol açmaktadır [103]. Betonda Portland çimentosu ile %20 oranında ikame edilen MK'nin basınç dayanımını, elastisite modülünü ve özellikle erken yaşlardaki hidrasyonu artırdığı görülmektedir. Beton özelliklerinde meydana gelen bu iyileşme MK'nin çimento hamurundaki boşlukları doldurmasına ve puzolanik reaksiyon ürünlerinden dolayı daha yoğun bir matrise sahip olunmasına bağlanmaktadır [104]. Betonun özelliklerini

iyileştirmesi açısından metakaolinin çimento ile optimum ikame oranının %10 olduğunu belirten başka birçok çalışma da literatürde mevcuttur [105].

Metakaolinin betonda kullanım geçmişi diğer mineral katkı maddelerine göre oldukça az olmasına rağmen literatürde oldukça fazla miktarda araştırmaya konu olmuş ve hala olmaktadır. Kısaca bu çalışmalar ile ilgili literatür özeti aşağıda verilmiştir.

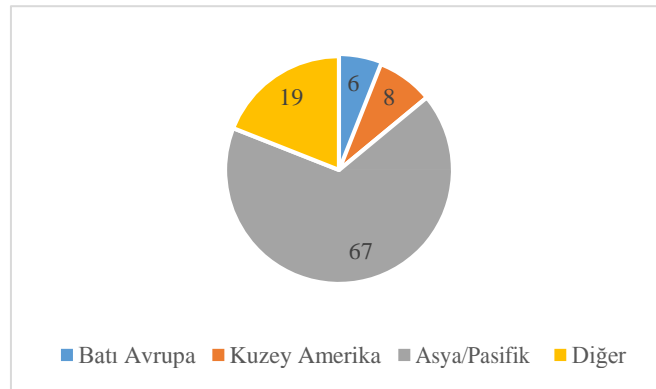
- Beton karışımına çimentonun %10'u kadar MK ilave edilmesinin, CH içeriği olarak da bilinen kalsiyum hidroksiti %70'e kadar azalttığı görülmüştür. Ayrıca MK içeriğinin %20'ye çıkarılması ile bu azalmanın 28 günlük sürenin ardından neredeyse sıfıra indiği belirtilmiştir. CH içeriğinde meydana gelen azalma yüksek sıcaklıklarda dâhil olmak üzere yüksek mukavemet ve dayanıklılık performansı ile sonuçlanmıştır [97].
- Bir çalışmada %5, %10 ve %20 MK içeren bir dizi yüksek mukavemetli beton ve normal beton karışımları hazırlanmış ve yine aynı oranlarda fakat bu sefer silis dumanı veya uçucu kül içeren betonlar da üretilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. MK içeren betonun SD ve UK içeren betona göre daha yüksek mukavemet, daha düşük geçirimsizlik ve daha düşük gözenekliliğe sahip olduğu belirlenmiştir [106].
- Silis dumanı veya uçucu külün aksine metakaolin kullanımının ilk yaşlardaki basınç dayanımı artışına etkisinin nispeten yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin metakaolinin sahip olduğu yüksek puzolanik aktivite ve betonun gözenek yapısını azaltmasına bağlanmaktadır [107].
- MK kullanılan tüm üretimlerde gözenek hacminin azaldığı sonucuna varılmamıştır. Örneğin geleneksel çimento harcına göre MK karışımlarının toplam gözeneklilikte %16 artış olduğu rapor edilmektedir [108].
- MK'nin çimento ile %20 oranında ikame edilmesinin harcın basınç dayanımında %50'lik önemli bir artışa neden olduğu ifade edilmektedir [109].
- Literatürde metakaolinin betonun büzülmesi üzerine etkisine ilişkin bir fikir birliği yoktur. Çalışmaların çoğu metakaolin ilavesinin betonların büzülmesini azalttığını gösterse de bazı araştırmalarda metakaolin ilavesinin büzülmeyi artırdığı sonucuna varılmıştır. Net etkinin beton türüne, karışım reçetesine, metakaolinin kalitesine ve ikame oranına bağlı olduğu görülmektedir [95, 110].
- MK içeren betonun içermeyen betona kıyasla önemli ölçüde daha düşük geçirimsizliğe sahip olduğu gösterilmiştir [111].



- MK kullanarak üretilen betonların SD kullanarak üretilen betonlardan daha düşük kılcal geçirimsizliğe sahip olduğu belirtilmektedir [112].
- Portland çimentosu ile %15'e kadar metakaolin ikamesinin korozyon direnci, su emme ve betonun özdirenç özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir [113].
- MK'nın tüm bu avantajlarına rağmen betonların işlenebilirliklerini önemli ölçüde azalttığı rapor edilmektedir [98]. Bu kıvam kaybını telafi etmek için kullanılan ilave suyun durabilite problemlerine, agrega segregasyonuna, boşlukların artmasına ve betonun porozitesinin artmasına neden olduğu rapor edilmektedir [114].
- MK içerikli betonlarda ASR genişmesinde düşüş olduğu belirtilmiştir [115].
- Erken yaşta beton büzülmesinin MK ikamesi ile azaltılabileceği belirtilmiştir [116].

#### 1.4. Geri Kazanılmış Agregalar (GKA)

İnşaat sektöründe agrega tüketimi 2015 yılında dünya genelinde 48,3 milyar tona ulaşmıştır. Bu tüketim yıllık yaklaşık %5 artarken en yüksek tüketim ise Şekil 1.5'de gösterildiği gibi Asya ve Pasifik ülkelerindedir [117]. Toplam beton karışım hacminin yaklaşık %70'ini oluşturan agregalar yenilenemez doğal kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır [118]. Dünyadaki birçok ülke doğal agrega kıtlığı ile karşı karşıya olup, tüketimdeki bu hızlı artış dikkate alındığında doğal agrega artık dünyada bazı ülkelerde yapı sektörünün hem nicelik hem de nitelik açısından ihtiyacı karşılayamamaktadır [119]. Agregaya gibi büyük miktarlarda tüketilen inşaat malzemelerinin neden olduğu olumsuzlukları çözmek için yapılan çalışmalar ve girişimler son yıllarda artmış ve bu tip konular ilgi odağı haline gelmiştir.

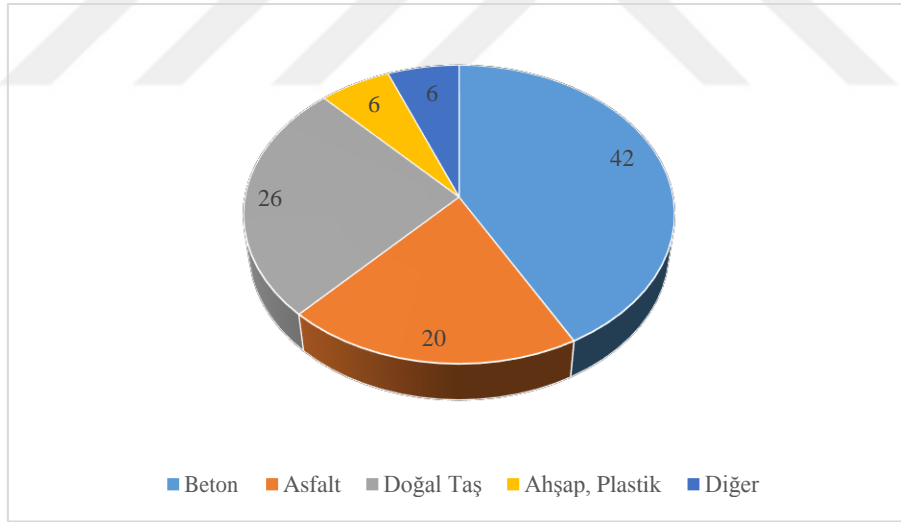


Şekil 1.5. Dünya çapında agregaya olan talep [117]

THBB verilerine göre 2014 yılı için Türkiye 107 milyon m<sup>3</sup> beton üretimi ile Avrupa'nın en fazla beton üreten ülkesi olmuş ve dolayısıyla en fazla kaynak tüketen ülkesi konumundadır [120].

#### 1.4.1. GKA Tanımı ve Önemi

Her yıl çeşitli yapıların yıkılması, bakımı ve yeniden inşası nedeniyle dünya çapında çok miktarda yapım ve yıkım atığı meydana gelmektedir. Bu atıkları yok etmenin en yaygın yolları geçmişten günümüze kadar devam eden arazi doldurma veya atığı boş alanlara boşaltma işlemleridir. Bu durumda boş araziler hızla dolmakta, nakliye ve bertaraf maliyetleri de artmaktadır [121]. Bu sorunları ortadan kaldırmak ve en aza indirmek için son yıllarda yıkım atığından elde edilen kırılarak agrega yapılan betonun yeni üretilecek olan betonda kullanılması yoluyla geri dönüştürülmesi büyük ilgi görmüştür [122]. İnşaat ve yıkım atıklarında bulunan malzemelerin % olarak dağılımları Şekil 1.6'da verildiği gibidir.



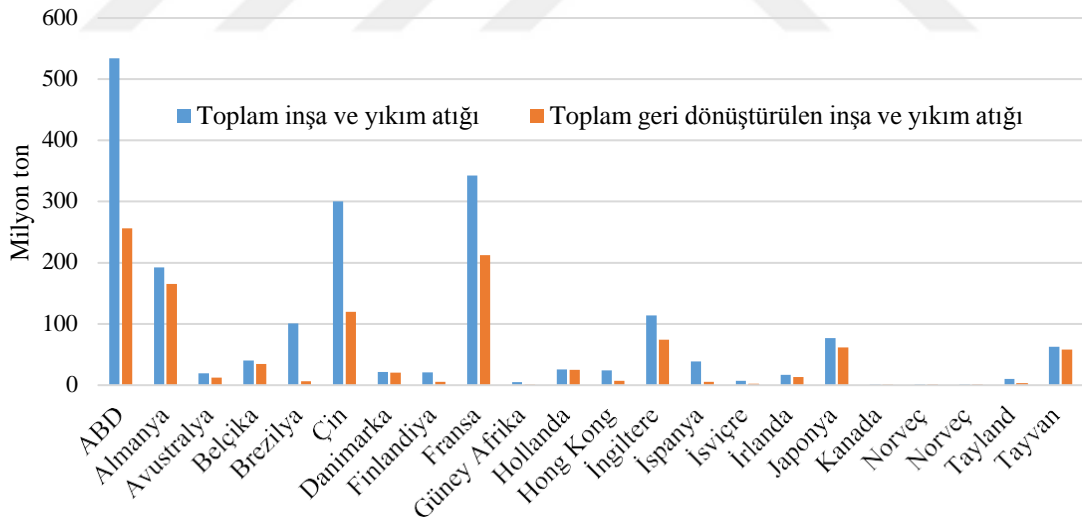
Şekil 1.6. İnşaat ve yıkım atıklarında bulunan malzemeler [123]

Yapım ve yıkım atıklarında birçok farklı malzeme bulunmasına karşın agrega olarak yıkımı yapılacak saf betonun öğütülerek agrega olarak kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu durum bazı standartlarda da belirtilmektedir. Örneğin; GKA, İngiliz standardına [124] göre “Yalnızca beton atıklarından elde edilen agregalar” olarak tanımlanmaktadır. TS 706 EN 12620 standardına göre ise geri kazanılış agrega (GKA) “Önceden yapılarda kullanılmış olan

inorganik malzemelerin işlemden geçirilmesi sonucunda elde edilen agrega” olarak tanımlanmaktadır [20].

Literatürde geri kazanılmış agrega (GKA), Recycled Concrete Aggregate (RCA) olarak isimlendirilirken, Türkiye’de geri kazanılmış (beton) agrega(sı), geri kazandırılmış (beton) agrega(sı), geri dönüşümlü (beton) agrega(sı), geri dönüştürülmüş (beton) agrega(sı) gibi isimler kullanılarak da çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tezde TS EN 12620 standardında da kullanılan geri kazanılmış agrega (GKA) terimi kullanılacaktır.

Tarihsel bağlamda, geri kazanılmış agregalı betona (GKAB) ilgi 1970’lerden bu yana artmaktadır [125]. 2010 yılında inşaat ve yıkım atıkları Almanya, İngiltere, Hollanda, Fransa ve ABD gibi ülkeler tarafından kullanılması 286 milyon tonu aşmıştır [126]. Yeni Delhi’deki Bilim ve Çevre Merkezi 2014 yılında inşaat ve yıkım atıklarının küresel bazda miktarının yaklaşık 1,3 milyar tona ulaştığı tahmin ediliyor. Bu miktarın Dünya Bankası tarafından sunulan bir raporda 2025 yılında iki katına çıkması bekleniyor [127]. Şekil 1.7’de son verilere göre inşaat sektörünün neden olduğu atıkların üretim ve geri dönüşüm miktarları gösterilmektedir [128].



Şekil 1.7. Ülkelerin ürettikleri ve geri dönüştürerek kullandıkları inşaat ve yıkım atıklarının miktarı [128]

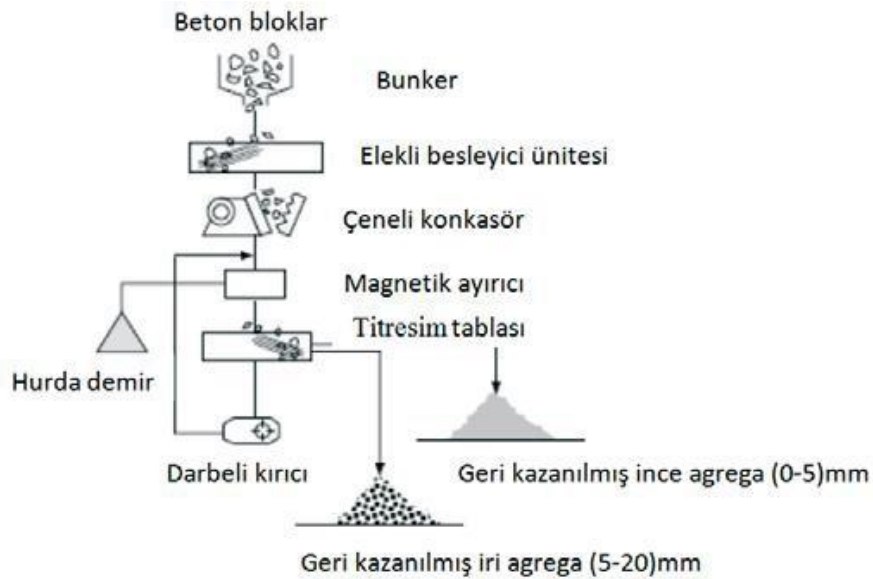
Geri kazanılmış agrega (GKA) kullanımı kaynakları korumak ve atıkları değerlendirmek için artan bir sosyal ihtiyaç haline dönüşmüş ve bilimsel anlamda üzerinde çalışmalar yapılması gereken bir konu haline almıştır. Literatüre göre GKA’lar ile ilgili

gerçekleştirilmiş çalışma sayısının katlanarak arttığı görülmektedir. GKAB ile ilgili ilk bilimsel makaleler, atıkların beton karışımına dâhil edilme yöntemlerini ve fizibilitesini ortaya koymaktadır. 2000 ve 2010 yılları arasında, GKA'nın üretim teknikleri ve GKAB'nin basınç dayanımı tarif edilmeye ve anlaşılmaya başlanmıştır. Sonraki yıllarda (2010-2015), kompozit malzemenin mekanik ve dayanıklılık performansı ve farklı fazları arasındaki etkileşim çalışılmıştır [129].

Türkiye`de literatürde inşaat ve yıkıntı atıkları ile ilgili net veriler bulunmamaktadır. Fakat herhangi bir sebepten kullanılmayan veya artık olarak adlandırılan beton miktarının yıllık olarak 500 bin m<sup>3</sup>'ü bulunduğu belirtilmektedir [130]. Ayrıca sadece İstanbul ili için kentsel dönüşüm kapsamında önümüzdeki 20 yıl içinde 117 milyon ton beton atığı ortaya çıkması beklenmektedir [123]. Türkiye genelinde önümüzdeki yıllarda birçok konutun elden geçirileceğinin planlanması düşünüldüğünde ortaya çıkacak olan inşaat ve yıkıntı atıklarının geri kazanılarak yeniden kullanımı son derece önem arz etmektedir.

#### 1.4.2. GKA Üretimi ve Kullanım Önerileri

Beton atıklarından geri kazanım tesisleri doğal agregalarından farklı olmayacak şekilde beton atıklarını farklı boyutlarda parçacıklara ayırarak birincil ve ikincil kırıcılardan oluşur. Örnek bir tesis şeması Şekil 1.8'de gösterilmektedir.



Şekil 1.8. GKA üretim tesisi şeması [131]

Bazı ülkelerde kullanılan GKA kullanım oranları Tablo 1.3'de verilmektedir. Türkiye'de GKA kullanımı ile ilgili sınırlamalar TS EN 206-1 standardında belirtilmektedir. Bu standarda göre tane sınıflarına ayrılmamış GKA'nın toplam agreganın %5'inden fazla olmaması istenmektedir. %5'den fazla kullanılabilmesi için ise bu agreganın asıl agrega ile aynı tipte olması, iri ve ince olmak üzere en az iki farklı sınıfa ayrılması ve EN 12620: 2000'e uygun olması gerektiği belirtilmektedir [132].

Tablo 1.3. Bazı ülkelerde betonda izin verilen geri kazanılmış agrega kullanımı [131]

Ülkeler	Uygulamalar	Geri kazanılan agrega hacimce (%)	Geri kazanılan ince agrega kullanımı	Beton sınıfı	Diğer malz. kütlece yüzdesi
<b>ABD</b>	Beton, betonarme elemanlarda	Sadece beton kırıkları için 0-100	İzin veriliyor	ACI 318-95'e göre	-
<b>Almanya</b>	Kuvvetli kimyasal etki ve betonarme haricinde	Sadece beton kırıkları için 0-42	< 2mm olan kısım için maks. %7	En fazla C35/45	<0,2 ahşap ve plastik malzeme
<b>Belçika</b>	Agresif olmayan çevresel etkilerde	0-100	Doğal agreganın standartlarının sağlandığı durumlarda	Agregaya bağlı olarak en fazla C30/37	<1 mineral olmayan karışımlar
<b>Danimarka</b>	Agresif olmayan çevresel etkilerde	> 4 mm olan kısım için 0-100	İzin veriliyor	Agregaya bağlı olarak en fazla 21 MPa	-
<b>Hollanda</b>	Agresif olmayan çevresel etkilerde	Sadece beton kırıkları için 0-20	%20'ye kadar izin veriliyor	Bütün beton yapı standartlarına göre	Maks. %1 bitüm ve maks. 0,15 organik malzeme
<b>Japonya</b>	Nemsiz elemanlarda	Sadece beton kırıkları için 0-42	İzin veriliyor	Agregaya bağlı olarak en fazla C30/37	Maks 10 kg/m <sup>3</sup> alçı ve maks. 2 kg/m <sup>3</sup> asfalt

Literatürde %0'dan %100'e kadar bütün oranlarında gerek geleneksel betonlar için gerekse KYB için araştırmalar yapılmış ve halen yapılmaktadır. Bu çalışmalara ait literatür özetini bölüm 1.4.4 ve bölüm 1.8'de verilmektedir.

### 1.4.3. GKA Özellikleri ve Sınıflandırılması

Geri kazanılmış beton agregaları günümüzde inşaat endüstrisi için geleneksel olmayan bir malzeme olarak kabul edilmektedir ve bu malzemenin ana maddesi olan inşaat ve yıkım atıklarının uygun şekilde kullanımı çevreye verilen zararı önemli ölçüde engeller [133].

Gerçekleştirilmiş olan birçok çalışmada geri kazanılmış agrega (GKA)'nın değişik oranlarda normal agrega (NA) ile ikame edilmesi durumunda betonların genel performansının düştüğü doğrulanmıştır. Yüksek oranlarda normal agrega ile ikame edilen GKA ile üretilen betonların işlenebilirlik, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı gibi özelliklerinde önemli miktarda düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir [133]. GKA daha düşük yoğunluk ve daha yüksek su emme kapasitelerine sahip olmaları ile karakterize edilir [134]. GKA'nın yüksek gözenekliliği bunun ana nedenidir. GKA ile üretilen betonlarda meydana gelen performans kaybı betona imento ilave edilerek telafi edilebilir. Fazla imento kullanımı ise normal betona kıyasla daha iyi bir performans sergileyen KYB kullanımını teşvik edebilir [126].

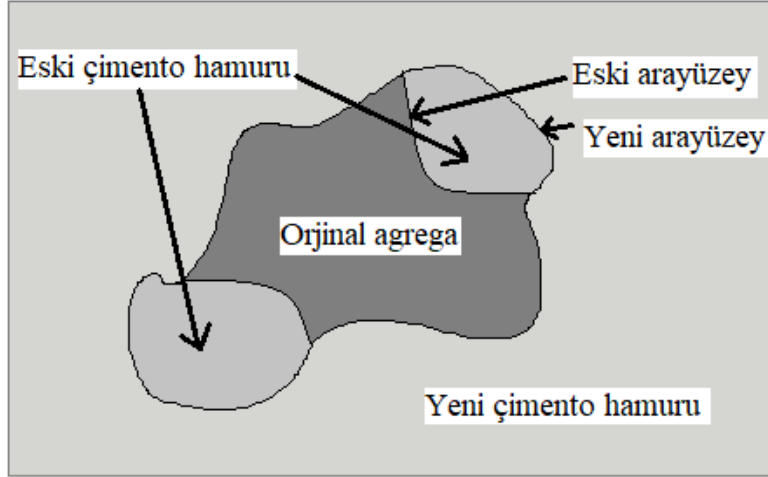
Önceki araştırmaların çoğunda agregaların büyüklüğüne bağlı olarak GKA yoğunluklarının  $2.29 \text{ g/cm}^3$  ila  $2.49 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmiş olduğu belirtilmektedir [135]. GKA'nın su emme yüzdesinin NA'dan oldukça fazla olduğu görölmektedir. Doğal agregalarda tipik su emme değerleri yaklaşık %0.9 iken, GKA'larda %3.5-%6.3 arasında değiştiği bazı önemli çalışmalarda bildirilmektedir. Ayrıca GKA'nın özgül ağırlık, incelik modülü, agrega kırılma değeri gibi parametreleri de doğal agregadan oldukça farklı olduğu belirtilmektedir [13].

Fiziksel davranıştaki farklılıkların yanı sıra GKA'larda daha önceden agregaların üzerinde kalan zayıf ve yapışmış harcın yeni üretilecek betonun geçirimsizliğini ve işlenebilirliğini düşürdüğü bilinmektedir. Yüksek oranlarda GKA'nın NA ile ikame edilmesinin betonların mekanik ve durabilite yönünden performansını düşürmesi nedeniyle beton endüstrisinde yüksek GAK ikameli uygulamalar azaltılmıştır. GKA kullanılarak üretilen gerek normal gerek kendiliğinden yerleşen betonların basınç dayanımı veya durabilite açısından performans azalışları birçok çalışmada rapor edilmiştir. Benzer şekilde

GKA'ların betonlarda kullanımı ile betonların karbonatlaşma derinliği, elektriksel direnci, sülfat atağı, asit atağı, donma-çözülme etkisi, klorür penetrasyonu gibi durabilite özellikleri de olumsuz yönde etkilenmektedir [13]. GKA'nın NA ile ikame edilmesinin betonun porozitesini artırdığı ortaya konulmuştur [136]. Ayrıca GKA'nın pürüzlü ve zayıf yapısı betonlarda çökme kaybına neden olduğu belirtilmektedir [137]. Betonlarda GKA kullanımı ile ilgili ortaya çıkan beton boşluk miktarının artmasına bağlı olarak oluşan negatif etkilerin kür süresi uzatılarak ve çimento miktarı artırılarak önemli derecede azaltıldığı belirtilmektedir [13].

GKA yüksek su emilimini kontrol etmek için araştırmacılar genellikle iki alternatif karıştırma metodolojisi önermektedirler. Bunlardan ilkinde agregalar kuru veya doğal nemli halde bileşime ilave edilir fakat agregalar tarafından oluşan su emilimini telafi etmek için gerekli olan fazla miktarda su karışıma eklenir. İkinci metodolojide ise önceden belirlenmiş bir süre boyunca agregalar suya batırılıp beklendikten sonra karışıma eklenir. GKA'ların yüksek oranda su emme özelliği hem taze hem de sertleşmiş betonun nihai özelliklerine etkileyen ve taze betonun davranışını kontrol etmeyi zorlaştıran bir etmendir [138].

Gerçekleştirilen çalışmalarda GKA'lar iri ve ince olmak üzere iki şekilde ele alınmaktadır ayrıca üç faz içerirler. Bu fazlar agregalar fazı, çimento hamuru fazı ve ara yüzey (eski ve yeni) fazlarıdır. Ara yüzey geçiş bölgesi fazı genellikle GKA üzerinde eski harç içerdiği için en zayıf faz olarak kabul edilir. GKA'lar eski ve yeni ara yüzey geçiş bölgelerine sahip olmalarından dolayı ve bu ara yüzey geçiş bölgelerinin de farklı kalitelere olmalarından dolayı normal agregalar ile üretilen betonun aksine öngörülemez bir doğaya sahiptir. Bu fazlar betonların (normal veya kendiliğinden yerleşen beton) genel davranışını önemli ölçüde etkiler. GKA üzerindeki çatlak ve yarıkların varlığı da agregaları zayıflatır. GKA'nın inşaat sektöründe kullanımı çok öncelere dayanmamakta olup sahip olduğu kusurları nedeniyle sadece birkaç kategoride sınırlı kalmıştır [13]. Tipik bir GKA'ya ait şematik gösterim Şekil 1.9'da verilmektedir.



Şekil 1.9. Geri kazanılmış agreganın şematik gösterimi

Geri kazanılmış agregalar RILEM (1994), DIN 4226-100 (2000) ve EN 13242 (2002) gibi Avrupa tavsiyeleri ile bileşimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Geri kazanılmış kaba agregalar RILEM (1994) tarafından aşağıdaki üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

- Tip I: Öncelikle duvar molozlarından elde edilenler,
- Tip II: Öncelikle beton molozlarından elde edilenler,
- Tip III: Doğal agrega (%80) ile geri kazanılmış agrega (%20) karışımından elde edilenler şeklindedir.

Öğütülmüş betondan elde edilen ve beton üretiminde kullanılan geri kazanılmış agregalar (GKA) RILEM (1994)'de Tip II agrega sınıfındadır.

#### 1.4.4. GKA'nın Geleneksel Betonda Kullanılması

Literatürde GKA içeren betonlarla ilgili son birkaç yılda oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı iri GKA ile ilgilidir. Bu çalışmaların bir kısmına kısaca aşağıda yer verilmiştir.

Gerçekleştirilen bazı çalışmalarda normal agrega (NA)'nın GKA ile ikame edilmesi sonucunda taze betonda işlenebilirlik zorluklarının üstesinden gelmek için su/çimento oranının artırılmasının gerektiği sonucuna varılmıştır [139].

İri GKA ile üretilen betonların davranışının iri GKA miktarı, su/bağlayıcı oranı ve iri GKA kaynak betonunun özellikleri tarafından etkilenmektedir. Daha önce gerçekleştirilmiş birçok araştırmada iri GKA içeriği %30 ile sınırlandırıldığında betonların basınç dayanımı



ve yarmada çekme dayanımındaki değişimin önemsiz olduğu belirtilmektedir. Fakat yüksek oranlarda iri GKA içeren betonların özelliklerinin önemli ölçüde kötüye gittiği vurgulanmaktadır. %100 iri GKA içeren betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme dayanımındaki azalmanın normal iri agrega kullanılan betonlara kıyasla sırasıyla %25, %23, %37 ve %45 civarında olduğu belirtilmektedir. %100 iri GKA üretilen betonun su emmesinin iri GKA içermeyen betona kıyasla %50`den fazla arttığı görülmektedir. Benzer şekilde iri GKA ile üretilen betonda büzülme ve sünme gibi uzun sürede değişim gösteren özellikler normal betona kıyasla önemli derecede yüksek çıktığı vurgulanmaktadır. Ayrıca karbonatlaşma, donma-çözülme, sülfat atağı ve klor iyonu penetrasyonuna karşı betonların direncinin iri GKA'nın betona dâhil edilmesiyle önemli ölçüde azaldığı belirtilmektedir. Betonda ultrases geçiş hızı gibi tahribatsız muayene sonuçlarının da iri GKA ile üretilen betonlarda daha düşük çıktığı görülmektedir [140].

İri GKA ile ilgi önceki birçok araştırmada betonların daha düşük performans göstermiş olduğu vurgulanmaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek için, son yıllarda birçok araştırmacı farklı teknikler uygulamıştır. İri GKA ile üretilen betonların özellikleri, iri GKA'nın çeşitli asitlerle önceden ıslatılması veya iki aşamalı kırma ve mekanik öğütme yoluyla işlenmesi gibi farklı işlemlerle GKA yüzeyinde yapışmış harcın uzaklaştırılmasıyla önemli ölçüde geliştirilebileceği belirtilmiştir. Benzer şekilde, yüzeyin çimento şerbeti veya puzolanik maddelere su eklenmesi ile oluşturulan bulamaç ile kaplanması gibi farklı teknikler vasıtasıyla agrega yüzeyindeki kalıntı harç güçlendirilerek iri GKA'nın özelliklerinde önemli bir iyileşme olabileceği gösterilmiştir. Beton üretiminde bakterilerin kullanımı da bu tip agregaların olumsuz özelliklerini azalttığı görülmüştür. İri GKA ile üretilen betonların özelliklerinin ayrıca nano parçacıkların beton üretimine dâhil edilmesiyle düzeltilebileceği vurgulanmıştır. Hızlandırılmış karbonasyon tekniklerinin geliştirilmesi ve karbon şartlı iri GKA kullanılması ile GKAB'nin niteliklerinin iyileştirilmesinde dikkate değer bir iyileşme gerçekleştiği belirtilmiştir. Bunun dışında beton karıştırma prosedürlerinde gerçekleştirilen bazı değişikliklerle iri GKA içeren betonların özelliklerinde bazı iyileşmeler görüldüğü kanıtlanmıştır. Su azaltıcı katkı maddelerinin veya biraz daha yüksek çimento miktarı (+%12) kullanımı betonun özelliklerini çok fazla değiştirmeden iri GKA kullanımının verimli yollarından birinde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca iri GKA ile üretilen betonların özellikleri çimento ile belirli oranlarda ikame edilen metakaolin, uçucu kül, nano-silika ve silis dumanı gibi çeşitli mineral katkıların dâhil edilmesiyle önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır [140].

GKA üzerine yapışmış harcın agrega yüzey alanının %44'ünden az bir alanı kaplaması durumunda yapısal beton elemanlarının üretiminde kullanılabilmesi belirtilmektedir. Bunun yanında GKA içeren betonların bazı durumlarda ara yüzey geçiş bölgesinin iyileşmesi nedeniyle çekme mukavemetinde artış meydana gelebileceği belirtilmiş olup, GKA ikame oranındaki artışla çekme mukavemetindeki azalmanın ihmal edilebilir düzeyde olduğu ifade edilmektedir. Su/çimento oranını değiştirerek, GKA maksimum tane çapında ve granülometrisinde değişiklik yaparak, mineral ve kimyasal katkı maddeleri kullanarak basınç dayanımının dikkate değer biçimde artırılabilmesi rapor edilmektedir [141].

Genellikle ince GKA'lar beton özelliklerini olumsuz yönde fazlaca değiştirebileceği için atılırlar. Fakat bu malzemelerle ilgili yapılan çalışmalarda %30'a kadar ince GKA kullanımının beton basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemediği, %100 ince GKA kullanımının ise beton basınç dayanımında yaklaşık %30 kadar bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. İnce GKA'nın betonda kullanmanın en olumsuz etkisi kuruma büzülmesinde neden olduğu artış ve betonun dayanıklılığındaki azalma gösterilebilir [142].

### 1.5. Betonun Durabilitesi

Durabilite (dayanıklılık) betonun çevreden gelen zararlı etkenlere karşı direnme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Betonun dayanıklılığı göreceli bir özelliktir çünkü beton aynı anda atmosfer, su ve toprak gibi ortamlarla temas halinde olabilir. Bu ortamlarda beton, sülfat saldırısı, asit saldırısı, karbonasyon, alkali-silika reaksiyonu, donma-çözülme, aşınma vb. kimyasal ve fiziksel saldırılara maruz kalabilir. Betonun tüm bu saldırılara karşı gösterdiği direnç dayanıklılığı olarak tanımlanır. Betonun hem dayanım hem dayanıklılık özelliklerine etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar kısaca aşağıda açıklanmaktadır:

- Su/bağlayıcı oranı: Su/bağlayıcı oranı arttıkça betonda daha fazla boşluk meydana gelmekte ve bu durumda dayanım ve dayanıklılık olumsuz etkilenmektedir.
- Agrega özellikleri: Agreganın tane şekli ve yüzey dokusu, en büyük tane boyutu, granülometri, dayanımı ve içerisinde bulunabilecek zararlı maddeler dayanım ve dayanıklılık açısından etkili faktörlerdir.
- Çimento özellikleri: Çimentonun kimyasal yapısı, hidrasyon hızı, inceliği betonun dayanımı ve dayanıklılığını etkiler.
- Su: Betondan kullanılacak karma suyu kalitesi betonun dayanım ve dayanıklılığını etkiler. Karışım suyu standartlara uygun olmalıdır.

- Yerleştirme: Taze betona uygulanan karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkılama işlemleri basınç dayanımı ve dayanıklılığına etkiyen önemli unsurlardır. Özellikle yerleştirme işleminin titizlikle yapılması gerekmektedir.
- Kür koşulları ve betonun yaşı: Kür koşulları ve yaş betonun dayanımı ve dayanıklılığı açısından önemli faktörlerdir [33].

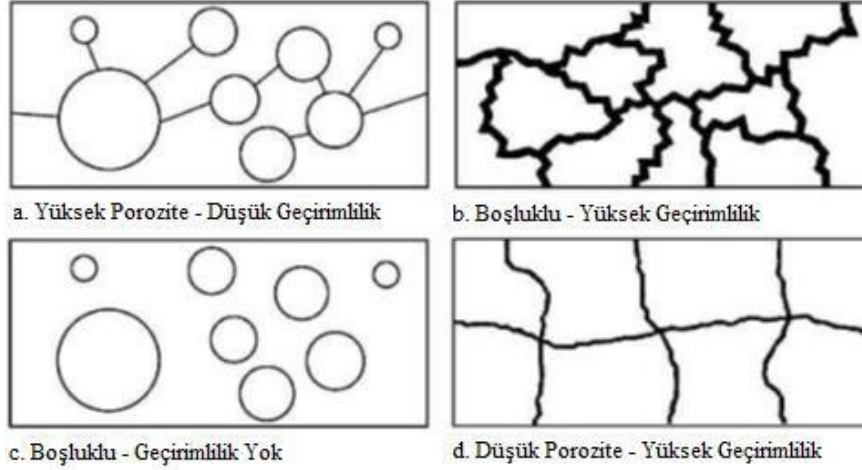
Dayanıklılık esas itibarıyla beton ve betonarme yapı elemanlarında ciddiye alınması gereken bir özellik olmasında rağmen gerektiği ilgiyi görmemektedir. Agresif ortamlarda betonarme yapıların dayanıklılığını arttırmak için çeşitli arayışlar sürdürülmektedir. Bunlar arasında çeliğe kimyasal ve fiziksel koruma sağlayan betonun kalitesini artırmak, betona yerleştirmeden önce donatıya doğrudan uygulanan koruma sistemleri (korozyon önleyici boyalar veya kaplamalar), bitmiş yapının dışına uygulanan koruma sistemleri (polimerik kaplamalar), donatı için katodik koruma ve korozyon direnci yüksek alternatif malzemeler (diğer bir deyişle paslanmaz çelikler, galvanizli çelikler ve karbon fiber) sayılabilir [142]. Durabilite açısından özellikle zorlu koşullar altında hizmet veren deniz yapıları gibi yapıların uzun süre ayakta kalabilmeleri noktasında endişe vardır. Bu tip yapılarda başlıca endişe veren unsurlar ise sülfat ve klorür saldırısı sonucu oluşan donatı korozyonudur. Geçirimlilik özellikle betonarme yapı elemanında belli bir sınır değeri aşarsa oldukça riskli sonuçlar doğurabilir. İlgili standart dayanıklı betonlar için izin verilen maksimum su işleme derinliğini 50 mm olarak tanımlamaktadır [143].

Son yıllarda beton yapıların dayanımı ve dayanıklılığını değerlendirmek için tahribatsız bir yöntem olan elektriksel özdirenç ölçüm tekniğinin araştırılmasına ve geliştirilmesine büyük önem verilmiştir. Bu yöntem, basitliği, hızlılığı ve maliyetinin ucuz olması nedeniyle özellikle saha değerlendirmeleri için oldukça popülerdir. Bununla birlikte, bu yöntemin standartlara ve yönergelere dâhil edilmesi oldukça yavaştır. Elektriksel özdirenç 2012 yılında beton kütle özdirencini ölçmek için ASTM C1760 ve ayrıca betonun yüzey özdirencini ölçmek için AASHTO TP 95-11 tarafından standardize edilmiştir. Bununla birlikte, mevcut bilgi ve endüstrideki uygulaması arasında halen bir boşluk bulunmaktadır. Araştırmacılar betonun sahip olduğu özdirençle basınç dayanımı arasında güçlü bir korelasyonun var olması nedeniyle tahribatsız yöntemlerin beton basınç dayanımını belirlemede kullanılabileceğini ileri sürmüşlerdir [144].

### 1.5.1. Betonların Boşluk Yapısı ve Geçirimsizliği

Beton yapıların fiziksel ve kimyasal olarak bozulmasının temelinde genellikle etkili olan iki faktör vardır. Bunlar ortamda suyun varlığı ve bu suyun beton bünyesinde mevcut boşluklara taşınımıdır. Su, beton içerisinde bulunan çatlaklar boyunca taşınır. Dolayısıyla taşınımın hızı çatlakların sayısına, dağılımına ve birbiriyle bağlantılı olup olmamasına bağlıdır. Betonun oluşturan agregalar çok az boşluğa sahip olduklarından geçirimsiz kabul edilir. Dolayısıyla betonun geçirimsizliği çimento hamurunun geçirimsizliğine ve çimento hamuru/agrega arayüzey özelliklerine bağlıdır. Aynı su/çimento oranına sahip betonun harçtan, harcın ise hamurdan daha çok geçirimsizdir. Bu açıdan bakıldığında ise geçirimsizlik açısından en zayıf halkanın agrega/çimento hamuru arayüzey bölgesinin yapısal özelliklerine bağlı olduğu söylenir [23].

Porozite, betonun dayanıklılığı açısından oldukça önemli bir faktördür. Betonun bünyesinde dört tip gözenek bulunur. Bunlar 5-50 µm büyüklüğünde jel gözenekleri, kılcal gözenekler, sürüklenen havadan kaynaklı mikro gözenekler ve yetersiz sıkıştırmadan kaynaklı makro gözeneklerdir. Tüm gözeneklerin betonun dayanımı üzerine olumsuz bir etkisi vardır. Ancak her boşluk miktarı fazla olan betonun geçirimsizliğinin de yüksektir sonucunu çıkarmamak gerekir. Betonun dayanıklılığının büyük ölçüde taşınım mekanizması tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle kılcallık ile suyun emiliminin beton dayanıklılığını anlamak için performans dayalı yaklaşımlarda yadsınmaz bir araç olduğu açıktır. Kılcal gözenekler (özellikle büyük olanlar) birbirine bağlantılı olduklarında betonun taşınım özelliği önemli derecede artar. Kılcal gözenekliliği ve gözenekler arası bağlantıyı kesmek için su/çimento oranının düşürülmesi gerektiği belirtilir [11]. Betonda porozite ve geçirimsizlik arasında Şekil 1.10'da gösterildiği gibi bir ilişki söz konusu olabilir.



Şekil 1.10. Porozite ve geçirimlilik arasındaki ilişki [145]

### 1.5.2. Betonda Çatlaklar

Betonda herhangi bir noktada oluşan çekme zorlamaları betonun maksimum birim şekil değiştirme kapasitesini aşarsa beton çatlaklar. Rötire (büzülme) betonda çatlak oluşumunun en önemli sebeplerinden biridir. Rötire sonucu betonda meydana gelen çatlaklar betonun geçirimliliğini artırarak betonu dış etkilere karşı savunmasız hale getirir. Rötire oluşum mekanizmasına göre aşağıdaki gibi 5 ana başlık altında toplanabilir.

- Hidrolik (Kuruma) Rötire: Boşluklardaki suyun kaybı sonucu oluşur.
- Termik Rötire: Kütle betonlarında iç ve dış sıcaklık farkı sonucu oluşur.
- Bünyesel Rötire: Çimento hidratasyon ürünlerinin, karışıma katılan çimento ve suyun hacimleri toplamından daha az hacim kaplaması sonucu oluşur.
- Erken Plastik Rötire: Terlemenin buharlaşmayı karşılayamaması halinde gerçekleşir.
- Karbonatlaşma Rötresi: Karbonatlaşma sonucu ortaya çıkan suyun buharlaşması neticesinde gerçekleşir.

Betonda oluşan çatlaklar taze betonda oluşan çatlaklar ve sertleşmiş betonda oluşan çatlaklar olmak üzere ikiye ayrılır. Taze betonda oluşan çatlaklar;

- Plastik Büzülme
- Plastik Oturma
- Kalıp ve Zemin Hareketleri
- Donma-Çözülme, vb.

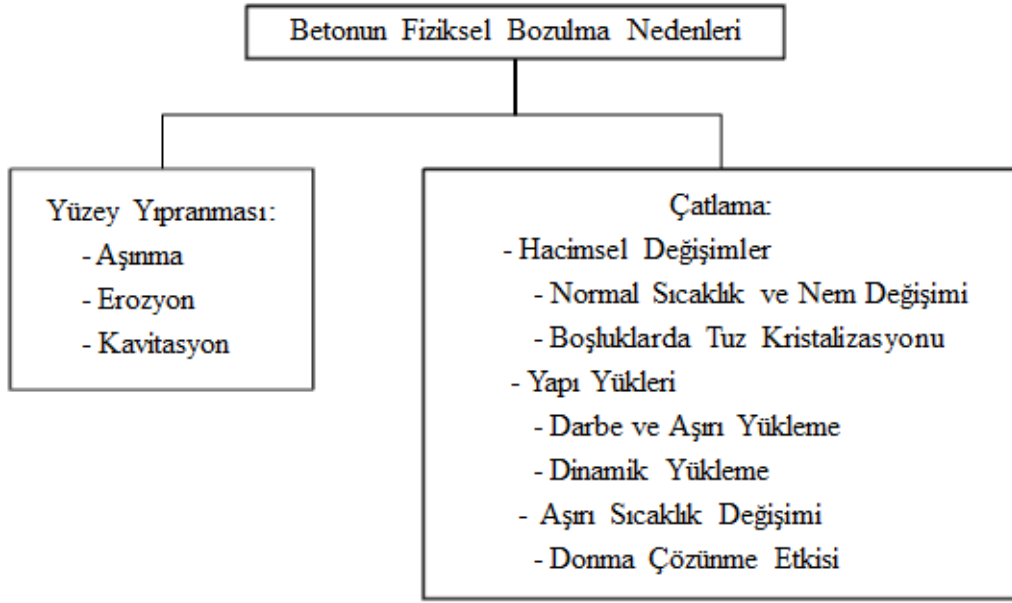
Sertleşmiş betonda oluşan çatlaklar ise;

- Çeşitli Rötrelere (Büzülme) Olayları
- Termal Etkiler
- Kimyasal, Fiziksel ve Biyolojik Nedenlerle Betonun Bozulması
  - Donma-Çözülme
  - ASR (alkali silika reaksiyonu)
  - AAR (alkali agrega reaksiyonu)
  - Boy ve Hacim Değişimleri
  - Islanma-Kuruma
  - Yüksek Sıcaklıklar ve Yangın
  - Donatı Korozyonu
  - Sülfat Etkisi
  - DEF (gecikmiş etrenjit oluşumu)
  - Tomasit Oluşumu
  - Karbonatlaşma
- Yapısal Nedenler
  - Aşırı yükleme
  - Mesnet Çökmesi
  - Sünme
  - Zemin problemleri vb

şeklinde sınıflandırılabilir [146].

### 1.5.3. Betonda Bozulma Mekanizmaları

Beton ve betonarme yapıların bozulmasına içerden ve/veya dışardan etki eden fiziksel, kimyasal ve biyolojik etmenler neden olmaktadır. Betonda bu etkiler birbirini tetikleyerek betonun hızlı bir şekilde bozulması gerçekleşmektedir [146]. Betonun bozulması üzerinde en etkili mekanizma geçirimsizliktir. Betonun geçirimsizliğini azaltmak için uygulamada en çok tercih edilen yöntemlerin başında su/çimento oranının düşürmek ve beton üretiminde mineral katkı maddeleri kullanmak gelmektedir [147]. Betonda fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki temel bozulma mekanizması vardır. Fiziksel bozulma nedenleri Şekil 1.11’de, kimyasal bozulma nedenleri ise Şekil 1.12’de verilmektedir.



Şekil 1.11. Betonun fiziksel bozulma nedenleri [147]

Aşınma trafik yükünden dolayı yollarda oluşan bozulma, erozyon suyun taşıdığı katı atıkların beton yüzeyine çarpması sonucu oluşan yıpranma ve kavitasyon ise suyun içinde oluşan kabarcıkların suyun aniden yön değiştirmesi sonucu oluşan patlamadan kaynaklı yıpranma olarak açıklanabilir.



Şekil 1.12. Betonun kimyasal bozulma nedenleri [147]

Hidrate olmuş çimento hamurunun katı fazını çözünmeyen kalsiyum hidratlar (C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub> ve CAH) oluşturmaktadır. Bu bileşenler gözenek suyu içinde bulunan Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> ve (OH)<sup>-</sup> iyonlarından dolayı pH değeri 12.5-13.5 arasında olan alkali özellikte bileşiklerdir. Beton içerisine giren özellikle sülfat ve klorür içeren sular, CO<sub>2</sub> ve H<sup>+</sup> iyonu içeren sular ve diğer reaksiyon oluşturabilecek sular bu pH ortamının hızlı bir şekilde bozulmasına neden

olur. Bu da betonda mukavemetin gelişmesinde önemli rol oynayan kalsiyum hidratların bozulmasına yol açarak betona zarar verir. Kimyasal bozulmanın özü bu şekildedir. Bir betonda bozulma oluşabilmesi için ortamda nemin mevcut olması öncelikli koşuldur. Nemin veya suyun betona girişi önlenmesi halinde betonda bozulma gerçekleşmez.

#### 1.5.4. Çelik Donatı Korozyonu

Korozyon metallerin doğadaki en düşük enerji düzeyine ulaşması isteği sonucu oluşan elektrokimyasal bir olaydır. Bu durumda metaller oksit haline geçerler [146]. Bu olay paslanma ve oksitlenme gibi terimlerle de ifade edilir. Bir yapının uzun süreli hizmet verebilirliğini belirleyen en önemli bozulmalardan biri çelik donatı korozyonudur. Korozyona uğramış yapıların onarım maliyeti çok yüksek olduğunu belirten literatürde çalışmalar mevcuttur. Avrupa'da inşaattaki yapılan harcamaların yaklaşık %50'sini eski yapıların bakım ve onarımına harcadığı tahmin edilmektedir. Bu oran 1980'lerde hesaplanan bakım ve onarım miktarları ile karşılaştırıldığında neredeyse iki katına çıkmış olduğu söylenebilir ve bazı araştırmacılar bu eğilimin gelecekte de artmaya devam edeceğini ifade etmektedir [148].

Klorür iyonları çelik korozyonunda önemli bir rol oynar. Çeliğin pasif oksit film tabakasına saldırır ve yok ederler. Çeliğin pasif tabakası ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) ile reaksiyona girerek çukur korozyonu diye tabir edilen  $\text{FeCl}_3$  üretir. Bu aşamadan sonra betonun koruyucu yüksek alkali ortamına rağmen çelik donatı korozyonu başlar. Donatı korozyonu hacmi orijinal donatıya kıyasla fazla olan korozyon ürünlerinin birikmesine, iç gerilmelerin oluşmasına ve daha sonra betonun çatlamasına neden olur. Beton bileşenlerin standart özellikleri nedeniyle, klorür iyonlarının agregalarda, suda veya katkılarda bulunması daha az olasıdır. Çevreden nüfuz eden dış kaynaklı klorür iyonları betonarme içindeki donatıya saldırabilir [25].

Klorürlerin bir kısmı gözenek çözeltisinde çözülmüş serbest iyonlar olarak kalır ve geri kalanı çimentonun hidratasyon sürecine katılır. Klorür iyonları  $\text{C}_3\text{A}$  ile reaksiyona girerek Friedel tuzunu ( $\text{FS- } 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) oluştururlar [149]. Ayrıca tetrakalsiyum alüminoferrit ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) de klorür ile reaksiyona girerek eşdeğer bir ferrik tuz ( $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) daha yavaş bir hızda oluşur. Genel olarak Portland çimentolarında klorür iyonları esas olarak  $\text{C}_3\text{A}$  ile reaksiyona girer ancak farklı puzolanik malzemelerin bulunduğu harmanlanmış çimentolarda aynı zamanda puzolanik katkı maddelerinden gelen reaktif alümin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile de reaksiyona girerler [150].



Çimento hamurunun klorür bağlama kapasitesi hidrasyonun ilk aşamalarında yüksek olmasından dolayı, betonun bileşenlerinde bulunan klorürler kimyasal olarak büyük ölçüde bağlanır. Bazı durumlarda (deniz ortamı gibi) sonsuz olarak kabul edilen harici klorür iyonlarının sadece bir kısmı çimento hamuru tarafından bağlanabilir. Açıkta kalan klorür iyonlarına genellikle bağlanmamış veya serbest klorür iyonları denir. Serbest klorür iyonları son derece zararlıdır ve çelik donatı için tehlikelidir. Sonuç olarak, çimento hamurunun klorür bağlama kapasitesinin yetersiz olması çok muhtemel olduğu için betonun geçirimsizlik direnci anahtar bir parametre haline gelir.

Betonda dört temel klorür iyonu taşınımı durumu vardır. Bunlar difüzyon, kılcal su emme, su buharı şeklinde taşınım ve hidrostatik basınç etkisi altındaki taşınımdır [25].

Klorür geçirimsizliği derinliği çevreden betona nüfuz eden veya karıştırma aşamasında betona giren klorür iyonlarının derinliğini ifade eder. Gerçekçi bir tasarım sağlamak ve böylece klorür geçirgenlik direncini arttırmak için olasılığa dayalı yaklaşımlar getirilmiştir. İri GKA ile üretilen betonlarda iri GKA'nın gözenekli yapısı nedeniyle genellikle normal agrega (NA) kullanılan betondan daha fazla klorür geçişine neden olmasına rağmen bazı araştırmacılar iri GKA ile üretilen betonların klorür geçişinin NA ile üretilen betonlardan hafif miktarda daha az olduğu ifade etmektedir. Karıştırma sırasında mineral katkı kullanımı, su/çimento oranını düşürmek ve süperakışkanlaştırıcı kullanmak GKA ile üretilen betonların klorür geçiş direncini arttırmanın etkili süreçleridir [151].

Betonun korozyona ve betona zarar veren çözeltilerin penetrasyonuna karşı dayanıklılığını değerlendirmenin bir yolu betonda bulunan iyonların miktarını belirleyen betonun elektrik direncini ölçmektir. Bu yöntemle betonun dayanıklılığını, klorür iyonu penetrasyonuna karşı direncini tahmin etmek mümkündür. Bazı araştırmacılar korozyon olasılığını belirlemek için elektriksel direnç aralığını araştırmayı denemişlerdir, ancak önerilen limitler büyük farklılıklar göstermiştir. Bununla birlikte betonun elektrik öz direncinin  $50 \Omega\cdot m$ 'dan az olması durumunda korozyon riskinin aşırı derecede yükseldiği belirtilmektedir [141].

Silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), metakaolin (MK), yüksek fırın cürufu (YFC) gibi minerallerin betonun klorür iyonu penetrasyonunu azalttığı ve elektriksel öz direncini arttırdığı bilinmektedir. Puzolanik reaksiyon yoluyla mineral kakılar gözenek çözeltilinde bulunan hidroksil ve klorür iyonu konsantrasyonunda uzun süreli bir azalmaya neden olur. Mineral katkıların varlığı mikro yapısal davranışı değiştirdiği ve gözenek yapısını yoğunlaştırdığı ve bu sebeple iyonların gözeneklerde hareket etmesini engellediği ve bu

şekilde betonların daha yüksek elektriksel dirence sahip olduğu belirtilmektedir. İri GKA içeren karışım üzerinde ASTM C1202 yöntemi kullanılarak klorür iyonu penetrasyon testi sonucunda geçen yükün referans karışımına kıyasla yaklaşık %25 arttığı belirtilmektedir. GKA ile yapılan KYB'lerin karbonatlaşma direnci ve elektriksel direnci hakkında literatürde oldukça sınırlı sayıda veri bulunmaktadır [127, 141].

### 1.5.5. Karbonatlaşma Etkisi

Karbonatlaşma atmosferde bulunan CO<sub>2</sub>'in difüzyon yoluyla betona nüfuz ederek ve beton içerisindeki boşluklarda betonun alkali bileşenleriyle reaksiyona girmesi sonucunda meydana gelen kimyasal bir reaksiyondur. Karbonatlaşma reaksiyonu aşağıda Denklem 1.1 ile verilmektedir.



Karbonatlaşma tahmin edilmez ve kontrol edilmezse ileri yaşlarda çok ciddi sonuçları olan bir bozulma türüdür. Karbonatlaşma, betonarme yapılar için büyük bir risktir, çünkü betonun alkaliliğini bozarak donatının paslanmasına neden olur. Betonun karbonatlaşması yavaş ve sürekli bir süreçtir ve dış taraftan içeriye doğru ilerler ve artan difüzyon derinliği ile yavaşlar. Karbonatlaşma işlemi pH değeri 8-13 olan betonun alkaliliğini o kadar azaltır ki betonarme donatısı yüzeyindeki ince pasif tabakayı bozar ve bu da korozyonun ilerlemesine neden olur. Bu durum beton kimyasında istenmeyen bir süreçtir. Karbonatlaşma esas olarak sıcaklık, bağıl nem, su/çimento oranı, kür rejimi, betonun gözenekliliği, beton ve agrega tipi, süper akışkanlaştırıcılar, bağıl nem, sıcaklık ve CO<sub>2</sub> konsantrasyonuna bağlıdır. Beton yapıların tasarımında karbonatlaşma, yapıların hizmet ömrünün belirlenmesine etki yapan önemli bir faktördür [127].

### 1.6. Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisinde beton maksimum sıcaklık düzeyine, ısınma hızına, ısınma-soğuma çevrimlerine ve sıcaklık süresine bağlı olarak farklı davranış gösterir. Yüksek sıcaklıkta betonun mukavemeti ve özellikle elastisite modülü önemli ölçüde kötülebilir ve bu

da betonun yapısal kalitesinde bozulmaya neden olur. Hızlı bir şekilde ısıya maruz kalmadığı sürece betonun basınç dayanımı genellikle 300°C'ye kadar artmaya devam devam edebilir. Fakat bu sıcaklığın üzerinde mukavemette önemli bir azalma görülür. Mukavemetteki azalmanın miktarı betonda kullanılan agreganın doğasına ve betonun nem içeriğine bağlıdır. Mukavemette meydana gelen değişiklikler hidrate olmuş çimentonun ayrışmasından, agregaların bozulmasından, agrega ve çimento hamurunun farklı genleşme özelliklerinden dolayı oluşan mikro çatlaklardan meydana gelebileceği rapor edilmektedir [152].

Sıcaklık artışı esnasında beton bir dizi karmaşık fiziksel ve kimyasal değişimlere maruz kalır. Beton ısıtıldığında betonda mevcut serbest su 100°C ila 200°C aralığında buharlaşmaya başlar ve sıcaklık arttıkça betondaki kimyasal su da bünyeden ayrılmaya başlar. Yüksek dayanımlı betonlar sahip oldukları düşük geçirimsizlikten dolayı açığa çıkıp buharlaşan su boşluklarda tutulmaya zorlanır. Sonuçta sıcaklık artışı ile artan iç buhar basıncı betonda çekme gerilmeleri oluşturur ve değer olarak 8 MPa düzeyine ulaşır. Betonun çekme mukavemetinden daha yüksek buhar basıncı değerine ulaşıldığında beton çatlar. Sıcaklığın devamlı yükselmesiyle ortaya çıkan buhar basıncının enerjisi de artar. Oluşan buhar basıncı betonu aniden terk etmesi durumunda betonun parçalanması söz konusu olabilir. Bu olay betonun patlayarak parçalanması olarak bilinir [104]. Betonun parçalanmasının bir başka nedeni ise beton içinde meydana gelen termal gerilmelerin artmasıdır. Beton termal iletkenliği düşük bir malzemedir. Bu durumda dış yüzeyi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun iç kısımları görece daha düşük sıcaklıktadır ve termal gradyanın eğimi artar. Bu da beton içinde termal gerilmelerin meydana gelmesine neden olur. Çimento hamurundaki en önemli bileşiklerden biri olan kalsiyum hidroksit yaklaşık 530°C'de ayrışarak betonun büzülmesine neden olur [153]. Betonun mukavemetini kaybetmesinde kritik eşik 550°C'de başlayan C-S-H jel yapısının ayrışması ile meydana gelmektedir.

Betonun ısıya dayanıklı olması yapı mühendisliğinde yapıların yangın dayanımı açısından ve nükleer reaktörlerde basınçlı tankların tasarımı gibi hususlarda önemli rol oynar. Kızgın bacaların ve yüksek yangın riski olan kimyasal üretim tesislerinin yapımında yüksek sıcaklık etkisi dikkate alınmaktadır [104]. Yangına maruz kalmış bir binaya ait fotoğraf Şekil 1.14'de verilmektedir.



Şekil 1.13. Yanmış bir binaya ait fotoğraf [154]

Yapılan çalışmalarda görülmektedir ki yüksek sıcaklık agrega ve çimento taneleri arasında kademeli ısı geçişine neden olmaktadır. Literatürde yüksek sıcaklıkta puzolan içeren (MK) karışımların mekanik özelliklerinin içermeyenlere göre daha düşük olduğuna dair bazı bulgular mevcuttur [104].

### **1.7. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)**

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), 1980'lerin ortalarında Japonya'da Tokyo Üniversitesinde Profesör Okamura tarafından geliştirilmiştir [152]. KYB'nin sistemli bir şekilde kullanımı 1988 yılında yine Okamura tarafından gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta bu beton "Yüksek Performanslı Beton, (YPB)" olarak isimlendirilmiştir. KYB/YPB başlangıçta Japonya'da inşaat ihtiyacını karşılamak için geliştirilmiştir. 1960'larda Japonya'nın savaş sonrası yeniden inşası, bina ve altyapı inşaatında bir patlamaya yol açtı. Japonya büyük bir deprem bölgesi olduğundan çoğu yapı elemanı yapının depreme dayanıklı olması için büyük ölçüde güçlendirilmeliydi. Ayrıca hızlı proje teslimi ihtiyacı nedeniyle, birçok yapı yeterli sıkıştırılmış betonla inşa edilememiştir. On iki yıl içinde pek çok betonarme yapı bozulmuştur.

Yeni beton konstrüksiyonunun dayanıklılık sorununu çözmek için Tokyo Üniversitesi'nden H. Okamura tarafından bir proje başlatılmıştı. Yaptığı araştırma sonucunda yetersiz sıkıştırmanın beton yapıların bozulmasının en önemli nedeni olduğu ve sıkıştırma sorununu ortadan kaldırmak için taze beton karışımının akışkanlığında bir artış sağlayarak "Kendi Kendine Sıkışan" beton karışımlarının kullanılmasının gerekliliğini öne sürmüştür [17]. KYB'ler oldukça akıcı betonlardır. KYB'lerin akıcılığı Şekil 1.15'de görülmektedir.



Şekil 1.14. Kendiliğinden yerleşen betonların akıcılığı

KYB kendi ağırlığı altında kalıbın farklı kısımlarında kolayca kayabilen, akabilen ve kalıp içinde dikkate değer bir sıkışma oluşturabilen özel bir betondur. KYB herhangi bir iç ve dış vibrasyona ihtiyaç duymayan, su kusmayan ve segregasyon yapmayan bir betondur [155]. KYB'nin özgünlüğü taze halde sahip olduğu reolojik özelliklerin bir sonucudur. Bu betonlar ayrışma olmaksızın yüksek işlenebilirlik ve şekil alabilme yeteneği ile karakterize edilirler ve bu özellikleri sayesinde dayanıklı yapıların inşası mümkün olmuştur. KYB'de tam bir sıkıştırma elde edebilmek için betonun yüksek derecede akıcılığa ve kohezifliğe sahip olmalıdır [156].

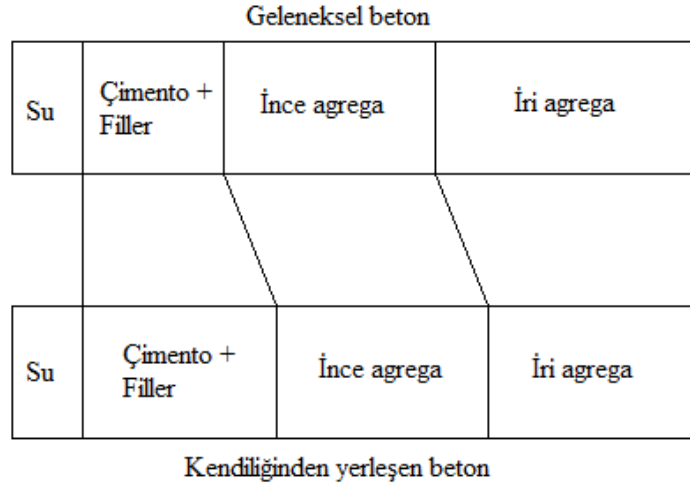
KYB'ler kendinden beklenen gereksinimleri karşılamak için fazla miktarda Portland çimentosu ve süperakışkanlaştırıcıya ihtiyaç duyar. KYB'lerin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çok dar kalıp ve sık donatılı yapı elemanlarına vibrasyona gerek duymadan kolayca yerleşir,
- İşçiliği ve dolayısıyla maliyeti azaltır,

- Döküm anında titreşim gerektirmediğinden işçiler gürültü ve titreşime maruz kalmaz. Ayrıca çevreye verilen gürültü kirliliği de azaltmış olur.
- Döküm anında titreşim gerektirmediğinden betonun içyapısında hasar meydana gelmez. Bu durum KYB'yi vibrasyon uygulayarak yerleştirilen betona kıyasla daha dayanıklı olmasını sağlar [157].

KYB'lerin tüm bu avantajlarının yanı sıra birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Geleneksel betonlara nazaran fazla miktarda kullanılan Portland çimentosu maliyeti olumsuz yönde etkilemenin yanı sıra betonun çatlamasına neden olan yüksek hidrasyon ısısına da neden olur [158]. KYB'nin akıcılığı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımını gerektirmektedir. Ayrıca koheziflik ve ayrışmaya karşı direnç uygun miktarda bir viskozite düzenleyici katkı maddesi vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu katkının görevi kayma ve göçme kaynaklı betonun ayrışmasını önlemek ve kayma eşiğini düşürmektir. Bu katkılar yine betonun maliyetini olumsuz etkilemektedir. Vibrasyonun uygulanamadığı bazı sık donatılı yapı elemanları için KYB tercih edilir. Bu özelliğin KYB'nin geleneksel betona göre ana avantajı olduğu belirtilmektedir [159].

Yüksek akıcılık etkin bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanabilir fakat karışımda kullanılan ince madde miktarını artırmak suretiyle de akıcılık artırılabilir. Bu amaçla kullanılacak olan ince malzeme 0.125 mm elekten daha küçük boyuta sahip olan taş unu (kireçtaşı tozu), uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi malzemelerdir. KYB'ler geleneksel betona kıyasla genellikle yüksek dayanıma, düşük su/çimento oranına ve üstün durabilite özelliklerine sahip oldukları için yüksek dayanımlı beton sınıfına girerler. Bileşimleri geleneksel betondan oldukça farklıdır [160, 161]. KYB ve geleneksel beton için tipik karışım oranları Şekil 1.16'da verilmektedir.



Şekil 1.15. KYB ve geleneksel beton için tipik karışım oranları

KYB’lerde malzeme seçimi ve beton tasarımları için birçok çalışma ve standart geliştirilmiştir. Bu tezde, EFNARC (European Federation of National Trade Associations - Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Uzmanları) tarafından sunulan standartlardan faydalanılmıştır. KYB’lerin işlenebilirliği geleneksel betonda kullanılan deney yöntemleriyle belirlenemez. Bu nedenle EFNARC çökme-yayıma, V-hunisi, J-halkası, L-kutusu, U-kutusu ve Elek ayırma deneylerini önermektedir [162, 163].

KYB aşağıda belirtildiği gibi EFNARC tarafından tanımlanan üç temel kriteri sağlamalıdır.

- Bulduğu hacmi boşluksuz doldurma yeteneği,
- Dar kesitlerden geçiş yeteneği,
- Ayırma (segregasyon) direnci.

EFNARC 2005’e göre bu 3 temel özelliğe ek olarak ayrıca betonların *akıcılığı*’da eklenmiştir. Tüm bu özelliklerin hangi deneylerle belirlenebileceği aşağıda Tablo 1.4’de verilmektedir.

Tablo 1.4. EFNARC'a göre KYB'lerin sağlaması gereken özellikler ve kullanılan deneyler

Ölçülen Özellik	Deney Yöntemi	Ölçülen Değer
Akıcılık / Doldurma yeteneği	Çökme – yayılma	Yayılma çapı
	Doldurma kutusu	Görsel dolum miktarı
Viskozite / Akıcılık	T <sub>500</sub>	Süre
	V hunisi	Süre
	O kutusu	Süre
	Orimet	Süre
Geçiş yeteneği	L kutusu	Geçişte yükseklik oranı
	U kutusu	Yükseklik farkı
	J halkası	Ring önü ve arkası yükseklik farkı ve yayılma çapı
	Doldurma kutusu	Görsel dolum miktarı
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışma	% Beton şerbeti
	Kolonda yerleşme	Segregasyon oranı

Tabloda görüldüğü üzere KYB'lerin taze beton özelliklerini belirlemek için birtakım deneyler önerilmektedir. Çeşitli standartlarda bu deneyler sonucunda KYB'lerin sağlaması gereken değerler belirtilmekle birlikte burada EFNARC'a göre KYB karışımlarının sağlaması gereken sınır değer aralıklarına da yer verilmektedir. Burada açıklanan deneyler bu tezde gerçekleştirilen deneyleri oluşturmaktadır

### 1.7.1. KYB'lerde Mineral Katkı Kullanımı

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) ile yüksek ve ultra yüksek mukavemetli betonlar genellikle yüksek çimento tüketimi gerektirir. Yaklaşık 500 kg/m<sup>3</sup> dozajında kullanılan Portland çimentosu bu tip betonlarda kullanılan ince malzemenin ana kaynağıdır. Betonlarda akışkanlık ve stabilite sağlamak amacıyla yüksek oranda ince malzeme kullanımı KYB üretiminin olmazsa olmazıdır. KYB'lerde fazla miktarda kullanılan ince malzeme mikro yapıyı ve gözenek ağını iyileştirdiğinden vibrasyon uygulanarak yerleştirilen geleneksel betona kıyasla dayanıklılık özelliği daha iyidir. Bununla birlikte ikili veya üçlü karışımlar halinde kullanılan mineral katkıları KYB'lerin yüksek oranda ince malzeme talebini karşıladıkları için KYB üretiminde önemlidirler [164].

Çeşitli mineral katkı maddesi ilavesinin KYB performansına etkisine ilişkin literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bunlar kısaca aşağıda verilmiştir.



Vivek ve Dhinakaran [165] yaptıkları çalışmada çimento yerine belli oranda silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC) ve metakaolin (MK) kullanarak kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) üretmişlerdir. Yaptıkları tasarımlarda %5 silis dumanı içeren KYB karışımlarının diğer tüm KYB karışımlarından daha iyi mekanik performans sergilediği sonucuna varmışlardır.

Dinakar ve ark. [166] uçucu külü %10-70 arasında çeşitli oranlarda çimento ile ikame ederek KYB'ler üretmişlerdir. %30 UK ikameli betonun 56 günlük kür süresi sonunda kontrol betonuna kıyasla daha yüksek dayanım verdiği belirtilmiştir.

Dadsetan ve Bai [167] UK, YFC ve MK içeren KYB karışımlarının mekanik ve mikro-yapı özelliklerini incelemişlerdir. Uçucu kül içeren KYB karışımlarının içermeyenlerden hem 28 hem 56 gün kür sonunda daha düşük basınç dayanımı vermişlerdir. Uçucu külün çimentoya ilave veya çimento ile ikame edildiğinde 28 gün sonunda basınç dayanımında azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir.

Mastali ve Dalvand [168] yaptıkları çalışmada KYB'lerin işlenebilirliklerinin çimentonun silis duman ile ikame edilme miktarının artışı ile azalma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Silis dumanı çimento ile %7 ve %14 oranında ikame edildiğinde kontrol betonuna kıyasla çökme-yayılma çapında sırasıyla %3.2 ve %7.8 azalma, çökme-akış süresinde ( $T_{500}$ ) %20 ve %40 oranında artış ve V hunisi deneyi süresinde %14.3 ve %42.9 oranında bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan silis dumanı kullanıldığında agrega ve çimento hamuru arasındaki aderansın gelişimine bağlı olarak betonların mekanik özelliklerinin de geliştiği belirtilmektedir. Çalışmada en yüksek basınç dayanımı %14 silis dumanı ikameli betonlarda görüldüğü ve bu oranda kontrol betonuna göre basınç dayanımında %21'lik bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Silis dumanı çimento ile %7 ve %14 ikame edildiğinde betonların yarmada çekme dayanımlarında sırasıyla %8.6 ve %14.3'lük artışlar kaydedildiği ifade edilmektedir.

Sfikas ve ark. [169] KYB'de MK kullanıldığında betonların işlenebilirlikleri olumsuz etkilendiği belirtmişlerdir. İşlenebilirlik ve reoloji üzerindeki bu olumsuz etkiyi bertaraf etmek için daha fazla miktarda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca metakaolin kullanımı ile basınç dayanımında artış sağlandığı ifade edilmektedir.

Madandoust ve Mousavi [105] çimento yerinen %5, %10, %15 ve %20 oranlarında MK kullanarak KYB karışımları üretmişlerdir. MK içeren betonların basınç dayanımları ilk 14 gün sonunda içermeyenlere kıyasla %27'ye varan oranda yüksek çıktığı belirtilmiştir.

Çimentonun %10 oranında MK ile ikame edilmesi ile en iyi sonuçların elde edildiği bu nedenle en avantajlı yüzde olarak kabul edilebileceği ifade edilmiştir. Benzer bir sonuç ve aynı öneri başka bir çalışmada da vurgulanmaktadır [170].

Kannan ve Ganesan [171] yüksek MK içeriğine (%30'a kadar) sahip kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) klorür iyonu penetrasyonuna karşı önemli bir direnç sergilediğini ifade etmektedirler.

Singh ve ark. [172] MK'nin KYB'lerde kullanımının daha düşük bir karbonasyon derinliğine yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Santos ve ark. [173] KYB'nin performansının agrega granülometrisinden etkilendiğini çünkü betonun daha yoğun olmasının paketleme yoğunluğu ve doldurulacak boşluk hacmiyle ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde, Nikbin ve ark. [174] iri agrega boyutu ve agrega hacminin KYB'lerin mekanik özellikleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla yürüttükleri bir çalışmada iri agrega hacminin %30'dan %60'a çıktığında farklı mekanik davranışlara neden olduğunu gözlemlemişlerdir. İri GKA agrega hacmi %40'a yükseltilmesi ile basınç ve yarmada çekme dayanımlarında küçük bir azalma olurken daha yüksek oranlarda (%50 ve %60) bu değerlerde artış daha belirgin olmaktadır. Jawahar ve ark. [175], farklı dozajlarda iri agrega karışımlarıyla KYB'lerin mekanik davranışını araştırmışlardır. Bu araştırmacılar basınç dayanımının iri agrega oranındaki değişimden etkilenmediği fakat birim ağırlık, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı gibi diğer mekanik özelliklerin etkilendiğini rapor etmişlerdir.

### **1.8. KYB'lerde Geri Kazanılmış Agrega (GKA) Kullanımı**

Omrane ve ark. [18] yaptıkları çalışmada, ürettikleri 1m x 1m x 0.1 m boyutlarında 28 günlük basınç dayanımı 25 MPa düzeyinde olan beton plağı kırarak elde ettikleri GKA ile kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) üretmişlerdir. Üretimlerde CEM II/A-L 42.5 R tip çimento kullanmışlardır. Tüm üretimlerde su/bağlayıcı oranı 0.42, bağlayıcı miktarı 449 kg/m<sup>3</sup> ve süperakışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı %0.9 olarak sabit tutulmuştur. Hem iri hem ince GKA'nın birlikte %0, %50, %75 ve %100 oranlarında normal agrega ile ikame edilmesinin sonuçlarını araştırmışlardır. Aynı zamanda üretilen karışımlarda %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında doğal puzolanın çimento ile ikame edilmesinin etkisini de araştırmışlardır. Taze beton özelliklerini belirlemek için çökme, J-ring, akma zamanı, V-hunisi, L-kutusu ve elek ayırma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 7, 28, 56, 90 ve 120 gün

sonunda basınç dayanımı belirlenmiştir. Ayrıca klorür iyonu difüzyonu deneyi ve sülfürik asitte kütle kaybı deneylerini de gerçekleştirmişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre beton performansı açısından GKA kullanım oranının %50'yi geçmemesi gerektiğini önermişlerdir. Çünkü bu orana kadar basınç dayanımlarındaki düşüş ihmal edilebilir düzeydedir. Doğal puzolan içeren betonların basınç dayanımı doğal puzolan içermeyen betonlarınkine kıyasla fark edilebilir şekilde düşük çıkmıştır. %15 ve %20 doğal puzolan ikamesi klor iyon penetrasyonu derinliğinde %50 azalma meydana getirmiştir. Ayrıca doğal puzolan kullanımı ile sülfürik asit içinde gerçekleşen kütle kaybı da azalmıştır.

Salesa ve ark. [176] yaptıkları bir çalışmada prefabrikasyon olarak üretilen betonların hedef özellikleri sağlamayanlar kırılıp agregaya üretilmiş ve bu agregadan (sadece iri agregaya %100 oranında kullanılmış, ince agregaya normal agregadır) tekrar beton üretilebilirliği (GK1) araştırılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca prekast beton elde edilirken oluşan atıkların kullanımı da değerlendirilmiştir. Elde edilen bu GKA kullanılarak üretilen betonu kırarak tekrar agregaya elde edilmiş ve bu agregadan (sadece iri agregaya %100 oranında kullanılmıştır, ince agregaya normal agregadır) beton üretilmiş (GK2) daha sonra aynı işlemi bir kez daha tekrarlayıp bir beton daha üretilmiş (GK3) ve bu betonlar arasındaki ilişki incelenmiştir. Böylece kontrol betonu da dâhil olmak üzere dört farklı beton tipi üretilmiştir. Tüm üretimlerde CEM I 52.5 R tip çimento  $390 \text{ kg/m}^3$  olarak kullanılmıştır. Su/çimento oranı tüm üretimlerde 0.5 olarak ve bir süperakışkanlaştırıcı katkı %1.5 oranında kullanılmıştır. Normal betondan 3. nesil betona doğru betonların şekil değiştirme kapasiteleri düşmüş basınç dayanımlarında artışlar meydana geldiği rapor edilmiştir.

González-Taboada ve ark. [177] yaptıkları çalışmada geri kazanılmış iri agregayı %0, %20 ve %100 oranlarında normal iri agregaya ile ikame ederek KYB üretilmiş ve bu betonların taze haldeki özelliklerini araştırmışlardır. Çimento olarak CEM I 52.5 tip çimento kullanılmıştır. GKA gerçek yıkıntı atıklarından temin edilmiş olup %96'sı beton geri kalan kısmı ise seramik asfalt ve diğer atıklardan sağlanmıştır. Çalışma kapsamında çimento  $400 \text{ kg/m}^3$ , filler  $180 \text{ kg/m}^3$ , su/(çimento+filler) oranı 0.32 ve süperakışkanlaştırıcı/(çimento + filler) oranı %1.7 olarak sabit tutulmuştur. Çalışmada ayrıca her bir iri agregaya ikame oranı için üç farklı beton karışımı gerçekleştirilmiştir. Bunlar M1 (kuru agregaya ve ekstra su), M2 (agregaya doyma suyu önceden emdirilmiş), M3 (%3 doğal neme sahip agregaya ve ekstra su) şeklindedir. Reolojik testler suyun çimento ile birleştiği andan 15, 45 ve 90 dakika sonunda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar GKA kullanılarak üretilen KYB'ler için reolojinin taze beton davranışını kontrol etmek için en iyi araç olduğunu ve Bingham 5-lowest'in ise

en uygun model olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada GKA kullanılarak KYB üretmek için en uygun yöntemin agregaya karışım esnasında ekstra su vermek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yöntemle kendiliğinden yerleşme davranışı tüm GKA ikame oranlarında 45 dakikaya kadar korunmasının yanı sıra GKA ikame oranının %50'yi geçmeyecek şekilde 90 dakikaya kadar korunabildiğini vurgulamışlardır. Hatta önceden bir nem içeriğine sahip iri GKA kullanımının işlenebilirliği ve reolojiyi kontrol etmek için kuru durumda kullanımdan daha zor olduğunu ifade etmişlerdir.

Vinay Kumar ve ark. [178] yaptıkları çalışmada iri GKA ve ince GKA'ların KYB üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada mineral katkı maddesi olarak F sınıfı uçucu kül kullanılmış ve Nan-Su metoduna göre 40 MPa dayanım hedeflenerek betonlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretimlerde 53 sınıf sıradan portland çimento kullanmışlardır. Tüm beton bileşimlerinde çimento  $440 \text{ kg/m}^3$ , su/çimento oranı 0.48, süperakışkanlaştırıcı/çimento oranı %1, viskozite düzenleyici/çimento oranı %0.05 ve uçucu kül  $146.67 \text{ kg/m}^3$  oranlarında kullanılmıştır. Betonlar kontrol betonu, %20 ince GKA ikame edilerek üretilen beton, %20 iri GKA ikame edilerek üretilen beton ve %20 GKA (hem irisi hem incesi) ikame edilerek üretilen beton olacak şekilde dört farklı beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Betonun taze haldeki özelliklerini belirlemek için çökme-yayılma,  $T_{500}$ , V-hunisi zamanı, L-kutusu yükseklik oranı ve elek ayrışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. %20 iri ve %20 ince GKA ikame edilen betonlar için çökme-yayılma deneyi EFNARC'da belirtilen sınırlamalar içinde kalmazken diğer testlerde sınır değerler arasında kalmıştır. Sertleşmiş betonlarda ayrıca 3, 7 ve 28 gün sonunda basınç dayanımı deneyleri ve 28 gün sonunda yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sertleşmiş betonlarda GKA kullanılarak elde edilen betonun özelliklerinin kontrol betonunun özelliklerinden bir miktar daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar taze ve sertleşmiş beton özelliklerini dikkate aldıklarında %20 GKA'nın (hem ince hem iri) betonda kullanımını önermişlerdir. %20 GKA'ya sahip betonlar üzerinde ayrıca sülfat ve asit atağı testleri yürütülmüş ve 30 gün boyunca ayrı ayrı  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  çözeltilerine maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımındaki azalmanın sırasıyla %11 ve %40 mertebesinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Kanish Kapoor ve ark. [179] yaptıkları çalışmada iri GKA'yı normal iri agrega ile %0, %50 ve %100 ikame ederek betonlar üretmişlerdir. Tüm betonlar için çimento  $430 \text{ kg/m}^3$  ve su/çimento oranı 0.65 olacak alınmıştır. Ayrıca çeşitli oranlarda süperakışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici katkıları da kullanılmıştır. Betonların işlenebilirlik özelliklerini

belirlemek için çökme-yayıma, V-hunisi, L-kutusu ve J-halkası deneyleri uygulanmıştır. Betonların durabilite özelliklerini belirlemek için hızlı klorür geçirimsizliği, su işleme derinliği ve kapiler su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uçucu küle ek olarak %10 oranında silis dumanı veya metakaolin kullanımının özellikle %50 iri GKA ikameli beton olmak üzere betonların durabilite kaybının önüne geçtiğini belirtmişlerdir. Mineral katkıları içinde özellikle metakaolinin daha etkin olduğu ifade edilmiştir. GKA ikame oranı %100 olması durumunda mineral katkıların durabilite kaybını telafi edemedikleri görülmüştür.

Navdeep Singh ve Singh [180] yaptıkları çalışmada iri GKA ile düşük hacimli uçucu kül (DHUK) ve yüksek hacimli uçucu kül (YHUK) kullanımının KYB'lerdeki karbonatlaşma direnci üzerine etkilerini incelemiştir. Bu amaçla 4, 12 ve 16 haftalık süreler sonunda hızlandırılmış karbonatlaşma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde kullanılan iri GKA laboratuvarında hazırlanan bir betonun kırılması sonucu elde edilmiştir. Betonlarda toplam bağlayıcı oranı  $615 \text{ kg/m}^3$  (çimento + uçucu kül) ve su/bağlayıcı oranı ise 1.45 olarak seçilmiştir. İri GKA kullanım oranının artması ile karbonatlaşma direncinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Mineral katkı maddesi olarak metakaolin kullanımının belli bir seviyede karbonatlaşma direncindeki bu düşüşü azalttığı görülmüştür. Bu sonuçlar ayrıca SEM ve TGA analizleriyle de doğrulanmıştır.

Güneyisi ve ark. [181] yaptıkları çalışmada hem ince hem de iri GKA'nın KYB'nin reolojik ve taze beton özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla iri GKA %0, %50 ve %100 oranlarında normal iri agrega ile yer değiştirerek ve ayrıca tekrar her bir seri içinde ince GKA %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında normal ince agrega ile yer değiştirerek betonlar üretilmiştir. Tüm karışımlarda çimento  $440 \text{ kg/m}^3$ , uçucu kül miktarı  $110 \text{ kg/m}^3$ , süperakışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı %1.25 ve su/bağlayıcı oranı 0.32 olarak sabit tutulmuştur. KYB'nin GKA ile reolojik davranışını açıklamak için Bingham modeli yerine Herschel-Bulkley ve modifiye Bingham modelleri benimsenmiştir. Hem iri hem de ince GKA kullanımının KYB'nin taze özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için çökme-yayıma ve  $T_{500}$  zamanı, V-hunisi ve L-kutusu testlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, Herschel-Bulkley ve modifiye Bingham modellerinin GKA içeren KYB'ler için uygun olduğu belirlenmiştir. Betonların kendiliğinden yerleşme özellikleri, KYB karışımlarında kullanılan iri GKA ve ince GKA'nın ikame seviyeleri ile dikkate değer bir şekilde değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Carro-Lopez ve ark. [182] yaptıkları çalışmada %0, %20, %50 ve %100 oranlarında ince GKA'yı normal ince agrega ile ikame ederek çeşitli betonlar üretmişlerdir. Karışımlarında çimento  $400 \text{ kg/m}^3$ , kireçtaşı tozu  $180 \text{ kg/m}^3$  olarak kullanılmıştır. %100 ince GKA ikame oranında KYB özelliklerini tamamen yitirdiği gözlemlenmiştir. İnce GKA ikame oranının artışına bağlı olarak betonun akışkanlığında azalma olduğu görülmüştür. Betonların basınç dayanımında ince GKA ikame oranının artışına bağlı olarak bir azalma gözlemlenmiştir. 28 gün standart kür sonunda ince GKA içermeyen betona göre %20, %50 ve %100 oranında ince GKA içeren betonların basınç dayanımlarındaki azalma sırasıyla yaklaşık olarak %9, %32 ve %46 olarak tespit edilmiştir.

Pereira-de-Oliveira ve ark. [183] yaptıkları çalışmada iri GKA içeren KYB'lerin geçirimsizlik özelliklerini incelemişlerdir. Çimento olarak CEM I 42.5 R tip çimento, filler olarak ise kireçtaşı tozu kullanmışlardır. Doğal iri agrega olarak granit, GKA olarak ise yıkılmış bir binadan alınan molozlar kullanılmıştır. Beton karışımlarında GKA içermeyen KYB yanı sıra %20, %40 ve %100 iri GKA ikameli betonlar da üretilmiştir. Çalışmada çimento  $284.5 \text{ kg/m}^3$ , kireçtaşı tozu  $370.2 \text{ kg/m}^3$ , su/çimento oranı 0.57 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Basınç dayanımı 28 gün standart kür sonunda GKA içermeyen betonlarda 54 MPa iken, %20, %40 ve %100 iri GKA ikameli betonlar da ise sırasıyla 54 MPa, 53 MPa ve 51 MPa bulunmuştur. Görüldüğü gibi %100 iri GKA ikame oranında bile basınç dayanımı kaybı çok az olmuştur. Benzer durum dinamik elastisite modülünde de görülmüştür. İri GKA ikame oranındaki artışı ile ilginç bir şekilde kılcallık katsayılarında azalma olduğu tespit edilmiştir. %20, %40 ve %100 iri GKA ikameli betonlarda kılcallık katsayılarındaki bu azalma GKA içermeyen KYB'ye göre sırasıyla %4.9, %6.3 ve %13.3 olarak belirlenmiştir. Maksimum su işleme derinlikleri incelendiğinde en fazla su işleme derinliğinin %20 iri GKA ikameli KYB'de gerçekleştiği görülmektedir. En düşük maksimum su işleme derinliğinin ise %40 iri GKA ikameli betonda olduğu belirtilmektedir.

Grdic ve ark. [184] yaptıkları çalışmada iri GKA'nın KYB üzerindeki etkisini araştırmışlardır. KYB tasarımlarında çimento  $409.6 \text{ kg/m}^3$ , taş unu  $260 \text{ kg/m}^3$  olacak şekilde sabit tutmuşlardır. Su/bağlayıcı oranı 0.25-0.28 arasında değiştirilmiştir. Bunun nedeni artan iri GKA kullanımı sonucunda KYB'nin çökme-yayılma çapında meydana gelen azalmayı telafi etmektir. İri GKA'nın doğal iri agregayla ikame oranı %0, %50 ve %100 olarak belirlenmiştir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde GKA içermeyen betonlara göre %50 ve %100 iri GKA içeren betonların basınç dayanımlarında oluşan azalma sırasıyla %2 ve %6

iken yarmada çekme dayanımında oluşan azalma sırasıyla %2 ve %16 ve su emmede oluşan artış sırasıyla %42 ve %67 mertebesinde olduğu rapor edilmiştir.

Tuyan ve ark. [185] yaptıkları çalışmada KYB üretiminde %0, %20, %40 ve %60 oranlarında iri GKA kullanımının etkisi araştırılmıştır. Bu üretimleri 0.32, 0.36 ve 0.40 su/toplam bağlayıcı oranında yapmışlardır. Basınç dayanımlarının su/bağlayıcı oranından oldukça fazla etkilediği belirlenmiştir. Her bir su/bağlayıcı oranı için en yüksek basınç dayanımının %40 iri GKA ikameli betonlarda görüldüğü rapor edilmiştir. Fakat yarmada çekme dayanımlarında ise en yüksek değer iri GKA içermeyen betonlarda görüldüğünü belirtmişlerdir. Sonuç olarak %40 iri GKA kullanımının betonların sertleşmiş özelliklerini çok fazla etkilemediği belirtilmiştir.

Modani ve Mohitkar [186] yaptıkları çalışmada iri GKA'nın KYB'ler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla doğal agregayı %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında iri GKA ile ikame ederek betonlar üretmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çeşitli deneyler sonucunda artan GKA ikamesinin betonların gerek mekanik gerekse durabilite özelliklerinde olumsuz etki yarattığı rapor. Bununla birlikte çalışmada sürdürülebilir bir beton için %40 iri GKA oranının kullanılabilmesi ileri sürülmektedir.

Guneyisi ve ark. [126] yaptıkları çalışmada yüzey iyileştirme yöntemleri ile iyileştirilen iri GKA ile üretilen KYB'lerin özelliklerini incelemişlerdir. İyileştirme yöntemlerinden ilki iri GKA'lar 24 saat süresince 20°C'de 0.1 M HCl çözeltisinde beklettikten sonra distile su ile durulamaktır. İkincisi iri GKA'ları cam suyunda (sodyum silikat) 30 dakika süresince bekletmek ve sonra havada süzdürdükten sonra 1 saat süresince agregaların birbirine yapışmasını önleyecek şekilde fırında kurutmaktır. Üçüncü yöntem ise iri GKA'ları çimento ve silis dumanı bulamaçlarında 30 dakika bekletip 24 saat sonunda 28 günlük su kürüne tabi tutmaktır. Bu şekilde iyileştirilen iri GKA ile üretilen KYB'lerin tümünde betonların su emmesinin azaldığı, basınç dayanımlarının ise HCl ve cam suyunda bekletilmeleri neticesinde arttığı görülmüştür.

Modani ve Mohitkar [187] yaptıkları çalışmada %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında iri GKA ikame oranlarında üretilen KYB'lerin mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Tüm üretimlerde çimento 348 kg/m<sup>3</sup>, silis dumanı 115 kg/m<sup>3</sup> ve su/bağlayıcı oranı 0.4 olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca tüm üretimlerde eşit işlenebilirlikte sağlamak için değişen oranlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kontrol betonunda 28 gün kür sonunda 38.07 MPa basınç dayanımı elde edilirken bu değer artan iri GKA oranı ile azalmakta ve %100 iri GKA ikameli betonda 32 MPa düzeyine düşerek kontrol betonuna

göre yaklaşık %16 kayba uğradığı tespit edilmiştir. Yarmada çekme dayanımındaki azalma %37 mertebesindedir. İri GKA miktarındaki artışa bağlı olarak KYB'lerin durabilite özelliklerinde azalma meydana gelmiştir. %100 iri GKA içeren betonların kontrol betonuna göre asit saldırısı halinde ağırlıkça ölçülen kayıp %4.58 artarken, klorür iyonu penetrasyon derinliğinde %128 artış, alkalilikte %8,4'lük bir artış olduğu belirlenmiştir.

Tang ve ark. [188] yaptıkları çalışmada %0, %25, %50, %75 ve %100 iri GKA içeren betonların özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında üretilen KYB'lerde çimento  $445 \text{ kg/m}^3$ , uçucu kül  $155 \text{ kg/m}^3$ , silis dumanı  $30 \text{ kg/m}^3$ , su/bağlayıcı oranı 0.35 olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca her bir karışımda süperakışkanlaştırıcı  $4.5 \text{ l/m}^3$  olacak şekilde sabit tutulmuştur. İri GKA ikame oranındaki artışa bağlı olarak betonların mekanik özelliklerinin ve akışkanlık özelliklerinin azalarak işlenebilirlik özelliklerinin olumsuz etkilendiği rapor edilmiştir. %100 iri GKA ikame oranında kontrol betonuna kıyasla basınç dayanımında %9.4, çekme dayanımında %6.6 ve elastisite modülünde ise %22.2 mertebesinde bir azalmanın ortaya çıktığı rapor edilmiştir.

Kapoor ve ark. [189] %0 ve %100 iri GKA ikameli iki seri beton üretmiş ve bu her iki seri beton için ayrıca %0, %25, %50, %75 ve 100 ince GKA ikameli KYB'ler üreterek bu betonların özelliklerini incelemişlerdir. Karışımlarda çimento  $430 \text{ kg/m}^3$  olarak sabit tutulmuştur. I. seri karışımda toplam bağlayıcının %30'u UK, II. seride karışımda ise toplam bağlayıcının %20'si UK ve %10'u MK olacak şekilde betonlar üretilmiştir. Elde edilen bulgulara göre betonların hem iri hem ince GKA içermeleri durumunda mekanik ve durabilite özelliklerinin kötü etkilenmiştir. Ancak oluşan bu olumsuz etkinin karışımlarda MK kullanmak suretiyle azaldığı veya ortadan kaybolduğu belirtilmektedir.

Çoğu çalışmada taze beton özelliklerinin iri GKA içeriğindeki artışla azaldığı ve hedef taze özelliklerinin elde edilmesi için daha yüksek dozda süperakışkanlaştırıcı kullanılması gerektiği ortaya çıktığı belirtilmektedir [178].

]. Bazı çalışmalarda ise bu durumun tersi bir sonucun olduğu ifade edilmektedir. Örneğin; Kou ve Poon [190] KYB'lerin çökme- yayılma çapı ve segregasyon oranı ince GKA içeriğinin artışı ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca %50 ince GKA ikamesine kadar basınç dayanımlarında artış gözlemlemişlerdir. Basınç dayanımındaki artış açısından bakıldığında benzer sonuç Hu ve diğ. [191] yaptıkları çalışmada da görülmüştür. Bu çalışmada KYB'lerde 28 günlük basınç dayanımının %75 ince GKA ikamesine kadar hafif bir artış eğilimi gösterdiği vurgulanmaktadır.



Carro L3pezeta ve diğ. [192], ince GKA'nın %50 ve %100`u ile ikame edilerek 3retilen KYB karışımlarının 45 dakika sonra geğme ve doldurma kabiliyetlerinde bozulma ve 90 dakikada t3m KYB 3zelliklerini tamamen kaybettikleri vurgulanmaktadır. Bununla birlikte %20 ince GKA ikameli karışımın t3m KYB 3zelliklerini korumuş olduğu belirtilmektedir. %20 ve %100 ince GKA içeren betonların 28 g3nl3k basınę dayanımlarının GKA içermeyen betona kıyasla sırasıyla %8 ve %47 daha d3ř3k olduğu belirtilmektedir.

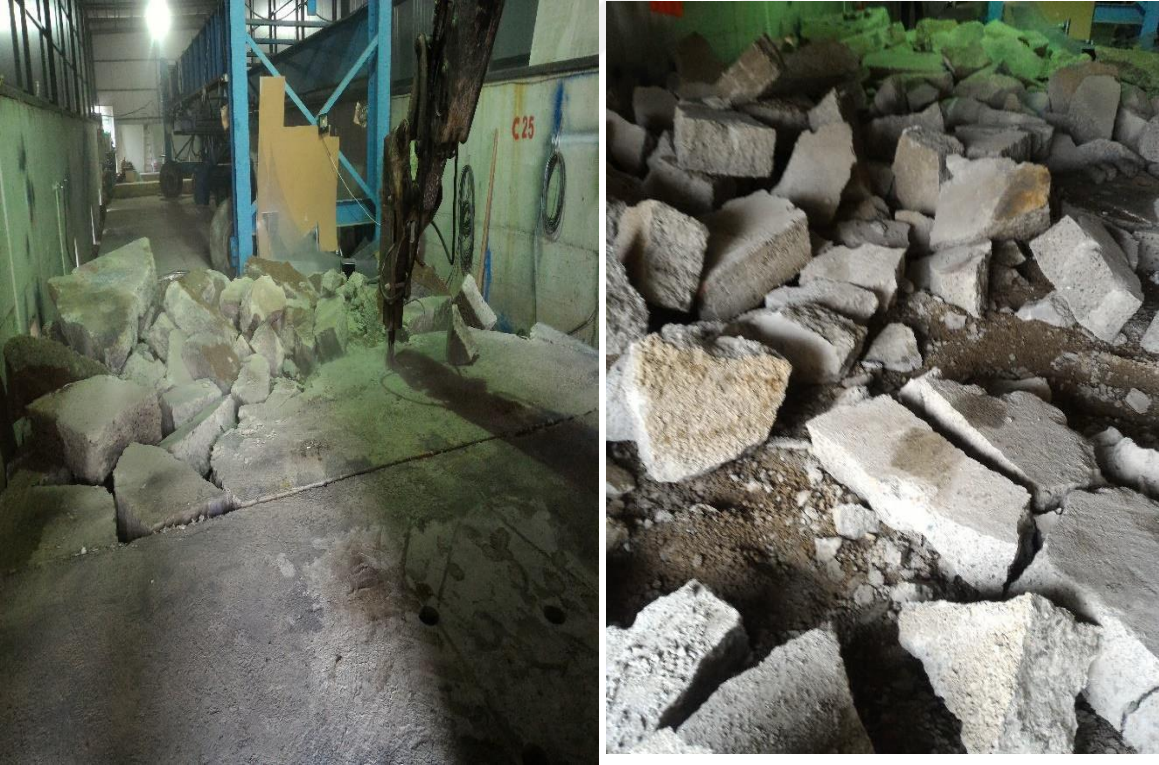
Çoğu araştırmada %40'a kadar iri GKA'nın normal agrega ile ikame edilmesinin basınę dayanımı 3zerinde 3nemli bir etkisinin olmadığı rapor edilmektedir [193].



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. GKA Temini ve Kaynak Betonun Özellikleri

Geri kazanılmış agregalar (GKA) Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bünyesinde bulunan Hızlandırılmış Yol Testi Laboratuvarındaki mevcut beton yol kırılarak elde edilmiştir. Bu beton yol daha önce deney amaçlı üzerinden çeşitli sayıda ve değişik yüklerde tekerlek geçişi yapılan bir yoldur. Beton yolun dökümü 2009 yılında yapılmış olup beton plağın ölçüleri 5.5x4x0.25 m'dir. Deneysel çalışmada kullanılan GKA bu ebatla üç tane beton plaktan sağlanmıştır. Beton yol plaklarının kırılması ve kamyonlara yüklenmesine ait görseller Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmektedir. Bu işlemler için Trabzon Büyük Şehir Belediyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Bazalt Agregat Kırma Tesisine ait iş makineleri kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Beton yol plaklarını kırma işlemine ilişkin görseller



Şekil 2.2. Kırılmış beton plak blokların kamyonlara yüklenmesi

Kırılmış beton bloklar öğütülüp agregaya yapılmak üzere Trabzon Yomra'da bulunan Bazalt Agregası Kırma Tesisine taşınmıştır. Bazalt Agregası Kırma Tesisi yetkilileriyle görüşüp önceki agregası üretimlerinden kalan malzemenin bertaraf edilmesi sonrası bize ait malzemenin kırma işlemi sağlanmıştır. GKA'nın öğütülerek elde edilmesine ait görsel Şekil 2.3.'te verilmektedir. Beton blokların öğütülüp agregaya dönüşmesi aşamasında filler malzeme yıkanarak uzaklaştırılmıştır. Bu şekilde öğütülmüş ve yıkanmış agregası üç farklı tane sınıfa ayrılmıştır. Karışmayı önlemek için her bir agregası grubu ayrı kamyonlara yüklenmiş, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme Laboratuvarına taşınmış ve üzeri örtülerek koruma altına alınmıştır.



Şekil 2.3. Beton bloklarının GKA haline getirilmesi

GKA, agrega kırma tesisinde 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm olacak şekilde üç farklı boyut halinde elde edilmiştir. GKA'nın temin edildiği beton plaklar üzerinde kırma öncesi ve sonrası beton özelliklerini belirlemek için birtakım deneyler gerçekleştirilmiştir. Beton plaklar agrega haline getirilmeden önce kırıcı ile büyük parçalar haline getirilmiştir. Parçalama işlemi gerçekleştirilmeden önce ve sonra Schmidt çekici ölçümleri yapılmış ve ayrıca elde edilen karot numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyleri gerçekleştirmenin amacı GKA kaynak betonunun özelliklerini belirlemenin yanı sıra, kırma işlemi nedeniyle betonun ne ölçüde örselendiğini ve mekanik özelliklerinde meydana gelen azalmayı belirlemektir. Schmidt çekici ölçümlerine ait görsel Şekil 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Beton plak ve beton parçalar üzerinde Schmidt okuması

Şekil 2.5'te GKA üretiminde kullanılan betondan karot alınmasına ait görseller verilmektedir. Alınan karotlar 100 mm çapında olup yükseklikleri çaplarına eşit olacak şekilde alt ve üst kısımlarından kesilmiştir. Daha sonra bu silindirik numuneler üzerinde 55 kHz frekansa sahip probalar kullanarak ultrases geçiş hızı okumaları yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı okumasına ilişkin görsel Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.5. Beton plaktan ve kırılmış parçalardan karot alma işlemi



Şekil 2.6. Ultrases geçiş hızı tayini

Ultrases geçiş hızı ölçümleri gerçekleştirilen numunelerin alt ve üst yüzeyleri kükürtle başlıklandıktan sonra tek eksenli basınç etkisinde basınç dayanımları belirlenmiştir. Kükürtle başlıklanmış numuneler ve basınç dayanımı deneyine ilişkin görsel şekil 2.7`de verilmektedir.



şekil 2.7. Başlıklanmış karot numuneler ve basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi

GKA`nın elde edildiği betonun farklı bölgelerinden elde edilen Schmidt ölçümleri Tablo 2.1`de verilmektedir. İlgili tablodan görüldüğü üzere beton yol plağın kırım öncesi ve kırım sonrası ortalama R-değeri (Rebound value) sırasıyla 26.87 ve 25.28 olmuştur. Basit bir hesaplama ile betonun kırım öncesine oranla R-değerinde %5.92 oranında bir azalma olduğu görülmektedir.

Tablo 2.1. GKA`nın elde edildiği betona ait kırım öncesi ve sonrası Schmidt okumaları (R değerı)

	Kırım gerçekleştirilmeden önce					Kırım gerçekleştirildikten sonra				
	36.5	28.5	31.5	24.0	34.5	25.5	27.5	26.0	27.5	28.0
	20.0	30.0	23.5	28.0	34.5	23.5	18.0	23.5	24.0	18.5
	25.0	28.5	25.5	23.0	21.0	21.0	25.5	16.5	33.0	27.5
	16.5	27.5	20.5	29.5	28.0	28.0	21.5	24.5	21.0	25.0
	30.5	27.0	25.0	32.5	21.0	33.0	22.5	20.0	34.5	27.0
	21.0	21.0	31.5	34.5	26.0	27.5	33.0	29.5	18.5	27.5
Ortalama	26.87					25.28				

GKA'nın elde edildiği beton plaklardan kırım öncesi ve kırım sonrası 9'ar adet karot numune alınmıştır. Karot numuneler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 2.2'de verilmektedir. İlgili tablodan görüleceği üzere kırım öncesi ultrases geçiş hızı ortalaması 4.22 km/s iken kırım sonrası bu değer 4.13 km/s kadardır. Basit bir hesaplama ile kırım sonrası ultrases geçiş hızının kırım öncesine kıyasla yaklaşık %2.13 mertebesinde azaldığı görülmektedir.

Tablo 2.2. Beton yol plaklar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı değerleri (km/s)

	Kırım gerçekleştirilmeden önce					Kırım gerçekleştirildikten sonra				
	4.37	4.26	4.18	4.42	4.26	4.26	4.08	4.18	4.26	4.31
	4.18	4.26	3.97	4.08		4.26	3.92	4.03	3.83	
Ortalama	4.22					4.13				

Beton yol plaklardan alınan karot numuneler üzerinde ölçülen basınç dayanımı değerleri Tablo 2.3'de verilmektedir. İlgili tablodan görüldüğü üzere beton yol plaklardan elde edilen karotlar üzerinde belirlenen ortalama basınç dayanımı 36.4 MPa iken kırım sonrası bu değer 31.9 MPa olduğu görülmektedir. Beton plağın parçalanması esnasında beton yapısında meydana gelen mikro çatlaklar nedeniyle betonun basınç dayanımında ortalama olarak %12.36 oranında bir azalma olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3. Beton yol plağına ait karotlar üzerinde belirlenen basınç dayanımları (MPa)

	Kırım gerçekleştirilmeden önce					Kırım gerçekleştirildikten sonra				
	32.1	34.7	35.5	40.3	38.9	23.3	35.9	34.6	31.8	38.1
	38.9	35.7	34.4	36.6		38.7	31.2	21.0	32.8	
Ortalama	36.4					31.9				

## 2.2. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

### 2.2.1. Agregalar

Çalışma kapsamında normal agrega olarak kırma taş ve kırma kum kullanılmıştır. Ayrıca hem iri (4-16 mm), hem ince (0-4 mm) geri kazanılmış agregalar (GKA) ayrı ayrı

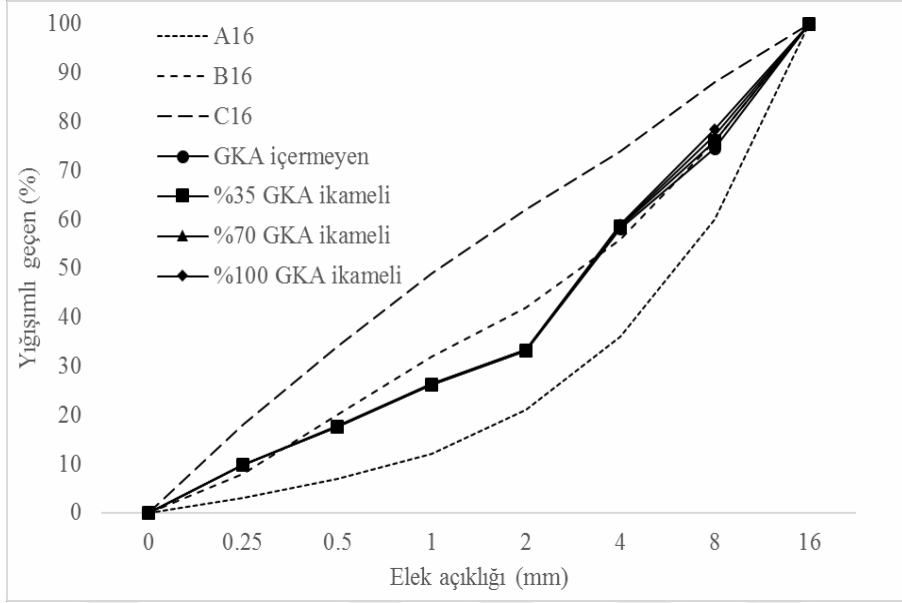
normal iri ve ince agregaya ile hacimce %35, %70 ve %100 oranlarında ikame edilerek farklı agregaya miktarlarında KYB karışımları tasarlanmıştır.

Öncelikle agregaların elek analizi yoluyla granülometrik bileşimleri belirlenmiştir. Elek analizi sonucunda normal agregalar için TS 802 [194] standardında belirtilen B sınır eğrisine yakın düşen bir karışım agregası elde etmek için %40 iri ve %60 inceden oluşan bir karışım oranı seçilmiştir. GKA'nın granülometrisi de normal iri agregaya ile oldukça benzerdir. Ancak ince GKA ve ince normal agregaya arasında bu benzerlik söz konusu olmadığından ince GKA eleme ve öğütme işlemleri yoluyla 0-2 mm (elenmiş), 2-4 mm (elenmiş) ve 0-2 mm (öğütülmüş) olacak şekilde üç farklı agregaya grubu oluşturulmuş ve bu agregaya gruplarından deneme-yanılma yoluyla normal ince agreganın granülometrisine benzer granülometriye sahip ince GKA oluşturulmuştur. Eleme ve öğütme işlemleri Şekil 2.8'de görüldüğü üzere gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan agregalara ilişkin granülometri eğrileri Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da verilmektedir. Bu görsellerden tüm karışımlara ait granülometri eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

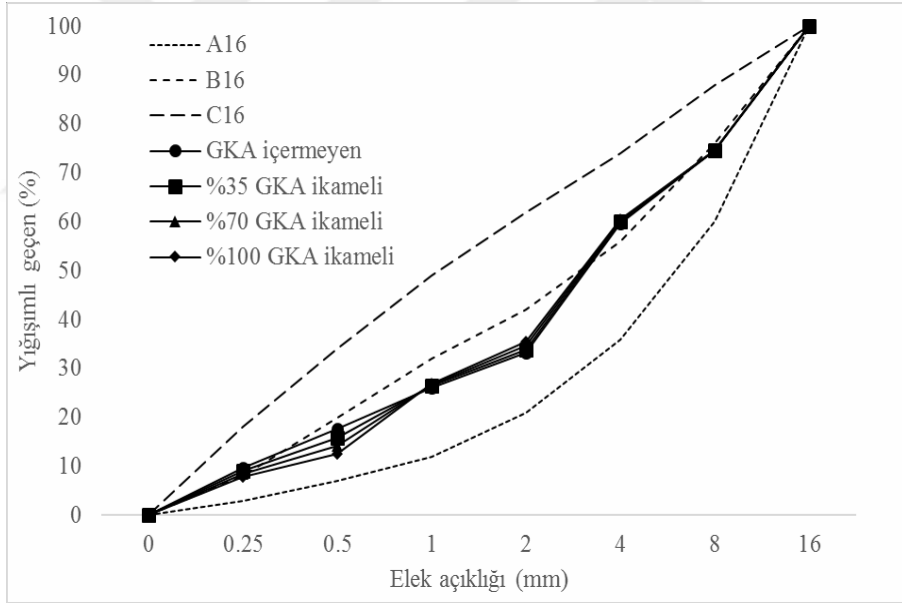


Şekil 2.8. Agregaya eleme cihazı (solda) ve öğütme cihazı (sağda)





Şekil 2.9. İri GKA ikame edilerek üretilen KYB'lere ilişkin granülometri eğrileri



Şekil 2.10. İnce GKA ikame edilerek üretilen KYB'lere ilişkin granülometri eğrileri

Tablo 2.4'de deneysel çalışmada kullanılan agregalara ilişkin doymun yüzey kuru (DYK) özgül ağırlıklar ve su emme değerleri verilmektedir. Burada N harfi normal agregayı, G harfi ise GKA'yı simgelemektedir.

Tablo 2.4. Agregalara ilişkin DYK özgül ağırlıklar ve su emme değerleri

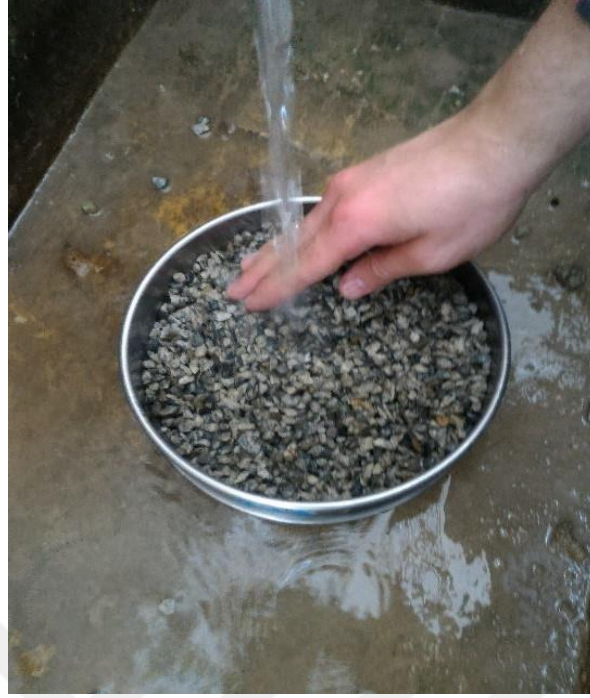
Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık	Su emme (%)
N- İri agrega (Kırma taş)	2.69	1.90
N- İnce agrega (Kırma kum)	2.66	2.49
G- İri agrega	2.48	7.51
G- İnce agrega	2.39	9.30

GKA'nın aşınma direncini belirlemek için ASTM C 131-03 [195] standardı uyarınca Los Angeles aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. İlgili standarda göre deneyde kullanılması gereken numune miktarı Tablo 2.5'de verilmektedir.

Tablo 2.5. Los Angeles deneyinde kullanılacak agregalar miktarları

Elek açıklığı (Kare göz)		Kütle (g)			
Elekten geçen	Elekte kalan	A	B	C	D
37.5 mm	25.0 mm	1250 ± 25			
25.0 mm	19.0 mm	1250 ± 25			
19.0 mm	12.5 mm	1250 ± 10	2500 ± 10		
12.5 mm	9.5 mm	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5 mm	6.3 mm			2500 ± 10	
6.3 mm	4.75 mm			2500 ± 10	
4.75 mm	2.36 mm				5000 ± 10
Toplam		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Los Angeles aşınma deneyi Tablo 2.5'de C sınıfı numune hazırlanarak gerçekleştirilmiştir. Yani 4.75-6.3 mm elek arasında kalan agregalar numunesinden 2500 g ve 6.3-9.5 mm elek arasında kalan numuneden de 2500 g olarak toplamda 5000 g kuru numune üzerinde deney gerçekleştirilmiştir. Numuneler belirtilen eleklerden elendikten sonra her bir numune 1.6 mm elek üstünde de yıkanarak standartta belirtildiği şekilde ince malzemenin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Yıkama işlemine ait görsel Şekil 2.11'de, yıkama kurutulduktan sonra deneye hazır hale getirilen agregalar numuneleri ise Şekil 2.12'de verilmektedir.



Şekil 2.11. İnce taneleri uzaklaştırmak için agregaların 1.6 mm elek üzerinde yıkanması



Şekil 2.12. Elenmiş, yıkanmış ve kurutulmuş agrega numuneleri

Belirtilen miktarda agrega numunesi Los Angeles cihazı tamburuna konulduktan sonra aşınmayı sağlamak için Tablo 2.6'de belirtilen sayıda bilye tambura konulmuştur. Deneyde kullanılan agrega numunesi C sınıfı olduğu için 8 adet çelik küresel bilye tambura konmuştur.

Tablo 2.6. Tambura konulması gereken bilye sayısı [195]

Sınıf	Küresel bilye sayısı	Yüklenen yük (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 25
D	6	2500 ± 25

Kullanılan Los Angeles cihazı Şekil 2.13’de verilmektedir. Aşınma miktarı yüzde olarak tambur 31~33 dev/dk hızda 500 devir yaptıktan sonra belirlenmektedir. Buna göre tamburdan çıkarılan agrega 1.6 mm elekten elenip yıkandıktan sonra değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulur. Kurutulan agrega miktarı tartılarak belirlenir (m). Aşınma yüzde olarak Denklem 2.1 yardımıyla belirlenir.

$$\text{Aşınma yüzdesi (\%)} = \frac{5000 - m}{5000} \times 100 \quad (2.1)$$



Şekil 2.13. Los Angeles cihazı

Çalışmada kullanılan agreganın aşınması %30.0 olarak belirlenmiştir. TS 706 EN 12620 [20] standardı uyarınca agregaların aşınma miktarlarına göre sınıflandırması Tablo 2.7'de verilmektedir. GKA agreganın aşınma kategorisi LA<sub>30</sub> olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.7. Los Angeles katsayısına göre agrega kategorileri [20]

Los Angeles katsayısı	Kategori (LA)
≤ 15	LA <sub>15</sub>
≤ 20	LA <sub>20</sub>
≤ 25	LA <sub>25</sub>
≤ 30	LA <sub>30</sub>
≤ 35	LA <sub>35</sub>
≤ 40	LA <sub>40</sub>
≤ 50	LA <sub>19</sub>
> 50	LA <sub>beyan</sub>
Serbest	LA <sub>NR</sub>

### 2.2.2. Çimento

Çalışmada Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ilişkin fabrikadan temin edilen kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2.8'de verilmektedir.

Tablo 2.8. Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	32 mikron elek üstünde kalan (%)	8.77	
SiO <sub>2</sub>	19.45	Özgül Yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	3556	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.77	Özgül Ağırlık	3.10	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.11	Priz Süresi (Vikat) (dak)	Başlangıç	175
CaO	63.03		Bitiş	220
MgO	1.97	Su İhtiyacı (%)	30.46	
SO <sub>3</sub>	3.06	Hacim Genleşmesi (mm)	1	
Na <sub>2</sub> O	0.29	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	30
Serbest CaO	1.21		7 gün	43.7
K <sub>2</sub> O	0.91		28 gün	53.7
Cl <sup>-</sup>	0.01			
Kızdırma Kay	3.75			

### 2.2.3. Su

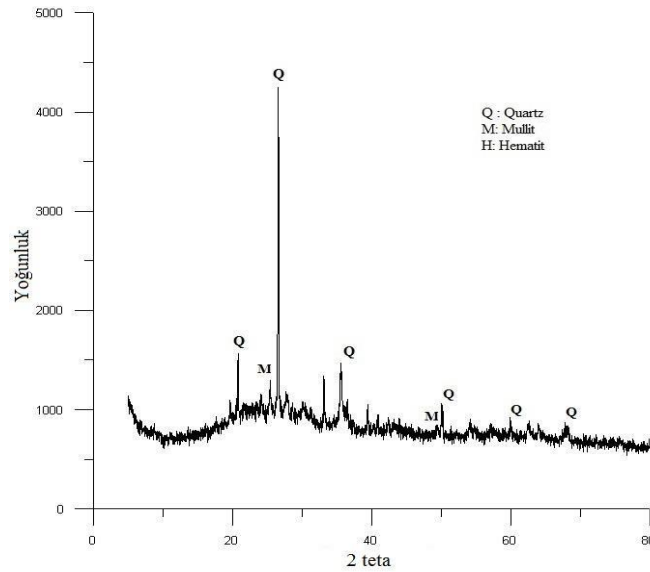
Tüm beton karışımlarında şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

### 2.2.4. Uçucu Kül

Çalışma kapsamında kullanılan uçucu kül Kütahya-Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiş olup özgül ağırlığı 2.3'tür. Uçucu küle ilişkin XRF analizi ODTÜ laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları Tablo 2.9'da verilmektedir. Ayrıca uçucu küle ait XRD analizi Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesinde gerçekleştirilmiş olup analiz sonucu Şekil 2.14'de verilmektedir.

Tablo 2.9. Uçucu külün kimyasal bileşimi

Bileşen	%
SiO <sub>2</sub>	49.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.3
CO <sub>2</sub>	4.85
CaO	4.35
MgO	3.86
K <sub>2</sub> O	2.50
SO <sub>3</sub>	1.73



Şekil 2.14. Uçucu küle ait XRD analizi

Gerçekleştirilen analizler sonucu çalışmada kullanılan uçucu kül;

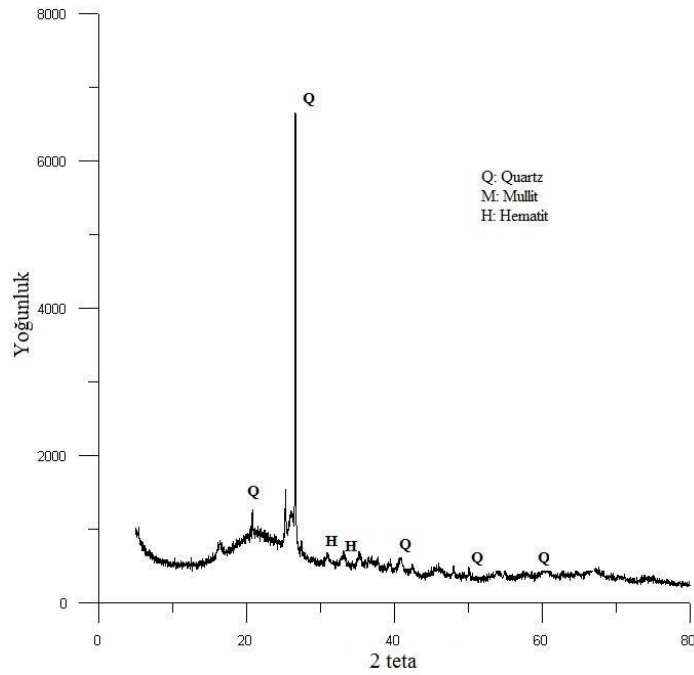
- TS EN 197-1 standardına göre V sınıfı uçucu kül
- ASTM C 618 standardına göre F sınıfı uçucu kül sınıfına girmektedir.

### 2.2.5. Metakaolin

Çalışmada kullanılan metakaolinin özgül ağırlığı 2.6 olup kimyasal bileşimi Tablo 2.10'da XRD analiz sonuçları ise Şekil 2.15'de verilmektedir.

Tablo 2.10. Metakaoline ilişkin kimyasal bileşim

Bileşen	%
SiO <sub>2</sub>	51.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.702
CaO	0.301
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.282
K <sub>2</sub> O	0.122
SnO <sub>2</sub>	0.0504
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0824
SrO	0.0166
TiO <sub>2</sub>	1.88



Şekil 2.15. Metakaoline ait XRD analiz

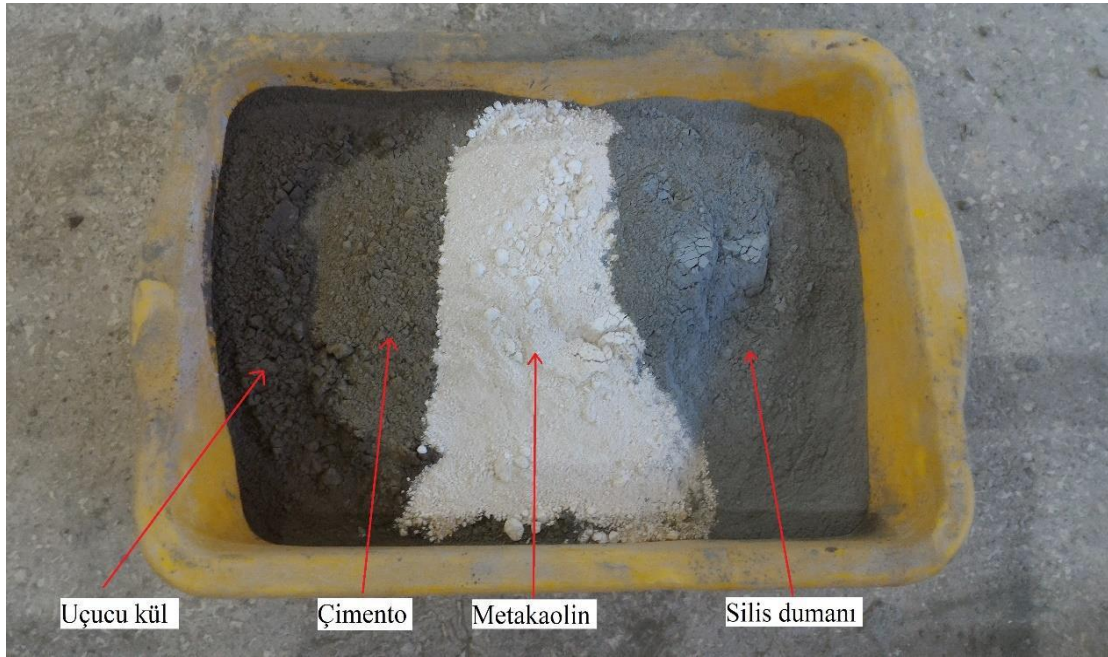
### 2.2.6. Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanının özgül ağırlığı 2.2'dir. Silis dumanına ait kimyasal bileşim Tablo 2.11'de verilmektedir.

Tablo 2.11. Silis dumanına ait kimyasal bileşim

Bileşen	%
SiO <sub>2</sub>	93.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.79
CaO	0.60
MgO	1.00
Na <sub>2</sub> O	1.00
K <sub>2</sub> O	0.10
SO <sub>3</sub>	0.50
Kızdırma kaybı	0.50

Çalışmada kullanılan çimento, uçucu kül, metakaolin ve silis dumanına ait fiziksel görsel Şekil 2.16'da verilmektedir.



Şekil 2.16. Çalışmada kullanılan bağlayıcı malzemelere ait görsel



### 2.2.7. Kimyasal Katkı Maddesi

Deneysel çalışmada yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kimyasal katkı maddesinin kullanım amacı KYB için gerekli olan işlenebilirliği su/bağlayıcı oranını değiştirmeden sağlamaktır. Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı maddesine ilişkin fabrikadan temin edilen fiziksel özellikler Tablo 2.12’de verilmektedir.

Tablo 2.12. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesine ilişkin fiziksel özellikler

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi sıvı
Özgül ağırlık (20°C’de)	1.082 – 1.142
pH değeri	6-7
Alkali içeriği (%)	≤ 3.00 (ağırlıkça)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0.10 (ağırlıkça)

### 2.3. Beton Karışımları

Çalışma kapsamında KYB’lerde farklı oranlarda GKA, uçucu kül, metakaolin ve silis dumanı kullanımının betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini ne ölçüde etkilediği ve bu betonların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler araştırılmıştır.

Tüm üretimlerde CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış olup su/bağlayıcı oranı 0.38, bağlayıcı miktarı 550 kg/m<sup>3</sup> olarak sabit tutulmuştur. Tüm üretimlerde bağlayıcı miktarının %70’ini çimento oluşturmaktadır. Uçucu kül, metakaolin ve silis dumanı toplam bağlayıcının %30’unu teşkil etmektedir. KYB işlenebilirlikleri EFNARC tarafından öngörülen sınır değerler arasında tutulmuştur. Bunu sağlamak için bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi gerekli miktarlarda kullanılmıştır.

KYB karışımları hazırlanırken iri GKA normal iri agregaya ile %35, %70 ve %100 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Benzer şekilde ince GKA da normal ince agregaya ile %35, %70 ve %100 oranlarında ikame edilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla GKA içermeyen KYB üretilerek toplamda 7 farklı bileşime sahip KYB betonu üretilmiştir. Aynı zamanda hem iri (4-16 mm), hem ince (0-4 mm) GKA içeren betonlar üretilmemiştir.

Literatürde ve standartlarda KYB’de toz malzeme (<0.125 mm) olarak yalnızca çimento kullanımından ziyade farklı miktarlarda puzolanın çimento ile birlikte kullanımı tavsiye edilmektedir.

Çalışmada üretilen bazı deneme betonları üzerinde bazı işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçta %70 çimento + %30 mineral katkı kullanıldığında stabil KYB’ler üretilebilmiş ve bu şekilde kullanılacak toz malzeme miktarı belirlenmiştir. Toz diye tabir edilen malzemeler bu çalışmada çimento ve mineral katkı maddeleri olarak uçucu kül (UK), metakaolin (MK) ve silis dumanı (SD) olup bundan böyle bu malzemeler bağlayıcı olarak ifade edilecektir. GKA ikame miktarının KYB üzerindeki etkisi yanı sıra farklı oranlarda mineral katkı maddelerinin de etki düzeyi araştırılmıştır. Bu amaçla üretilen beton karışımlarında mineral katkıları; %30UK, %20UK+%10MK, %20UK+%10SD ve %20UK+%5MK+%5SD olacak şekilde 4 farklı kombinasyonda kullanılmıştır. Bu kapsamda hazırlanan beton karışımları Tablo 2.13’de verilmektedir.

Tablo 2.13’den görüleceği gibi farklı oranlarda GKA içeriğinden 7 kombinasyon ve farklı oranlarda mineral katkı içeriğinden 4 kombinasyon olmak üzere toplam  $7 \times 4 = 28$  farklı bileşimde KYB üretilmiştir. Karışımları isimlendirmede kullanılan kısaltmalar tabloda verilmiştir. Tabloda UK uçucu külü, MK metakaolini, SD silis dumanını göstermektedir. Kısaltmaların önündeki sayılar her bir bileşenin karışımda karışım oranını göstermektedir. Örneğin, 20UK0MK10SD betonda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı  $550 \text{ kg/m}^3$ ’ün ağırlıkça %20’si UK, %10’u SD olduğu ve karışımda MK’nin %0 olduğunu ifade etmektedir. Zaten daha önce belirtildiği gibi çimento tüm karışımlarda toplam bağlayıcı miktarının %70’ini oluşturmaktadır. Karışımı isimlendirmede sağdaki kısım betonda ikame edilen GKA oranını göstermektedir. Örneğin 70 İri demek o betonda iri GKA hacimce %70 oranında normal iri agrega ile ikame edilmiştir anlamına gelmektedir. “0” ise GKA içermeyen beton demektir. Tabloda N normal agregayı, G GKA’yı gösterirken SA süperakışkanlaştırıcıyı göstermektedir.

Tablo 2.13. Çalışmada gerçekleştirilen beton karışımları (kg/m<sup>3</sup>)

Karışım kombinasyonları	Çim.	UK	MK	SD	Su	N İri	N İnce	G İri	G İnce	SA			
30UK0MK0SD-0	385	165	0	0	209	619	918	0	0	7,6			
30UK0MK0SD-35İri						402		200		7,6			
30UK0MK0SD-70İri						186		400		7,6			
30UK0MK0SD-100İri						0		571		7,6			
30UK0MK0SD-35İnce						619	597	0	288	8,0			
30UK0MK0SD-70İnce							275		577	8,1			
30UK0MK0SD-100İnce							0		824	8,6			
20UK10MK0SD-0						385	55	0	209	622	922	0	0
20UK10MK0SD-35İri		404	201	7,8									
20UK10MK0SD-70İri		187	402	7,9									
20UK10MK0SD-100İri		0	574	8,1									
20UK10MK0SD-35İnce		622	599	0						290	8,6		
20UK10MK0SD-70İnce			277							579	8,5		
20UK10MK0SD-100İnce			0							828	8,7		
20UK0MK10SD-0		110	0	55						209	618	916	0
20UK0MK10SD-35İri							401	199			11,1		
20UK0MK10SD-70İri	185				399		11,3						
20UK0MK10SD-100İri	0				570		11,4						
20UK0MK10SD-35İnce	618				595		0	288			11,4		
20UK0MK10SD-70İnce					275			575			11,5		
20UK0MK10SD-100İnce					0			822			11,8		
20UK5MK5SD-0	385				27.5		27.5	209			620	919	0
20UK5MK5SD-35İri			403	200							9,2		
20UK5MK5SD-70İri			186	400		9,2							
20UK5MK5SD-100İri			0	572		9,4							
20UK5MK5SD-35İnce			620	597		0			289		9,6		
20UK5MK5SD-70İnce				276					577		9,7		
20UK5MK5SD-100İnce				0					825		9,8		

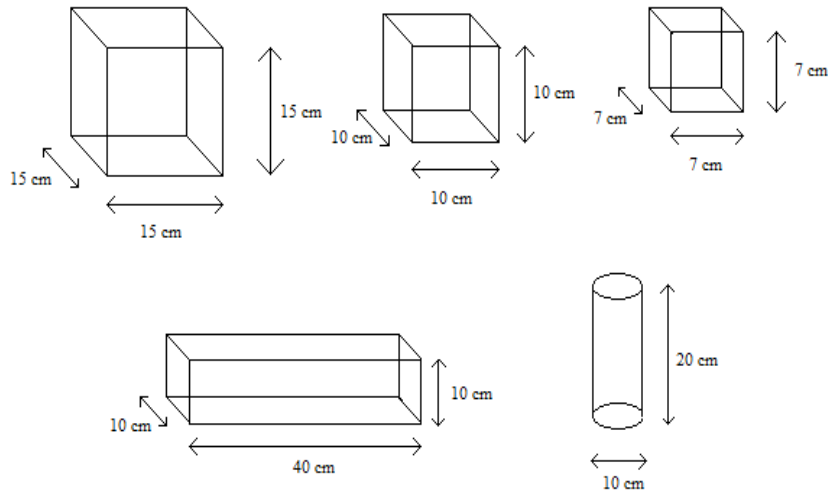
#### 2.4. KYB Üretimi, Numune Hazırlama ve Kür Süreci

Üretilen KYB'lerden elde edilen numuneler üzerinde dayanım, dayanıklılık ve yangına dayanıklılık testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her bir karışım için 13 adet 15 cm küp numune, 24 adet 10 cm küp numune, 2 adet 7 cm küp numune, 4 adet 10x10x40 cm prizma ve 6 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numune üretilmiştir. Bu şekilde her bir üretim için 105 lt beton üretilmiştir. Beton karıştırıcının kapasitesi bu miktarda betonu bir seferde karıştırmaya elverişli olmadığından her bir karışım 35 litrelik 3

partide gerçekleştirilmiştir. Beton üretimlerinde kullanılan karıştırıcı Şekil 2.17’de verilmektedir. Numune geometrik boyutları şematik olarak Şekil 2.18’de ve her bir seride üretilen numunelere ilişkin görsel ise Şekil 2.19’da verilmektedir.



Şekil 2.17. Beton üretimlerinde kullanılan karıştırıcı



Şekil 2.18. Numunelere ilişkin şematik gösterim



Şekil 2.19. Tek üretimde denenmek üzere hazırlanan KYB numuneler

Şekil 2.19’da görüldüğü gibi hazırlanan beton numuneler kalıpları içinde laboratuvar ortamında 24 saat bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılarak deney gününe kadar Şekil 2.20’de görüleceği üzere  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’de su dolu kür tankında tutulmuştur.



Şekil 2.20. Su dolu kür tankında tutulan numuneler

Üretilen 15 cm küp numuneden 9 tanesi 3'er adet olmak üzere 7, 28 ve 90 günlük kür sonunda basınç dayanımı değerini belirlemek için kullanılmıştır. Dört adet numune 28 ve 90 gün kür sonunda 2'şer adet olmak üzere su işleme derinliği tayini için denenmiştir.

Üretilen 24 adet 10 cm küp numunenin 12 tanesi 28 gün kür sonunda, kalan 12 adedi de 90 gün kür sonunda deneylere tabi tutulmuştur. Bu 12 numuneden 2 tanesi su emme deneyi için kullanılırken, 8 tanesi her bir sıcaklık düzeyi için ikişer adet olmak üzere 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de yüksek sıcaklık etkisine tabi tutulmuştur. İki adet numune de 20°C'de bekletilmiş olup yüksek sıcaklık etkisine tabi tutulmamıştır.

Üretilen 2 adet 7 cm küp numune 28 gün kür sonunda Böhme aşınma deneyi için kullanılmıştır.

Üretilen 6 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğindeki numunelerden 3 tanesi 28 gün kür sonunda diğer 3 adedi ise 90 gün kür sonunda deneylere tabi tutulmuştur. 3 adet numuneden 2 tanesi yarmada çekme dayanımı için kullanılmıştır. Kalan 1 adet numune 5 cm yüksekliğinde 4 eşit dilime ayrılmış ve bu dilimlerden 1 tanesi hızlı klorür geçirimsizlik deneyine tabi tutulurken, 3 tanesi üzerinde kılcallık deneyi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen 4 adet 10x10x40 cm prizma numunelerin iki tanesi 28 gün kür sonunda, kalan iki tanesi 90 gün kür sonunda rezonans frekansı deneyi ile dinamik elastiklik modülü için ve akabinde eğilmede çekme dayanımını belirlemek amacıyla üç nokta eğilme deneyi için kullanılmıştır.

## 2.5. Gerçekleştirilen Deneyler

Üretilen beton karışımları için taze halde ve sertleşmiş halde gerçekleştirilen deneyler aşağıda verilmektedir.

### 2.5.1. Taze Beton Deneyleri

#### 2.5.1.1. Çökme-Yayılma ve T<sub>500</sub> Deneyi

Deney TS EN 12350-8 [196] standardı ve EFNARC [163] yönergesi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Betonun temas edeceği yüzeyler nemlendirildikten sonra taze halde KYB numune alınmış ve metal plaka üzerine yerleştirilen Abram's konisine dökülmüştür. Koninin altından beton sızmasını önlemek için beton koniye dökülürken 9 kg ağırlığında bir metal halka koninin üzerine oturtulmuştur. Koni yukarı doğru çekildiği sırada kronometre çalıştırılarak betonun metal levha üzerinde yayılması sağlanır. Betonun 500 mm çapa ulaşmaya kadar geçen süre belirlenir. Bu süre T<sub>500</sub> olarak bilinir. Daha sonra betonun yayılmasının durması beklenir. Yayılma çapı birbirine dik doğrultuda alınan iki ölçümün ortalaması ( $d = [d_1 + d_2] / 2$ ) şeklinde belirlenir. EFNARC'ta [163] KYB betonu için öngörülen sınır çökme-yayılma değerleri 550-850 mm arasında değişmektedir. Çökme-yayılma deneyine ilişkin görsel Şekil 2.21'de verilmektedir.



Şekil 2.21. T<sub>500</sub> ve çökme-yayılmanın ölçülmesi

### 2.5.1.2. J Halkası Deneyi

Deney TS EN 12350-12 [197] standardı ve EFNARC [162] yönergesi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Deney Bölüm 2.5.1.1’de verilen çökme-yayıma deneyine benzer bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Burada J halkası adı verilen bir aparat metal plakanın ortasına yerleştirilerek deney gerçekleştirilmektedir. J halkası aparatı 18 mm çapında 16 adet düz çelik çubuğun 30 cm çapında bir halka etrafında eşit aralıklarla yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Deneye ait görsel Şekil 2.22’de verilmektedir. Deneyde Abram’s konisi betonla doldurulduktan sonra yukarı çekilerek betonun yayılması sağlanır. J halkası çemberinin hemen içinden ( $h_1$ ) ve hemen dışından ( $h_2$ ) beton yükseklikleri ölçülür. Elde edilen yükseklik farkı ( $h=h_2-h_1$ ) belirlenir. Bu değer EFNARC yönergesinde maksimum 10 mm olarak öngörülmektedir.



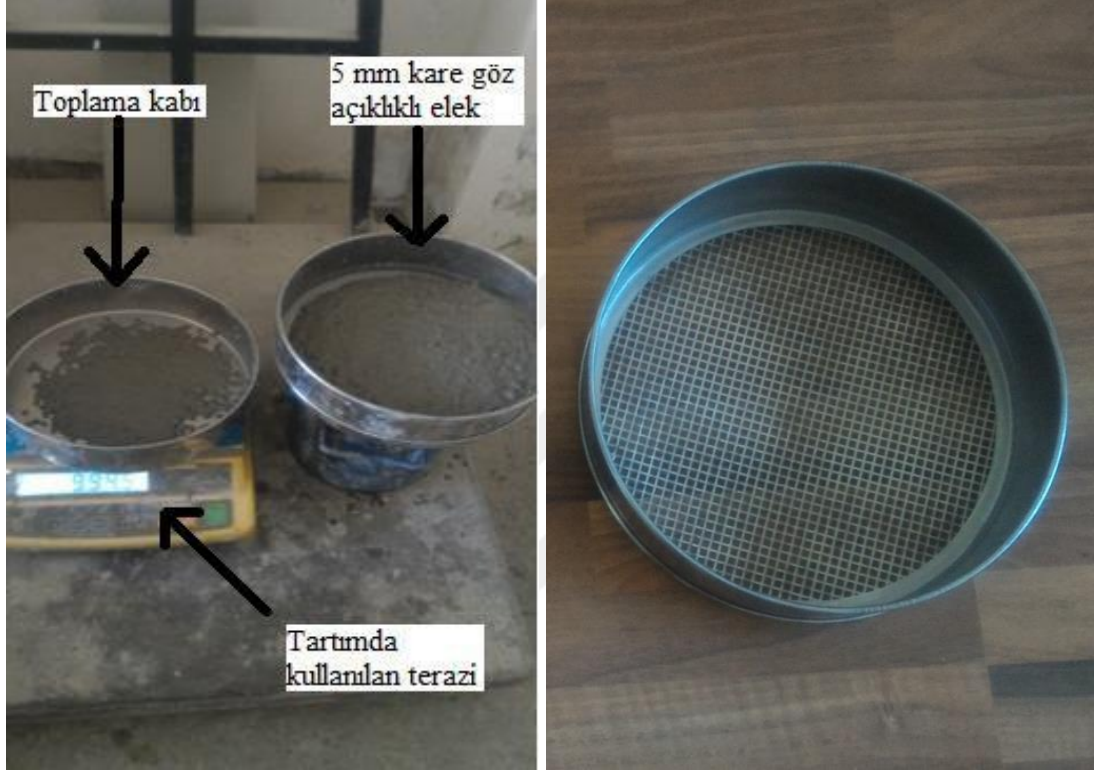
Şekil 2.22. J halkası deneyinin gerçekleştirilmesi

### 2.5.1.3. Elek Ayırışma Deneyi

Deney TS EN 12350-11 [198] standardı ve EFNARC [163] yönergesi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Deneyde karışım işlemi gerçekleştirildikten sonra bir kovaya taze betondan bir miktar (yaklaşık 10 lt) doldurulur ve ağzı kapalı olarak yaklaşık 15 dk. kadar sarsılmadan bekletilir. Daha sonra bu beton en altta bir terazi, üstünde toplama kabı ve onun



üstünde bulunan 5 mm kare göz açıklıklı eleğe 50 cm yüksekten yaklaşık olarak 4.8 kg kadar dökülür. Elekten geçen beton miktarının eleğe dökülen beton miktarına oranı 100 ile çarpılarak ayrışma oranı belirlenir. EFNARC kriterlerine göre ayrışma miktarının %20'den fazla olmaması gerekmektedir. Deneyde kullanılan elek ve deneye ilişkin görsel Şekil 2.23'de verilmektedir.



Şekil 2.23. Elek ayrışma deneyi ve deneyde kullanılan elek

#### 2.5.1.4. Taze Beton Birim Ağırlık Deneyi

Taze betonun birim ağırlığını belirlemede 15 cm küp kalıp kullanılmıştır. 15 cm küp kalıbın darası belirlendikten sonra taze beton ile doldurulup bir kez daha tartılarak aldığı taze beton miktarı belirlenir. Belirlenen taze beton ağırlığı 15 cm küpün hacmine bölünerek taze beton birim ağırlığı belirlenmiş oldu.

## 2.5.2. Sertleşmiş Beton DeneYleri

### 2.5.2.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 [199] standardı uyarınca gerçekleştirilmiş olup dayanımı belirlemek için 15 cm küp numuneler kullanılmıştır. Deney günü küp numuneler kür havuzundan çıkarılıp laboratuvar ortamında yaklaşık 5 saat kadar bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak basınç dayanımları belirlenmiştir. Deneyde Şekil 2.24'de verilen bilgisayar kontrollü 250 ton kapasiteli bir pres kullanılmış ve deney sonunda basınç dayanımı bilgisayar ekranından MPa olarak alınmıştır.



Şekil 2.24. Basınç dayanımı test cihazı

### 2.5.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-6 [200] standardı uyarınca gerçekleştirilmiş olup deneyde 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır. Deney günü numuneler kür havuzundan çıkarılmış ve yaklaşık 5 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Numunenin doğrultmanı boyunca yarılmaya neden olan kuvvet Denklem 2.2 vasıtasıyla yarmada çekme dayanımı belirlenmiştir. Deneye ait görsel Şekil 2.25'te verilmektedir.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.2)$$

Burada;  $\sigma$  yarmada çekme dayanımını (MPa), P numune yarılarına kadar uygulanan maksimum yükü (N), L silindirik numunenin uzunluğunu (mm), D silindirik numunenin çapını (mm) belirtmektedir.



Şekil 2.25. Yarmada çekme dayanımı deneyi

### 2.5.2.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi TS EN 12390-5 [201] standardı uyarınca gerçekleştirilmiş olup deneyde 10×10×40 cm boyutlu kare prizma numuneler kullanılmıştır. Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra yaklaşık 5 saat laboratuvar ortamında bekletilip yüzeylerinin kuruması sağlandıktan sonra önce dinamik elastisite modülünü belirlemek amacıyla rezonans frekans deneyine tabi tutulmuş ardından eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu deney için iki adet 28 gün kür sonunda iki adet 90 gün kür sonunda olmak üzere dört adet prizma numune kullanılmıştır. Deneyde orta noktadan yükleme uygulanarak mesnetler arası mesafe 30 cm olarak sabit tutulmuştur. Deneye ait görsel Şekil 2.26'da verilmektedir. Eğilme dayanımı Denklem 2.3 vasıtasıyla belirlenmiştir.



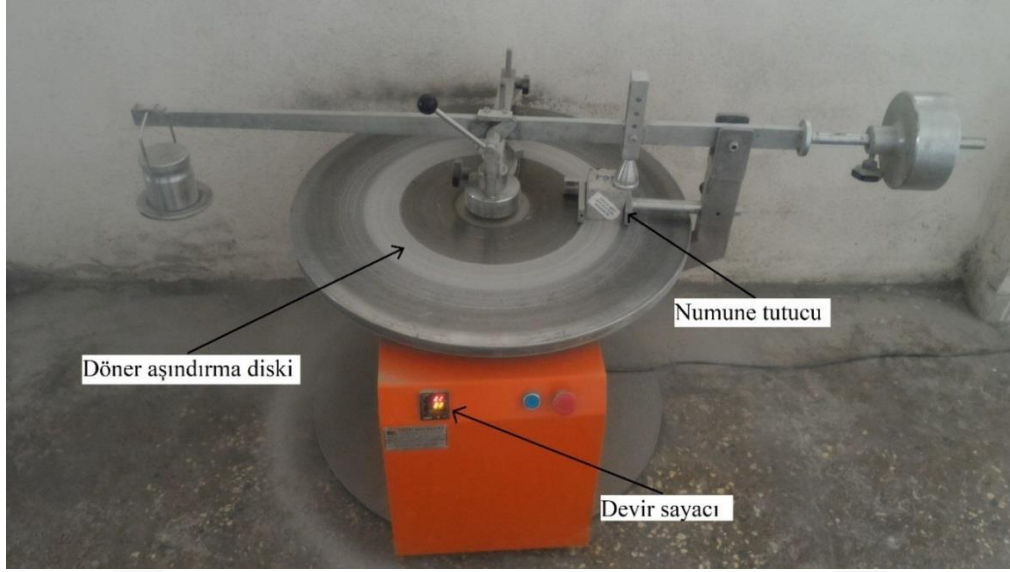
Şekil 2.26. Eğilme deneyi düzeneği

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.3)$$

Burada;  $\sigma$  eğilme dayanımını (MPa), P numunenin kırılmasına neden olan yükü (N), L mesnetler arası mesafeyi (mm), b kirişin genişliğini (mm), d kirişin yüksekliğini (mm) belirtmektedir.

#### 2.5.2.4. Böhme Aşınma Deneyi

Deney DIN 52108 [202] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney sadece 28 gün kür görmüş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup aşınmayı belirlemek için iki adet 7.1 cm boyutlu küp numune kullanılmıştır. Böhme deneyine ilişkin aparat Şekil 2.27’de verilmektedir.



Şekil 2.27. Böhme aşınma deneyi aparatı

28 gün kür havuzunda bekletilen numuneler havuzdan çıkarıldıktan sonra 105°C’de fırında 24 saat boyunca değişmez kütleye gelinceye kadar bekletildikten sonra fırından çıkarılarak laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Deney öncesi ağırlıkları belirlendikten sonra numuneler Şekil 2.27’de verilen deney aparatına yerleştirilirler. Üzerine 294±3 N yük yüklenen numune döner aşındırma diski üzerinde numunenin geçeceği sürtünme şeridine 20±0.5 g zımpara (korundum) tozu serpiştirilir. 22 devir sonrası numunenin aşınma artıkları ve aşınma tozları deney düzeneğinden temizlenerek numune aşınma şeridine aynı yüzeyinden temas edecek şekilde fakat eksenini etrafında 90° döndürülerek yerleştirilmiş ve aynı işlem tekrar edilmiştir. Toplamda 16 kez 22 devirden oluşan aşınma işlemi sonunda numune tozlarından temizlenerek tekrar tartılmıştır. Bu işlemler sonunda numunede meydana gelen hacimsel kayıp Denklem 2.4 vasıtasıyla belirlenmiştir. Deneyde kullanılan aşınma tozu ve aşınma işlemine maruz kalmış numune Şekil 2.28’de verilmektedir.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (2.4)$$

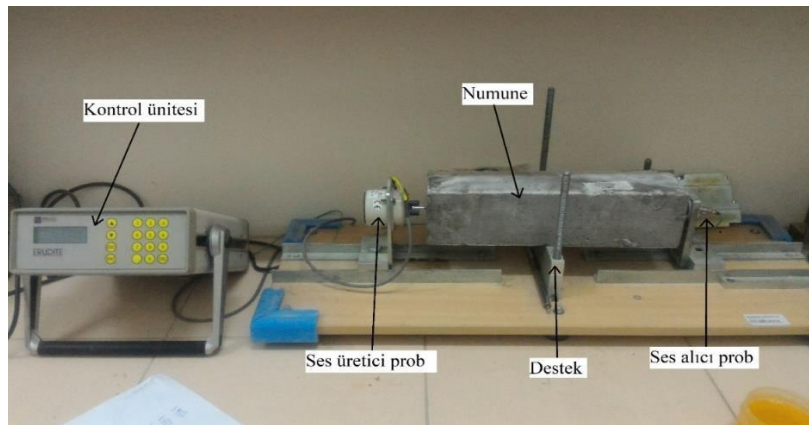
Burada;  $\Delta V$  numunenin  $50 \text{ cm}^2$  aşınma yüzeyinden oluşan hacimsel kaybı ( $\text{cm}^3$ ),  $\Delta m$  numunenin aşınan yüzeyinden ( $50 \text{ cm}^2$ ) aşınma nedeniyle kaybolan kütleyi (gr),  $\rho$  küp numunenin birim hacim ağırlığını ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) göstermektedir.



Şekil 2.28. Zımpara (korundum) tozu ve aşınan deney numunesi

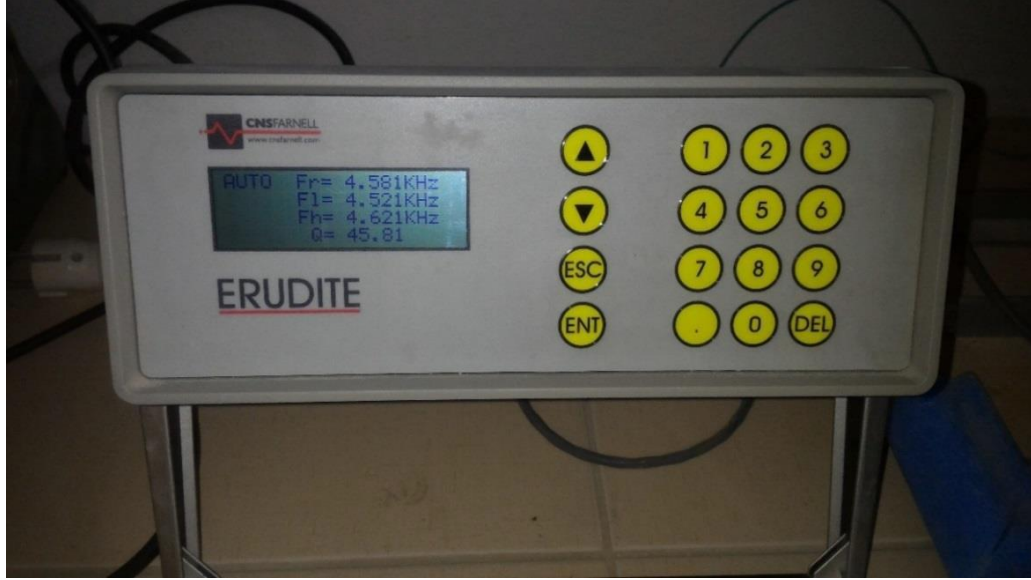
#### 2.5.2.5. Dinamik Elastisite Modülü Tayini Deneyi

Dinamik elastisite modülünü belirlemek amacıyla  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$  boyutlu prizmatik numuneler üzerinde rezonans frekans deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney BS 1881 [203] standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde kür havuzunda 28 ve 90 gün kür gören numuneler havuzdan çıkarılıp, yaklaşık 5 saat süresince laboratuvar ortamında bekletilmiş ve rezonans frekans deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneye ait görsel Şekil 2.29'de verilmektedir.



Şekil 2.29. Rezonans frekans deney düzeneği

Şekil 2.29'dan görüldüğü üzere destek üzerine oturtulan prizmatik numunenin bir ucuna ses üreticisi diğer ucuna ses alıcısı temas ettirilmektedir. Ses üreticisi artan frekanslarda numuneye titreşimler göndermekte ve ses alıcısı titreşen numunenin hangi frekansta rezonansa girdiğini belirlemek amacıyla değişen titreşimleri sürekli kontrol ünitesine göndermektedir. Numune belirli frekanslar arasında tarandıktan sonra numunenin rezonans frekansı belirlenmekte ve kontrol ünitesinin ekranında yansıtılmaktadır. Tüm bu işlemler kontrol ünitesi tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Deney kontrol ünitesi ekranına ilişkin görsel Şekil 2.30'da görülmektedir. Kontrol ünitesi ekranı en üst satırda gözüken değer numuneye ait rezonans frekans değerini kHz cinsinden göstermektedir.



Şekil 2.30. Rezonans frekans deney kontrol ünitesinde ekran görüntüsü

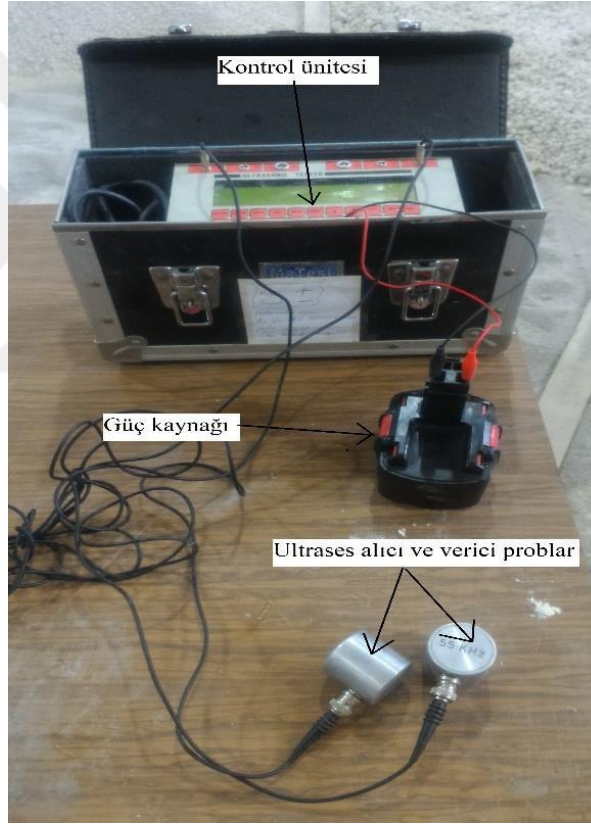
Elde edilen rezonans frekans değeri ile BS 1881: Part 209 standardında tanımlanan Denklem 2.5`de yerine konarak betonun dinamik elastisite modülü belirlenmektedir.

$$E_D = 4\eta^2 L^2 \rho 10^{-15} \quad (2.5)$$

Burada;  $E_D$  betonun dinamik elastisite modülünü ( $\text{GN/m}^2$ ),  $L$  numunenin uzunluğunu (mm),  $\eta$  numuneye ait boyuna rezonans frekans değerini (Hz),  $\rho$  numunenin birim hacim ağırlığını ( $\text{gr/cm}^3$ ) göstermektedir.

### 2.5.2.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyi IS 13311: Part 1 [204] uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deney 28 gün ve 90 gün kür gören betonlar üzerinde 10 cm boyutlu numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kr havuzundan çıkarılan numuneler yaklaşık 5 saat laboratuvar ortamında bekletilip yüzeyleri kuruduktan sonra deney gerçekleştirilmiştir. Ultrases deneyinde kullanılan numuneler akabinde yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. Ultrases deneyinde kullanılan cihaz şekil 2.31’de deneye ilişkin görsel şekil 2.32’de verilmektedir.



şekil 2.31. Ultrases geçiş hızı tayini cihazı





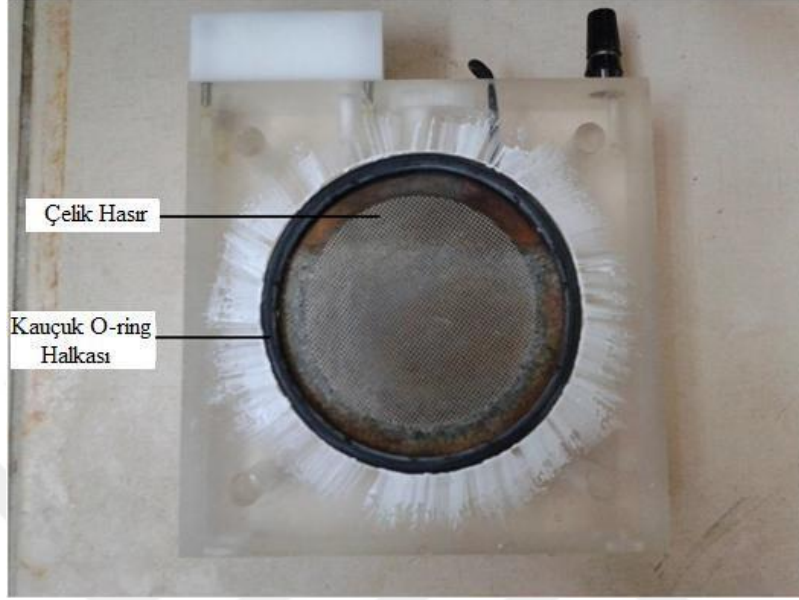
Şekil 2.32. Ultrases geçiş hızı deneyi

Ultrases geçiş hızı tayini deneyinde numunenin bir ucuna ses verici ünite diğer yüzeyine de ses alıcı ünite yerleştirilmiştir. Teması arttırmak için ses verici ve ses alıcı ünitelerin oturtulduğu numune yüzeylerine jel sürülerek deney gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde numune boyunca sesin geçiş süresi ölçülerek ultrases geçiş hızı hesaplanmıştır. Deneyde 55 kHz frekansa sahip ses alıcı ve verici kullanılmıştır.

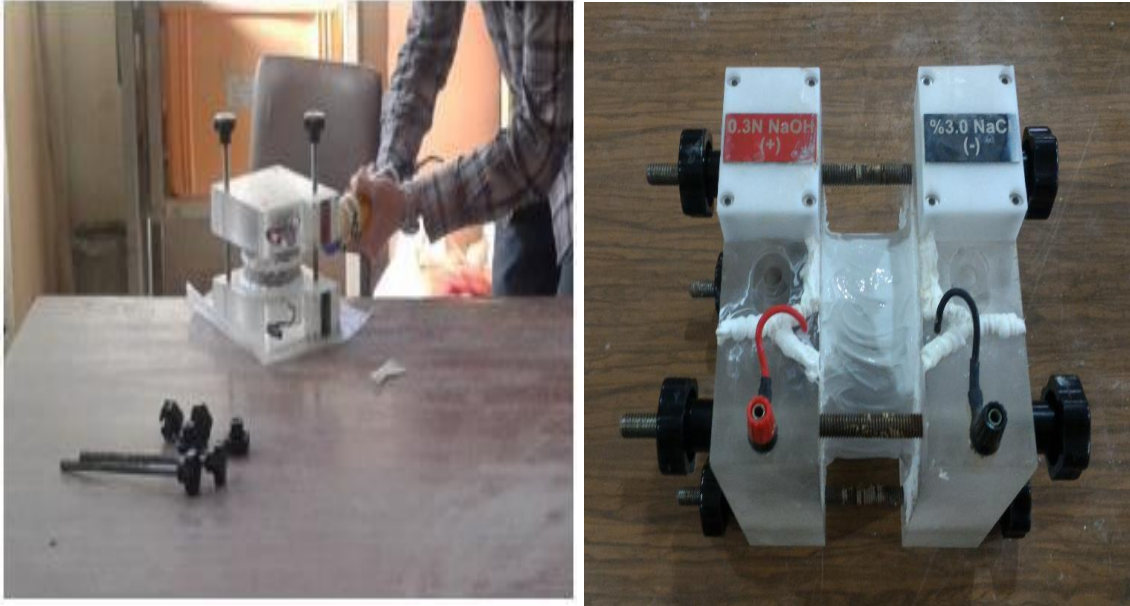
#### **2.5.2.7. Hızlı Klorür Geçirimsizlik Deneyi**

Betonların klorür geçirimsizliğini tayin etmede ASTM C 1202 [205] standardınca benimsenen yöntem kullanılmıştır. Hızlı klorür geçirimsizlik deneyi için 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik beton numuneler kullanılmıştır. Numune deney günü kür havuzundan çıkarılmış 5 cm yüksekliğinde 4 eşit parçaya bölünmüştür. Bu şekilde 4 adet numuneden üç tanesi kılcallık deneyi için 1 adedi de hızlı klorür geçirimsizlik deneyi için kullanılmıştır. Suya doygun haldeki numunenin dış yüzeyi bir bez yardımıyla kurulandıktan sonra numune deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Numune yüzeyini kurulamanın nedeni silikonun kuru beton yüzeyinde daha iyi yapışmasını sağlamaktır. Silikonun beton numune yüzeyine daha iyi yapışmasıyla sulu çözeltinin dış yüzeylerden sızması önlenmektedir.

Numunenin yerleştirildiği hücre ile çözeltilerin konulduğu üniteler Şekil 2.33’de ve deneye hazır hale getirilmesine ait görsel Şekil 2.34’de verilmektedir.



Şekil 2.33. Deney düzeneğine ait hücrelerin iç kısmının görünümü



Şekil 2.34. Hızlı klorür geçirirlik deneyi hazırlama aşaması

Silindirik numunenin kesilen yüzeyleri sızdırmaz lastik bir conta yardımıyla hücrelere temas edecek şekilde yerleştirildikten sonra numunenin hücrelere temas etmeyen kavisli



Coulomb (C) hızlı klorür geçirimsizliğini vermektedir. Yarım saatte bir ölçülen akıma göre geçen yük hesabı Denklem 2.6 vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

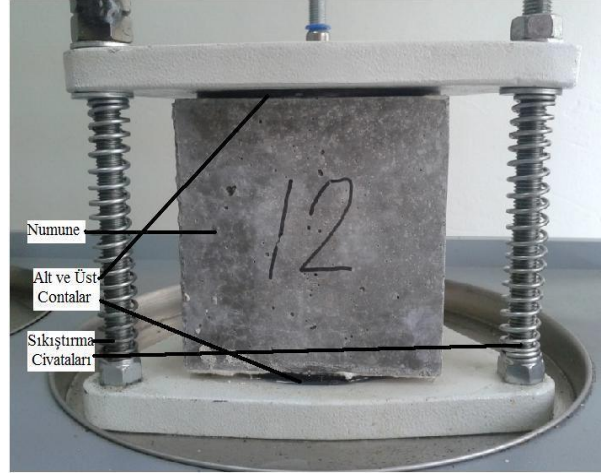
$$Q = 15*(I_0 + 2*I_{30} + 2*I_{60} + \dots + 2*I_{300} + 2*I_{330} + I_{360}) \quad (2.6)$$

Burada; Q altı saat sonunda devreden geçen yükü (C),  $I_x$  x. dakikada devreden geçen akımı (A) belirtmektedir.

### 2.5.2.8. Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği Deneyi

Basınç altında maksimum su işleme derinliği tayini deneyi TS EN 12390-8 [206] standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde 28 ve 90 gün kür gören ikişer adet 15 cm küp numune kullanılmıştır.

Deney günü numuneler kür havuzundan çıkarılarak laboratuvar ortamında 2 gün kuruması beklendikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Numuneler laboratuvar ortamında iki günden daha kısa süre bekletilmesi durumunda numuneler halen ıslak olduğu için deney sonunda maksimum su işleme derinliği tespit edilememektedir. Kuruması sağlanan numunelerin basınçlı su tatbik edilecek yüzeyi tel fırça ile aşındırılmıştır. Bu aşındırma işlemi numune kalıplanırken betonun kalıba temas eden yüzeylerinde yoğun çimento hamuru birikmesinden dolayı yapılmaktadır. Basınçlı su tatbik edilecek yüzey cihazda aşağı gelecek şekilde deney cihazına yerleştirilen numuneler üstten ve alttan su geçirmez contalar yerleştirilerek sıkıştırıldı. Merkezi olarak yerleştirilen su geçirmez contanın çapı 10 cm olup basınçlı su numuneye bu contadan tatbik edilmektedir. Deneye ilişkin görsel Şekil 2.36'da verilmektedir. Numune cihaza yerleştirildikten sonra cihazın tüpleri su ile doldurulup suyun bu numunenin alt kısmına temas etmesi sağlandı. Sisteme su verildikten sonra kompresör çalıştırılarak 5 bar basınca sahip havanın suya iletilmesi ile deney başlatılmış oldu. Numunenin alt yüzeyi 72 saat boyunca 5 bar basınca sahip suya maruz bırakıldı. Bu süre zarfında çeşitli nedenlerden kaynaklı oluşması muhtemel basınç kayıplarında basıncın belirli bir seviyenin altına düşmesi durumunda kompresör otomatik olarak devreye girerek tekrar 5 bar basınç düzeyini sağlamaktadır.



Şekil 2.36. Basınçlı su işleme derinliği hücresi

5 bar su basıncına 72 saat boyunca maruz kalan numune cihazdan çıkarılarak suya maruz kalmış yüzeye dik olacak şekilde numune ortadan ikiye ayrılmıştır. Yarılmış numune yüzeyinde su seviyesine ait profil çıkarıldı. Numunenin yarılmasına ilişkin görsel Şekil 2.37’de ve su işleme derinliğinin belirlenmesine ilişkin görsel Şekil 2.38’de verilmektedir. Su işleme derinliği düzeyi Şekil 2.38’deki gibi kalemle işaretlendikten sonra çizimler asetat kağıdına aktarılarak kaydedilmiştir. Yüzeyden itibaren ölçülen maksimum su işleme düzeyi maksimum su işleme derinliği (MSİD) değerini vermektedir.



Şekil 2.37. Su işleme derinliği deneyi sonrası numunenin yarılmış hali



Şekil 2.38. Yarma işlemi sonrası su işleme seviyesinin belirlenmesi

Su işleme derinliği düzeneğine ait görsel Şekil 2.39’da verilmektedir. Görüldüğü üzere aynı anda sistemde 6 adet numune test edilebilmektedir. Ancak deneysel çalışmam boyunca aynı anda yalnızca 4 adet numune teste tabi tutulabilmiştir. Deneyde her bir seri için aynı anda iki adet numune denenmiş olup bunlardan hangisinde en yüksek su işleme derinliği gözlemlenmişse o numuneye ait sonuç MSİD değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.39. Basınçlı su işleme derinliği tayini deneyi cihazı

### 2.5.2.9. Kılcallık Deneyi

Kılcallık katsayısı 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune deney günü 5 cm yüksekliğinde 4 eşit parçaya bölünmüş ve üç

tanesi bu deney için kullanılmıştır. Deney 28 ve 90 günlük standart kür gören numuneler için gerçekleştirilmiştir.

Deneyi gerçeklemede deney günü numune kür havuzundan çıkarılıp kesildikten sonra 70°C'ye ayarlanmış etüve konmuş ve iki gün süreyle etüvde değişmez ağırlığa gelmesi beklenmiştir. Deneyde kullanılan hava dolaşımli etüv Şekil 2.40'da verilmektedir.



Şekil 2.40. Kılcallık deneyi numuneler kurutmak için kullanılan etüv

Etüvden çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numunelerin suya temas eden yüzeyinin yan kısımları temas yüzeyinden itibaren su geçirmez bantla sıkıca sarılarak numunenin yan yüzeylerden su emmesi engellenmiştir. Numuneler daha önce su doldurulmuş büyük bir leğenin içinde yerleştirilen metal desteklere Şekil 2.41'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 2.41. Kılcallık deney düzeneği

Numuneler metal desteklere yerleştirildiğinde su emecek yüzeyleri yaklaşık 2 mm suyun içinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney öncesi numunelerin ağırlığı (0 dk) ve su ile temas ettirildikten sonra 5, 10, 20, 30, 45, 60 ve 1440 dakika sonunda 0.1 g hassasiyetle belirlenen ağırlıklar kaydedilmiştir. Numunelerin bu süreler sonunda emdiği su miktarı belirlenerek ASTM C 1585 [207] standardı uyarınca kılcallık katsayıları  $\text{mm/s}^{0.5}$  cinsinden hesaplanmıştır. Tartımda kullanılan 0.1 g hassasiyete sahip hassas terazi Şekil 2.42’de verilmektedir.



Şekil 2.42. 0.1 g hassasiyetli terazi



Numunenin zamana bağılı emdiği su miktarı dikkate alınarak betonun kılcallık katsayısı Denklem 2.7 vasıtasıyla bulunmuştur.

$$q = \frac{Q}{A} = k \times \sqrt{t} \quad (2.7)$$

Burada; k kılcallık katsayısını t numunenin suya temas ettirildikten sonra geçen süreyi (s), Q t zamanında emilen su miktarını (g), A numunenin suya temas eden yüzey alanını (mm<sup>2</sup>) göstermektedir.

Kılcal geçirimlilik katsayısı lineer regresyon yapılarak belirlenmiştir.

#### 2.5.2.10. Sertleşmiş Beton Doymun Birim Ağırlık Deneyi

28 ve 90 gün kür sonunda kür havuzundan çıkarılan numunelerin yüzeyleri kurularak havada ve su içinde asılı tartımları yapılarak sertleşmiş betonların birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Sertleşmiş beton doymun birim ağırlıkların hesaplanmasında Denklem 2.8 kullanılmıştır. Beton numunelerin birim hacim ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan Arşimet terazi Şekil 2.43'de verilmektedir.

$$\gamma = \frac{m_{\text{Havada}}}{m_{\text{Havada}} - m_{\text{Suda}}} \quad (2.8)$$

Burada;  $\gamma$  sertleşmiş beton doymun birim hacim ağırlığı (g/cm<sup>3</sup>),  $m_{\text{Havada}}$  numunenin havada ağırlığını (g),  $m_{\text{Suda}}$  numunenin su içinde asılı ağırlığını (g) belirtmektedir.

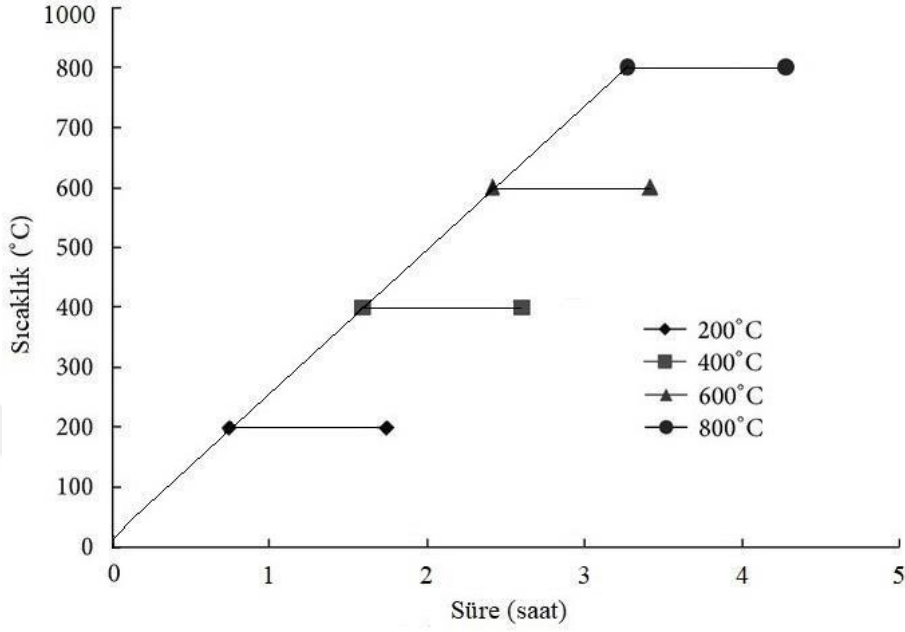


Şekil 2.43. Birim ağırlığı belirlemede kullanılan Arşimet terazisi

### 2.5.3. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Üretilen KYB'lerde yüksek sıcaklık etkisini belirlemek amacıyla 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler üzerinde yüksek sıcaklık uygulanması öncesinde ve sonrasında ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel gerçekleştirilmede 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C yüksek sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Kontrol amaçlı ayrıca 20°C'de de numuneler denemiştir. Bu şekilde her bir sıcaklıkta ikişer numune olmak üzere toplamda 10 adet numune kullanılmıştır. 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklık seviyelerine ulaşmak için 4°C/dak sabit ısıtma hızı uygulanmıştır. Belirtilen sıcaklıklara ulaşıldığında numuneler bir saat boyunca ilgili sıcaklıkta tutulmuş ve sonrasında fırının kapağı açılarak sıcaklığın oda sıcaklığına düşünceye kadar numunelerin soğuması sağlanmıştır. Uygulanan sıcaklık rejimi şematik olarak Şekil 2.44'de verilmektedir. Gerçekleştirilmiş bazı çalışmalarda hedeflenen sıcaklığa ulaşıldığında beton numuneler bir

saat boyunca bu sıcaklıkta tutulduğu belirtilmektedir [208, 209]. Bu çalışmada da beton numuneler hedeflenen sıcaklığa ulaştıktan sonra bir saat kadar bu sıcaklıkta tutulmuştur.



Şekil 2.44. Uygulanan sıcaklık rejiminin şematik gösterimi

Yüksek sıcaklık etkisini belirlemek için kullanılan yüksek sıcaklık fırını Şekil 2.45'de verilmektedir. Numunelerin aynı sıcaklık etkisine maruz kalmasını sağlamak için numuneler fırının rezistanslarına eşit mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 2.46'da soldan sağa doğru sırayla OS, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz kalan beton numuneler verilmektedir. İlgili şekilde basınç dayanımı deneyi öncesine ilişkin foto üstte, basınç dayanımı sonrası foto altta sunulmaktadır. OS oda sıcaklığını belirtmektedir.



Şekil 2.45. Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 2.46. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler (soldan sağa sıcaklık artmakta)

### 3. BULGULAR

Üretilen betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneylere ilişkin sonuçlar çizelgeler halinde bu bölümde aktarılmıştır. Tablolarda verilen UK uçucu külü, MK metakaolini, SD silis dumanını simgelemektedir. Örnek bir kodlama 20UK 10MK 0SD şeklinde olabilir. Bu kodlama KYB’de kullanılan toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %20’si uçucu külden (UK), %10’u metakaolinden (MK) ve geri kalan %70’i ise çimentodan oluştuğunu ifade etmektedir. Tablolarda MKİ kısaltması mineral katkı ikamesi anlamındadır.

#### 3.1. Taze Beton Üzerinde Elde Edilen Deney Sonuçları

Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de EFNARC [162,163] tarafından belirtilen sınır değerler verilmektedir. Araştırma kapsamında üretilen betonların tümü için taze halde iken çökme-yayılma,  $T_{500}$ , J halkası, elek-ayırışma, taze beton birim ağırlık (TBBA) ve sertleşmiş beton birim ağırlık (SBBA) değerleri ölçülmüştür. Tüm üretimlerde EFNARC kriterlerinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi gerektiği miktarlarda kullanılmıştır. Ölçülen taze beton özellikleri ve SBBA değerleri Tablo 3.4’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Çökme-yayılmaya göre KYB’lerin sınıflandırılması

Sınıf	Çökme – Yayılma Çapı (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

Tablo 3.2. Viskoziteye göre KYB’lerin sınıflandırılması

Sınıf	$T_{500}$ (s)
VS1	$\leq 2$
VS2	$> 2$

Tablo 3.3. Elek ayrışma direncine göre KYB'lerin sınıflandırması

Sınıf	Elek ayrışma direnci
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

Tablo 3.4. KYB'lere ait taze beton özellikleri, birim ağırlıklar ve kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı oranları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Çökme-yayılma (mm)	T <sub>500</sub> (s)	J Halkası (mm)	Elek ayrışma (%)	TBBA (g/cm <sup>3</sup> )	SBBA (g/cm <sup>3</sup> )	SA* (%)
1	30UK 0MK 0SD	0	660	2.74	8	2	2.29	2.32	1.38
2		35 İri	670	2.14	8	2	2.30	2.27	1.39
3		70 İri	660	2.25	9	1	2.23	2.27	1.39
4		100 İri	660	2.03	7	3	2.21	2.23	1.39
5		35 İnce	730	2.1	9	12	2.29	2.32	1.45
6		70 İnce	710	2.02	8	14	2.24	2.23	1.48
7		100 İnce	715	2.14	8	14	2.19	2.19	1.56
8	20UK 10MK 0SD	0	670	2.22	9	1	2.26	2.31	1.44
9		35 İri	710	2.08	5	4	2.27	2.28	1.42
10		70 İri	680	2.12	9	3	2.25	2.27	1.44
11		100 İri	705	2.15	7	6	2.24	2.26	1.48
12		35 İnce	680	2.25	8	7	2.27	2.28	1.56
13		70 İnce	660	2.18	9	7	2.23	2.23	1.54
14		100 İnce	670	2.04	9	7	2.19	2.20	1.58
15	20UK 0MK 10SD	0	650	2.24	8	1	2.29	2.29	1.98
16		35 İri	650	3.85	5	3	2.28	2.27	2.02
17		70 İri	690	2.58	4	2	2.25	2.27	2.06
18		100 İri	700	2.34	6	2	2.24	2.24	2.08
19		35 İnce	690	2.28	8	8	2.25	2.27	2.08
20		70 İnce	695	2.43	9	2	2.21	2.23	2.09
21		100 İnce	710	2.1	8	2	2.19	2.20	2.15
22	20UK 5MK 5SD	0	728	2.24	9	7	2.29	2.30	1.63
23		35 İri	655	3.08	8	7	2.26	2.27	1.67
24		70 İri	725	2.02	6	7	2.25	2.26	1.68
25		100 İri	675	2.28	7	7	2.22	2.24	1.71
26		35 İnce	670	2.4	9	2	2.23	2.26	1.74
27		70 İnce	670	2.4	8	3	2.20	2.24	1.76
28		100 İnce	690	2.2	8	4	2.19	2.21	1.79

\* Süperakışkanlaştırıcı % miktarı (süperakışkanlaştırıcı/bağlayıcı miktarı) x 100 şeklinde hesaplanmıştır.

### 3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

#### 3.2.1. Basınç Dayanımı Ölçümleri

KYB'lere ilişkin ölçülen basınç dayanımı değerleri Tablo 3.5'de verilmektedir.

Tablo 3.5. KYB'lere ilişkin basınç dayanımı değerleri

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Basınç dayanımı (MPa)		
			7 gün	28 gün	90 gün
1	30UK 0MK 0SD	0	42.68	55.92	69.29
2		35 İri	40.03	54.48	68.39
3		70 İri	39.51	50.58	62.00
4		100 İri	34.91	47.76	55.87
5		35 İnce	43.54	58.77	67.35
6		70 İnce	41.25	55.54	59.47
7		100 İnce	35.81	51.71	54.41
8	20UK 10MK 0SD	0	49.19	58.24	70.07
9		35 İri	47.91	56.69	68.76
10		70 İri	43.79	54.47	65.52
11		100 İri	39.33	50.61	59.79
12		35 İnce	49.76	58.31	61.35
13		70 İnce	46.17	57.19	61.82
14	100 İnce	42.94	56.47	59.76	
15	20UK 0MK 10SD	0	43.22	60.46	71.35
16		35 İri	41.10	60.65	70.41
17		70 İri	40.69	60.81	66.62
18		100 İri	38.01	55.37	66.04
19		35 İnce	42.60	63.47	66.36
20		70 İnce	38.17	59.88	61.89
21	100 İnce	38.85	60.26	67.51	
22	20UK 5MK 5SD	0	44.65	64.20	67.44
23		35 İri	40.66	61.96	68.74
24		70 İri	35.27	61.12	64.73
25		100 İri	31.73	56.00	62.06
26		35 İnce	46.56	64.04	66.47
27		70 İnce	39.64	63.04	63.56
28	100 İnce	39.47	62.09	62.72	

### 3.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Ölçümleri

KYB'ler üzerinde ölçülen yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.6. KYB'lerin yarmada çekme ve eğilme dayanımları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Yarmada çekme dayanımı (MPa)		Eğilme dayanımı (MPa)	
			28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
1	30UK 0MK 0SD	0	4.56	5.42	6.11	6.18
2		35İri	4.17	4.79	5.92	6.09
3		70İri	3.33	4.47	4.59	5.66
4		100İri	3.35	4.06	4.47	5.32
5		35İnce	4.87	5.52	5.10	5.52
6		70İnce	4.44	4.62	5.00	5.11
7		100İnce	4.25	4.36	4.52	4.84
8	20UK 10MK 0SD	0	4.80	5.43	6.53	6.94
9		35İri	4.26	4.73	5.44	6.67
10		70İri	4.70	4.74	5.44	6.20
11		100İri	4.42	4.49	5.20	5.69
12		35İnce	4.82	5.67	5.42	6.61
13		70İnce	4.50	5.43	5.02	6.59
14		100İnce	4.20	4.90	4.94	5.82
15	20UK 0MK 10SD	0	5.04	5.70	6.19	6.26
16		35İri	4.38	5.52	5.39	5.75
17		70İri	4.31	4.82	4.78	5.41
18		100İri	4.14	4.58	4.85	5.72
19		35İnce	4.97	6.08	5.75	6.06
20		70İnce	4.54	4.70	5.46	6.44
21		100İnce	4.23	4.33	5.44	5.90
22	20UK 5MK 5SD	0	5.38	5.49	6.78	6.80
23		35İri	5.04	5.24	5.97	6.16
24		70İri	4.55	4.65	4.93	5.80
25		100İri	4.30	4.46	4.85	5.72
26		35İnce	5.54	5.57	5.86	6.01
27		70İnce	5.24	5.28	5.86	5.94
28		100İnce	4.44	4.77	5.69	5.94



### 3.2.3. Böhme Aşınma Ölçümleri

KYB'ler üzerinde 28 gün kür sonunda belirlenen Böhme aşınma ölçümleri Tablo 3.7'de verilmektedir.

Tablo 3.7. KYB'lere ait Böhme aşınma ölçümleri

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Böhme Aşınma-hacimsel kayıp (cm <sup>3</sup> )
1	30UK 0MK 0SD	0	9.97
2		35 İri	12.09
3		70 İri	12.62
4		100 İri	13.13
5		35 İnce	10.83
6		70 İnce	11.23
7		100 İnce	11.92
8	20UK 10MK 0SD	0	9.93
9		35 İri	12.06
10		70 İri	11.92
11		100 İri	12.75
12		35 İnce	12.13
13		70 İnce	12.50
14	100 İnce	12.62	
15	20UK 0MK 10SD	0	9.73
16		35 İri	11.25
17		70 İri	11.97
18		100 İri	12.38
19		35 İnce	10.38
20		70 İnce	11.51
21	100 İnce	11.58	
22	20UK 5MK 5SD	0	10.65
23		35 İri	11.42
24		70 İri	13.50
25		100 İri	13.27
26		35 İnce	10.77
27		70 İnce	11.56
28	100 İnce	13.02	

### 3.2.4. Rezonans Frekans ve Dinamik Elastisite Modülü Ölçümleri

Beton karışımları üzerinde 28 gün ve 90 gün kür sonunda ölçülen rezonans frekans ve dinamik elastisite modüllerine ilişkin ölçümler Tablo 3.8’de verilmektedir.

Tablo 3.8. KYB’lere ait rezonans frekansları ve dinamik elastisite modülleri

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Rezonans frekans değerleri (Hz)		Dinamik elastisite modülü (MPa)	
			28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
1	30UK 0MK 0SD	0	4889	4901	35477	36636
2		35 İri	4841	4841	34029	34537
3		70 İri	4659	4742	31512	33286
4		100 İri	4505	4528	28987	29631
5		35 İnce	4813	4834	34344	33977
6		70 İnce	4679	4785	32701	32648
7		100 İnce	4696	4911	30274	34409
8	20UK 10MK 0SD	0	4770	4861	33643	34923
9		35 İri	4792	4897	33516	35010
10		70 İri	4719	4814	32412	33829
11		100 İri	4618	4693	30865	31883
12		35 İnce	4792	4909	33498	35198
13		70 İnce	4704	4886	31560	34601
14		100 İnce	4607	4710	29926	31625
15	20UK 0MK 10SD	0	4806	4878	33857	34749
16		35 İri	4764	4844	32995	33995
17		70 İri	4754	4834	32765	33687
18		100 İri	4611	4768	30424	32442
19		35 İnce	4780	4872	33190	34419
20		70 İnce	4708	4761	31576	32389
21		100 İnce	4669	4730	30627	31938
22	20UK 5MK 5SD	0	4861	4974	34740	36584
23		35 İri	4751	4946	32804	35872
24		70 İri	4690	4870	31792	34294
25		100 İri	4583	4760	30172	32762
26		35 İnce	4712	4769	32160	33067
27		70 İnce	4743	4809	32281	32991
28		100 İnce	4702	4753	31242	32189

### 3.2.5. Hızlı Klorür Geçirirnililiği Ölçümleri

Ölçülen hızlı klorür geçirirnililiği değerlerine göre ASTM C 1202 standardınca betonlar için öngörülen geçirirnililik sınıflaması Tablo 3.9'da verilmektedir.

Tablo 3.9. ASTM C 1202 standardına göre betonların geçirirnililik sınıfları

Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirirnililik Sınıfı
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

KYB'ler üzerinde 28 gün ve 90 gün kür sonunda ölçülen hızlı klorür geçirirnililik değerleri ve betonlara ilişkin geçirirnililik sınıfları Tablo 3.10'da verilmektedir.

Tablo 3.10. Hızlı klorür geçirirliliği ölçümleri

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	28 Gün		90 Gün	
			Geçen yük (C)	Geçirgenlik sınıfı	Geçen yük (C)	Geçirgenlik sınıfı
1	30UK 0MK 0SD	0	1416	Düşük	678	Çok düşük
2		35 İri	1675	Düşük	981	Çok düşük
3		70 İri	2055	Orta	1003	Düşük
4		100 İri	2725	Orta	981	Çok düşük
5		35 İnce	1551	Düşük	666	Çok düşük
6		70 İnce	2096	Orta	792	Çok düşük
7		100 İnce	1740	Düşük	1080	Düşük
8	20UK 10MK 0SD	0	1950	Düşük	829	Çok düşük
9		35 İri	2136	Orta	678	Çok düşük
10		70 İri	2311	Orta	890	Çok düşük
11		100 İri	3378	Orta	1255	Düşük
12		35 İnce	2066	Orta	998	Çok düşük
13		70 İnce	2481	Orta	1031	Düşük
14		100 İnce	2479	Orta	1159	Düşük
15	20UK 0MK 10SD	0	795	Çok düşük	373	Çok düşük
16		35 İri	1038	Düşük	420	Çok düşük
17		70 İri	1177	Düşük	444	Çok düşük
18		100 İri	1416	Düşük	468	Çok düşük
19		35 İnce	923	Çok düşük	619	Çok düşük
20		70 İnce	1043	Düşük	745	Çok düşük
21		100 İnce	1119	Düşük	679	Çok düşük
22	20UK 5MK 5SD	0	1627	Düşük	619	Çok düşük
23		35 İri	2075	Orta	666	Çok düşük
24		70 İri	2750	Orta	756	Çok düşük
25		100 İri	2797	Orta	838	Çok düşük
26		35 İnce	1641	Düşük	847	Çok düşük
27		70 İnce	1715	Düşük	1063	Düşük
28		100 İnce	1816	Düşük	864	Çok düşük

### 3.2.6. Kılcallık Ölçümleri

28 gün ve 90 gün kür sonunda ölçülen kılcallık katsayıları Tablo 3.11’de verilmektedir.

Tablo 3.11. KYB'lere ilişkin ölçülen kılcallık katsayıları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	28 gün sonunda (mm/s <sup>0.5</sup> )*10 <sup>-3</sup>	90 gün sonunda (mm/s <sup>0.5</sup> )*10 <sup>-3</sup>
1	30UK 0MK 0SD	0	6.68	6.58
2		35 İri	7.73	7.22
3		70 İri	9.03	8.20
4		100 İri	10.40	8.36
5		35 İnce	6.57	6.23
6		70 İnce	8.77	8.23
7		100 İnce	10.07	8.82
8	20UK 10MK 0SD	0	6.54	6.43
9		35 İri	7.15	7.09
10		70 İri	7.90	8.17
11		100 İri	8.32	8.02
12		35 İnce	7.46	6.43
13		70 İnce	8.17	7.05
14		100 İnce	9.60	8.47
15	20UK 0MK 10SD	0	5.05	4.51
16		35 İri	5.74	5.56
17		70 İri	5.68	5.78
18		100 İri	6.03	5.88
19		35 İnce	6.09	5.27
20		70 İnce	6.22	5.75
21		100 İnce	7.66	7.06
22	20UK 5MK 5SD	0	5.85	5.76
23		35 İri	6.57	6.21
24		70 İri	6.94	6.75
25		100 İri	7.46	6.35
26		35 İnce	6.43	5.90
27		70 İnce	6.95	6.00
28		100 İnce	7.67	6.93

### 3.2.7. Su Emme Ölçümleri

28 gün ve 90 gün kür sonunda ölçülen su emme değerleri Tablo 3.12'de verilmektedir.

Tablo 3.12. KYB'lere ilişkin ölçülen su emme değerleri

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	28 gün sonunda (%)	90 gün sonunda (%)
1	30UK 0MK 0SD	0	2.54	2.24
2		35 İri	3.37	2.52
3		70 İri	2.93	2.23
4		100 İri	4.01	3.34
5		35 İnce	2.96	3.38
6		70 İnce	3.52	3.72
7		100 İnce	5.37	3.84
8	20UK 10MK 0SD	0	3.12	2.94
9		35 İri	3.32	3.20
10		70 İri	3.99	3.79
11		100 İri	4.06	3.84
12		35 İnce	4.37	3.40
13		70 İnce	4.38	3.54
14		100 İnce	5.80	4.00
15	20UK 0MK 10SD	0	2.97	2.72
16		35 İri	3.18	2.86
17		70 İri	3.28	3.01
18		100 İri	3.67	3.28
19		35 İnce	3.10	3.10
20		70 İnce	3.69	3.45
21		100 İnce	4.48	3.95
22	20UK 5MK 5SD	0	3.12	2.44
23		35 İri	3.27	2.64
24		70 İri	3.57	3.03
25		100 İri	3.65	2.59
26		35 İnce	3.08	2.85
27		70 İnce	3.77	3.24
28		100 İnce	4.64	4.19

### 3.2.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Ölçümleri

Maksimum su işleme derinliği (MSİD)'ne göre TS EN 13515 standardı uyarınca yapılan sınıflama Tablo 3.13'da verilmektedir.

Tablo 3.13. Betonda su işleme derinliğine göre betonun geçirimsizlik sınıflaması

Maksimum Su İşleme Derinliği (mm)	Betonun Geçirimsizlik Sınıfı
>50	Geçirimsiz Beton
<50	Geçirimsiz Beton
<30	Zararlı Ortamlara Karşı Geçirimsiz Beton

Üretilen her KYB serisi için dijital ortamda su işleme derinliği profilleri temsili olarak çıkarıldıktan sonra belirlenen MSİD ve ortalama su işleme derinlikleri (OSİD) Tablo 3.14’de verilmektedir. Tablo 3.13’deki değerlendirmeye göre üretilen tüm KYB’ler hem 28 hem 90 gün kür sonunda zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfında yer almaktadır.

Tablo 3.14. Basınçlı su geçirimsizlik deneyine ilişkin ölçümler

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	28 gün sonunda		90 gün sonunda	
			MSİD (mm)	OSİD (mm)	MSİD (mm)	OSİD (mm)
1	30UK 0MK 0SD	0	15	7	13	10
2		35 İri	19	15	12	8
3		70 İri	21	15	15	10
4		100 İri	25	12	14	11
5		35 İnce	13	8	12	6
6		70 İnce	17	13	13	8
7		100 İnce	18	12	19	9
8	20UK 10MK 0SD	0	14	6	10	7
9		35 İri	16	11	10	6
10		70 İri	17	10	8	5
11		100 İri	29	13	14	7
12		35 İnce	19	11	13	6
13		70 İnce	22	17	13	5
14	20UK 0MK 10SD	100 İnce	15	9	18	9
15		0	11	6	9	6
16		35 İri	10	6	14	7
17		70 İri	14	7	15	10
18		100 İri	21	12	17	10
19	20UK 5MK 5SD	35 İnce	10	7	11	8
20		70 İnce	17	9	28	8
21		100 İnce	12	9	15	10
22		0	15	9	13	7
23	20UK 5MK 5SD	35 İri	21	13	16	7
24		70 İri	18	8	12	8
25		100 İri	28	11	21	9
26		35 İnce	19	7	14	8
27		70 İnce	21	9	24	12
28		100 İnce	19	7	19	10

### 3.2.9. Yüksek Sıcaklığa Maruz Betonlara Ait Basınç Dayanımı Ölçümleri

Farklı yüksek sıcaklık koşulları için 10 cm küp numuneler üzerinde 28 gün kür sonrası ölçülen basınç dayanımları Tablo 3.15’de, 90 gün kür sonrası ölçülen basınç dayanımları ise Tablo 3.16’de verilmektedir.

Tablo 3.15. 28 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası basınç dayanımları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Sıcaklığa bağlı olarak ölçülen basınç dayanımları (MPa)				
			Oda Sıcaklığı	200°C	400°C	600°C	800°C
1	30UK 0MK 0SD	0	65.2	72.1	64.5	43.2	18.2
2		35 İri	63.1	70.3	64.9	40.0	17.9
3		70 İri	57.3	64.7	58.3	35.9	15.8
4		100 İri	54.1	56.2	48.9	30.0	12.3
5		35 İnce	67.1	69.0	68.8	48.4	19.0
6		70 İnce	64.3	67.3	61.3	40.8	14.0
7		100 İnce	60.2	63.0	51.8	34.5	11.6
8	20UK 10MK 0SD	0	65.5	72.9	70.3	46.2	18.5
9		35 İri	64.4	71.2	68.7	45.7	17.4
10		70 İri	61.0	66.3	58.1	36.6	14.5
11		100 İri	58.6	64.2	54.6	33.4	13.7
12		35 İnce	67.4	73.8	67.5	36.3	12.7
13		70 İnce	64.9	68.3	54.3	32.1	11.4
14		100 İnce	63.9	61.4	44.8	25.6	6.9
15	20UK 0MK 10SD	0	70.2	74.0	60.4	44.6	14.4
16		35 İri	69.8	69.6	60.0	43.8	13.2
17		70 İri	68.7	69.2	59.0	43.7	13.6
18		100 İri	64.9	67.1	58.3	42.0	12.9
19		35 İnce	74.0	72.3	60.8	46.5	10.4
20		70 İnce	67.6	63.6	56.8	29.0	7.9
21		100 İnce	68.3	72.5	52.2	30.0	5.8
22	20UK 5MK 5SD	0	71.4	70.2	62.4	38.3	12.3
23		35 İri	70.7	69.5	61.2	37.6	11.0
24		70 İri	69.7	65.8	64.1	33.7	11.5
25		100 İri	66.0	61.1	64.0	31.5	10.7
26		35 İnce	75.1	72.6	61.5	34.6	11.4
27		70 İnce	72.3	71.3	54.1	30.5	9.9
28		100 İnce	66.0	71.0	47.2	24.8	6.7



Tablo 3.16. 90 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası basınç dayanımları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Sıcaklığa bağlı olarak ölçülen basınç dayanımları (MPa)				
			Oda Sıcaklığı	200°C	400°C	600°C	800°C
1	30UK 0MK 0SD	0	75.2	75.1	75.4	49.2	17.2
2		35 İri	71.9	72.5	72.0	46.4	17.5
3		70 İri	67.6	68.7	65.4	42.3	15.8
4		100 İri	61.3	59.9	55.3	36.5	12.5
5		35 İnce	81.8	77.2	80.4	52.0	21.8
6		70 İnce	75.8	71.5	69.1	42.5	18.4
7		100 İnce	73.0	68.7	61.1	31.4	14.1
8	20UK 10MK 0SD	0	75.6	73.3	73.8	45.0	18.3
9		35 İri	72.9	72.2	71.7	46.0	17.7
10		70 İri	71.0	66.3	64.9	39.9	14.1
11		100 İri	65.2	66.1	55.8	36.5	12.6
12		35 İnce	77.8	74.1	64.9	39.1	16.7
13		70 İnce	82.5	74.1	59.5	37.6	16.8
14		100 İnce	72.8	65.0	50.2	28.4	12.5
15	20UK 0MK 10SD	0	77.0	80.9	77.6	46.3	14.7
16		35 İri	77.2	78.4	75.4	45.3	13.6
17		70 İri	71.3	78.3	77.6	46.6	14.2
18		100 İri	69.4	75.9	67.4	46.0	12.2
19		35 İnce	75.2	82.9	65.6	41.9	15.9
20		70 İnce	74.4	70.3	54.9	33.7	11.8
21		100 İnce	76.8	72.4	56.5	31.1	10.4
22	20UK 5MK 5SD	0	73.0	75.3	76.2	39.7	15.2
23		35 İri	73.1	72.5	74.4	38.6	15.2
24		70 İri	68.1	64.0	71.7	35.1	13.9
25		100 İri	66.4	65.5	62.9	34.5	11.7
26		35 İnce	73.5	78.4	64.3	42.3	13.6
27		70 İnce	81.9	72.3	61.4	34.5	13.0
28		100 İnce	69.2	73.8	53.0	29.5	9.9

### 3.2.10. Yüksek Sıcaklığa Maruz Betonlara Ait Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri

Farklı yüksek sıcaklık koşulları için 10 cm küp numuneler üzerinde 28 gün kür sonrası ölçülen ultrases geçiş hızları Tablo 3.17’de, 90 gün kür sonrası ölçülen ultrases geçiş hızları ise Tablo 3.18’de verilmektedir.

Tablo 3.17. 28 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası ölçülen ultrases geçiş hızları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Sıcaklığa bağlı olarak ölçülen ultrases geçiş hızları (m/s)				
			Oda Sıcaklık	200°C	400°C	600°C	800°C
1	30UK 0MK 0SD	0	4425	3964	3152	2418	1641
2		35 İri	4237	3850	3260	2255	1602
3		70 İri	4237	3839	3086	2134	1541
4		100 İri	4149	3666	2799	1885	1257
5		35 İnce	4264	4053	3268	2587	1832
6		70 İnce	4211	3910	3017	2317	1523
7		100 İnce	4211	3680	2653	2031	1235
8	20UK 10MK 0SD	0	4329	3872	2799	2292	1392
9		35 İri	4184	3988	3072	2463	1641
10		70 İri	4237	3766	2845	2155	1486
11		100 İri	4090	3824	2743	1969	1317
12		35 İnce	4264	3906	2911	2125	1697
13		70 İnce	4090	3839	2768	2087	1625
14		100 İnce	4237	3721	2569	1751	1291
15	20UK 0MK 10SD	0	4264	3910	2845	2397	1478
16		35 İri	4065	3914	2805	2354	1540
17		70 İri	3984	3850	2654	2336	1563
18		100 İri	3883	3817	2614	2281	1386
19		35 İnce	4237	3925	3005	2457	1616
20		70 İnce	4211	3839	2736	1914	1337
21		100 İnce	4149	3770	2429	1917	904
22	20UK 5MK 5SD	0	4367	3937	2793	2042	732
23		35 İri	4237	3872	2762	2101	796
24		70 İri	4184	3839	2847	1930	1192
25		100 İri	4090	3759	2761	1802	1040
26		35 İnce	4211	3902	2976	2335	1342
27		70 İnce	4175	3839	2926	2065	832
28		100 İnce	4040	3872	2451	1622	346

Tablo 3.18. 90 gün kür sonunda yüksek sıcaklık uygulaması sonrası ölçülen ultrases geçiş hızları

Üretim No	MKİ	GKA ikame oranı ve tipi	Sıcaklığa bağlı olarak ölçülen ultrases geçiş hızları (m/s)				
			Oda Sıcaklığı	200°C	400°C	600°C	800°C
1	30UK 0MK 0SD	0	4484	4137	3393	2572	1815
2		35 İri	4329	4028	3333	2378	1745
3		70 İri	4329	3960	3273	2341	1649
4		100 İri	4175	3721	3096	2119	1427
5		35 İnce	4386	4137	3431	2654	1911
6		70 İnce	4329	4077	3303	2270	1649
7		100 İnce	4211	3988	2878	1976	1401
8	20UK 10MK 0SD	0	4329	3889	3120	2524	1566
9		35 İri	4367	4028	3333	2632	1645
10		70 İri	4211	3925	3118	2288	1456
11		100 İri	4175	3850	2821	2152	1465
12		35 İnce	4264	4167	2865	2500	1667
13		70 İnce	4237	4132	2859	2410	1509
14		100 İnce	4149	4012	2511	2006	1324
15	20UK 0MK 10SD	0	4264	3964	3331	2549	1578
16		35 İri	4237	3922	3472	2427	1669
17		70 İri	4211	3883	3384	2466	1564
18		100 İri	4090	3817	2918	2268	1388
19		35 İnce	4454	3988	3005	2247	1672
20		70 İnce	4425	3933	2616	1954	1310
21		100 İnce	4425	3949	2326	1667	837
22	20UK 5MK 5SD	0	4454	3953	3364	2274	1438
23		35 İri	4292	3883	3568	2274	1559
24		70 İri	4264	3784	3404	2189	1466
25		100 İri	4149	3770	2981	1810	1221
26		35 İnce	4515	4012	2999	2326	1619
27		70 İnce	4396	3922	2613	1924	1395
28		100 İnce	4425	3933	2110	1434	1037

#### 4. İRDELEME

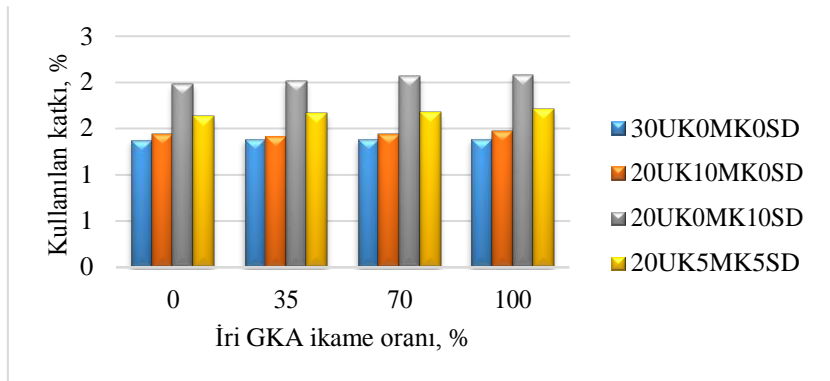
Tüm karışımlar toplam 550 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcının %30'u uçucu kül (UK), metakaolin (MK) ve silis dumanı (SD) mineral katkı malzemelerinin farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır. Bu malzemeler karışımlarda dört farklı kombinasyonda kullanılmıştır. Sonuçlar verilirken bu karışımlara ait farklı kombinasyonlar için kısaltmalar kullanılmıştır. Karışımlara ilişkin kullanılan kısaltmalar ve kısaltmaların tanımlamaları Tablo 4.1`de verilmektedir.

Tablo 4.1. Karışımlara ilişkin kısaltmalar ve kısaltmaların tanımları

30UK0MK0SD	Toplam bağlayıcının ağırlıkça %30'u uçucu külden oluşmaktadır. Geri kalanı çimentodur.
20UK10MK0SD	Toplam bağlayıcının ağırlıkça %20'si uçucu kül ve %10'u metakaolinden oluşmaktadır. Geri kalanı çimentodur.
20UK0MK10SD	Toplam bağlayıcının ağırlıkça %20'si uçucu kül ve %10'u silis dumanından oluşmaktadır. Geri kalanı çimentodur.
20UK5MK5SD	Toplam bağlayıcının ağırlıkça %20'si uçucu kül, %5'i metakaolin ve %5'i silis dumanından oluşmaktadır. Geri kalanı çimentodur.

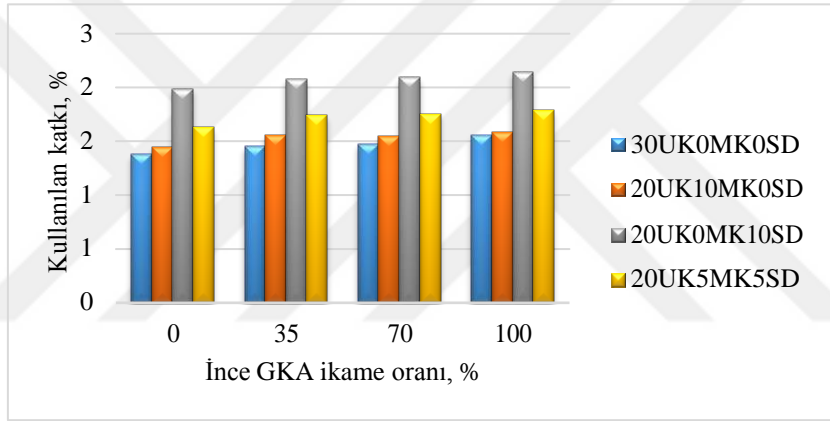
##### 4.1. Kimyasal Katkı Maddesi Miktarı Değerlendirmesi

Karışımlarda hedef işlenebilirliği sağlamak amacıyla bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan miktarlar iri GKA ikameli KYB'lerde Şekil 4.1`de ve ince GKA ikameli KYB'lerde Şekil 4.2`de verilmektedir.



Şekil 4.1. İri GKA ikameli KYB'lerde kullanılan kimyasal katkı miktarları

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere iri GKA ile üretilen beton karışımlarında hedef işlenebilirlik için kullanılan katkı miktarının GKA ikame oranı artışına bağlı olarak değiştiğini söylemek mümkün değildir. Ancak kullanılan kimyasal katkı miktarı değişimi üzerinde daha ziyade mineral katkı maddesi türü ve miktarının belirleyici olduğu görülmektedir. En belirgin artış tüm GKA ikame değerleri için geçerli olmak üzere %10 SD içeren karışımlarda olurken %5 SD içeren karışımlar bu anlamda ikinci sırada yer almaktadır. SD içermeyen karışımlarda GKA ikame oranı artışına bağlı olarak kullanılan kimyasal katkı maddesinde önemli bir değişim görülmemektedir. Bunun nedeni silis dumanının kullanılan diğer mineral katkılara kıyasla çok daha ince tanelerden oluşması ve bu nedenle özgül yüzey alanının çok olmasıdır.



Şekil 4.2. İnce GKA ikameli KYB'lerde kullanılan kimyasal katkı miktarları

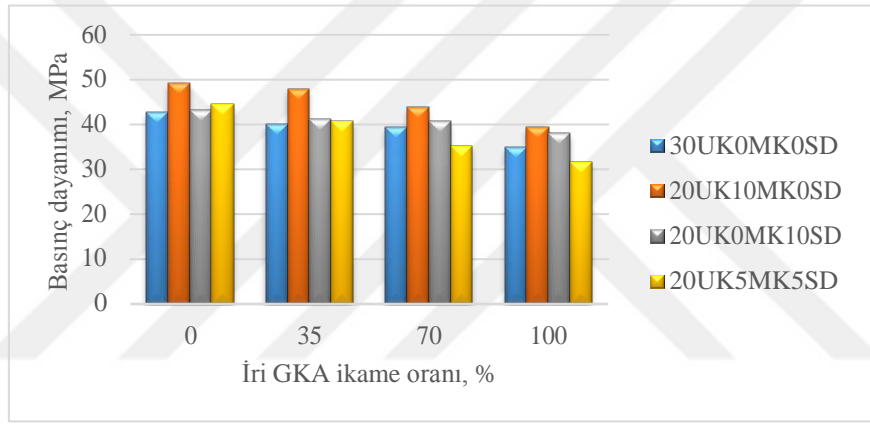
Şekil 4.2'de ince GKA ikameli betonlarda kullanılan kimyasal katkı miktarları verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere ince GKA ikame oranı artışına bağlı olarak kullanılan süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesinde belirgin bir artış söz konusudur. Süperakışkanlaştırıcı miktarındaki artış kullanılan mineral katkı maddesi türüne göre daha belirginleşmektedir. En belirgin artış %10 SD içeren karışımlarda olurken onu %5 SD içeren karışımlar izlemektedir. Diğer karışımlarda mineral katkı türüne bağlı olarak süperakışkanlaştırıcı miktarındaki değişim çok belirgin değildir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'den görüldüğü üzere aynı oranda ince GKA ikame edilen betonların iri GKA ikame edilen betonlara kıyasla daha fazla miktarda süperakışkanlaştırıcı katkıya gereksinim duyulduğu görülmektedir. Örneğin %10 SD içeren ve %100 iri GKA ikameli beton karışımları için kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı %2.08 iken, %10 SD

ve %100 ince GKA ikameli beton karışımları için kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı %2.15 mertebesindedir.

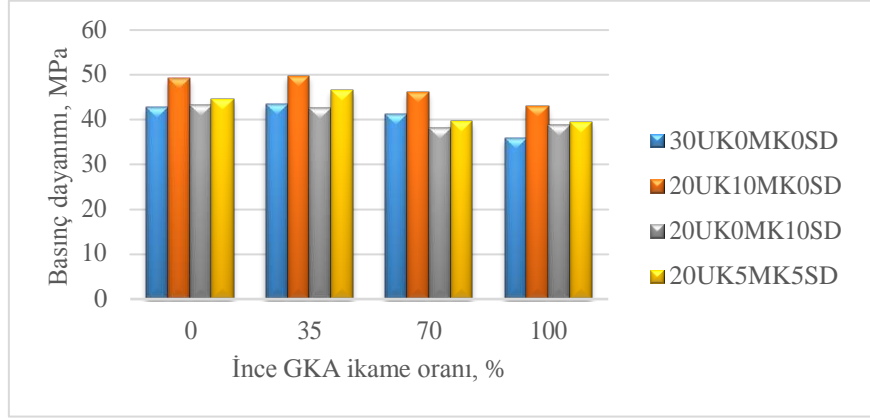
#### 4.2. Basınç Dayanımı Değerlendirmesi

Basınç dayanımını belirlemek amacıyla 15 cm küp numune kullanılmıştır. İlgili grafiklerde verilen her bir basınç dayanımı değeri üç numunenin ortalamasıdır. 7, 28 ve 90 gün kür sonunda elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 4.3 ila Şekil 4.8'de verilmektedir.



Şekil 4.3. 7 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları

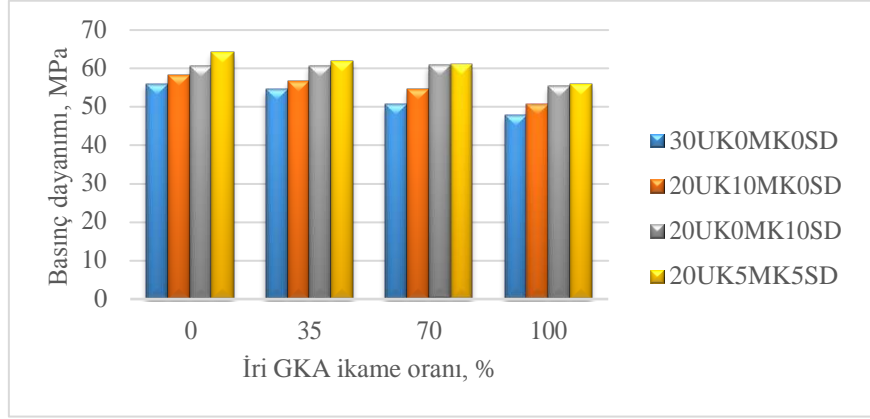
Şekil 4.3'de 7 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü gibi iri GKA ikame oranının artmasıyla betonların basınç dayanımlarında belirgin bir azalma söz konusudur. GKA içermeyen betona kıyasla %100 iri GKA ikame edilen betonların basınç dayanımında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %18, %10 MK içeren betonda %20, %10 SD içeren betonda %12 ve %5MK+%5SD içeren betonda ise %29 olduğu görülmektedir. Yani 7 gün kür sonunda KYB'de iri agreganın tamamının iri GKA ile ikame edilmesi durumunda basınç dayanımında %12 ila %29 arasında bir düşüş olduğu söylenebilir.



Şekil 4.4. 7 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları

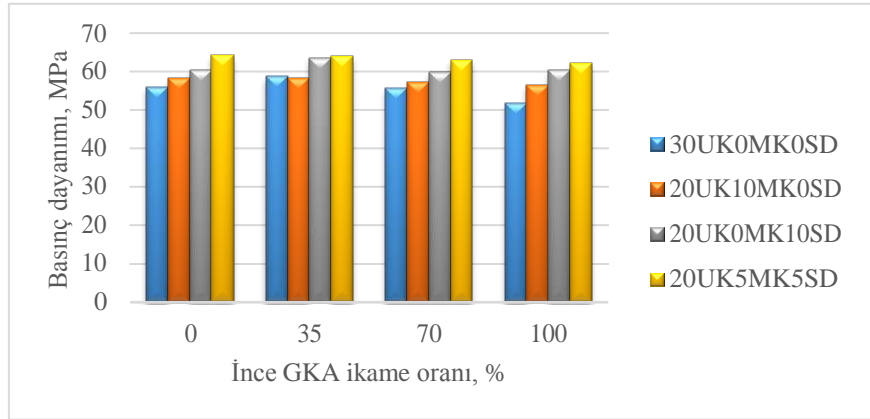
Şekil 4.4'de 7 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere ince GKA içermeyen ve %35 ince GKA içeren betonların basınç dayanımlarında belirgin bir değişim görülmezken %70 ve %100 ince GKA içeren betonların basınç dayanımlarında hafif bir azalma söz konusudur. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA ikameli betonların basınç dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %16, %10 MK içeren betonda %13, %10 SD içeren betonda %10 ve %5MK+%5SD içeren betonda %12 mertebelerindedir. Kısaca 7 gün kür sonunda KYB'de kullanılan tüm ince agreganın ince GKA ile ikame edilmesi durumunda basınç dayanımındaki azalma %10 ila %16 arasında değişmektedir.

Gerek Şekil 4.3'den gerekse Şekil 4.4'den görüldüğü üzere eşit oranda GKA içeren betonlar için en yüksek basınç dayanımı %10 MK içeren betonlarda meydana gelmektedir. Ayrıca aynı şekillerden görüldüğü gibi MK, kullanılan diğer minerallere kıyasla daha yüksek erken dayanım kazandırmaktadır. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında %10 MK içeren betonun basınç dayanımı %30 UK içeren betona kıyasla %15, %10 SD içeren betona kıyasla %14 ve %5MK+%5SD içeren betona kıyasla %10 daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 birlikte incelendiğinde 7 gün kür sonunda betonlarda eşit oranda iri ve ince GKA içeren ve aynı miktarda mineral katkı kullanılan betonların basınç dayanımlarının birbirine oldukça yakın olduğu ortaya görülmektedir. Ancak iri GKA kullanımı betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi daha olumsuz olmaktadır.



Şekil 4.5. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları

Şekil 4.5'de 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere tüm mineral katkı içeren karışımların basınç dayanımları iri GKA ikame oranı artışı ile belirgin bir biçimde azalmaktadır. GKA içermeyen betona kıyasla %100 iri GKA ikameli betonların basınç dayanımlarındaki azalma; %30 UK içeren betonda %14, %10 MK içeren betonda %13, %10 SD içeren betonda %8 ve %5MK+%5SD içeren betonda %13 mertebesindedir. Buradan 28 gün kür sonunda iri agreganın tümünün iri GKA ile ikame edilmesi durumunda basınç dayanımında %8 ila %14 mertebesinde azalmalar olduğu görülmektedir.



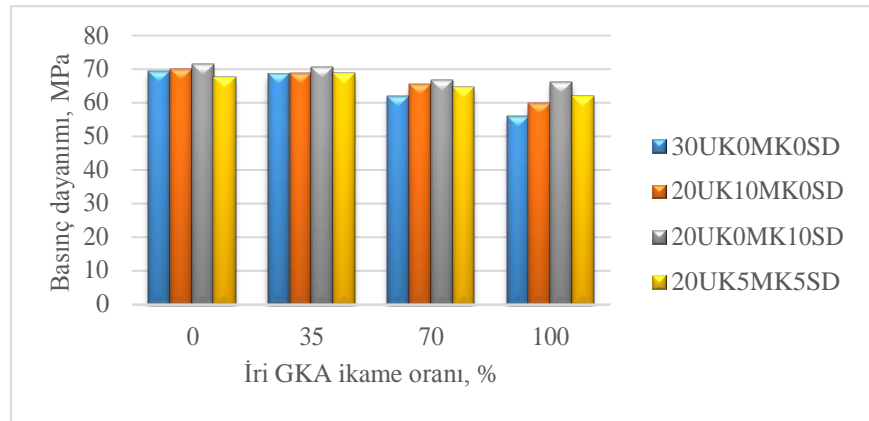
Şekil 4.6. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları

Şekil 4.6'da 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere %30 UK içeren karışımların basınç dayanımları ince GKA ikame artışına bağlı olarak hafif bir biçimde azalırken, diğer karışımların basınç



dayanımlarında belirgin bir değişim görülmektedir. GKA içermeyen betona kıyasla %100 ince GKA içeren betonların basınç dayanımlarındaki azalma; %30 UK içeren betonda %8, %10 MK içeren betonda %3, %10 SD içeren betonda %1 ve %5MK+%5SD içeren betonda %3 mertebelerindedir. Görüldüğü üzere KYB’de kullanılan ince agrega tamamen ince GKA ile ikame edildiğinde dahi basınç dayanımlarındaki azalma oldukça küçük mertebede kalmaktadır.

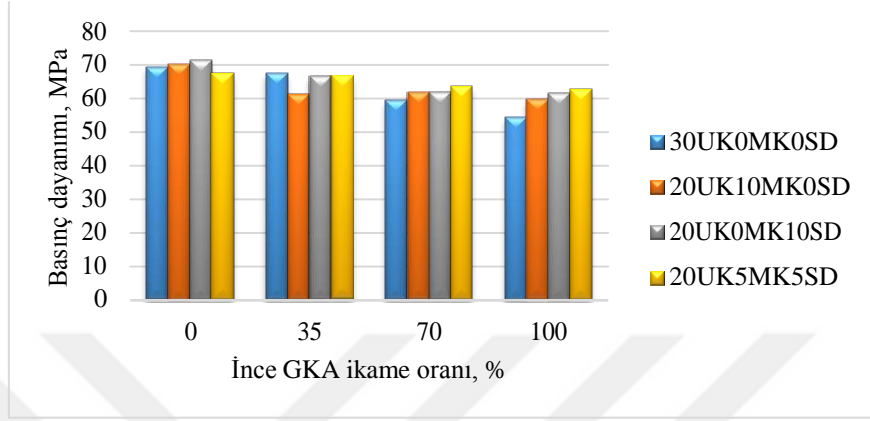
Gerek Şekil 4.5’de gerekse Şekil 4.6’da eşit GKA ikame oranına sahip betonlar için en yüksek basınç dayanımları %5MK+%5SD içerikli betonlarda elde edilmektedir. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında; %5MK+%5SD içeren karışımın basınç dayanımı %30 UK içeren karışıma kıyasla %15, %10 MK içeren karışıma kıyasla %10 ve %10 SD içeren karışıma kıyasla %6 daha yüksek olduğu görülmektedir. Metakaolin ve silis dumanı birlikte kullanıldığında 28 gün kür sonunda daha yüksek dayanıma sahip KYB’ler elde edilmektedir. 28 gün sonunda basınç dayanımı açısından değerlendirme yapıldığında UK kullanılan karışımların basınç dayanımı gelişimi metakaolin ve silis dumanı kullanılanlara kıyasla daha düşük kalmaktadır. Eşit oranda iri ve ince GKA ikameli ve aynı oranda mineral katkı içeren betonların basınç dayanımları birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.7. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin basınç dayanımları

Şekil 4.7’de 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin basınç dayanımları verilmektedir. İlgili şekil incelendiğinde tüm mineral katkı içeren betonlarda iri GKA ikame oranı artışına bağlı olarak basınç dayanımlarında azalmalar olduğu görülmektedir. GKA içermeyen betona kıyasla %100 iri GKA ikameli betonların basınç dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %19, %10 MK içeren betonda %15, %10 SD içeren

betonda %7 ve %5MK+%5SD içeren betonda %8 mertebesindedir. İri agreganın tümünün iri GKA ile ikame edilmesi durumunda 90 gün kür sonunda basınç dayanımında %7 ila %19 arasında bir azalmadan söz etmek mümkündür.



Şekil 4.8. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımları

Şekil 4.8'de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin basınç dayanımlarının ikame oranına bağlı olarak değişimi verilmektedir. İlgili şekil incelendiğinde tüm mineral katkı içeren betonlarda ince GKA ikame oranının artmasına bağlı olarak basınç dayanımlarında azalmalar olduğu görülmektedir. GKA içermeyen betona kıyasla %100 iri GKA ikameli betonların basınç dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %21, %10 MK içeren betonda %15, %10 SD içeren betonda %14 ve %5MK+%5SD içeren betonda %7 mertebesindedir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 birlikte değerlendirildiğinde eşit GKA ikame oranına sahip ve aynı oranda mineral katkı içeren betonlarda en yüksek basınç dayanımının genellikle %10 SD içeren betonlarda sağlandığı görülmektedir. Yalnızca normal agrega ile üretilen KYB dikkate alındığında, %10 SD içeren betonun basınç dayanımı %30 UK içeren betonunkine kıyasla %3, %10 MK içeren betonunkine kıyasla %2 ve %5MK+%5SD içeren betonunkine kıyasla %6 daha yüksek olduğu görülmektedir. 90 gün kür gören UK ve MK içeren betonların basınç dayanımları gelişimi SD içeren betonlarınkine kıyasla daha düşüktür. 90 gün küre maruz betonlarda eşit GKA ikame oranlarında ve aynı mineral katkı içeren betonların basınç dayanımları birbirlerine oldukça yakındır.

GKA ikamesi ile betonların basınç dayanımından meydana gelen kayıplar farklı kombinasyonlarda mineral katkı maddesi kullanarak tolere etmek mümkündür. Örneğin;

Şekil 4.5`de görüldüğü üzere, %30 UK içeren ve GKA içermeyen 28 günlük betonun basınç dayanımı 55.92 MPa, %100 iri GKA ikameli betonun basınç dayanımı 47.76 MPa'dır. Basınç dayanımında meydana gelen %15 civarındaki düşüşü, karışımdaki uçucu külü %10 oranında azaltarak yerine %5MK+%5SD eklemek suretiyle elimine etmek olasıdır. Bu şekilde GKA kullanımını sonucu meydana gelen basınç dayanımı kaybı önlenerek beton üretiminde GKA kullanımını sürdürülebilir kılmak mümkün olmaktadır.

Son zamanlarda yapılan birçok makalede GKA içeren beton karışımlarının mikroyapısı ve GKA ile harç matrisi arasındaki arayüzey geçiş bölgesine ilişkin tartışmalar mevcuttur. Bu tartışmalarda GKA içeren beton karışımının mikroyapısının geleneksel betonunkinden daha karmaşık olduğu belirtilmektedir [210, 211]. GKA içeren betonda eski ve yeni olmak üzere iki farklı arayüzey geçiş bölgesi fazı vardır. Eski arayüzey geçiş bölgesi, GKA kaynak betonunda kullanılmış olan agrega ile eski yapışmış harç matrisi arasındaki arayüzey geçiş bölgesidir. Yeni arayüzey geçiş bölgesi ise GKA ile yeni harç arasındaki yüzeydir. Arayüzey geçiş bölgesi özellikleri ve buna bağlı olarak GKA içeren beton karışımının mekanik ve dayanıklılık özellikleri GKA'nın kalitesinden etkilenir [212]. Basınç dayanımlarındaki azalmanın nedeni bundan dolayı olduğuna işaret edilmektedir.

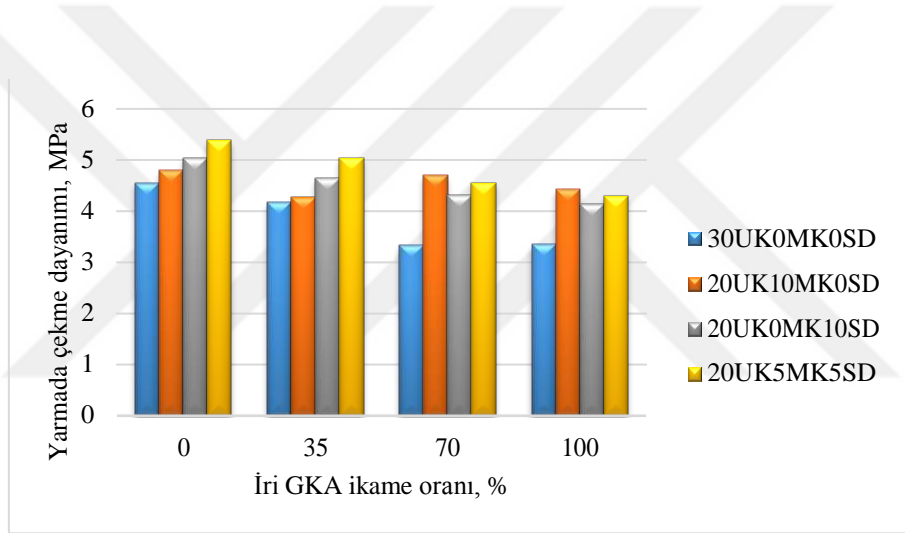
Pek çok araştırmada %40'a varan oranda iri GKA'nın normal agrega ile ikame edilmesinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı rapor edilmektedir [193]. Yapılan çalışmada da benzer şekilde %35 oranında iri GKA ikameli betonların basınç dayanımında yaklaşık %3 mertebesinde basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. Tang ve ark. [188] %100 iri GKA ikameli karışımın kontrol betonuna kıyasla basınç dayanımında %9.4 bir azalmayı rapor etmişlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise %3 ila %14 mertebesinde bir azalma meydana gelmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen sonuçlar örtüşmektedir. Bağlayıcı miktarının  $463 \text{ kg/m}^3$  olarak kullanıldığı başka bir çalışmada [184] 28 gün kür sonunda GKA içermeyen kontrol betonunda basınç dayanımı 38.07 MPa çıkmış ve %100 iri GKA ikameli betonda 32 MPa düzeyine düşerek kontrol betonuna kıyasla yaklaşık %16 kayıp gözlenmiştir.  $550 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı kullanılan çalışmamızda GKA içermeyen betonların basınç dayanımı 56 MPa ila 64 MPa civarında çıkmış ve %100 iri GKA ikameli betonların basınç dayanımında %6 ila %15 mertebesinde bir azalma ölçülmüştür. Kullanılan bağlayıcı miktarlar dikkate alındığında sonuçların uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.

Yapılan bazı çalışmalarda ince GKA kullanımı ile betonların basınç dayanımlarında artış olduğu rapor edilmektedir. Kou ve Poon [190] gerçekleştirdikleri çalışmada %50 ince GKA ikamesi düzeyine kadar basınç dayanımında artış gözlemlemişlerdir. Hu ve diğ. [191]

benzer şekilde yaptıkları çalışmada KYB’lerde 28 günlük basınç dayanımının %75 ince GKA ikamesine kadar hafif bir artış eğilimi gösterdiği vurgulamışlardır. Çalışmamızda ise %35 oranında ince GKA içerikli betonların basınç dayanımlarında GKA içermeyen betona kıyasla yaklaşık %4 mertebesinde bir artış gözlemlenmiştir.

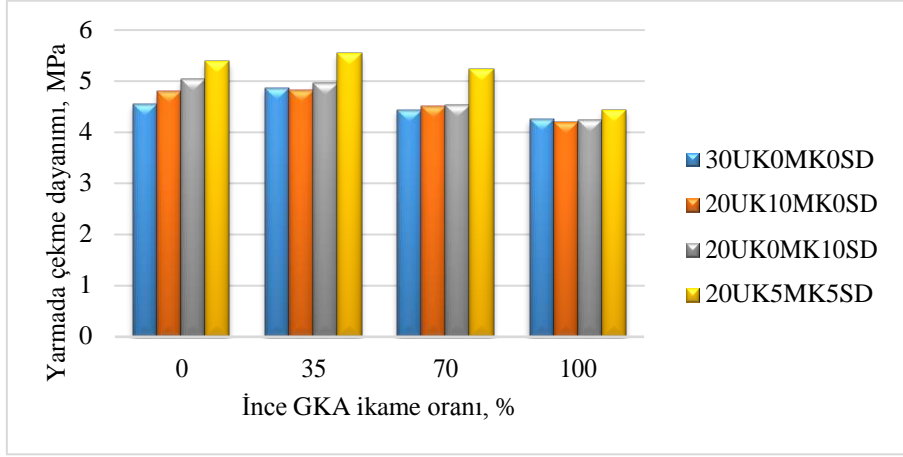
### 4.3. Yarmada Çekme Dayanımı Değerlendirmesi

Yarmada çekme dayanımı deneyi 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yarmada çekme dayanımı değerleri iki numunenin ortalamasıdır.



Şekil 4.9. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin yarmada çekme dayanımları

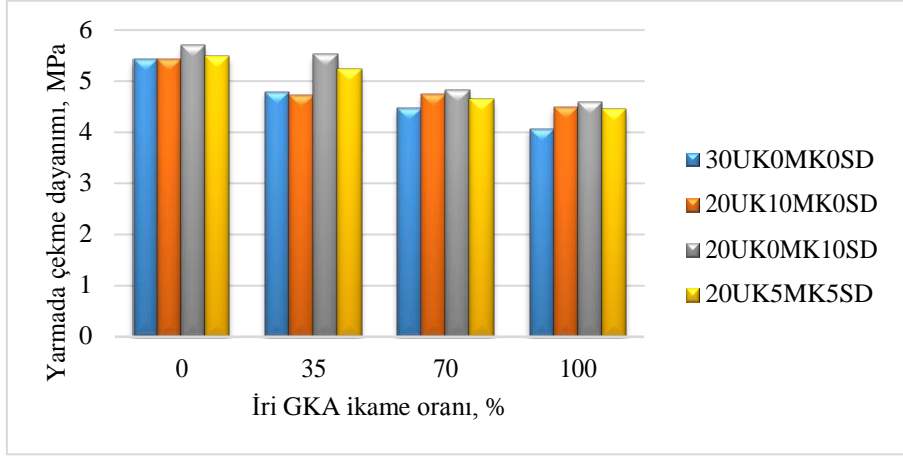
Şekil 4.9’da 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin yarmada çekme dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere iri GKA ikame oranı artışına bağlı olarak yarmada çekme dayanımları hafif bir düşme eğilimi göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %26, %10 MK içeren betonda %8, %10 SD içeren betonda %18 ve %5MK+%5SD içeren betonda %20 mertebesinde dir. İri agreganın tümünün iri GKA ile ikame edilmesi durumunda yarmada çekme dayanımında %8 ila %26 arasında bir azalmadan söz etmek mümkündür.



Şekil 4.10. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları

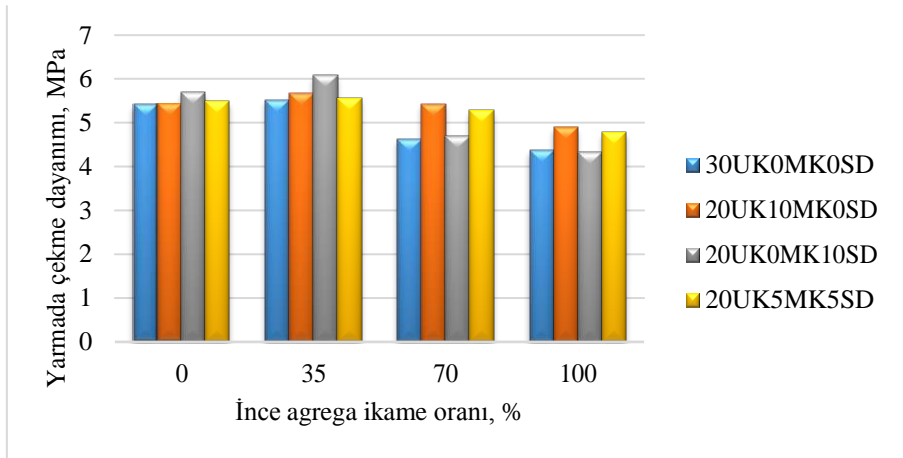
Şekil 4.10'da 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden %35 ince GKA ikame oranında yarmada çekme dayanımlarında önemli bir değişim görülmezken, daha yüksek ikame oranlarında düşüş belirginleşmektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA ikameli betonların yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %7, %10 MK içeren betonda %12, %10 SD içeren betonda %16 ve %5MK+%5SD içeren betonda %17 mertebesindedir. İnce agreganın tümünün ince GKA ile ikame edilmesi durumunda yarmada çekme dayanımında %7 ila %17 arasında bir azalmadan söz edilebilir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 birlikte incelendiğinde, aynı oranda kullanılan iri GKA betonların yarmada çekme dayanımlarını ince GKA içerenlere kıyasla daha olumsuz etkilendiği görülmektedir. Ayrıca GKA ikame oranından bağımsız olarak genellikle %5MK+%5SD içeren betonların yarmada çekme dayanımları diğer mineral katkı içerenlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında %5MK+%5SD içeren betonun yarmada çekme dayanımı %30 UK içeren betondan %18, %10 MK içeren betondan %12 ve %10 SD içeren betondan %7 daha yüksektir. Dolayısıyla, KYB üretiminde yalnızca %10 MK veya %10 SD kullanımı yerine %5MK+%5SD kombinasyonunda mineral katkı kullanmanın yarmada çekme dayanımı gelişim açısından daha olumlu sonuç vermesi beklenebilir.



Şekil 4.11. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları

Şekil 4.11'de 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere iri GKA ikame oranı arttıkça KYB'lerin yarmada çekme dayanımları azalmaktadır. GKA içermeyen betona kıyasla %100 iri GKA içeren betonların yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %25, %10 MK içeren betonda %17, %10 SD içeren betonda %20 ve %5MK+%5SD içeren betonda %19 mertebesindedir. İri agreganın tümünün iri GKA ile ikame edilmesi durumunda yarmada çekme dayanımında %17 ila %25 arasında bir azalmadan söz edilebilir. Tüm iri GKA ikame oranlarında en yüksek yarmada çekme dayanımı %10 SD içeren betonlarda görülmektedir.



Şekil 4.12. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları

Şekil 4.12'de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin yarmada çekme dayanımları verilmektedir. İlgili şekil incelendiğinde GKA içermeyen betonlara kıyasla %35 oranında ince GKA içeren KYB'lerin yarmada çekme dayanımlarında hafif bir artış gözlemlenirken, %70 ve %100 oranında ince GKA ikameli betonların dayanımlarında ise belirgin bir düşme görülmektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA içeren betonların yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %20, %10 MK içeren betonda %10, %10 SD içeren betonda %24 ve %5MK+%5SD içeren betonda %13 mertebesindedir. İnce agreganın tümü ince GKA ile ikame edildiğinde yarmada çekme dayanımında %10 ila %24 arasında bir azalma meydana gelmektedir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 birlikte değerlendirildiğinde, aynı oranda iri GKA kullanılan betonların yarmada çekme dayanımı ince GKA kullanılan betonlarınkine kıyasla daha düşüktür.

Basınç dayanımı irdelemesi yapılırken bahsedildiği üzere eski ve yeni arayüzey geçiş bölgesinin varlığı ve eski yapımış çimento hamuru varlığından dolayı GKA'nın betonda kullanımının betonların mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmektedir [212]. Yarmada çekme dayanımlarındaki azalma eski ve yeni arayüzeylerin varlığı ve bu arayüzeler arasındaki eski çimento hamurunun özelliklerinin betonun sahip olduklarından daha düşük mekanik özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. %35 ince GKA içeren KYB'lerin yarmada çekme dayanımlarındaki artışın nedeni ise GKA kaynak betonunun kırılıp agrega yapılması aşamasında ince agrega (0-4 mm)'da eski çimento hamurunun ince kısımlarının daha yoğun bulunması ve bunun dolgu etkisine neden olduğu düşünülmektedir.

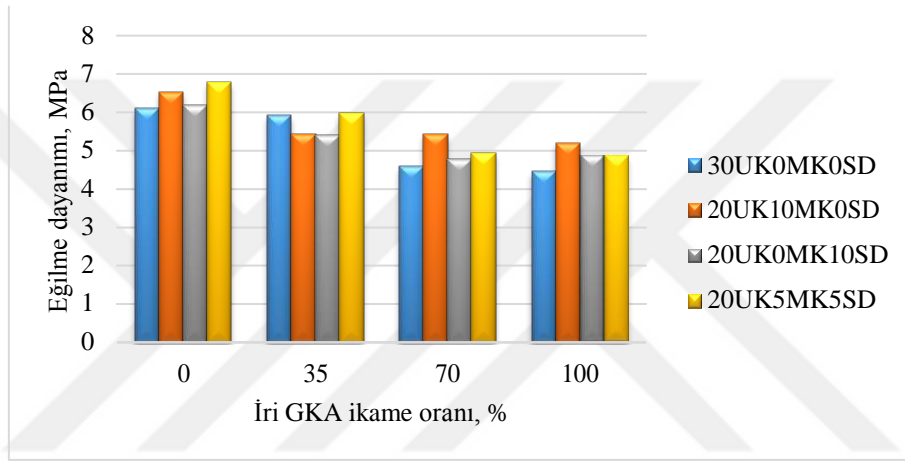
Genel olarak yarmada çekme dayanımı değerlendirildiğinde GKA kullanımı sonucu dayanımda oluşan kayıp farklı türde ve miktarda mineral katkı kullanarak önlemek mümkündür. Örneğin; Şekil 4.10'da 28 gün sonunda %30 UK içeren ve GKA içermeyen betonun yarmada çekme dayanımı 4.56 MPa, %100 ince GKA ikameli betonun yarmada çekme dayanımı 4.25 MPa'dır. Yarmada çekme dayanımında meydana gelen %7 miktarda azalma karşından %10 UK çıkararak ve %5MK+%5SD ekleyerek telafi edilebilir.

Grdic ve ark. [187] iri doğal agrega yerine %0, %50 ve %100 ikame oranlarında iri GKA kullanarak KYB'ler üretmişlerdir. 28 gün kür sonunda %50 ve %100 iri GKA ikame oranlarında yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen azalmayı sırasıyla %2 ve %16 olarak belirlemişlerdir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada %100 iri GKA ikame oranında %8 ila %26 mertebesinde belirlenmiştir. Başka bir çalışmada [188], %40'a kadar iri GKA kullanımının betonlar üzerinde kayda değer bir olumsuzluk meydana getirmediği ifade

edilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada %35 oranında iri GKA ikameli betonların yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen azalmanın ihmal edilecek düzeyde olduğu görülmektedir.

#### 4.4. Eğilme Dayanımı Değerlendirmesi

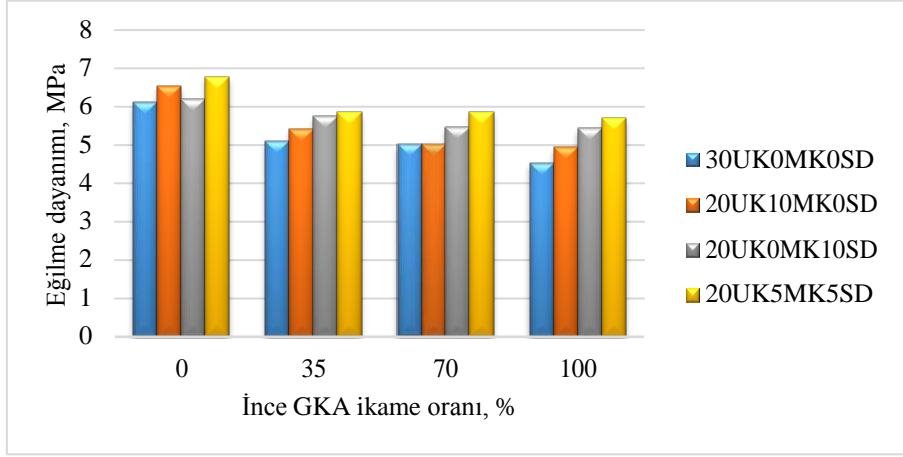
Eğilme dayanımı 10x10x40 cm prizma numuneler üzerinde belirlenmiştir. Eğilme dayanımı değerleri iki numunenin ortalaması şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.13. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları

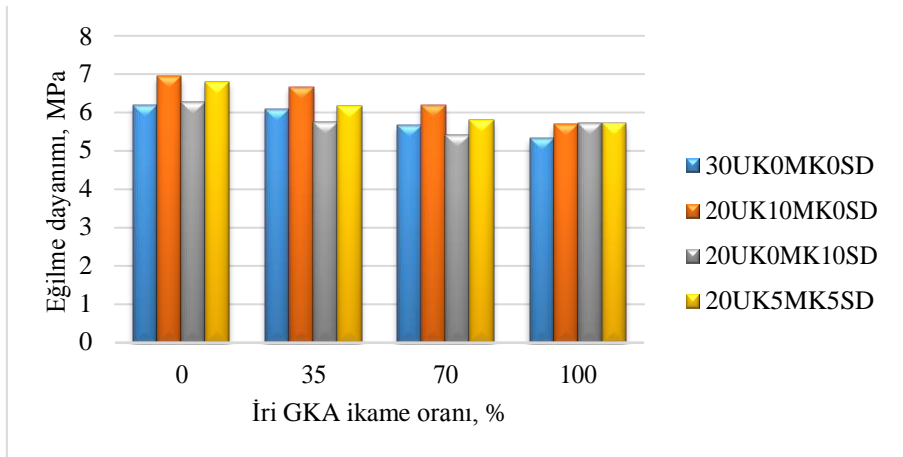
Şekil 4.13'de 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere tüm mineral katkı içeren betonlarda iri GKA ikame oranı artışına bağlı olarak eğilme dayanımında belirgin azalmalar görülmektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların eğilme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %27, %10 MK içeren betonda %20, %10 SD içeren betonda %22 ve %5MK+%5SD içeren betonda %28 mertebesindedir. KYB'de kullanılan tüm iri agregası iri GKA ile ikame edildiğinde eğilme dayanımındaki azalmanın %20 ila %28 arasında olduğu görülmektedir.





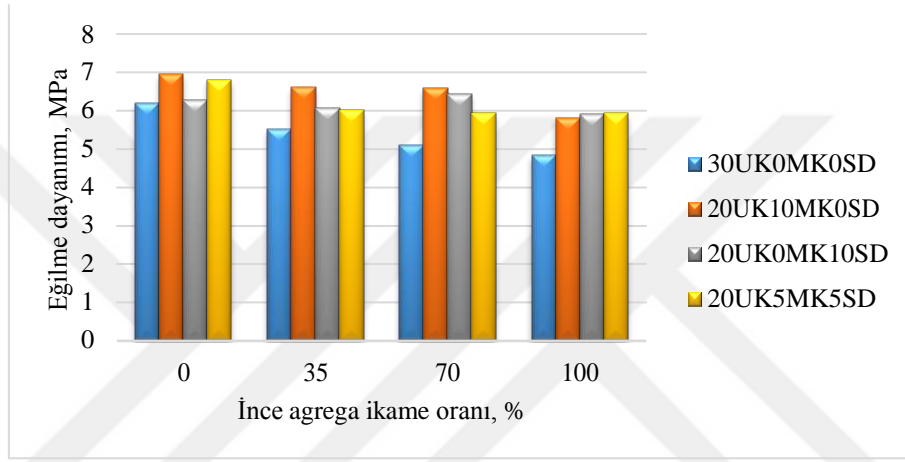
Şekil 4.14. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları

Şekil 4.14'de 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere ince GKA ikame oranı artışına bağlı olarak tüm betonların eğilme dayanımları azalmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA içeren betonların eğilme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %26, %10 MK içeren betonda %24, %10 SD içeren betonda %12 ve %5MK+%5SD içeren betonda %16 mertebesindedir. Tüm ince agreganın ince GKA ile ikame edildiğinde eğilme dayanımındaki azalma %12 ila %24 arasında olmaktadır. İlgili şekilden ayrıca görüldüğü üzere farklı oranlarda iri GKA içeren betonlardan %5MK+%5SD içerenler en yüksek eğilme dayanımı verirken, %30 UK içerenler en düşük eğilme dayanımı vermektedir.



Şekil 4.15. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımları

Şekil 4.15’de 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin eğilme dayanımları verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere genel olarak iri GKA ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları belirgin bir şekilde azalmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA ikameli KYB’lerin eğilme dayanımlarında meydana gelen azalma; %30 UK içeren betonda %14, %10 MK içeren betonda %18, %10 SD içeren betonda %8 ve %5MK+%5SD içeren betonda %16 mertebesindedir. KYB’de kullanılan iri agreganın tamamı, iri GKA ile ikame edildiğinde eğilme dayanımı %8 ila %18 mertebesinde azalmaktadır.



Şekil 4.16. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’lerin eğilme dayanımları

Şekil 4.16’da 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’lerin eğilme dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere genel olarak ince GKA ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları hafif bir azalma eğilimi göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA ikameli betonların eğilme dayanımlarında meydana gelen azalmalar; %30 UK içeren betonda %22, %10 MK içeren betonda %16, %10 SD içeren betonda %6 ve %5MK+%5SD içeren betonda %13 mertebesindedir. KYB’de kullanılan ince agreganın tamamı ince GKA ile ikame edildiğinde eğilme dayanımlarında %6 ila %22 mertebesinde azalmalar meydana gelmektedir.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’den görüleceği üzere aynı GKA ikame oranına sahip betonlar için en yüksek eğilme dayanımı %10 MK içeren betonlarda görülmektedir. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında, %10 MK içeren betonunun eğilme dayanımının %30 UK içeren betonunkinden %12, %10 SD içeren betonunkinden %11 ve %5MK+%5SD içeren betonunkinden %2 daha fazla olduğu görülmektedir.

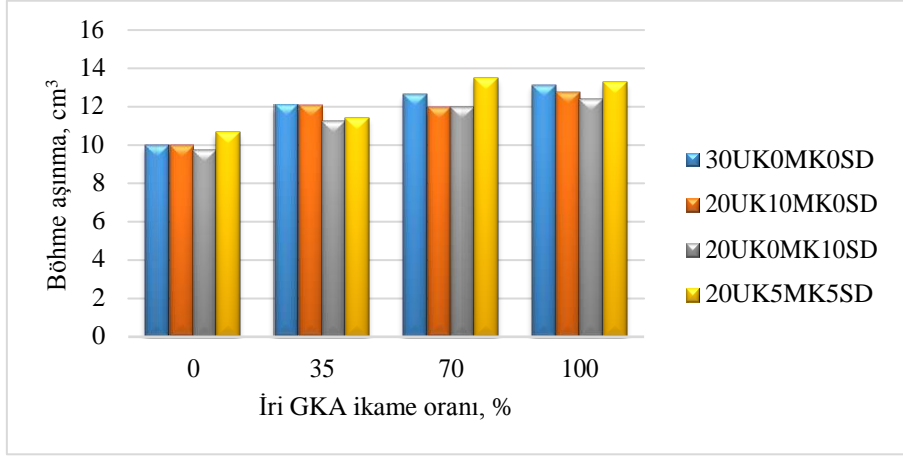
Genel sonuç itibariyle GKA kullanımının eğilme dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi farklı türde ve miktarda mineral katkı kullanarak önlenabilir. Örneğin, Şekil 4.14'de görüleceği üzere %30 UK içeren ve GKA içermeyen betonun eğilme dayanımı 6.11 MPa, %100 ince GKA ikameli betonun eğilme dayanımı 4.52 MPa'dır. Eğilme dayanımında meydana gelen %26 mertebesindeki kayıp %30 UK karışımından %10 UK azaltarak ve %5MK+%5SD ekleyerek azaltılabilir.

Basınç dayanımı değerlendirmesi ve yarmada çekme dayanımı değerlendirmesi yapılırken belirtildiği üzere GKA üzerine yapışmış eski çimento hamuru varlığı ve GKA ile üretilen betonda meydana gelen iki farklı arayüzey geçiş bölgesinden dolayı GKA içeren betonların eğilme dayanımları normal agregaya içerenlere kıyasla düşmektedir. GKA kaynak betonun öğütülmesi aşamasında GKA üzerine yapışmış olan eski çimento hamurunda meydana gelen mikroçatlaklar nedeniyle de GKA agregalarının betonda kullanımı betonun eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Literatürde %100 oranında iri GKA içeren betonların eğilme dayanımlarının GKA içermeyen betona kıyasla %45 mertebesinde azaldığı rapor edilmektedir [140]. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada %100 iri GKA ikameli KYB'lerin eğilme dayanımlarında %8 ila %28 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Elde edilen bu sonucun literatür ile uyumsuzluğunun nedeni söz konusu karışımların bağlayıcı miktarlarının farklı olması ile ilgili olabilir.

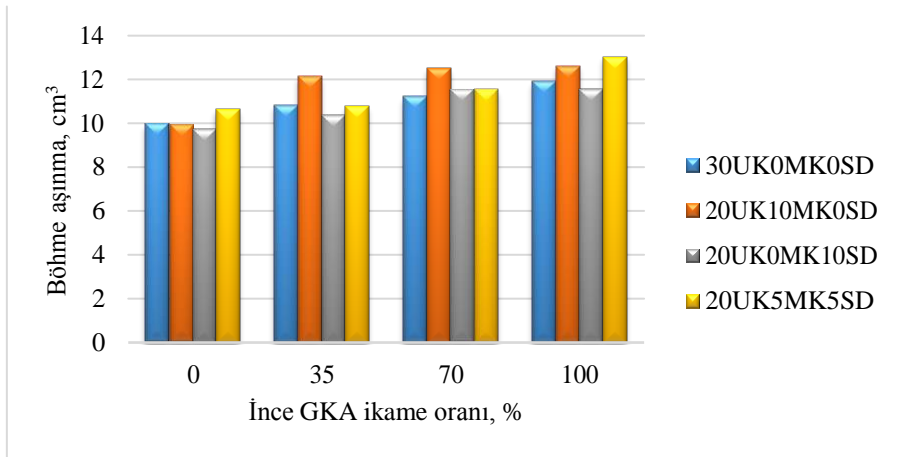
#### **4.5. Böhme-Aşınma Değerlendirmesi**

Böhme aşınma deneyinde 7.1 cm küp numuneler kullanılmıştır. Deney yalnızca 28 gün kür gören numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Grafiklerde verilen her bir sonuç iki numune üzerinde elde edilen ölçümün ortalamasıdır.



Şekil 4.17. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin aşınma değerleri

Şekil 4.17'de Böhme aşınma deneyine tabi tutulan iri GKA ikameli KYB'lerin hacimsel olarak aşınma değerleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere KYB'lerde iri GKA ikame oranı arttıkça betonların aşınması artmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların aşınmasındaki artış oranı; %30 UK içeren betonda %32, %10 MK içeren betonda %28, %10 SD içeren betonda %27 ve %5MK+%5SD içeren betonda %25 mertebesindedir. KYB'de kullanılan tüm iri agrega iri GKA ile ikame edildiğinde betonların aşınması %25 ila %32 arasında değişmektedir.



Şekil 4.18. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin aşınma değerleri

Şekil 4.18'de Böhme aşınma deneyine tabi tutulan ince GKA ikameli KYB'lerin hacimsel olarak aşınma değerleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere KYB'lerde ince GKA ikame oranı arttıkça betonların aşınması artmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla

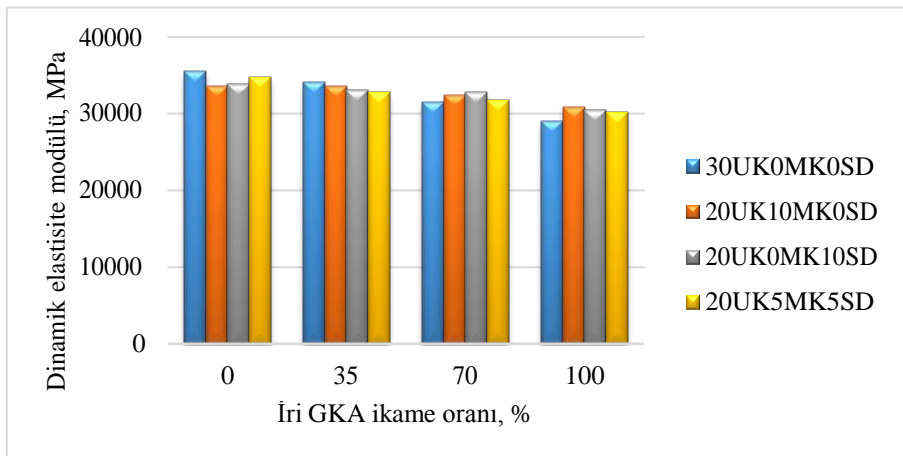
%100 oranında ince GKA içeren betonların aşınmasındaki artış; %30 UK içeren betonda %20, %10 MK içeren betonda %27, %10 SD içeren betonda %19 ve %5MK+%5SD içeren betonda %22 mertebesindedir. KYB’de kullanılan tüm ince agrega ince GKA ile ikame edildiğinde betonun aşınmasındaki artış %19 ila %27 arasında değerler almaktadır.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 birlikte değerlendirildiğinde, eşit oranda iri GKA kullanılan KYB’lerin aşınması ince GKA kullanılanlardan daha fazla aşındığı görülmektedir. Kullanılan agregadan bağımsız olarak en düşük aşınma değeri %10 SD içeren betonlarda meydana gelmiştir.

GKA üzerinde yapılmış olan eski çimento hamuru yapısının doğal agreganın yapısından daha gözenekli olduğu ve mekanik özelliklerinin de doğal agregaya kıyasla daha düşük olduğu bilinmektedir. Öğütme sırasında meydana gelen mikroçatlaklı ve gözenekli yapı betonların aşınma deneyinde normal agregadan daha kolay aşınmakta ve dolayısıyla betonların aşınmasını da artırmaktadır. GKA ikamesi ile aşınmanın artmasının nedeni bundan dolayı olduğu düşünülmektedir.

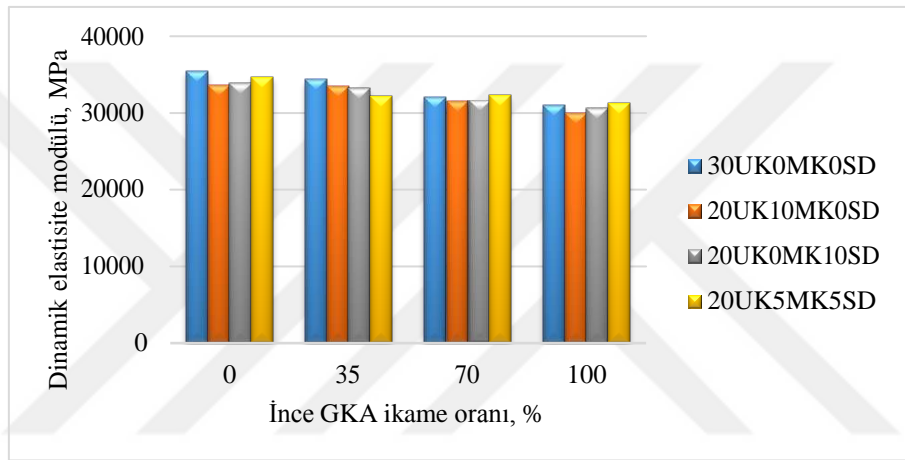
#### 4.6. Dinamik Elastisite Modülü Değerlendirmesi

Betonların dinamik elastisite modülü rezonans frekans tekniği ile belirlenmiştir. Rezonans frekansları belirlenen numunelerin dinamik elastisite modülleri ilgili standart uyarınca hesaplanmıştır. Deneysel gerçekleştirilmede 10x10x40 cm prizmatik numuneler kullanılmıştır.



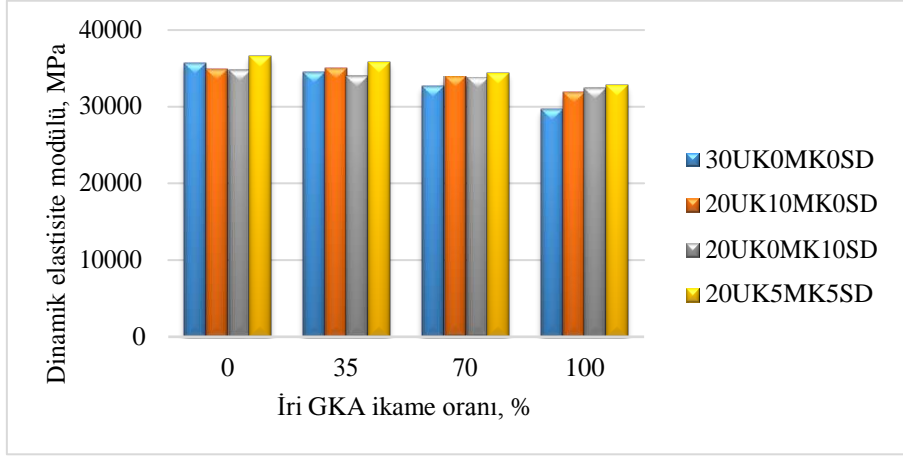
Şekil 4.19. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin dinamik elastisite modülleri

Şekil 4.19’da 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB’lerin dinamik elastisite modülleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere iri GKA ikame oranı arttıkça betonların dinamik elastisite modülleri belirgin bir biçimde azalmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 oranında iri GKA içeren betonların dinamik elastisite modüllerinde meydana gelen bu azalmalar; %30 UK içeren betonda %18, %10 MK içeren betonda %8, %10 SD içeren betonda %10, %5MK+%5SD içeren betonda %13 mertebesindedir. Özetle, KYB’de iri agregâ %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde betonların dinamik elastisite modülleri %8 ila %18 mertebesinde azalmaktadır.



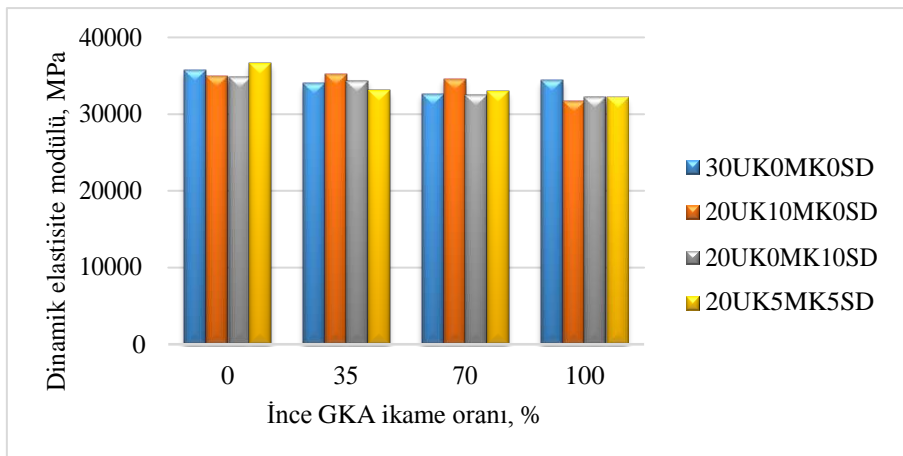
Şekil 4.20. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’lerin dinamik elastisite modülleri

Şekil 4.20’de 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’lerin dinamik elastisite modülleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ince GKA ikame oranı arttıkça betonların dinamik elastisite modülleri belirgin bir biçimde azalmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 oranında ince GKA içeren KYB’lerin dinamik elastisite modüllerinde meydana gelen bu azalmalar; %30 UK içeren betonda %13, %10 MK içeren betonda %11, %10 SD içeren betonda %10, %5MK+%5SD içeren betonda %10 mertebesindedir. Kısaca, KYB’de ince agregâ %100 oranında ince GKA ile ikame edildiğinde betonların dinamik elastisite modüllerinde %10 ila %13 arasında azalmalar meydana gelmektedir.



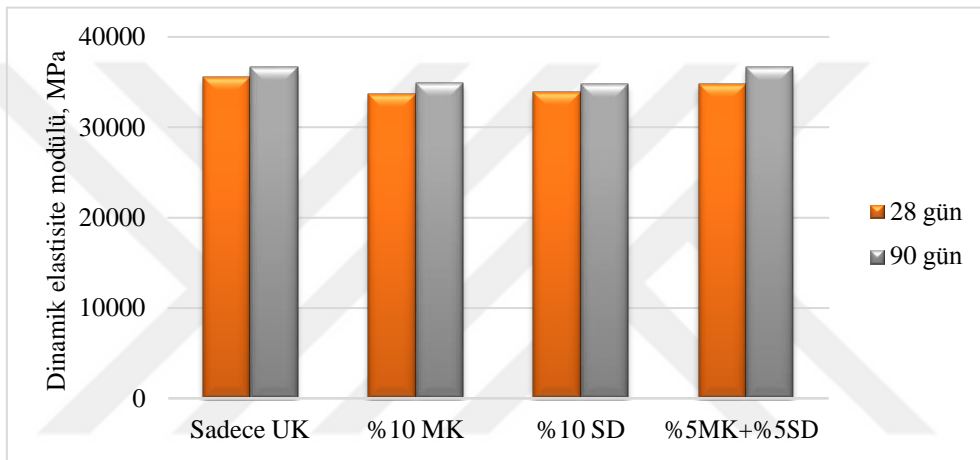
Şekil 4.21. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri

Şekil 4.21'de 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri verilmektedir. Şekilden görüleceği gibi, GKA ikame oranı arttıkça betonların dinamik elastisite modülleri azalma eğilimi göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların dinamik elastisite modüllerinde meydana gelen azalma miktarları; %30 UK içeren betonda %17, %10 MK içeren betonda %9, %10 SD içeren betonda %7 ve %5MK+%5SD içeren betonda %10 mertebesindedir. Sonuç olarak KYB'de iri agregası %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde betonların dinamik elastisite modülünde %7 ila %17 mertebesinde azalmalar görülmektedir.



Şekil 4.22. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülleri

Şekil 4.22’de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’lerin dinamik elastisite modülleri verilmektedir. Şekil incelendiğinde ince GKA ikame oranı arttıkça betonların dinamik elastisite modülleri hafif bir azalma eğilimi göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 oranında iri GKA içeren betonların dinamik elastisite modüllerinde meydana gelen azalma miktarı; %30 UK içeren betonda %4, %10 MK içeren betonda %9, %10 SD içeren betonda %7 ve %5MK+%5SD içeren betonda ise %12 mertebesindedir. Sonuç itibariyle, KYB’de iri agregâ %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde betonların dinamik elastisite modüllerinde %4 ila %12 oranında bir azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 4.23. GKA içermeyen KYB’ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen dinamik elastisite modülleri

Şekil 4.23’de 28 ve 90 gün sonunda GKA içermeyen betonlar üzerinde ölçülen dinamik elastisite modüllerinin kıyaslaması görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere tüm karışımlar için geçerli olmak üzere betonların dinamik elastite modüllerinin kür süresine bağlı olarak belirgin bir değişimleri yoktur.

GKA agregâsına yapışmış olan mikroçatlaklı ve gözenekli eski çimento hamuru nedeniyle bu agregâ ile üretilen betonlar normal agregâ ile üretilen betonlara kıyasla daha boşluklu ve rijit olmayan bir yapıya bürünmektedir. Dinamik elastisite modüllerindeki azalmanın nedeni buna bağlanabilir. Ayrıca KYB’de GKA kullanımı nedeniyle oluşan eski ve yeni arayüzey geçiş bölgelerinin varlığı da dinamik elastisite modülünün azalmasında oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Yapılan bir çalışmada [140], GKA içermeyen betona göre %30 iri GKA ikameli betonun elastisite modülünde önemli bir değişiklik olmadığı, %100 iri GKA ikameli betonun

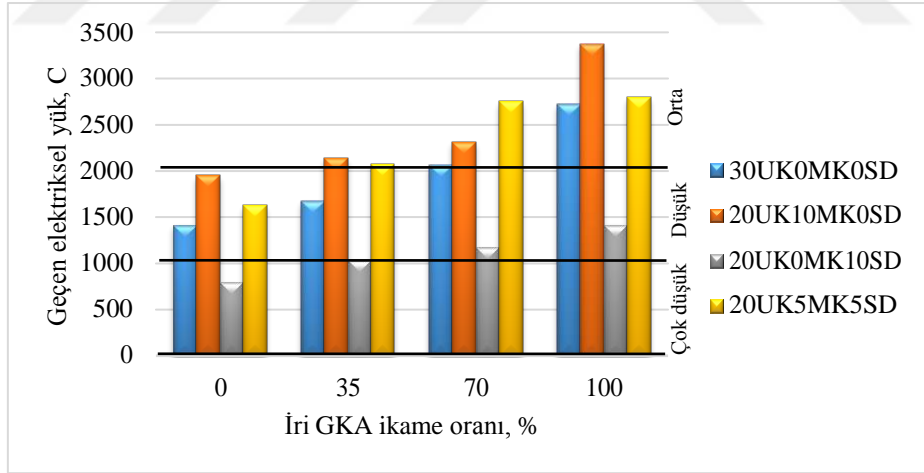


elastisite modülününse %37 mertebesinde azalma meydana geldiği rapor edilmektedir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada %35 iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modüllerinde meydana gelen azalma yaklaşık %3 gibi küçük bir mertebede kalırken, %100 iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modüllerinde %7 ila %18 mertebesinde bir azalma görülmektedir.

Pereira-de-Oliveira ve ark. [183] iri GKA içeren KYB'lerin özelliklerini inceledikleri çalışmada %100 oranında iri GKA ikameli KYB'lerin dinamik elastisite modülündeki azalmanın kontrol betonuna kıyasla son derece küçük olduğu belirtilirken, Tang ve ark. [188] %22.2 oranında bir azalmayı vurgulamaktadır. Bu çalışmada bulduğumuz değerler literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

#### 4.7. Hızlı Klorür Geçirirliliği Değerlendirmesi

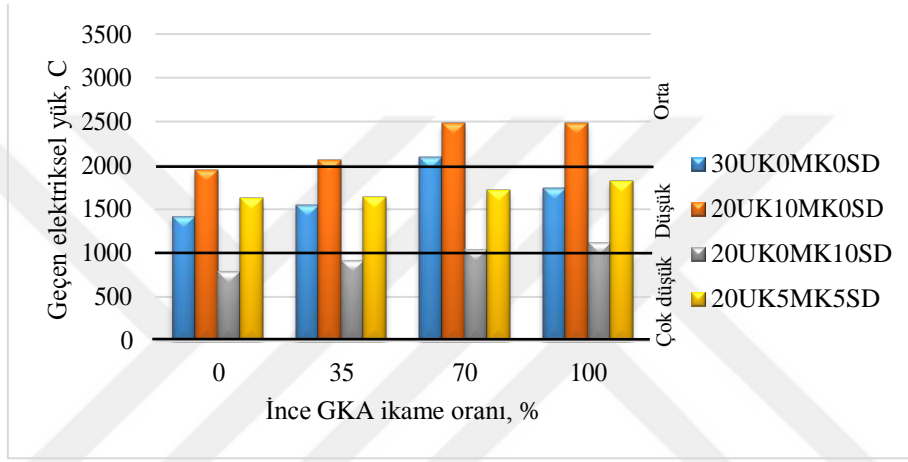
Hızlı klorür geçirirliliği deneyi 10 cm çapında silindir numuneden 5 cm yüksekliğinde kesilerek hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.24. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirirlilikleri

Şekil 4.24'de 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirirlilikleri verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere iri GKA ikame oranı arttıkça ölçülen hızlı klorür geçirirlilikleri tüm beton karışımlarında belirgin bir artış eğilimi göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların hızlı klorür

geçirimsizliklerinde oluşan artış; %30 UK içeren betonda %92, %10 MK içeren betonda %73, %10 SD içeren betonda %78 ve %5MK+%5SD içeren betonda %72 mertebesindedir. İri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizliklerinde %72 ila %92 arasında artış görülmektedir. ASTM C 1202 standardı değerlendirmesine göre; %0 GKA ve %10 SD içeren betonlar çok düşük geçirimsizlik sınıfında yer alırken diğer betonların düşük ve orta geçirimsizlik sınıfında yer aldığı görülmektedir.

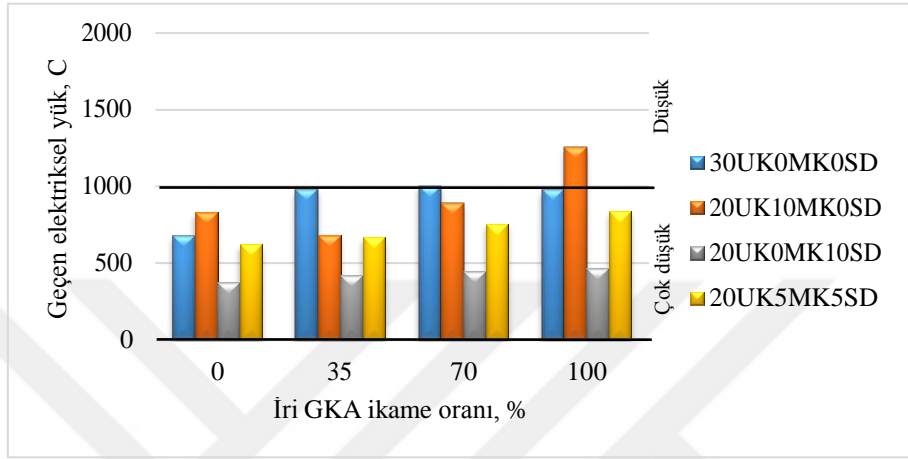


Şekil 4.25. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri

Şekil 4.25'de 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere ince GKA ikame oranı arttıkça tüm beton karışımları için hızlı klorür geçirimsizliklerinde hafif bir artış görülmektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA içeren betonların hızlı klorür geçirimsizlik değerlerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %23, %10 MK içeren betonda %27, %10 SD içeren betonda %41 ve %5MK+%5SD içeren betonda %12 mertebesindedir. İri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde betonların hızlı klorür geçirimsizlik değerlerinde %12 ila %41 oranında bir artış söz konusudur. ASTM C 1202 standardı değerlendirmesi uyarınca, %10 SD içeren tüm beton karışımları yaklaşık olarak çok düşük geçirimsizlik sınıfında yer aldığı görülmektedir.

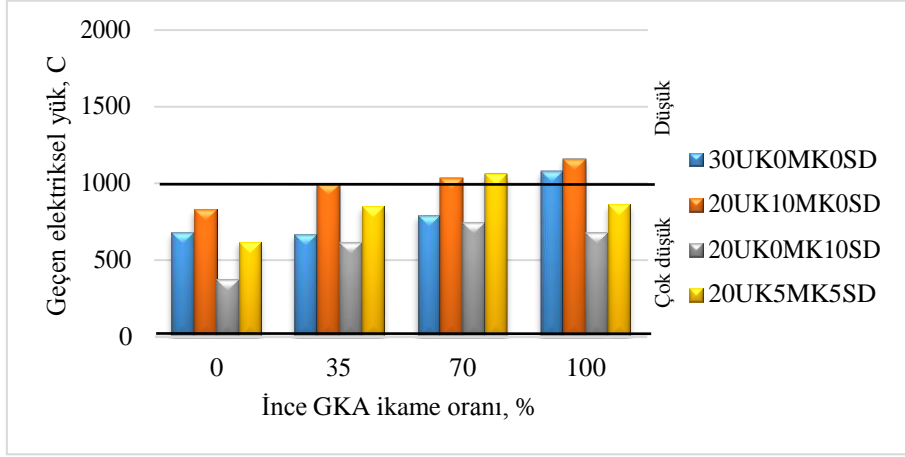
Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 birlikte değerlendirildiğinde iri GKA içeren beton karışımlarının hızlı klorür geçirimsizlikleri ince GKA içerenlere kıyasla tüm ikame oranları için daha yüksek olduğu ve ayrıca tüm beton karışımları için geçerli olmak üzere en düşük

klorür geçirirnililiği %10 SD içeren karışımlarda meydana geldiği görülmektedir. GKA içermeyen beton karışımları dikkate alındığında, %10 SD içeren betona kıyasla hızlı klorür geçirirnililiğindeki artış; %30 UK içeren betonda %78, %10 MK içeren betonda %145 ve %5MK+%5SD içeren betonda %105 mertebesindedir.



şekil 4.26. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirirnililikleri

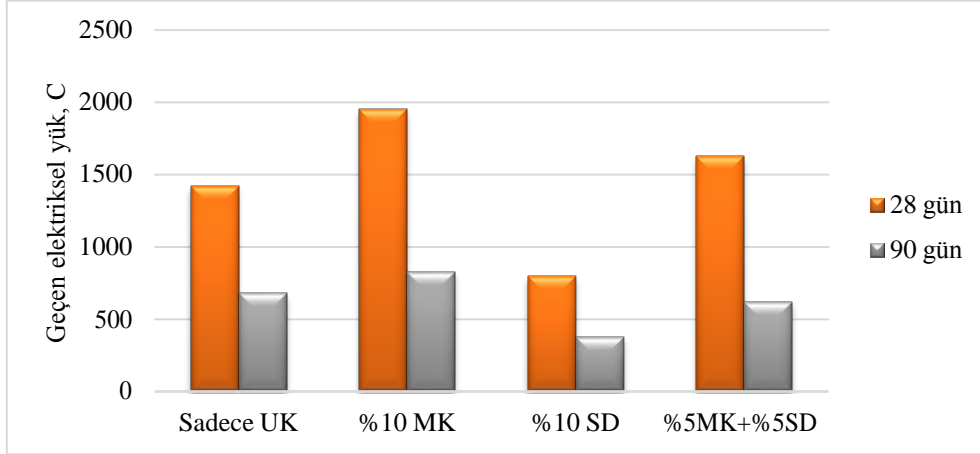
şekil 4.26'da 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirirnililikleri verilmektedir. şekilden görüleceği üzere iri GKA ikame oranı arttığa betonların hızlı klorür geçirirnililiklerinde çok hafif bir artış görülmektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 oranında iri GKA içeren betonların hızlı klorür geçirirnililiklerinde meydana gelen artış sırasıyla; %30 UK içeren betonda %45, %10 MK içeren betonda %51, %10 SD içeren betonda %25 ve %5MK+%5SD içeren betonda %35 mertebesindedir. İri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde hızlı klorür geçirirnililik değerlerinde %25 ila %51 oranında bir artış meydana gelmektedir. ASTM C 1202 standardı değerlendirmesine göre, %100 iri GKA ikameli ve %10 MK içeren beton düşük geçirirnililik sınıfında yer alırken diğer tüm betonlar çok düşük geçirirnililik sınıfında yer almaktadır.



Şekil 4.27. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri

Şekil 4.27'de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin hızlı klorür geçirimsizlikleri verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere ince GKA ikame oranı arttıkça SD içeren betonlar hariç olmak üzere diğer betonlarda hızlı klorür geçirimsizliğinde hafif bir artış görülmektedir. Buna karşın SD içeren betonlardan %70 ince GKA ikamelilerde hızlı klorür geçirimsizliği maksimum olmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 oranında ince GKA içeren betonların hızlı klorür geçirimsizliklerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %59, %10 MK içeren betonda %40, %10 SD içeren betonda %82 ve %5MK+%5SD içeren betonda %40 mertebesindedir. İnce agrega %100 oranında ince GKA ile ikame edildiğinde hızlı klorür geçirimsizliğinde %40 ila %82 arasında bir artış görülmektedir. ASTM C 1202 standardı değerlendirmesine göre, hemen hemen tüm beton karışımları çok düşük geçirimsizlik sınıfında yer almaktadır.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 birlikte değerlendirildiğinde her bir GKA ikame oranında en düşük klorür geçirimsizliği %10 SD içeren betonlarda görülmektedir. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında %10 SD içeren betona kıyasla hızlı klorür geçirimsizliğindeki artış; %30 UK içeren betonda %82, %10 MK içeren betonda %122 ve %5MK+%5SD içeren betonda %66 mertebelerindedir.



Şekil 4.28. GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen hızlı klorür geçirimsizlikleri

Şekil 4.28'de 28 ve 90 gün sonunda GKA içermeyen betonlar üzerinde ölçülen hızlı klorür geçirimsizlikleri görülmektedir. Kıyaslama yapıldığında, kür süresinin hızlı klorür geçirimsizliği üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.

GKA içermeyen betonlara göre GKA içeren betonların klorür geçirimsizliklerindeki artış beton karışımında farklı tür ve miktarda mineral katkı kullanarak önlemek mümkündür. Örneğin, Şekil 4.27'de %30 UK içeren ve %100 GKA ikame edilen beton karışımının GKA içermeyen beton karışımına kıyasla hızlı klorür geçirimsizliğinde ölçülen %92'lik artış karışımında %10 UK eksiltip yerine %10 SD ilave edildiğinde elimine edilebilir.

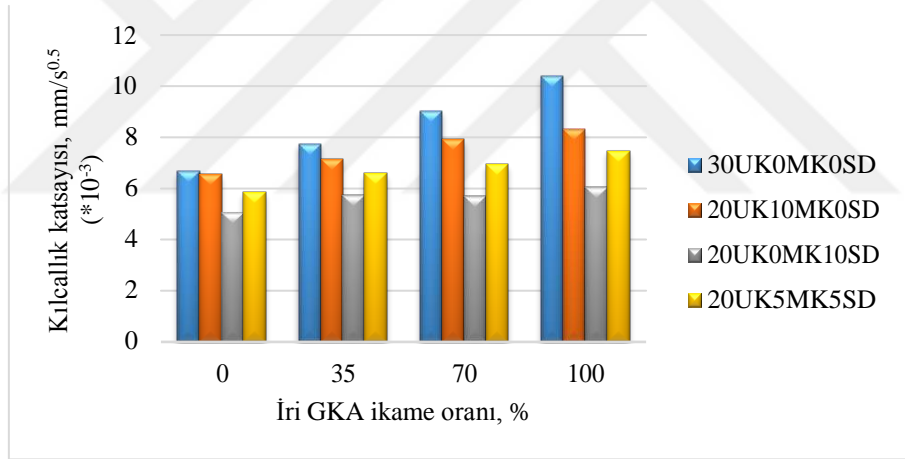
Silis dumanının diğer mineral katkılardan çok daha küçük boyuta sahip olması nedeniyle betonda dolgu etkisinin daha iyi olmaktadır ve bu nedenle SD içeren betonların klorür geçirimsizlikleri önemli derecede azalmaktadır. Metakaolin, diğer mineral katkılara nazaran klorür geçirimsizliklerini artırmıştır. Diğer yandan Kong vd. [213], RCA'daki gözenek ve çatlakların suyu emdiğini ve yeni arayüzeyde yüksek su içeriğine neden olduğunu ve bu nedenle yapıyı büyük kalsiyum hidroksit kristallerinin oluşturduğunu ve zayıflattığını belirtmektedir. Bu nedenle GKA içeriği klorür geçirimsizliğini artırmaktadır.

Kanish Kapoor vd. [179] yaptıkları çalışmada %30UK + %70 çimento içeren KYB'lerde %100 iri GKA ikame edilenlerin GKA içermeyenlere kıyasla klorür geçirimsizliklerinin %13 mertebesinde daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmamızda bu değerinde %50 mertebesine varan oranda bir artış görülmektedir. Bunun bir nedeninin çalışmamızda kullanılan bağlayıcı miktarının  $50 \text{ kg/m}^3$  civarında daha az olması ve kullanılan GKA'nın daha fazla boşluklu olmasına bağlanabilir. Çünkü çalışmamızda GKA

agregasının su emmesi kıyası yapılan çalışmadan %75 oranında daha yüksektir. Kanish Poor vd.[179] gerçekleştirdikleri çalışmada kür süresinin 28 günden 90 güne çıkması ile klorür geçirimsizlik değerlerinde %60'a varan oranda azalma bulmuşlardır. Çalışmamızda bu azalma %100'den daha fazla olmuştur. Bunun nedeninin çalışmamızda kullanılan GKA'nın daha gözenekli bir yapıya sahip olmasıdır. Sonuçların malzeme özellikleri doğrultusunda literatürdeki çalışmalarla uyum içinde olduğu görülmektedir.

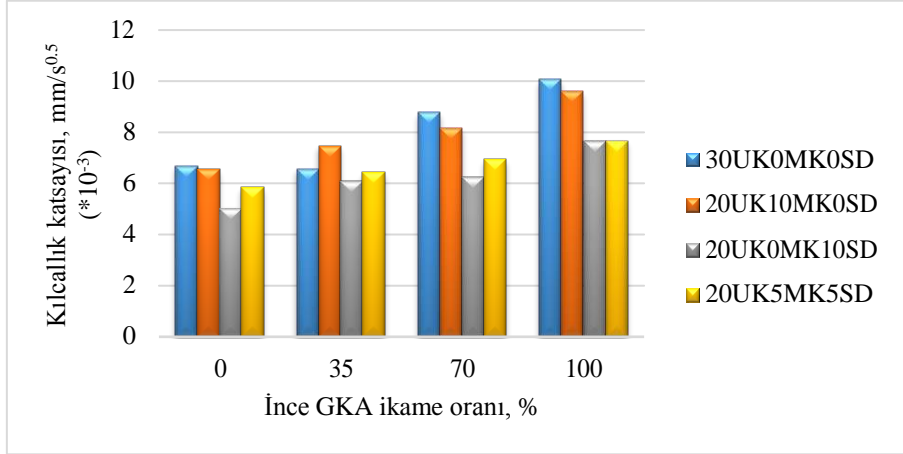
#### 4.8. Kılcallık Değerlendirmesi

Kılcallık deneyi 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde silindir numuneden 5 cm yüksekliğinde kesilerek hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda hesaplanan kılcallık katsayıları Şekil 4.29 ila Şekil 4.32 verilmektedir.



Şekil 4.29. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları

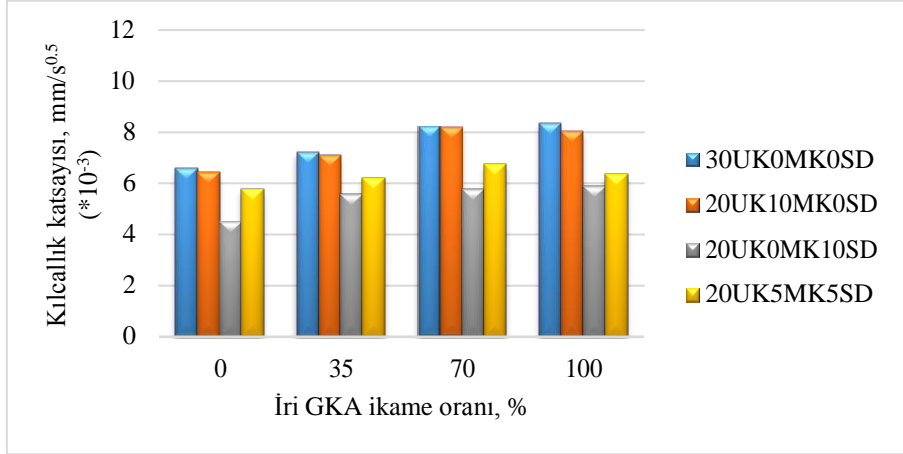
Şekil 4.29'da 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere iri GKA ikame oranı arttıkça kılcallık katsayıları %10 SD içerenlerde hafif olmak üzere diğer beton karışımlarında belirgin bir artış göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların kılcallık katsayılarındaki artış; %30 UK içeren betonda %56, %10 MK içeren betonda %27, %10 SD içeren betonda %19 ve %5MK+%5SD içeren betonda %28 mertebesindedir. Özetle, iri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde betonların kılcallık katsayılarında %19 ila %56 oranında bir artış olmaktadır.



Şekil 4.30. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları

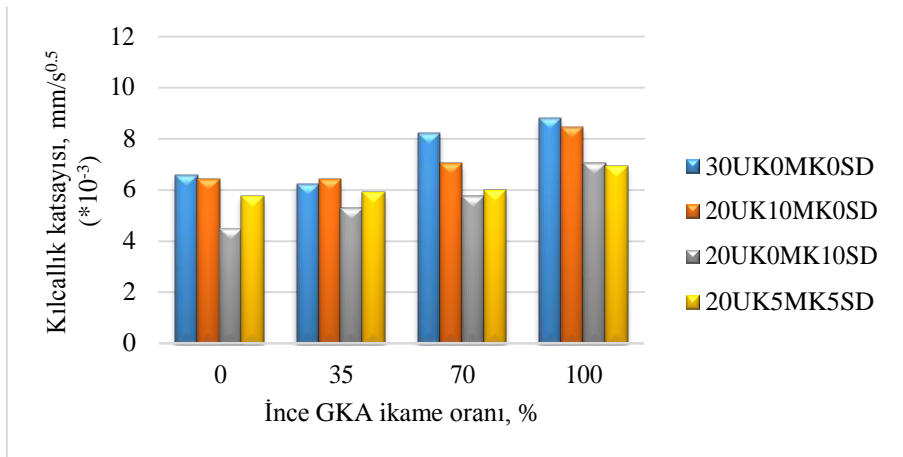
Şekil 4.30'da 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere ince GKA ikame oranı arttıkça betonların kılcallık katsayıları belirgin bir biçimde artmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA ikameli betonların kılcallık katsayılarında meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %51, %10 MK içeren betonda %47, %10 SD içeren betonda %52 ve %5MK+%5SD içeren betonda %31 mertebesindedir. İnce agrega %100 oranında ince GKA ile ikame edildiğinde kılcallık katsayıları %31 ila %52 arasında artışlar göstermektedir.

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 birlikte değerlendirildiğinde tüm karışımlar için geçerli olmak üzere ölçülen kılcallık katsayıları %10 SD içeren betonlar için en düşüktür. Bu durum, kılcal geçirimsizliği azaltmak açısından SD mineral katkı maddesinin diğer mineral katkılara kıyasla daha olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında, %10 SD içeren betonların kılcallık katsayılarınının %30 UK içeren betondan %24, %10 MK içeren betondan %21 ve %5MK+%5SD içeren betondan %14 daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.31. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları

Şekil 4.31'de 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü gibi, iri GKA ikame oranı arttıkça betonların kılcallık katsayıları genel olarak bir artış eğilimindedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA ikameli betonların kılcallık katsayılarında meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %27, %10 MK içeren betonda %25, %10 SD içeren betonda %30 ve %5MK+%5SD içeren betonda %10 mertebesindeir. İri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde kılcallık katsayılarında %10 ila %30 arasında artışlar görülmektedir.



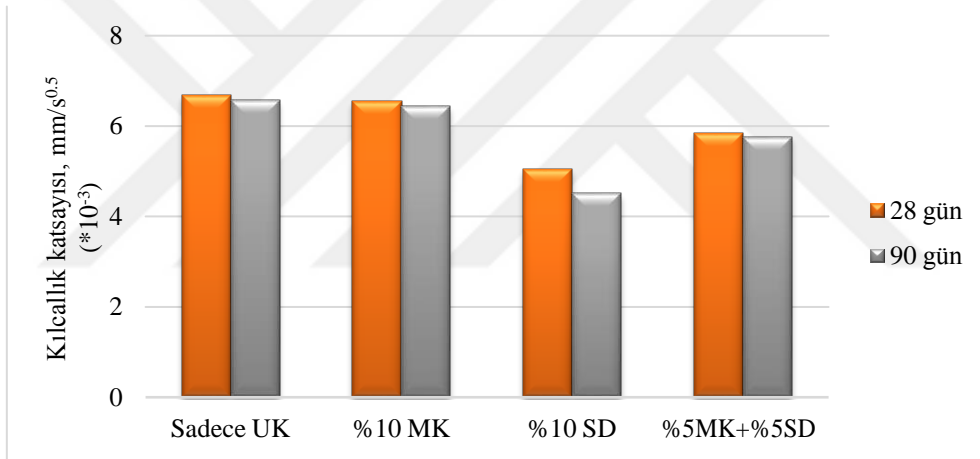
Şekil 4.32. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları

Şekil 4.32'de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin kılcallık katsayıları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü gibi, ince GKA ikame oranı arttıkça betonların kılcallık katsayıları artış eğilimindedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA



ikameli betonların kılcallık katsayılarında meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %34, %10 MK içeren betonda %32, %10 SD içeren betonda %57 ve %5MK+%5SD içeren betonda %20 mertebesindedir. Kısaca, ince agreganın %100 oranında ince GKA ile ikame edilmesi durumunda betonların kılcallık katsayılarında %20 ila %57 arasında artışlar görülmektedir.

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 birlikte değerlendirildiğinde tüm GKA ikame oranlarında geçerli olmak üzere en düşük kılcallık katsayısı %10 SD içeren betonlarda görülmektedir. GKA içermeyen betonlar dikkate alındığında, %10 SD içeren betonun kılcallık katsayısı %30 UK içeren betondan %31, %10 MK içeren betondan %31 ve %5MK+%5SD içeren betondan %22 mertebesinde daha düşüktür. Sonuç itibariyle SD diğer mineral katkılarına kıyasla betonun kılcal geçirimliliği bakımından en uygun mineral olduğu söylenebilir.



Şekil 4.33. GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen kılcallık katsayıları

Şekil 4.33'de 28 ve 90 gün sonunda GKA içermeyen betonlar üzerinde ölçülen kılcallık katsayıları görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere, kür süresinin 28 günden 90 güne uzatılması ölçülen kılcallık katsayıları açısından önemli bir fark yaratmamaktadır. Buna karşın aynı kıyaslama beton bileşimi açısından yapıldığında SD'nin kılcallık üzerindeki olumlu etkisi oldukça belirginleşmektedir. Bu etki SD ilave miktarı arttıkça daha da etkin olduğu açıkça görülmektedir.

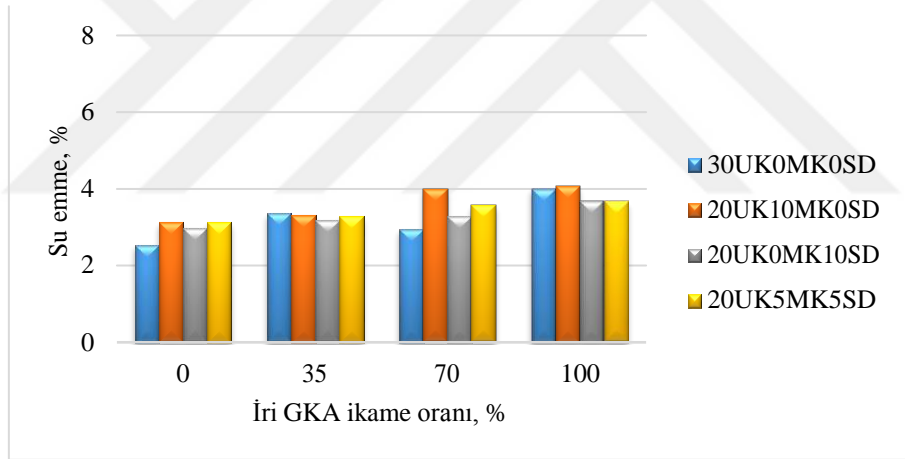
GKA içermeyen betonlara kıyasla GKA içeren betonların kılcallık katsayılarında meydana gelen artış betonda farklı mineral katkı maddelerinin farklı kombinasyonlarda kullanmak suretiyle önlenemez. Şekil 4.29'da görüleceği üzere, %30 UK içeren ve %100 iri

GKA ikameli betonun GKA içermeyen betona kıyasla kılcallık katsayısında meydana gelen %56 mertebesindeki artışı karışımdan %10 UK çıkarıp %10 SD eklemek suretiyle elimine etmek mümkün olabileceği görülmektedir.

Kong vd. [213], GKA'daki gözenek ve çatlakların suyu emdiğini ve yeni arayüzeyde yüksek su içeriğine neden olduğunu, bu nedenle büyük kalsiyum hidroksit kristallerinin yapıyı oluşturduğunu ve zayıflattığını belirtmiştir. Bu nedenle GKA içeren betonun GKA içermeyene kıyasla daha yüksek kılcallık katsayısına sahip olduğunu söylemek mümkündür.

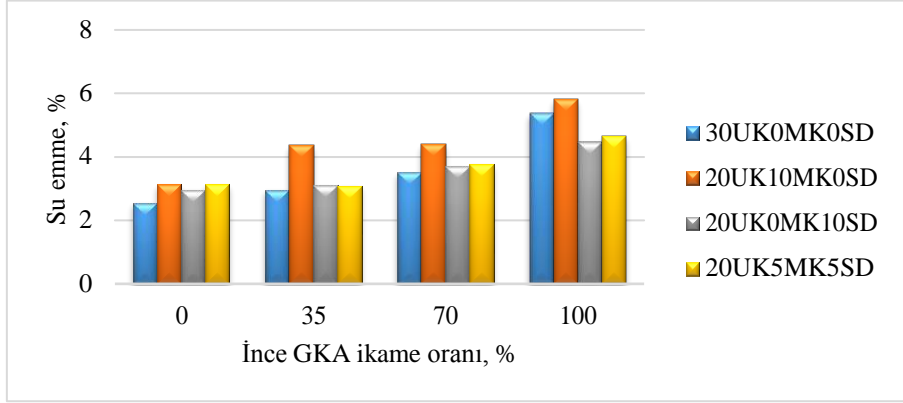
#### 4.9. Su Emme Değerlendirmesi

Su emme deneyi için 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. İlgili şekillerde verilen ölçümler iki adet numunenin ortalaması şeklinde hesaplanmıştır.



Şekil 4.34. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri

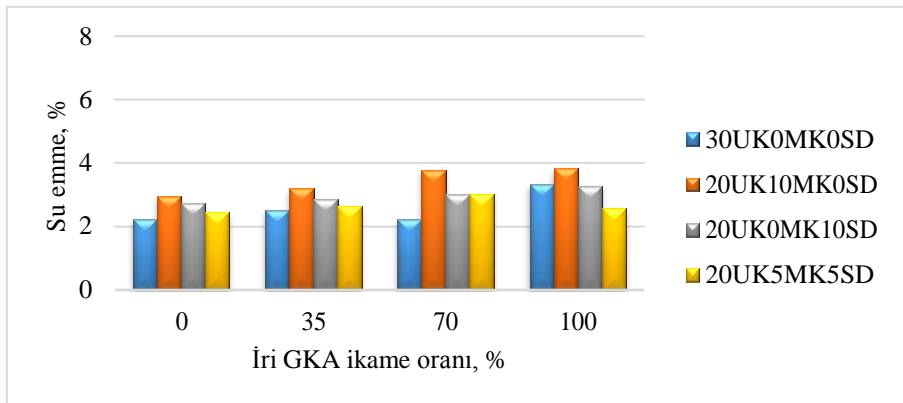
Şekil 4.34'de 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin su emmeleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere iri GKA ikame oranı artışı ile betonların su emmeleri genel olarak artış göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların su emmelerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %58, %10 MK içeren betonda %30, %10 SD içeren betonda %24 ve %5MK+%5SD içeren betonda %17 mertebesinde. Özetle, iri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde su emmede %17 ila %58 mertebesinde artışlar meydana gelmektedir.



Şekil 4.35. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri

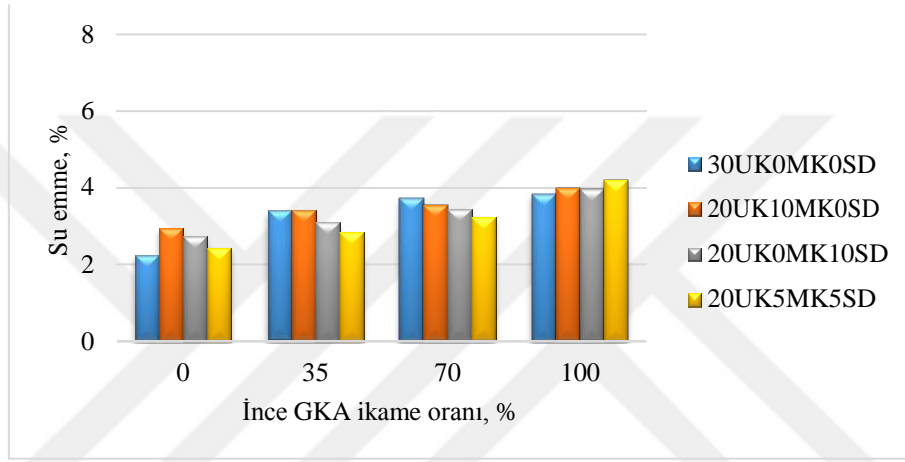
Şekil 4.35'de 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere ince GKA ikame oranı arttıkça betonların su emme miktarları artmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA içeren betonların su emmelerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %111, %10 MK içeren betonda %86, %10 SD içeren betonda %51, %5MK+%5SD içeren betonda %49 mertebesindedir. Sonuç itibariyle ince agrega %100 oranında ince GKA ile ikame edildiğinde betonların su emmelerinde %49 ila %111 arasında bir artış göstermektedir.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 birlikte değerlendirildiğinde, ince GKA ikameli betonların su emme değerleri iri GKA ikameli betonlara kıyasla genellikle daha yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca tüm GKA içeren betonlar için geçerli olmak üzere en yüksek su emme değerine sahip betonlar %10 MK içeren betonlar olduğu görülmektedir. Buradan çıkarılabilecek sonuç, MK mineral katkısının diğer mineral katkılara kıyasla su emme açısından en olumsuz olanıdır.



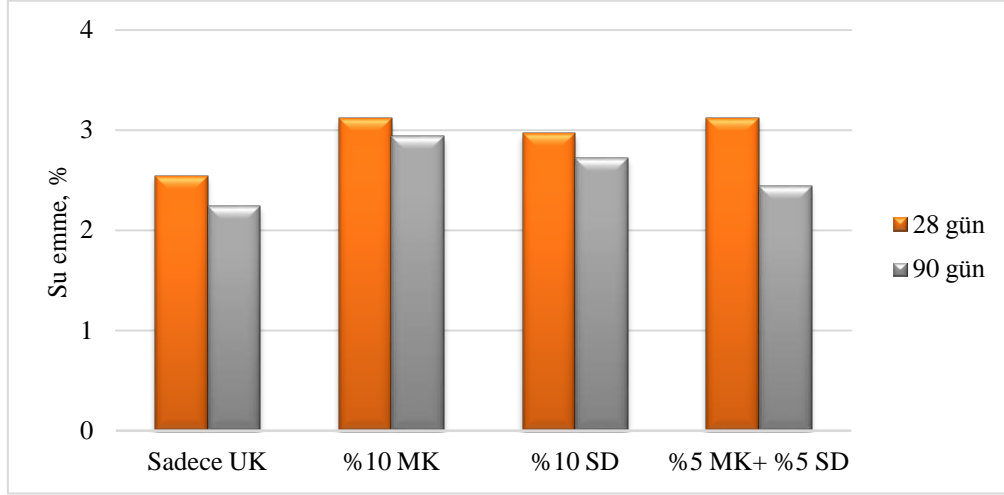
Şekil 4.36. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri

Şekil 4.36'da 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin su emmeleri verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere, iri GKA ikame oranı arttıkça betonların su emmeleri genellikle artmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren betonların su emmesinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %49, %10 MK içeren betonda %31, %10 SD içeren betonda %21 ve %5MK+%5SD içeren betonda %6 mertebesindedir. İri agreganın tümünün iri GKA ile ikame edilmesi durumunda su emmede %6 ila %49 arasında değişen artışlar söz konusudur.



Şekil 4.37. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri

Şekil 4.37'de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin su emme değerleri verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere ince GKA ikame oranı arttıkça betonların su emmeleri artmaktadır. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 ince GKA içeren betonların su emmesinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %71, %10 MK içeren betonda %36, %10 SD içeren betonda %45 ve %5MK+%5SD içeren betonda %72 mertebesindedir. İnce agreganın tamamı ince GKA ile ikame edildiğinde su emmede %36 ila %72 mertebesinde artışlar söz konusudur.



Şekil 4.38. GKA içermeyen KYB'ler için 28 ve 90 gün sonunda ölçülen su emme değerleri

Şekil 4.38'de 28 ve 90 gün sonunda GKA içermeyen betonlar üzerinde belirlenen su emmeler verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere kür süresi 28 günden 90 güne uzatıldığında kılcallık katsayıları %6 ila %22 mertebesinde azalma göstermektedir.

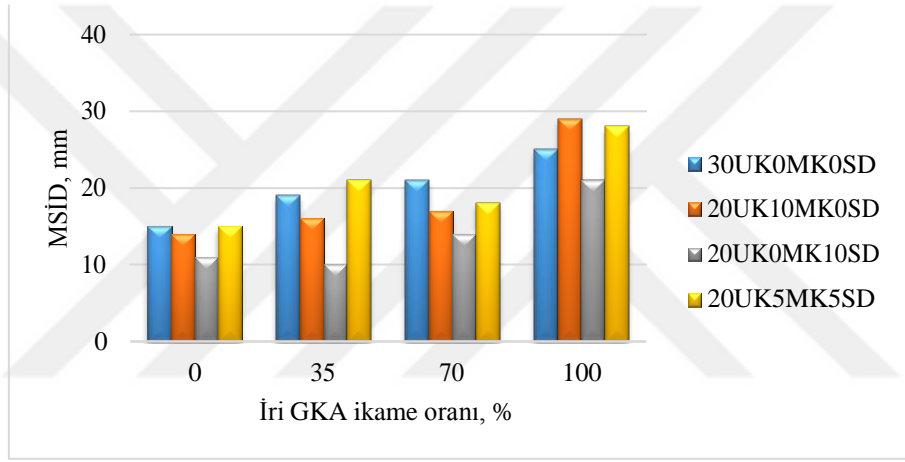
Genel bir sonuç olarak, GKA içermeyen betonlara kıyasla GKA içeren betonların su emmesinde meydana gelen artış betonda farklı mineral katkıları farklı oranda kullanıldığında önlenebileceği söylemek olasıdır. Örneğin; Şekil 4.36'da görüleceği gibi, %10 MK içeren betonda %100 iri ikame edildiğinde su emmede %31 mertebesinde bir artışın meydana geldiği karışımdan %5 MK çıkarıp %5 SD eklendiğinde elimine etmek mümkündür.

GKA çevresine yapışmış bulunan eski çimento hamuru ile eski ve yeni arayüzeylerin suyun absorbe edilmesini artırdığı için beton daha boşluklu bir yapı kazanmaktadır. Su emmedeki artışın nedeni buna bağlanmaktadır [213].

Grdic ve ark. [187] yaptıkları çalışmada %0, %50 ve %100 oranında iri GKA ikameli KYB'ler üretmişlerdir. %50 ve %100 iri GKA içeren betonların su emmelerinde GKA içermeyen betona kıyasla sırasıyla %42 ve %67 mertebesinde azalmaların olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada ise %100 iri GKA ile üretilen betonların su emmesinin GKA içermeyen betona kıyasla artışın %50'den daha fazla olduğu rapor edilmektedir [140]. Bu sonuçlar çalışmamızla örtüştüğünü söylemek mümkündür.

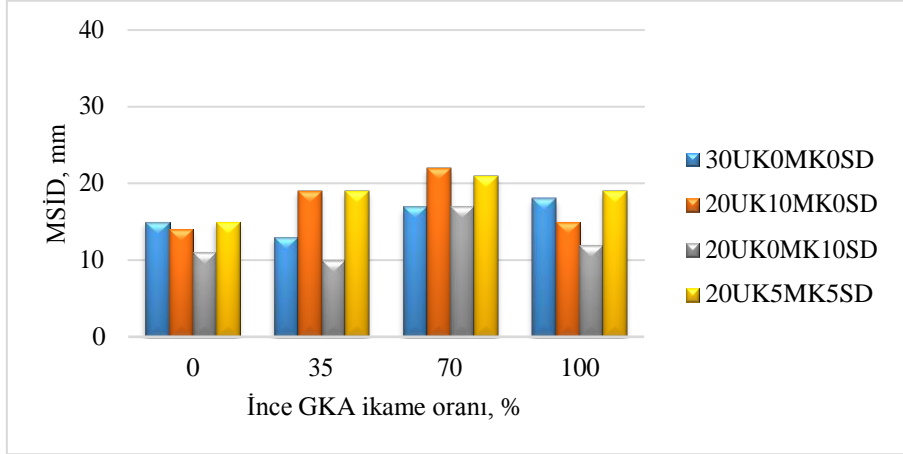
#### 4.10. Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği Değerlendirmesi

Basınç altında maksimum su işleme derinliğini belirlemek amacıyla 15 cm küp numuneler kullanılmıştır. Deneysel 28 gün ve 90 gün kür süreleri için ikişer numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Maksimum su işleme derinliği (MSİD) şekillerde iki numune üzerinde belirlenen değer olarak gösterilmektedir. Deney doğası gereği oldukça hassas bir deneydir. Örneğin betonun heterojen yapısı sonuçlar üzerinde çok ciddi farklılıkların meydana gelmesiyle sonuçlanabilir. Basınçlı suyun bu tür bölgeden kolaylıkla ilerleyerek oldukça yüksek bir su derinliği değerine ulaşabilmektedir.



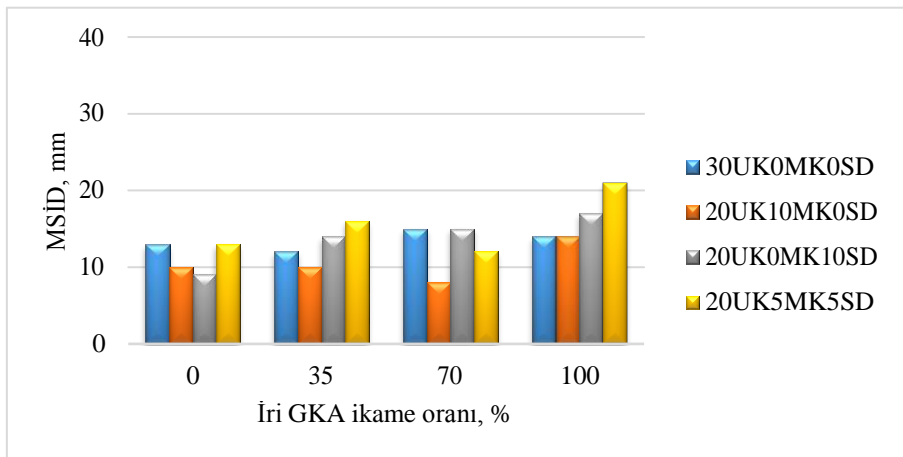
Şekil 4.39. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri

Şekil 4.39'da 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin MSİD değerleri verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, iri GKA ikame oranı arttıkça MSİD değerlerinin belirgin bir biçimde arttığı görülmektedir. GKA içermeyen betonlar ile %100 iri GKA ikameli betonlar kıyaslandığında MSİD değerlerindeki artış; %30 UK içeren betonda %66, %10 MK içeren betonda %107, %10 SD içeren betonda %91 ve %5MK+%5SD içeren betonda %87 mertebesindedir. TS 13515 [214] standardı uyarınca bir betonun zararlı ortamlara karşı geçirimsiz kabul edilebilmesi için MSİD değerinin 30 mm altında olması gerekmektedir. Bu koşulun tüm betonlar tarafından sağlandığı görülmektedir. Ayrıca tüm iri GKA içeren beton karışımları için belirlenen MSİD değerleri %10 SD içeren karışımlarda minimum olduğu görülmektedir.



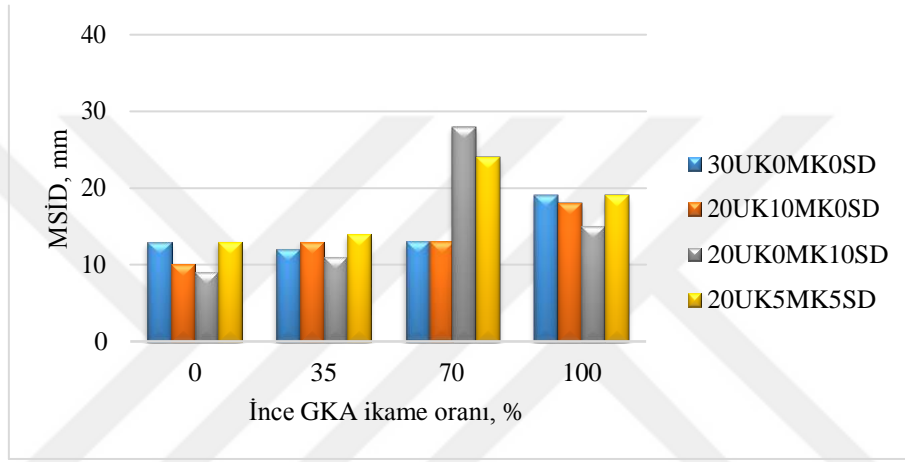
Şekil 4.40. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri

Şekil 4.40'da 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'ler için belirlenen MSİD değerleri verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, MSİD değerleri %70 GKA ikameli tüm karışımlar için maksimum olmaktadır. İnce agregaya %100 oranında ince GKA ile ikame edildiğinde MSİD değerlerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %20, %10 MK içeren betonda %7, %10 SD içeren betonda %9 ve %5MK+%5SD içeren betonda ise %27 mertebesindedir. Ölçülen MSİD değerlerine göre tüm betonların TS 13515 standardı uyarınca zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfında olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm ince GKA içeren beton karışımları için belirlenen MSİD değerleri %10 SD içeren karışımlarda minimum olduğu görülmektedir. Buradan görüldüğü üzere SD diğer mineral katkılarına kıyasla su işleme derinliği açısından daha yararlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.41. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'ler için MSİD değerleri

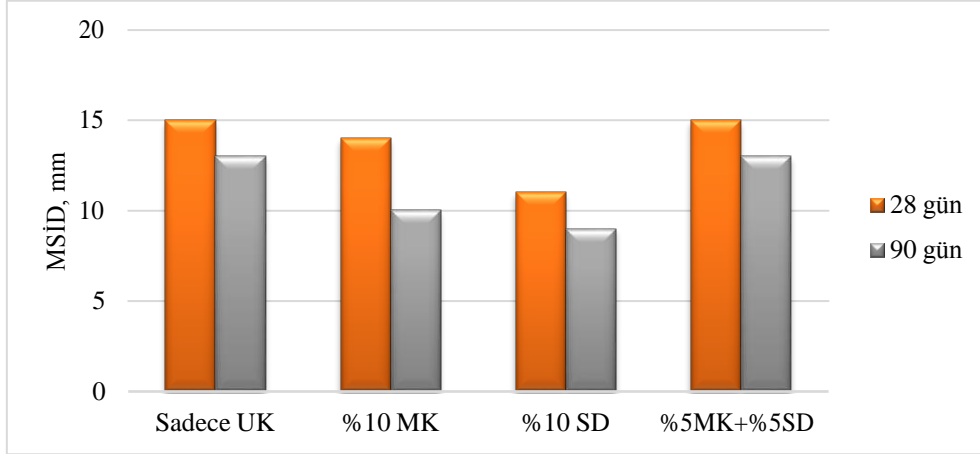
Şekil 4.41’de 90 kür gören iri GKA ikameli betonlar için belirlenen MSİD değerleri verilmektedir. Şekilden görüleceği gibi iri GKA ikamesinin, %100 iri GKA ikameli betonlar hariç, betonlar için ölçülen MSİD değerleri üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. %100 GKA ikameli betonlar açısından değerlendirme yapıldığında, iri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde MSİD değerlerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %8, %10 MK içeren betonda %40, %10 SD içeren betonda %89 ve %5MK+%5SD içeren betonda ise %61 mertebesindedir.



Şekil 4.42. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’ler için MSİD değerleri

Şekil 4.42’de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’ler için ölçülen MSİD değerleri verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, MSİD değerleri %100 GKA ikameli betonlar dışında tüm karışımlar için önemli bir değişkenlik göstermemektedir. Burada %70 GKA ikameli betonlardan SD içerenler için ölçülen gözle görülür yüksek MSİD değerleri tamamen deneysel hata kaynaklı değerler olduğu düşünülmektedir. %100 GKA ikameli betonlar açısından değerlendirme yapıldığında, iri agrega %100 oranında iri GKA ile ikame edildiğinde MSİD değerlerinde meydana gelen artış; %30 UK içeren betonda %46, %10 MK içeren betonda %80, %10 SD içeren betonda %67 ve %5MK+%5SD içeren betonda %46 mertebesindedir.





Şekil 4.43. GKA içermeyen KYB'ler için kür süresine ilişkin MSİD ölçümlerinin grafiksel gösterimi

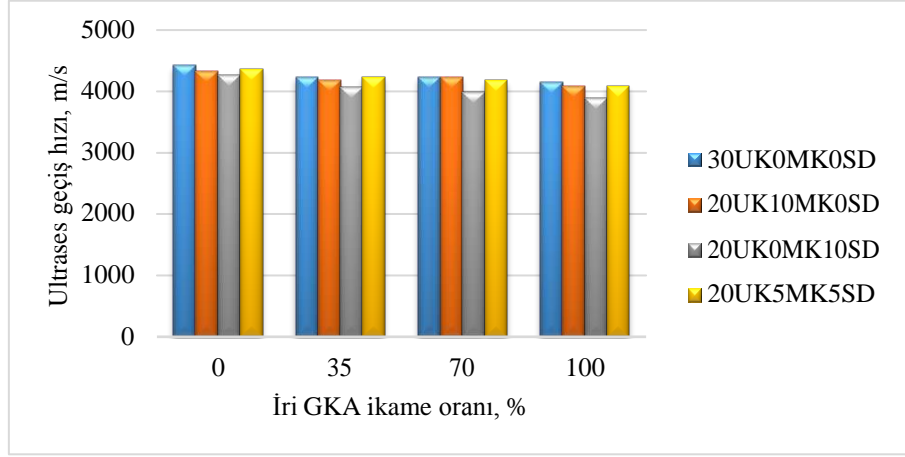
Kür süresinin MSİD değerleri üzerindeki etkisini anlamak için GKA içermeyen betonlar dikkate alınarak Şekil 4.43 oluşturulmuştur. İlgili şekilden görüldüğü üzere kür süresinin 28 günden 90 güne uzaması sonucu betonların MSİD değerlerinde %13 ila %29 mertebesinde azalmalar meydana geldiği görülmektedir.

28 gün ve 90 gün kür süresi sonunda betonlar üzerinde ölçülen MSİD değerleri 30 mm altında kaldıkları için zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfında yer almıştır. Bu nedenle %100 ince GKA veya %100 iri GKA ikameli betonlar su işleme derinliği açısından herhangi bir sorun oluşturmayacağı anlaşılmaktadır.

MSİD değerlerinin artışı GKA çevresinde yapışmış olan eski çimento hamurunun daha geçirgen olmasına ve iki farklı arayüzeyin su geçirimsizliğini artırdığına bağlanabilir.

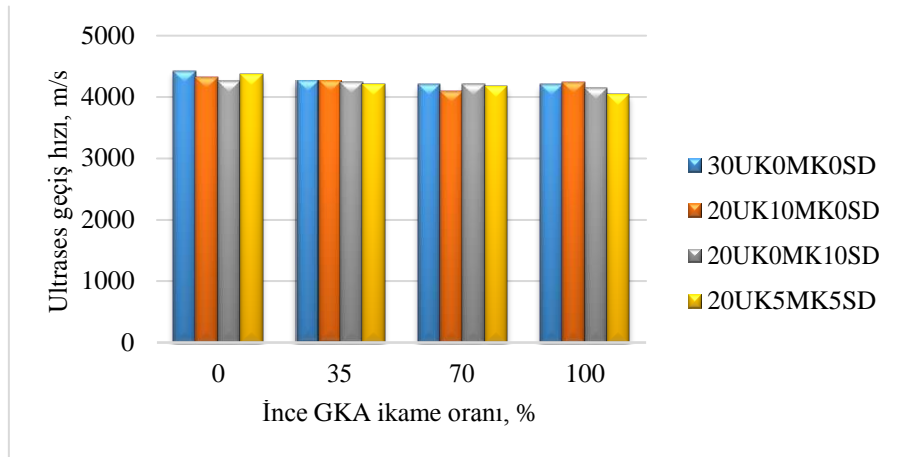
#### 4.11. Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi

Ultrases geçiş hızı iki adet 10 cm küp numuneler üzerinde ölçülmüştür. Suyu doymun numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyde numunelerin karşılıklı yüzlerine yerleştirilen ses verici ve ses alıcılar vasıtasıyla numune içinden sesin geçiş süresi ölçülmüştür. Mikrosaniye cinsinden ölçülen geçiş süresinden yol/zaman formülü vasıtasıyla ultrases geçiş hızı (m/s) belirlenmiştir.



Şekil 4.44. 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı

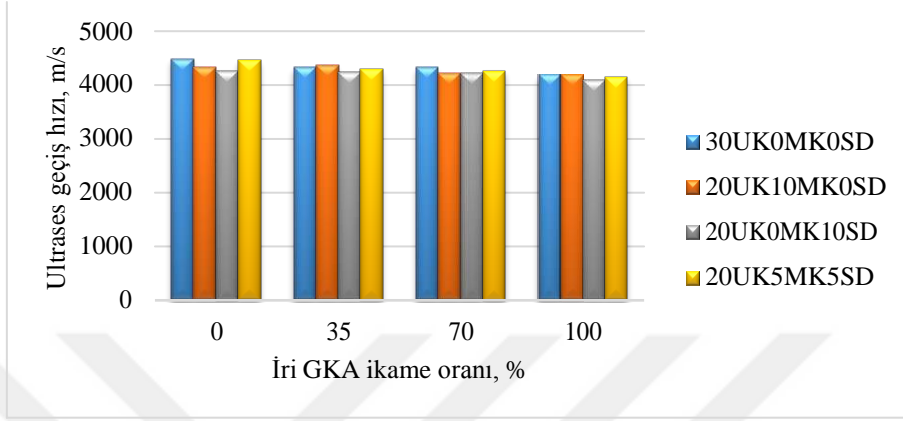
Şekil 4.44'de 28 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin belirlenen ultrases geçiş hızları verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere iri GKA ikame oranı arttıkça ultrases geçiş hızının çok hafif azaldığı görülmektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA içeren tüm beton karışımları için geçerli olmak üzere ultrases geçiş hızında ortalama %6-7 mertebesinde bir azalma söz konusudur. Tüm GKA ikame oranları için geçerli olmak kaydıyla ultrases geçiş hızı %10 SD içeren betonlarda minimumdur. IS 13311 [204] standardı uyarınca tüm betonların iyi kalite beton sınıfında yer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.45. 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı

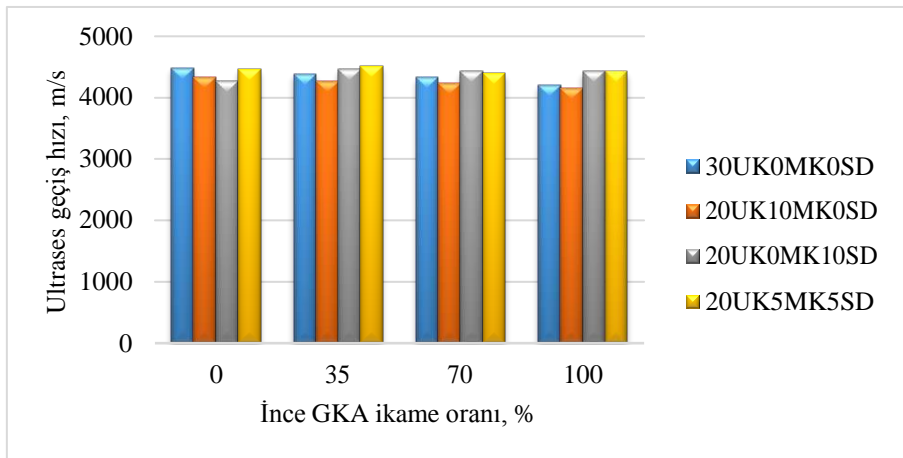
Şekil 4.45'de 28 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin belirlenen ultrases geçiş hızları verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere ince GKA ikame oranı arttıkça ultrases geçiş hızı tüm karışımlar için geçerli olmak kaydıyla hafif bir azalış göstermektedir. GKA

içermeyen betonlara kıyasla %100 oranında ince GKA içeren betonların ultrases geçiş hızlarında meydana gelen azalma ortalama olarak %4 mertebesindedir. IS 13311 [204] standardı uyarınca tüm betonların iyi kalite beton sınıfında yer aldığı görülmektedir.



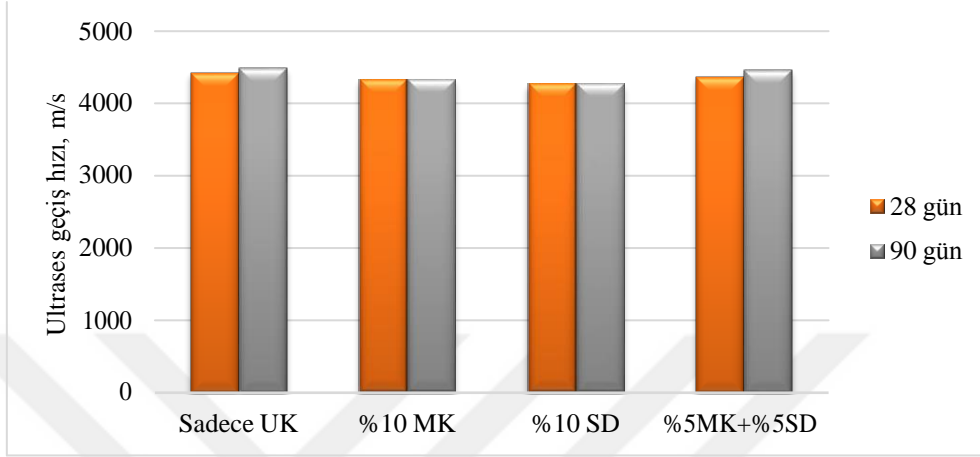
Şekil 4.46. 90 gün kür gören iri GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı

Şekil 4.46'da 90 kür gören iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin hesaplanan ultrases geçiş hızları verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere iri GKA ikame oranı arttıkça ultrases geçiş hızı genel itibariyle tün betonlar için azalma eğilimi göstermektedir. GKA içermeyen betonlara kıyasla %100 iri GKA ikameli betonların ultrases geçiş hızı ortalama %5-6 mertebesindedir. Tüm GKA ikame oranları için geçerli olmak üzere en düşük ultrases geçiş hızı %10 SD içeren betonlarda ölçülmüştür. IS 13311 [204] standardı uyarınca tüm betonların iyi kalite beton sınıfında yer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.47. 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB'lerin ultrases geçiş hızı

Şekil 4.47’de 90 gün kür gören ince GKA ikameli KYB’lere ilişkin belirlenen ultrases geçiş hızları verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, ince GKA ikame oranı artışının ultrases geçiş hızı üzerinde etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir.



Şekil 4.48. GKA içermeyen KYB’ler için kür süresine ilişkin ultrases geçiş hızı değişiminin grafiksel gösterimi

Kür süresinin betonların ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla GKA içermeyen betonlar dikkate alınarak Şekil 4.48 oluşturulmuştur. Şekilden görüleceği gibi kür süresinin 28 günden 90 güne uzatılmasının ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir.

Sesin geçiş hızı yoğun ortamda daha yüksek boşluklu ortamda daha yavaştır. Betonlarda GKA içeriğinin artışı ile beton daha boşluklu bir hale gelmekte ve yoğunluğu azalmaktadır. Bu da sesin beton içinde geçiş hızını azaltmaktadır. Bu nedenle ultrases geçiş hızı GKA ikame oranı artışı ile azalmaktadır.

#### 4.12. KYB’lerde Yüksek Sıcaklık Etkisi

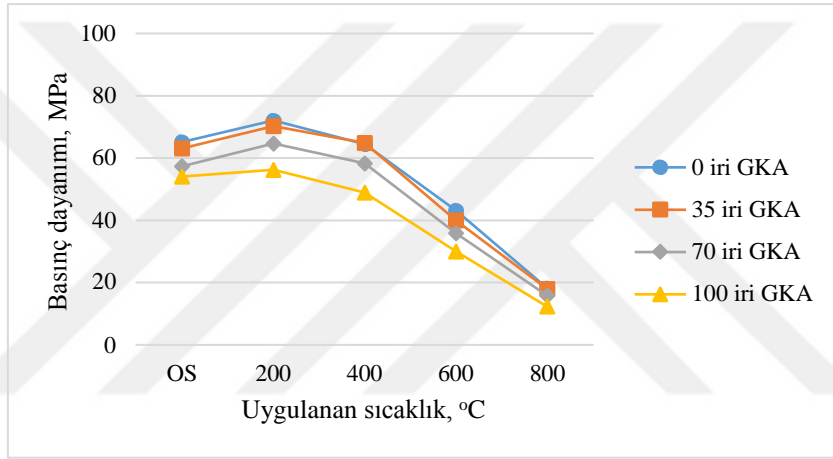
KYB’ler üzerinde yüksek sıcaklık etkisi, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı kapsamında değerlendirilmiştir. Değerlendirme 28 ve 90 gün kür gören numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sıcaklıkları 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla oda sıcaklığı (20°C)’de değerlendirmeye dâhil edilmiştir. Her bir kür koşulu ve sıcaklık düzeyi için değerlendirme iki adet 10 cm küp numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, üzerinde ultrases geçiş hızı deneyi gerçekleştirildikten

sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Grafiklerde, OS kısaltması oda sıcaklığını ifade etmektedir.

#### 4.12.1. Yüksek Sıcaklığa Maruz KYB'lerin Basınç Dayanımı Değerlendirmesi

##### 4.12.1.1. 28 Gün Kür Gören Betonlar İçin Basınç Dayanımı Değerlendirmesi

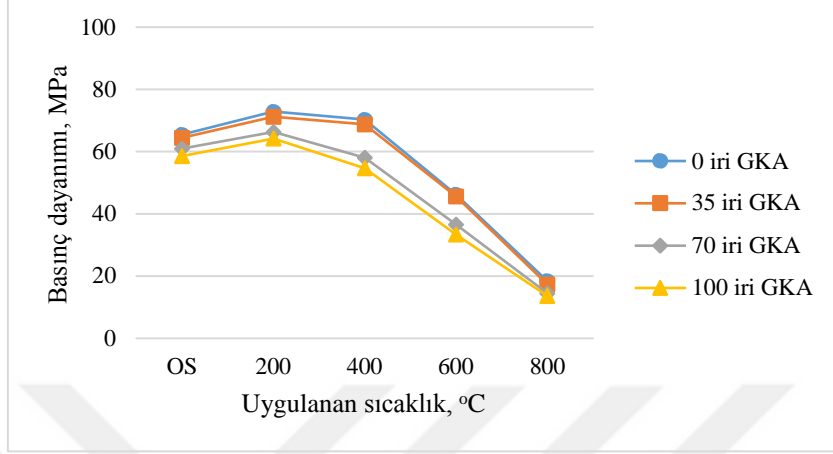
Şekil 4.49'da farklı sıcaklıklara maruz %30 UK içeren ve iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin elde edilen basınç dayanımları verilmektedir.



Şekil 4.49. %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

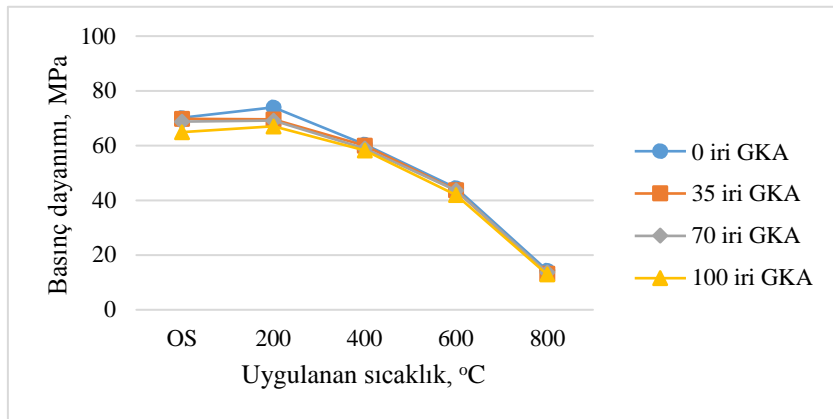
Şekil 4.49'dan görüldüğü üzere OS ortamında tutulan betonların basınç dayanımları %100 GKA ikameli betonların basınç dayanımları hariç diğer betonların basınç dayanımlarında 400°C'ye kadar ciddi kayıplar meydana gelmediği görülmektedir. Ancak 400°C üstü sıcaklıklarda tüm betonların basınç dayanımlarında önemli kayıpların meydana geldiği gözlemlenmektedir. Dayanımdaki kayıp GKA ikame oranı arttıkça daha da belirginleşmektedir. Oda sıcaklığındaki betonların basınç dayanımına kıyasla, %100 GKA içeren betonlar hariç, 200°C'ye maruz betonların basınç dayanımındaki artış buharlaşma nedeniyle meydana gelen su kaybına bağlı olarak betonun bünyesinde dayanım kaybına neden olabilecek düzeyde hasarların oluşmamasına ve anhidrate bileşenlerin sıcaklıkla birlikte hızla hidrate olmasına bağlanabilir. %100 iri GKA ikameli betonların basınç dayanımları diğer betonların basınç dayanımlarına kıyasla tüm sıcaklıklarda geçerli olmak

üzere daha düşük dayanımlar vermektedir. 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımları oda sıcaklığındakilere kıyasla yaklaşık %72 mertebesinde daha düşüktür.



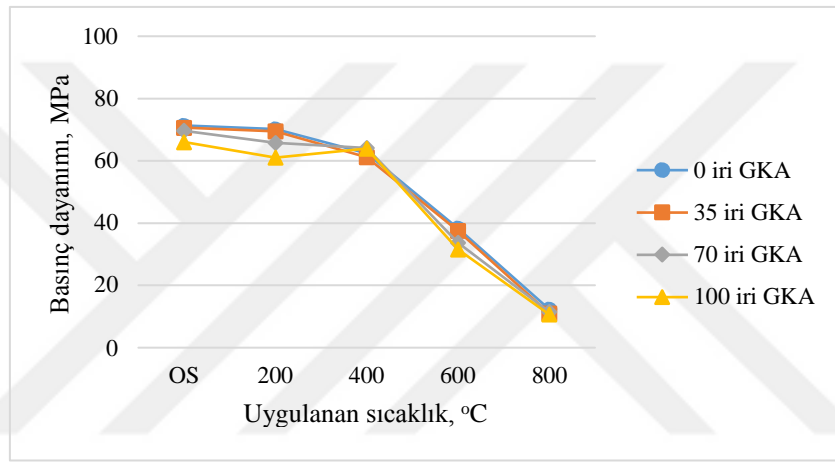
Şekil 4.50. %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.50'de %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere, %100 GKA ikameli betonların basınç dayanımları hariç, betonların basınç dayanımlarında 400°C'ye kadar herhangi bir azalma görülmemektedir. Hatta %0 ve %35 GKA ikameli betonların basınç dayanımlarında hafif bir artıştan dahi söz edilebilir. 400°C üstü sıcaklıklarda tüm betonların basınç dayanımları çok belirgin biçimde azalmaktadır. Bileşimden bağımsız olarak 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımları oda sıcaklığındakilere kıyasla %74 mertebesinde daha düşüktür.



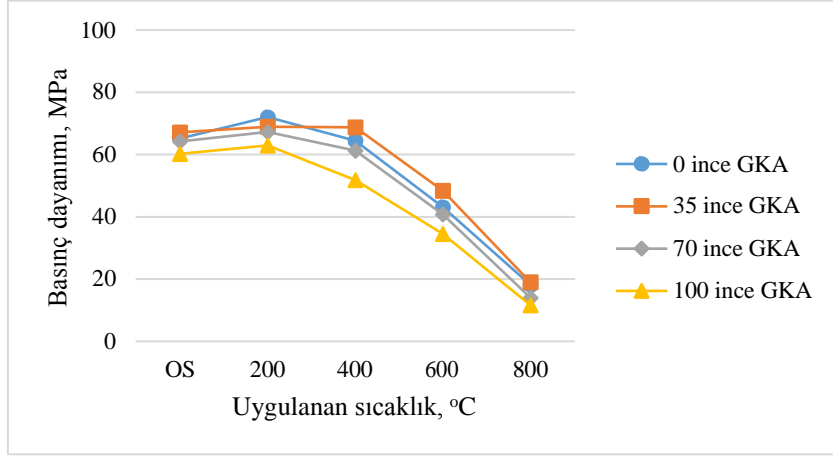
Şekil 4.51. %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.51’de %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere betonların basınç dayanımları 200°C sıcaklığa kadar hafif bir artış gösterirken, bu sıcaklıktan sonra tüm betonların basınç dayanımları birbirine benzer şekilde belirgin bir biçimde azaldıkları görülmektedir. 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımlarında oda sıcaklığına maruz betonlarınkine oranla meydana gelen azalma %80 mertebesindedir. %10 SD içeren tüm betonların basınç dayanımları 200°C üstü tüm sıcaklıklarda birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, 200°C üstü sıcaklıklarda iri GKA ikame düzeyinin basınç dayanımı üzerinde etkisi yoktur.



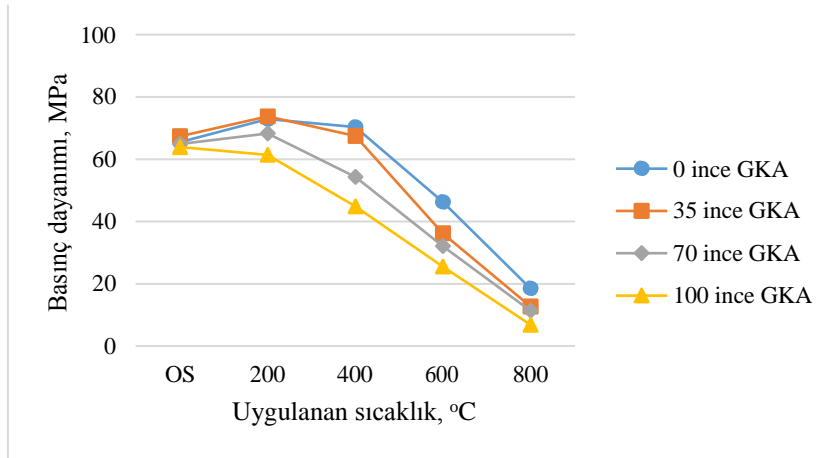
Şekil 4.52. %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.52’de %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere tüm betonların basınç dayanımları sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Yani, sıcaklığa bağlı olarak dayanımda meydana gelen azalma iri GKA ikame oranından bağımsızdır. Basınç dayanımındaki azalma 400°C`den sonra belirginleşmektedir. Oda sıcaklığındakilere kıyasla 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımlarındaki azalma yaklaşık %84 mertebesindedir.



Şekil 4.53. %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

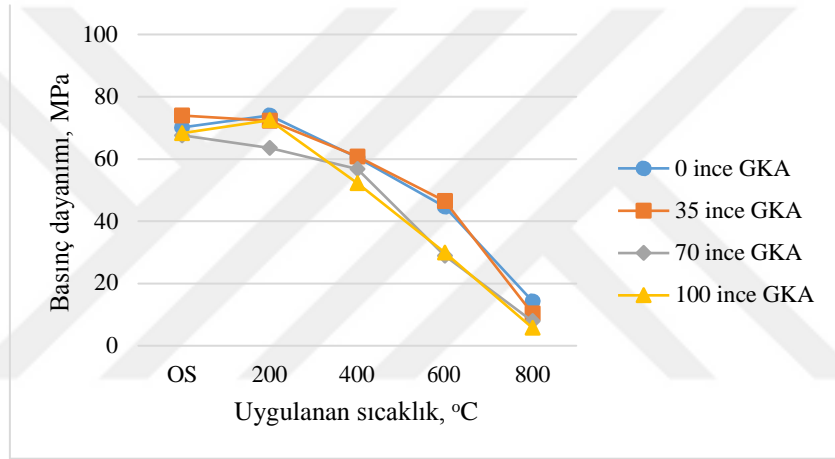
Şekil 4.53'de %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere %100 ince GKA içeren betonlar hariç diğer betonların basınç dayanımı 400°C'ye kadar değişmediği ancak 400°C üstü sıcaklıklarda ciddi azalma eğilimi göstermektedir. %100 ince GKA ikameli betonun basınç dayanımı 200°C itibariyle belirgin bir biçimde azalmaktadır. Tüm sıcaklıklarda geçerli olmak kaydıyla, %100 ince GKA ikameli betonların basınç dayanımlarının diğer GKA ikameli betonlara kıyasla daha düşük olduğu net bir şekilde görülmektedir. Yine tüm betonlar için geçerli olmak üzere, 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımları da sıcaklığındakilere kıyasla %76 mertebesinde azdır.



Şekil 4.54. %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

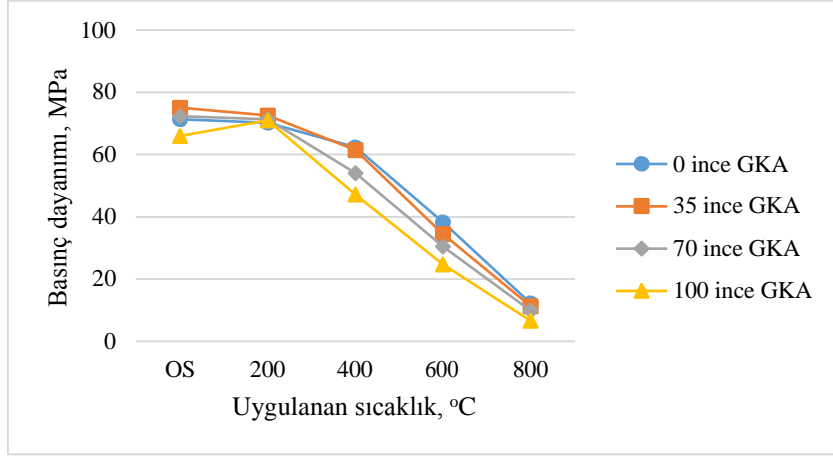


Şekil 4.54’de %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB’lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere, %0 ve %35 ince GKA içeren betonların basınç dayanımlarının 400°C’ye kadar önemli derecede değişmediği ancak 400°C üstü sıcaklıklarda belirgin bir biçimde azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, %70 ve %100 GKA ikameli betonların basınç dayanımları 200°C’den sonra önemli bir azalma eğilimine girmektedir. Oda sıcaklığındakilere kıyasla 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımındaki azalma %81 mertebesindedir. Tüm sıcaklıklar için geçerli olmak üzere, %100 ince GKA ikameli betonların basınç dayanımlarının diğer GKA ikameli betonlara kıyasla daha az olduğu açıkça görülmektedir.



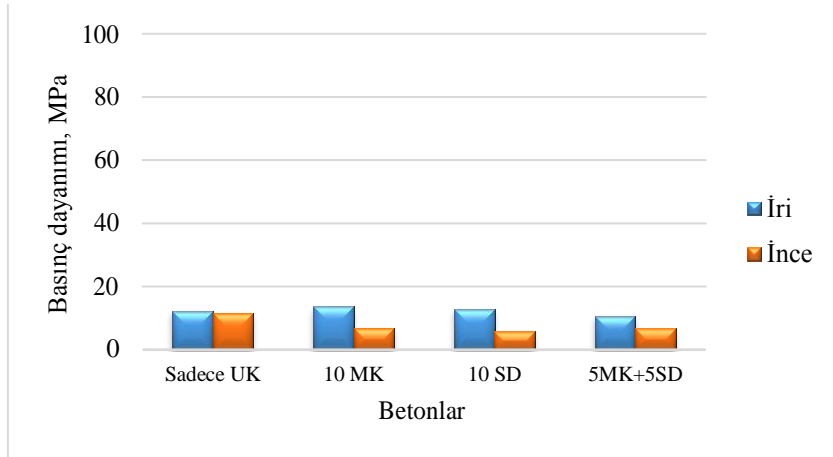
Şekil 4.55. %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.55’de %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB’lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça tüm betonların basınç dayanımı belirgin bir biçimde azalmaktadır. Oda sıcaklığındakilere kıyasla, 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımındaki azalma %88 mertebesindedir.



Şekil 4.56. %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.56'da %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere, tüm betonların basınç dayanımı sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir biçimde azalmaktadır. Oda sıcaklığındakilere kıyasla 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımlarındaki azalma yaklaşık %85 mertebesinde.



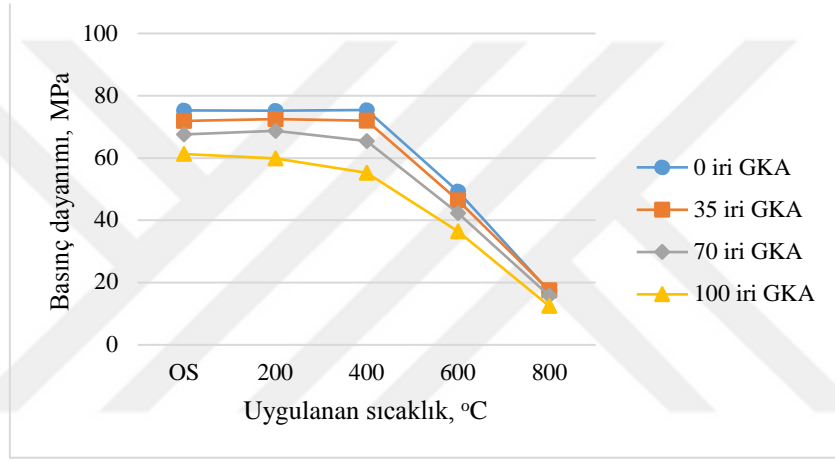
Şekil 4.57. %100 oranında GKA içeren 800°C'ye maruz KYB'lerin basınç dayanımları

Şekil 4.57'de 28 gün kür gören ve 800°C'ye maruz %100 iri ve %100 ince GKA içeren betonların basınç dayanımları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere, %100 iri GKA içeren betonların basınç dayanımlarının %100 ince GKA içeren betonlara kıyasla tüm farklı

mineral katkı kombinasyonları için daha yüksek olduğu görülmektedir. Özetle, farklı kombinasyonlarda mineral katkı içeren iri GKA ikameli betonların basınç dayanımları ince GKA ikamelilere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.

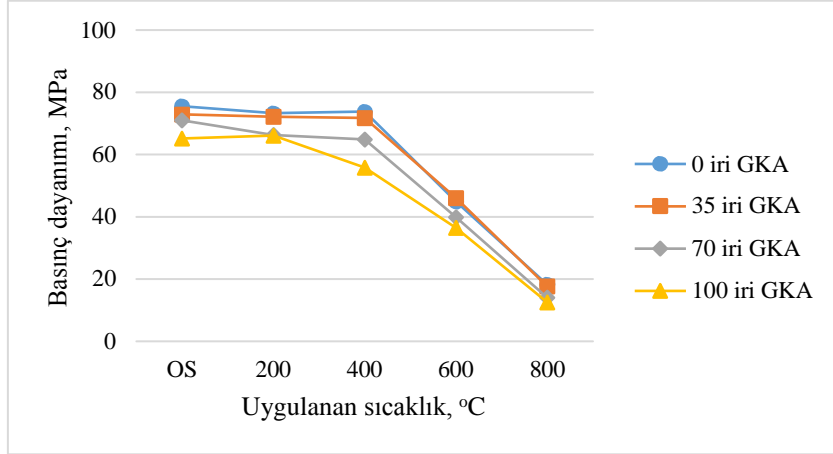
#### 4.12.1.2. 90 Gün Kür Gören Betonlar İçin Basınç Dayanımı Değerlendirmesi

Şekil 4.58’de %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi verilmektedir.



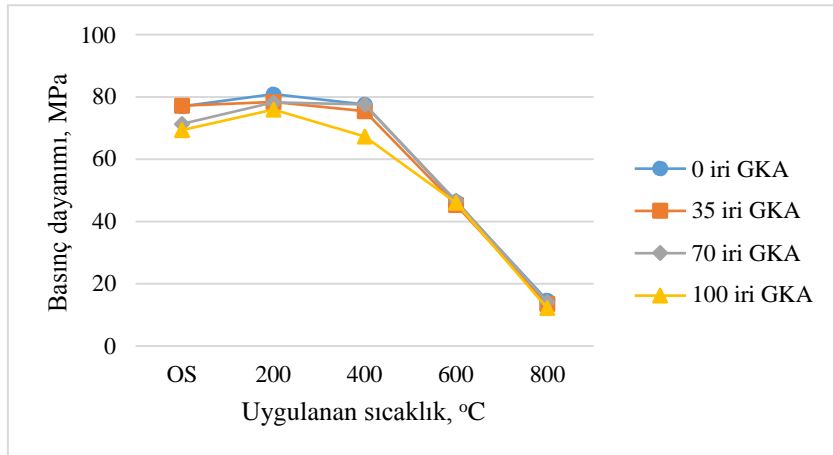
Şekil 4.58. %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.58’den görüldüğü üzere %100 iri GKA içeren beton hariç diğer betonların basınç dayanımlarında 400°C’ye kadar belirgin bir değişim gözlemlenmezken 400°C üstü sıcaklıklarda dayanımlardaki azalma belirginleşmektedir. %100 iri GKA içeren betonun basınç dayanımındaki azalma 400°C’ye kadar hafif seyrederken 400°C üstü sıcaklıklarda hızlanmaktadır. Oda sıcaklığındakilere kıyasla 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımındaki azalma %77 mertebesindedir. GKA içermeyen betonunkine kıyasla %100 iri GKA ikameli betonların basınç dayanımlarında tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere %20 mertebesinde bir azalma görülmektedir.



Şekil 4.59. %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

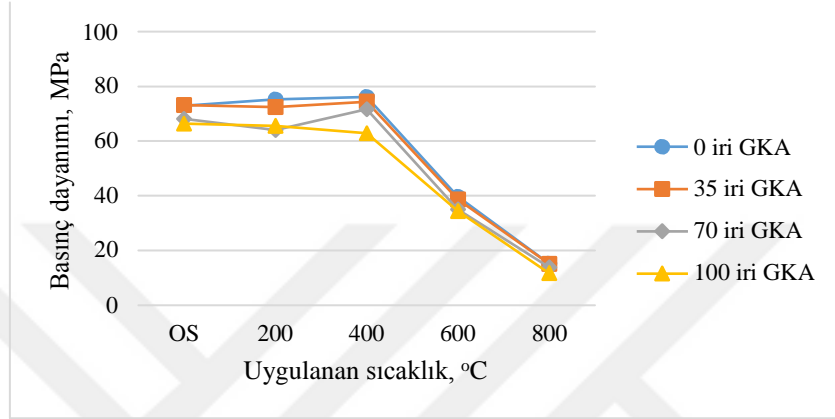
Şekil 4.59'da %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere %100 iri GKA ikameli betonlar dışındaki betonların basınç dayanımlarında 400°C'ye kadar önemli bir değişim gözlemlenmezken 400°C üstü sıcaklıklarda azalma belirginleşmektedir. Buna karşın %100 iri GKA ikameli betonun basınç dayanımı 200°C'ye kadar hafif bir azalma eğilimi gösterirken 200°C üstü sıcaklıklarda azalma hızlanmaktadır. Oda sıcaklığındakilere kıyasla 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımında %78 mertebesinde bir azalma söz konusudur.



Şekil 4.60. %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

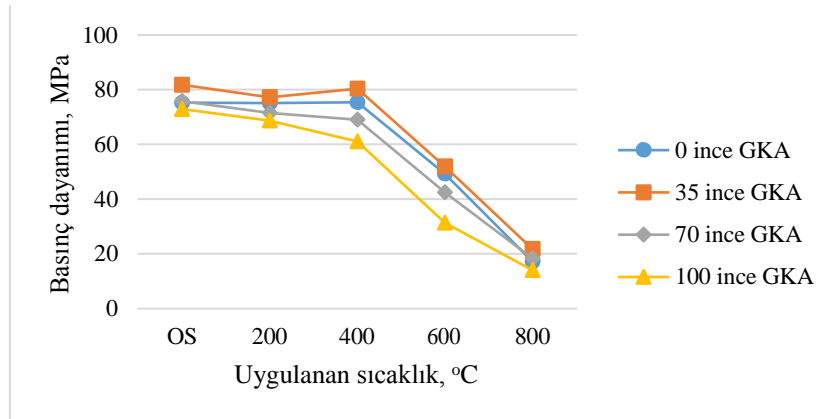
Şekil 4.60'da %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere tüm beton karışımlarının

basınç dayanımları 400°C sıcaklığa kadar önemli bir değişim göstermezken 400°C üstü sıcaklıklarda tüm betonların basınç dayanımlarındaki düşüş belirginleşmektedir. Oda sıcaklığındakilere kıyasla, 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımındaki azalma %81 mertebesindedir. 600°C üstü sıcaklıklarda iri GKA ikame oranının basınç dayanımı açısından herhangi bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



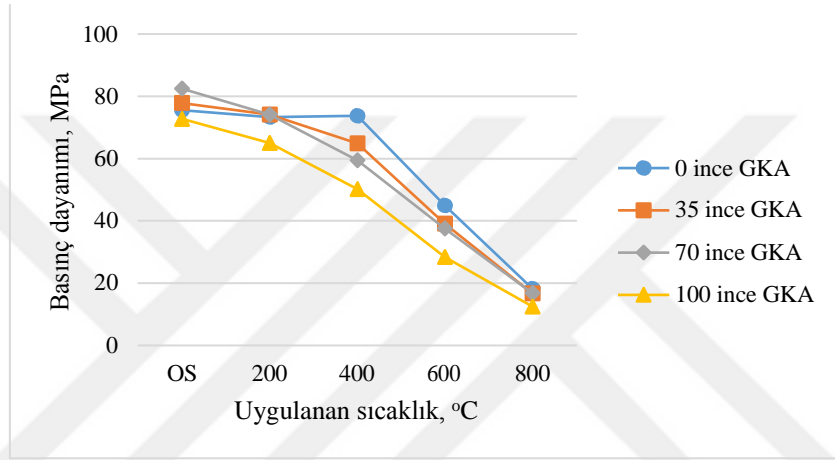
Şekil 4.61. %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.61'de %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere tüm betonlar için geçerli olmak üzere 400°C'ye kadar basınç dayanımlarında önemli bir değişim gözlenmezken, 400°C üstü sıcaklıklarda basınç dayanımlarındaki azalma belirginleşmektedir. Oda sıcaklığındakilere kıyasla, 800°C'ye maruz tüm betonların basınç dayanımları %80 mertebesinde daha düşüktür.



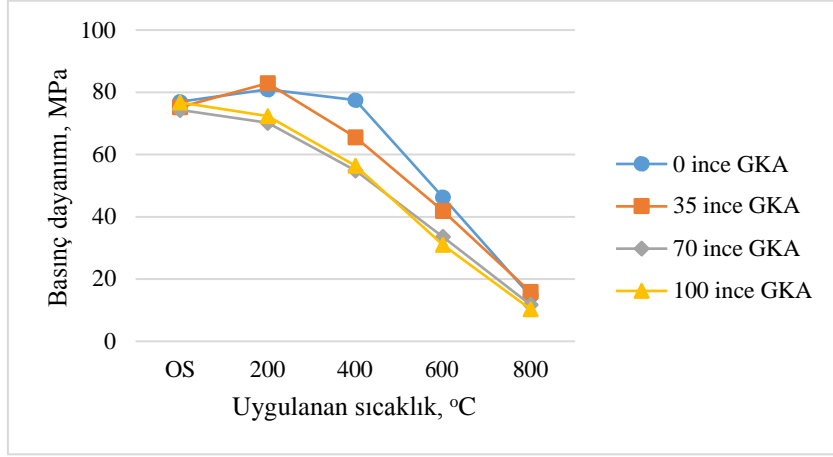
Şekil 4.62. %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.62’de %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB’lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 400°C’ye kadar %100 ince GKA ikameli beton dışındaki betonların basınç dayanımları çok hafif bir azalma gösterirken 400°C üstü sıcaklıklarda dayanımlardaki azalma çok hızlı olmaktadır. %100 ince GKA ikameli betonun basınç dayanımı tüm sıcaklıklarda tedrici bir azalma göstermektedir. 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımlarındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla yaklaşık %77 mertebesindedir.



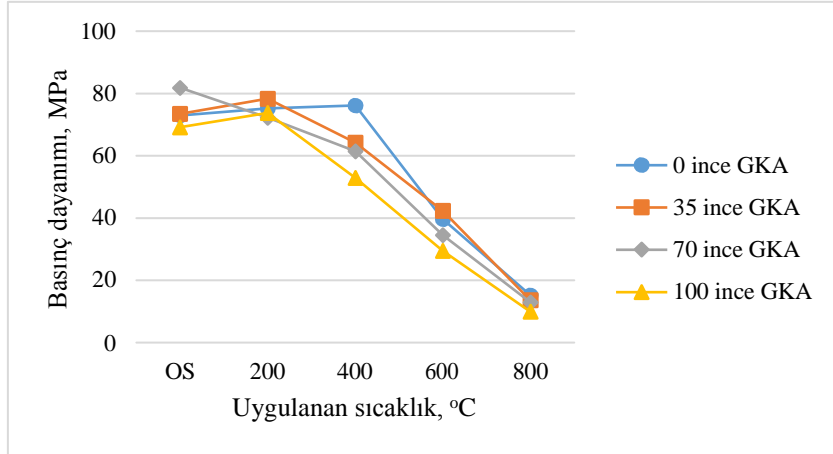
Şekil 4.63. %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB’lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.63’de %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB’lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği gibi %0 ince GKA içeren beton hariç diğer tüm betonların basınç dayanımları sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir biçimde azalmaktadır. %0 ince GKA içeren betonun basınç dayanımı 200°C’ye kadar değişim göstermezken 200°C üstü sıcaklıklarda belirgin biçimde azalmaktadır. 800°C’ye maruz betonların basınç dayanımlarındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla ortalama %79 mertebesindedir. %100 ince GKA içeren betonun basınç dayanımı diğer betonların basınç dayanımlarına kıyasla tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere net bir biçimde daha düşük olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.64. % 10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

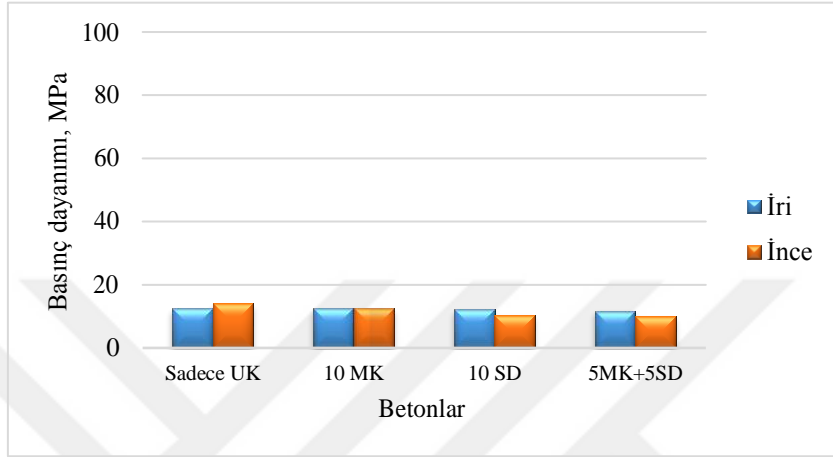
Şekil 4.64'de %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ait basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere %0 ince GKA içeren betonun basınç dayanımı 400°C'ye kadar önemli derecede değişmezken ve bu sıcaklıktan itibaren önemli derece azalırken diğer betonların basınç dayanımı 200°C'den itibaren hızlı bir biçimde azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımlarındaki azalmanın da sıcaklığındakilere kıyasla %83 mertebesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.65. %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımı

Şekil 4.65'de %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere %0 ince GKA içeren betonların basınç dayanımında 400°C'de herhangi bir kayıp meydana

gelmezken bu sıcaklıktan itibaren dayanımdaki kayıp hızla artmaktadır. Buna karşın diğer betonların basınç dayanımları sıcaklık artışına bağlı olarak hızla azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımlarındaki azalmanın oda sıcaklığındakilerle kıyasla ortalama %83 mertebesindedir.



Şekil 4.66. %100 oranında GKA içeren 800°C'ye maruz KYB'lerin basınç dayanımları

Şekil 4.66'da 90 gün kür gören 800°C'ye maruz, %100 iri ve %100 ince GKA içeren betonların basınç dayanımları kıyaslamalı olarak verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere tüm mineral katkı kombinasyonları için %100 iri GKA içeren betonlar ile %100 ince GKA içeren betonların basınç dayanımları arasında ciddi bir fark görülmemektedir. %30 UK mineral katkılı %100 ince GKA içeren betonların basınç dayanımları %100 iri GKA içerenlere kıyasla bir miktar yüksek çıkarken, SD içeren beton karışımlarının %100 iri GKA içeren betonların basınç dayanımları %100 ince GKA içerenlere kıyasla bir miktar daha yüksek çıktığı görülmektedir.

Literatürde 400°C'ye maruz kalan bazı betonların basınç dayanımlarının yüksek sıcaklık görmeyenlerinkinden %20 mertebesine kadar daha yüksek çıktığı ifade edilmektedir [215]. Çalışmamızda da 200°C ve 400°C'ye maruz betonların basınç dayanımlarının yüksek sıcaklık görmeyenlerinkiyle oldukça yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bazı betonların basınç dayanımı ise 200°C'de bir miktar artış göstermektedir. Bu değişim literatürle uyum içindedir. Önceden ifade edildiği üzere 200°C ila 400°C sıcaklığa maruz kalan betonların basınç dayanımlarındaki artışın beton içindeki serbest suyun buharlaşması ve anhidrate bileşiklerin artan sıcaklıkla birlikte hızla hidrate olmasıyla açıklanmaktadır.



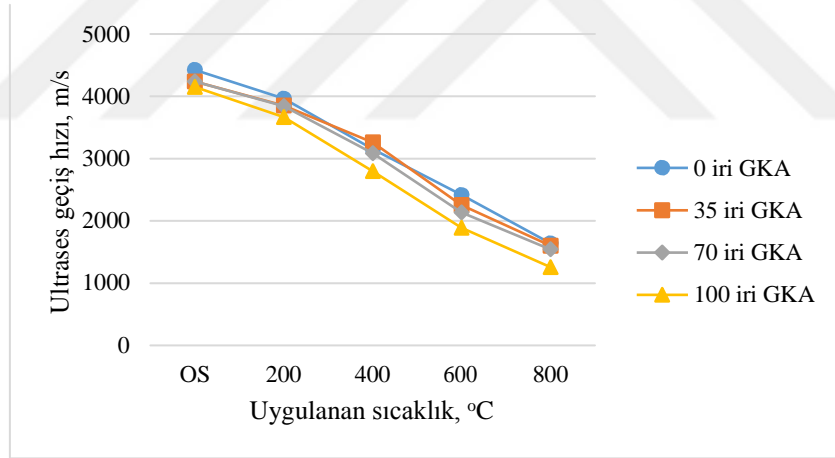
600°C ve 800°C sıcaklıklarda betonu oluşturan C-S-H jelleri büyük ölçüde tahrip olduğundan basınç dayanımlarında %80 mertebesinde azalma meydana gelmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyum içindedir [216].

#### 4.12.2. Yüksek Sıcaklığa Maruz KYB'lerin Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi

Sıcaklık uygulamasının ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisine ilişkin değerlendirme 28 ve 90 gün kür gören beton karışımları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

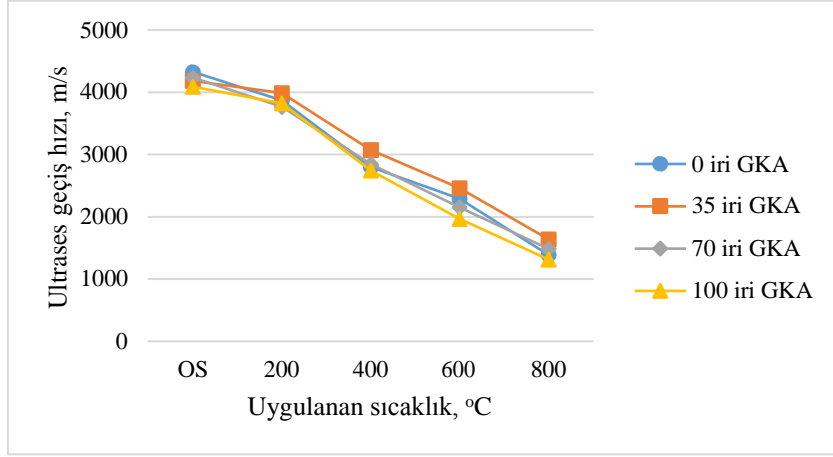
##### 4.12.2.1. 28 Gün Kür Sonunda Ölçülen Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi

Şekil 4.70`de %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir.



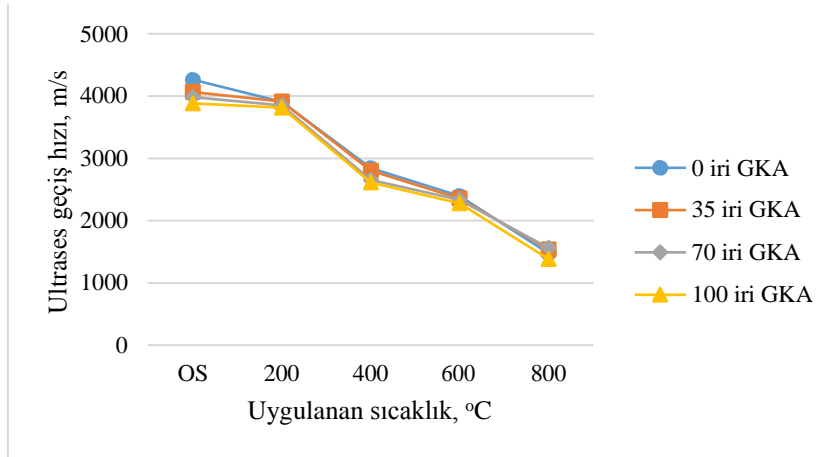
Şekil 4.67. %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.67 incelendiğinde tüm beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızlarının sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir azalma gösterdiği açıkça görülmektedir. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla yaklaşık %64 mertebesinde dir. %100 iri GKA içeren beton üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı %30 UK içeren tüm beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızından daha düşüktür. Bu eğilim tüm sıcaklıklar için geçerlidir.



Şekil 4.68. %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

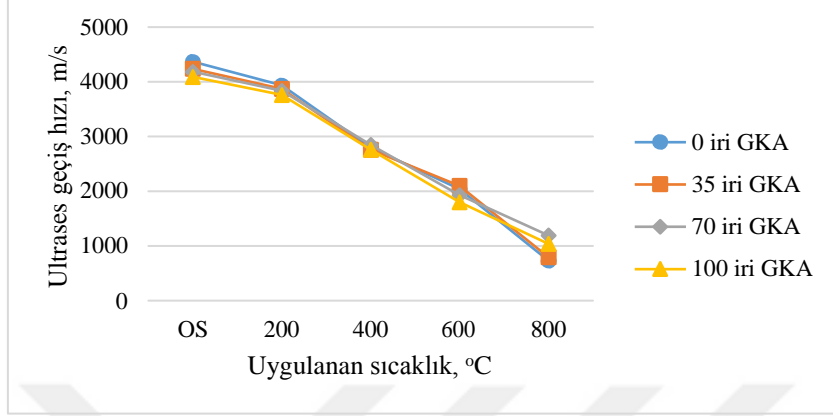
Şekil 4.68`de %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere tüm beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir biçimde azalma göstermektedir. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %65 mertebesinde dir.



Şekil 4.69. %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

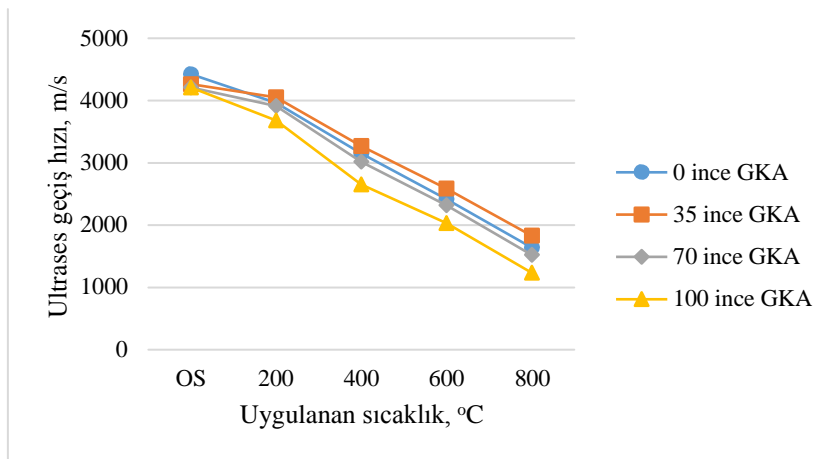
Şekil 4.69`da %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere tüm beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir

biçimde azalmaktadır. Oda sıcaklığındakilere kıyasla, 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızlarındaki azalma ortalama %63 mertebesindedir.



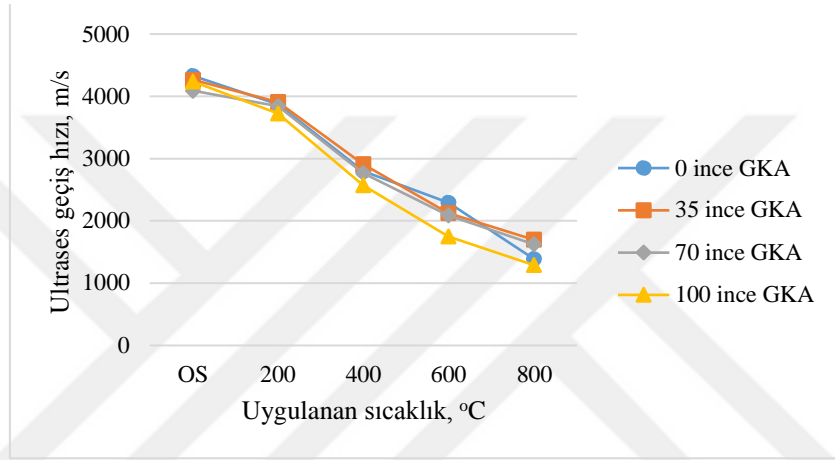
Şekil 4.70. %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.70'de %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden karışımların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızının azaldığı görülmektedir. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızları için hesaplanan azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %78 mertebesindedir.



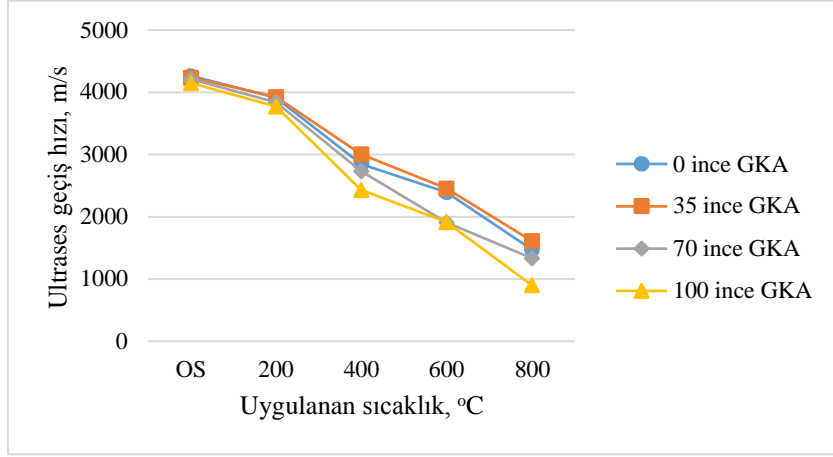
Şekil 4.71. %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.71`de %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB`ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde azalmaktadır. 800°C`ye maruz betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızlarındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %63 mertebesindedir. %100 ince GKA içeren beton için ölçülen ultrases geçiş hızı diğer beton karışımları için ölçülen ultrases geçiş hızlarına kıyasla daha düşüktür. Bu eğilim tüm sıcaklıklar için geçerlidir.



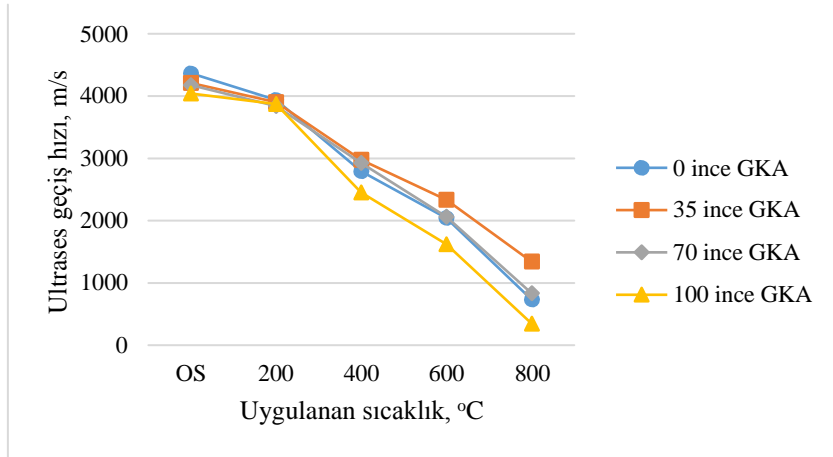
Şekil 4.72. %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.72`de %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB`ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde azalmaktadır. 800°C`ye maruz betonlar için ölçülen ultrases geçiş hızındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %64 kadar düşüktür.



Şekil 4.73. %10 SD içeren ve ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

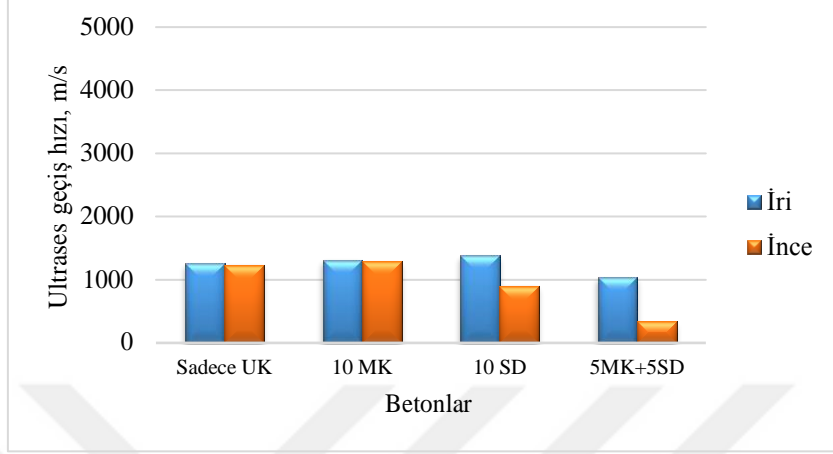
Şekil 4.73`de %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB'ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızlarındaki azalma da sıcaklığındakilere kıyasla %68 oranında düşüktür.



Şekil 4.74. %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.74`de %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB'ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere beton karışımlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde

azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızlarındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %80 oranında düşüktür.

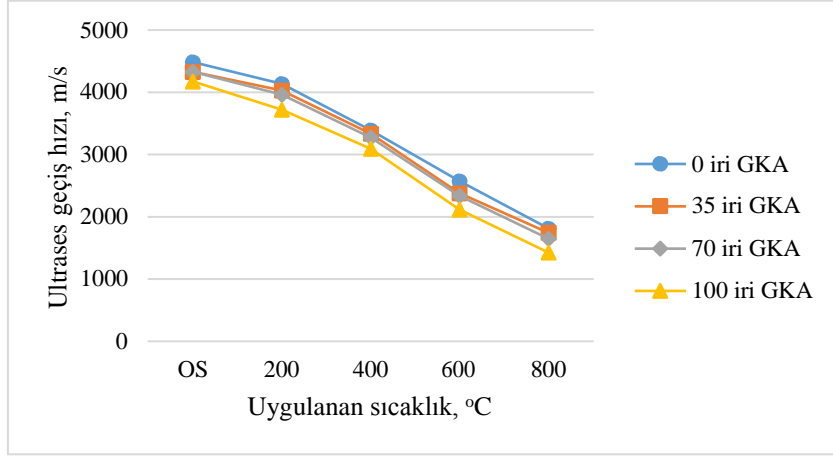


Şekil 4.75. %100 oranında GKA içeren 800°C'ye maruz KYB'lerin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.75'de 800°C'ye maruz, %100 iri ve %100 ince GKA içeren betonlar üzerinde 28 gün kür sonunda ölçülen ultrases geçiş hızları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü gibi tüm mineral katkı kombinasyonları için %100 iri GKA içeren betonların ultrases geçiş hızları %100 ince GKA içeren betonlar üzerinde ölçülenlere kıyasla daha yüksektir. Bu fark özellikle SD içeren beton karışımları için daha belirgindir.

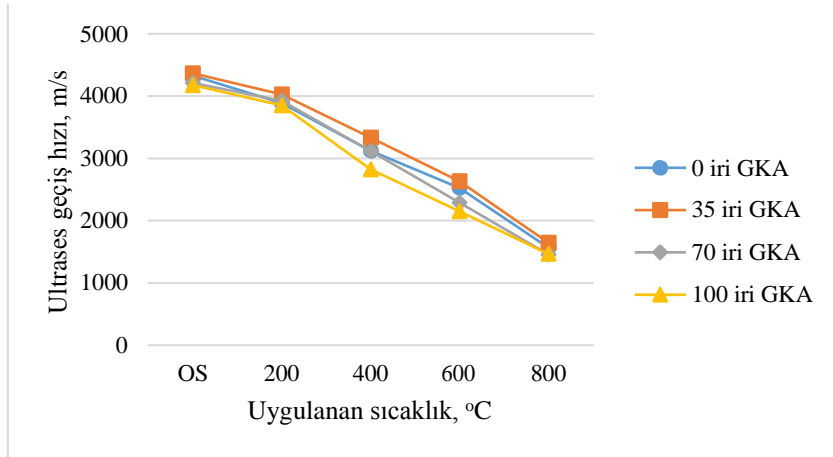
#### 4.12.2.2. 90 Gün Kür Sonunda Ölçülen Ultrases Geçiş Hızı Değerlendirmesi

Şekil 4.76'da %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir.



Şekil 4.76. %30 UK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

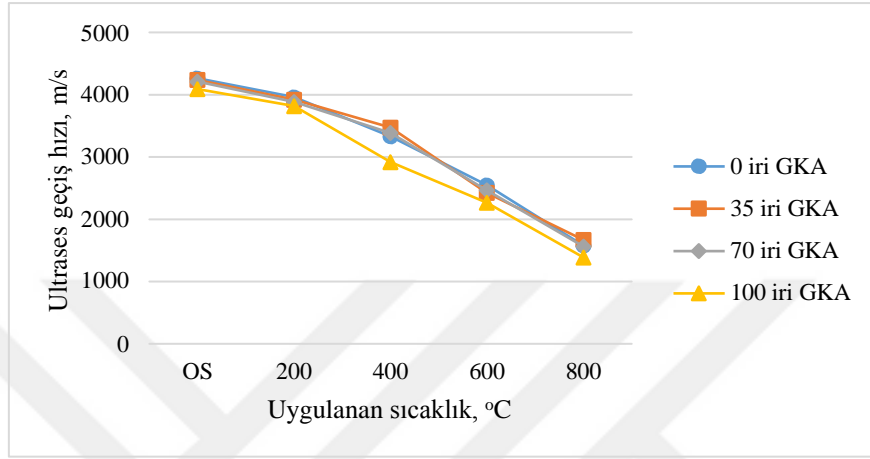
Şekil 4.76'dan görüldüğü üzere beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızlarındaki ortalama azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %61 oranında düşüktür. %100 iri GKA içeren betonun ultrases geçiş hızı diğer beton karışımlarınıninkine kıyasla tüm sıcaklıklarda daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.77. %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

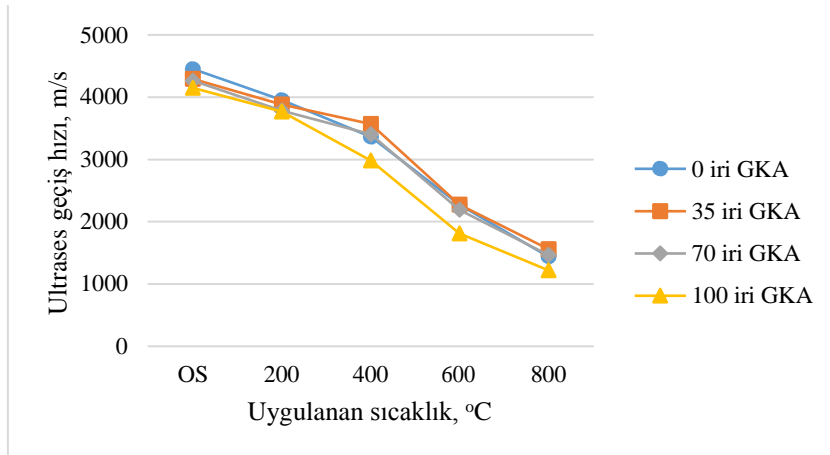
Şekil 4.77'de %10 MK içeren iri GKA ikameli KYB'ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere beton karışımlarının ultrases geçiş hızları sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir biçimde

azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızındaki azalma oda sıcaklığındakilere kıyasla %63 mertebesindedir. Oda sıcaklığındakiler de dâhil olmak kaydıyla tüm beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları arasında tüm sıcaklıklar için geçerli olmak üzere önemli bir fark yoktur.



Şekil 4.78. %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

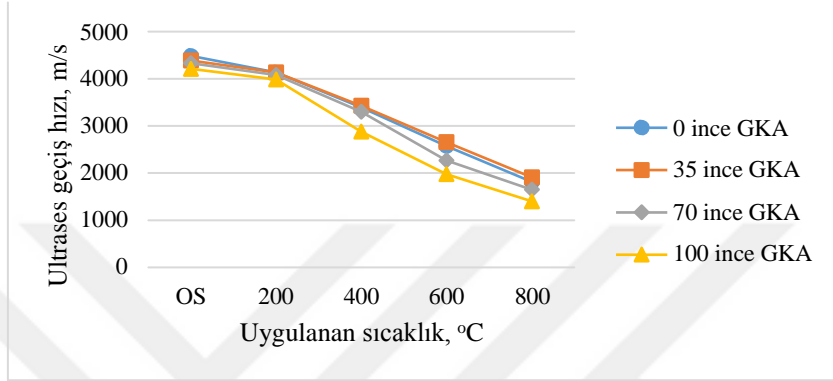
Şekil 4.78'de %10 SD içeren iri GKA ikameli KYB'ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde azalmaktadır. 800°C'ye maruz betonların ultrases geçiş hızlarında oda sıcaklığındakilere kıyasla %63 mertebesinde bir azalma söz konusudur.



Şekil 4.79. %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB'lere ilişkin ultrases geçiş hızları

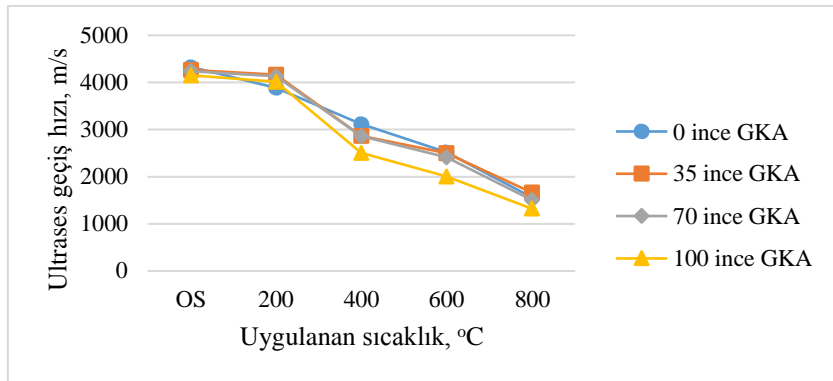


Şekil 4.79`da %5MK+%5SD içeren iri GKA ikameli KYB`ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları sıcaklık arttıkça belirgin bir biçimde azalmaktadır. 800°C`ye maruz beton karışımları üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızlarında da sıcaklığındakilere kıyasla %67 mertebesinde bir azalma söz konusudur.



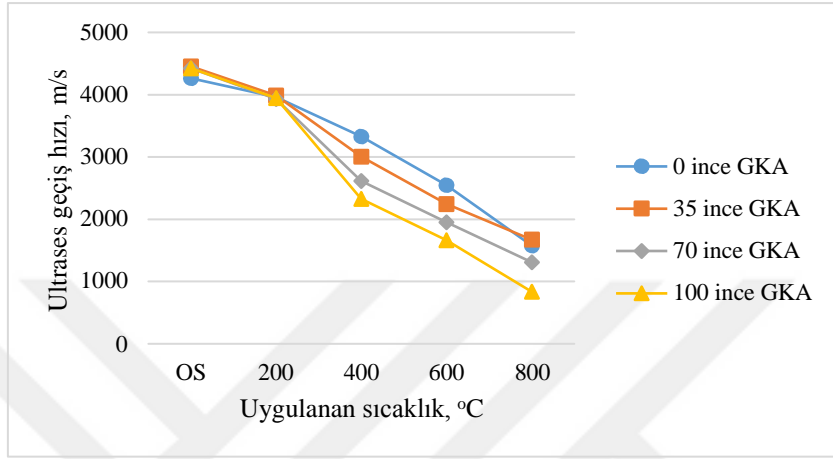
Şekil 4.80. %30 UK içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.80`de %30 MK içeren ince GKA ikameli KYB`ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere beton karışımlarının arttıkça ultrases geçiş hızı azalmaktadır. 800°C`ye maruz betonların ultrases geçiş hızlarındaki ortalama azalma da sıcaklığındakilere kıyasla %54 mertebesindedir. %100 ince GKA içeren betonun ultrases geçiş hızı diğer beton karışımlarınıninkine kıyasla tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere daha düşük olduğu görülmektedir.



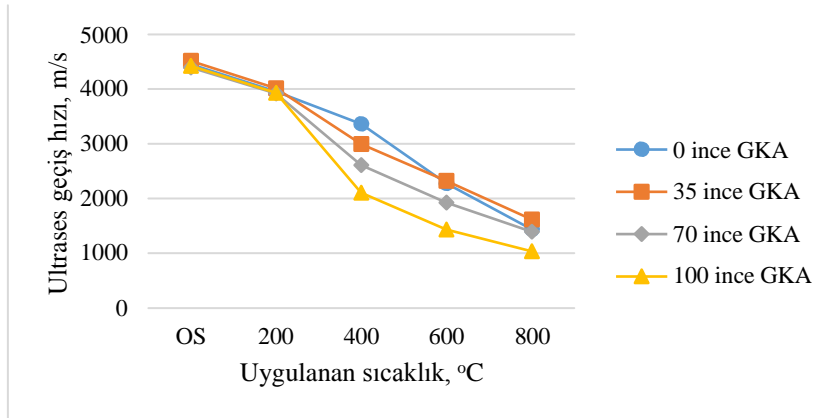
Şekil 4.81. %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.81`de %10 MK içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları verilmektedir. İlgili şekil görüldüğü üzere karışımların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızı azalmaktadır. 800°C`ye maruz betonların ultrases geçiş hızında oda sıcaklığındakilere kıyasla %64 mertebesinde bir azalma söz konusudur.



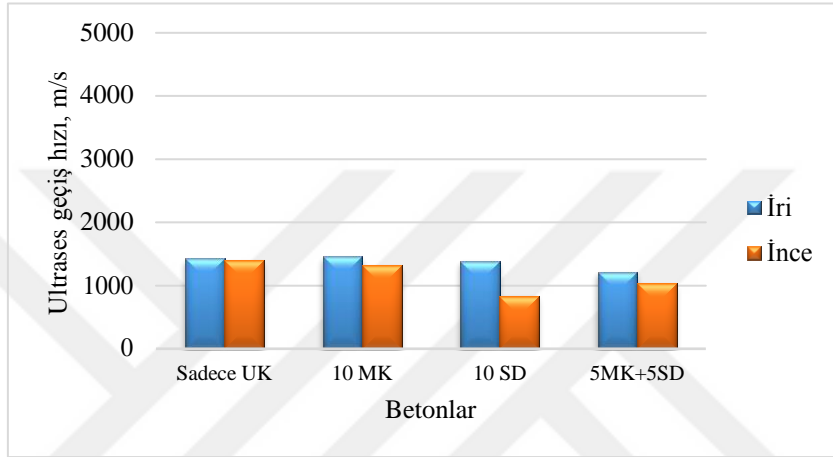
Şekil 4.82. %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.82`de %10 SD içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere karışımların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızı azalmaktadır. 800°C`ye maruz betonların ultrases geçiş hızlarında oda sıcaklığındakilere kıyasla %69 mertebesinde bir azalma söz konusudur. Uygulanan sıcaklık arttıkça ince GKA ikame oranının etkisinin daha belirgin bir hale geldiği görülmektedir.



Şekil 4.83. %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.83`de %5MK+%5SD içeren ince GKA ikameli KYB`lere ilişkin ultrases geçiş hızları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere karışımların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızı azalmaktadır. 800°C`ye maruz betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızlarında oda sıcaklığındakilere kıyasla %69 mertebesinde bir azalma söz konusudur. Uygulanan sıcaklık arttıkça ince GKA ikame oranı etkisinin daha belirgin bir hale geldiği görülmektedir.



Şekil 4.84. %100 oranında GKA içeren 800°C`ye maruz KYB`lerin ultrases geçiş hızları

Şekil 4.84`de 800°C`ye maruz, %100 iri ve %100 ince GKA içeren betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızları verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere tüm mineral katkı kombinasyonları için %100 iri GKA içeren betonlar için ölçülen ultrases geçiş hızlarının %100 ince GKA içeren betonlar için ölçülenlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Fark SD içeren beton karışımlarında diğerlerine kıyasla daha belirgindir.

Şekil 4.75 ve Şekil 4.84 birlikte değerlendirildiğinde 800°C`ye maruz iri GKA içeren KYB`ler üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı ince GKA içerenlere kıyasla tüm mineral katkı kombinasyonları için kür süresinden bağımsız olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. İri GKA içeren betonların lehine olan ultrases geçiş hızları arasındaki fark SD içeren beton karışımlarında daha belirgin olduğu görülmektedir.

Betonlara uygulanan sıcaklığın artmasıyla birlikte betonların içindeki su buharlaşmakta ve betonlar daha boşluklu hale gelmektedir. 600°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklarda betonda çimento hamurunun en güçlü bileşiği olan C-S-H`nin yapısında meydana gelen bozulma ve buharlaşan suların meydana getirdiği genleşme ile betonlar

boşluk bir hale gelmekte ve bu durum ultrases geçiş hızını %80 mertebesine varan oranda azaltmaktadır. Bu durum literatürde incelenen çalışmalarla uyum içindedir [216].

#### 4.13. ANOVA Değerlendirmesi

GKA ikameli beton karışımları üzerinde ölçülen basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, aşınma kaybı, ultrases geçiş hızı, kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme derinliği ile GKA içermeyen beton karışımlar üzerinde ölçülen aynı özellikler arasındaki farkın anlamlı olup olmadığını belirlemek için ANOVA testi vasıtasıyla değerlendirme yapılmıştır. Benzer değerlendirme 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz beton karışımlar üzerinde ölçülen basınç dayanımı ve ultrases geçiş hız ölçümleri üzerinde de gerçekleştirilmiştir.

Farklı GKA ikamesine ek olarak, farklı kür süreleri ve farklı tür ve oranda mineral katkı kullanımının da sonuçlar üzerinde etkili olması nedeniyle çok yönlü ANOVA uygulanmıştır. Bu şekilde GKA ikame oranının betonların bahis konusu karakteristikleri üzerine anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığı değerlendirilmiştir. Bunun için bir paket program vasıtasıyla anlamlılık testi gerçekleştirilmiştir. Test neticesinde hesaplanan p-değeri literatürde genel kabul gören 0.05 anlamlılık düzeyinde karşılaştırılmış ve değerlendirmeler tablolar halinde verilmiştir. Hesaplanan p-değerinin 0.05'den küçük olması bahis konusu karakteristiklere ilişkin ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olduğunu, büyük olması ise test edilen ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olmadığını ve farkın tesadüfen meydana geldiğini ifade etmektedir. Tablo 4.2, Tablo 4.3., Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'de 0.05 anlamlılık düzeyi için belirtilmiş olan "anlamlı" ifadesi ilgili GKA ikameli beton için incelenen özelliğin GKA içermeyen betona kıyasla farklı olduğunu, "anlamlı değil" ifadesi ise ilgili GKA ikameli beton için incelenen özelliğin GKA içermeyen betona kıyasla farklı olmadığını istatistiksel olarak ifade etmektedir.

Tablo 4.2. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımları için ANOVA testi

GKA türü	GKA ikame oranı, %	Basınç dayanımı		Yarmada çekme dayanımı	
		p-değeri	Değerlendirme	p-değeri	Değerlendirme
İri	35	0.0787	Anlamlı değil	0.0000	Anlamlı
	70	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı
	100	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı
İnce	35	0.4983	Anlamlı değil	0.1363	Anlamlı değil
	70	0.0000	Anlamlı	0.0013	Anlamlı
	100	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı

Tablo 4.2’de farklı oranlarda GKA ikameli betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları ile GKA içermeyen betonun basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki farkın anlamlı olup olmadığına dair uygulanan ANOVA testi değerlendirilmiştir. Tablo incelendiğinde, %35 iri ve %35 ince GKA ikameli betonların basınç dayanımı ortalaması ile GKA içermeyen betonun basınç dayanımı ortalaması arasındaki farkın anlamlı olmadığı görülmektedir. Yani, ortalamalar arasındaki fark muhtemelen tesadüfi faktörlerden kaynaklanmıştır. Benzer şekilde, %35 ince GKA ikameli betonun yarmada çekme dayanımı ortalaması ile GKA içermeyen betonun yarmada çekme dayanımı ortalaması arasındaki fark anlamlı değildir. Diğer tüm GKA ikameli karışımlara ait basınç dayanımları ile GKA içermeyenler aralarındaki farkın 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olduğu görülmektedir. Benzeri bir değerlendirme yarmada çekme dayanımı ortalamaları için de geçerlidir.

Tablo 4.3. Aşınma ve ultrases geçiş hızı ölçümleri için ANOVA testi

GKA türü	GKA ikame oranı, %	Aşınma kaybı		Ultrases geçiş hızı	
		p-değeri	Değerlendirme	p-değeri	Değerlendirme
İri	35	0.0495	Anlamlı	0.0006	Anlamlı
	70	0.0068	Anlamlı	0.0001	Anlamlı
	100	0.0029	Anlamlı	0.0000	Anlamlı
İnce	35	0.2301	Anlamlı değil	0.3502	Anlamlı değil
	70	0.0667	Anlamlı değil	0.0227	Anlamlı
	100	0.0111	Anlamlı	0.0397	Anlamlı

Tablo 4.3’de GKA ikameli betonlara ilişkin aşınma ve ultrases geçiş hızı ölçümleri ile GKA içermeyen betonun aşınma ve ultrases geçiş hızı ölçümleri arasındaki farkın anlamlı olup olmadığına dair uygulanan ANOVA testi değerlendirilmiştir. İlgili tablodan görüldüğü üzere, %35 ince GKA ikameli betona ilişkin aşınma ve ultrases geçiş hızı ile GKA içermeyen beton için ölçülen aşınma ve ultrases geçiş hızı ölçümleri arasındaki fark anlamlı değildir. Bunun yanı sıra %70 ince GKA ikameli beton için aşınma ölçümleri ile GKA içermeyen betonda dair aşınma ölçümleri arasındaki fark anlamlı değildir. Diğer tüm GKA ikameli beton karışımlarına ilişkin aşınma ölçümleri ile GKA içermeyenlerin aşınma ölçümleri arasındaki farkın 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olduğu görülmektedir. Benzeri bir değerlendirme ultrases geçiş hızı ölçümleri için de geçerlidir.

Tablo 4.4. Kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme derinliği ölçümleri için ANOVA testi

GKA türü	GKA ikame oranı, %	Kılcallık		Su emme		Basınçlı su işleme derinliği	
		p-değeri	İrdeleme	p-değeri	İrdeleme	p-değeri	İrdeleme
İri	35	0.0000	Anlamlı	0.0058	Anlamlı	0.0677	Anlamlı değil
	70	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı	0.0442	Anlamlı
	100	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı	0.0002	Anlamlı
İnce	35	0.0042	Anlamlı	0.0001	Anlamlı	0.1730	Anlamlı değil
	70	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı	0.0107	Anlamlı
	100	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı	0.0002	Anlamlı

Tablo 4.4’de GKA ikameli betonlara ilişkin kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme derinliği ölçümleri ile GKA içermeyen betonun kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme derinliği ölçümleri arasındaki farkın anlamlı olup olmadığına dair uygulanan ANOVA testi değerlendirilmiştir. Tablo incelendiğinde, %35 iri ve %35 ince GKA ikameli beton karışımlarına ilişkin basınçlı su işleme derinliği ölçümleri ile GKA içermeyen betonun basınçlı su işleme derinliği ölçümleri arasındaki farkın %5 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olmadığı görülmektedir. Buna karşın diğer tüm GKA ikameli beton karışımlarına ilişkin kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme derinliği ölçümleri ile GKA içermeyen betonun kılcallık, su emme ve basınçlı su işleme ölçümleri arasındaki farkın 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5. Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ölçümleri için ANOVA testi

GKA türü	GKA ikame oranı, %	Basınç dayanımı		Ultrases geçiş hızı	
		p-değeri	Değerlendirme	p-değeri	Değerlendirme
İri	35	0.0536	Anlamlı değil	0.4162	Anlamlı değil
	70	0.0000	Anlamlı	0.0117	Anlamlı
	100	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı
İnce	35	0.1008	Anlamlı değil	0.0000	Anlamlı
	70	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı
	100	0.0000	Anlamlı	0.0000	Anlamlı

Tablo 4.5’de GKA ikameli betonlara ilişkin 600°C ve 800°C sıcaklık etkisinde basınç ve ultrases geçiş hızı ölçümleri ile GKA içermeyen betonun basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı arasında farkın anlamlı olup olmadığına dair uygulanan ANOVA testi değerlendirmesi verilmektedir. İlgili tablo incelendiğinde, %35 iri GKA ikameli betonun hem basınç dayanımı ölçümleri hem de ultrases geçiş hızı ölçümleri ile GKA içermeyen betonun basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ölçümleri arasındaki farkın 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olmadığı görülmektedir. Benzer şekilde aynı tablo incelendiğinde %35 ince GKA ikameli betonun basınç dayanımı ölçümleri ile GKA içermeyen betonun basınç dayanımı ölçümleri arasındaki farkın 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olmadığı görülür. Buna karşın diğer tüm GKA ikameli beton karışımlarına ilişkin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ölçümleri 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olduğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen tüm ANOVA testleri dikkate alındığında genel olarak %35 iri ve %35 ince GKA ikameli beton karışımlarına ilişkin ölçülen özellikler ile GKA içermeyen beton için ölçülen özellikler arasındaki farkın 0.05 anlamlılık düzeyine göre anlamlı olmadığı görülmektedir. Bu durum elbette tüm ölçümler için gözlemlenmese bile genel eğilim bu yönde olduğunu söylemek mümkündür.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda geri kazanılmış agrega (GKA) ile farklı tür ve oranda mineral katkı maddesi ikame edilerek üretilen kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) mekanik ve durabilite özelliklerini GKA içermeyen beton ile karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Bunun yanı sıra bu betonların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özelliklerini karşılaştırmalı olarak belirlemektir. Bu bağlamda gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde elde edilen önemli bulgular aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

1. Bazı betonlar için daha belirgin olmak kaydıyla tüm karışımlar için GKA ikame oranı arttıkça betonların basınç, yarmada çekme, eğilme ve aşınma dayanımları azalma göstermektedir. %100 iri ve %100 ince GKA ikame edilen betonların basınç, yarmada çekme, eğilme ve aşınma dayanımlarında meydana gelen azalma GKA içermeyen betonlara kıyasla %30 mertebesine ulaşmaktadır. Dayanımlarda meydana gelen azalma %35 iri GKA ve %35 ince GKA ikame oranlarında minimum düzeydedir. Öyle ki %35 ince GKA içeren betonların basınç ve yarmada çekme dayanımlarının GKA içermeyenlere kıyasla hafifçe arttığını söylemek mümkündür. Dayanımda sağlanan artış itibarıyla erken yaşlarda MK, ileri yaşlarda SD mineral katkının etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca GKA ikame oranından bağımsız olarak %10 SD içeren beton karışımlarında aşınma kaybının diğer betonlara kıyasla en az olduğu görülmektedir.
2. Betonlar üzerinde belirlenen dinamik elastisite modülleri GKA ikame oranı artışına bağlı olarak azalma göstermektedir. %100 iri ve %100 ince GKA ikameli betonların dinamik elastisite modüllerinde GKA içermeyen betona kıyasla %18 mertebesinde bir azalma söz konusudur. Mineral katkı miktarı ve kür süresinin dinamik elastisite modülü üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir.
3. Betonlar için belirlenen hızlı klorür geçirimsizliği GKA ikame oranı artışına bağlı olarak artmaktadır. %100 iri ve %100 ince GKA ikameli betonların klorür geçirimsizlikleri GKA içermeyen betona kıyasla %90 mertebesinde daha yüksektir. %10 SD içeren betonların klorür geçirimsizliği diğer mineral katkı içeren betonlara kıyasla %50 mertebesinde daha düşüktür. ASTM C1202 standardı kapsamında yapılan sınıflamaya göre 28 gün kür sonunda betonların hızlı klorür geçirimsizlikleri



genel olarak orta ve düşük geçirimsizlik sınıfında yer alırken 90 gün kür sonunda bu betonlar düşük ve çok düşük geçirimsizlik sınıfında yer almıştır.

4. Betonlar için belirlenen kılcallık katsayıları GKA ikame oranı arttıkça belirgin bir artış göstermektedir. %100 iri ve %100 ince GKA ikame edilen betonların kılcallık katsayılarında GKA içermeyen betona kıyasla %55 mertebesinde bir artış olduğu görülmektedir. Buna mukabil %10 SD içeren betonların kılcallık katsayısı diğerlerine kıyasla belirgin bir şekilde düşüktür. Kür süresinin %10 SD içeren betonlar dışında diğerlerinde belirgin bir fark oluşturmadığı görülmektedir.
5. Betonların su emmeleri GKA ikame oranı arttıkça önemli bir artış göstermektedir. %100 iri ve %100 ince GKA ikameli betonların su emmelerinde GKA içermeyen betona kıyasla %120 mertebesinde bir artış olduğu görülmektedir. %10 MK içeren betonların su emmesi diğer beton karışımlarına kıyasla en düşük olandır. Kür süresinin 28 günden 90 güne uzaması sonucu su emmede belirgin bir azalma görülmektedir.
6. Betonlar için ölçülen maksimum su işleme derinliği (MSİD) GKA ikame oranı arttıkça artış eğilimi göstermektedir. %10 SD içeren betonlar üzerinde ölçülen MSİD değerleri diğer beton karışımlarına kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Kür süresinin 28 günden 90 güne uzadığında su işleme derinliğinde %29 mertebesine varan oranda azalmalar göze çarpmaktadır.
7. Betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı GKA ikame oranı arttıkça hafif bir azalma göstermektedir. %100 iri ve %100 ince GKA ikame edilen betonların ultrases geçiş hızı GKA içermeyen betona kıyasla %8 mertebesine varan oranda azalma göstermektedir. Kür süresinin ultrases geçiş hızı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. IS 13311 standardı sınıflamasına göre betonların büyük çoğunluğu iyi kalite beton sınıfında yer almaktadır.
8. Sıcaklık artışına bağlı olarak betonların basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızlarında azalma görülmektedir. Her iki kür koşulunda 200°C ve 400°C sıcaklığa maruz betonların basınç dayanımlarının oda sıcaklığında tutulanlara yakın olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında kür gören betonunkine kıyasla 600°C'ye maruz betonların basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızlarında %20 ila %56 arasında azalmalar meydana gelirken, 800°C'ye maruz betonların basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızlarındaki bu kayıp %54 ila %88 mertebesine ulaşmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz eşit oranda ince GKA ikame edilen betonların basınç

dayanımı ve ultrases geçiş hızlarındaki azalma iri GKA ikameli betonlarınkinden bir miktar daha yüksektir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan numuneler için basınç dayanımı açısından kür süresinin iri GKA ikameli betonlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeyde iken, ince GKA ikame edilen betonlar üzerinde belirgin bir olumlu etki yapmış olduğu görülmektedir. Kür süresinin ultrases geçiş hızı açısından ise iri GKA ikame edilen betonlar üzerinde etkisi fark edilebilir düzeyde iken, ince GKA ikame edilen betonlarda bu anlamda belirgin bir olumlu etkisinin olmadığı görülmektedir.

9. GKA kullanılan betonların çeşitli mekanik ve durabilite özelliklerinde meydana gelen olumsuz etkinin farklı mineral katkı kullanmak suretiyle giderilebileceği görülmektedir. Örneğin, %30 UK içeren %100 iri GKA ve %100 ince GKA ikameli betonlarda basınç ve çekme dayanımları ile hızlı klorür geçirimsizliği, kılcallık, su emme ve ultrases geçiş hızı değerleri üzerinde meydana gelen negatif etki karışında %10 UK yerine %10 SD veya %5MK+%5SD ikame etmek suretiyle elimine edilebilmektedir.
10. Kür süresinden bağımsız olarak %5 ve %10 oranında SD kullanılan betonların diğerlerine kıyasla en iyi performans gösterdiği görülmektedir.
11. GKA ikame etmenin betonun mekanik ve dürabilite özelliklerine olan etkisinin anlamlı olup olmadığını görmek amacıyla sonuçlara çok yönlü ANOVA testi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen ANOVA testi ile genel olarak GKA içermeyen betonların mekanik ve durabilite özellikleri ile %35 iri GKA ve %35 ince GKA ikameli betonların mekanik ve durabilite özellikleri arasındaki farkın anlamlı olmadığı görülmektedir. Başka bir deyişle, %35 iri ve %35 ince GKA ikameli betonların mekanik ve dürabilite özellikleri GKA içermeyen betonunki ile aralarında belirgin bir farkın olmadığı ve dolayısıyla %35 (iri veya ince) GKA ikamesinin bu anlamda olumsuz etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.
12. Benzer bir çalışmanın farklı miktarda bağlayıcı ile tekrarlanabileceği önerilebilir.
13. Çalışmada öncelikli mineral katkı olarak UK kullanımı tercih edilmiştir. UK yerine yüksek fırın cürufu (YFC) kullanarak benzer bir çalışmanın gerçekleştirilmesi halinde elde edilecek sonuçlar dikkat çekici olabilir.
14. Numune boyut etkisini görmek açısından yüksek sıcaklık uygulaması için farklı boyutta numuneler denenebilir. Buna ek olarak yüksek sıcaklık uygulama süresinin etkisi de araştırılabilir.

15. Çalışmada mineral katkı kullanım oranı %30 olarak belirlenmiştir. Aynı mineral katkıları daha yüksek oranda kullanılarak ve/veya daha farklı mineral katkıları kullanmak suretiyle benzer çalışmalar gerçekleştirilebilir.



## 6. KAYNAKLAR

1. Sabir, B., B., Wild, S. and Bai, J., Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review, Cem. Concr. Compos., 23,6 (2001) 441-454.
2. Cherezy, M., Maret, V. and Frouin, L., Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete), Cem. Concr. Res., 25,7 (1995) 1491-1500.
3. Ahsan, M., B. and Hossain, Z., Supplemental Use of Rice Husk Ash (RHA) as a Cementitious Material in Concrete Industry, Construct. Build. Mater. 178 (2018) 1-9.
4. Habeeb, G., A. and Fayyadh, M., M., Rice Husk Ash Concrete: The Effect of Rha Average Particle Size on Mechanical Properties and Drying Shrinkage, Aust. J. Basic Appl. Sci., 3,3 (2009) 1616-1622.
5. Pedro, D., Brito, J. and Evangelista, L., Influence of the Use of Recycled Concrete Aggregates from Different Sources on Structural Concrete, Constr. Build. Mater., 71 (2014) 141-151.
6. Naik, T., R., Sustainability of Concrete Construction, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 13 (2008) 98-103.
7. Marie, I. and Quiasrawi, H., Closed-Loop Recycling of Recycled Concrete Aggregates, J. Clean. Prod., 37 (2012) 243-248.
8. Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K., S. and Singh, M., Environmental Impact Assessment of Fly Ash and Silica Fume Based Geopolymer Concrete, J. Clean. Prod., 254 (2020) 120147.
9. Mehta, A. and Deepankar, A., Silica Fume and Waste Glass in Cement Concrete Production: A Review, Journal of Building Engineering, 29 (2020) 100888.
10. Tripathi, D., Kumar, R., Mehta, P., K. and Singh, A., Silica Fume Mixed Concrete in Acidic Environment, Materials Today: Proceedings, In press (2020).
11. Berredjem, L., Arabi, N. and Laurent, M., Mechanical and Durability Properties of Concrete Based on Recycled Coarse and Fine Aggregates Produced from Demolished Concrete, Constr. Build. Mater., 246 (2020) 118421.
12. Boudali, S., Kerdal, D., E., Ayed, K., Abdulsalam, B. and Soliman, A., M., Performance of Self-Compacting Concrete Incorporating Recycled Concrete Fines and Aggregate Exposed to Sulphate Attack, Constr. Build. Mater., 124 (2016) 705-713.
13. Singh, N., Kumar, P. and Goyal, P., Reviewing the behaviour of High Volume Fly Ash based Self Compacting Concrete, Journal of Building Engineering, 26 (2019) 100882.

14. Davraz, M., Pehlivanoglu H., E. and Kili arslan, S., Influence of High Temperature on Concrete Produced from Portland Cement with Boron Additives, Special issue of the 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2016), 132 (2017) 3-11.
15. Binici, H.,  a atay, İ. ve Kaplan, H., Değişik Faktörlerin Beton Mukavemetine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (2000) 200-209.
16. Sahoo, S., Mahapatra, T., R., Priyadarshini, N., Mahapatra, S., Naik, S. and Jaypuria, S.. Influence of Water Binder Ratio on Strength and Acid Resistance of Concrete Made Up of Mineral Admixture as Supplementary Cementitious Material, Materials Today: Proceedings, 26,2 (2020) 796-803.
17. Zongjin, L., B., Advanced Concrete Technology, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2011.
18. Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E., H. and Ait-Mokhtar, A., Performance and Durability of Self Compacting Concrete Using Recycled Concrete Aggregates and Natural Pozzolan, J. Clean. Prod., 165 (2017) 415-430.
19. Chan, S., Y., N., Luo, X. and Sun, W., Effect of High Temperature and Cooling Regimes on the Compressive Strength and Pore Properties of High Performance Concrete, Construct. Build. Mater., 14,5 (2000) 261-266.
20. TS 706 EN 12620+A1, Beton Agregaları, T. S. E., Ankara, Nisan 2009.
21. ASTM D8, Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements, ASTM International, December 2018.
22. Neville, A., M. and Brooks, J., J., Concrete Technology, Essex, UK: Longman Group, 1990.
23. Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, Y., M., Topal, A. ve Öztürk, A., U., Beton, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2012.
24. Güner, M., S. ve Süme, V., Yapı Malzemesi ve Beton, Üçüncü Baskı, Aktif Yayınevi, İstanbul, 2001.
25. Neville, A., M., Properties of Concrete, Fourth Edition, John Wiley & Sons. Inc., New York, 1996.
26. TS EN 197-1, Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, T. S. E., Ankara, 2002.

27. Mills, A., P., Hayward, H., W. and Rader, L., F., *Materials of Construction*, John Wiley and Sons, New York, 1955.
28. Chandra, S., *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*, Westwood, N.J., U.S.A., Noyes Publications, 1997.
29. Wang, Y., Tan, Y., Wang, Y. and Liu, C., *Mechanical Properties and Chloride Permeability of Green Concrete Mixed with Fly Ash and Coal Gangue*, Construct. Build. Mater., 233 (2020) 117166-117179.
30. <https://www.worldcementassociation.org/wca-media/infographics/> World Cement Association. 20 June 2020.
31. Popovics, S., *Concrete materials: properties, specifications, and testing*, Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1992.
32. TS EN 1008, *Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları*, T. S. E., Ankara, Nisan 2003.
33. Erdoğan, T., Y., *Beton*, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası, Ankara, 2003.
34. Ramachandran V., S. and Malhotra M., *Concrete Admixtures Handbook- Part 7: Superplasticizers*, Noyes Publications, 1984.
35. TS EN 934-2, *Kimyasal Katkılar-Beton Harç ve Şerbeti İçin-Bölüm 2: Beton Katkıları*, T. S. E., Ankara, 2002.
36. ASTM C 494-99a, *Standart Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, Annual Book of ASTM Standards, 2002.
37. Akman, M., S., *Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması*, 4. Ulusal Beton Kongresi, Ekim 1996, İstanbul, Bildiriler Kitabı I: 1-11.
38. ASTM C 618, *Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, ASTM International, 1991.
39. Corinaldesi, V. and Moriconi, G., *The Role of Industrial by-Products in Selfcompacting Concrete*, Constr. Build. Mater., 25 (2011) 3181-3186.
40. Matos, P., R., Oliveira, A., L., Pelisser, F. and Prudêncio, L. R., *Rheological Behavior of Portland Cement Pastes and Self-Compacting Concretes Containing Porcelain Polishing Residue*, Constr. Build. Mater., 175 (2018) 508-518.
41. Matos, P., R., Foiato, M. and Prudêncio, L., R., *Ecological, Fresh State and Long-Term Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash High-Performance Self-Compacting Concrete*, Constr. Build. Mater., 203 (2019) 282-293.

42. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. and Bolio, H., Sustainable Cement Production- Present and Future, Cement Concr. Res., 41 (2011) 642–650.
43. Salas, D., A., Ramirez, A., D., Rodríguez, C., R., Petroche, D., M., Boero, A., J. and Duque-Rivera, J., 2016. Environmental Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review, J. Clean. Prod., 113 (2016) 114-122.
44. Lothenbach, B., Scrivener, K. and Hooton, R., D., Supplementary Cementitious Materials, Cem. Concr. Res., 41 (2011) 1244-1256.
45. Marceau, M., L., Gajda, J. and VanGeem, M., G., Use of Fly Ash in Concrete: Normal and High Volume Ranges, Portland Cement Association, Illinois, 2002.
46. Chao-Lung, H., Le Anh-Tuan, B. and Chun-Tsun, C., Effect of Rice Husk Ash on the strength and durability characteristics of concrete, Construct. Build. Mater., 25,9 (2011) 3768-3772.
47. Taylor-Lange, S., C., Lamon, E., L., Riding, K., A. and Juenger, M., C., G., Calcined Kaolinite–Bentonite Clay Blends as Supplementary Cementitious Materials, Appl. Clay Sci., 108 (2015) 84-93.
48. Erdoğan, Ş., Arslantürk, C. and Kurbetci, Ş, Influence of Fly Ash and Silica Fume on the Consistency Retention and Compressive Strength of Concrete Subjected to Prolonged Agitating, Construct. Build. Mater., 25 (2011) 1277-1281.
49. Rumman, R., Bari, M., S., Manzur, T., Kamal, M., R. and Noor, M., A., A Durable Concrete Mix Design Approach Using Combined Aggregate Gradation Bands and Rice Husk Ash Based Blended Cement, Journal of Building Engineering, 30 (2020) 101303.
50. Juenger, M., C., G. and Siddique, R., Recent Advances in Understanding the Role of Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Cement Concr. Res., 78 (2015) 71-80,
51. Snellings, R., Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials, RILEM Tech. Lett., 1 (2016) 50-55.
52. Yavuz, H., Su Geçirimsiz Beton Tasarımı ve Örnek Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
53. Anjos, M., A., S., Camões, A. and Jesus, C., Eco-Efficient Self-Compacting Concrete with Reduced Portland Cement Content and High Volume of Fly Ash and Metakaolin, Key Eng. Mater., 634 (2015) 172-181.
54. Ashish, D., K. and Verma, S., K., Determination of Optimum Mixture Design Method for Self- Compacting Concrete: Validation of Method with Experimental Results, Constr. Build. Mater., 217 (2019) 664–678.

55. Karahan, O. and Atiş, C., D., The Durability Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Fly-Ash Concrete, Mater. Des., 32,2 (2011) 1044-1049.
56. Wu, Z. and Naik, T., R., Properties of Concrete Produced from Multicomponent Blended Cements, Cem. Concr. Res., 32,12 (2002) 1937-1942.
57. Khoury, G., Majorana, C., Pesavento, F. and Schrefler, B., Modelling of Heated Concrete, Mag. Concr. Res., 54 (2002) 77-101.
58. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TCMB, Ankara, 2009.
59. American Coal Ash Association, Fly Ash Facts for Highway Engineers, A Technical Report- FHWA-IF-03-019, Washington DC, 2003.
60. Kaur, G., Singh, S., P. and Kaushik, S., K., Reviewing Some Properties of Concrete Containing Mineral Admixtures, Indian Concr. J., 86 (2012) 35-51.
61. Federal Highway Administration Research and Technology, User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction, FHWA-RD-97-148, Georgetown Pike, Accessed date: 30 May 2019.
62. Tokyay, M., Cement and Concrete Mineral Admixtures, Taylor & Francis Group, New York, 2016, p. 12.
63. McCarthy, M., J. and Dhir, R., K., Development of High Volume Fly-Ash Cements for Use in Concrete Construction, Fuel, 84,11 (2005) 1423-1432.
64. Dhir, R., K., Hubbard, F., H., Munday, J., G., L., Jones, M., R. and Duerden, S., L., Contribution of PFA to Concrete Workability and Strength Development, Cem. Concr. Res., 18,2 (1988) 277-289.
65. Tokyay, M. and Erdoğan, K., Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TCMB, Ankara, 1998.
66. Gajda, J., Weber, M. and Diaz-Loya, I., A Low Temperature Rise Mixture for Mass Concrete, American Concrete Institute, 36 (2014) 48-53.
67. Sumer, M., Compressive Strength and Sulfate Resistance Properties of Concretes Containing Class F and Class C Fly Ashes, Constr. Build. Mater., 34 (2012) 531-536.
68. Uysal, M. and Akyuncu, V., Durability Performance of Concrete Incorporating Class F and Class C Fly Ashes, Constr. Build. Mater., 34 (2012) 170-178.
69. Kayali, O. and Sharfuddin Ahmed, M., Assessment of High Volume Replacement Fly Ash Concrete – Concept of Performance Index, Constr. Build. Mater., 39 (2013) 71-76.



70. Berry, E., E., Hemmings, R., T. and Cornelius, B., J., Mechanisms of Hydration Reactions in High Volume Fly Ash Pastes and Mortars, Cem. Concr. Compos., 12 (1990) 253-261.
71. Feldman, R., F., Carette, G., G. and Malhotra, V., M., Studies on Mechanics of Development of Physical and Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash Cement Pastes, Cem. Concr. Compos., 12 (1990) 245-251.
72. Habert, G. and Roussel, N., Study Of Two Concrete Mix-Design Strategies To Reach Carbon Mitigation Objectives, Cem. Concr. Compos., 31 (2009) 397-402.
73. Wang, X., Y. and Park, K., B., Analysis of Compressive Strength Development of Concrete Containing High Volume Fly Ash, Constr. Build. Mater., 98 (2015) 810-819,
74. Pitroda, J., Zala, L., B. and Umrigar, F., S., Experimental Investigations On Partial Replacement Of Cement with Fly-Ash in Design Mix Concrete, Int. J. Adv. Eng. Technol., 3,4 (2012) 126-129.
75. Mohamed, H., A., Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Under Different Curing Conditions, Ain Shams Eng. J., 2 (2011) 79-86.
76. Atis, C., D., High-Volume Fly Ash Concrete With High Strength and Low Drying Shrinkage, J. Mater. Civ. Eng., 15,2 (2003) 153-156.
77. Fan, K., Li, D., Damrongwiriyanupap, N. and Li L., Y., Compressive Stress-Strain Relationship for Fly Ash Concrete under Thermal Steady State, Cem. Concr. Compos., 104 (2019) 103371.
78. Siddique, R., Utilization of Silica Fume in Concrete: Review of Hardened Properties, Resour. Conserv. Recycl., 55 (2011) 923-932,
79. Ganesh Babu, K. and Surya Prakash, P., V., Efficiency of Silica Fume in Concrete, Cem. Concr. Res., 25 (1995) 1273-1283.
80. Kandil, U., Uçucu Kül ve Silis Dumanı İçeren Betonların Geçirimlilik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
81. Erdem, T., K. and Kırca, Ö., Use of Binary and Ternary Blends in High Strength Concrete, Constr. Build. Mater., 22 (2008) 1477-1483.
82. Khayat, K., H. and Aitcin, P., C., Silica Fume: A Unique Supplementary Cementitious Material, Miner. Admixtures Cem. Concr. ABI Books Private Limited, 1993.
83. Mazloom, M., Ramezaniapour, A., A. and Brooks, J., J., Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Cement Concr. Compos., 26 (2004) 347-357.

84. Topçu, İ., B. ve Canbaz, M., Microstructural Analysis of Concrete with Silica Fume, 9th International Conference on Comp. Engineering, 2002, San Diego, 793-794.
85. Sandemir, M., Effect of Silica Fume and Ground Pumice on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Concrete, Constr. Build. Mater., 49 (2013) 484-489.
86. Scrivener, K., L., Crumbie, A., K. and Laugesen, P., The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete, Interface Sci., 12,4 (2004) 411-421.
87. Yan, H., Sun, W. and Chen, H., The Effect of Silica Fume and Steel Fiber on the Dynamic Mechanical Performance of High-Strength Concrete, Cem. Concr. Res., 29,3 (1999) 423-426.
88. ACI Committee 234, 234R-06 - Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, Michigan, 2006.
89. Khan, M. And Ali, M., Improvement in Concrete Behavior with Fly Ash, Silica-Fume and Coconut Fibres, Constr. Build. Mater., 203 (2019) 174-187.
90. Detwiler, R., J. and Kumar Mehta, P., Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete, ACI Mater. J., 86,6 (1989) 609-614.
91. Santosh, P., H., Dwivedi, A., K. and Chatterjee, A., M., Optimize Properties of Concrete with Silica Fume, J. Mater. Sci., 2 (2017) 1-4.
92. Kadri, E., H., Duval, R., Aggoun, S. and Kenai, S., Silica Fume Effect on Hydration Heat and Compressive Strength of High-Performance Concrete, ACI Mater. J., 106,2 (2009) 107-113.
93. Mahalingam, B., Nagamani, K., Kannan, L., S., Mohammed Haneefa, K. and Bahurudeen, A., Assessment of Hardened Characteristics of Raw Fly Ash Blended Self-Compacting Concrete, Perspect. Sci., 8 (2016) 709-711.
94. Karthikeyan, B. and Dhinakaran, G., Influence of Ultrafine TiO<sub>2</sub> and Silica Fume on Performance of Unreinforced and Fiber Reinforced Concrete, Constr. Build. Mater., 161 (2018) 570-576,
95. Brooks, J., J. and Johari, M., M., Effect of Metakaolin on Creep and Shrinkage of Concrete, Cement Concr. Compos., 23,6 (2001) 495-502.
96. Ding, J., T. and Li, Z., J., Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete, ACI Mater. J., 99,4 (2002) 393-398.

97. Kostuch, J., A., Walters, G., V. and Jones, T., R., High Performance Concrete Incorporating Metakaolin: A Review, *Concrete* 2000, 1993, University of Dundee, 1799-1811.
98. Ambroise, J., Maximilien, S. and Pera, J., Properties of Metakaolin Blended Cements, *Adv. Cem. Based Mater.*, 1,4 (1994) 161-168.
99. Souri, A., Kazemi-Kamyab, H., Snellings, R., Naghizadeh, R., Golestani-Fard, F. and Scrivener, K., Pozzolanic Activity of Mechanochemically and Thermally Activated Kaolins in Cement, *Cem. Concr. Res.*, 77 (2015) 47-59.
100. Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X. and Degeimbre R., Durability of Mortars Modified with Metakaolin, *Cem. Concr. Res.*, 33,9 (2003) 1473-1479.
101. Khatib, J., M., Baalbaki, O. and ElKordi, A., A., "Metakaolin." Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Woodhead Publishing, 2018.
102. Kakali, G., Perraki, T., Tsvivilis, S. and Badogiannis, E., Thermal Treatment of Kaolin: the Effect of Mineralogy on the Pozzolanic Activity, *Appl. Clay Sci.*, 20 (2001) 73-80.
103. Vejmelkova, E., Pavlikova, M., Keppert, M., Kersner, Z., Rovnanikova, P. and Ondracek, M., High Performance Concrete with Czech Metakaolin: Experimental Analysis of Strength, Toughness and Durability Characteristics, *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 1404-1411.
104. Mehdipour, S., Nikbin, I., M., Dezhampahan, S., Mohebbi, R., Moghadam, H., Charkhtab, S. and Moradi, A., Mechanical Properties, Durability and Environmental Evaluation of Rubberized Concrete Incorporating Steel Fiber And Metakaolin at Elevated Temperatures, *J. Clean. Prod.*, 254 (2020) 120126.
105. Madandoust, R. and Mousavi, S., Y., Fresh and Hardened Properties of Selfcompacting Concrete Containing Metakaolin, *Constr. Build. Mater.*, 35 (2012) 752-760.
106. Poon, C., S., Azhar, S., Anson, M. and Wong, Y., L., Performance of Metakaolin Concrete at Elevated Temperatures, *Cement Concr. Compos.*, 25 (2003) 83-89.
107. Poon, C., S., Lam, L., Kou, S., C., Wong, Y., L. and Wong R., Rate of Pozzolanic Reaction of Metakaolin in High-Performance Cement Pastes, *Cem. Concr. Res.*, 31 (2001) 1301-1306.
108. Frías, M. and Cabrera, J., Pore Size Distribution and Degree of Hydration of Metakaoline Cement Pastes, *Cement Concr. Res.*, 30 (2000) 561-569.
109. Khatib, J., M., Negim, E., M., and Gjonbalaj, E., High Volume Metakaolin as Cement Replacement in Mortar, *World J. Chem.*, 7,1 (2012) 7-10.

- 110.Salimi, J., Ramezaniapour, A., M. and Moradi, M., J., Studying the Effect of Low Reactivity Metakaolin on Free and Restrained Shrinkage of High Performance Concrete, Journal of Building Engineering, 28 (2020) 101053.
- 111.Badogiannis, E. and Tsivilis, S., Exploitation of Poor Greek Kaolins: Durability of Metakaolin Concrete, Cem. Concr. Compos., 31,2 (2009) 128-133.
- 112.Guneyisi, E., Gesoglu, M., Karaoglu, S. and Mermerdas, K., Strength, Permeability and Shrinkage Cracking of Silica Fume and Metakaolin Concretes, Constr. Build. Mater., 34 (2012) 120-130.
- 113.Parande, A., K., Ramesh Babu, B., Karthik, M., A., Kumar, K., K. and Palaniswamy, N., Study on Strength and Corrosion Performance for Steel Embedded in Metakaolin Blended Concrete/Mortar, Constr. Build. Mater., 22,3 (2008) 127-134.
- 114.Menhosh, A., A., Wang, Y., Wang, Y. and Augustus-Nelson, L., Long Term Durability Properties of Concrete Modified with Metakaolin and Polymer Admixture, Constr. Build. Mater., 172 (2018) 41-51.
- 115.Lee, G., Ling, T., C., Wong, Y., L. and Poon, C., S., Effects of Crushed Glass Cullet Sizes, Casting Methods and Pozzolanic Materials on ASR of Concrete Blocks, Constr. Build. Mater., 25,5 (2011) 2611-2618.
- 116.Khatib, J., Kayali, O. and Siddique, R., Dimensional Change and Strength of Mortars Containing Fly Ash and Metakaolin, J. Mater. Civ. Eng., 21,9 (2009) 523-528.
- 117.Yehia, S., Helal, K., Abusharkh, A., Zaher, A. and Istaitiyeh, H., Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete, Int J Concr Struct Mater, 9,2 (2015) 219-239.
- 118.Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L. and Xie, Z., Performance Enhancement Of Recycled Concrete Aggregate- A Review, J. Clean. Prod., 112 (2016) 466-472.
- 119.Gomes P., C., C., Ulsen, C., Pereira, F., A., Quattrone, M. and Angulo, S., C., Comminution and Sizing Processes of Concrete Block Waste as Recycled Aggregates, Waste Manage, 45 (2015) 171-179.
- 120.Türkiye Hazır Beton Birliği, 2014. (THBB) İstatistikler.
- 121.Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. and Evangelista, L., Mechanical Performance of Concrete Made With Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants, J. Clean. Prod., 99 (2015) 59-74.
- 122.Xie, T., Gholampour, A. and Ozbakkaloglu, T., Toward the Development of Sustainable Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Comprehensive Review of Studies on Mechanical Properties, J. Mater. Civ. Eng., 30,9 (2018) 04018211.

123. Aktaş, Z., Bina Yıkım Atıklarının Altyapı Projelerinde Değerlendirilmesi, Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, 2015.
124. BS EN 206-1-Part: 2, Concrete complementary, British Standards, London, 2006.
125. Buck, A., D., Recycled Concrete, Highw. Res. Rec., 430 (1973) 1-8.
126. Guneyisi, E., Gesoglu, M., Algin, Z. and Yazıcı, H., Effect of Surface Treatment Methods on the Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregates, Constr. Build. Mater., 64 (2014) 172-183.
127. Navdeep Singh, M., E. and Singh, S., P., Carbonation and Electrical Resistance of Self Compacting Concrete Made with Recycled Concrete Aggregates and Metakaolin, Constr. Build. Mater., 121 (2016) 400-409.
128. Tam, V., W., Y., Soomro, M. and Evangelista, A., C., J., A Review of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000–2017), Constr. Build. Mater., 172 (2018) 272-292.
129. Thomas, C., Brito, J., Cimentada, A. and Sainz-Aja, J., A., Macro- and Micro-Properties of Multi-Recycled Aggregate Concrete, J. Clean. Prod., 245 (2020) 118843.
130. Andaç, M., S. ve Oral, E., Hazır Beton Üretiminde Atık Yönetimi: Türkiye'deki Taze Beton Atığının Durumu, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 31,2 (2016) 85-92.
131. Özalp, F., Yılmaz, H., D., Kaya, Ö., Kara, M. ve Kılıç, Y., İnşaat ve Yıkıntı Atıklarından Geri Kazanılan Agregaların Çeşitli Beton Elemanların Üretiminde Değerlendirilmesi, 9. Ulusal Beton Kongresi, Nisan 2015, Antalya, Bildiriler Kitabı, 411-420.
132. TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, T. S. E., Ankara, 2002.
133. <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/applications.pdf> Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate. 22 Haziran 2020.
134. Silva, R., V., Brito, J. and Dhir, R., K., Fresh-State Performance of Recycled Aggregate Concrete: A Review, Constr. Build. Mater., 178 (2018) 19-31.
135. Hansen, T., C. and Narud, H., Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate, Concr Int., 5 (1983) 79-83.
136. Gómez-Soberón, J., M., V., Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate: An Experimental Study, Cement Concr. Res., 32 (2002) 1301-1311.

137. Leite, M., B., Figueire Do Filho, J., G., L. and Lima, P., R., L., Workability Study of Concretes Made with Recycled Mortar Aggregate, Mater. Struct. Constr., 46 (2012) 1765-1778.
138. González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F. and Seara-Paz, S., Analysis of Rheological Behaviour of Self-Compacting Concrete Made with Recycled Aggregates, Constr. Build. Mater., 157 (2017) 18-25.
139. Mefteh, H., Kebaili, O., Oucief, H., Berredjem, L., and Arabi, N., Influence of Moisture Conditioning of Recycled Aggregates on the Properties of Fresh and Hardened Concrete, J. Clean Prod., 54 (2013) 282-288.
140. Muduli, R. and Mukharjee, B., B., Effect of Incorporation of Metakaolin and Recycled Coarse Aggregate on Properties of Concrete, J. Clean Prod., 209 (2019) 398-414.
141. Sasanipour, H. and Aslani, F., Durability Properties Evaluation of Self-Compacting Concrete Prepared with Waste Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates, Constr. Build. Mater., 236 (2020) 117540.
142. Torres-Acosta, A., A., Díaz-Cruz, L., A., Concrete Durability Enhancement from Nopal (*Opuntia Ficus-Índica*) Additions, Constr. Build. Mater., 243 (2020) 118170.
143. Abdulkader, E., M. and Nehme, S., G., Utilization of Industrial Waste Perlite Powder in Self-Compacting Concrete, J. Clean. Prod., 156 (2017) 507-517,
144. Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A., R. and Salehi, M., Electrical Resistivity of Concrete, Concrete International, 37,5 (2015) 41-46.
145. Chia, K., S. and Zhang, M., Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete, Cement Concr. Res., 32 (2002) 639-645.
146. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB), İstanbul, 2010.
147. Erdoğan, Ş., Yapı Malzemelerinin Bozulması Ders Notları, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
148. Neville, A., Maintenance and Durability of Structures, Concr. Int., 19,11 (1997) 52-56.
149. Doğan, Ü., A., Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimlilik Özellikleri ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
150. Badogiannis, E., Aggeli, E., Papadakis, V., G. and Tsivilis, S., Evaluation of Chloride-Penetration Resistance of Metakaolin Concrete by means of a Diffusion E Binding Model And of the K-Value Concept, Cem. Concr. Compos., 63 (2015) 1-7.

151. Abed, M. and Nemes, R., Long-Term Durability of Self-Compacting High-Performance Concrete Produced with Waste Materials, Constr. Build. Mater., 212 (2019) 350-361.
152. Yaragal, S., C. and Ramanjaneyulu, S., Exposure to Elevated Temperatures and Cooled under Different Regimes–A Study on Polypropylene Concrete, Advances in Materials Research, 5,1 (2016) 21-34.
153. Janotka, I. and Nürnberggerová, T., Effect of Temperature on Structural Quality of the Cement Paste and High-Strength Concrete with Silica Fume, Nucl. Eng. Des., 235,17 (2005) 2019-2032.
154. <https://www.ekoyapidergisi.org/4698-binalarimiz-yangina-karsi-guvenli-mi.html>  
Binalarımız Yangına Karşı Güvenli Mi? 22 Haziran 2020.
155. <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/37p.pdf> CIP-37 Self Consolidating Concrete (SCC) 22 Haziran 2020.
156. Djelal, C., Vanhove, Y. and Magnin, A., Tribological Behaviour of Self Compacting Concrete, Cement Concr. Res., 34,5 (2004) 821-828.
157. Ouchi-Kochi, M. and Hibino-Nagaoka, M., Development, Applications and Investigations of Self-Compacting Concrete, International Workshop, 2000, Kochi – Japan, 1-3.
158. Silva, Y., F., Lange, D., A. and Delvasto, S., Effect of Incorporation of Masonry Residue on the Properties of Self-Compacting Concretes, Constr. Build. Mater., 196 (2019) 277-283.
159. Faraj, R., H., Hama Ali, H., F., Sherwani, A., F., H., Hassan, B., R. and Karim, H., Use of Recycled Plastic in Self-Compacting Concrete: A Comprehensive Review on Fresh and Mechanical Properties, Journal of Building Engineering, 30 (2020) 101283.
160. Ünal, O., Agregat Türünün Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2,1 (2013).
161. Açıkgenç, M., Karataş, M. ve Ulucan, Z., Ç., Elâzığ Yöresine ait Atık Tuğla ve Kireç Taşı Tozunun Kendiliğinden Yerleşen Harcın Mühendislik Özelliklerine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19,6 (2013) 249-255.
162. EFNARC 2002, Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete, ISBN 0 953973344, UK, 2002.
163. EFNARC 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use, UK, 2005.
164. Carvalho, J., M., F., Fontes, W., C., Azevedo, C., F., Brigolini, G., J., Schmidt, W. and Peixoto, R., A., F., Enhancing the Eco-Efficiency of Concrete Using Engineered

- Recycled Mineral Admixtures and Recycled Aggregates, J. Clean Prod., 257 (2020) 120530.
165. Vivek, S., S. and Dhinakaran, G., Fresh and Hardened Properties of Binary Blend High Strength Self Compacting Concrete, Eng. Sci. Technol. Int. J., 20 (2017) 1173-1179.
166. Dinakar, P., Reddy, M., K. and Sharma, M., Behaviour of Self Compacting Concrete Using Portland Pozzolana Cement with Different Levels of Fly Ash, J. Mater., 46 (2013) 609-616.
167. Dadsetan, S. and Bai, J., Mechanical and Microstructural Properties of Selfcompacting Concrete Blended with Metakaolin, Ground Granulated Blastfurnace Slag and Fly Ash, Constr. Build. Mater., 146 (2017) 658-667.
168. Mastali, M. and Dalvand, A., Use of Silica Fume and Recycled Steel Fibers in Self-Compacting Concrete (SCC), Constr. Build. Mater. 125 (2016) 196–209.
169. Sfikas, I., P., Badogiannis, E., G. and Trezos, K., G., Rheology and Mechanical Characteristics of Self-Compacting Concrete Mixtures Containing Metakaolin, Constr. Build. Mater., 64 (2014) 121-129.
170. Hassan, A., A., A., Lachemi, M. and Khandaker, M., A., H., Effect of Metakaolin and Silica Fume on the Durability of Self-Consolidating Concrete, Cement Concr. Compos., 34 (2012) 801-807.
171. Kannan, V. and Ganesan, K., Chloride and Chemical Resistance of Self Compacting Concrete Containing Rice Husk Ash and Metakaolin, Constr. Build. Mater., 51 (2014) 225-234.
172. Singh, N., Mithulraj, M. and Arya, S., Resources, Conservation & Recycling Utilization of Coal Bottom Ash in Recycled Concrete Aggregates Based Self Compacting Concrete Blended with Metakaolin, Resour. Conserv. Recycl., 144 (2019) 240-251.
173. Santos, A., C., Ortiz-Lozano, J., A., Villegas, N. and Aguado, A., Experimental Study about the Effects of Granular Skeleton Distribution on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete (SCC), Constr. Build. Mater., 78 (2015) 40-49.
174. Nikbin, I., Beygi, M., Kazemi, M., Amiri, J., V., Rahmani, E., Rabbanifar, S. and Eslami, M., A Comprehensive Investigation into the Effect of Aging and Coarse Aggregate Size and Volume on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, Mater. Des., 59 (2014) 199-210.
175. Jawahar, J., G., Sashidhar, C., Reddy, I., R. and Peter, J., A., Effect of Coarse Aggregate Blending on Short-Term Mechanical Properties of Self Compacting Concrete, Mater. Des., 43 (2013) 185-194.



176. Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J., Á., Esteban, L., M., Vicente-Vas, R. and Orna-Carmona, M., Physico-Mechanical Properties of Multi-Recycled Self-Compacting Concrete Prepared with Precast Concrete Rejects, Constr. Build. Mater., 153 (2017) 364-373.
177. González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Eiras-López, J. and Rojo-López, G., Tools for the Study of Self-Compacting Recycled Concrete Fresh Behaviour: Workability and Rheology, J. Clean Prod., 156 (2017) 1-18.
178. Vinay Kumar, B., M., Ananthan, H. and Balaji, K., V., A., Experimental Studies on Utilization of Coarse and Finer Fractions of Recycled Concrete Aggregates in Self Compacting Concrete Mixes, Journal of Building Engineering, 9 (2017) 100-108.
179. Kanish Kapoor, M., E., Singh, S., P. and Bhupinder, S., Durability of Self-Compacting Concrete Made with Recycled Concrete Aggregates and Mineral Admixtures, Constr. Build. Mater., 128 (2016) 67-76.
180. Navdeep Singh, M., E. and Singh, S., P., Carbonation Resistance and Microstructural Analysis of Low and High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates, Constr. Build. Mater., 127 (2016) 828-842.
181. Güneyisi, E., Gesoglu, M., Algin, Z. and Yazıcı, H., Rheological and Fresh Properties of Self-Compacting Concretes Containing Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates, Constr. Build. Mater., 113 (2016) 622-630.
182. Carro-López, D., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., Brito, J. and Varela-Puga, F., Proportioning, Microstructure and Fresh Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Sand, Procedia Engineering, (2017) 645-657.
183. Pereira-de-Oliveira, L., A., Nepomuceno, M., C., S., Castro-Gomes, J., P. and Vila, M., F., C., Permeability Properties of Self-Compacting Concrete with Coarse Recycled Aggregates, Constr. Build. Mater., 51 (2014) 113-120.
184. Grdic, Z., J., Toplicic-Curcic, G., A., Despotovic, I., M. and Ristic, N., S., Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse Recycled Concrete Aggregate, Constr. Build. Mater., 24 (2010) 1129-1133.
185. Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A. and Ramyar, K., Freeze–Thaw Resistance, Mechanical and Transport Properties of Self-Consolidating Concrete Incorporating Coarse Recycled Concrete Aggregate, Materials and Design, 53 (2014) 983-991.
186. Modani, P., O. and Mohitkar, V., M., Recycled Aggregate Self Compacting Concrete, International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, 2,2 (2015) 48-57.
187. Modani, P., O. and Mohitkar, V., M., Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate: A Solution for Sustainable Development, International Journal of Civil and Structural Engineering, 4,3 (2014) 430-440.

188. Tang, W., C., Ryan, P., C., Cui, H., Z. and Liao, W., Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate, Advances in Materials Science and Engineering, 2016 (2016) 1-11.
189. Kapoor, K., Singh, S., P. and Singh, B., Permeability of Self-Compacting Concrete Made with Recycled Concrete Aggregates and Metakaolin, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 6,5 (2017) 293-313.
190. Kou, S., C. and Poon, C., S., Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates, Cem. Concr. Compos., 31,9 (2009) 622-627.
191. Hu, J., Wang, Z. and Kim, Y., Feasibility Study of Using Fine Recycled Concrete Aggregate in Producing Self-Consolidation Concrete, J. Sustain. Cem.-Based Mater., 2,1 (2013) 20-34.
192. Carro-López, D., González-Fontebó, B., Brito, J., Martínez-Abellá, F., González-Taboada, I. and Silvac, P., Study of the Rheology of Self-Compacting Concrete with Fine Recycled Concrete Aggregates, Constr. Build. Mater., 96 (2015) 491-501.
193. Wu, Z., Khayat, K., H. and Shib, C., Changes in Rheology and Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete with Silica Fume Content, Cem. Concr. Res., 123 (2019) 105786.
194. TS 802, Beton Karışımı Hesap Esasları, T. S. E., Ankara, 1985.
195. ASTM C 131-03, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, 2003.
196. TS EN 12350-8, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 8: Kendiliğinden yerleşen beton- Çökme yayılma deneyi, T. S. E., Ankara, Eylül 2019.
197. TS EN 12350-12, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 12: Kendiliğinden yerleşen beton- J halkası deneyi, T. S. E., Ankara, Nisan 2011.
198. TS EN 12350-11, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 11: Kendiliğinden yerleşen beton- Elekte ayrışma deneyi, T. S. E., Ankara, Nisan 2011.
199. TS EN 12390-3, Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, T. S. E., Ankara, 2003.
200. TS EN 12390-6, Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çökme Dayanımının Tayini, T. S. E., Ankara, 2002.
201. TS EN 12390-5, Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, T. S. E., Ankara, 2002.

- 202.DIN 52108, Wear Testing of Inorganic, Nonmetallic Materials Using The Böhme Abrasive Wheel, Deutsche Norm, 2002.
- 203.BS 1881: Part 209, Recommendations for the Measurement of Dynamic Modulus of Elasticity, British Standard, 1990.
- 204.IS 13311: Part 1, Non-Destructive Testing of Concrete - Methods of Test - Ultrasonic Pulse Velocity, Indian Standard, 1992.
- 205.ASTM C 1202 – 12, Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, Philadelphia, 2012.
- 206.TS EN 12390-8, Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini, T. S. E., Ankara, Nisan 2010.
- 207.ASTM C 1585, Standart Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, Philadelphia, 2013.
- 208.Shang, X. and Lu, Z., Impact of High Temperature on the Compressive Strength of ECC, Advances in Materials Science and Engineering, 2014 (2014) 919078.
- 209.Wang, W.C., Wang, H.Y., Chang, K.H. and Wang, S.Y., Effect of High Temperature on the Strength and Thermal Conductivity of Glass Fiber Concrete, Constr. Build. Mater., 245 (2020) 118387.
- 210.Otsuki, N., Miyazato, S. and Yodsudjai, W., Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete, J Mater Civil Eng., 15,5 (2003) 443–451.
- 211.Tam, V., W., Y., Gao, X., F. and Tam, C., M., Microstructural Analysis of Recycled Aggregate Concrete Produced from Two-Stage Mixing Approach, Cem. Concr. Res., 35 (2005) 1195–1203.
- 212.Poon, C., S., Shui, Z., H. and Lam, L., Effect of Microstructure of ITZ on Compressive Strength of Concrete Prepared with Recycled Aggregates, Constr. Build. Mater., 18,6 (2004) 461–468.
- 213.Kong, K., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J. and Jiang J., Effect and Mechanism of Surfacecoating Pozzalanics Materials Around Aggregate on Properties and ITZ Microstructure of Recycled Aggregate Concrete, Constr. Build. Mater., 24,5 (2010) 701–708.
- 214.TS 13515, TS EN 206-1'in Uygulamasına Yönelik Tamamlayıcı Standard, T. S. E., Ankara, 2012.

- 215.Mwilongo, K., Machunda, R. And Jande, Y., Effect of Elevated Temperature on Compressive Strength and Physical Properties of Neem Seed Husk Ash Concrete. Materials, 13 (2020) 1198.
- 216.Xie, Q., Zhang, L., Yin, S., Zhang, Baozhuang and Wu, Y., Effects of High Temperatures on the Physical and Mechanical Properties of Carbonated Ordinary Concrete, Advances in Materials Science and Engineering, 10.1155 (2019) 1-10.



## ÖZGEÇMİŞ

Ufuk KANDİL, İlköğrenimini Ziya Gökalp İlköğretim okulunda, liseyi Erzincan Yabancı Dil Ağırlıklı Lisede tamamladı. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ni bitirdi. 2010 yılında çift anadal programı kapsamında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü tamamladı. 2010 yılında Erzincan Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2010-2011 yıllarında ÖYP kapsamında İTÜ'de 6 ay yabancı dil eğitimi gördü. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (Yapı Malzemeleri) Bölümünde yüksek lisansa başladı. 2014 yılında yüksek lisansını tamamlayıp, 2015 yılının başında doktora başladı. İngilizce bilmektedir.