

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜZEY İYİLEŞTİRMESİ UYGULANMIŞ GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI GEOPOLİMER
BETONLARIN ÖZELLİKLERİ**

DOKTORA TEZİ

Memduh NAS

**MART 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜZEY İYİLEŞTİRMESİ UYGULANMIŞ GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI
GEOPOLİMER BETONLARIN ÖZELLİKLERİ**

Memduh NAS

ORCID : - - -

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şirin KURBETCİ
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Yüzey İyileştirmesi Uygulanmış Geri Dönüştürülmüş Agregalı Geopolimer Betonların Özellikleri” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmalar, KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tez konusunun belirlenmesi, çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında destek ve görüşlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Doç.Dr. Şirin KURBETCİ’ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez izlemesi komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’ya ve Sayın Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU’na teşekkür ederim. Geopolimer konusunda öneri ve desteklerinden yararlandığım Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi’ndeki bazı deney aletlerini kullanmamı sağlayan Doç. Dr. İlker USTABAŞ ve Doç. Dr. Ayberk KAYA’ya teşekkür ederim. Laboratuvarda bana yardımcı olan arkadaşlarım Safa NAYIR, Emrahan AKBULUT, Ali Fuat GENÇ, Olguhan KARAHASAN, Ali KAYA ve Fatih BEBEK’e teşekkür ederim. Sodyum silikat almamda yardımcı olan V. Alperen BAKİ’ye, Aykut ULUSOY’a, Ümit YALÇIN’a, Arman ATASOY’a teşekkür ederim. Metakaolin alamama yardımcı olan Yurdakul AYGÖRMEZ’e, kaolin EAD firmasından Erdem KURT ve Özay SÖĞÜTÇÜ’ye teşekkür ederim. Yüksek fırın cürufu almamda yardımcı olan Mustafa ŞAHİN, Ahmet ORHAN, Mehmet Serhat KESER ve Serdar KÖSE’ye teşekkür ederim. Uçucu kül temininde bana yardımcı olan Mehmet Hilmi KUMKUMOĞLU’na teşekkür ederim. Kimyasal madde desteği sağlayan Palkim firmasından Orhan POLAT’a, BASF firmasından Fatih AYDIN’a teşekkür ederim. Diğer birçok malzememin temini aşamasında bana yardımcı olan Burak EKİCİ, Mustafa ŞAHİN, Mehmet Can YILDIRIM ve ağabeyim Murat NAS’a teşekkür ederim. Tezimin yazım ve düzeltilmesi konusunda bana yardımcı olan Bayram Ali TEMEL’e ve muhtelif konularda desteklerini esirgemeyen Ayşe BAYRAKTAR’a teşekkür ederim. Son olarak doktora çalışmam sırasında tüm derdime ortak olan eşim Ceren ÇETİN NAS’a teşekkürlerimi sunarım.

Memduh NAS
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüzey İyileştirmesi Uygulanmış Geri Dönüştürülmüş Agregalı Geopolimer Betonların Özellikleri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Şirin KURBETCİ’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, 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. 23/03/2023

Memduh NAS

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. İnşaat Sektöründe Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik.....	2
1.3. Geri Dönüştürülmüş Agregalar.....	3
1.3.1. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Üretimi	3
1.3.2. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Özellikleri	5
1.3.3. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi.....	6
1.3.3.1. İşlenebilirlik.....	6
1.3.3.2. Yoğunluk	6
1.3.3.3. Su Emme ve Kılcal Geçirimsizlik.....	7
1.3.3.4. Karbonasyon Derinliği.....	8
1.3.3.5. Klorür İyonu Geçirimsizliği.....	8
1.3.3.6. Basınç Dayanımı	9
1.3.3.7. Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımı	10
1.3.3.8. Elastisite Modülü	10
1.3.3.9. Donma-Çözülme Direnci	11
1.3.4. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi	11
1.3.4.1. GDA'nın Porozitesinin Azaltılması.....	12
1.3.4.1.1. Hızlandırılmış Karbonasyon Yöntemi	12
1.3.4.1.2. Biyobirikinti (Biodeposition) Uygulaması	13
1.3.4.1.3. Puzolan Emdirme.....	14

1.3.4.1.4.	Sodyum Silikat Kullanımı	15
1.3.4.1.5.	Polimer Emülsiyonu	15
1.3.4.2.	Eski Harç Tabakasının Azaltılması.....	16
1.3.4.2.1.	Asit Uygulaması	16
1.3.4.2.2.	Isıl İşlem	17
1.3.5.	GDA'yı Modifiye Etmeden GDAB Özelliklerin İyileştirilmesi.....	18
1.3.5.1.	Karışım Yaklaşımı	18
1.3.5.2.	Lif Kullanımı	19
1.3.5.3.	Nano Parçaların İlavesi	20
1.3.6.	Geri Dönüştürülmüş Agrega ile Yapılan Uygulamalar	20
1.3.6.1.	Pratikteki Uygulamalar	20
1.3.6.2.	Uygulamadaki Zorluklar	22
1.4.	Geopolimer Beton.....	23
1.4.1.	Geopolimerizasyon Reaksiyonu	24
1.4.2.	Geopolimer Betonun Tasarımı ve Üretimi	25
1.4.3.	GPB'nin Kürü	26
1.4.4.	Taze Haldeki Geopolimer Betonların Özellikleri	27
1.4.4.1.	İşlenebilirlik	27
1.4.4.2.	Priz Süresi	28
1.4.4.3.	Hidratasyon Isısı	28
1.4.5.	Sertleşmiş Geopolimer Betonun Özellikleri	29
1.4.5.1.	Basınç Dayanımı	29
1.4.5.2.	Eğilme Dayanımı	31
1.4.5.3.	Elastisite Modülü	31
1.4.5.4.	Rötre.....	32
1.4.6.	Geopolimer Betonun Dayanıklılık Özellikleri.....	32
1.4.6.1.	Kimyasal Dayanıklılık	32
1.4.6.2.	Yüksek Sıcaklığa Karşı Dayanıklılık.....	34
1.4.7.	Geopolimer Betonların Yapılarda Kullanımı	36
1.4.7.1.	Beton Boru	36
1.4.7.2.	Yapı Elemanları	37
1.4.7.3.	Isıya Dayanıklı Yol Üst Kaplaması	38
1.4.7.4.	Zehirli Metallerin Bertarafı.....	39
1.4.7.5.	Su Altı Uygulamaları	39

1.4.8.	GDA Kullanılarak Üretilen GPB'ler ve Literatür Taraması.....	40
1.4.8.1.	İşlenebilirlik	40
1.4.8.2.	Priz Süresi, Ayrışma, Kusma	42
1.4.8.3.	Yoğunluk	43
1.4.8.4.	Basınç Dayanımı	43
1.4.8.5.	Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımları	46
1.4.8.6.	Aşınma Dayanımı	47
1.4.8.7.	Elastisite Modülü	48
1.4.8.8.	Su Emme ve Kılcallık	49
1.4.8.9.	Klorür İyonu Geçirimsiliği.....	50
1.4.8.10.	Asit Direnci.....	51
1.4.8.11.	Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	52
1.4.8.12.	Mikroyapı.....	53
1.5.	Çalışmanın Amacı.....	53
2.	YAPILAN ÇALIŞMAR	55
2.1.	Kapsam	55
2.2.	Kullanılan Malzemeler	56
2.2.1.	Agregalar	56
2.2.1.1.	GDA Temini	56
2.2.1.2.	Agregaların Özellikleri	57
2.2.2.	Çimento.....	59
2.2.3.	Uçucu Kül	59
2.2.4.	Yüksek Fırın Cürufu	60
2.2.5.	Metakaolin	60
2.2.6.	Silis Dumanı	61
2.2.7.	Bağlayıcı Maddelerin Lazer Kırınım Yöntemiyle Tane Boyutu Analizi	61
2.2.8.	Puzolanik Maddelerin Puzolanik Aktivite İndekslerinin Belirlenmesi	62
2.2.9.	Alkali Aktivatörler	64
2.2.9.1.	Sodyum Hidroksit	64
2.2.9.2.	Sodyum Silikat.....	64
2.2.10.	Süperakışkanlaştırıcı.....	64
2.2.11.	Su	65
2.3.	Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar.....	65
2.3.1.	GDA'lara Uygulanacak Puzolanik Şerbet Emdirme Yöntemine Karar	

Verilmesi.....	65
2.3.1.1. Birinci Emdirme Denemesi	66
2.3.1.2. İkinci Emdirme Denemesi	67
2.3.1.3. Üçüncü Emdirme Denemesi	69
2.3.1.4. Dördüncü Emdirme Denemesi.....	71
2.3.2. Agregaların Aşınma Direnci ve Darbe Dayanımlarının Belirlenmesi.....	76
2.3.2.1. Agregaların Los Angeles Aşınma Direncinin Belirlenmesi	77
2.3.2.2. Agregaların Darbe Direncinin Belirlenmesi	78
2.4. Yapılan Deneyler ve Kullanılan Ekipmanlar	80
2.4.1. Geopolimer Beton Üretimi	80
2.4.2. Taze Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler ve Kullanılan Cihazlar	84
2.4.2.1. Çökme Deneyi	84
2.4.2.2. Yayılma Deneyi	84
2.4.2.3. Birim Ağırlık Deneyi	85
2.4.3. Sertleşmiş Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler	85
2.4.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi	85
2.4.3.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi	86
2.4.3.3. Su Emme Deneyi	87
2.4.3.4. Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği Deneyi	88
2.4.3.5. Kılcal Su Emme Deneyi	89
2.4.3.6. Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi.....	91
2.4.3.7. Elektriksel Özdirenç Deneyi.....	91
2.4.3.8. Ultrases Hızlarının Belirlenmesi.....	92
2.4.3.9. Schmidt Çekici Deneyi	93
2.4.3.10. Aşınma (Böhme) Deneyi	94
2.4.3.11. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi	94
2.4.3.12. Mikro Sertlik Analizi	95
2.4.3.13. Mikroyapı İncelemesi	97
3. BULGULAR VE İRDELEME	98
3.1. Çökme ve Yayılma Deneyi.....	98
3.2. Taze Beton Birim Ağırlıkları	99
3.3. Sertleşmiş Birim Ağırlık.....	101
3.4. Basınç Dayanımı.....	102
3.5. Yarmada Çekme Dayanımı.....	105

3.6.	Su Emme Deneyi	107
3.7.	Basınç Altında Maksimum Su işleme Derinliği	110
3.8.	Kılcal Su Emme Deneyi	112
3.9.	Hızlı Klor Geçirirmliliği Deneyi	114
3.10.	Elektriksel Özdirenç Deneyi	117
3.11.	Ultrases Hızları	119
3.12.	Schmidt Çekici Deneyi	122
3.13.	Aşınma (Böhme) Deneyi	124
3.14.	Yüksek Sıcaklık Etkisi	126
3.14.1.	Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi	126
3.14.2.	Yüksek Sıcaklığın Ultrases Hızları Üzerindeki Etkisi	129
3.14.3.	Yüksek Sıcaklığın Ağırlık Kaybı Üzerindeki Etkisi	133
3.15.	Mikro Sertlik Deneyi	136
3.16.	Mikroyapı Analizi	138
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	148
5.	KAYNAKLAR	151
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

YÜZEY İYİLEŞTİRMESİ UYGULANMIŞ GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI
GEOPOLİMER BETONLARIN ÖZELLİKLERİ

Memduh NAS

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Şirin KURBETCİ
2023, 176 Sayfa

Çimento üretiminin yol açtığı yüksek enerji sarfiyatı ve karbondioksit emisyonu nedeniyle geopolimer betonlar (GPB), geleneksel çimentolu betonlara alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Beton sektörünün daha çevreci ve sürdürülebilir olabilmesi için doğal kaynakların kullanımını azaltma, tekrar kullanma ve geri dönüştürme yollarına başvurulmaktadır. Betonun hacimce yaklaşık %70'ini oluşturan agregalar, doğal kaynakları tüketmektedir. Betonun geri dönüştürülmesi, inşaat atıklarının azaltılmasında en etkili yöntemdir. GPB üretiminde bağlayıcı olarak endüstriyel atıkların kullanımının yanı sıra doğal agregaların yerine geri dönüştürülmüş agregaların (GDA) kullanılması da mümkündür. Ancak, bu agregaların beton özelliklerinde oluşturduğu olumsuz etkilerin giderilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada puzolanik şerbet emdirilmiş GDA'lar kullanılarak üretilen GPB'lerin özellikleri incelenmiştir. GPB üretiminde bağlayıcı olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin, alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. GDA'lara çimento şerbeti ve uçucu kül, silis dumanı, metakaolin ve yüksek fırın cürufu şerbetleri emdirilmiştir. Tüm puzolanik şerbetler GDA'ların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Silis dumanı içeren şerbet, GDA'nın su emmesini yaklaşık %55, aşınmasını ve darbe direncini %33 oranında azaltarak en etkili şerbet olmuştur. Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri, normal agregalı (NA) ve emdirmeye uygulanmamış GDA'lı GPB'lerle karşılaştırılmıştır. GPB üretiminde kullanılan bağlayıcılar arasında en yüksek performans, yüksek fırın cürufuyla elde edilmiştir. Silis dumanı şerbeti emdirilen GPB'lerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri en iyi olmuştur. İyileştirme yapılmamış GDA'lı GPB'lere kıyasla basınç dayanımında %56, yarmada çekme dayanımında %35, su emmede %38, kılcal su emmede %54, klor geçirimsizliğinde %39 düzeyinde iyileşmeler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, geri dönüştürülmüş agrega, puzolanik şerbet emdirmeye, geri dönüşüm

PhD. Thesis

SUMMARY

PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCED WITH SURFACE-IMPROVED RECYCLED CONCRETE AGGREGATES

Memduh NAS

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şirin KURBETCİ
2023, 176 Pages

Due to the high energy consumption and carbon dioxide emissions caused by cement production, geopolymer concretes (GPC) have emerged as an alternative to ordinary concretes. In order to make the concrete industry more environmentally friendly and sustainable, ways to reduce the use of natural resources are used. Aggregates, which make up approximately 70% of the concrete, consume natural resources. Recycling concrete is the most effective method of reducing construction waste. In addition to the use of industrial wastes as binders in GPC production, it is also possible to use recycled aggregates (RCA) instead of natural aggregates (NA). However, it is important to eliminate the negative effects of these aggregates on concrete properties. In this study, the properties of GPCs produced using pozzolanic slurry impregnated RCAs were investigated. In the production of GPC, fly ash (FA), blast furnace slag (BFS) and metakaolin (MK) were used as binders, sodium silicate and sodium hydroxide solutions were used as alkali activators. RCAs were impregnated with cement slurry and FA, silica fume (SF), MK and BFS slurries. All pozzolanic slurries improved the properties of RCAs. The slurry containing SF was the most effective slurry, reducing the water absorption of RCA by 55%, abrasion and impact resistance by 33%. Strength and durability properties of slurry impregnated RCA GPCs were compared with NA and unimpregnated RCA GPCs. Among the binders used in GPC production, the highest performance was obtained with BFS. Strength and durability properties of GPCs impregnated with SF slurry were the best. Compared to GPCs with untreated RCA, improvements in compressive strength by 56%, in splitting tensile strength by 35%, in water absorption by 38%, in capillary water absorption by 54%, and in chloride permeability were achieved by 39%.

Key Words: Geopolymer concrete, recycled concrete aggregate, pozzolan slurry impregnation, recycling

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. GDA ve GDAB'nin üretim aşamaları	4
Şekil 1.2. GDA kullanılarak üretilen GDAB örneği	5
Şekil 1.3. İki aşamalı karıştırma yöntemi ile GDAB üretimi	19
Şekil 1.4. Berlin Humboldt Üniversitesi Yaşam Bilimleri Araştırma Laboratuvarı Binası.....	22
Şekil 1.5. Geopolimerleşme mekanizmasının şematik gösterimi.....	25
Şekil 1.6. Geopolimer betonun üretim aşamaları	26
Şekil 1.7. GPB boru örneği.....	37
Şekil 1.8. Geopolimer beton döşeme prekast kiriş	37
Şekil 1.9. Geopolimer prekast tünel elemanları	38
Şekil 1.10. Prekast geopolimer kutu menfez	38
Şekil 1.11. Brisbane Batı Wellcamp Havalimanı	38
Şekil 1.12. Alman GEOPOLYTECH technology firmasının uyguladığı zehirli ve radyoaktif atıkların geopolimer beton kullanılarak bertarafı.....	39
Şekil 2.1. Beton numunelerinin temini ve hilti ile parçalanması, çeneli kırıcıda kırılarak agrega boyutuna getirilmesi.....	57
Şekil 2.2. GDA'nın elenmesi ve saklanması	57
Şekil 2.3. Agregaların granülometri eğrileri.....	58
Şekil 2.4. Agrega karışımının granülometri eğrisi ve sınır eğrileri.....	58
Şekil 2.5. Uçucu küle ait XRD analizi	60
Şekil 2.6. Yüksek fırın cürufuna ait XRD analizi	60
Şekil 2.7. Metakaoline ait XRD analizi.....	61
Şekil 2.8. Silis dumanına ait XRD analizi	61
Şekil 2.9. Bağlayıcı malzemelerin tane boyutunun belirlenmesi	62
Şekil 2.10. Kullanılan bağlayıcı maddelerin tane boyutu analizi	62
Şekil 2.11. Pozolanik maddelerin dayanım aktivite indekslerinin belirlenmesi için çimento harçları üretimi ve basınç deneyi.....	63
Şekil 2.12. MGlenium 51	65
Şekil 2.13. 1. Pozolan Emdirme Yöntemi ve betoniyerden alına GDA'lar	67
Şekil 2.14. 1. Pozolan Emdirme Yönteminde Elde Edilen GDA'ların Su Emme Yüzdeleri	67

Şekil 2.15.	2. Puzolan emdirme yöntemi ve betoniyerden alınan GDA'lar	69
Şekil 2.16.	2. Puzolan emdirme yönteminde elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri	69
Şekil 2.17.	3. Puzolan Emdirme işlemi uygulanmış GDA'lar	70
Şekil 2.18.	3. Puzolan emdirme yönteminde elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri	71
Şekil 2.19.	4. Puzolan Emdirme Yöntemi ve betoniyerden alınan GDA'lar	72
Şekil 2.20.	Şerbet emdirilen GDA'ların betoniyerden alınması ve kurutulması.....	72
Şekil 2.21.	4. puzolan emdirme yönteminde (çimento ve SD şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri	73
Şekil 2.22.	4. Puzolan emdirme yönteminde (çimento ve MK şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri	73
Şekil 2.23.	4. Puzolan emdirme yönteminde (çimento ve UK şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri	74
Şekil 2.24.	4. Puzolan emdirme yönteminde (çimento ve YFC şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri	75
Şekil 2.25.	Puzolan emdirme yöntemi sonucunda seçilen agregaların su emme yüzdeleri	75
Şekil 2.26.	Emdirme işlemi sonunca elde edilen GDA'lardan bir örnek	76
Şekil 2.27.	Kuruyan GDA'ların elenmesi ve deney laboratuvarında muhafaza edilmesi ...	76
Şekil 2.28.	Agregaların elenip 1.6 mm elekten yıkanması ve etüvde kurutulması	77
Şekil 2.29.	Deneye hazır hale getirilen agrega ve bilyalar, bilyaların tambura konulması ve aşındırılan agregaların deney sonunda tamburdan alınması	77
Şekil 2.30.	Agregaların Los Angeles aşınma değerleri	78
Şekil 2.31.	Agregaların elenerek 12.5/10 mm arası malzemenin elde edilmesi, deney kabına yerleştirilmesi ve deneyin yapılışı.....	79
Şekil 2.32.	Darbe deneyi sonunda agregaların 2.36 mm elekten elenerek kırılan ince malzeme miktarın belirlenmesi	79
Şekil 2.33.	Agregalara ait darbe deneyi sonuçları	79
Şekil 2.34.	Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması	80
Şekil 2.35.	Geopolimer beton üretiminde kullanılan 60 litre kapasiteli eğik eksenli betoniyer	81
Şekil 2.36.	Geopolimer beton üretimi	81
Şekil 2.37.	Geopolimer betonlara buhar kürü uygulanması	82
Şekil 2.38.	Geopolimer betonların kalıplardan çıkarılması ve laboratuvar ortamında saklanan numuneler.....	82

Şekil 2.39.	Çökme deneyi.....	84
Şekil 2.40.	Yayılma deneyi	85
Şekil 2.41.	Deneylerde kullanılan hidrolik pres	86
Şekil 2.42.	Yarmada çekme deneyi	86
Şekil 2.43.	Deney örneklerini kurutmak için kullanılan etüv ve numunelerin etüvde kurutulması	87
Şekil 2.44.	Hassas terazi	88
Şekil 2.45.	Numunelerin doygun kuru yüzey hale getirilmesi	88
Şekil 2.46.	Basınçlı su işleme derinliği deneyi.....	89
Şekil 2.47.	Basınçlı su işleme derinliğinin ölçümü	89
Şekil 2.48.	Kılcallık deney düzeneği.....	90
Şekil 2.49.	Hızlı klorür geçirimsizlik deneyinin yapılışı.....	91
Şekil 2.50.	Beton yüzeyde elektriksel özdirenç testi.....	92
Şekil 2.51.	Proceq Tico marka ultrases ölçüm cihazı.....	92
Şekil 2.52.	Ultrases geçiş hızı ölçümü.....	93
Şekil 2.53.	Proceq marka Schmidt çekici.....	93
Şekil 2.54.	Böhme yüzey aşındırma test cihazı.....	94
Şekil 2.55.	Yüksek sıcaklık etkisi için kullanılan Ref-San marka fırın ve GPB'lere yüksek sıcaklık uygulanması.....	95
Şekil 2.56.	Mikrosertlik numunelerinin kesilmesi, reçineye alınması, zımparalanması ve deneye hazır olan numune	96
Şekil 2.57.	İnnovatest marka mikrosertlik cihazı ve mikrosertlik ölçümü.....	96
Şekil 2.58.	Mikrosertlik deneyi yapılan bir numunenin deney sonrası görüntüsü	96
Şekil 2.59.	Mikroyapı analiz numunelerinin parlatılması, altın kaplanması ve analizin yapılışı	97
Şekil 3.1.	Üretilen betonların çökme ve yayılma çapı değerleri	99
Şekil 3.2.	GPB'lerin 28 ve 90 günlük sertleşmiş birim ağırlıkları	101
Şekil 3.3.	UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.....	102
Şekil 3.4.	YFC esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.....	103
Şekil 3.5.	MK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.....	104
Şekil 3.6.	UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları.....	105
Şekil 3.7.	YFC esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları.....	106
Şekil 3.8.	MK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları.....	107
Şekil 3.9.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri	109

Şekil 3.10.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri	109
Şekil 3.11.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri.....	109
Şekil 3.12.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği.....	111
Şekil 3.13.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği.....	111
Şekil 3.14.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği.....	111
Şekil 3.15.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları	112
Şekil 3.16.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları	113
Şekil 3.17.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları	113
Şekil 3.18.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük klor geçirim değerleri	116
Şekil 3.19.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük klor geçirim değerleri	116
Şekil 3.20.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük klor geçirim değerleri	116
Şekil 3.21.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük elektriksel özdirenç değerleri	118
Şekil 3.22.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük elektriksel özdirenç değerleri	118
Şekil 3.23.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük elektriksel özdirenç değerleri.....	119
Şekil 3.24.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları	120
Şekil 3.25.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları	120
Şekil 3.26.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları.....	121
Şekil 3.27.	28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı-basınç dayanımı ilişkisi	122
Şekil 3.28.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri	122
Şekil 3.29.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri	123
Şekil 3.30.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri	124
Şekil 3.31.	UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük hacimsel aşınma kayıpları	125
Şekil 3.32.	YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük hacimsel aşınma kayıpları	125
Şekil 3.33.	MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük hacimsel aşınma kayıpları	126
Şekil 3.34.	UK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki ve oda sıcaklığındaki basınç dayanımları	128
Şekil 3.35.	YFC esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki ve oda sıcaklığındaki basınç dayanımları	128
Şekil 3.36.	MK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki ve oda sıcaklığındaki basınç dayanımları	129
Şekil 3.37.	UK esaslı GPB'lerin 25, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıktaki ultrases geçiş hızları.....	130

Şekil 3.38.	YFC esaslı GPB'lerin 25, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıktaki ultrases geçiş hızları	131
Şekil 3.39.	MK esaslı GPB'lerin 25, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıktaki ultrases geçiş hızları.....	131
Şekil 3.40.	UK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi.....	132
Şekil 3.41.	YFC esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi.....	132
Şekil 3.42.	MK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi.....	133
Şekil 3.43.	UK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda ağırlık kayıpları.....	134
Şekil 3.44.	YFC esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda ağırlık kayıpları.....	135
Şekil 3.45.	MK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda ağırlık kayıpları.....	135
Şekil 3.46.	Soldan sağa 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda GPB numunelerinin görselleri.....	136
Şekil 3.47.	UK esaslı GPB'lerin Mikrosertlik sonuçları	136
Şekil 3.48.	YFC esaslı GPB'lerin Mikrosertlik sonuçları	137
Şekil 3.49.	MK esaslı GPB'lerin Mikrosertlik sonuçları	137
Şekil 3.50.	NA ile üretilen UK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü.....	139
Şekil 3.51.	NA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin SEM görüntüsü.....	139
Şekil 3.52.	NA ile üretilen MK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü	140
Şekil 3.53.	GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü	141
Şekil 3.54.	GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü	141
Şekil 3.55.	Şerbet emdirilmiş GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü ...	141
Şekil 3.56.	Şerbet emdirme işlemi uygulanmış GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin SEM görüntüsü.....	142
Şekil 3.57.	Şerbet emdirme işlemi uygulanmış GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü.....	142
Şekil 3.58.	GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin 300 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü.....	143
Şekil 3.59.	Şerbet emdirilmiş GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin 300 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü	144
Şekil 3.60.	NA ile üretilen MK esaslı GPB'nin 600 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü	144
Şekil 3.61.	GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin 600 °C sıcaklık sonrası SEM	

	görüntüsü.....	145
Şekil 3.62.	GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü.....	146
Şekil 3.63.	GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü.....	146
Şekil 3.64.	GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü.....	147



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Agregaların fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 2.2.	Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	59
Tablo 2.3.	UK, YFC, MK ve SD'nin kimyasal bileşimi	59
Tablo 2.4.	Puzolanik malzemelerin dayanım aktivite indeksleri ve ilgili standartlarda belirtilen asgari değerler	63
Tablo 2.5.	Sodyum silikata ait özellikler	64
Tablo 2.6.	MGlenium 51'e ait teknik özellikleri	65
Tablo 2.7.	GPB'lerin bir metreküpü için malzeme miktarları (kg/m ³)	83
Tablo 2.8.	IS 13311 standardına göre betonun ultrases hızı-kalite sınıflandırılması	93
Tablo 3.1.	GPB karışımlarının taze, 28 ve 90 günlük birim ağırlıkları	100
Tablo 3.2.	ASTM C 1202 standardına göre beton hızlı klor geçirim sınıfları	114

SEMBOLLER DİZİNİ

AAM	: Alkalilerle Aktive Edilmiş Malzemeler
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
AGB	: Arayüzey Geçiş Bölgesi
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
Ç	: Çimento
GB	: Geleneksel Beton
GDA	: Geri Dönüştürülmüş Agregası
GDAB	: Geri Dönüştürülmüş Agregalı Beton
GDBA	: Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası
GP	: Geopolimer
HKY	: Harç Karıştırma Yaklaşımı
İAKY	: İki Aşamalı Karıştırma Yaklaşımı
KKY	: Kumla Kaplama Yaklaşımı
MK	: Metakaolin
NA	: Normal Agregası
NAB	: Normal Agregalı Beton
NS	: Nano Silis
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SH	: Sodyum Hidroksit
SS	: Sodyum Silikat
UK	: Uçucu Kül
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
XRF	: X-Işını Floresans Spektrometresi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hızla artan insan nüfusunun ihtiyaçlarını karşılamak için gelişen endüstriyelleşme ve kaynakların hızlı tüketilmesi çeşitli çevresel sorunlar doğurmaktadır. Su kıtlığı, su kirliliği, küresel ısınma, verimli tarım arazilerinin kaybı gibi bu sorunlar ekolojik dengenin bozulmaya başladığının göstergesidir.

Birçok ülke ekolojik dengeyi koruyabilmek için önlemler almaya çalışmaktadır. Örneğin küresel ısınmanın önüne geçmek için karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla farklı sektörlerde kısıtlamalara gidilmiş ve Kyoto Protokolü gibi uluslararası antlaşmalar imzalanmıştır.

Geleneksel betonun temel bağlayıcı maddesi olan çimento üretimi, dünyadaki karbondioksit emisyonunun yaklaşık olarak %7'sini oluşturmaktadır (Ali vd., 2011). Zhao vd. (2022)'nin yaptığı bir çalışmaya göre hem nüfusu hem nüfus artış hızı yüksek olan Çin'de, 2060'ta olması beklenen karbon emisyon değerine 2030'dan önce ulaşılacağını rapor etmiştir.

İnşaat sektöründeki hızlı gelişmeler normal agregaların (NA) kıtlığına sebep olmakta ve ayrıca birçok yapı atığı oluşturmaktadır ve bu atıkların yarısı atık betondur (Tang vd., 2022).

Atık betonu yeni yapılar üretmekte kullanılan betonda agrega olarak kullanmak sürdürülebilir inşaat sektörü için çok faydalı bir yöntemdir. Geri dönüştürülen atık betonlar istenilen boyutlarda kırılıp elenerek geri dönüştürülmüş ince filler malzeme, geri dönüştürülmüş ince agrega ve geri dönüştürülmüş iri agrega elde edilebilir (Likes vd., 2022; Nedeljkovic vd., 2021; Kim 2022). Bu sayede normal agregaları kullanmadan daha ekonomik betonlar üretilir.

Araştırmacılar betonun bağlayıcısı olan çimentoyu da azaltmak için de farklı çözüm arayışlarına girmiştir. Asırlar önce inşaa edilip günümüze sapasağlam bir şekilde gelebilen Mısır piramitleri, Roma'daki Büyük Kule, Petra Antik Kenti gibi yapıların yapılış yöntemleri ve kullanılan bağlayıcı maddelerden esinlenerek çimento kullanmadan daha ekonomik, çevresel ve daha yüksek performanslı bir bağlayıcı arayışına girmişlerdir.

1.2. İnşaat Sektöründe Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik

Beton, dünyada yapı sektöründe en çok kullanılan malzemelerden biridir. Beton üretiminde kullanılan maddeler çimento, iri ve ince agrega, su ve katkı maddeleridir. Betonun yaygın kullanımının sebebi beton üretiminde kullanımında kullanılan maddelere ulaşımın ve üretiminin kolay olması ve bakım masraflarının az olmasıdır (Danish vd., 2019). Artan nüfusun taleplerini karşılayabilmek için endüstrileşme ve şehirleşmenin hızı artması sonucu betonun kullanımı giderek daha da artmaktadır. Günümüzde dünya genelinde her yıl kişi başına yaklaşık olarak bir metreküp beton üretilmekte ve bu yüksek beton üretimi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Danish ve Mosaberpanah, 2021).

Beton üretiminde su, kum ve iri agrega gibi birçok doğal kaynak tüketilir. Geleneksel bir betonun hacimce yaklaşık %70'ini oluşturan agregalar doğal kaynakların tüketilmesine sebep olmaktadır. Üretilen her bir metreküp betonun agregalarının doğadan çıkarılıp istenilen boyuta getirmek için kırılma ve elenmesinde yaklaşık 2800 mega joule enerji tüketilirken çimento üretiminde yakılan kömür için ise her bir ton çimento için yaklaşık 600 kg karbon dioksit doğaya salınmaktadır (Oikonomou, 2005).

Nüfus artışı, şehirleşme ve doğal afetlerden dolayı hasar gören yapıların yerine yeni yapılar inşa edilmekte ve ekonomik ömürlerini tamamlayan yapılar yıkılmaktadır. Beton üretimi için doğal kaynakların tüketilmesinin yanı sıra yıkılan inşaat molozlarının depolanması için çok büyük miktarda dolgu alanı işgal edilmektedir. Beton üretimi ve mevcut yapıların yıkımı; doğal kaynakları tüketmesi, fazla miktarda atık açığa çıkarması ve fazla enerji tüketmesinden dolayı yapı sektörü için sürdürülebilir bir yöntem olarak görülmemektedir (Lauritzen, 1998; Ugwu ve Haupt, 2007).

Günümüzde beton sektörünü daha çevreci ve sürdürülebilir hale getirebilmek için doğal kaynakların kullanımını azaltma, tekrar kullanma ve geri dönüştürme yollarına başvurulmaktadır. Betonun geri dönüştürülmesi, inşaat atıklarının azaltılmasında en etkili yöntemdir. Betonun geri dönüşümü yeni kaynakların kullanımını azaltır, yeni doğal kaynakların taşınması ve üretimi sırasında harcanan enerjinin azaltılması ve atıkların yeniden kullanılmasını sağlar (Edwards, 1999). Çevre koruma konusundaki artan farkındalık ve sürdürülebilir kalkınma talebi nedeniyle, GDA ve GDAB hakkında giderek daha fazla araştırma yapılmaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda beton sektöründe puzolanik maddeler kullanılarak çimento tüketimi belli bir orana kadar azaltılabilmektedir. Puzolan olarak kullanılan maddelerin

arasında silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi maddeler vardır. Bu maddeler çimentoyla belli oranlarda ikame edilerek çimento kullanımı azaltılabilmektedir (Mehra vd., 2016; Vaibhav vd., 2019; Zawrah vd., 2016).

Çimentonun çevreye verdiği zarardan dolayı çimentoya alternatif ve daha uzun servis ömrüne sahip bağlayıcılar araştırılmıştır. Buna çözüm olarak çeşitli doğal ve yapay puzolanları alkali çözeltilerle aktive edilerek kullanıldığı geopolimer beton (GPB) bulunmuştur. GPB üretiminde geleneksel betona göre göre %80 daha az CO₂ gazı salındığından dolayı daha çevrecidir. Ayrıca bağlayıcı olarak sanayi atık yan ürünleri kullandığından dolayı daha sürdürülebilir ve ucuzdur (Duxson vd., 2007).

1.3. Geri Dönüştürülmüş Agregalar

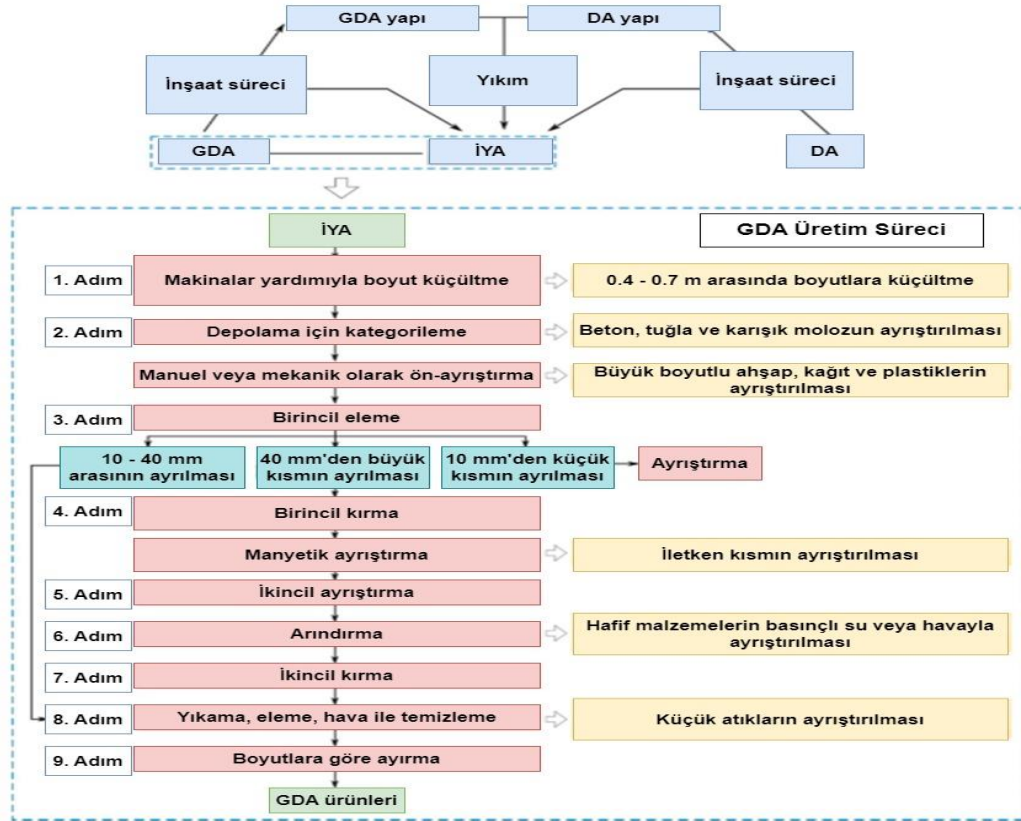
Yeni yapılar inşa etmek için inşaat ve yıkım atıklarından (İYA) gelen malzemelerin betonda agrega olarak kullanılması özellikle Birleşik Krallık ve Almanya'da şehirlere yapılan bombardımanlardan sonra muazzam miktarda moloz oluşması nedeniyle ilk olarak II. Dünya Savaşı sırasında ve sonrasında uygulanmıştır (Nixon, 1978).

1945'ten 1985'e kadar, agregaların geri dönüşüm süreci (örn. ayırma ve üretim), GDA özellikleri (örn. yoğunluk, şekil ve su emme), GDAB'nin mekanik özellikleri (örn. basınç, çekme ve eğilme) ve ayrıca uzun dönemli performansı (örneğin, geçirgenlik, donma direnci ve karbonatlaşma) üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır (Hansen, 1986). 21. yüzyıla geldiğimizde GDA kullanılarak önerilmeli betonların bile üretildiği, yeni karışım tasarımlarının geliştirildiği ve hatta GDA'nın büyük ölçekli yapılarda kullanıldığı görülmektedir (Dhir vd., 1998).

1.3.1. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Üretimi

GDA'ların üretim sürecini gösteren dokuz adım, Şekil 1.1'de gösterilmektedir: (1) boyut küçültme: hidrolik kırıcı veya pnömatik çekiç yoluyla büyük moloz parçalarının azaltılması (Bansal ve Singh, 2015); (2) ön ayırma: işlemin daha yüksek verimliliği için büyük çelik, ahşap, plastik veya kağıt parçalarının ayrılması; (3) birincil eleme: toprak ve alçıtaşı gibi küçük parçacıkların uzaklaştırılması; (4) birincil kırma ve manyetik ayırma: GDA boyutunun küçültülmesi ve kalan demirli maddelerin uzaklaştırılması; (5) ikincil

eleme (örn. 10 mm elekten eleme (Hansen, 1986)): kir, alçı veya tozun uzaklaştırılması; (6) dekontaminasyon: ahşap, plastik veya kağıt gibi tüm hafif bileşenlerin yıkama veya havayla elenerek uzaklaştırılması; (7) moloz boyutunu azaltmak için son kırma; (8) kalan yabancı maddeleri ayıklamak için yıkama, eleme ve havayla eleme, örn. plastik, kağıt ve ahşap; ve (9) çeşitli uygulamalar için agregaları farklı boyutlara ayırma.



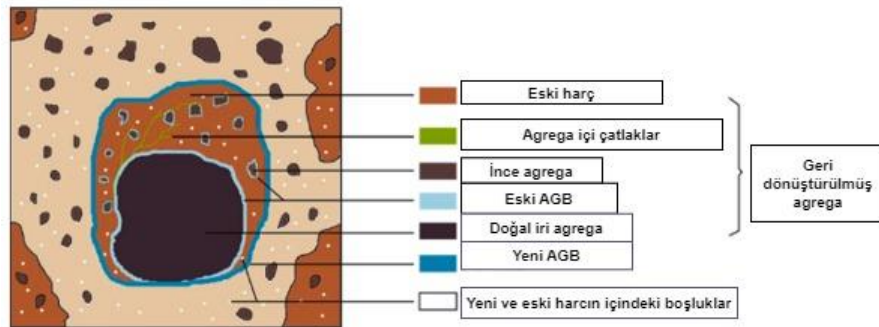
Şekil 1.1. GDA ve GDAB'nin üretim aşamaları (Hansen vd., 1986)

İnşaat ve yıkım atıklarının (İYA) kaynağına bağlı olarak, geri dönüştürülmüş beton agregaları (GDBA), geri dönüştürülmüş kil tuğla agregaları, geri dönüştürülmüş seramik karo agregaları, geri kazanılmış asfalt kaplama agregaları olarak sınıflandırılabilir (Wang vd., 2021). Bu farklı geri dönüştürülmüş agrega türleri içinde geri dönüştürülmüş beton agregası önemli miktarda atık üretimi nedeniyle en çok araştırılan agrega türüdür (Yan vd., 2017).

1.3.2. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Özellikleri

GDA kullanımının inşaat sektöründe hem ekonomik hem de çevresel olarak birçok faydasının olmasına rağmen, yeni üretilecek bir betonda kullanılması için özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunun temel sebebi GDA'nın üzerine yapışmış olan eski harç tabakası, GDA üretilirken kullanılan kırma yöntemi ve GDA'nın üzerindeki zayıf arayüzey geçiş bölgesidir. GDA üzerindeki bu fazların varlığı GDA'nın porozitesini artırarak su emme ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Danish ve Mosaberpanah, 2022).

Şekil 1.2'de, GDA kullanılarak üretilen GDAB örneği gösterilmektedir. İYA kullanılarak üretilen GDBA'ların çoğu NA ve NA yüzeyine yapışmış eski harç tabakası olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bu nedenle, GDBA'da doğal iri agrega ile eski harç arasındaki eski arayüzey geçiş bölgesi (AGB, açık mavi çizgi) ve GDA ile yeni harç arasındaki yeni AGB (koyu mavi ile gösterilen) olarak iki farklı AGB bulunabilir. NA'lı betonlardaki yeni oluşan tek arayüzey ile karşılaştırıldığında GDA'lardaki arayüzey hacmi daha büyüktür. Bu nedenle, GDAB'un porozitesi normal agregalı betondan daha yüksektir ve bu da GDBA için daha düşük mekanik özelliklere (basınç, eğilme ve yarma dayanımı) yol açar. Artan porozite ayrıca GDBA'nın geçirgenliğini de etkileyecektir. NA'lı betona kıyasla farklı konsantrasyon gradyanlarına (örn. inşaat demiri korozyon koruması veya yaşlanma) sahip olacaktır. Ayrıca üzerine eski harç yapışmış GDA, NA'dan daha düşük basınç dayanımına sahiptir. GDA üretilirken kırma ve eleme işlemleri sırasında, GDA içindeki harçta yeni çatlaklar ve kusurlar oluşabilir. Bu agregalar kullanılarak üretilen beton, tasarlanandan çok daha az bir yük ile bu çatlakların genişlemesine sebep olabilir (Verian, 2012). İYA'dan gelen agrega dışındaki ahşap, plastik, alüminyum gibi yabancı maddeler de üretilen GDAB'nin mekanik özelliklerini etkiler (Park ve Noguchi, 2013).



Şekil 1.2. GDA kullanılarak üretilen GDAB örneği (Wang vd., 2021)

1.3.3. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi

GDAB'nin hem taze hem de sertleşmiş haldeki mekanik ve fiziksel özelliklerini anlamak için normal agregalı beton (NAB) ile karşılaştırmak gereklidir. Böylece, GDA'nın ikame oranının taze betonun işlenebilirliği, GDAB'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkisi (yoğunluk, karbonatlaşma derinliği ve klorür iyonu geçirimsizliği), GDAB'nin mekanik özellikleri (basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı) ve GDAB'nin uzun dönem performansı (donma-çözülme ve alkali-silika reaksiyonu direnci, sünme ve büzülme) aşağıda kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmiştir.

1.3.3.1. İşlenebilirlik

Betonun işlenebilirliği, taze betonun karıştırılabilme, kalıba yerleştirilebilme, sıkıştırma ve homojen bir durumda kalma kolaylığını belirleyen bir özellik olarak tanımlanmaktadır (Amerikan Beton Enstitüsü, 2020).

Sıkıştırılması zor olduğundan, düşük işlenebilirlik betonda yüksek poroziteye yol açar. Araştırmacılar, taze haldeki GDAB'lerin çökme değerinin NAB'a göre her zaman daha düşük olduğunu ve bunun sebebinin GDA'ların yüksek su emme kapasitesi, düzensiz ve pürüzlü yüzey şeklinden kaynaklı olduğunu belirtmiştir (Smith, 2010; Lotfi vd., 2014). Bu nedenle, NAB'a benzer işlenebilirliği elde etmek için taze betonun karıştırma sırasında ilave suya ihtiyaç vardır. Wagih vd.'lerinin yaptığı bir çalışmada, NAB ve GDAB'lara aynı işlenebilirliği sağlamak için NAB'a kıyasla %9-13 oranında ilave su eklenmiştir (Wagih vd., 2013).

1.3.3.2. Yoğunluk

GDBA'da eski agregaya yapışmış olan harç miktarı, harç/eski agregası oranını NAB'ye kıyasla artırır. Harcın porozitesi NA'dan daha yüksektir ve dolayısıyla GDA'nın yoğunluğu normal agregadan daha düşüktür. Genel olarak tüm doğal iri agregalar, GDA'lar ile ikame edilirse, ortalama beton yoğunluğu yaklaşık %5 kadar azalır (Silva vd., 2018).

1.3.3.3. Su Emme ve Kılcal Geçirimsizlik

Aynı malzeme miktarları kullanılarak üretilen ve aynı kür koşulları uygulanan betonlarda GDA içeren betonların su geçirgenliği GDA'lı betonlara göre genellikle daha fazladır. GDA'lı betonların su geçirimsizlik özellikleri GDA'nın içeriğine, GDA'nın kalitesine, betonun kür süresi ve yöntemine ve beton üretiminde kullanılan bağlayıcıların özelliklerine bağlıdır. GDA'lı betonlarda GDA'nın üzerindeki hidrate çimento pastasının içindeki boşluklar ve bu boşlukların birbirleriyle kılcal kanallarla bağlantılı olması durumunda GDA'nın geçirimsizliği artar (Mindes vd., 2003). Ayrıca GDA boyutu küçüldükçe içerdiği pasta fazı ve GDA'nın kırılma ve elenme sırasında oluşan çatlakların da yardımıyla GDA'lı betonun geçirgenliği daha da azalmaktadır (Kurda vd., 2017).

Hansen (1986) GDA ile üretilen betonların geçirgenliklerinin GDA ikame oranına bağlı olarak normal agregalı betonlara göre yaklaşık 2 ile 5 kat arasında daha fazla olduğunu rapor etmiştir. Pedro vd. (2017) çalışmalarında normal agreganın tamamını GDA ile ikame ederek ürettikleri GDAB'nin su emme ve kılcal su emme değerlerinin NAB'nin sırasıyla yaklaşık 2.5 ve 1.7 kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Gao vd. yaptıkları çalışmada GDA ile üretilen betonların kılcal su emme özelliklerinin betonun donma-çözülme direnci üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmaya göre betonda kullanılan GDA miktarı arttıkça betonun su emme ve kılcal su emme değerlerinin arttığını rapor etmiştir. Betonun içerisine aldığı su miktarı arttıkça betonun donma-çözülme etkisinden daha fazla etkilendiği ve GDA ikame oranının betonun kılcallığı ve donma direncine doğrudan etki ettiği rapor edilmiştir.

GDA kullanılarak üretilen betonların özellikle ilk 30 dakikadaki su emme değerleri normal agregalı betona göre çok yüksektir. GDA'nın etrafındaki eski harç tabakası, yeni beton üretiminde GDA üzerine yapışan yeni harç tabakası ve GDA'nın içindeki boşluklu yapıdan dolayı GDA, betonun kılcal su emmesine de oldukça olumsuz etki etmektedir. Bu sebeplerden dolayı beton üretiminde GDA kullanım oranı arttıkça üretilen betonun kılcal geçirimsizliği de giderek artar (Thomas vd., 2016).

GDA kullanılarak üretilen betonların geçirimsizliğini azaltmak için puzolanik maddeler çimento ile ikame edilerek betonun genel kalitesinin iyileştirilmesi yaygın bir yöntemdir. Örneğin çimentonun %30'unun uçucu kül ile ikame edilmesi, üretilen yeni GDA'lı betonun işlenebilirliğini kolaylaştırırken betonun su geçirgenliğini azaltılabilmektedir (Bhikshma ve Divya, 2012).

Brito vd. (2006), birden fazla kez geri dönüştürülen betondan elde edilen GDA'ların geri dönüşüm sayısı arttıkça GDA'nın içindeki harç kısmı arttığından dolayı GDA'nın geçirgenliğinin de arttığını rapor etmiştir. Ayrıca belirli bir geri dönüşüm sayısından sonra GDA kullanımının betonun geçirimsizliği üzerinde oldukça olumsuz etki ettiğini rapor etmiştir.

1.3.3.4. Karbonasyon Derinliği

Karbonatlaşma sırasında betondaki kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) nem varlığında havadaki CO_2 ile reaksiyon ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur ve bu durum betonun yaklaşık olarak 13 olan pH değerini 9'un altına düşürür. Çimentodaki bu düşük pH değeri, çelik donatının yüzeyindeki paspayı tabakasını bozar ve donatıyı oksijen ve suya maruz bırakarak betondaki donatının korozyonuna yol açar (Hussain ve Ishida, 2009; American Concrete Enstitü, 1988).

Karbonatlaşma derinliği, betona CO_2 'nin işleme hızı ve betonun karbonasyona karşı dayanıklılığının bir parametresidir (Guo vd., 2018). Genel olarak yüksek porozite, suyun betona daha kolay nüfuz etmesine ve betonun daha yüksek geçirgenliğe sahip olmasına yol açar. Claisse vd. (1999) betonun porozitesiyle karbonatlaşma direnci arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Karbondioksit kabini kullanılarak yapılan bu çalışmada porozitesi %20 olan NA'lı betonun karbonatlaşma derinliği 20 mm iken, GDA ile üretilen betonda karbonasyon derinliği 35 mm olarak belirlenmiştir. GDAB'nin NAB'den daha yüksek poroziteye sahip olması nedeniyle GDAB'nin karbonatlaşma derinliği daha büyüktür. Silva vd. (2015), yaptıkları çalışmada farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonların karbonatlaşma derinliğini NA ile üretilen betonlarla karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda GDAB'nin karbonatlaşma derinliğinin NAB'a göre daha fazla olduğu belirtilmiştir.

1.3.3.5. Klorür İyonu Geçirimsizliği

Betonda karbonatlaşmanın yanı sıra, klorür iyonunun penetrasyonu da betonarme yapılarda donatı korozyonunun ana nedenlerinden biridir. Klorür genellikle donatının pas payı tabakasını parçalar ve beton yüzeyinde boşlukların oluşmasına yol açar. Açılan bu

boşluklar dolayısıyla betondaki donatılar oksitlenir. Serbest kalan pozitif demir iyonlarını dengelemek için, boşluktaki klorür iyonu miktarı artar. Bu reaksiyonlar sonucunda hidroksil iyonları açığa çıkarak daha fazla korozyon meydana gelmesini tetikler (Berrocal, 2017).

Geçirimsizliği yüksek betona su ile taşınan klorür iyonları kolayca nüfuz edeceğinden, tıpkı karbonatlaşmadaki gibi klorür iyon penetrasyonu da betonun porozitesi ve geçirgenliğine oldukça bağlıdır. GDAB'un yüksek porozitesi nedeniyle GDA'nın klorür iyon geçirimsizliği NAB'dan daha yüksektir. Guo vd. (2018) yaptığı bir çalışmada betondaki tüm doğal iri agreganın GDA ile ikame edildiğinde betonun klorür geçirimsizliğinin 2 katına çıktığını belirtmiştir.

Gonzalez-Corominas vd. (2017)'nin yaptığı bir çalışmaya göre farklı oranlarda GDA ikameli betonlarda, GDA ikame oranı arttıkça betonun klorür geçirimsizliğinin belirgin bir şekilde arttığı rapor edilmiştir. GDA ikame oranı %30 ile 70 arasında olması durumunda betonun klorür geçirimsizliğinin donatı korozyonu bakımından kritik seviyelerde olduğu ve GDA ikame oranının %30'u geçmemesi gerektiği önerilmiştir. Betonun içerisindeki donatının paslanmasını engellemek için optimum GDA ikame oranının %20 ile sınırlandırılması gerektiği belirtilmiştir. Benzer sonuçlar Zhutovsky vd. (2012) tarafından yapılan bir başka çalışmada da görülmüştür. Benzer sonuçlar Zhutovsky vd. (2012) tarafından yapılan bir başka çalışmada da görülmüştür.

1.3.3.6. Basınç Dayanımı

GDAB'nin basınç dayanımı, betondaki GDA'nın miktarı ve kalitesine bağlıdır. Beton dayanımını etkileyen diğer parametreler de su/çimento oranı, GDA'nın harç hacmi, geri dönüşüm yöntemidir. GDAB'nin basınç dayanımı içerdiği GDA dan dolayı normalde NAB'ye göre daha düşüktür. Ortalama olarak GDAB'nin dayanımı NAB'ye göre %5-10 kadar daha azdır (URL-7, 2022); fakat dayanımlardaki düşüş, düşük kalitede GDA kullanıldığında %5-25 seviyelerine kadar inebilir (Rahal, 2007; Marie ve Quiasrawi, 2012).

Huda ve Alam (2014), GDA'nın geri dönüşüm yöntemi ve GDA'nın üzerindeki harç hacminin GDAB'nin özelliklerini araştırmıştır. Sonuçlarına göre GDA kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımının azaldığı ve bunun sebebinin ise GDA'daki boşluklar ve kusurlar olduğu sonucuna varmıştır.

1.3.3.7. Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımı

Basınç dayanımındaki gibi GDAB'nin eğilme dayanımı da NAB'den daha düşüktür. Genellikle GDAB'nin eğilme dayanımı NAB'ye göre %10 daha azdır (Yang vd., 2008).

GDAB'lerin yarmada çekme dayanımı da GDA ikame oranı arttıkça azalmaktadır. Fakat birçok araştırma GDA'nın basınç dayanımı üzerindeki etkisinin, eğilme ve yarmada çekme dayanımından daha belirgin olduğunu göstermiştir. Yang vd. farklı GDA ikame oranlarıyla elde edilen yarmada çekme dayanımı düşüşlerinin sadece %10 civarında olduğunu belirtmiştir (Yang vd., 2008).

Bazı araştırmacılar GDA'nın eğilme dayanımı üzerinde daha az olan bu etkisinin sebebinin, GDA'nın ikame oranından ziyade GDA'nın pürüzlü yüzeyi nedeniyle matrisle daha iyi tutunmasından kaynaklandığını söylemiştir (Malesev vd., 2010; Matias vd., 2013).

Ayrıca bazı çalışmalarda GDA ile üretilen betonların yarmada çekme dayanımlarının NAB'ye benzer (McNeil ve Kang, 2013) veya daha fazla (Butler vd., 2013) olduğu rapor edilmiştir.

1.3.3.8. Elastisite Modülü

Betonun elastisite modülü özellikle betonda kullanılan iri agreganın elastisite modülünden oldukça etkilenmektedir (Neville, 1995). Lydon ve Balendran (1986)'a göre betonun elastisite modülü, betonda kullanılan iri agreganın yoğunluğunun karesi ile orantılıdır. Kullanılan GDA'nın birden çok kez geri dönüştürülmüş olması, GDA içindeki eski harç kısmının fazla olması, GDA'nın içindeki eski agreganın kalitesi gibi parametreler GDA'nın elastisite modülünün düşmesine yol açar. Bu nedenle GDA kullanılması durumunda betonun da elastisite modülü düşmektedir (Exterria vd., 2007). Yani GDA'nın içindeki yüksek poroziteli eski harç tabakası ve kılcal çatlaklarından dolayı GDA içeren betonların elastisite modülleri normal agregalı betondan daha düşüktür (Yang vd., 2008).

Literatürde bazı çalışmalar GDAB'nin elastisite modülünün GDAB üretiminde kullanılan GDA'nın kalitesiyle yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Örneğin bir çalışmada (Froudinstou-Yannas, 1977) GDA'lı betonun elastisite modülü NAB'ye göre %60 oranında daha düşük çıkmışken başka bir çalışmada ise (Maruyama vd., 2004) düşüşün %20 olduğu rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada ise betonda GDA kullanılması durumunda betonun elastisite modülündeki değişimin betonun basınç dayanımındaki değişime göre

daha belirgin olduğu rapor edilmiştir. GDA'nın yapısındaki eski harcın varlığı ve yüksek porozitesinden dolayı GDAB'nin elastisite modülü, NAB'ye göre %10 ile %30 oranında daha düşük çıkmıştır (Nelson, 2004).

Xiao vd. (2005)'nin yaptıkları çalışmada ise betondaki iri agreganın tamamının GDA ile ikame edilmesi durumunda üretilen GDAB'nin elastisite modülü, normal agregalı beton karışımına göre yaklaşık %45 oranında düşük çıkmıştır. Bu çalışmalar sonucunda açıkça görülmektedir ki GDAB'nin elastisite modülü betonda kullanılan agreganın elastisite modülü ile oldukça ilişkilidir.

1.3.3.9. Donma-Çözülme Direnci

GDA kullanılarak üretilen betonların donma-çözülme direnci NA'lı betondan daha düşüktür (Danish ve Mosaberpanah, 2021).

GDAB'nin porozitesi NAB'ninkinden daha yüksek olduğu için GDAB'nin gözeneklerine daha fazla su gireceğinden, GDAB'ler donma-çözülme etkisinden daha fazla zarar görür. Sonuç olarak, GDAB'nin donma-çözülme etkisinden kaynaklı mekanik özelliklerindeki azalma genellikle NAB'den daha yüksektir (Lotfi vd., 2014; Verian vd., 2018). Bu nedenden ötürü soğuk bölgelerde dökülecek betonlarda GDA kullanımı önerilmemektedir. Soğuk bölgelerde üretilecek GDAB'ler için su/bağlayıcı oranının 0.5'ten düşük olması ve kullanılacak hava sürükleyicinin de %0.5'ten küçük olması önerilmektedir (Salem vd., 2003). Verian vd. (2018), hem ince hem iri GDA'yı %100 oranda normal agregala ile ikame ederek betonlar üretmiş ve bu betonların donma-çözülme direnci araştırarak, 100 donma-çözülme çevrimi uygulanmış GDAB'lerin basınç dayanımındaki azalmanın NAB'lerden %10.4 daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Seps vd. (2016), yaptıkları çalışmada %100 GDA ikameli GDAB'nin 50 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç ve eğilme dayanımlarının sırasıyla %47 ve %10 azaldığını, elastisite modülünün ise %15 oranında azaldığını rapor etmiştir.

1.3.4. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi

Yapılan araştırmalarda geri dönüştürülmüş agregalı betonlar (GDAB) normal agregalı betonlar (NAB) ile karşılaştırıldığında GDAB'nin NAB'ye kıyasla daha düşük mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğu rapor edilmiştir (Nixon, 1978; Hansen, 1986).

Bu nedenle son zamanlarda GDAB ile ilgili çalışma konuları GDA'nın kalitesini artırmak üzerine yönelmiştir GDAB'nin kısa ve uzun vadeli mekanik özelliklerini (basınç, eğilme ve çekme dayanımı, sünme ve büzülme) iyileştirmek, porozitesini ve eski harç tabakasını azaltmak için literatürde farklı yöntemler araştırılmıştır (Tam vd., 2007). Genel olarak, bu yöntemler şu şekilde üç gruba ayrılabilir: (1) GDA porozitesinin azaltılması, (2) GDA üzerindeki eski harç tabakasının azaltılması ve (3) GDA modifikasyonu olmadan özellik iyileştirme.

1.3.4.1. GDA'nın Porozitesinin Azaltılması

Yukarıda belirtildiği gibi, GDA ve GDA'dan gelen ek AGB genellikle betonun diğer bileşenlerinden daha yüksek poroziteye sahiptir. Bu boşluklar, beton üretimi sırasında çimentonun hidratasyonu için gerekli suyu emip çimento hamurunun hidratasyon derecesini azaltabilir. Ayrıca sertleşmiş betonda hiçbir yük taşıma kapasitesi olmayan bu boşluklar, klor ve karbondioksit gibi zararlı maddelerin betona sızıp betonda paslanmaya neden olabilir.

1.3.4.1.1. Hızlandırılmış Karbonasyon Yöntemi

Hızlandırılmış karbonasyon yöntemi, esas olarak, eski harç tabakasına yapışan GDA'ların porozitesinin azaltılmasını hedef alır (Tam vd., 2020).

Geleneksel olarak, GDA'lar üzerindeki eski harç tabakası, su varlığında (çimento harcında fiziksel olarak emilen su, nem) CO₂ ile karbonatlaşma reaksiyonu gösterebilen yüksek miktarda kalsiyum hidroksit, kalsiyum silikat hidrat, etrenjit ve monosülfat içerir. Hızlandırılmış karbonasyon sırasında, GDA'lar genellikle CO₂ ile doldurulmuş bir odaya yerleştirilir. Agregalar, beton üretiminden önce birkaç gün boyunca basınçlı CO₂ altında işleme tabi tutulur (Li vd., 2017).

Zhang vd. (2015) yaptıkları bir çalışmada CO₂ kürü uygulanan betonlarda karbonatlaşma nedeniyle betonda katı hacim artışı ve reaksiyona girebilen beton bileşenlerini açıkça göstermişlerdir. GDA'nın hacminin karbonatlaştıktan sonra yaklaşık %12 arttığı görülmüştür. Bileşenlerin hacim genişlemesi nedeniyle, GDA'lardaki boşluklar karbonatlaşma ürünleri tarafından kısmen işgal edilebildiği ve hatta kapatılabildiği için GDA'ların porozitesinin azalttığı rapor edilmiştir. Hızlandırılmış karbonasyon, betonda

basınç dayanımının yanı sıra ayrıca eğilme ve yarmada çekme dayanımı ve kuruma büzülmesi gibi GDAB'nin diğer kısa ve uzun yaştaki özelliklerini de iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

1.3.4.1.2. Biyobirikinti (Biodeposition) Uygulaması

GDA'nın özelliğini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir başka verimli ve yeni yöntem de biyobirikintidir. Biyobirikinti, ürolitik bakteriler tarafından üretilen biyolojik karbonat birikintisi olarak tanımlanır (ASTM C 490, 2007). Bakterilerin hücre yüzeyinde/hücre duvarında, karboksil, fosforil veya amino grupları gibi negatif yüklü gruplar hakimdir ve burada genel bir anyonik yüke yol açar (Douglas ve Beveridge, 1998).

Bakteriler bir tuz çözeltisi içinde bekletilirse metal iyonları bakteri üzerine bağlanır. GDA kullanıldığında ise metal iyonları kalsiyumdur. Negatif yüklü karbonat iyonları, bakterinin işlevi ve CO₂ den dolayı H₂CO₃ üretir. Kalsiyum ve karbonat reaksiyona girerek kalsiyum karbonatı oluşturur. Beton içindeki kusurlar, kalsiyum karbonat ile kapatılabilir. Dolayısıyla biyobirikinti yöntemi ile betonun performansı geliştirilebilir. Hassas bir laboratuvar ortamında biyobirikinti uygulaması yapılabilir. Biyobirikinti uygulaması genellikle üç aşamaya ayrılır. İlk adım, sıvı kültürün GDA örneklerine döküldüğü ve bakteri üremesi için oda koşullarında 24 saat bekletildiği bakteri üreme adımıdır. İkinci adım, çökeltme ortamının (üre ve kalsiyum klorür gibi kalsiyum tuzlarından oluşan çözelti, (Grabiec vd., 2012) veya Ca-nitrat'ın (García-Gonzalez vd., 2017) bulunduğu çökeltme aşamasıdır.

Biyobirikinti işlemi uygulanmış numuneler oda koşullarında bekletildikten sonra agregalar çözeltiden çıkarılıp etüvde kurutulur. Kuruduktan sonra agregalar, beton üretimine hazır hale gelir. Biyobirikinti ile agrega iyileştirme yöntemi yeni bir yöntem olduğundan literatürdeki çalışmaların çoğu agreganın su emme oranını azaltmaya yöneliktir (He vd., 2020; Mehta ve Monteiro, 2017).

Grabiec vd. (2012), *S. Pasteurii* bakterisi kullanarak GDA'nın su emme oranını %13 ile 21 oranında azalttıklarını rapor etmiştir.

Garcia-Gonzalez vd. (2017), *B.Sphaericus* bakterisi yardımıyla GDA'nın su emme oranının yaklaşık %17 oranında azalabildiğini bildirmiştir.

Singh vd. (2018), bakteri ve nano silis kullanılarak GDA'nın su emme oranlarının değişimlerini araştırmıştır.

Su emmenin yanı sıra bakteri ile modifiye edilmiş saf GDBA ve karışık GDBA'larla (içerisinde kırılmış kiremit, duvar, cam ve ahşap gibi malzemeler de bulunan) üretilen betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri de araştırılmıştır (Wang vd., 2016). Sonuçlar, biyolojik çökeltmenin (*B. Sphaericus*), nihai GDAB'nin elastisite modülünde ve basınç dayanımında önemli bir gelişme sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Spesifik olarak, elastisite modülü, geri dönüştürülmüş beton agregası ve geri dönüştürülmüş karışık agrega kullanılan GDAB için sırasıyla yaklaşık %27 ve %40 artmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregası ve geri dönüştürülmüş karışık agrega kullanılan GDAB için basınç dayanımı sırasıyla yaklaşık %16 ve %10 artmıştır. Bu çalışmanın sonucuna göre biyoçökelme yönteminin her iki tip GDAB'da uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

1.3.4.1.3. Puzolan Emdirme

Puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık özelliği olmayan, fakat ince öğütüldüğünde sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleşerek hidrolik bağlayıcılık gösteren silisli, silisli-alüminli malzemelerdir. Puzolanlar, hidrate olan çimentonun bileşenlerinden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek puzolanik özellik gösterir. Silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve nano- SiO_2 (NS), literatürde GDA modifikasyonu için genellikle araştırılan üç ana puzolandır. Literatürde bir çalışmada SD çözeltisine 24 saat batırılan GDA ile üretilen betonların dayanımlarının, herhangi bir işleme tabi tutulmamış GDA içeren betona göre %15 daha yüksek olduğu bulunmuştur (Katz, 2004).

Benzer sonuçlar SD emdirilen GDAB'ların basınç ve yarmada çekme dayanımlarındaki artışının yaklaşık %10 olduğu şeklindedir (Gonzalez-Fonteboa ve Martínez-Abella, 2008).

Shi vd. (2018), SD, UK ve nano silika içeren çimento şerbetinde bekletilen GDA'lı betonların 28 günlük basınç dayanımlarının sırasıyla %55.2, %39.4 ve %17.6 arttığını bulmuşlardır.

1.3.4.1.4. Sodyum Silikat Kullanımı

Sodyum silikat, GDA porozitesinin azaltılmasında kullanılan başka bir maddedir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ genellikle AGB'de yoğunlaşır. Puzolana benzer şekilde, sodyum silikat çözeltisi de C-S-H jeli oluşturmak için AGB'de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girebilir. CSH, AGB'deki boşlukları doldurarak GDAB'nin dayanımını artırır (Shi vd., 2016).

Zhao vd. (2013), GDA'ları sodyum silikat çözeltisi emdirme işlemine tabi tutmuştur. GDAB'lerin dayanımları herhangi bir işlem uygulanmamış GDAB'ye göre yaklaşık %30 artmıştır. Fakat, sodyum silikat kullanımı sırasında ASR jeli oluşabileceği unutulmamalıdır (Shi vd., 2016).

1.3.4.1.5. Polimer Emülsiyonu

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin yanı sıra, polimer emülsiyonları ile iyileştirme, GDA'ların porozitesini azaltmak için başka bir etkili yöntemdir. Genel olarak, polivinil alkol (PVA) (Lei vd., 2020), polidiorgano siloksanlar (siloksan) ve alkil alkoksi silanlar (silan) gibi polimerler en çok kullanılan polimerlerdendir.

Bu malzemeler, özellikle su girişi nedeniyle buz çözücü tuzun veya donma-çözülmenin neden olduğu hasara karşı betonda su itici koruma amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Spaeth ve Djerbi Tegguer, 2013). Polimer emülsiyonu işlemi sırasında önce bir polimer çözeltisi hazırlamak için suya polimer eklenerek polimer çözeltisi hazırlanır. Daha sonra bu çözeltiye agrega eklenerek belirli bir süre çözelti içinde emdirmeye bırakılır (Spaeth ve Djerbi Tegguer, 2013). Emdirme işleminden sonra kurumaya bırakılan agregalarda GDA'lar üzerinde yapışmış eski harç ve AGB'deki boşluklar ve çatlaklar polimer molekülleri tarafından doldurulup agrega yüzeyleri geçirimsiz polimer film tabakasıyla kaplanmış olur (Shi vd., 2016).

Polimer çözeltisi emdirilmiş GDA'larla yapılan bir başka çalışmada ise GDA'nın boşluk yapısında, betonun porozitesini ve betonun geçirgenliğini önemli ölçüde azaltan bir polimerik film oluşumu sağlanmıştır (Spaeth ve Djerbi Tegguer, 2013). Bu çalışmada %5 Octyl trietoksi silan uygulanmış geri dönüştürülmüş beton agregasının su emmesi %1.8 iken, polimersiz geri dönüştürülmüş beton agregasının su emmesi %4.5 olarak belirlenmiştir. Kou ve Poon (2010), GDA'lara farklı konsantrasyonlu PVA çözeltileri emdirip 24 saat boyunca vakumlu ortamda bu polimerin agregalara nüfuz etmesini sağlamıştır. Yapılan çalışmada

optimum polimer çözeltisi konsantrasyonunun %10 olduğu belirlenmiş ve bu çözeltide işlem gören agregaların su emmelerinin yaklaşık %70 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca GDAB'nin basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla %5.6 ve %1.1 oranında artmıştır.

1.3.4.2. Eski Harç Tabakasının Azaltılması

İYA'dan elde edilen GDA tipleri arasında, en çok kullanılan ve üzerinde en çok çalışma yapılan beton atıklarından elde edilen GDA'dır. GDBA üzerine yapışmış olan eski harç, NA'dan daha yüksek poroziteye ve daha fazla çatlağa sahip olduğundan genellikle GDBA'nın kusur miktarı daha fazladır. Literatürde bazı araştırmacılar GDA kullanılarak üretilen betonların performansını artırmak için GDA üzerindeki harç tabakasını azaltmaya yönelmiştir.

1.3.4.2.1. Asit Uygulaması

Asit uygulaması, GDA üzerindeki eski harcın sökülmesi veya azaltılması için en yaygın kullanılan yöntemdir. Literatürde, hidroklorik asit (HCl), sülfürik asit (H₂SO₄), nitrik asit (HNO₃) ve nispeten daha zayıf bir asit olan asetik asit (CH₃COOH) bu işlem için uygulanmaktadır. Saravankumar vd. GDA'ları 0.1 normaliteli HCl, H₂SO₄ ve HNO₃ çözeltilerine batırarak oda sıcaklığında 24 saat bekletmiştir. Asidik çözeltide bekletilen GDA'ların üzerindeki eski harç tabakasının asitle reaksiyonu sonucu agregalardan sökülmesi sağlandıktan sonra temiz suyla yıkanarak kalıntı asit çözeltisi ve gevşek tanecikler GDA üzerinden temizlenmiştir. Daha sonra bu agregalar kullanılarak üretilen betonların dayanımı, normal agregalar ve temizlenmemiş GDA'lar kullanılarak üretilen betonlarla karşılaştırılmıştır. Asitle temizlenmiş GDA'larla üretilen betonların dayanımları, temizlenmemiş GDA'lı betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu artışlar HCl, H₂SO₄ ve HNO₃ için sırasıyla 34.6%, 25.3%, ve 17.6% olarak belirlenmiştir. Sonuçta GDA üzerindeki eski harcı sökmek için en etkili asitin hidroklorik asit olduğu rapor edilmiştir (Saravanakumar vd., 2016).

Benzer sonuçlar Tam vd. tarafından da rapor edilmiştir. Tam vd. (2007), yaptıkları çalışmada GDA'lar HCl, H₂SO₄, ve H₃PO₄ asit çözeltileri içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Bu agregalarla üretilen betonların basınç dayanımları HCl, H₂SO₄, ve H₃PO₄ asitine

batırılanlar için sırasıyla 10.1%, 12.8%, ve 14.0% artmıştır. Aynı çalışmada eğilme dayanımları da sırasıyla %4.4, %5.1 ve %18.6 artmıştır.

Wang vd. asetik asit kullanarak geri dönüştürülmüş beton agregalarının özelliklerini iyileştirmenin hem çevresel hem de ekonomik bir yaklaşım olduğunu belirtmiştir (Wang vd., 2017). Diğer asitlerle kıyaslandığında asetik asit daha zayıf bir asit olduğundan kullanım bakımından daha az tehlikelidir. Ayrıca diğer asitlerden gelebilen klorür gibi iyonları içermez. Klorür iyonu betonarme bir yapının zarar görmesine neden olabilir (örneğin, betondaki çelik donatının korozyonu). Wang vd. (2017), farklı konsantrasyon ve farklı bekletme süreleri uygulanmış GDA'lar ile üretilen betonların, işlem görmemiş GDA ile üretilenlere göre daha yüksek basınç dayanımı verdiğini bulmuştur.

1.3.4.2.2. Isıl İşlem

GDA'lar üzerindeki eski harç tabakasını azaltmak için uygulanan bir başka yöntem de ısıtma işlemidir. Isıl işlem, GDA üretimi sırasında gerçekleştirilir. Isıl işlemin prensibi, eski harç tabakasına yapışan eski agrega parçalarının ayrılmasına yol açan eski harca yapışan agreganın dehidrasyonuna dayanır. Larbi vd. (2000), geri dönüştürülmüş beton agregasının 2 saat boyunca 800°C'ye ısıtılmasının, GDA'ya yapışmış eski harcın çoğunu çıkarabildiğini ve kalan eski harç miktarının GDA numunelerinin ağırlıkça sadece %5'i olduğunu bildirmiştir.

Bu işlemin yüksek bir enerji tüketimi olmasına rağmen, Mulder vd. (2007)'ye göre ihtiyaç duyulan enerji İYA'nın yanıcı parçacıklarından (ahşap, plastik, kâğıt, bitümlü çatı malzemeleri vb.) üretilebilir.

Akbarnezhad vd. (2011), mikrodalga destekli ısıtma tekniğinin kullanılmasının GDA üzerindeki eski harcı sökebileceğini ortaya koymuştur. Harcın mikrodalgalarla karşı geçirgenliği daha fazla olduğundan GDA'lara mikrodalga ışın demeti gönderildiğinde eski harç, NA'dan daha hızlı ısınabilir, bu da harçta (özellikle AGB'de) ve agregalarda önemli bir ısı gerilme farklılığına yol açar. Sonuç olarak bu yöntemle, GDA üzerindeki eski harç agregalardan ayrılabilir.

1.3.5. GDA'yı Modifiye Etmeden GDAB Özelliklerinin İyileştirilmesi

Yukarıda belirtilen iyileştirme yöntemlerinin yanı sıra, GDA üzerinde herhangi bir değişiklik yapmadan GDAB'nin performansını artırabilen geliştirilmiş karıştırma yaklaşımları ve lif takviyesinin yapılması gibi yöntemler de vardır.

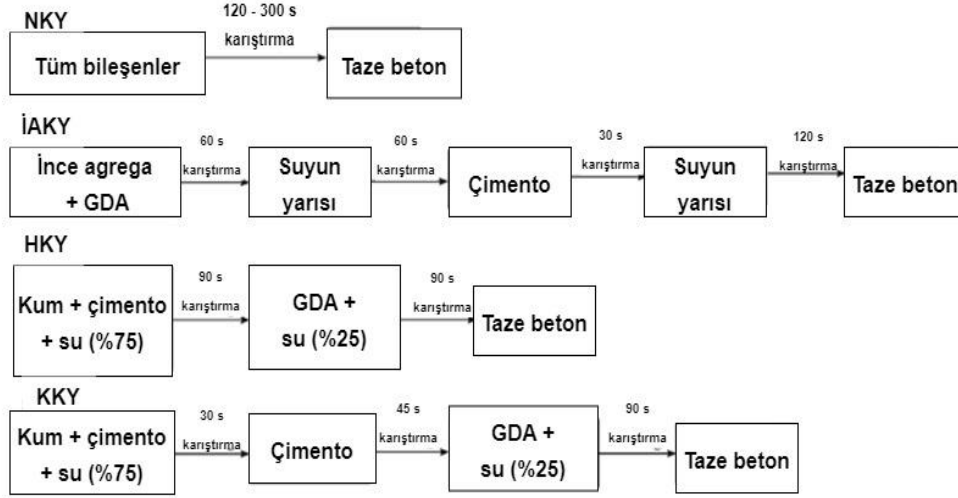
1.3.5.1. Karışım Yaklaşımı

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, iki aşamalı karıştırma yaklaşımı (İAKY), harç karıştırma yaklaşımı (HKY) ve kumla kaplama yaklaşımı (KKY) olmak üzere üç karıştırma yaklaşımının GDAB performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Bu iyileştirme yöntemleri Verian vd. (2018) tarafından Şekil 1.3'te özetlenmiştir.

Bunlar arasında İAKY ilk olarak Tam vd. tarafından 2007 yılında yapılmıştır. Geleneksel beton karıştırma yaklaşımından farklı olarak, karışım suyu iki aşamada katılmış ve bu betonların basınç dayanımında geleneksel karıştırma yöntemine göre %20'ye kadar artış görülmüştür. Ayrıca iki aşamalı karışım yöntemiyle üretilen NA'lı betonlarda ise neredeyse hiçbir dayanım artışının olmadığı ve bu yöntemin sadece GDA ile üretilen betonlarda olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Bu yöntemin GDA yüzeyinde ince bir çimento şerbeti oluşturduğu ve bu şerbetin GDA'daki eski harcın ve arayüzeyin boşluklarını ve kusurlarını doldurabildiği ve bu sebeple beton basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir (Tam vd., 2007).

Hem HKY hem de KKY'de, ilk önce ince agregalar su ve çimento ile karıştırılarak GDA'nın boşlukları ve çatlaklarının bu harç ile doldurulması ve kaplanması sağlanmaktadır (Liang vd., 2015).

Bu üç karıştırma yöntemi arasında KKY'nin GDAB'nin dayanımını artırmada en etkili yöntem olduğu rapor edilmiştir (Liang Y vd., 2015). Özellikle KKY kullanarak üretilen betonun basınç dayanımının, HKY ve İAKY ile üretilen betondan sırasıyla yaklaşık %20 ve %30 daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Eski harç tabakasının azaltılması gibi iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bu yeni karıştırma yöntemlerinin uygulanması daha kolay olduğundan ve nispeten düşük maliyetlere sahip olduklarından daha pratik yöntemler olarak değerlendirilmiştir (Bai vd., 2020).



Şekil 1.3. İki aşamalı karıştırma yöntemi ile GDAB üretimi (Verian vd., 2018)

1.3.5.2. Lif Kullanımı

Bazı araştırmacılar, GDAB'nin gevrek olarak kırılmasını engellemek ve ayrıca çekme ve eğilme mukavemetini artırmak için GDAB'de kısa monofilament lifler kullanmışlardır. Bu liflerin betondaki ana rolü, “liflerin köprü etkisi” ile, betonda oluşan çatlakların açılmasını ve yayılmasını kontrol etmektir (Brandt, 2008).

Birçok araştırmacı, GDAB'nin çelik, polipropilen gibi monofilament liflerle birlikte kullanılmasını araştırmıştır. Bu çalışmaların sonuçlarına göre lif kullanımının yarmada çekme, eğilme dayanımlarını artırdığı rapor edilmiştir. (Mohseni vd., 2017, Katkhuda ve Shatarat, 2017).

Lif kullanımı basınç dayanımına da etki etmektedir fakat literatürdeki araştırmaların bulguları doğrultusunda ortak bir etkiden söz edilememektedir. Bazı araştırmada lif kullanımının betonun basınç dayanımını artırdığını bazılarında ise azalttığı rapor edilmiştir (Mohseni vd., 2017; Chen vd., 2014).

Bazı çalışmalarda ise betonda lif kullanımının dayanım üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı rapor edilmiştir (Alnahhal ve Aljidda, 2018). Bazı çalışmalarda ise lif ilavesinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını bildirilmiştir (Alnahhal ve Aljidda, 2018; Gao ve Zhang, 2018).

1.3.5.3. Nano Parçaların İlavesi

Teknik açıdan 100 nm'den küçük boyutlu parçacıklar, nanoparçacık olarak kabul edilir (Sanchez ve Sobolev, 2010). Nanoparçacıkların boyutları çimento tanelerinden daha küçüktür ve AGB'deki kusurları kapatarak betonun porozitesini azaltırlar. Çimentonun hidratasyonu sırasında, nanoparçacıklar, hidrasyon hızını artırabilmekte ve Ca(OH)_2 fazının miktarını azaltabilmektedir (Mukharjee ve Barai, 2017). Karbon nanotüp (CNT) gibi bazı spesifik nanoparçacıklar, çatlakları birbirine bağlayıp köprü etkisi sağlayarak çekme gerilmelerini taşıyabilirler (Sanchez ve Sobolev, 2010).

Nanosilika, GDAB'ler ile ilgili en çok kullanılan ve araştırılan nanoparçacıktır. Nanokalsiyum karbonat (nano kireçtaşı), nano titanyum dioksit, nano alümina, nanokil ve karbon nano tüp de GDAB ile ilgili araştırılan diğer nanoparçacıklardandır (Gao vd., 2020; Moro vd., 2020).

Ön emdirme GDAB'lere nanoparçacık ilavesinde kullanılan yaygın bir yöntemdir. Beton karıştırılmadan önce, nano parçacıklar suda çözünerek bir çözelti hazırlanır (Gao vd., 2020). Daha sonra GDA, çimento ve kalan karma suyu gibi diğer beton bileşenleri eklenip karıştırılır. Genel olarak, büyük özgül yüzey alanı nedeniyle nanoparçacıkların suyla birleşmesi kolaydır. Bundan dolayı taze betonun işlenebilirliği önemli ölçüde azalır. İşlenebilirliğin azalmasına ek olarak basınç dayanımının (Mukharjee ve Barai, 2017; Gao vd., 2020), yarmada çekme dayanımının (Mukharjee ve Barai, 2017; Gao vd., 2020) ve eğilme dayanımının (Mukharjee ve Barai, 2017; Zhang vd., 2015) nanoparçacıkların eklenmesiyle iyileştiği rapor edilmiştir.

1.3.6. Geri Dönüştürülmüş Agrega ile Yapılan Uygulamalar

1.3.6.1. Pratikteki Uygulamalar

GDA'nın düşük mekanik yük kapasitesi ve içeriğinin belirsizliği nedeniyle GDA veya GDAB'nin ana uygulama alanı yapısal olmayan uygulamadır.

Avustralya'da GDA birçok farklı yapıda kullanılmaktadır (Kotrayothar, 2012). Sürdürülebilir çevre oluşturmak için birçok ülkede yapısal uygulamalar için GDAB (çoğunlukla geri dönüştürülmüş beton agregası ile) kullanımı teşvik edilmektedir.

İsviçre, GDAB'nin uygulamalarında akla gelen ilk ülkelerdendir (Brugger, 2020). Örneğin ETH Zürih'teki (Zürih, Zürih'teki İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü) e-bilim laboratuvarı 2007 yılında tamamlamış ve toplam 11.655 m² taban alanına sahip bu altı katlı yapı, çoğunlukla geri dönüştürülmüş betondan yapılmıştır (URL-2, 2020).

Başka bir örnek de Zürih Hirzenbach'ta tamamen geri dönüştürülmüş betondan üretilen bir okul binasının genişletme yapısıdır (URL-3, 2020). Başka bir örnek de 2002 yılında Zürih'te %80 geri dönüştürülmüş beton içeren pilot bir kamu yapısı olan “Im Birch” okuludur (Şekil 1.4). Bu projenin başarılı sonuçlanması, İsviçre gibi tüm kamu binaları için en az %25 oranında GDA kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. (URL-4, 2020).

Zürih, geri dönüştürülmüş beton agregasının yanı sıra kil tuğlalar, fayanslar, kalsiyum silikat tuğlalar veya gaz beton içerebilecek %25 oranında GDA kullanmayı bile teşvik etmektedir. İsviçre'ye benzer şekilde, Almanya'da İYA'da yüksek bir geri dönüşüm oranına sahiptir, örneğin 2016 yılında toplam 86 milyon ton bina ve yol malzemesinin yanı sıra inşaat atıklarının yaklaşık %84'ü geri dönüştürülmüş inşaat malzemelerine dönüştürülmüştür. Ancak, bu 72.2 milyon ton geri dönüştürülmüş malzemeden yalnızca %21'i inşaat malzemesi olarak asfalt ve beton üretiminde kullanılmıştır (URL-5, 2022).

Almanya'daki tüm uygulamalar arasında, Berlin Humboldt Üniversitesi'ndeki Yaşam Bilimleri Araştırma ve Laboratuvar Binası, büyük miktarda GDA (3800 m³) kullanımı nedeniyle Almanya'nın en popüler pilot inşaatı olarak kabul edilmiştir (URL-6, 2019). GDA'nın bu binada başarılı bir şekilde uygulanmasından sonra, Berlin hükümeti gelecekteki kamu inşaat projesi için geri dönüşüm betonu kullanma zorunluluğunu uygulamaya koymayı düşünmektedir (Brugger, 2020).

İsviçre ve Almanya'nın yanı sıra Dünya çapında GDAB'nin yapısal uygulamalarını teşvik eden ülkeler de vardır. Örneğin Japonya'da, Shin-Osaka'da bir yapının birinci katının yaklaşık 100 m²'si GDAB kullanılarak dökülmüştür (Takenaka Corporation, 2019).

Japonya İnşaat Federasyonu tarafından Toko/Bunkyo-Ku'da katlı bir konut yapısı için 1000 m³ GDAB kullanıldığı ve yine Tokyo Bunkyo-ku'da bir ofis binası için yaklaşık 120 m³ GDAB kullanıldığı rapor edilmiştir (Japonya İnşaat Federasyonu, 2019).

Çin'de, Şangay Uluslararası havacılık Hizmet Merkezi'nde Proje X'in yapımında inşaat atıklarının tamamı GDA olarak kullanılmıştır. Yaklaşık olarak 40000 m³ GDAB şantiye alanında üretilmiş ve bunun 11000 m³'ü de yapının temelinde kullanılmıştır (Çin İnşaat Sekizinci Mühendislik Bürosu, 2008).



Şekil 1.4. Berlin Humboldt Üniversitesi Yaşam Bilimleri Araştırma Laboratuvarı Binası (üstte), Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü e-Bilim Laboratuvarı (alt solda) ve Zürih Im Birch Okulu (alt sağda)

1.3.6.2. Uygulamadaki Zorluklar

Yukarıda belirtilen uygulamalara rağmen, pratikte GDAB uygulaması hala sınırlıdır. GDAB'nin düşük mekanik özellikleri dışında esas zorluk, GDA üretiminde İYA'nın geri dönüşümündedir. En yüksek İYA üretimine sahip olan ülkelerden biri Çin'dir (2018'de yaklaşık 2360 milyon ton). 2003 yılında Çin, İYA ve ilgili faaliyetlerin tanımlandığı ilk Kentsel İnşaat Atıkları Yönetmeliği'ni (Aslam vd., 2020) yürürlüğe koymuştur.

Çin'deki İYA geri dönüşümünde karşılaşılan zorluklar teknik, ekonomi politik ve sosyal yönler olarak sıralanabilir. İYA'nın kökeni ve miktarının belirsiz olması, şantiye alanının geri dönüşüm tesisine uzak olması, saha dışındaki geri dönüşüm tesislerinin yeterli kalitede malzeme sağlayamaması gibi sebepler işin teknik zorluklarıdır (Ma vd., 2020; Bao vd., 2020; Chi vd., 2020).

Ekonomik yönler, İYA geri dönüşümü ve tedarik zincirindeki etkileşim ve koordinasyon eksikliği ve geri dönüşüm pazarının gelişmemiş olmasıdır (Ma vd., 2020; Chi vd., 2020). (Aslam vd., 2020; Bao vd., 2020)

İnsanların geri dönüşüm konusunda bilinçlendirilmemesi ve geri dönüştürülen malzemeler ile ilgili olumsuz düşünceleri, geri dönüştürülen malzemelerin yapılarda kullanılması ile ilgili sosyal yönlerdir (Chi vd., 2020; Ma vd., 2020).

Ekonomiklik, maliyeti düşürmek ve bir şirkete fayda sağlamak için etkin İYA yönetiminden ve İYA boşaltma ücreti için cazip politikaların sağlanmasıyla desteklenebilir. İYA yönetiminin verimsizliği probleminin üstesinden gelmek için bazı araştırmalarda bir dizi çözümler önerilmiştir. Bao vd. özelleştirilmiş geri dönüştürme ekipmanları ve daha fazla saha dışı geri dönüşüm tesisleri geliştirmeyi önermiştir (Bao vd., 2020).

1.4. Geopolimer Beton

Geopolimer terimi 1970'lerde Prof. Joseph Davidovits vd. (1991) tarafından bulunmuş ve bir alkali çözeltinin bir alüminosilikat kaynağı toz malzeme ile reaksiyonu ile sentezi olarak tanımlanmıştır.

Geopolimeri tanımlarken farklı formülasyonlar nedeniyle inorganik polimer ve alkali ile aktive edilmiş malzemeler gibi farklı isimler de tanımlanabilmektedir. Bazı araştırmacılar da, geopolimerlerin düşük kalsiyumlu uçucu kül ve kalsine killer gibi öncüllerin alkalilerle aktive edildiği bağlayıcılar olarak adlandırılabilceğini savunmuştur (Davidovits, 1991; Duxson vd., 2007). Öncüllerin yanı sıra, geopolimerin bir diğer önemli bileşeni de alkali aktivatördür. Yaygın alkali aktivatörler sodyum veya potasyum hidroksitler, silikatlar, karbonatlar veya bu maddelerin suyla oluşturulmuş çözelti karışımlarıdır (Fernandez-Jimenez vd., 1999).

Nihai üründen iyi performans elde etmek için, öncül ve alkali aktivatörün uygun koşullarda birleştirilmesi önemlidir. Bazı öncüller, yapılarındaki kimyasal farklılıklardan dolayı, belirli aktivatör tipleri ile daha verimli bir şekilde reaksiyona girer. Örneğin sodyum silikat çözeltisi, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (YFC) diğer alkali aktivatör türlerinden daha iyi aktive olmasını sağlar (Bakharev vd., 1999).

Literatürde uçucu külün (UK) alkali aktivasyonu ile üretilen GPB'lerde ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri tercih edilmektedir (Fareed vd., 2011).

GPB üzerinde yapılan araştırmalar, GPB'nin geleneksel beton ile eşit veya üstün özelliklere sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Normal dayanım düzeyinde GPB ile geleneksel beton karşılaştırıldığında; GPB'nin geleneksel beton ile benzer dayanıma sahip olduğu, yangına karşı daha iyi bir malzeme olduğu (Cheng ve Chiu, 2003); sülfat saldırısına (Bakharev vd., 2002) ve klorüre karşı daha iyi bir performansa sahip olduğu rapor edilmiştir (İsmail vd., 2013).

GPB, ayrıca çeşitli çevresel avantajlar da sağlayabilir. GPB üretilirken geleneksel beton ile karşılaştırıldığında kullanılan çimento yerine YFC ve UK gibi endüstriyel atık ürünler kullanıldığından dolayı; GPB kullanımı geleneksel beton kullanımına göre CO₂ emisyonunu %80 oranında azaltabilir (Duxson vd., 2007a,b,c).

Roy ve Idorn (1982)'un yaptığı bir çalışmaya göre YFC üretiminde aynı miktarda çimento üretiminden daha az enerji tüketildiği belirlenmiştir.

GPB, sürdürülebilirlik bakımından çok iyi bir alternatif beton tipi olmasına karşın dünya genelinde henüz yapısal standartları olmadığından sadece özel projelerde kullanılabilmektedir (Kumar vd., 2018).

GPB'nin yaygınlaşması için GPB'nin uzun vadeli performansı üzerine daha fazla bilimsel araştırma yapılması gerekmektedir (Duxson vd., 2007 a,b,c).

1.4.1. Geopolimerizasyon Reaksiyonu

Alüminasilikat oksitlerin alkali çözeltiler ile reaksiyona girerek Si-O-Al bağları içeren üç boyutlu polimer zincirlerinin oluşturmasına geopolimerizasyon reaksiyonu denir (Davidovits, 1991).

Geopolimer üretiminde alkali çözeltiler ile toz alümina silikat öncülleri birbirleriyle karıştırılır. Öncül ve alkali aktivatör arasındaki temastan sonra, öncülün amorf bileşenleri (alüminatlar ve silikatlar) çözünür. Daha sonra alümin ve silikatlar, bir alümina silikat jeli oluşturmak üzere reaksiyona girer. Reaktif alüminyum, silikondan daha hızlı çözündüğünden, ilk önce alüminyum açısından zengin bir jel (Jel 1) oluşur. Sonraki aşamada daha fazla silikon çözündüğünde, jel yapısı zeolit yapılı öncül jeli (Jel 2) oluşturmak üzere yeniden düzenlenir. Oluşan bu jel, silisyum ve alüminyumun oksijenle yaptığı bağlardan daha kuvvetli ve kararlıdır. Yeniden yapılaşma süreci devam eder ve zeolit formunda kristaller oluşur. Bu reaksiyon serisi sonucunda, jeller birbirine bağlanır ve çimentonun hidratasyonuna benzer bağlayıcı özellikte katı bir kütle oluşturur. Douglas vd. (1991), sodyum silikat ile aktive edilen beş farklı GPB karışımı üzerinde yaptığı testler sonucunda GPB'nin tatmin edici işlenebilirlik ve mukavemet özellikleri sağlayabildiğini belirlemiştir. Bu reaksiyonlar Şekil 1.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Geopolimerleşme mekanizmasının şematik gösterimi (Hassan vd., 2019)

1.4.2. Geopolimer Betonun Tasarımı ve Üretimi

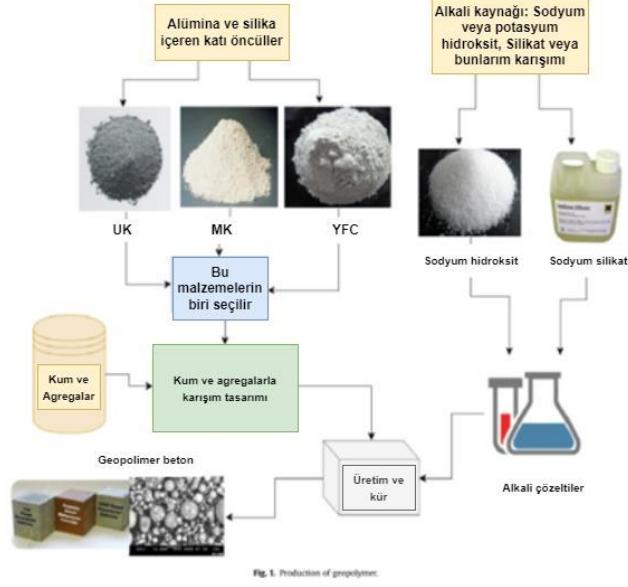
GPB'lerin tasarım standartlarının geliştirilmesi hala deneysel aşamadadır. Araştırmacılar GPB üretiminde betondan istenilen özellikleri sağlayabilmek için farklı yöntemler önermiştir (June vd., 2010; Lokuge vd., 2018; Ferdous vd., 2015; Anuradha vd., 2012).

Lokuge vd. (2018), geleneksel betonun aksine GPB'nin karışım oranlarının belirlenmesinin zor olduğunu çünkü GPB matrisine etki eden birçok parametre olduğunu belirtmiştir. Alkali aktivatör çözeltisi, NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltilerinin karışımından yapılabilir. GPB üretiminde NaOH çözeltisinin molaritesi 8 ile 16 arasında değişebilir. Bağlayıcı madde, GPB ve GB arasındaki temel farktır. GP jeli, öncül madde içindeki SiO₂ ve Al₂O₃'in alkali aktivatör çözeltisiyle reaksiyona girerek bağlayıcı özellik gösterir (Davidovits, 1991).

GB'ye benzer şekilde GPB'nin kütlelerinin yaklaşık %75-80'ini agregalar oluşturur. GPB karışımlarının agrega miktarı tıpkı GB'deki gibi hesap yöntemleriyle belirlenebilir (Davidovits, 2008).

GPB üretiminde öncelikle UK, MK, YFC gibi alümina ve silika içeren katı öncüllerden birisi seçilir. Diğer yandan seçilen öncül maddeye uygun olan alkali aktivatör çözeltisi (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat gibi) hazırlanır. Seçilen malzemelerin miktar ve özelliklerine göre agrega miktarı belirlenir. Daha sonra tıpkı geleneksel beton üretimindeki gibi agregalar miksera konulduktan sonra doygun kuru yüzey haline getirilir. Bu agregaların üzerine öncül maddeler eklenerek birkaç dakika karıştırılır ve

alkali çözelti ilave edilir. Karışım homojen hale gelene kadar karıştırılır. Bu aşamalar Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.6. Geopolimer betonun üretim aşamaları (Hassan vd., 2019)

1.4.3. GPB'nin Kürü

GPB'nin kür edilmesinde yüksek sıcaklık kürü, buhar kürü gibi kür yöntemleri uygulanabildiği gibi oda sıcaklığında kür de uygulanabilir. GPB'ye uygulanacak kür yöntemi GPB'de kullanılan öncüle, bu öncüllerin inceliğine, kullanılan alkali aktivatör çözeltisinin miktarına, alkali aktivatör çözeltisini oluşturan bileşenlere bağlıdır. Örneğin yüksek kalsiyum içeriğine sahip olan YFC ve C sınıfı UK ile üretilen GPB'lerde oda koşullarında kür uygulanabilirken F sınıfı UK ve MK gibi öncüllerin kullanılması durumunda yüksek sıcaklık kürünün uygulanması gerekmektedir (Nuriddin vd., 2018).

Geopolimer betonun yüksek sıcaklık altında kür edilmesi, reaksiyonları hızlandırarak betonun mekanik özelliklerini iyileştirir. Özellikle uzun süre yüksek sıcaklıkta kür edilen F tipi uçucu kül esaslı betonların dayanımı belirgin bir şekilde artar (Adam ve Horiato, 2014).

Sıcak kürlenme, cüruf bazlı GPB için erken dayanımı artırsa da daha geç yaşta oda sıcaklığında kürlenmiş GPB'lere göre daha düşük bir nihai dayanıma yol açabildiği görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimerizasyon reaksiyonunun hızlanması sonucunda, homojen bir mikro yapı oluşmaz. Cüruf tanelerinin yakınında biriken reaksiyon

ürünleri daha sonraki reaksiyonlar için bir bariyer oluşturur ve bu nedenle ileri yaşlarda yavaş mukavemet artışına neden olur (Bakharev vd., 1999b). Bu nedenle, cüruf bazlı GPB için ısıyla kütleme gerekli değildir.

1.4.4. Taze Haldeki Geopolimer Betonların Özellikleri

1.4.4.1. İşlenebilirlik

GPB'nin işlenebilirliği GPB üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve özelliklerine bağlıdır. (Wallah ve Hardjito, 2005).

Rangan vd. çalışmalarında GPB'nin çökme değerinin $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranına ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermişlerdir. Alkali ortamda çözülebilen kalsiyum miktarının düşük olduğu durumda C tipi UK veya YFC ile üretilen GPB'nin çökme kaybının GB'ye eşit veya daha az olduğunu belirtmişlerdir. GPB'de betonda sıvı kütlelerinin katı kütlelerine oranının 0.22'den büyük olduğu veya düşük su emmeli agregalar kullanıldığında uygun işlenebilirlik özelliklerinin elde edilebildiği görülmüştür. Literatürde GPB için naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcıların iyi etki ettiği ve tavsiye edilen katkı miktarının bağlayıcı maddenin yaklaşık %4'ü kadar olduğu rapor edilmiştir (Rangan ve Hardjito, 2005).

Umniati vd. (2017), UK/kum oranının artmasının GPB'nin işlenebilirliğini artırdığını ve sodyum silikat çözeltisindeki $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının artmasıyla GPB'nin yapışma ve çökme kabiliyetinin arttığını belirtmiştir.

Çeşitli araştırmacılar, farklı oranlarda alkali aktivatör çözeltisi/ UK kullanarak ürettikleri GPB ile ilgili çalışmalarda NaOH molaritesi azaldığında GPB'nin işlenebilirliğinin arttığını belirtmişlerdir (Shadnia vd., 2015; Lokuge vd., 2018; Mehta vd., 2017).

Bazı araştırmacılar, alkali aktivatör tipinin GPB'un işlenebilirliğine etki ettiğini rapor etmiştir. Örneğin Mehta ve Siddique (2016), Na_2SiO_3 çözeltisinin yüksek viskozitesi nedeniyle GPB'nin işlenebilirliğini NaOH çözeltisine göre daha çok azalttığını rapor etmiştir. Ayrıca alkali aktivatör olarak sadece NaOH kullanılması durumunda betonun çökme değerindeki azalmanın iyileştirilebileceği belirtilmiştir.

Mehta ve Siddique (2017), farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarına sahip çeşitli NaOH molariteleri kullanılarak üretilen geopolimer betonunun işlenebilirliğini inceledikleri

çalışmada sodyum hidroksit çözeltisinin yoğunluğunun geopolimerin işlenebilirliğini etkilediğini rapor etmiştir.

1.4.4.2. Priz Süresi

GPB'nin priz süresi GPB'nin bağlayıcı dozajına, sodyum hidroksit ve sodyum silikat miktarına ve bu çözeltilerin birbirine oranına ve agrega tipine göre değişmektedir (Xie vd., 2019; Ren ve Zhang, 2019).

Literatürde alkali aktivatör/UK ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının GPB priz süresine neredeyse belirgin bir etkisinin olmadığı fakat priz süresinin NaOH çözeltisinin molaritesi ile değiştiği rapor edilmiştir (Jumrat vd., 2011; Antoni vd., 2017).

Ayrıca yaptıkları çalışmada NaOH molaritesindeki azaltmanın UK ile üretilen GPB'nin priz süresini etkili bir şekilde geciktirdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Phoongernkham vd. (2016) tarafından NaOH molaritesi arttığında GPB'nin priz süresinin azaltılabileceği rapor edilmiştir.

Malkawi vd. (2016), Na_2SiO_3 çözeltisindeki sodyum miktarının, UK ile üretilen GPB'nin priz süresi üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, YFC ile üretilen GPB'lerde YFC miktarı artırılarak betonun başlangıç ve bitiş priz süreleri azaltılabilir. Musaddiq Laskar ve Talukdar (2017), alkali aktivatör olarak sadece NaOH kullanılarak üretilen GPB'lerde; NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı kullanılarak üretilen GPB'ye kıyasla priz süresini önemli ölçüde geciktirebildiğini rapor etmiştir.

Al-Majidi vd. (2016), GPB üretiminde UK ve YFC'nin birlikte kullanımının GPB'nin priz süresi açısından önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

1.4.4.3. Hidratasyon Isısı

GPB'nin yüzey sıcaklığı, alkali çözelti ve bağlayıcı öncül madde arasındaki geopolimerizasyon nedeniyle çimentolu betonunkinden biraz daha yüksektir (Zhang vd., 2016). GPB'lerde sodyum silikat/UK ve sodyum hidroksit/UK oranı arttıkça hidratasyon ısısının arttığını, ince agrega/UK oranı arttıkça hidratasyon ısısının azaldığını belirtmişlerdir (Shekhovtsova ve EP Kearsley, 2014).

Brough ve Atkinson (2002), GPB'nin sıcaklığının yalnızca karıştırma sırasında arttığını ve dökümden sonra sıcaklığın düştüğünü belirtmişlerdir.

Rangan ve Hardijito (2005)'un yaptığı çalışmada ise UK bazlı GPB'de oda sıcaklığında dökümden sonraki ilk 25 saat boyunca ekzotermik bir reaksiyon görülmezken, metakaolin bazlı GPB'de ekzotermik reaksiyon görüldüğünü ve hızlı bir basınç dayanımı gelişimi olduğu belirtilmiştir.

1.4.5. Sertleşmiş Geopolimer Betonun Özellikleri

1.4.5.1. Basınç Dayanımı

GPB'lerin basınç dayanımını üzerinde etkili parametreler öncülün kimyasal bileşimi, NaOH molaritesi, kullanılan alkali aktivatör çözeltilerinin birbirine kütlece oranı, kür süresi ve kür sıcaklığıdır (Rattanasak vd., 2009, 2011; Gorhan ve Kurklu, 2014; Mustafa vd., 2012; Ramujee ve Potharaju, 2017; Hardjito ve Rangan, 2005; Pimraksa vd., 2011).

GPB üretilirken seçilen alümina silikat kaynağı olan öncülün seçimi GPB'den hedeflenen dayanımın ve dayanıklılığın sağlanabilmesi için çok önemlidir. GPB üretimine uygun öncül madde seçiminde öncülün yüksek amorflukta olması, alüminyumlu bileşenlerini alkali ortama kolayca bırakabilmesi gerekmektedir (Zergaoui, 2009).

Al-mashhadani vd. (2018), GPB üretiminde kullanılan MK'nin kaynağının ve yapısındaki alüminyum, silisyum oksitlerin miktarı gibi özelliklerinin GPB'nin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

YFC ile üretilen GPB'lerin dayanımları UK ile üretilen GPB'lerden daha yüksektir. Assi vd. (2016), yaptıkları çalışmada yüksek inceliğe sahip reaktif uçucu küller kullanılarak üretilen GPB'lerden oldukça yüksek basınç dayanımları elde edilebildiğini rapor etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda UK ile üretilen GPB'lerden yüksek dayanım elde etmek için karışıma YFC ikame etmek yerine daha ince UK kullanılarak yakın dayanım sınıfında GPB'ler elde edilebileceği belirtilmiştir.

GPB üretiminde kullanılan alkali çözeltinin çözünürlüğü, GPB'nin dayanımı üzerinde etkilidir. Yüksek çözünürlüklü alkali ortam öncül malzemelerin iyi çözülmesini sağlayarak GPB'nin dayanımını artırır (Puertas vd., 2000).

GPB üretiminde kullanılan Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltilerinin kütlece birbirine oranı GPB'nin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bhowmick ve Ghosh (2012),

yaptıkları çalışmada UK ile üretilen GPB'lerin basınç dayanımlarının kullanılan alkali çözeltilerin $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının etkisinin açıkça görüldüğünü, bu oranın 1'den 1.5'e çıkarıldığında GPB'nin basınç dayanımının arttığı, 1.8'e çıkarıldığında ise dayanımların azaldığı rapor edilmiştir.

Benzer bir çalışmada ise GPB üretiminde kullanılan alkali çözeltilerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 1'den 1.5, 2 ve 2.5'e artmasıyla GPB'lerin dayanımlarının da arttığı rapor edilmiştir (Thaarrini ve Ramassamy, 2015).

Kotwal vd. (2015), GPB bileşiminde Na_2SiO_3 çözeltilisinin UK'e oranı artırıldığında GPB'nin basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. NaOH çözeltilisinin UK'e oranındaki artışın GPB'nin basınç dayanımında Na_2SiO_3 'e göre daha belirgin dayanım artışları elde edilmesine neden olduğu rapor edilmiştir.

Wazien vd. (2016), yaptıkları çalışmada GPB içerisindeki OH^- iyonlarının fazla olması durumunda öncüllerin çözünmesini hızlandırdığı, geopolimerin nihai bağlayıcılık özelliğini veren jellerin polikondensasyonunu azalttığını belirtmişlerdir. Bu durum bağlayıcının erken priz almasına ve GPB'de mukavemet kaybına neden olduğunu rapor etmişlerdir.

GPB üretiminde kullanılan bağlayıcıların miktarı GPB'nin mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. İsmail vd. (2013), çeşitli oranlarda NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltilisi içeren GPB üretiminde bağlayıcı olarak metakaolin ve palmye yağı külü kullanılan GPB'nin erken yaşta basınç dayanımı sağladığını gözlemlemiştir.

GPB'nin dayanım gelişimi GPB üretiminde kullanılan öncülün kimyasal bileşiminin yanı sıra uygulanan kür rejimine de bağlıdır (Assi vd., 2018).

Sıcak kür uygulanmış C sınıfı UK esaslı GPB'ler nihai dayanımının %90'ına 80-90 °C derecede kür edildiği takdirde birkaç saatte ulaşır. Ancak ortam sıcaklığında kürlenene UK esaslı GPB, geleneksel betonda olduğu gibi zamanla dayanım kazanmaya devam eder. UK ile üretilen GPB'yi oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür etmenin genellikle nihai dayanıma belirgin bir etkisi yoktur fakat kür sıcaklığı betondaki reaksiyonların ilerlemesini ve betonun nihai basınç dayanımına ulaşma sürecini hızlandırır (Rangan, 2008).

GPB'lerde su/geopolimer katı oranının GPB basınç dayanımına etkisi geleneksel betonun su/çimento oranının dayanıma etkisine benzerdir. Genellikle GPB üretiminde su/geopolimer katı oranı arttıkça GPB'nin dayanımı azalır. Geopolimer bağlayıcıyı oluşturan katı tanelerin kütlesi; sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin katı kütlesi ve öncül maddenin kütlesinin toplamıyla hesaplanır (Ng ve Foster, 2008).

1.4.5.2. Eğilme Dayanımı

Lee vd. (2017), UK ile üretilen GPB'lerde betonun kum/UK oranının betonun eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu ve bu oranın belli bir değerden sonra GPB'nin eğilme dayanımını oldukça azalttığını rapor etmiştir.

Adak vd. (2014), UK ile üretilen geopolimer harçlara nano silika ilavesinin geopolimer harcın performansını artırdığını rapor etmiştir. Çalışmalarında geopolimer harcına nano silika ilave edilmesi durumunda harçların eğilme dayanımlarının oldukça arttığı ve yüksek sıcaklık kürü uygulanmadan bile yüksek sıcaklık altında kür edilen geopolimer harçlara yakın dayanımlar elde edildiği rapor edilmiştir. Ayrıca eklenecek nano silisin optimum oranının %6 olduğu belirtilmiştir.

Al-Majidi vd. (2016), çalışmalarında ortam sıcaklığında kür edilen UK'li geopolimer harçlar üretmiş ve bu harçların özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada UK'nin bir kısmının YFC ile ikame edilmesi sonucunda harçların eğilme ve direkt çekme dayanımlarının arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca YFC ikamesi sayesinde harçlara sıcaklık kürü uygulanmadan da yüksek erken ve nihai dayanım elde edilebileceğini rapor etmiştir.

Nath ve Sarker (2017), UK esaslı GPB'lerin içerisine farklı oranlarda YFC, çimento ve kalsiyum hidroksit ekleyerek bu malzemelerin GPB'ye olan etkisini incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda UK esaslı GPB'lerin eğilme dayanımlılarının YFC ve kalsiyum hidroksit ikamesiyle birlikte arttığını rapor etmiştir. Ayrıca çimentonun UK ile ikamesinin, YFC ve kalsiyum hidroksit ile ikamesine kıyasla GPB'nin çekme dayanımını daha fazla artırdığı rapor edilmiştir.

1.4.5.3. Elastisite Modülü

GPB'de, geopolimer matrisinin GB'ye göre daha yoğun olması nedeniyle, benzer agregalı GB'ye kıyasla GPB'nin elastisite modülünün daha büyük olması beklenir. Ancak, bunu doğrulamak veya aksini kanıtlamak için literatürde daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır (Hardjito ve Rangan, 2005; Sofi vd., 2007 a, b).

Haq vd. (2016), farklı oranlarda alkali aktivatör çözeltisi kullanımının taban külü esaslı GPB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre kullanılan sodyum hidroksit çözeltisinin miktarı ve molaritesi arttıkça GPB'lerin elastisite modüllerinin belirgin bir şekilde arttığı belirtilmiştir.

1.4.5.4. Rötire

Rötire, betonarme yapıların uzun süre hizmet edebilmesi için çok kritik bir parametredir. Bu nedenle, sertleşmiş GPB'nin düşük rötireye sahip olması arzu edilir. Tchakoute vd. (2013), yaptıkları çalışmada volkanik kül esaslı GPB'lerde MK ikamesini araştırmış ve çalışma sonucunda GPB'lerde numune yaşı arttıkça rötrenin arttığını rapor etmişlerdir. Yüksek miktarda MK içeren betonlarda rötrenin azalmasının sebebini MK'den kaynaklı bağlayıcı jelin daha yoğun olması şeklinde açıklamışlardır.

Khater ve Abd El Gawaad (2016), çok duvarlı karbon nanotüplerin YFC ile üretilen GPB'lere olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında YFC'nin ağırlıkça %0.0, 0.1, 0.2, 0.3 ve 4.0'ü karbon nanotüp ile ikame etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda karbon nanotüp kullanımının hem 28 hem de 90 günde geopolimerlerin rötresini azalttığı rapor edilmiştir. Rötiredeki bu azalışın sebebini karbon nanotüplerin geopolimerin mikroyapısında erken yaşlarda C-S-H jelleri oluşumunu hızlandırdığı ve böylece daha yoğun ve boşluksuz bir mikro yapının oluşmasını sağladığı belirtilmiştir.

1.4.6. Geopolimer Betonun Dayanıklılık Özellikleri

1.4.6.1. Kimyasal Dayanıklılık

Yapı elemanları agresif çevresel etkilere maruz kaldığında fiziksel veya kimyasal bozulmalara uğrayarak tasarlananın altında performans sergileyebilirler (Pasupathy vd., 2017).

Malzemelerin dayanıklılığı, bu malzemelerin hizmet süresinin belirlenmesi ve mekanik davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapı elemanlarının dayanıklılığı, GPB'de kullanılan malzemelerin mikro yapısı ile doğrudan ilgilidir (Davidovits, 2008).

GB'nin dayanıklılığının en büyük sorunu, hidrasyon ürünlerinden biri olan kalsiyum oksitin varlığı ile ilişkilidir. Bu nedenle, GPB matrisindeki düşük kalsiyum içeriği nedeniyle GPB'nin kimyasal saldırılara karşı davranışı tamamen farklıdır. GB içerisindeki fazla miktarda bulunan kalsiyum, kimyasal çözeltilerle kolaylıkla reaksiyona girebildiğinden kimyasallara karşı dayanıklılık üzerinde olumsuz etkisi vardır (Assi vd., 2018).

Araştırmacılar, GPB'nin dayanıklılık açısından performansının GB'den daha üstün olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, GPB'nin agresif ortamlardaki davranışını

iyi anlamak için bu malzemelerin dayanıklılığının daha fazla araştırılması gerekmektedir (Hassan vd., 2019).

Albitar vd. (2017a,b) ve Mehta vd. (2017b), %5 sodyum sülfat, %5 sodyum klorür, %5 sodyum sülfat + %3 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfata maruz kalan GPB'nin davranışını araştırmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, GB'nin GPB'ye kıyasla daha az su emdiğini ancak sülfürik aside maruz bırakıldığında GPB'nin GB'den daha az zarar gördüğünü ve sodyum sülfat direncinin de daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir (Albitar vd., 2017a,b; Mehta vd., 2017).

Johansen (2011), UK esaslı GPB'lerin sülfürik ve asetik asit çözeltilerine karşı dayanıklılık özelliklerini incelemiştir (Johansen, 2011). Bu çalışma sonucuna göre NaOH ile aktive edilen betonun Na_2SiO_3 ile aktive edilen betondan daha dayanıklı olduğu rapor edilmiştir. GPB'de asit etkisinden dolayı oluşan hasar, alüminasilikat polimerler jellerinin asit ile depolimerizasyonu sonucunda oluşur. Asidin GPB'ye bir etkisi de potasyum ile sodyum katyonlarının H^+ ve H_3O^+ katyonları ile yer değiştirerek geopolimer jel yapısındaki alüminatların bozulmasıdır. Geopolimerin asetik asitle teması, geopolimer yapısındaki sodyum ve potasyum katyonlarının H_3O^+ veya H^+ katyonlarının yer değiştirmesine neden olur. Böylelikle GPB'nin sülfürik aside maruz kaldığında GPB bağlayıcı jellerinin Si-O-Al bağları bu saldırı nedeniyle zarar görür.

Hardjito vd. (2004), yaptıkları çalışmada kaolin kili ve silis dumanının sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri ile aktive edilerek üretilen GPB'lerin bazı özelliklerini GB ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada numuneler %1 ve %0.5'lik sülfürik aside daldırıldığında, GPB basınç dayanımında önemli bir azalma görüldüğü, bu azalmanın GB'ye göre daha az olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca GPB üzerindeki asit saldırı mekanizmasının asidin gücüne, kullanılan aktivatörün yoğunluğuna, aside maruz kalma süresine ve GPB üretilirken kullanılan malzemelerin fiziksel ve mineralojik yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Johansen (2011), UK esaslı GPB'lerin içerisindeki alüminasilikatlı jellerin sülfat içeren agresif ortamlara karşı beton dayanıklılığında temel etken olduğunu rapor etmiştir. Yaptıkları çalışmada yüksek çözünürlüklü Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen UK esaslı GPB'lerin sülfata karşı dayanıklılığının aynı agregalarla üretilen ve aynı dayanım sınıfındaki geleneksel betondan çok daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

Rangan vd. (2009) yaptıkları çalışmada düşük kalsiyum içeriğine sahip UK esaslı GPB numunelerini %5'lik sodyum sülfat çözeltisinde bekleterek numunelerdeki basınç dayanımı,

kütle ve boy değişimini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda bir yıl boyunca sülfat çözeltisinde bekletilen GPB'lerde bile herhangi bir aşınma, çatlak veya dökülme görülmediğini ve basınç dayanımlarında herhangi bir azalma olmadığını rapor etmiştir.

Rajamane vd. (2012), UK esaslı GPB numunelerini 3 ay boyunca sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinde bekleterek GPB'lerin sülfat direncini belirlemişlerdir. Üç ayın sonunda GPB numunelerindeki ağırlık kaybının çok az olduğu fakat basınç dayanımlarında GB'ye göre belirgin bir azalma görüldüğü rapor edilmiştir. GB'de genleşebilen alçı ve etrenjitten dolayı sülfat saldırısı sonucunda genleşme ve çatlamlar olduğunu, GPB'de ise reaksiyona giremeyen kalsiyum hidroksit ve monosülfoalümina olmamasından dolayı genleşmenin çok daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Davidovits vd. (2014), GPB'lerin alkali silika reaksiyonunu araştırdığı çalışmada ürettikleri GPB'leri hızlı alkali silika reaksiyonu deneyine tabi tutmuş ve GPB'nin GB'ye göre daha az alkali silika reaksiyonu geliştirdiğini ve GPB'nin ASR bakımından güvenle kullanılabileceğini belirtmiştir.

Benzer bir çalışmada ise Li vd. (2005), geopolimer harçların ASR potansiyelini çimentolu harçlarla karşılaştırmıştır. Geopolimer harçların boyutunda %0.02'lik bir değişim görülürken çimentolu harçlarda bu değişim yaklaşık %0.1 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak geopolimer harçların ASR bakımından çimentolu harçlardan çok daha iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir.

1.4.6.2. Yüksek Sıcaklığa Karşı Dayanıklılık

Genellikle GB'nin yüksek sıcaklığa iyi direnç gösterdiği bilinmektedir. Fakat GB'nin 800 °C ile 1000 °C arasında yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra artık basınç dayanımı betonun dayanımının %20 ile %30'u arasında kalabilmektedir. Bunun sebebi betonun içerisindeki temel bağlayıcı jel olan CSH jelinin ve diğer kristal hidratların bu sıcaklık seviyelerinde bozulmasıdır. Beton yanmaya başlayınca betonun en dış katmanındaki sıcak yüzey ile iç bölgesindeki nispeten soğuk bölge birbirinden ayrılma eğilimi göstererek beton yüzeyinde dökülmeler gerçekleşir (Neville, 1997).

Bunun tam aksine GPB'ler yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklıdır. GPB içerisinde kimyasal ve fiziksel olarak bağlanan su, GPB'nin seramiklere benzer şekilde mikroyapıya sahip olması ve mikroyapının içerisinde homojen dağılan nano boşluklar sayesinde

buharlaşıp kolayca hareket ederek GPB'nin alüminasilikat bağlayıcı ağına zarar vermeden betonu terk edebilmektedir (Duxon vd., 2007).

Kong vd. (2007), UK esaslı GP pastalarının 800 °C'ye maruz kaldıktan sonra dayanımlarının %6 arttığını, MK esaslı GP pastaların dayanımının ise %34 oranında azaldığını rapor etmiştir. Sıcaklık artarken UK esaslı GP'lerin yüksek geçirimliliğinden dolayı GP içerisinde buharlaşan suyun bu boşluklar sayesinde ortamı daha rahat terk ettiğini ve GP'ye hasar vermediğini belirtmiştir. Dayanımdaki artışın sebebinin ise reaksiyona giremeyen UK taneciklerinin yüksek sıcaklık ile sinterleşme reaksiyonuna girmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Kong ve Sanjayan (2010), yaptıkları çalışmada UK esaslı GPB'lerde yüksek sıcaklık etkisi sonucunda oluşan dayanım kaybının geopolimer pastası ile agregalar arasındaki ısı genleşme farklılığından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, ısı genleşme katsayısı daha düşük olan iri agrega kullanıldığında GPB hamurunun büzülmesini dengelediği belirtilmiştir.

Mathew ve Joseph (2018), yaptıkları çalışmada sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilen UK bazlı GPB'lerin yüksek sıcaklık altında dayanıklılık özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucuna göre, küp basınç dayanımları 600 °C'ye kadar azalma gösterirken, 600 ile 800 °C sıcaklık arasında azalmamıştır. Bu durum, polimerizasyon reaksiyonuna girmemiş malzemelerin yüksek sıcaklık etkisi ile reaktifleşmesi ve bu nedenle bu sıcaklıkta betonun yük taşıma kapasitesinde azalma oluşmaması şeklinde açıklanmıştır.

Yapılan bir çalışmada farklı dayanım sınıflarına sahip olan GB ve UK esaslı GPB'ler üretilmiş ve bu betonların yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda UK esaslı GPB'ler 850 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında GPB'lerin yüzeylerinde herhangi bir dökülme görülmediği ve GPB'lerin kabuk atma direncinin GB'ye göre çok daha üstün olduğu rapor edilmiştir (Zhao ve Sanjayan, 2011).

Bir başka çalışmada ise alkalilerle aktive edilmiş UK-YFC ve UK-Çimento esaslı GPB'lerin 28 ile 1100 °C sıcaklıklar altındaki davranışları araştırılmıştır. Sonuçlara göre alkalilerle aktive edilen GPB'lerin yüksek sıcaklık altındaki performansları GB'lere kıyasla daha yüksek olarak belirlenmiştir. 1100 °C'de geleneksel beton dayanımının tamamını kaybetmişken, UK-YFC ve UK-Çimento karışımlarıyla üretilen betonların dayanımları sırasıyla 15 MPa ve 5.5 MPa olarak belirlenmiştir. Böylelikle UK-YFC karışımı ile üretilen

GPB'lerin yüksek sıcaklık etkisi altında GB'ye göre çok daha üstün bir dayanıklılığa sahip olduğu rapor edilmiştir (Saavedra ve Gutierrez, 2017).

Fan vd. (2018), potasyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilen UK esaslı harçların mekanik ve ısı özelliklerini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda uygun şekilde kür edilen harçların çok yüksek basınç dayanımlarına çıkabildiği belirtilmiştir. 500 °C sıcaklık etkisi sonrasında yüksek basınç dayanımını gösterdiği, 800 °C sıcaklık sonrasında bile yüzeyde dökülmelerin çok az olduğu rapor edilmiştir.

1.4.7. Geopolimer Betonların Yapılarda Kullanımı

GPB, yüksek dayanım, kimyasal ve ısı direnç özellikleri, hızlı dayanım kazanması, donatı ile kuvvetli aderansı ve endüstriyel yan ürünlerin kullanılması sayesinde ekonomikliğiyle ticari uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir. GPB'nin 24 saat içinde 60 MPa'nın üzerinde basınç dayanımına ulaşabilmesi, sülfat ve asitlere karşı yüksek dirençli olması nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirler.

1.4.7.1. Beton Boru

Sülfürik asit, geleneksel kanalizasyon sistemlerinde, sistemdeki aerobik bakteriler tarafından hidrojen sülfürün parçalanması yoluyla üretilir ve boru şebekelerinin zaman içinde yapısal bozulmasında ve korozyonunda önemli bir faktördür. GB borularda oluşan hasarın yaklaşık %45'i, uzun akış periyotları ve atık suyun yetersiz havalandırılması sonucunda biyojenlerin sülfürik asit saldırısından kaynaklanan korozyona bağlanabilir. GPB'ler ise sülfatlara ve asitlere karşı direnci yüksek olduğundan kanalizasyon borularında güvenle kullanılabilir (Fernández-Jimenez ve Puertas, 2002). Şekil 1.7'de geopolimer beton ile üretilen bir boru örneği görülmektedir.

Betonun dayanıklılığına etki eden faktörlerden biri de betonun uygulanacağı alandaki toprağın asiditesidir. Doğal zemin, içerisindeki okside sülfürlü bileşiklerden dolayı düşük pH seviyesine sahiptir. Düşük pH'a sahip zemin GB'ye rahatlıkla zarar verebilecek bir ortamdır. Asidik sülfatlı zemin, içerisinde doğal olarak oluşan demir sülfürler veya sülfür oksidasyon ürünleri içerir ve GB'ye çok zarar veren düşük pH seviyeli (1 ile 4 arasında) ortam yaratır. Asidik sülfatlı zeminin ürettiği agresif asidik ortamlar, çelik altyapı ve beton

üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir ve yapısal zayıflığa ve nihayetinde yapının yıkılmasına neden olabilir. Geopolimerik malzemelerin aside karşı direnci Portland çimentosuna göre çok daha üstündür. Geopolimer malzemelerin bu yüksek performansı, Portland çimentosuna göre içerisinde kalsiyum içeriğinin çok daha düşük olmasına bağlanmıştır. (Wallah ve Rangan, 2006).



Şekil 1.7. GPB boru örneği (RCPA, 2012)

1.4.7.2. Yapı Elemanları

Wallah ve Rangan (2006), donatılı GPB kirişlerin kırılma modu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Deneysel sonuçlar, donatılı GPB kirişin, çatlak ve kırılma yükü açısından donatılı GB'den daha iyi performans gösterdiğini rapor etmiştir. Zorlu ortamlarda ve büyük işletme yüklerinde malzeme ömrü açısından bakıldığında, GPB'ler yüksek basınç dayanımına sahip oldukları, çok az büzülme ve sünme yaptıkları ve asit ile sülfat gibi zararlı kimyasal saldırılarına karşı mükemmel dayanıklılık gösterdikleri için betonarme yapılarda kullanım için çok uygun yapı malzemeleridir.

Literatürde GPB ile üretilen yapı elemanlarından elde edilen deney sonuçları göz önüne alındığında; GB'ye göre daha ekonomik ve daha yüksek performanslı yapıların inşaa edilebileceği öngörülmektedir. Şekil 1.8, Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'da GPB kullanılarak üretilmiş yapı elemanlarına örnekler verilmiştir.



Şekil 1.8. Geopolimer beton döşeme prekast kiriş (Architecture & Design News, 2013)



Şekil 1.9. Geopolimer prekast tünel elemanları (Glasby vd., 2014)



Şekil 1.10. Prekast geopolimer kutu menfez (Glasby vd., 2014)

1.4.7.3. Isıya Dayanıklı Yol Üst Kaplaması

Geopolimer betonların yüksek ısı kapasitesinden dolayı GPB, ısıya dayanıklı yol kaplama uygulamaları için uygun bir alternatif malzemedir. GPB'ler yüksek sıcaklık altında GB'ye göre daha dayanıklıdır (Provis ve Van Deventer, 2009). Şekil 1.11'de apronu GPB ile üretilen bir havalimanının fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Brisbane Batı Wellcamp Havalimanı, Toowoomba, Queensland, Avustralya (URL-6, 2023)

1.4.7.4. Zehirli Metallerin Bertarafı

GPB'ler yoğun mikroyapıya sahip olduğu için zehirli metallerin bertarafında yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptir. GPB'lerin düşük geçirgenliği, zehirli metallerin bertarafı amacıyla kurulacak sistemlerde kullanılabilmesi için önemli avantajdır (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 1997).

Geopolimer ağı zehirli metalleri hem içindeki yoğun bağlayıcı matris arasındaki fiziksel boşluklara hapsederek hem de atomik çerçeve yapısındaki anyonların kimyasal olarak dengeleme özeliği sayesinde enkapsüle eder (Fernandez-Jimenez vd., 2006).

Luna vd. (2007), tarafından yapılan çalışmada, GPB'nin sızdırma karakterleri test edilen tüm numunelerin zehirli metalleri (Pb, Cd, Cr, Zn) mükemmel bir şekilde bertaraf ettiğini göstermiştir. Şekil 1.12'de zehirli ve radyoaktif atıkların GPB kullanılarak bertaraf edilmesine bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Alman GEOPOLYTECH Technology firmasının uyguladığı zehirli ve radyoaktif atıkların geopolimer beton kullanılarak bertarafı (URL-7, 2023)

1.4.7.5. Su Altı Uygulamaları

GPB'nin sülfat direnci karakteristiği, onu su altı ve deniz uygulamaları için alternatif bir seçenek yapmaktadır. Alkalilerle aktive edilen metakaolin esaslı harç ve betonlar çeşitli agresif çözeltilere (deiyonize su, deniz suyu, sodyum sülfat çözeltisi ve sülfürik asit) batırıldığında çok stabil kalabilmektedir (García-Lodeiro vd., 2007).

1.4.8. GDA Kullanılarak Üretilen GPB'ler ve Literatür Taraması

Birçok farklı endüstriden kaynaklı atık ürünler; çevre kirliliğini, inşaat sektöründeki enerji sarfiyatını ve sera gazı etkisini azaltmak için beton üretiminde puzolanik madde veya agrega olarak geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu endüstriyel atık maddelerin hacim olarak en büyük payını oluşturan inşaat yapım ve yıkım atıklarının bertarafı birçok ülke için büyük bir önem arz etmektedir. Son yıllarda, inşaat molozlarının geri dönüştürülerek betonda agrega olarak kullanılması ile ilgili birçok araştırma yapılmış ve bu konuda çok yol kat edilmiştir. GB'ye alternatif olarak geliştirilen GPB'lerin üretiminde de GDA'ların kullanımı hem birikmiş inşaat atıklarını hem de CO₂ emisyonlarını azaltabilir. GDA ve geopolimerin birlikte kullanımı çevreyi koruması ve kaynakların tasarrufu açısından önemli bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu konuda yapılan çeşitli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1.4.8.1. İşlenebilirlik

GDA'ların yüksek porozitesi sebebiyle GB üretiminde GDA kullanılması durumunda GDA, betonun karma suyunun bir kısmını emerek betonun işlenebilirliğini azaltır. Tıpkı GB'de olduğu gibi GPB'de GDA kullanımı GPB'nin üretiminde kullanılan su ve alkali çözeltiyi emerek karışımın işlenebilirliğini düşürmektedir. Bu durumun önüne geçmek için kullanılan GDA'nın beton dökümünden önce doymun kuru yüzey haline getirilmesi önerilmektedir (Hu vd., 2019; Behera vd., 2014).

Nuaklong vd. (2018), benzer durumu UK ile üretilen GPB'lerde de gözlemlemişler, ayrıca GPB üretiminde kullanılan GDA'ların yüzeylerinin pürüzlülüğünden dolayı betonun işlenebilirliğinin azaldığını belirtmişlerdir (Nuaklong vd., 2018).

Shaikh (2016)'in yapmış olduğu çalışmasında GPB üretiminde kullanılan doğal agreganın tamamının GDA ile ikame edilmesi durumunda taze GPB'nin işlenebilirliğinin dramatik bir şekilde azaldığı ve GPB'nin çökme değerinin 125'ten 60 mm'ye düştüğü rapor edilmiştir.

YFC esaslı GPB üretilerek yapılan bir çalışmada da doğal agregaların tamamının GDA ile ikame edilmesi durumunda çökme değerinin 117 mm'den 106 mm'ye düştüğü rapor edilmiştir ve GDA'nın pürüzlü yapısının GPB'nin işlenebilirliğini belirgin bir şekilde azalttığı belirtilmiştir (Parthiban ve Saravana Raja Mohan, 2017).

Literatürdeki bazı çalışmalarda ise GPB üretiminde GDA kullanımının taze haldeki GPB'nin işlenebilirliğine belirgin bir etkisinin olmadığı rapor edilmiştir. Örneğin bir çalışmada GDA kullanımının GPB'nin işlenebilirliğine negatif etki etmediğini, sadece GDA'nın doğal agregaya göre doygun kuru yüzey hale gelmesi için daha fazla suya ihtiyaç olduğunu, GDA'nın yeteri kadar suya doyurulduğunda doğal agregalı betona kıyasla benzer işlenebilirlik özelliklerine sahip olduğu rapor edilmiştir (Bhardwaj ve Kumar, 2021).

Waqas vd. (2021)'nin yaptığı bir çalışmada C sınıfı UK ile üretilen GPB'lerde GDA ikame oranı arttıkça GPB'nin daha çok işlenebilir hale geldiği, Nuaklong vd. (2020)'nin yaptığı çalışmada ise GDA'nın GPB'nin çökme değerini normal agregalı GPB'ye göre %15 artırdığı rapor edilmiştir.

Benzer bir çalışmada YFC ve UK kombinasyonu ile üretilen GPB'deki doğal agregaların tamamının GDA ile ikame edilmesi halinde taze haldeki GPB'nin çökme değerinin %10 arttığı rapor edilmiştir (Xie vd., 2019).

Bir başka çalışmada ise GPB üretiminde GDA kullanımının taze GPB'nin vizkozitesini artırdığı ve taze betonda ayrışmaya sebep olduğu rapor edilmiştir (Ayub vd., 2021).

Metakaolinin C sınıfı uçucu kül ile ikame edilerek kullanıldığı bir çalışmada GDA'lı GPB'lerin çökme değerlerinin normal agregalı GPB'ye göre yaklaşık %25 daha fazla olduğu rapor edilmiştir. Uçucu külün küresel yapısından kaynaklanan yüksek işlenebilirlik, köşeli ve çok ince taneli yapıda olan metakaolin kullanımı neticesinde azalmıştır (Nuaklong vd., 2018).

Lim ve Pham (2021), ince öğütülmüş YFC tanecikleri GPB'ye eklendiğinde bu ince taneciklerin GDA etrafına yapışarak GDA'nın pürüzlülüğünü azalttığını ve GPB'nin işlenebilirliğini artırdığını rapor etmişlerdir.

Xie vd. (2019) ise GDA kullanımının GPB'lerin çökmesini artırdığını ve aynı su/bağlayıcı oranı ile üretilen geleneksel betondan daha yüksek çökme değeri sağladığını rapor etmiştir. GPB üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan YFC'nin dozajının artması ve su/bağlayıcı oranının azaltılmasının GPB'nin işlenebilirliğini azalttığı belirtilmiştir. Bunun sebebini YFC'nin köşeli ve nispeten iri taneli yapıya sahip olması ve yüksek kalsiyum içeriğinden kaynaklı hızlı reaksiyona girmesi olarak açıklamışlardır.

GDA'lı GPB'lerin işlenebilirliğine etki eden bir etken de alkali çözeltisinin bağlayıcı maddeye oranıdır. Bu oran arttıkça tıpkı GB'deki su/çimento oranının artması gibi GPB'nin de işlenebilirliği artmaktadır. Örneğin UK ile üretilen GDA'lı GPB'lerin alkali çözelti/UK

oranı 0.4'ten 0.5'e arttığında GPB'nin çökme değerinin %10 arttığı fakat dayanımın yaklaşık %9 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Le ve Bui., 2021).

Benzer bir çalışmada ise alkali çözeltisi/UK oranı 0.4, 0.45 ve 0.5 olan GDA'lı GPB'lerin çökme değerlerinin sırasıyla 16, 18 ve 20 mm olacak şekilde arttığı rapor edilmiştir (Le vd., 2021).

Xie vd. (2019)'nin yaptığı bir çalışmada ise YFC ve UK karışımı ile üretilen GDA'lı GPB'lerin alkali çözelti/bağlayıcı oranının 0.3'ten 0.5'e çıkması durumunda işlenebilirliğin yaklaşık %48 oranında arttığı rapor edilmiştir.

GDA'lı GPB üretiminde işlenebilirliğe etki eden bir faktör de kullanılan alkali çözeltinin SS/SH oranıdır. SS/SH oranı arttıkça GPB'nin vizkozitesi artarak işlenebilirliği azalmaktadır. Ayrıca kullanılan SH çözeltisinin molaritesinin artması GPB'nin çökme değerini artırmaktadır (Salihi ve Younis, 2021). Bunun sebebi çözeltinin yükselen molaritesi sayesinde bağlayıcı maddelerin içerisindeki alüminli ve silisli bileşenlerin geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmasıdır (Nuaklong vd., 2016).

Yapılan bir çalışmada 8, 10 ve 12 molar SH çözeltisi ile üretilen GDA'lı GPB'lerin çökme yayılma değerleri sırasıyla 750, 740 ve 710 mm olarak belirlenmiş ve artan molarite ile birlikte işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür (Salihi ve Younis, 2021).

1.4.8.2. Priz Süresi, Ayırışma, Kusma

GPB'lerde taze betonun priz süresi; bağlayıcı/agrega oranına, SH/SS oranına ve agrega özelliklerine göre değiştiği, GDA miktarı arttıkça priz süresinin azaldığı rapor edilmiştir (Posi vd., 2016).

Literatürdeki çalışmalara göre GDA kullanılarak üretilen GPB'lerin priz süreleri normal agregalı GPB'lere göre daha kısadır. GDA, yapısındaki gözeneklerden dolayı normal agregadan daha fazla su emdiği için beton karışımı sırasında GDA'lar daha fazla su ve çözelti emmektedir. Ayrıca GDA'nın üzerindeki zayıf eski harç tabakası beton karışımı sırasında kırılarak beton içerisinde yeni kuru yüzeyler oluşturmaktadır. Alkali çözeltiler ve su, bu yeni oluşan kuru yüzeyler tarafından emilmektedir (Ren ve Zhang, 2016).

GDA kullanılarak üretilen GPB'lerin priz süreleri beton üretiminde kullanılan GDA'nın doymuş kuru yüzey haline getirilmesiyle yapısındaki serbest suyun artırılması ile önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir (Hu vd., 2019).

Xie vd. (2019), yaptıkları çalışmada GPB üretiminde uçucu külün bir kısmının metakaolin ile ikame edilmesinin betonun priz süresini yaklaşık %25 oranında azalttığını rapor etmişlerdir.

Priz süresinin azalmasındaki bir etken de GDA'ların beton üretimi sırasında zayıf bölgelerinden parçalanarak yeni ve kuru yüzeyler oluşturarak daha fazla su emmesine ve karışımın viskozitesinin artmasına sebep olmasıdır (Ren ve Zhang, 2016).

Hu vd. (2019), GDA içeren GPB'lerin karıştırılması, dökümü ve yerine yerleştirilme sürecinde herhangi bir ayrışma veya su kusmanının görülmediğini rapor etmiştir.

GPB üretiminde ince öğütülmüş GDA kullanılması durumunda ince öğütülen GDA'nın yapısındaki yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı GPB'nin priz süresi kısalmır. Karıştırma sırasında ince öğütülen GDA'nın içerisindeki kalsiyumlu maddeler alkali çözeltisi yardımıyla yeni CSH ürünleri oluşturarak taze GPB'nin işlenebilirliğini azaltırlar ve bu reaksiyon sırasında ortam sıcaklığının artması nedeniyle geopolimerizasyon reaksiyonlarını da hızlandırarak priz süresini kısaltırlar. Ayrıca GDA'lı GPB'lerde bağlayıcı/agrega oranının artması priz süresini uzatmaktadır (Ren ve Zhang, 2019).

1.4.8.3. Yoğunluk

GPB üretiminde GDA kullanımı genel olarak tıpkı GB'de olduğu gibi GDA'nın düşük yoğunluğundan dolayı normal agregalı GPB'ye göre daha düşüktür. GDA'lı GPB'lerin yoğunluğu, kullanılan GDA'nın özelliklerine bağlı olarak NA kullanılarak üretilen GPB'lerden yaklaşık olarak %4 ile %10 arasında daha düşüktür. Bu azalmanın sebebi GDA'nın yoğunluğunun normal agregaya kıyasla daha düşük olmasıdır. (Hu vd., 2019; Arora vd., 2021).

Sata ve Chindaprasirt (2020), GPB üretiminde GDA kullanılması durumunda elde edilecek betonun yoğunluğunun daha düşük olması nedeniyle düşük ağırlık ve yüksek ısı iletkenlik gerektiren durumlarda ısı yalıtımı amacıyla kullanılabileceği belirtmişlerdir.

1.4.8.4. Basınç Dayanımı

GDA içeren GPB'lerin basınç dayanımları tıpkı GB'de olduğu gibi doğal agregalı betonlara göre daha düşüktür. Bunun sebebi GDA'nın üretimi, kırılıp elenmesi sırasında

içerisinde oluşan çatlaklar, bünyesinde bulunan eski harç fazının boşluklu yapısından dolayı doğal agregaya kıyasla daha düşük mekanik özelliklere ve daha yüksek su emme özelliklerine sahip olmasıdır. Dayanımdaki bu etkinin ana faktörü GDA içindeki eski harç ve yeni bağlayıcı jel arasındaki zayıf AGB'dir (Nuaklong vd., 2018; Ganesh ve Muthukannan, 2019; Nuaklong vd., 2020).

Ayub vd. (2021)'nin yaptığı bir çalışmada UK ile üretilen GPB'nin iri agregasının %30'u GDA ile ikame edilmiş ve bu betonların basınç dayanımının normal agregalı betona göre %13 azaldığı rapor edilmiştir.

Srinivas vd. (2019), bağlayıcı olarak UK ve YFC karışımı kullanılarak üretilen GPB'lerde normal iri agreganın %30'unun GDA ile ikame edilmesi durumunda betonun basınç dayanımında hafif bir azalma olduğu ve %30'dan daha fazla ikame oranlarında dayanımın giderek azaldığı rapor edilmiştir.

Xie vd. (2019)'nin yaptığı benzer bir çalışmada ise UK ve YFC ile üretilen GPB'nin iri agregasının tamamının GDA ile ikame edilmesi durumunda betonun 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımlarının %12 ile %18 oranında azaldığını belirtmiştir.

Nuaklong vd. (2020)'nin yaptığı çalışmada ise kalker esaslı doğal iri agreganın tamamının GDA ile ikame edildiği durumda UK esaslı GPB'nin basınç dayanımının %9 ile %13 oranında azaldığı ve bu dayanımdaki düşüşün GDA'nın boşluklu yapısından kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Bir çalışmada ise GPB'de GDA kullanılması durumunda betonun basınç dayanımının azalmadığı rapor edilmiştir. Örneğin bir çalışmada normal agregalı GPB'nin 28 günlük basınç dayanımı 24.27 MPa olarak belirlenmişken; %30, %50, %70 ve %100 GDA ikameli GPB'nin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 24.51, 24.91 ve 24.24 ve 23.58 MPa olarak belirlenmiştir (Parthiban vd., 2017).

Sasuni vd. (2016)'nin yaptığı çalışmada ise bağlayıcı olarak UK ve SD karışımının kullanıldığı GPB'ler üretilmiş ve GDA normal agregayla farklı oranlarda ikame edilmiştir. Çalışmanın sonucunda GDA'nın %40 ile %50 arasında ikame edilmesinin UK ve SD ile üretilen GPB'ler için en uygun ikame oranları olduğu rapor edilmiş ve bu GDA'lı betonların dayanımlarının GDA ikame edilmesine rağmen 50 MPa'nın üzerinde olduğu rapor edilmiştir.

Bazı çalışmalarda, GPB üretiminde kullanılan iri agreganın tamamı GDA ile ikame edilmiş ve bu GPB'nin basınç dayanımında normal agregalı GPB'ye göre bir miktar artış gözlenmiştir. Bu artışın sebebinin yüksek kalitede GDA kullanımından kaynaklandığı rapor

edilmiştir. Yüksek kalitede bir betonun geri dönüştürülmesiyle elde edilen kaliteli GDA kullanılması durumunda GDA'lı GPB'nin dayanımının azalmayabileceği araştırmacılarca belirtilmiştir (Tran, 2020; Krishnan ve Purushothaman, 2017).

Ledesma vd. (2014)'nin yaptığı çalışmada ise ince öğütülmüş GDA'lar normal agregalarla %10 oranında ikame edilmiş ve GPB'nin basınç dayanımının arttığı rapor edilmiştir. Bu artışın sebebi çok ince öğütülen GDA'ların filler etkisi ile boşlukları fiziksel olarak kapatarak daha yoğun bir matrise sebep olması şeklinde açıklanmıştır.

Fakat daha yüksek oranda ince GDA'nın ikame edilmesi durumunda GPB'nin basınç dayanımının giderek düştüğü rapor edilmiştir. Bunun sebebi çok ince öğütülen GDA'nın su emmesinin çok yüksek olmasından dolayı geopolimerizasyon reaksiyonu için gerekli alkali aktivatörün bir kısmının ince öğütülen GDA tarafından emilmesi ve böylece reaksiyonun yavaşlaması ile açıklanmıştır. Örneğin Tran (2020)'in yaptığı çalışmada normal ince agregaların %25, %50, %75 ve %100'ü ince öğütülmüş GDA ile ikame edilen GPB'lerin dayanımlarında azalmaya sebep olmuştur. Optimum ince GDA ikame oranının %25 olduğu, bu ikame oranında betonun basınç dayanımında sadece %2'lik bir azalma olduğu rapor edilmiştir.

Benzer bir çalışmada ise ince öğütülmüş GDA'nın normal agregayla %25 oranında ikame edilmesi durumunda YFC ve UK ile üretilen GPB'lerin dayanımlarının yaklaşık %5 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Saha vd., 2020).

Literatürdeki çalışmalar GDA kullanılarak üretilen GPB'lerin dayanımlarının GPB üretimi sırasında kullanılan UK ve YFC gibi puzolanların bir miktar çimento ile ikame edilmesiyle artırılabilirdiğini göstermiştir. Bu dayanım artışının sebebi, çimento ikamesiyle ortamda bulunan kalsiyum iyonlarının miktarındaki artış sonucunda kalsiyumun hızlı bir şekilde reaksiyona girip CSH jelleri oluşturması ve bu jellerin AGB'deki kusurları doldurmasıdır (Xie vd., 2019a, b).

Yapılan bir çalışmada, uçucu kül esaslı GDA'lı GPB'lerin GDA'dan kaynaklı performans azalmasını gidermek için uçucu külün bir kısmını çimento ile ikame edilmiştir. Çimento ikame oranı %15'e kadar artırıldığında GDA'lı GPB'nin dayanımının normal agregalı GPB'ye yaklaştığı rapor edilmiştir (Nuaklong vd., 2018).

GDA kullanılarak üretilen GPB'lerde, GDA'nın üzerine yapışık olan eski harç tabakasının boşluklu yapısı GPB üretiminde kullanılan alkali çözeltilerini emip GDA'nın içerisindeki zayıf AGB'yi doldurarak daha sağlam bir agrega yapısı oluşturduğu ve GPB'de GDA kullanımının geleneksel betona göre daha yüksek performans verdiği çeşitli

araştırmacılarca rapor edilmiştir (Pappu vd., 2007; Saraswathy ve Song, 2007; Villoria Sáez ve Osmani, 2019)

1.4.8.5. Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımları

Betonun içindeki GDA miktarı arttıkça betonun eğilme ve yarmada çekme dayanımı düşmektedir. Bunun sebebi GDA ile yeni GP bağlayıcı jel fazının arasındaki düşük aderanstır. Çoğunlukla GDA üzerindeki eski harç tabakası ile yeni GP bağlayıcı jel fazı arasındaki güçsüz arayüzeyden kırılma yaşanır.

Akbarnezhad vd. (2015)'nin yaptığı çalışmanın sonucunda UK esaslı GPB'lerin normal iri agregaları farklı oranlarda GDA'larla ikame edilmiş ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda %50 ve %100 GDA ikameli GPB'lerin eğilme dayanımları sırasıyla %8.2 ve %15.2 oranında azalmıştır. %20 oranında GDA ikamesinde ise normal agregalı betona göre eğilme dayanımında neredeyse bir değişiklik olmamıştır.

Mesgari vd. (2020)'nin yaptıkları çalışmada F tipi UK ile üretilen GPB'ların normal iri agregaları GDA'lar ile %0, %20, %50 ve %100 oranında ikame edilerek GPB'lerin mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. GPB'nin eğilme dayanımı %20 GDA ikamesinde %3 oranında azalırken %100 GDA ikamesinde %20 oranında azalmıştır.

Nuaklong vd. (2021)'nin yaptığı çalışmada UK esaslı GPB üretiminde doğal iri agreganın tamamının GDA ile ikame edilmesi durumunda GPB'nin çekme ve eğilme dayanımının sırasıyla %27 ve %36 oranında azaldığı rapor edilmiştir.

GDA ikamesinin GPB'nin eğilme dayanımını azaltıcı etkisi, GPB üretiminde kullanılan puzolanik maddelerin birbirine oranları değiştirilerek giderilebilmektedir. Örneğin bir çalışmada UK ile üretilen GPB'de UK'nin %30'unun MK ile ikamesi ile GPB'nin yarmada çekme ile eğilme dayanımlarının sırasıyla %30 ve %22 oranında artırılabilirdiği rapor edilmiştir. Bu artışın sebebi MK taneciklerinin geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırarak daha yoğun bir matris ve daha yoğun mikroyapı oluşturmasıdır (Nuaklong vd., 2018).

Hu vd. (2019), UK ile üretilen GPB'lerde GDA ikame oranının %50 ve %100 olması durumunda eğilme dayanımının NA'lı GPB'ye göre sırasıyla yaklaşık % 24 ve %37 oranında azaldığını rapor etmiştir. UK'nin bir kısmının YFC ile ikame edilmesi durumunda azalma oranının %13 ve %26 olduğunu belirtmişlerdir.

Bazı araştırmacılar, GDA ile üretilen GPB’lerde kür sıcaklığı ve süresi arttıkça eğilme dayanımlarında belirgin bir artış görüldüğünü belirtmişlerdir (Zhu vd., 2020; Xie vd., 2019a,b).

1.4.8.6. Aşınma Dayanımı

Literatüre göre betonun aşınma dayanımı, agrega-bağlayıcı jel arasındaki arayüzey bölgesinin yapısına ve kullanılan agreganın kalitesine bağlıdır. GDA kullanılarak üretilen GPB’lerin aşınma direncinin NA’lı GPB’lere göre daha düşük olduğu ve GPB’lerin aşınma dayanımlarının GPB üretiminde kullanılan sodyum hidroksit çözeltisinin molaritesine bağlı olduğu rapor edilmiştir (Nuaklong vd., 2016).

GDA ile üretilen GPB’lerin aşınma dayanımını iyileştirmek için geopolimer matrisinin dayanımını artırmak amacıyla GPB’nin bağlayıcılarını çimento, metakaolin veya YFC gibi maddelerle belli oranlarda ikame ederek GDA’lı GPB’nin aşınma dayanımı artırılabilir (Nuaklong vd., 2018, 2020).

Nuaklong vd. (2018), GPB üretiminde kullanılan uçucu külün %10 ve %15 oranında çimento ile ikame edilmesi durumunda GDA’lı GPB’nin aşınma kaybının sırasıyla %15 ve %36 azaldığını rapor etmiştir.

Benzer şekilde uçucu kül ile üretilen GDA’lı GPB’de uçucu külün bir kısmının metakaolin ile %30’a kadar ikame edilmesinin GPB’nin aşınma direncini artırdığı rapor edilmiştir (Nuaklong vd., 2018).

Arora vd. (2021)’nin yaptığı bir çalışmada farklı molaritelerde SH çözeltileri kullanılarak GDA’lı GPB’lerin özelliklerini araştırmıştır. Yapılan bu çalışmada doğal agrega olarak kalker esaslı doğal agrega kullanılmış, bu agreganın tamamı GDA ile ikame edilerek GDA’lı GPB’ler üretilmiştir. 8, 12 ve 16 molarlık çözeltilerle üretilen GPB’lerin aşınma kayıpları GDA kullanımı sonucunda sırasıyla %17, %21 ve %32 oranında artmıştır. Sonuç olarak doğal agregalı GPB’nin aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğu, GDA’lı GPB’nin özellikle içerdiği pasta fazının aşınmaya karşı dayanıksız olduğu ve yüksek molariteli SH çözeltisi kullanımının aşınma kayıplarını artırdığı rapor edilmiştir.

1.4.8.7. Elastisite Modülü

GPB’de matris fazı aynı dayanım seviyesindeki GB’ye göre daha kuvvetli ve boşluksuzdur. Bazı araştırmacılar, geopolimerizasyon neticesinde oluşan jeller daha uzun zincirli ve daha yoğun olduğu için aynı tip iri agrega kullanılarak üretilen GB ile GPB karşılaştırıldığında GPB’nin elastisite modülünün özellikle dayanım sınıfı arttıkça geleneksel çimentolu betona göre daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Fakat literatürde bu konuda yeterince araştırma olmadığından literatürde kesin bir fikir birliği yoktur (Hardjito ve Rangan, 2005; Hardjito ve Rangan, 2007a,b; Sofi vd., 2007).

GDA’nın rijitliği yani şekil değiştirme direnci normal agregalara göre daha düşüktür. GDA’nın kırılma ve elenme sürecinde içerisinde oluşan mikro çatlaklardan dolayı GDA kullanılarak üretilen GPB’lerin elastisite modülleri normal agrega kullanılarak üretilen GPB’lere kıyasla daha düşüktür (Mohammadinia vd., 2016).

Hu vd. (2016), %50 ve %100 oranında GDA kullanılarak üretilen GPB’lerin elastisite modüllerinin normal agregalı betona göre yaklaşık olarak %20 ve %40 oranında düşük olduğunu rapor etmiştir.

Xie vd. (2019), bağlayıcı olarak farklı oranlarda YFC ve MK karışımları kullanılarak üretilen GDA’lı GPB’lerin özelliklerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucuna göre üretilen GPB’lerde GDA ikame oranı arttıkça elastisite modüllerinin giderek azaldığını ve minimum GDA ikame oranında bile normal agregalı GPB’lere kıyasla daha düşük elastisite modülü elde edildiği rapor edilmiştir.

Akbarnezhad vd. (2015), yaptıkları çalışmalarında normal iri agreganın %20’sinin GDA ile ikame edilmesi durumunda GDA’lı GPB’nin elastisite modülünde yaklaşık %9 oranında artış olduğunu, %50 ve %100 iri GDA ikamesinde ise sırasıyla yaklaşık %3 ve %11 oranında azalma görüldüğünü rapor etmişlerdir. Bu çalışmanın sonucuna göre belli bir orandan daha fazla GDA ikame edilmesi durumunda GPB’nin elastisite modülünün azaldığı ve en uygun GDA ikame oranının %20 civarı olduğu rapor edilmiştir.

Mesgari vd. (2020)’nin yaptıkları çalışmada F tipi UK ile üretilen GPB’lerin normal iri agregaları GDA’lar ile %0, 20, 50 ve 100 oranında ikame edilerek GPB’lerin mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. GDA ikame oranı arttıkça elastisite modülünde azalma olduğu, %20, %50 ve %100 oranında GDA ikamesinde elastisite modülünün sırasıyla % 6.6, %10.4 ve %21 oranlarında azaldığı rapor edilmiştir.

1.4.8.8. Su Emme ve Kılcallık

Tıpkı GB’de olduğu gibi GPB’lerin de su emme ve kılcal su emme değerleri GDA kullanılması durumunda artmaktadır. İnşaat atıklarından temin edilen GDA ile üretilen GPB’lerin geçirimsizliklerinin normal agregayla üretilen GPB’lere kıyasla daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bunun sebebinin molozlardan elde edilen malzemelerin hem üretimi hem de kırılıp elenmesi sırasında agregaların üzerinde birçok çatlak ve kusur oluşmasıdır. Bir diğer sebep ise GDA’nın üzerine yapışmış eski harç tabakasının varlığıdır. Sonuç olarak GDA’ların yapısı normal agregalara göre daha zayıftır ve GDA’lı GPB’ler normal agregalı GPB’lere kıyasla daha geçirgendir (Elchalakani ve Elgaali, 2012).

Waqas vd. (2021)’nin yaptığı bir çalışmada GPB’de doğal agregaların tamamı GDA ile ikame edilmiş ve GDA’lı GPB’nin ağırlıkça su emme değeri normal agregalı betona göre %29 oranında artmıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak GDA’nın içerisindeki boşluklu yapıdan dolayı GPB’nin su emme değerlerinin dramatik bir şekilde arttığı rapor edilmiştir.

Topal vd. (2021), YFC ile üretilen GPB’nin doğal agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında GDA ile ikame edilmesi durumunda GPB’nin hem kılcallığının hem de ağırlıkça su emmesinin GDA ikame oranı ile doğru orantılı bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Nuaklong vd. (2019)’nin yaptığı çalışmada ise ince öğütülmüş GDA’nın sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 oranında doğal ince agregayla ikame edilmesi durumunda GPB’nin su emme değerlerinin sırasıyla %11.1, %11.3, %12.6, ve %13.4 oranında arttığı rapor edilmiştir.

Bir başka çalışmada ise GDA içeren kendiliğinden yerleşen GPB’nin özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada iri normal agregaların %30’u GDA ile ikame edilerek kendiliğinden yerleşen GDA’lı GPB’ler üretilmiştir. GPB’lerin 28, 90, 180 ve 720 gün sonundaki basınçlı su işleme derinlikleri karşılaştırıldığında normal agregalı betona göre tüm yaşlarda yaklaşık olarak %15 ile %23 arasında daha fazla su emdiği görülmüştür (Ayub vd., 2021).

Araştırmacılar tarafından GPB üretiminde kullanılan bağlayıcıların özelliklerinin de geçirimsizlik özellikleri üzerinde etkili olduğu rapor edilmiştir. Jin vd. (2019), UK ile üretilen GPB’lerde bağlayıcı olarak kullanılan UK’nin YFC ile ikame edilmesi durumunda daha yoğun CASH jelleri oluşumu sonucunda GPB’nin su emme ve kılcal su emme değerlerinde azalma olduğunu belirtmiştir.

Nuaklong vd. (2018), UK ile üretilen GPB’lerde bağayıcı olarak çimento ikame edildiğinde geçirimsiz CASH jeli oluştuğunu ve bu jellerin su emme hızını %30 kadar azaltabildiğini rapor etmiştir. Benzer durum MK kullanımında da görülmüştür. İnce taneli MK taneleri GDA üzerindeki eski çatlaklara, boşluklara ve zayıf AGB’ye nüfuz ederek kılcal su emebilecek boşlukları doldurarak GPB’nin su emme özelliklerini belirgin bir şekilde iyileştirdiği rapor edilmiştir.

1.4.8.9. Klorür İyonu Geçirimsizliği

GPB’de GDA içeriği arttıkça ASTM C1202’ye göre yapılan hızlı klorür geçirimsizliği deneyine göre GPB’lerin klorür geçirimsizliği artmaktadır. Bunun arkasındaki sebep, GDA’nın boşluklu yapısı ve yüksek su emmesinin yanında GDA’nın üzerine yapışmış olan boşluklu eski harcın varlığından dolayı süreklilik gösteren boşlukların içerisinde klorür iyonlarının daha fazla geçebilmesidir. GDA üzerindeki harç tabakasının içerisinde bulunan anhidrate trikalsiyum alüminat (C_3A) ile klorür iyonlarının arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda kalsiyum kloroalüminat hidrat oluşur ve bunun sonucunda klorür iyonlarının mikroyapıdaki boşlukların sızma hızı artar (Thomas vd., 2012; Yuan vd., 2014; Nuaklong vd., 2020).

Nuaklong vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada GDA ikameli YFC esaslı GPB’ler üretilmiş ve üretilen GPB’lerde YFC’nin %5 ile %15’i çimento ile ikame edilerek GDA’lı GPB’lerin klorür geçirimsizlerinin azaltılabildiği rapor edilmiştir.

Koushkbaghi vd. (2019), farklı SS/SH oranlarına sahip alkali aktivatörler kullanılarak üretilen MK esaslı GPB’lerin normal iri agregaları farklı oranlarda GDA ile ikame edilerek bu betonların dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre kullanılan alkali çözeltilerin birbirine oranından bağımsız olarak GDA ikame oranı arttıkça GPB’lerin klorür iyon geçirimsizliği artmıştır. GPB’lerde GDA içermeyen referans betonunun geçirimsizliği ASTM C1202’ye göre düşük sınıftayken GDA ikamesiyle betonların klorür geçirimsizlik sınıfları bir üst sınıf olan orta geçirim seviyesine yükselmiştir. Üretilen GPB’lerde SS/SH oranı arttıkça GPB’lerin klorür geçirimsizlikleri azalmıştır. Bu durum GPB üretiminde kullanılan alkali çözeltinin SS/SH oranı arttıkça GPB’nin porozitesinin azaldığı ve böylece klorür iyonlarının betona girişinin zorlaştığı şeklinde açıklanmıştır. Böylelikle azalan klorür geçirimsizliği neticesinde bu betonun içerisindeki donatının daha zor paslanacağı sonucuna varılmıştır.

Nuaklong vd. (2018), yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak metakaolin ve yüksek kalsiyumlu UK kullanılarak ürettikleri GPB'lerin normal iri agregalarını GDA'larla ikame etmiş ve bu betonların farklı özelliklerini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda %3'lük NaCl çözeltisinde 120 gün bekletilen GPB'lerin klorür işleme derinliklerinin GDA ikame oranı arttıkça arttığı rapor edilmiştir. Bu çalışmanın bir dikkat çekici sonucu da 30. ve 60. günlerde GDA'lı betonların daha az klorür geçirdiği fakat ilerleyen deney sürelerinde GDA'lı betonların klorür geçirimsizliklerinin arttığı rapor edilmiştir. Bunun sebebi GDA bünyesindeki eski harç tabakasının içerisinde olan hidrate olmamış trikalsiyum alüminatın (C_3A) kalsiyum kloroalümina hidrat veya Friedel tuzunun oluşturması ve böylece boşluklu yapının azalması sonucunda klorür iyonlarının daha yavaş ilerlemesi şeklinde açıklanmıştır (Zhu vd., 2012; Thomas vd., 2012).

Saloni vd. (2021)'nin GDA'lı GPB'lerin özelliklerini araştırdığı çalışmada bağlayıcı olarak F tipi UK kullanılarak üretilen GPB'lerin normal iri agregalarını farklı oranlarda GDA ile ikame ederek GDA ikamesinin betonun özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonucuna göre GDA kullanılması durumunda hem 28 hem de 90 günlük GPB'lerin klorür geçirimsizlikleri artmıştır. 28 ve 90 günlük değerler karşılaştırıldığında, 90 günlük GPB'lerin klorür geçirim değerleri 28 günlük betonlara kıyasla azalmıştır.

Bazı araştırmacılar GDA kullanımı durumunda GPB'nin klorür iyon geçirimsizliğinin kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını gözlemlemişlerdir. Bir çalışmada GDA kullanılarak üretilen GPB'lerin klorür iyon geçirimsizliği, kalker agregası ile üretilen normal agregalı GPB ile karşılaştırılmıştır. GPB'lerin uzun dönemde klorür geçirimsizliklerinin araştırıldığı bu çalışmada GDA ile üretilen GPB'lerin klorür geçirimsizliklerinin ilgili standartlara göre yapılarda kullanılabilir değerler içinde kaldığı rapor edilmiştir (Elchalakani ve Elgaali, 2012).

Alabi ve Mahachi (2021)'nin yaptığı bir çalışmada ise tamamen GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'lerin klorür geçirim değerlerinin Basra Körfezi gibi klorür etkisinin belirgin olduğu bölgelerde bile kullanılabilir seviyelerde olduğunu rapor etmiştir.

1.4.8.10. Asit Direnci

Çimentonun kalsiyum esaslı reaksiyon ürünleri ile asit birbirleri ile kolaylıkla reaksiyona girerek betonun rijit yapısını bozarak betonun performansına olumsuz etkiler. GPB'lerde ise bağlayıcı olarak çimento kullanılmaz ve bağlayıcı kimyasal jeller asit etkisine

karşı daha dirençlidir. Bundan dolayı GPB'ler geleneksel betona göre asite karşı daha dayanıklıdır (Nuaklong vd., 2019).

GPB üretiminde GDA kullanılması durumunda ise GDA üzerine yapışmış olan eski çimentolu harcın içindeki kalsiyum esaslı hidratasyon ürünleri aside karşı dayanıksız olduğu için DA'lı GPB'ye göre daha düşük performans gösterir (Ganesh ve Muthukannan, 2019).

Waqas vd. (2021), yaptıkları çalışmada sadece normal agregası ve sadece GDA kullanarak ürettikleri GPB'leri sülfürik asit çözeltisine batırarak 28, 56 ve 90 gün sonunda kütle kayıplarını ölçmüşlerdir. Sonuç olarak tüm yaşlarda GDA içeren GPB'lerin kütle kayıplarının normal agregalı GPB'ye göre daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

1.4.8.11. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Geopolimerler yüksek sıcaklık etkisine karşı GB'ye göre daha dayanıklıdır. Literatüre göre GB 600 °C'de bozulmaya başlarken GPB'ler 800 °C ile 1000 °C arasındaki sıcaklıklara kadar dayanabilmektedir (Nuaklong vd., 2020; Sun vd., 2013).

Bazı araştırmacılar, GDA'lı GPB'lerin 400 °C ile 800 °C arasında bozulmaya başladığını söylemiştir (Komnitsas vd., 2015; Zaharaki vd., 2016).

Bu sıcaklık seviyelerinde GDA'lı GPB'lerin dayanımları ve kütleleri normal agregalı GPB'ye göre daha fazla azalmaktadır. Sıcaklıkla birlikte GDA'lı GPB'lerin dayanım ve kütlelerinde belirgin kayıpların görülmesinin sebebi GDA'ların yüksek porozitesi ve içerdiği boşluk suyunun buharlaşıp pastanın büzülmesinden dolayı olmaktadır. Bu büzülme betonun iç yapısında çekme gerilmeleri oluşturarak beton yapısında mikroçatlaklara neden olmaktadır (Lemougna vd., 2011). Bu mikroçatlaklar agrega-pasta AGB boyunca ilerleyip genişleyerek betonun yüzeyinde dökülmelere ve dolayısıyla kütle kaybına sebep olur (Jiang vd., 2020; Topal vd., 2021).

GPB üretiminde kullanılan normal agregalar GDA ile ikame edildiğinde betonun ısı direncinin azalmasının bir sebebi de GDA'nın yapısında bulunan eski harç tabakasındaki çimento hidratasyon ürünlerinin yüksek sıcaklıklarda hem kimyasal hem de fiziksel olarak ayrılmaya başlamasıdır (Celik vd., 2018).

GPB'lerde sıcaklığa karşı dayanıklılık, GPB üretiminde kullanılan agregaların özelliklerinin yanında, alkali aktivatörlerin tipi ve bu alkali aktivatörlerin bağlayıcıya oranı, GPB'ye uygulanan kür koşulları ve uygulanacak yüksek sıcaklık etkisinin süresine de bağlıdır (Pan vd., 2014; Bakharev, 2006).

GPB’lerde yüksek sıcaklık altında oluşacak hasarın önemli bir etkeni de uygulanacak yüksek sıcaklığın süresidir. Örneğin Nuaklong vd. (2020)’nin çalışmasına göre yarım saat boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılan GDA’lı GPB’lerin basınç dayanımlarında normal agregalı GPB’ye kıyasla belirgin bir değişiklik olmamıştır. Bunun sebebi GPB’nin 30 dakika boyunca yüksek sıcaklık altında bekletilmesi durumunda içindeki agrega ile pasta fazları arasındaki ısı genleşme farklarının kritik seviyeye ulaşamamasıdır. Yüksek sıcaklık etki süresi 60 dakikaya çıkarıldığında ise GDA etrafındaki kalsiyum hidroksit dekompoze olmaya başlayıp agrega ile pasta arasındaki aderans kopmaya başlamış ve GPB’lerin dayanımları azalmış ve kütle kayıpları artmıştır. Benzer şekilde 900 °C’de 90 dakika boyunca bekletilen UK esaslı GPB numunelerinin yüzeylerinde gözle görülebilecek seviyede ısı çatlaklar görülmüştür.

1.4.8.12. Mikroyapı

Geleneksel betonda NA, AGB ve çimento hamuru olmak üzere üç; GDA’lı betonda ise NA, eski AGB, eski çimento hamuru, yeni AGB ve yeni çimento hamuru olmak üzere beş faz vardır. GDA ile üretilen betonlarda arayüzey geçiş bölgeleri betonun performansı açısından büyük etkiye sahiptir. Geleneksel betona kıyasla GDA içeren GPB’lerin arayüzey geçiş bölgesi daha sağlam ve boşluksuz yapılıdır. Bunun sebebi geopolimer bağlayıcı fazı ile agrega arasındaki aderansın geleneksel çimentolu bağlayıcı jellere göre daha yüksek olması ve GPB üretiminde kullanılan alkali çözeltilerin GPB üretimi sırasında GDA boşluklarına girerek boşlukları doldurmasıdır (Liu vd., 2016; Pawluczuk vd., 2021).

1.5. Çalışmanın Amacı

Günümüzde artan nüfusla birlikte yapılaşmanın artmasıyla dünyanın doğal kaynakları tükenmekte ve eski yapıların yıkılması sonucu oluşan inşaat atıkları çevre kirliliğine neden olmaktadır. Yıkılan yapılardan elde edilen molozların geri dönüştürülerek yeniden kullanılması çevreye daha az atık atılmasını, doğal kaynakların daha az tüketilmesini ve yeni inşaat malzemelerinin temini sırasında harcanan enerjinin azalmasını sağlar. Literatürde inşaat molozlarının agrega olarak yeniden kullanılması için GDA’lı betonlar üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Diğer yandan üretimi sırasında atmosfere fazla miktarda CO₂ salınımı

yapan çimentonun kullanımını azaltmak için geleneksel betona alternatif olabilecek bir beton türü olan geopolimer betonlar geliştirilmiştir. Geopolimer betonlarda GDA'ların kullanılması hem çevre kirliliği açısından hem de doğal kaynakların korunması açısından önemli bir alternatiftir. Geleneksel betonda olduğu gibi geopolimer betonda da GDA'ların kullanılmasının önündeki en büyük problem yüksek geçirimsizlik ve düşük mekanik özellikleridir. Bundan dolayı GDA'nın kalitesini artırabilmek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Literatürde geçirimsizlik özellikleri iyileştirilmiş GDA'larla üretilen geleneksel betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmışken bu agregaların GPB üretiminde ne derece etkili olduğu ile ilgili çok az sayıda çalışma vardır.

Bu çalışmada, puzolanik şerbet emdirme işlemi uygulamak suretiyle yüzey iyileştirmesi yapılan GDA'lar kullanılarak üretilen GPB'lerin özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı bağlayıcı maddeler kullanılarak GPB'ler üretilmiş ve bu GPB'lerin normal iri agregaları, şerbet emdirilen GDA'larla ikame edilmiştir. GPB'ler üzerinde basınç ve yarmada çekme dayanımı, böhme aşınma dayanımı, yüksek sıcaklığa karşı direnç, su emme, kılcallık, hızlı klorür geçirimsizliği, elektriksel özdirenç deneyleri yapılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kapsam

Çalışmanın ilk aşamasında yüzey iyileştirme yöntemi belirlenmiştir. Bu amaçla GDA'lara literatürde uygulanmış farklı yöntemlerle puzolanik şerbet emdirme denemeleri yapılmıştır. Denemelerin sonunda en fazla iyileşmenin sağlandığı yöntem ve şerbet tipleri belirlenmiştir. GPB üretiminde, bu yöntemle iyileştirilen GDA'lar kullanılmıştır.

Çalışmada UK, YFC ve MK esaslı GPB'ler üretilmiştir. Üretilen betonlarda toplam bağlayıcı 400 kg/m^3 olarak seçilmiştir. MK ile üretilen GPB'ler erken dayanım alıp kalıptan kolay çıkarılabilmesi için %10 YFC ile ikame edilmiştir. Bağlayıcı puzolanik malzemeleri aktive etmek için SS ve SH çözeltileri kullanılmıştır.

Deneylerdeki GPB karışımlarının miktarını belirlemek için ön çalışma olarak farklı alkali çözeltisi/bağlayıcı oranı, alkali çözeltisindeki SS/SH oranı ve SH çözeltisinin molaritesi denemeler yapılarak karar verilmiştir.

Üretilen betonlarda alkali çözeltisinin bağlayıcıya oranı ve SS/SH oranı 0.5 ve 2 olarak seçilmiştir. Üretimlerde kullanılan SH çözeltisinin molaritesi, literatüre göre GPB'ler için en uygun işlenebilirlik ve dayanım değerinin sağlanabilmesi için önerilen değer olan 12 molardır (Alhawat vd., 2022).

GPB'lerin kolay işlenebilmesi için S4 sınıfı (15-20 cm) çökme değeri sağlanmıştır.

MK ile üretilen GPB'lerde %10 YFC ikame edilerek karışımın kalsiyum içeriği artırılarak priz süresi iyileştirilmiş ve betonun 24 saatin sonunda kalıptan zarar görmeden çıkarılması hedeflenmiştir (Aygörmez vd., 2020)

MK ile üretilen betonlarda istenilen işlenebilirliği sağlamak için ilave olarak 40 kg/m^3 su ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda bağlayıcının %4'ü kadar akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Bu betonlarda kimyasal katkı miktarının daha fazla artırılmamasının sebebi betonun priz süresini artırmamak ve kalıptan geç sökülmesini önlemektir. UK ve YFC ile üretilen GPB'ler taze haldeyken buhar kürüne tabi tutulmuş, MK ile üretilenler ise oda sıcaklığında kür edilmiştir. MK ile üretilen GPB'lerin oda sıcaklığında kür edilme sebebi, MK parçacıklarının tabaka şeklindeki ince düz yapılarının etrafında çok su tutması ve sıcak kür uygulanması durumunda bu suyun ortamı terk ederek betonda kuruma büzülmesi ve çatlaklar oluşturmasıdır. Karışımdan reaksiyona girmeden ayrılan su, alkali aktivatör



Şekil 2.1. Beton numunelerinin temini ve hilti ile parçalanması, çeneli kırıcıda kırılarak agrega boyutuna getirilmesi



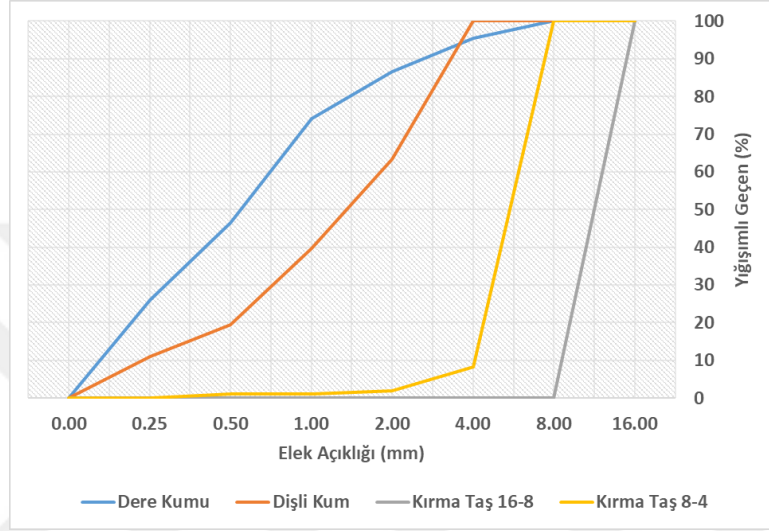
Şekil 2.2. GDA'nın elenmesi ve saklanması

2.2.1.2. Agregaların Özellikleri

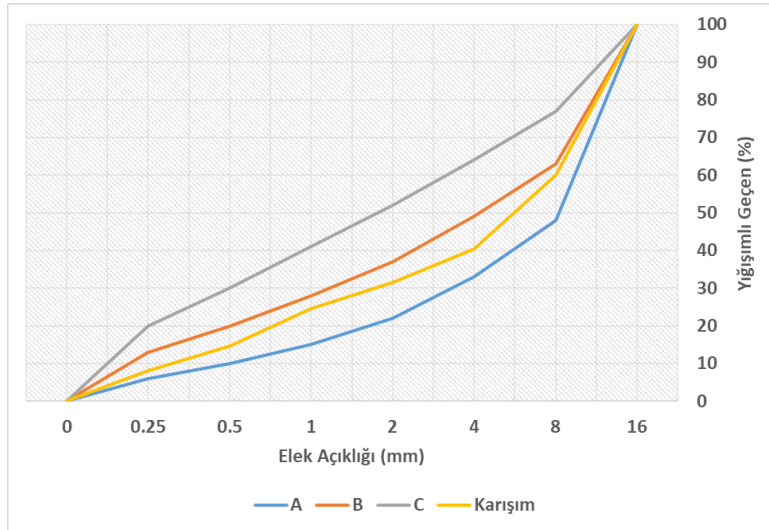
Bu çalışmada GPB üretiminde normal agrega olarak kalker kökenli kırma taş, dişli kum ve dere kumu kullanılmıştır. GDA'lı beton üretiminde GDA'lar normal iri agregalar ile %100 oranında ikame edilmiştir. En büyük agrega boyutu 16 mm'dir. Hem normal agregalı hem GDA'lı betonlarda ince agrega olarak dişli kum ve dere kumu kullanılmıştır. Agregaların karışım oranları kırma taş, dişli kum ve dere kumu için sırasıyla %60, %15 ve %25'tir. Kullanılan agregalara ait özellikler ve agregaların granülometri eğrisi Tablo 2.1., Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Kırma taş (16-4 mm)	Dişli kum (< 4 mm)	Dere kumu (< 4 mm)	GDA (16-8 mm)	GDA (8-4) mm
Özgöl ağırlık (g/cm ³)	2.71	2.69	2.65	2.54	2.46
Su emme (%)	0.61	0.96	2.11	5.31	7.63
Nem içeriği (%)	0.33	2.69	2.65	1.67	2.72



Şekil 2.3. Agregaların granülometri eğrileri



Şekil 2.4. Agregaların karışımının granülometri eğrisi ve sınır eğrileri

2.2.2. Çimento

Çalışmada Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu GDA'lara puzolanik şerbet emdirme işleminde kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

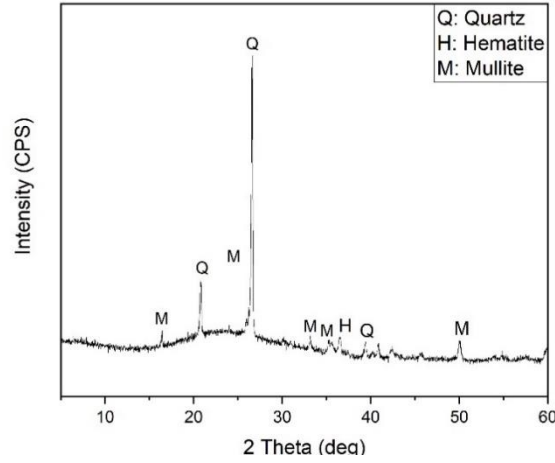
Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	32 µm elek üstünde kalan (%)		9.8
SiO ₂	20.13	90 µm elek üstünde kalan (%)		0
Al ₂ O ₃	4.77	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)		3402
Fe ₂ O ₃	3.20	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3.09
CaO	63.24	Priz Süresi (Vicat) (dak.)	Başlangıç	180
MgO	1.69		Bitiş	210
SO ₃	2.78	Su İhtiyacı (%)		28.0
Na ₂ O	0.2	Hacim Genleşmesi (mm)		0
K ₂ O	0.91	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	26.5
Cl ⁻	0.0113		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	2.87		28 gün	51.7

2.2.3. Uçucu Kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül Sugözü Termik Santralinden temin edilmiş olup ASTM C 618 standardına göre F tipi uçucu küldür (ASTM C618, 2022). Külün özgül ağırlığı 2.39 g/cm³'tür. Uçucu külün XRF analizi ODTÜ Merkezi laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları Tablo 2.3'te verilmiştir. Uçucu külün XRD analizi RTEÜ'de gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları Şekil 2.5'te görülmektedir.

Tablo 2.3. UK, YFC, MK ve SD'nin kimyasal bileşimi

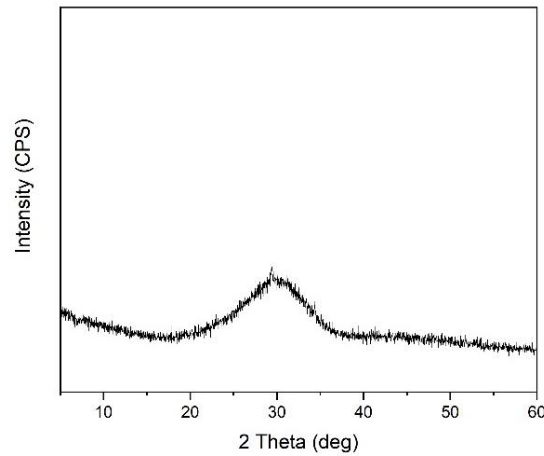
Bileşen	UK	YFC	MK	SD
SiO ₂	61.81	36.7	56.1	93
Al ₂ O ₃	19.54	14.21	40.25	0.58
Fe ₂ O ₃	7.01	0.98	0.85	2.79
TiO ₂	-	-	0.55	-
CaO	1.77	32.61	0.19	0.6
MgO	-	10.12	0.16	1.0
Na ₂ O	2.43	0.42	0.24	1.0
K ₂ O	-	0.76	0.55	0.10
SO ₃	0.31	0.99	-	0.50



Şekil 2.5. Uçucu küle ait XRD analizi

2.2.4. Yüksek Fırın Cürufu

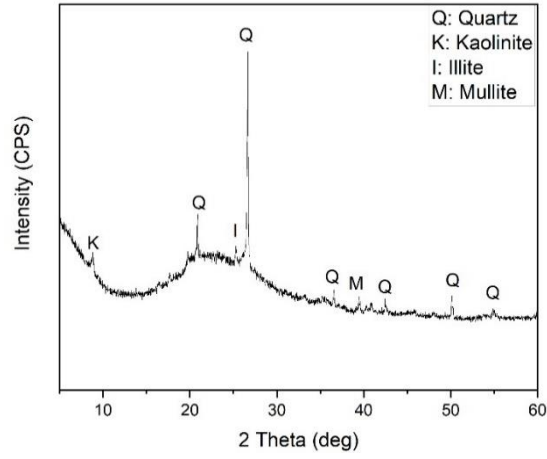
Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu, İskenderun Demir Çelik Fabrikası'ndan elde edilmiştir. YFC'nin özgül ağırlığı 2.81 g/cm^3 olup kimyasal bileşimi Tablo 2.3'te XRD sonuçları ise Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yüksek fırın cürufuna ait XRD analizi

2.2.5. Metakaolin

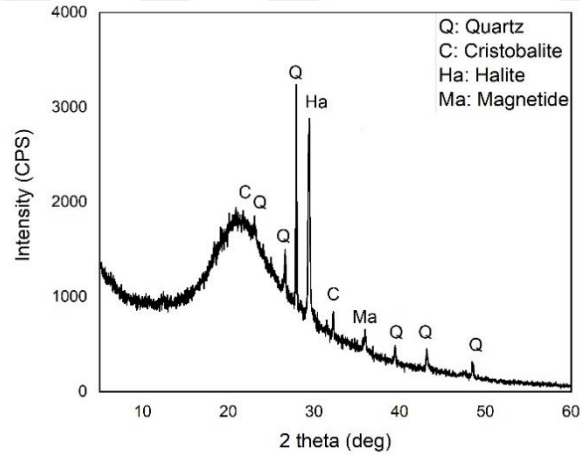
Çalışmada kullanılan metakaolin KAOLİN EAD firmasından temin edilmiştir. Metakaolinin özgül ağırlığı 2.52 g/cm^3 olup kimyasal bileşimi Tablo 2.3'te, XRD analiz sonuçları ise Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Metakaoline ait XRD analizi

2.2.6. Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanının özgül ağırlığı 2.2 g/cm^3 'tür. Silis dumanına ait kimyasal bileşimi Tablo 2.3'te XRD analiz sonucu ise Şekil 2.8'de verilmiştir.

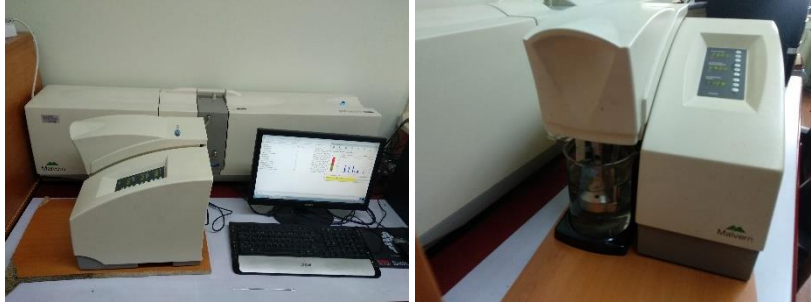


Şekil 2.8. Silis dumanına ait XRD analizi

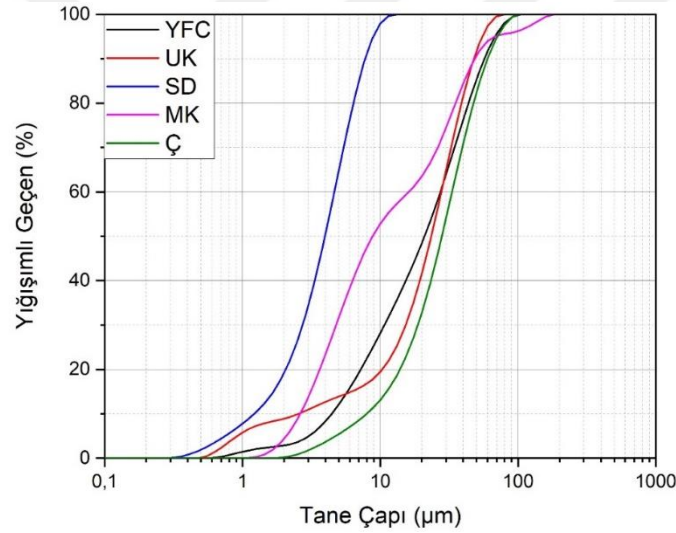
2.2.7. Bağlayıcı Maddelerin Lazer Kırınım Yöntemiyle Tane Boyutu Analizi

Çalışmada kullanılan bağlayıcı toz malzemelerin boyut ölçümleri Şekil 2.9'da gösterilen MasterSizer 2000 cihazında yapılmıştır. Malzemelerin tane boyutu dağılımı Şekil

2.10’da yığışımli bir şekilde gösterilmiş olup YFC, UK, SD, MK ve Ç için ortalama tane çapları sırasıyla 15.87, 23.41, 17.46, 11.9 ve 28.01 μm ’dir.



Şekil 2.9. Bağlayıcı malzemelerin tane boyutunun belirlenmesi



Şekil 2.10. Kullanılan bağlayıcı maddelerin tane boyutu analizi

2.2.8. Puzolanik Maddelerin Puzolanik Aktivite İndekslerinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve silis dumanının puzolanik aktiviteleri, dayanım aktivite testi yöntemine göre sırasıyla BS EN 450-1, ASTM C1240, ASTM C618 ve ASTM C1240-20 standartlarına göre belirlenmiştir (BS EN 450-1, 2012; ASTM C1240, 2020; ASTM C618, 2019; ASTM C1240, 2020). Puzolanik aktivite indekslerinin belirlenmesi için öncelikle CEM I 42.5 R tipi çimento ve standart kum kullanarak referans çimento harcı üretilmiştir. Bu harcın malzeme miktarları çimento, su ve kum için sırasıyla 450, 225 ve 1350 gramdır. Bu malzeme miktarları kullanılarak üçer adet

40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneler üretilmiştir. Şekil 2.11’de harçların üretimi gösterilmiştir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve silis dumanı ikameli harçlar üretilirken kum ve su miktarı sabit tutularak puzolanik malzemeler çimentoyla ağırlıkça yüzde olarak sırasıyla %25, %25, %25 ve %10 oranlarında ikame edilmiştir. Puzolanik malzemelerle üretilen harçlarda standart kıvamın (110mm+-%5) sağlanabilmesi için kimyasal akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Üretilen harçlar standartta belirtilen sürelerde kür edilerek deney gününde eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutularak aktivite indeksleri belirlenmiştir. Şekil 2.11’de üretilen harçlar üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyi gösterilmiştir. Puzolanik maddelerin ilgi standartlara göre sağlaması gereken değerler ve dayanım indeksleri Tablo 2.4’te verilmiştir. Tablo 2.4’te görüldüğü gibi tüm puzolanik maddeler ilgili standarda belirtilen asgari aktivite indeksi şartlarını sağlamıştır.



Şekil 2.11. Puzolanik maddelerin dayanım aktivite indekslerinin belirlenmesi için çimento harçları üretimi ve basınç deneyi

Tablo 2.4. Puzolanik malzemelerin dayanım aktivite indeksleri ve ilgili standartlarda belirtilen asgari değerler

Puzolanik Malzeme	İlgili Standart	Gerekli asgari aktivite indeksi	Ölçülen aktivite indeksleri
Uçucu Kül	BS EN 450-1	%75 (28 gün)	76
Yüksek Fırın Cürufu	ASTM C1240	%75 (7 gün)	78
Metakaolin	ASTM C618	%85 (28 gün)	101
Silis Dumanı	ASTM C1240-20	% 85 (7 gün)	87.4

2.2.9. Alkali Aktivatörler

2.2.9.1. Sodyum Hidroksit

Çalışmada Chloran şirketinden temin edilen %99 saflıkta pellet formda sodyum hidroksit kullanılmıştır.

2.2.9.2. Sodyum Silikat

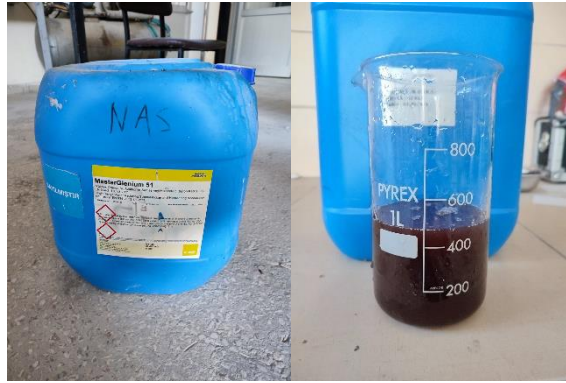
Çalışmada kullanılan sodyum silikat Palkim'den temin edilmiştir ve çözelti halindedir. Çözeltinin özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Sodyum silikata ait özellikler

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Limitler
Görünüş	Filtre edilmiş, renksiz, berrak kıvamlı sıvı
Ağırlıkça Modül: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	1.9-2.2
Moleküler Modül: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	1.95-2.3
Be' (20°C'de)	40-41
Yoğunluk (20°C'de, gr/cm^3)	1.38-1.397
Na_2O (%)	11
SiO_2 (%)	22
H_2O (%)	66

2.2.10. Süperakışkanlaştırıcı

Deneylerde betonun istenen kıvam özelliklerini sağlaması için BASF Yapı Kimyasalları'ndan temin edilen MGlenium 51 adlı polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Tablo 2.6'da süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri, Şekil 2.12'de ise akışkanlaştırıcının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.12. MGlenium 51

Tablo 2.6. MGlenium 51'e ait teknik özellikler

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Amber
Yoğunluk	1.082-1.142 kg/litre
Klor İçeriği % (EN 480-10)	<0.1

2.2.11. Su

Deneylerde Trabzon şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.3. Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar

2.3.1. GDA'lara Uygulanacak Puzolanik Şerbet Emdirme Yöntemine Karar Verilmesi

Literatürde GDA'ları iyileştirmek için puzolanik şerbet emdirme yöntemlerinin kullanıldığı birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar incelendiğinde, her bir çalışmada farklı bir yöntem uygulandığı ve bazılarında olumsuz sonuçlar alındığı görülmüştür. Bu çalışmada, literatürde denenen bazı puzolanik şerbet emdirme yöntemleri baz alınarak farklı miktarlarda puzolanik şerbetler GDA'lara emdirilmiş ve en uygun sonuç alınan yöntem belirlenerek çalışmanın ileriki safhalarında GDA'lar bu yöntem kullanılarak iyileştirilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde bu denemeler ve sonuçları özetlenmiştir.

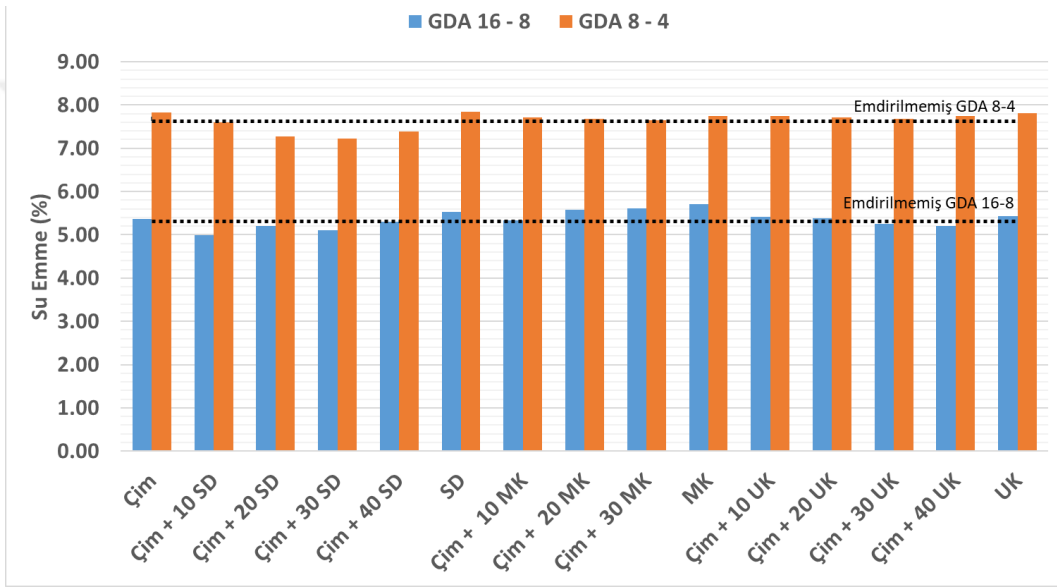
2.3.1.1. Birinci Emdirme Denemesi

Birinci emdirme yönteminde Sasanipour ve Aslani (2020), yaptıkları çalışmada kullandıkları yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde önerilen puzolanik madde, su ve GDA miktarları sırasıyla 250 gram bağlayıcı, 1 kg su ve 8 kg GDA şeklindedir. Burada amaç, puzolanların ince taneli yapısı sayesinde GDA'ların içerisine girip filler etkisi göstermesidir. Emdirme işleminde ilk olarak bağlayıcı maddeler ile su betoniyerde karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra GDA'lar bu şerbetin üzerine eklenerek 4 saat boyunca GDA'ların şerbeti emmesi sağlanmıştır. Emdirme işlemi sonunda agregalar el arabasına alınıp bir ince elek yardımıyla fazlalık şerbetten arındırılmış ve 45 °C sıcaklıktaki etüvde 3 gün boyunca tutularak hem puzolanik reaksiyonun hızlanması hedeflenmiş hem de agregalar üzerindeki fazlalık su uzaklaştırılmıştır.

Bu denemede puzolanik şerbet, GDA'ların üzerini kapatacak miktarda olamamış yani yeterli gelmemiştir. Dolayısıyla betoniyerin alt kısmında kalan GDA'lar ile üst yüzeyde şerbetle temas halinde olmayan GDA'lar arasında şerbet emme açısında büyük farklılıklar olmuştur. Şekil 2.13'te puzolan emdirme işlemi ve betoniyerden alınan GDA'lar görülmektedir. Etüvden alınan GDA'lar üzerinde su emme deneyi yapılırken GDA'ların üzerindeki kurumuş şerbetin su ile temas etmesi durumunda GDA yüzeyinden ayrıldığı görülmüştür. Görsel incelemenin yanında su emme deney sonuçları da incelendiğinde şerbetin GDA'lara iyi nüfuz edemediği ve su emme değerlerinin istenilen şekilde iyileşmediği görülmüştür. Başarısız olan bu denemeden sonra, puzolanik maddelerin GDA'ya daha iyi nüfuz etmesi için çimentolu şerbetler denenmiştir. Çimento şerbetlerinde puzolanların çimento ile ikame oranları silis dumanı ve uçucu kül için %10, %20, %30 ve %40'tır. MK ile üretilen şerbetlerde puzolan ikame oranları %10, %20 ve %30'dur. Bu emdirme denemesinde görülen en önemli gözlemler şu şekildedir: kullanılan puzolanik şerbetin GDA'ların etrafını tamamen kaplayamamış olması ve çimentosuz şerbetlerin içindeki puzolanik maddelerin GDA'lara nüfuz edemeyip GDA yüzeyinden kolaylıkla ayrılmasıdır.



Şekil 2.13. 1. Pozolan emdirme yöntemi ve betoniyerden alınan GDA'lar



Şekil 2.14. 1. pozolan emdirme yönteminde elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

Şekil 2.14'te bu yöntemin sonucunda elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapılan emdirme işlemi agregaların su emmeleri üzerinde herhangi bir iyileşme sağlamamıştır.

2.3.1.2. İkinci Emdirme Denemesi

Bu emdirme yönteminde Zhao vd. (2013)'nin kullandığı yöntem uygulanmıştır. GDA'ları kaplamakta kullanılan şerbetlerde 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 ve 1.0 olacak şekilde farklı su/bağlayıcı oranları kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca çimentoyla farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül ikameli şerbetler de denenmiştir. Sonuç olarak şerbetlerde su/bağlayıcı

miktarı arttıkça GDA'ların mekanik özelliklerinin iyileştiği, GDA kaplama kalınlığının fazla olmasının betonun dayanımını düşürdüğü, yüzeydeki fazlalık pastanın GDA'nın su emmesini artırdığı rapor edilmiştir. Çalışmanın sonucunda optimum GDA özellikleri için kullanılacak şerbetin su/bağlayıcı oranının 0.8 olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla çalışmamızda Zhao vd.'nin önerdiği üzere kullanılan şerbetlerin su/bağlayıcı oranı 0.8 olarak seçilmiş ve buna ek olarak şerbetlerde farklı oranlarda puzolan ikameleri de denenmiştir.

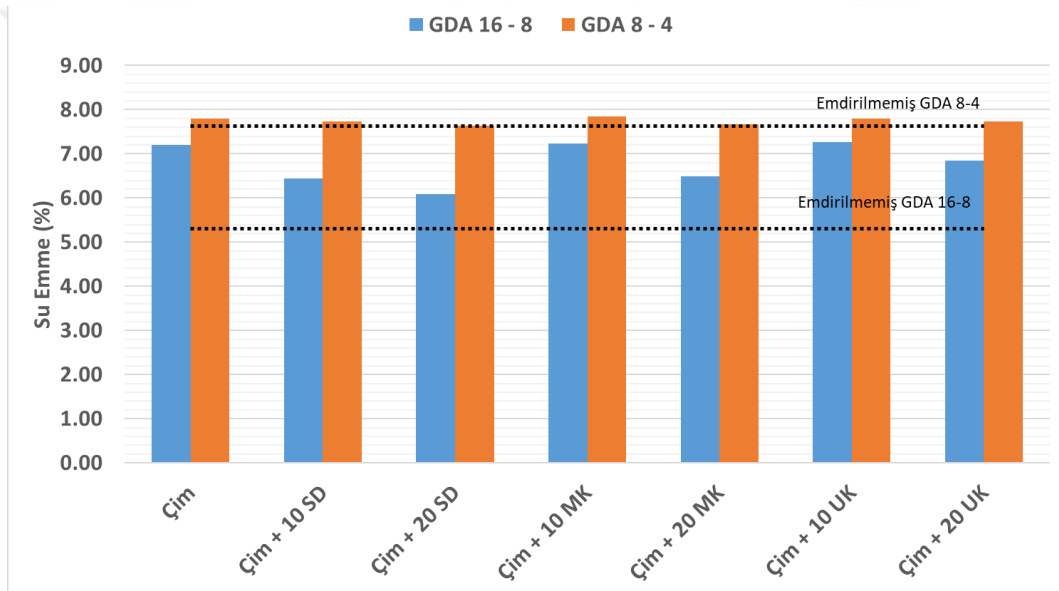
GDA'lara şerbet emdirme işlemi için öncelikle bağlayıcı malzemeler ve su betoniye koyularak homojen bir şerbet elde edilene kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan şerbetin üzerine GDA'lar eklenerek betoniye içerisinde 1 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra betoniyerden alınan GDA'lar oda koşullarında bir hafta kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan GDA'lar eleklerden elenerek hem GDA'lara işlemeyen fazlalık ince malzemeler arındırılmış hem de 4/8 ve 8/16 mm olacak şekilde iki gruba ayrılmıştır.

Bu yöntemde kullanılan malzeme miktarları; 800 gram su + 1 litre bağlayıcı + 5 kg GDA şeklindedir. İçerisinde sadece çimento olan şerbetin yanında ayrıca çimentonun ağırlıkça %10 ve 20 oranında SD, MK ve UK ikameli şerbetler de üretilmiştir.

Bu yöntemin sonucunda Zhao vd.'nin önerdiği 0.8 su/bağlayıcı oranlı şerbetlerin yeterli akışkanlıkta olmadığı ve GDA'ların tüm yüzeyine aynı oranda etki etmediği görülmüştür. Ayrıca GDA'lar betoniyerde bekletilirken, betoniye alt ve üst kısmında kalan GDA'lara şerbet aynı oranda nüfuz edememiş, betoniye alt kısmında kalan GDA'ların etrafında çok fazla pasta yapışıp topaklanma olurken üst kısmında kalan GDA'lara pasta yeteri kadar nüfuz edememiştir. Şekil 2.15'te bu yöntemle emdirme yapılan ve üzerinde topaklanma olan GDA'lar görülmektedir. GDA'lar üzerinde topaklanma olmaması için GDA'ların betoniye içerisinde bekletilirken arada sırada betoniye çalıştırılıp şerbetin tüm GDA'lara aynı şekilde etki etmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Betoniye alt kısmında kalan GDA'ların üzerinde topaklaşan pasta tıpkı Zhao vd.'nin çalışmalarında düşük su/bağlayıcı şerbetlerde gördüğü gibi GDA'nın su emmesini arttırmıştır. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi, bu deneme sonucunda hiçbir puzolanik şerbet GDA'ların su emme değerini düşürmekte etkili olamamıştır.



Şekil 2.15. 2. puzolan emdirme yöntemi ve betoniyerden alınan GDA'lar



Şekil 2.16. 2. puzolan emdirme yönteminde elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

2.3.1.3. Üçüncü Emdirme Denemesi

Bu emdirme yönteminde literatürde bazı çalışmalarda uygulanıp olumlu sonuç alındığı rapor edilen, GDA'lara şerbet emdirmeden önce ön kurutma yöntemi uygulanmıştır. (Shi vd., 2018; Alqarni vd., 2021).

GDA'ların şerbeti daha hızlı ve daha çok miktarda emebilmesi için GDA'lar şerbet emdirme işleminden önce etüvde 105 °C'de 24 saat boyunca kurutulmuş ve kurutulan GDA'lar şerbete batırılmadan önce oda sıcaklığında bir süre soğumaya bırakılmıştır. Bu denemede her bir kilogram GDA için 400 gram puzolanik şerbet kullanılmıştır. Literatürde

puzolanik şerbetin su/bağlayıcı oranı arttıkça GDA'lara daha iyi işlediği belirtildiği ve diğer deneme sonuçlarında da teyit edildiği için bu denemede şerbetin su/bağlayıcı oranı 0.8 olarak seçilmiştir (Zhao vd., 2013).

Puzolanik malzemeler ve su betoniye konulduktan sonra homojen bir şerbet elde edilinceye kadar betoniye çalıştırılmıştır. Şerbet elde edildikten sonra üzerine ön kurutma yapılan GDA'lar eklenerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Puzolan şerbetine batırılan GDA'lar 4 saat boyunca betoniyerde bekletilerek şerbetin nüfuz etmesi sağlanmıştır. Emdirme işlemi bittiğinde GDA'lar betoniyerden alınarak laboratuvar ortamında 1 hafta bekletilmiştir. Şekil 2.17'de Puzolan Emdirme işlemi uygulanmış GDA'lar gösterilmiştir.

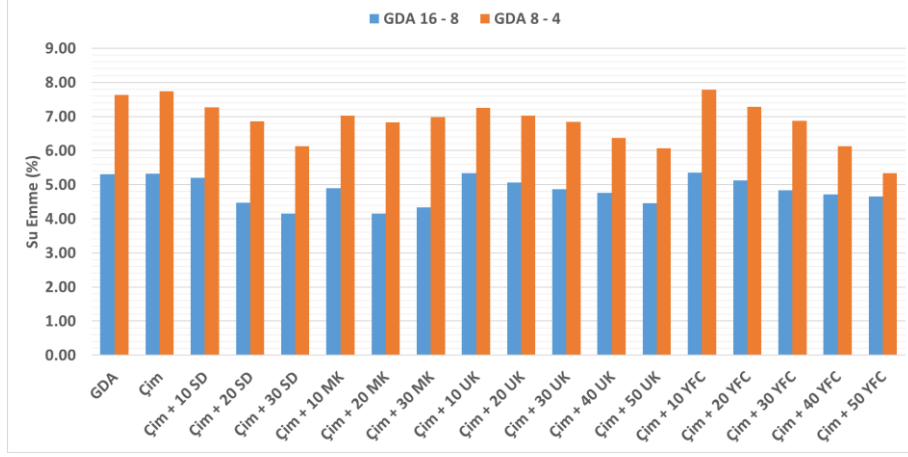
Üretilen şerbetlerde içerisinde sadece çimento bulunan şerbetin haricinde farklı oranlarda SD, MK, UK ve YFC ikameli şerbetler de denenmiştir. SD ve MK için denenilen ikame oranları %10, %20 ve %30 iken UK ve YFC için %10, %20, %30, %40 ve %50'dir.

GDA'ların emdirme işlemi sonucunda elde edilen su emme değerleri Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Bu emdirme sonunda puzolansız çimento şerbeti emdirilen GDA'ların su emme değerlerinde bir değişiklik olmamıştır. Puzolanlı şerbetlerde ise en düşük su emme değerlerini veren ikame oranı ve su emmedeki azalma oranları %30 SD ikameli şerbette ortalama %21, %20 MK ikameli şerbetlerde ortalama %16, %50 UK ikameli şerbette ortalama %18 ve %50 YFC ikameli şerbette ortalama %21 olmuştur.

Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında GDA'ların su emme değerlerindeki azalma istenilen seviyede olamamıştır. Ayrıca bu emdirme denemesinde şerbet miktarı GDA'ları tamamen saracak miktarda olmamış ve şerbetin istenilen akışkanlıkta olmamasından dolayı edilen GDA'lara homojen bir şekilde işleyememiştir. Bu denemenin sonucunda üretilen şerbetin daha sulu ve agregaları tamamen saracak miktarda olması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.17. 3. puzolan emdirme işlemi uygulanmış GDA'lar



Şekil 2.18. 3. puzolan emdirme yönteminde elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

2.3.1.4. Dördüncü Emdirme Denemesi

Bu denemede Shaban vd. (2019)'nin uyguladığı emdirme yöntemi uygulanmıştır.

Bu yöntemde öncelikle betoniye su ve bağlayıcı maddeler konulup bu malzemeler betoniye içerisinde homojen hale gelene kadar karıştırılarak şerbet hazırlanmıştır. Daha sonra GDA'lar betoniye koyulmuş, homojen bir karışım olana kadar Şekil 2.19'da gösterildiği gibi karıştırılmıştır. Önceki denemelerde bekleme sürecinde malzemeler betoniye karıştırılmadan bekletilmiş, şerbetin katı kısmı dibe çökmüş ve bu nedenle üst kısımda kalan GDA'lara şerbet yeteri kadar nüfuz edememiştir. Bu deneyimden faydalanarak betoniye 15 dakikada bir çalıştırılıp GDA'ların alt üst edilmesi sağlanmıştır. Shaban vd. yaptıkları çalışmada şerbetin GDA'ya en iyi nüfuz etme süresini 4 saat olarak rapor etmiştir. Bu nedenle GDA'lar toplamda 4 saat boyunca betoniye bekletilmiştir. Bekleme süresinin sonunda Şekil 2.20'de görüldüğü gibi laboratuvar ortamında 1 hafta kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 2.19. 4. puzolan emdirme yöntemi ve betoniye alanan GDA'lar

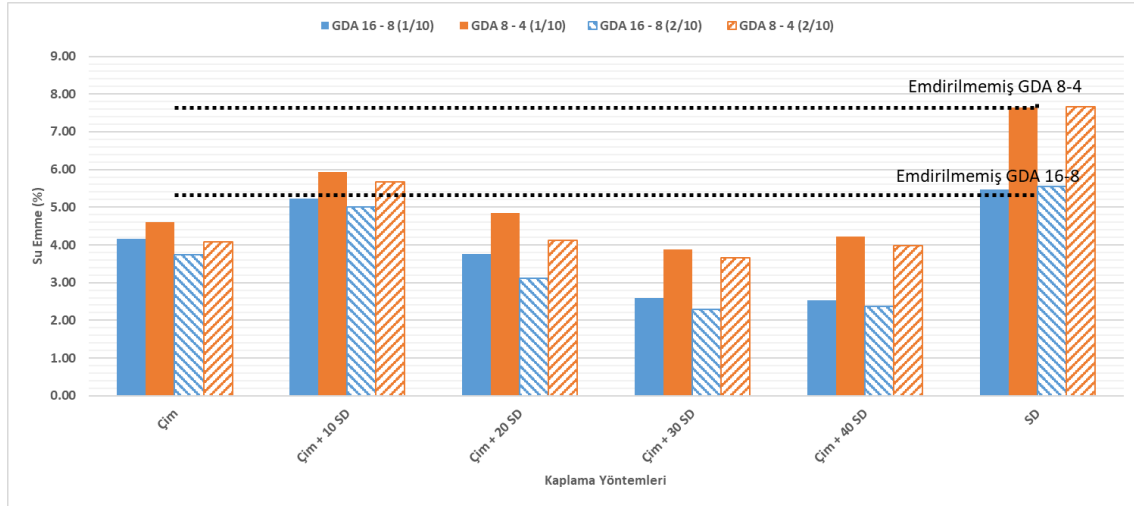


Şekil 2.20. Şerbet emdirilen GDA'ların betoniyerden alınması ve kurutulması

Bu yöntemde üretilen şerbetlerde bağlayıcı/su oranı 1/10 ve 2/10 olarak iki tanedir. Bağlayıcı/su oranı 1/10 olan şerbet için malzeme miktarları her 1 kilogram agrega için 2 kilogram su ve 200 gram bağlayıcıdır. Bağlayıcı/su oranı 2/10 olan karışım için ise malzeme miktarları her 1 kilogram agrega için 2 kilogram su ve 400 gram bağlayıcı şeklindedir. Üretilen şerbetlerde SD, MK, UK ve YFC çimento ile ağırlıkça farklı oranlarda ikame edilmiştir.

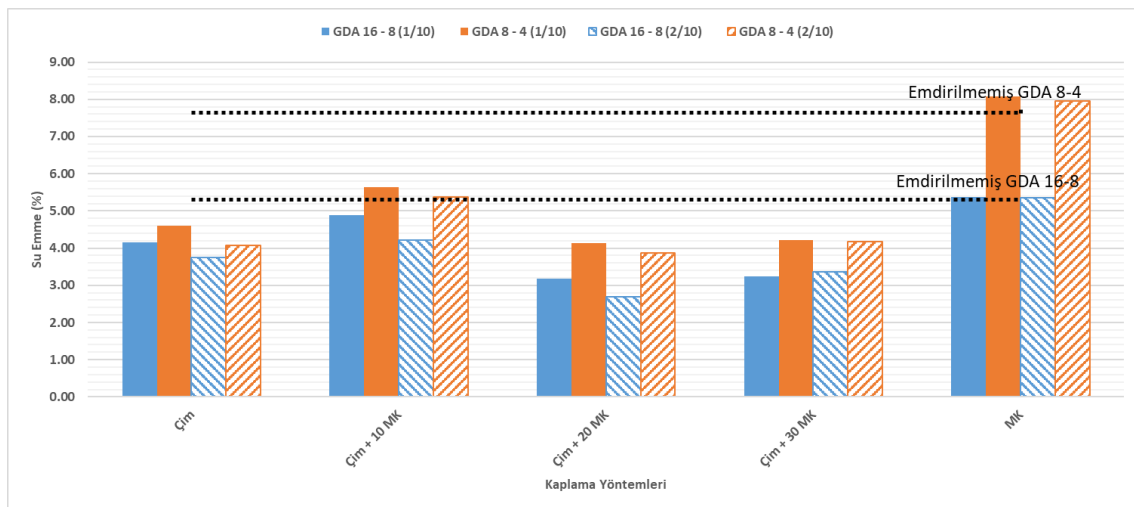
Şekil 2.21'de SD ikameli şerbetler emdirilen GDA'ların su emme yüzdelерini göstermektedir. SD ikame oranları %0, %10, %20, %30, %40 ve %100'dür. SD içermeyen çimento şerbeti emdirilen 16/8 ve 8/4 mm boyutundaki GDA'ların su emme değerlerinde %21.6 ve % 39 oranında azalma görülmüştür. SD ikame edilen şerbetlerin emdirildiği GDA'lara bakıldığında ise emdirilen şerbetteki SD ikamesi arttıkça GDA'ların su emme değerlerinin azaldığı görülmektedir. En düşük su emme değeri çimentoyla %30 SD ikame edilerek hazırlanan şerbet ile elde edilmiştir. Herhangi bir şerbet emdirme işlemi uygulanmayan GDA'larda bu değerler sırasıyla %5.31 ve %7.63 iken %30 SD'li şerbet emdirilen GDA'larda %2.28 ve %3.66'ya inmiştir.

İkame oranı %40'a çıktığında su emme değerinde küçük de olsa bir artış oluşmuştur. Ayrıca bağlayıcı/su oranı 2/10 olan şerbetlerin emdirildiği GDA'ların su emme değerleri 1/10 olanlara göre daha düşük olmuştur. Sadece SD içeren şerbetlerde ise bağlayıcı/su oranındaki değişim GDA'ların su emmesinde herhangi bir fark oluşturmamıştır.



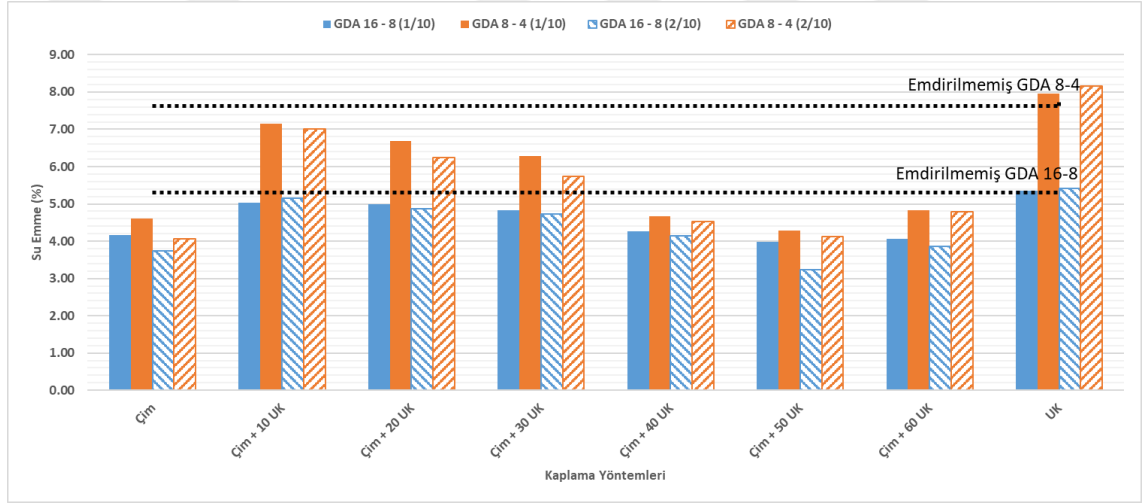
Şekil 2.21. 4. puzolan emdirme yönteminde (çimento ve SD şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

Şekil 2.22, çimentoyla %0, %10, %20, % 30 ve %100 MK ikameli şerbetler emdirilen GDA'ların su emme yüzdelerini göstermektedir. Grafik incelendiğinde MK ikamesi arttıkça GDA'ların su emme değerlerinin azaldığı görülmektedir. En düşük su emme değeri çimentoyla %20 MK ikame edilerek hazırlanan şerbet ile elde edilmiştir. Bu değerler 16/8 ve 8/4 mm boyutundaki GDA'lar için sırasıyla %2.7 ve %3.87 olmuştur. İkame oranı %30'a çıktığında su emme değerinde tekrar artış görülmüştür. %100 MK ikameli şerbet emdirilen GDA'ların su emme yüzdeleri ise hiç emdirme yapılmayan GDA'lar düzeyinde olmuştur.



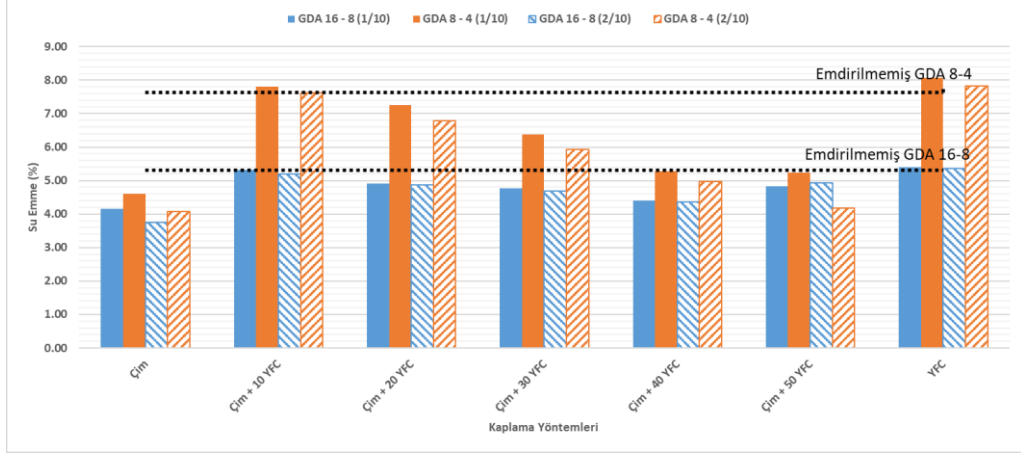
Şekil 2.22. 4. puzolan emdirme yönteminde (çimento ve MK şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

Şekil 2.23, çimentoyla %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %100 UK ikameli şerbet emdirilen GDA'ların su emme yüzdeleri göstermektedir. Grafik incelendiğinde UK ikamesi arttıkça GDA'ların su emme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalış 8/4 mm boyutundaki GDA'larda 16/8 mm boyutundaki GDA'lara göre daha belirgindir. En düşük su emme değeri çimentoyla %50 UK ikame edilerek hazırlanan şerbet ile elde edilmiştir. Bu değerler 16/8 mm GDA'lar için %3.23, 8/4 mm GDA'lar için ise %4.12'dir. İkame oranı %60'a çıktığında su emme değerinde tekrar artış görülmüştür. %100 UK ikameli şerbet emdirilen GDA'ların su emme yüzdeleri ise hiç emdirme yapılmayan GDA'lar düzeyinde olmuştur.



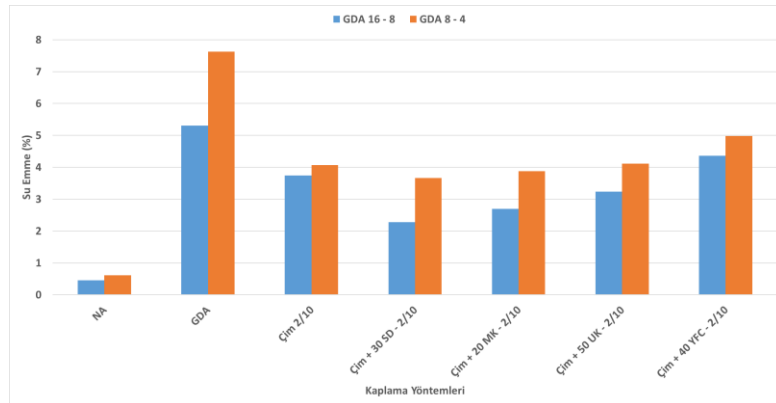
Şekil 2.23. 4. puzolan emdirme yönteminde (çimento ve UK şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

Şekil 2.24, çimentoyla %0, %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 YFC ikameli şerbetler emdirilen GDA'ların su emme yüzdeleri göstermektedir. Grafik incelendiğinde YFC ikamesi arttıkça GDA'ların su emme değerlerinin azaldığı görülmektedir. En düşük su emme değeri çimentoyla %40 YFC ikame edilerek hazırlanan şerbet ile elde edilmiştir. Bu değerler 16/8 ve 8/4 mm boyutundaki GDA'lar için sırasıyla %4.36 ve %4.97 olmuştur. Görüldüğü gibi 16/8 mm boyutlu GDA'ların su emme değerlerindeki azalma emdirme işlemi yapılmamış GDA'lara göre çok da belirgin değildir. İkame oranı %50'a çıktığında su emme değerinde tekrar artış eğilimi görülmüştür. Diğer %100 puzolanlı şerbet emdirme işlemlerinde görüldüğü gibi burada da %100 YFC ikameli şerbet emdirmek GDA'ların su emme yüzdelerinde bir azalma sağlamamıştır.



Şekil 2.24. 4. puzolan emdirme yönteminde (çimento ve YFC şerbeti) elde edilen GDA'ların su emme yüzdeleri

Bu denemede şerbetlerde su/bağlayıcı oranı olarak seçilen her iki oranda da GDA'ların su emme değerlerinde istenilen seviyede azalma görülmüştür. Literatüre göre puzolanik şerbet emdirme işleminde şerbetin hem yeterli akışkanlıkta hem de içerisindeki bağlayıcı maddenin yeterli miktarda olması gerektiği belirtilmiştir. Bu denemede GDA'lar betoniyein içindeki şerbette bekletilirken 4 saat boyunca her 15 dakikada bir karıştırılması şerbetin GDA'lara homojen olarak nüfuz etmesini sağlamıştır. Sonuç olarak su/bağlayıcı oranı 2/10 olan şerbette diğer emdirme yöntemlerinin aksine şerbetin GDA'ları kaplayacak ve onların içerisine nüfuz edebilecek miktar ve akışkanlıkta olduğu görülmüştür. Şekil 2.25'de denenen her bağlayıcı için elde edilen en düşük GDA su emme değerlerini veren şerbet tipleri verilmiştir. Çalışmanın devamında GPB üretiminde kullanılacak GDA'ları iyileştirmek için bu şerbetler kullanılmıştır.



Şekil 2.25. 4. puzolan emdirme yöntemi sonucunda seçilen agregaların su emme yüzdeleri

Sonuç olarak su/bağlayıcı oranı 2/10 olan %100 çimento, çimento + %30 SD, çimento + %20 MK, çimento + %50 UK ve çimento + %40 YFC içeren şerbetler yukarıda belirtilen şekilde GDA'lara emdirilmiş ve kurutulmuştur. Şekil 2.26'da hazırlanan GDA'ların görüntüsü yer almaktadır. Bu agregalar Şekil 2.27'de görüldüğü gibi sandıkların içinde depolanmıştır.



Şekil 2.26. Emdirme işlemi sonunda elde edilen GDA'lardan bir örnek



Şekil 2.27. Kuruyan GDA'ların elenmesi ve laboratuvarında muhafaza edilmesi

2.3.2. Agregaların Aşınma Direnci ve Darbe Dayanımlarının Belirlenmesi

Belirlenen emdirme yönteminin GDA'ların aşınma direnci ve darbe dayanımları üzerindeki etkisini belirlemek ve karşılaştırma yapabilmek için şerbet emdirilmiş GDA'lar, emdirme yapılmamış GDA'lar ve normal agregalar üzerinde Los Angeles aşınma ve darbe dayanımı deneyleri yapılmıştır.

2.3.2.1. Agregaların Los Angeles Aşınma Direncinin Belirlenmesi

Los Angeles aşınma direnci TS EN 1097-2 standardınca belirlenmiştir. Dmax 16 mm için standartta belirtildiği gibi C sınıfı agrega numunesi hazırlanmıştır. Buna göre agregalar 9.5/6.3 ve 6.3/4.75 mm eleklerden elenmiştir. Agregalar elendikten sonra ince malzemelerin ayıklanması için standartta belirtildiği üzere 1.6 mm elekten yıkanmıştır. Şekil 2.28’de agregaların deney için hazırlanma süreci gösterilmiştir.



Şekil 2.28. Agregaların elenip 1.6 mm elekten yıkanması ve etüvde kurutulması

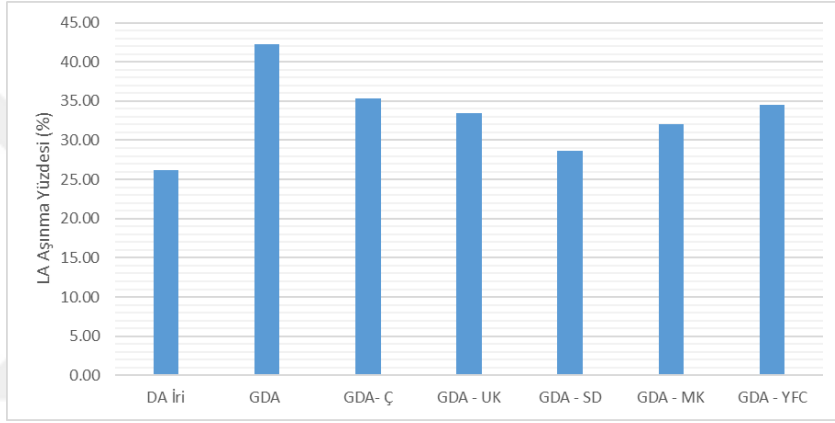
Yıkanan agregalar etüvde kurutulduktan sonra deney için 5 kg agrega alınıp 8 adet bilye ile deney aletinin içine konulmuştur. Cihazın tamburu dakikada 32 devir yaparak toplamda 500 devir çevrilmiştir. Tamburdan alınan agregalar 1.6 mm elekten yıkanarak elenmiş ve sonra etüvde kurutulmuştur. Kuruyan agregalar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra tartılmıştır. Şekil 2.29’da deneyin yapılış aşamaları görülmektedir. Tüm işlemler sonunda agregaların Los Angeles aşınma değerleri Denklem 2.1 ile belirlenmiştir.



Şekil 2.29. Deneye hazır hale getirilen agrega ve bilyalar, bilyaların tambura konulması ve aşındırılan agregaların deney sonunda tamburdan alınması

$$\text{Los Angeles Katsayısı (\%)} = \frac{5000-m}{5000} \times 100 \quad (2.1)$$

Şekil 2.30'da agregalara ait Los Angeles aşınma sonuçları gösterilmiştir. Normal iri agreganın ve GDA'nın Los Angeles katsayıları sırasıyla % 26.14 ve % 42.7 olarak belirlenmiştir. Çimento, UK, SD, MK ve YFC'li şerbet emdirilen GDA'ların Los Angeles katsayıları sırasıyla %35.37, %33.49, %28.65, %32.01 ve %34.53 olmuştur. Sonuç olarak tüm puzolanik şerbet emdirilen GDA Los Angeles katsayıları şerbet emdirilmeyen GDA'ya göre daha düşük çıkmıştır. En fazla azalma SD şerbeti ile sağlanmıştır.



Şekil 2.30. Agregaların Los Angeles aşınma değerleri

2.3.2.2. Agregaların Darbe Direncinin Belirlenmesi

NA, GDA ve şerbet emdirme işlemi uygulanmış GDA'ların Darbe direnci BS 812-112 standardına göre belirlenmiştir. Bu deneyde kullanılacak agregalar etüvde 4 saat boyunca 100 °C'de kurutulduktan sonra kuru agregalar laboratuvarında bir süre soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan agregalar 12.5 ve 10 mm eleklerden elenmiş ve arada kalan malzemeler deneyde kullanılmıştır. Agregalar deney ölçü kabına 3 aşamada konulmuş ve her aşamada 25 kez şişlenerek sıkıştırılmış ve konulan agreganın ağırlığı belirlenmiştir. Ölçü kabındaki malzeme deney cihazının haznesine konularak deney cihazındaki ağırlık 380 mm yükseklikten serbest düşme ile 15 kez düşürülerek agregaların bu düşen ağırlık altında parçalanması sağlanmıştır. Kırılan agregalar 2.36 mm elekten elenerek kırılan elek altı ince malzeme miktarı belirlenmiştir. Deney sonunda 2.36 mm elek altı malzemenin, deneye giren ilk malzemeye oranı belirlenerek agregaların darbe dayanımı Denklem 2.2'ye göre hesaplanmıştır. Bu

denklemdaki M1 ve M2 sırasıyla deneyden önce deney kabına koyulan 12.5-10 mm arası kuru malzemenin ağırlığı ve deney sonucunda 2.36 mm elekten elenen malzemenin ağırlığıdır. Şekil 2.31 ve Şekil 2.32’de deneyin yapılışı gösterilmiştir.

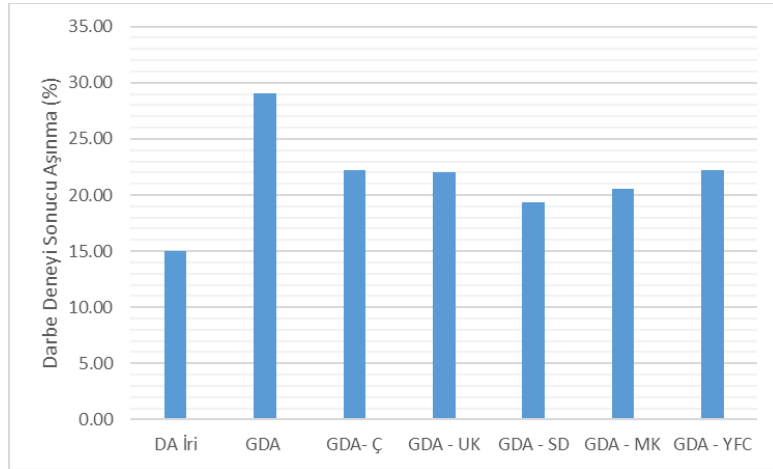
$$\text{Agrega Darbe İndeksi (\%)} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (2.2.)$$



Şekil 2.31. Agregaların elenerek 12.5/10 mm arası malzemenin elde edilmesi, deney kabına yerleştirilmesi ve deneyin yapılışı



Şekil 2.32. Darbe deneyi sonunda agregaların 2.36 mm elekten elenerek kırılan ince malzeme miktarının belirlenmesi



Şekil 2.33. Agregalara ait darbe deneyi sonuçları

Şekil 2.33'te agregalara ait darbe deneyi sonuçları gösterilmiştir. Normal iri agreganın ve GDA'nın darbe değerleri sırasıyla % 15.01 ve % 29.05 olarak belirlenmiştir. Çimento, UK, SD, MK ve YFC'li şerbet emdirilen GDA'ların darbe değerleri sırasıyla %22.2, %22, %19.37, %20.54 ve %22.21 olmuştur. Sonuç olarak tüm puzolanik şerbet emdirilen GDA darbe değerleri şerbet emdirilmeyen GDA'ya göre daha düşük çıkmış, en fazla azalma SD şerbeti ile sağlanmıştır.

Bu sonuçlar puzolanik şerbet emdirilen GDA'ların mekanik özellikleri ve yüzey sertliklerinin arttığını göstermektedir. Genel olarak şerbet ile iyileştirme yöntemi GDA etrafında ince ve sert bir tabaka oluşturarak GDA'nın kırılma ve darbe dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca puzolanik şerbetlerin içindeki puzolanların GDA içindeki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek CSH jelleri oluşturup daha yoğun bir eski harç tabakası oluşturması GDA'nın en zayıf bölgesi olan eski harç kısmının daha yoğun ve kırılmaya karşı daha dayanıklı bir hale getirmiştir. Benzer sonuçlar literatürdeki çalışmalarda da görülmüştür (Çakır, 2014; Zhang vd., 2016).

2.4. Yapılan Deneyler ve Kullanılan Ekipmanlar

2.4.1. Geopolimer Beton Üretimi

GPB üretiminde kullanılan SH çözeltisi, GPB üretiminden bir gün önce hazırlanmıştır. Çözelti hazırlanırken önce pelet formdaki sodyum hidroksit taneleri tartılarak cam kaba konulmuş ve üzerine su eklenerek yavaşça karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra karışımın soğuması ve tamamen homojen hale gelmesi için çözelti laboratuvar ortamında bir gün bekletilmiştir. Şekil 2.34'te sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanışı gösterilmektedir.



Şekil 2.34. Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması

Beton üretiminde Şekil 2.35'te gösterilen 60 litre kapasiteli eğik eksenli betoniye kullanılmıştır. Önceden nemlendirilen betoniye sırasıyla iri ve ince agrega konulduktan sonra üzerine doyma suyu eklenip 1-2 dakika karıştırılarak agregalar suya doyurulmuş ve daha sonra puzolanik madde betoniye ilave edilmiştir. Malzemeler homojen bir hale gelene kadar karıştırıldıktan sonra alkali çözeltiler ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi yavaşça ilave edilmiştir. Alkali çözeltisinin bağlayıcıya oranı ve SS/SH oranı 0.5 ve 2 olarak seçilmiştir. SH çözeltisinin molaritesi 12'dir. Tüm malzemeler yaklaşık 3 dakika boyunca homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Taze beton deneyleri yapıldıktan sonra taze beton sarsma tablasının üzerindeki kalıplara iki aşamada yerleştirilmiş ve her bir aşamada sarsma masası titretilerek betonun kalıba boşluksuz bir şekilde yerleştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 2.36'da GPB üretiminden fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 2.35. Geopolimer beton üretiminde kullanılan 60 litre kapasiteli eğik eksenli betoniye



Şekil 2.36. Geopolimer beton üretimi

UK ve YFC kullanılarak üretilen GPB'ler üretimin hemen ardından Şekil 2.37'de görülen 80 °C sıcaklıktaki buhar kürü kabineye yerleştirilmiştir ve 3 saat sonra numuneler

kabinden alınarak Şekil 2.38’de görüldüğü gibi kalıptan çıkarılmıştır. Bunun nedeni, yapılan deneme betonlarında kür boyunca betonların kalıplarla birlikte kür edilmesi halinde betonların kalıplara yapıştığı ve kalıplardan çıkmasının zorlaşmasının gözlenmesidir. Kalıptan çıkarılan numuneler tekrar kabine geri konularak toplam 24 saat olacak şekilde küre devam edilmiştir. Buhar kürü sırasında numunelerin üzerleri naylon ile örtülerek buhar kürü kabininin üst kapağında yoğunlaşan dolaylı oluşan su damlacıklarının numunelere damlaması önlenmiştir.



Şekil 2.37. Geopolimer betonlara buhar kürü uygulanması



Şekil 2.38. Geopolimer betonların kalıplardan çıkarılması ve laboratuvar ortamında saklanan numuneler

MK kullanılarak üretilen betonlarda ise herhangi bir buhar kürü işlemi uygulanmamıştır. Bunun sebebi, buhar kürü uygulanması sonucu GPB’lerde oluşan aşırı

rötredir. Kalıplara dökülen betonlar laboratuvar koşullarında bir gün priz alması beklendikten sonra kalıplardan sökülerek deney gününe kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir.

Üretilen GPB karışımlarının bir metreküp için malzeme miktarları Tablo 2.7’de verilmiştir. Bu tabloda ilk harf GPB’nin bağlayıcı malzemesi, ikinci kısım agrega tipini, üçüncü kısım ise GDA’ya hangi şerbetin emdirildiğini göstermektedir. Örneğin “UK NA”, uçucu kül ve normal agregayla üretilen karışımı temsil ederken; “UK GDA-Ç”, uçucu kül ile üretilen ve iri agregası çimento şerbeti emdirilmiş GDA olan karışımı temsil etmektedir. GDA’lara emdirilen puzolanlı şerbetlerin özellikleri dördüncü şerbet emdirme denemesinde belirlendiği gibi %100 çimento, çimento + %30 SD, çimento + %20 MK, çimento + %50 UK ve çimento + %40 YFC’dir.

Tablo 2.7. GPB’lerin bir metreküpü için malzeme miktarları (kg/m³)

Numune Kodu	UK	YFC	MK	16/8 Agrega	8/4 Agrega	Kum	İlave Su
UK NA	400	-	-	703.22	351.61	684.12	-
UK GDA	400	-	-	637.95	315.34	684.12	-
UK GDA-Ç	400	-	-	708.14	341.66	684.12	-
UK GDA-UK	400	-	-	744.33	355.29	684.12	-
UK GDA-SD	400	-	-	805.61	378.61	684.12	-
UK GDA-MK	400	-	-	783.11	368.58	684.12	-
UK GDA-YFC	400	-	-	718.70	336.79	684.12	-
YFC NA	-	400	-	730.25	365.13	710.42	-
YFC GDA	-	400	-	662.48	317.15	710.42	-
YFC GDA-Ç	-	400	-	735.36	354.80	710.42	-
YFC GDA-UK	-	400	-	772.95	368.95	710.42	-
YFC GDA-SD	-	400	-	836.59	393.16	710.42	-
YFC GDA-MK	-	400	-	813.22	382.75	710.42	-
YFC GDA-YFC	-	400	-	746.33	349.74	710.42	-
MK NA	-	40	360	712.55	356.28	693.20	40
MK GDA	-	40	360	646.42	309.46	693.20	40
MK GDA-Ç	-	40	360	717.54	346.20	693.20	40
MK GDA-UK	-	40	360	754.21	360.01	693.20	40
MK GDA-SD	-	40	360	816.30	383.63	693.20	40
MK GDA-MK	-	40	360	793.50	373.47	693.20	40
MK GDA-YFC	-	40	360	728.24	341.26	693.20	40

*Tüm üretimlerde SS: 133.33 kg, SH: 66.67 kg, SA: 16 kg olarak kullanılmıştır.

2.4.2. Taze Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler ve Kullanılan Cihazlar

2.4.2.1. Çökme Deneyi

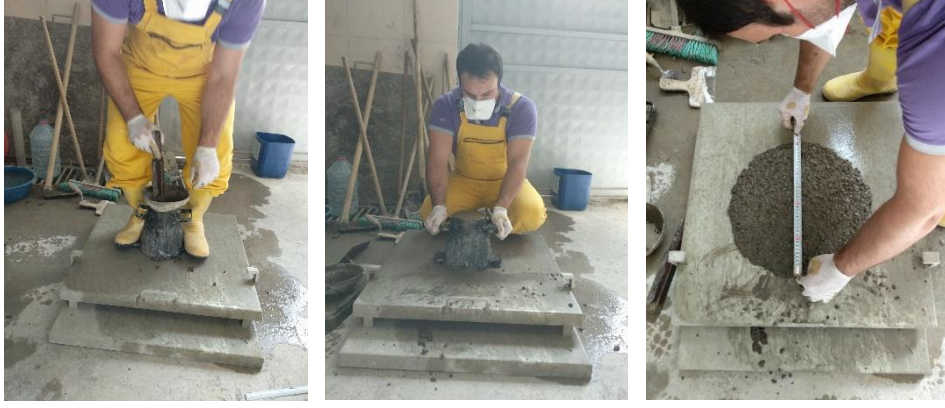
Üretilen geopolimer betonların çökme deneyleri TS EN 12390-2 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.39’da çökme deneyinin yapılışı gösterilmiştir.



Şekil 2.39. Çökme deneyi

2.4.2.2. Yayılma Deneyi

Yayılma deneyi TS EN 12350-5 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yayılma tablası düz bir zemine yerleştirildikten sonra üzeri nemlendirilir. Deney konisine iki eşit seviyede doldurulan taze geopolimer beton 10’ar kez tokmaklanarak sıkıştırılmıştır. Doldurulan koni, düşey şekilde kaldırılmıştır. Daha sonra deney tablasının üst levhası tutma yerinden 15 kere kaldırılıp kendi ağırlığı ile düşürülerek betonun tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. 15 düşüşün sonunda yayılma değerine dik iki eksenden ölçülerek ortalaması alınarak yayılma çapı belirlenmiştir. Şekil 2.40’ta deneyin yapılışı gösterilmiştir.



Şekil 2.40. Yayılma deneyi

2.4.2.3. Birim Ağırlık Deneyi

Taze haldeki betonun birim ağırlığını belirlemek için 7 litrelik birim ağırlık kovasına 3 aşamada beton doldurulmuş ve sıkıştırılmıştır. Tartılan beton dolu kalıbın ağırlığı belirlenip kabın hacmine bölünerek taze betonun birim ağırlığı belirlenmiştir.

2.4.3. Sertleşmiş Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

2.4.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Üretilen geopolimer betonların basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına göre belirlenmiştir. Deneyde her bir üretim için üçer adet 10 cm'lik küp numune kullanılmıştır. Geopolimer betonların basınç dayanımları 7, 28 ve 90 günlerde belirlenmiştir. Şekil 2.41'de basınç dayanımı deneyinde kullanılan 300 ton kapasiteli Dinç Makine yapımı hidrolik pres ve basınç dayanımı deneyinin yapılışı görülmektedir. Üretilen geopolimer betonların basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına göre belirlenmiştir.



Şekil 2.41. Deneylerde kullanılan hidrolik pres

2.4.3.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Üretilen geopolimer betonların yarmada çekme dayanımları TS EN 12390-6 standardına göre belirlenmiştir. Deneyde 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Her bir geopolimer beton için üç adet numune kullanılmıştır. 7,28 ve 90 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımları Denklem 2.3'teki bağıntıyla belirlenmiştir. Şekil 2.42'de deneyin yapılışı gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (2.3)$$

Burada, P kırılma yükünü (N), L numune boyunu (mm), D numune çapını (mm) σ ise hesaplanan yarmada çekme dayanımını (MPa) göstermektedir.



Şekil 2.42. Yarmada çekme deneyi

2.4.3.3. Su Emme Deneyi

Sertleşmiş gepolimer betonların su emme yüzdeleri TS EN 12390-7 standardına göre belirlenmiştir. Numuneler Şekil 2.43'te görülen Geniar marka etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulan 10 cm küp numuneler tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kullanılan terazi Şekil 2.44'te görülen 6 kg kapasiteli Radway marka hassas terazidir. Daha sonra bu numuneler Şekil 2.45'te görüldüğü gibi 48 saat boyunca suya batırılarak suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır. 48 saat sonunda suya doymun hale gelen numuneler doymun kuru yüzeyli hale getirildikten sonra tekrar ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numunelerin fırın kurusu, doymun yüzey kuru ve su içinde ağırlıkları belirlenerek su emmeleri ve poroziteleri belirlenmiştir.



Şekil 2.43. Deney örneklerini kurutmak için kullanılan etüv ve numunelerin etüvde kurutulması



Şekil 2.44. Hassas terazi



Şekil 2.45. Numunelerin doymun kuru yüzey hale getirilmesi

2.4.3.4. Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği Deneyi

Üretilen geopolimer betonlar üzerinde basınç altında maksimum su işleme derinliği deneyi TS EN 12390-8 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında muhafaza edilen numunelerin suya temas edecek yüzeyleri tel fırça ile aşındırılıp düzleştirilmiştir. Basınçlı suya maruz kalacak yüzey aşağı bakacak şekilde deney cihazına yerleştirilen numuneler contalar arasına yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Deneye ilişkin fotoğraf Şekil 2.46'da verilmiştir. Numuneler cihaza yerleştirildikten sonra cihazın su hazneleri su ile doldurulduktan sonra sisteme su verilerek kompresör çalıştırılmıştır. Kompresör yardımıyla 5 bar basınçlı su numunenin alt yüzeylerine 72 saat boyunca uygulanmıştır. Basınçlı suya maruz kalan numuneler cihazdan alınarak suya maruz kalan yüzeyin dik eksenini doğrultusunda numune beton presi yardımıyla ortadan ikiye ayrılmıştır.

Yarılmış numune yüzeyindeki maksimum su ilerlemesi kumpas yardımıyla Şekil 2.47’de ki gibi belirlenmiştir.



Şekil 2.46. Basınçlı su işleme derinliği deneyi



Şekil 2.47. Basınçlı su işleme derinliğinin ölçümü

2.4.3.5. Kılcal Su Emme Deneyi

Çalışmada kılcal su emme deneyi ASTM C1585 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deney için 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Beton numuneler deney öncesi 48 saat 70°C’de kurutulmuş ve ardından deney anına kadar 20°C’de bekletilmiştir.

Numunelerin kuru ağırlıkları tartılarak belirlendikten sonra yan yüzlerinden su girişini önlemek amacıyla su geçirimsiz bantla yalıtılmıştır. Daha sonra numunelerin alt yüzleri yaklaşık 2 mm kadar suya batacak şekilde, Şekil 2.48’de görünen deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deneyin gerçekleştirilmesinde 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 1440 dakikalık süreler sonunda emilen su miktarı numuneler tartılarak belirlenmiştir. Kılcallık katsayısı hesabı için Denklem 2.4’teki bağıntı kullanılmaktadır. Kılcallık katsayısı Q/A ile $\sqrt{t}$ arasında çizilen ilişkinin lineer kısmın eğimi olarak belirlenmektedir.

$$\frac{Q}{A} = k \times \sqrt{t} \quad (2.4)$$

Burada, Q emilen su miktarı(g), A numunenin suya değen kesit alanı(mm²), k kılcallık katsayısı ve t deney başlangıcından son okuma arasında geçen süre (s)’dir.



Şekil 2.48. Kılcallık deney düzeneği

2.4.3.6. Hızlı Klorür Geçirirliiği Deneyi

Numuneler üzerinde hızlı klorür deneyini uygulamak için ASTM C 1202 standardına uygun olarak tasarlanmış olan ve Şekil 2.49’da gösterilen cihaz kullanılmıştır. Bu deneyde çözeltilerin betona nüfuz etme seviyesine göre betonun elektriksel iletkenliği ölçülmüştür. Deneyde 10 cm çapında 20 cm yüksekliğindeki silindir numuneler kullanılmıştır. Kür havuzundan alınan numuneler yüzeyleri kuruyana kadar klimatize odada bekletilmiştir. Numunelerin iki ucundan 2.5 cm’lik dilimler kesildikten sonra numunelerin kalan kısmından 5 cm yüksekliğinde yeni bir dilim kesilmiştir. Son kesilen 5 cm’lik dilim deney hücrelerinin içindeki kauçuk halkaların üzerine oturtularak deney hücreleri arasına yerleştirilmiştir.

Deney hücrelerinin cıvataları sıkılarak daha sonra koyulacak olan çözeltinin hücre dışına sızması sağlanmıştır. Cıvatalar sıkıldıktan sonra numunelerin açıkta kalan yüzeyi ve deney hücresiyle birleşim yeri beyaz silikonla hiç boşluk kalmayacak şekilde kaplanmıştır. Silikon uygulamasının amacı, çözeltinin numunenin yüzeylerinden ilerlemeyip sadece silindirik kesit boyunca nüfuz etmesini sağlamaktır. Silikon uygulanan numune laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır. Silikonlar kuruduktan sonra, silikonlu yüzeylerin etrafı lastikle sıkıca sarılmıştır. Bu işlemin amacı deney sırasında akımla ısınan numunenin yüzeyindeki silikonun numune yüzeyinden ayrışmasını engellemektir. Test hücrelerinin (+) kutbuna 3M NaOH, (-) kutbuna da %3 NaCl çözeltisi doldurulmuştur. 60 V potansiyel fark oluşturan aparatın kabloları hücrelerin kutuplarına bağlanmıştır. Deney başlatıldıktan sonra 6 saat boyunca her yarım saatte bir devreden o an geçen akım değerleri ölçülüp kaydedilmiştir.



Şekil 2.49. Hızlı klorür geçirimsizlik deneyinin yapılışı

2.4.3.7. Elektriksel Özdirenç Deneyi

Doygun kuru yüzey haldeki 100 mm çapında, 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde Giatec Surf marka modellenli cihaz ile elektriksel özdirenç ölçümü yapılmıştır. Bu deneyde doymuş kuru yüzey haldeki GPB numuneleri kullanılmıştır. Cihazın deney hücresi içerisindeki alıcıların üzerlerine iletken jel sürüldükten sonra numuneler

hücreye yerleştirilmiştir. Cihaz üzerinde birbirine eşit aralıkta konumlandırılmış dört adet elektrot vardır. Bunlardan ikisi akım verirken diğer ikisi de bu akım sonucu ortaya çıkan potansiyel farkı düşürür. Sonuç olarak bu yöntemle tahribatsız bir şekilde betonun elektriksel özdirenci ölçülür. Şekil 2.50’de deneyin yapılışı gösterilmiştir.



Şekil 2.50. Beton yüzeyde elektriksel özdirenci testi

2.4.3.8. Ultrases Hızlarının Belirlenmesi

Sertleşmiş GPB’lerin ultrases hızları her bir karışım için üçer adet 100 mm küp numuneler üzerinde IS 13311 standardına göre belirlenmiştir. Bu deneyde küp numunelerin karşılıklı yüzeyleri üzerine yerleştirilen probalar vasıtasıyla numunenin içinden geçen ses dalgasının ne kadar sürede geçtiği mikrosaniye cinsinden belirlenmiştir. Belirlenen geçiş hızı, yol/zaman bağıntısı kullanılarak km/s cinsinden Denklem 2.5’e göre belirlenmiştir. Tablo 2.8’de IS 13311 standardına göre betonun ultrases hızlarına göre betonun kalitesinin sınıflandırılması verilmiştir. Şekil 2.51’de deneyde kullanılan Proceq markalı ultrases cihazı, Şekil 2.52’de ise ultrases geçiş hızı ölçümü gösterilmiştir.

$$\text{Ultrases Hızı (km/s)} = \frac{\text{Ses dalgasının ilerleyeceği iki prob arası mesafe (mm)}}{\text{İletim süresi (\mu s)}} \quad (2.5)$$



Şekil 2.51. Proceq Tico marka ultrases ölçüm cihazı



Şekil 2.52. Ultrases geçiş hızı ölçümü

Tablo 2.8. IS 13311 standardına göre betonun ultrases hızı-kalite sınıflandırılması

Ultrases Hızı (km/s)	Beton Kalitesi
>4.5	Mükemmel
3.5 – 4.5	İyi
3.0 – 3.5	Şüpheli
2.0 – 3.0	Zayıf
< 2.0	Çok zayıf

2.4.3.9. Schmidt Çekici Deneyi

Schmidt çekici deneyi, betonun basınç dayanımını ve bağıl kalitesini belirlemede kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu deneyde çekiç beton test çekici betona çarptıktan sonra çekicin içerisindeki bilye betonun sertliğine oranla geri seker. Test çekici tarafından ölçülen bu geri tepme betonun dayanımı ile ilgili bilgi verir. Sonuç olarak bu yöntemde betonun yüzey sertliğinden faydalanılarak beton basınç dayanımı yaklaşık olarak belirlenir. Şekil 2.53'te deneylerde kullanılan Proceq marka Schmidt çekici gösterilmiştir.



Şekil 2.53. Proceq marka Schmidt çekici

2.4.3.10. Aşınma (Böhme) Deneyi

TS 699/T1 standardına göre gerçekleştirilen aşınma deneyi için 71x71x71 mm boyutunda küp numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler, doygun halde havada ve suda tartılarak birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra 70 °C’de 48 saat kurutulmuştur. 20 °C’deki klimatize odada soğuyan numuneler zımpara tozu serpilmiş aşındırıcı disk üzerine yerleştirilerek 22 tur çevrilmiştir. Her 22 tur sonrasında numune 90° döndürülmüş, disk yüzeyi temizlenerek yeni zımpara tozu serpilmiştir. Bu işlem 16 kez tekrarlanmıştır. Deneylerde kullanılan Böhme test cihazı Şekil 2.54’te görülmektedir. Aşındırma işlemleri bittikten sonra, hacimsel aşınma kaybı Denklem 2.6’daki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$DV = Dm / \Delta r \quad (2.6)$$

Burada;

DV= Hacimsel kayıp (cm³/50cm²)

Dm= 16 periyot sonrası kütle kaybı (gr)

δR= Örnek Birim hacim ağırlığı (gr/cm³)



Şekil 2.54. Böhme yüzey aşındırma test cihazı

2.4.3.11. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisini belirlemek amacıyla ultrases hızları belirlenen 10 cm küp numuneler önce 48 saat boyunca 70 °C’deki etüvlerde bekletilerek ön kurutma yapılmıştır. Isıtma hızı 6-10 °C/dk olan fırına yerleştirilen numuneler hedeflenen sıcaklıkta 1 saat

bekletilmiştir. Numunelere uygulanan sıcaklıklar 200 °C, 500 °C ve 800 °C’dir. Her bir sıcaklık için 3 numune kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulaması Şekil 2.55’de görülen Ref-San marka fırında gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık uygulaması bittikten sonra etüvden alınan numuneler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma süreci tamamlanınca numunelerin ultrases hızları ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar, sıcaklığa maruz kalmamış referans numuneleriyle karşılaştırılmıştır.

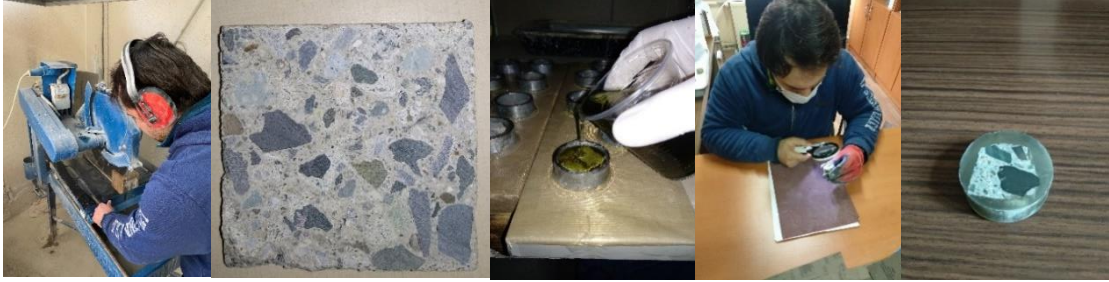


Şekil 2.55. Yüksek sıcaklık etkisi için kullanılan Ref-San marka fırın ve GPB’lere yüksek sıcaklık uygulanması

2.4.3.12. Mikro Sertlik Analizi

Numunelerin mikroyapısal mekanik özelliklerinin belirlenmesi için Vickers mikro sertlik analizi yapılmıştır. Bu analizde agrega, eski ve yeni AGB, yeni harç tabakasının vickers sertlikleri belirlenerek puzolan şerbeti emdirme işleminin etkisi belirlenmiştir. Bu deneyde 2 kilogram kuvvet kapasiteli İnnovatest marka HVS-5Z model numaralı mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Beton numunelerinden elde edilen beton parçacıkları mikro analiz numune kalıbına konularak üzerine reçine ve sertleştiriciden oluşan karışım dökülmüş ve 24 saat reçinenin sertleşmesi beklenmiştir. 24 saatin sonunda reçine sertleştikten sonra elde edilen numune zımparalanarak yüzeyi düzleştirilmiştir. Zımparalama işleminden sonra numunenin yüzeyi parlatılarak deneye hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan numune mikrosertlik cihazına yerleştirildikten sonra 10 saniye süreyle 10 gram yük

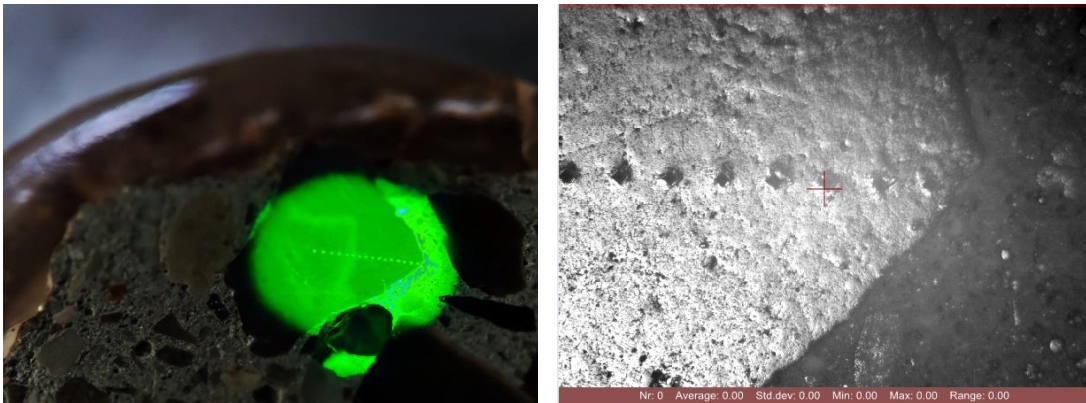
uygulanarak numune üzerinde mikro çentik oluşturularak mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Numunelerde agreganın iç yüzeyinden 10 mikron mesafe ile agreganın dış yüzeyinden 120 mikron mesafeden ölçüm alınmıştır. Şekil 2.56, 2.57 ve 2.58’de mikrosertlik numunelerinin hazırlanışı, deneyin yapılışı ve deney yapılan bir numunede oluşan izler gösterilmiştir.



Şekil 2.56. Mikrosertlik numunelerinin kesilmesi, reçineye alınması, zımparalanması ve deneye hazır olan numune



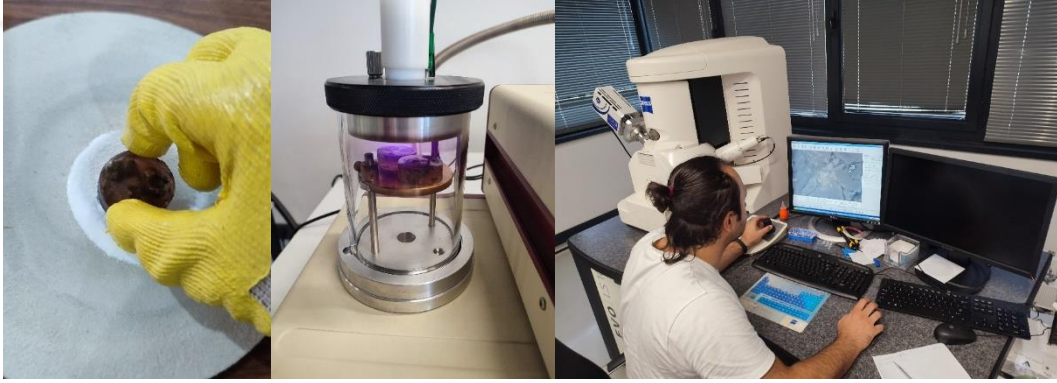
Şekil 2.57. Innovatest marka mikrosertlik cihazı ve mikrosertlik ölçümü



Şekil 2.58. Mikrosertlik deneyi yapılan bir numunenin deney sonrası görüntüsü

2.4.3.12. Mikroyapı İncelemesi

GPB'lerin mikro yapısının incelenmesi için, mikrosertlik başlığında anlatıldığı gibi numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler zımparalandıktan sonra alümina çözeltisi ile parlatılarak üzerindeki tüm çizikler giderilmiştir. Parlatılan numunelerin yüzeyleri KTÜ MERLAB'da altın kaplatılarak deneye hazır hale getirilmiştir. Mikro yapı analizlerinde KTÜ MERLAB'da bulunan ZEISS EVO LS 10 marka ve modeli elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 2.59'da numunelerin alümina çözeltisi ile parlatılıp altın kaplanması ve mikroyapı analizinin yapılması gösterilmiştir.



Şekil 2.59. Mikroyapı analiz numunelerinin parlatılması, altın kaplanması ve analizin yapılması

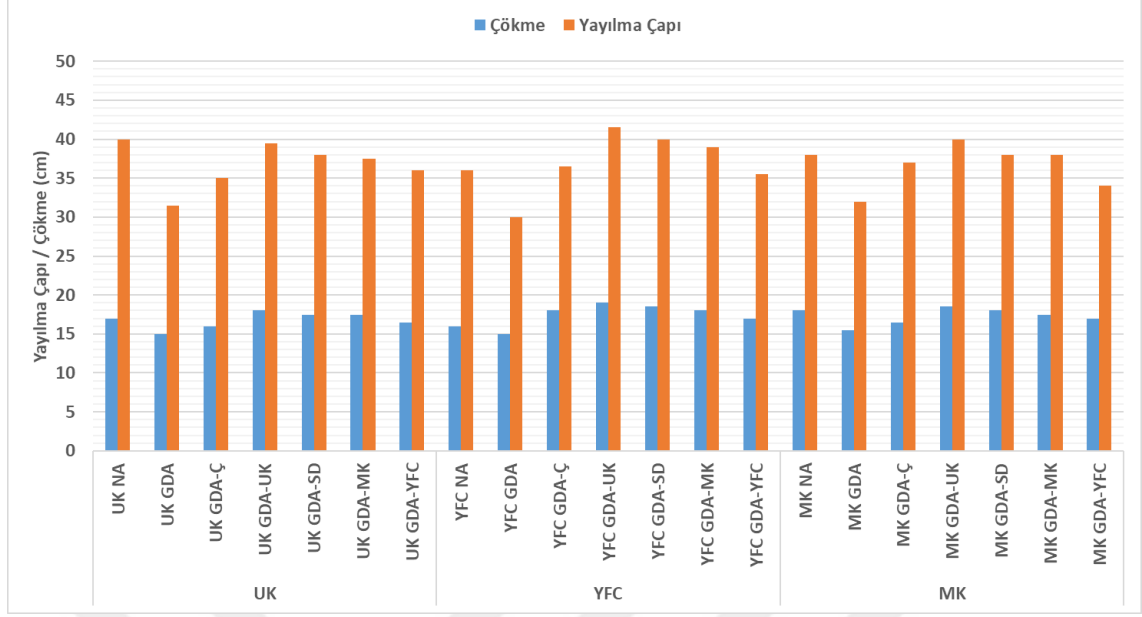
3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1 Çökme ve Yayılma Deneyi

Şekil 3.1’de, üretilen GPB’lerin çökme ve yayılma çapı değerleri gösterilmektedir. Tüm betonlarda çökme değeri S4 sınıfı olarak (15-20 cm) hedeflenmiştir. Şekil incelendiğinde tüm GPB’lerde NA ile üretilen karışımların işlenebilirliğinin yüksek olduğu, yayılma çaplarının 40 cm düzeyinde gerçekleştiği görülmüştür. GDA kullanıldığında yayılma çapları UK esaslarda %21, YFC esaslarda %17 ve MK esaslarda %16 oranında azalmıştır. GDA’nın sahip olduğu pürüzlü yüzey aderansı iyileştiren bir özellik olsa da işlenebilirliğin azalmasının sebebidir (Saloni vd. 2021).

Puzolanik şerbetle iyileştirilen GDA’lar kullanılarak üretilen GPB’lerin işlenebilirliklerinin arttığı ve tümünün işlem uygulanmamış GDA’ kullanılan GPB’den daha yüksek çökmeye ve yayılma çapına sahip olduğu görülmektedir. İşlenebilirlikteki en fazla iyileşme UK şerbeti emdirilen GDA’larla sağlanmıştır. GDA’lı GPB’lere göre UK ve MK esaslı GPB’lerde %25, YFC esaslı GPB’lerde %38 oranında artış gözlenmiştir. Bu değerler, NA’lı GPB’lerin sağladığı işlenebilirliklere eş düzeyde hatta YFC ve MK esaslı GPB’lerde daha fazla olmuştur.

Bu iyileşmenin sebebi şerbet ile modifiye edilen GDA’ların daha az su emmesi ve GDA’lar üzerine yapışan şerbetin GDA yüzeyini daha pürüzsüz bir hale getirmesi nedeniyle agregaların taze beton içerisinde daha kolay hareket etmesiyle diğer bir deyişle agregaların arasındaki sürtünmenin azalmasıyla açıklanabilir (Shi vd., 2018; Alqarni vd., 2021; Zhang vd., 2021).



Şekil 3.1 Üretilen betonların çökme ve yayılma çapı değerleri

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi puzolan kaplanan GDA’lar arasında en yüksek çökme ve yayılma çapı sağlayan, uçucu kül kaplanmış GDA’lardır. Uçucu kül kaplı GDA’ların kullanımıyla elde edilen işlenebilirlik değerleri UK ve MK esaslı geopolimerlerde NA ile üretilen betonlarınkine neredeyse eşit, YFC esaslı GPB’lerde ise bir miktar daha fazla olmuştur. Benzer şekilde Ho vd. (2018), çeşitli puzolanlar ile kapladıkları GDA’lar ile ürettikleri betonlarda en iyi işlenebilirliğin uçucu kül ile kaplanan agregalarla sağlandığını belirtmişler ve bunu uçucu külün küresel yapısı nedeniyle agreganın beton içinde daha kolay hareket etmesine yardımcı olması şeklinde açıklamışlardır.

3.2. Taze Beton Birim Ağırlıkları

Üretilen GPB’lerin taze birim ağırlıkları Tablo 3.1’de verilmiştir. Görüldüğü gibi boşluklu ve kusurlu yapısı nedeniyle birim ağırlığı düşük olan GDA’larla üretilen GPB’lerin birim hacim ağırlıkları NA ile üretilen GPB’lerden daha düşük çıkmıştır. Puzolanik şerbet emdirilen GDA’ların birim ağırlıkları GDA’ya kıyasla daha yüksek olduğundan, üretilen GPB’lerin birim ağırlıklarında da belirgin bir artış olmuştur.

UK esaslı NA’lı GPB’nin taze birim ağırlığı 2335 kg/m^3 olarak belirlenmişken GDA kullanılması durumunda taze birim ağırlık %5.3 azalarak 2216 kg/m^3 olarak olmuştur. Ç,

UK, SD, MK ve YFC şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin taze birim ağırlıkları emdirmeye yapılmamış GDA'lıya kıyasla sırasıyla %5.5, %7.4, %11, %9.3 ve %5.1 artarak 2338, 2379, 2459, 2422 ve 2329 kg/m³'e yükselmiştir.

YFC esaslı NA'lı GPB'nin taze birim ağırlığı 2399 kg/m³ olarak belirlenmişken GDA kullanılması durumunda % 5.5 azalarak 2267 kg/m³ olmuştur. Ç, UK, SD, MK ve YFC şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin taze birim ağırlıkları ise GDA'lı GPB'ye kıyasla sırasıyla % 6.1, %7.8, %11,7, %10.6 ve %5.9 artarak 2405, 2444, 2533, 2508 ve 2400 kg/m³'e yükselmiştir.

MK esaslı NA'lı GPB'nin 2401 kg/m³ olan taze birim ağırlığı, GDA kullanılması durumunda %5.4 azalarak 2277 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Ç, UK, SD, MK ve YFC şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen MK esaslı GPB'lerin taze birim ağırlıkları ise sırasıyla % 5.7, %8.1, %11.8, %9.7 ve %5.6 artarak 2396, 2450, 2535, 2488 ve 2395 kg/m³'e yükselmiştir.

Bu değerler incelendiğinde SD ve MK şerbeti emdirilmiş GDA ile üretilen GPB'lerin taze birim ağırlıklarının en yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi SD ve MK şerbeti emdirilen GDA'ların birim ağırlıklarının diğer agregalara göre daha yüksek olmasıdır.

Tablo 3.1. GPB karışımlarının taze, 28 ve 90 günlük birim ağırlıkları

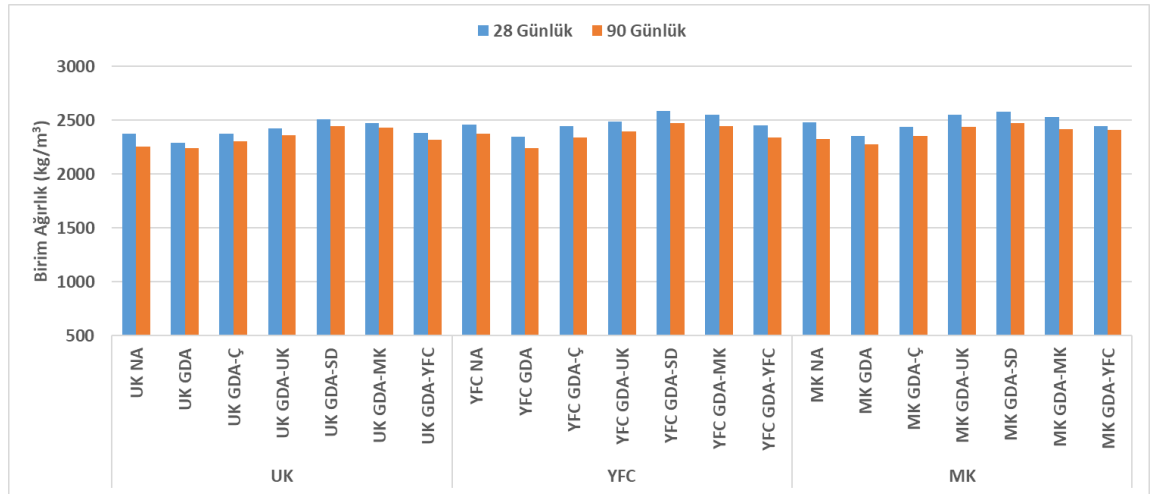
GPB Karışımları	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)	28 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)	90 Günlük Birim Ağırlık (kg/m ³)
UK NA	2335	2374	2253
UK GDA	2216	2294	2244
UK GDA-Ç	2338	2376	2306
UK GDA-UK	2379	2427	2359
UK GDA-SD	2459	2511	2445
UK GDA-MK	2422	2474	2429
UK GDA-YFC	2329	2382	2207
YFC NA	2399	2462	2378
YFC GDA	2267	2344	2240
YFC GDA-Ç	2405	2447	2340
YFC GDA-UK	2444	2490	2395
YFC GDA-SD	2533	2584	2475
YFC GDA-MK	2508	2548	2447
YFC GDA-YFC	2335	2452	2337
MK NA	2216	2480	2329
MK GDA	2338	2352	2275
MK GDA-Ç	2379	2439	2353
MK GDA-UK	2459	2549	2437
MK GDA-SD	2422	2582	2473
MK GDA-MK	2329	2528	2419
MK GDA-YFC	2399	2446	2413

3.3. Sertleşmiş Birim Ağırlık

Tablo 3.1 ve Şekil 3.2’de GPB’lerin 28 ve 90 günlük birim ağırlıkları görülmektedir. UK, YFC ve MK esaslı NA’lı GPB’lerin 28 günlük birim ağırlıkları sırasıyla 2374, 2462 ve 2480 kg/m³ olarak belirlenmiş, GDA içeren betonlarda bu değerler %3.4, %4.8 ve %5.2 azalarak sırasıyla 2294, 2344 ve 2352 kg/m³’e düşmüştür.

90 günlük betonlarda ise UK, YFC ve MK esaslı NA’lı GPB’lerin birim ağırlıkları sırasıyla 2253, 2378 ve 2329 kg/m³ olmuş, GDA içeren betonlarda ise bu değerler %0.4, 5.8 ve 2.4 azalarak sırasıyla 2244, 2240 ve 2275 kg/m³’e düşmüştür.

Her üç bağlayıcı esaslı GPB’lerde de puzolanik şerbet emdirilen GDA’larla üretilenlerin 28 gündeki sertleşmiş birim ağırlıkları emdirme yapılmamış GDA’lı GPB’lere göre artmış ve en yüksek artış SD ve MK içeren şerbetlerle elde edilmiştir. Birim ağırlıklardaki artışlar SD emdirilmiş GDA’lı GPB’lerde ortalama %9.8 düzeyinde, MK emdirilmiş GDA’lı GPB’lerde %8 düzeyinde olmuştur. Bunun sebebi SD ve MK’nin yüksek puzolanik etkisi ve ince yapıları gereği GDA’ların çatlakları içine girerek fiziksel olarak filler etkisi yaratmasıdır (Khan vd. 2017).



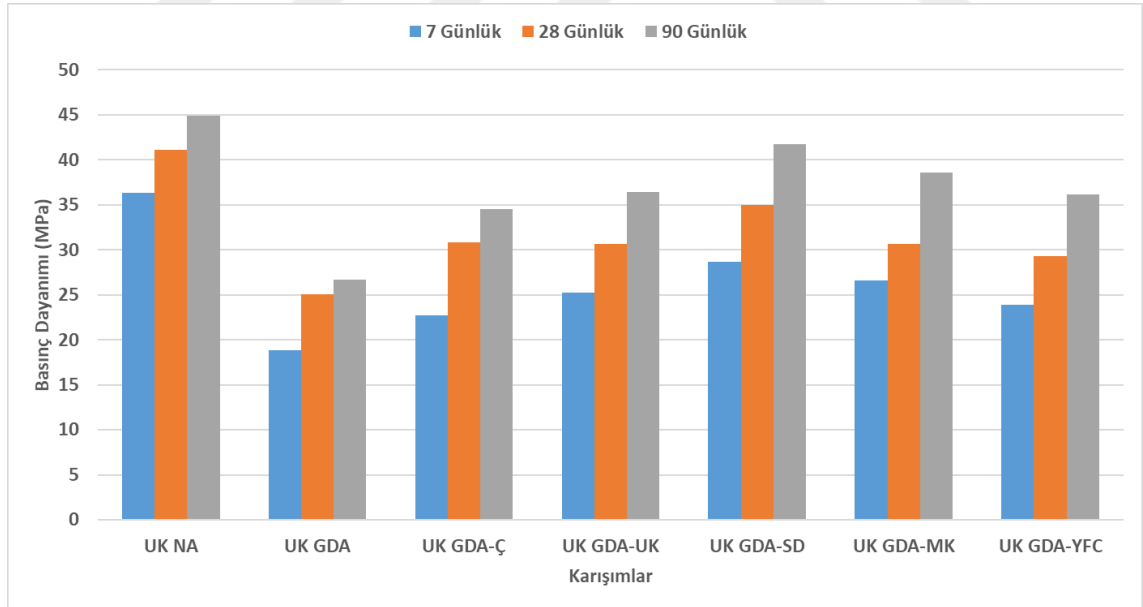
Şekil 3.2. GPB’lerin 28 ve 90 günlük sertleşmiş birim ağırlıkları

90 günlük birim ağırlıklar incelendiğinde, 28 günlük betonlara kıyasla daha düşük oldukları görülmüştür. Bunun sebebinin geopolimerizasyon reaksiyonunda suyun çimentonun hidrasyonundaki gibi kullanılmaması ve serbest suyun zamanla buharlaşıp ortamı terk ederek betonun birim ağırlığında azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

3.4. Basınç Dayanımı

Şekil 3.3'te UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK esaslı GPB'nin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 36.3 MPa, 41.1 MPa ve 44.9 MPa olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %48, %39 ve %41 azalarak 18.87 MPa , 25.11 MPa ve 26.7 MPa'ya düşmüştür.

Tüm puzolanik emdirme işlemi uygulanan GDA'lar ile üretilen UK esaslı GPB'lerin basınç dayanımları ise belirgin bir şekilde artmıştır. Çimento, UK, SD, MK ve YFC şerbetleri emdirilmiş GDA'lı GPB'lerin 90 gündeki dayanım artış oranları sırasıyla %29.2, %40, %56.5, %44.6 ve %35.5 olmuştur. Dayanımda en fazla iyileşmenin SD şerbeti emdirilmiş GDA'larla sağlandığı görülmektedir. NA ile üretilen GPB'nin 90 günlük dayanımı olan 44.9 MPa'ya oldukça yaklaşarak 42 MPa dayanım sağlamıştır. SD şerbeti emdirilmiş GDA'ların 7 ve 28 günde sağladığı iyileşme ise %51.9, ve %39.5 oranında olmuştur.

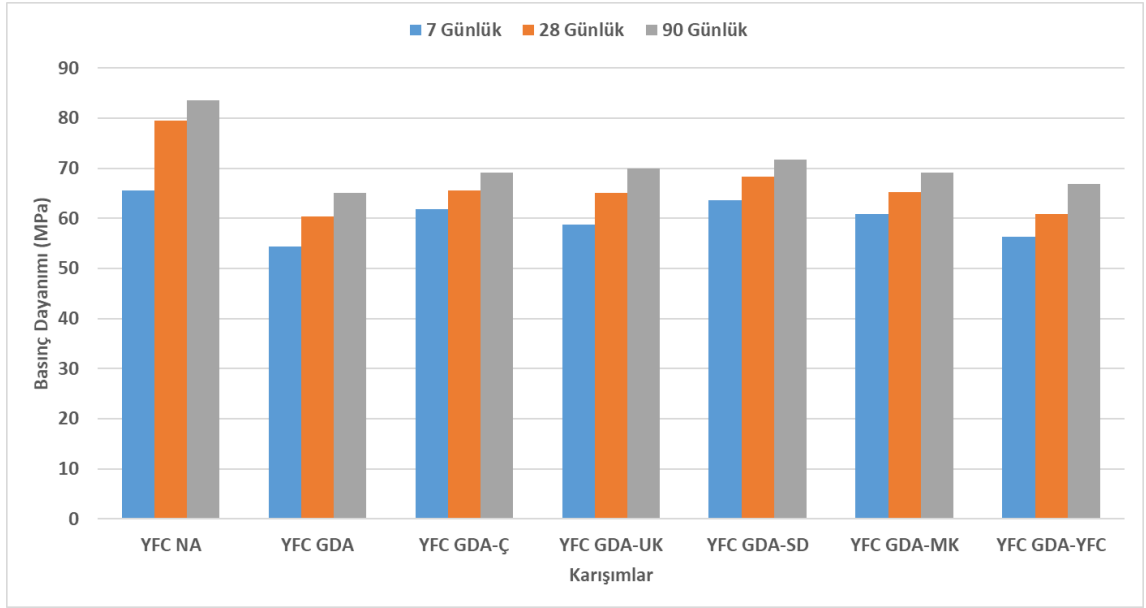


Şekil 3.3. UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 3.4'te YFC esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen YFC esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 65.6 MPa , 79.6 MPa ve 84.5 MPa olarak belirlenmiştir. GDA ile

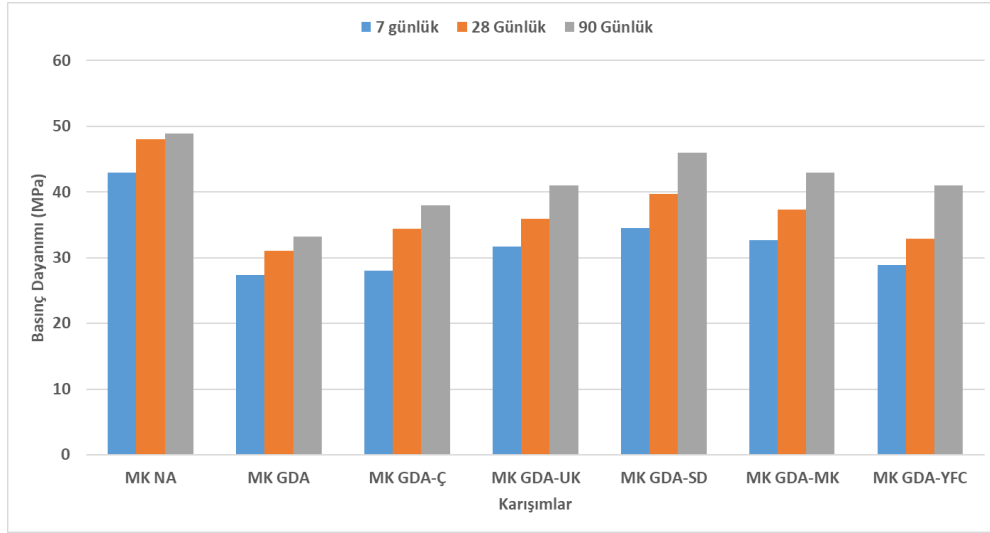
üretileen GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla % 17, %24 ve %23 azalarak 54.5 MPa, 60.4 MPa ve 65.1 MPa'a düşmüştür.

Tüm şerbet emdirilen GDA'larla üretileen GPB'lerin dayanımlarında genel olarak artış görölmesine rağmen dayanımlardaki artış oranları UK esaslı GPB'lerdeki kadar belirgin değildir ve hemen hemen tümünde aynı düzeydedir. Şerbet emdirme işlemi uygulanmamış GDA'lı GPB'lerin basınç dayanımlarına oranla sağlanan artışlar 7 günlük dayanımlar için ortalama %11, 28 günlük dayanımlar için ortalama %8 ve 90 günlük dayanımlar için ortalama %7 düzeyinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.4. YFC esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 3.5'te MK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretileen MK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 41.0 MPa, 48,1 MPa ve 48.9 MPa olarak belirlenmiştir. GDA ile üretileen GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %33, %36 ve %32 azalarak 27.3 MPa , 31.0 MPa ve 33.2 MPa'a düşmüştür. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'larla üretileen MK esaslı GPB'lerin basınç dayanımları artmıştır. En belirgin artışlar 90 günlük basınç dayanımlarında olmuştur. En yüksek artışı ise SD içeren şerbet emdirilen GDA'lı betonlar vermiştir. Bu betonun 90 günlük basınç dayanımı %39 artarak 46 MPa'ya yükselmiştir. Bu değer normal agregalı betonların 90 günlük basınç dayanımı olan 49 MPa değerine oldukça yaklaşmıştır.



Şekil 3.5. MK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Genel olarak, şerbet emdirme işlemi uygulanmış GDA'lı GPB'lerin basınç dayanımları normal GDA'lı GPB'lere göre belirgin bir şekilde artmıştır. GPB'nin bağlayıcı tipinden bağımsız olarak en iyi sonucu SD ve MK şerbeti emdirilen GDA'lı GPB'lardan elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, GDA'ların yoğunluğu arttıkça GPB'lerin dayanımlarının da arttığını göstermektedir. GDA kullanıldığında basınç dayanımlarının azalmasının ana sebebi GDA üzerinde, DA'ya kıyasla daha boşluklu, zayıf ve üzerinde çatlak gibi kusurlar olan eski harç tabakasıdır. Ayrıca bu eski harç tabakası GDA'nın yeni harç ile arasında oluşan arayüzey bölgesi DA ile üretilen betonlardan daha zayıftır. Bu zayıf arayüzey bölgesi kuvvet altında kolayca çatlayarak beton içerisinde mekanik açıdan zayıf bir bölge oluşturur (Muduli ve Mukharjee, 2019).

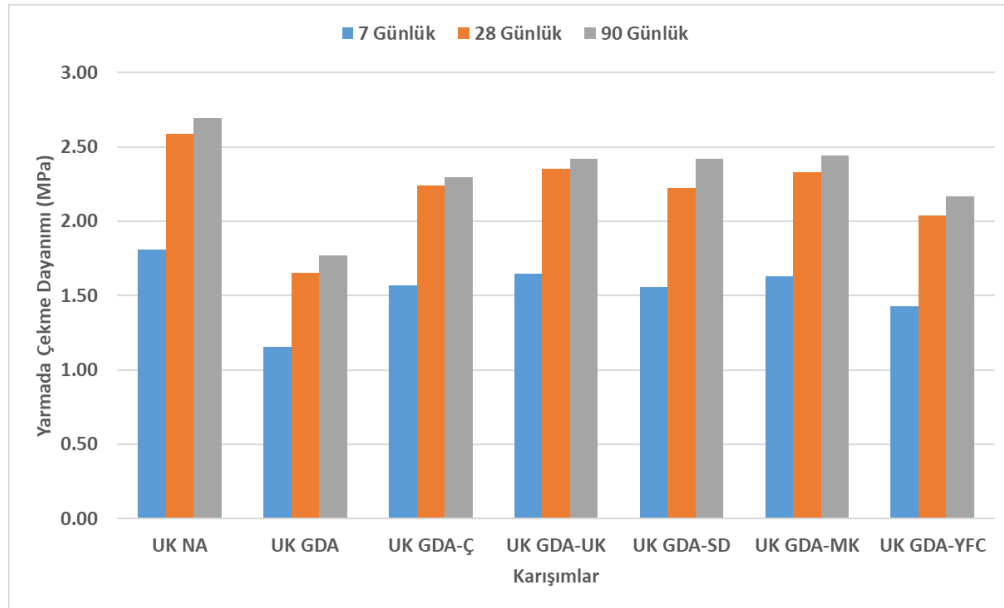
Alqarni vd. (2021)'nin yaptığı bir çalışmada silika dumanı şerbeti emdirilen GDA'lı betonların basınç dayanımları, herhangi bir işleme tabi tutulmayan GDA'larla üretilen betonlardan Dmax 10 ve 20 mm olan agregalar için sırasıyla %54 ve %32 oranında daha yüksek çıkmıştır. Alqarni vd.'ne göre dayanımlardaki bu artışın sebebi, silika dumanının GDA yüzeyindeki eski harç tabakasında bulunan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girip yeni kalsiyum silikat jelleri oluşturarak GDA boşluklarını doldurarak GDA üzerindeki eski harç tabakası daha yoğun hale getirmesidir.

UK, YFC ve MK ile üretilen GPB'lerin 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük dayanımlarına göre sırasıyla %16, 6 ve 11 oranında artmıştır. Görüldüğü gibi UK ve YFC de 10'un üzerinde dayanım artışı olurken YFC ile üretilen GPB'lerde dayanımın 28 günden

sonra aynı düzeyde artış göstermemiştir. Bunun sebebi YFC içindeki yüksek CaO içeriğinin geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırıp betonun ulaşabileceği maksimum dayanım seviyelerine erkenden ulaşmasıdır. Ayrıca YFC'li GPB'lere uygulanan yüksek sıcaklıktaki buhar kürü bu reaksiyonu daha da hızlandırmıştır (Jindal, 2018).

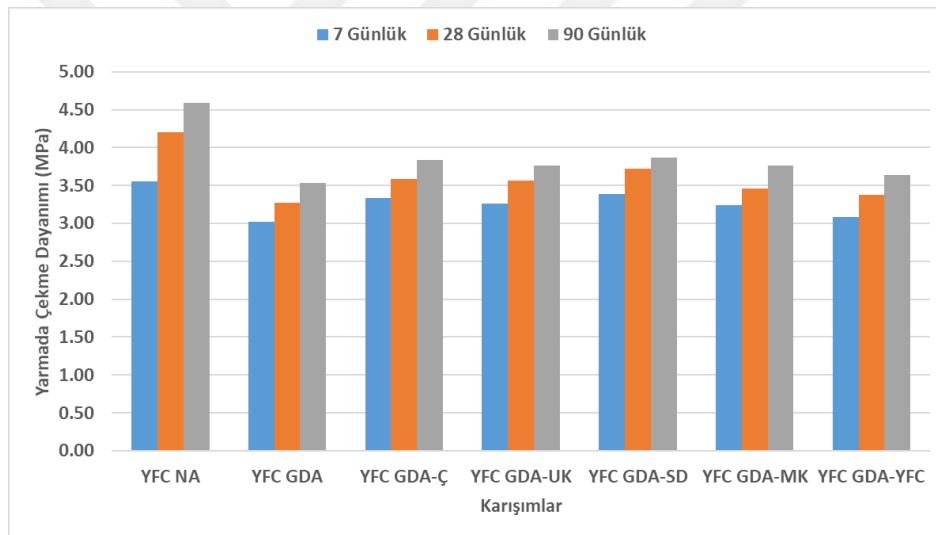
3.5. Yarmada Çekme Dayanımı

Şekil 3.6'da UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla 1.81, 2.59 ve 2.69 MPa olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla %36, %35 ve %32 azalarak 1.16, 1.65 ve 1.77 MPa'a düşmüştür. Puzolanik şerbet emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen UK esaslı GPB'lerin yarmada çekme dayanımları ise belirgin bir şekilde artmıştır. Şerbet emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları ortalama olarak sırasıyla 1.57, 2.24 ve 2.35 MPa düzeyine yükselmiştir. Bu değerlerin GDA'lı GPB'nin yarmada çekme dayanımlarına göre artış oranı yaklaşık %35 olmuştur. 90 günlük dayanımlar esas alındığında en yüksek değerler UK, SD ve MK şerbeti emdirilmiş GDA'lı GPB'lerden elde edilmiştir.



Şekil 3.6. UK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları

Şekil 3.7’de YFC esaslı GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen YFC esaslı GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla 3.56, 4.2 ve 4.59 MPa olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla %15, %21 ve %23 azalarak 3.02, 3.27 ve 3.54 MPa’a düşmüştür. Pozolanik şerbet emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen YFC esaslı GPB’lerin yarmada çekme dayanımları belirgin bir şekilde artmıştır. Şerbet emdirilen GDA’larla üretilen GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları ortalama olarak sırasıyla 3.26, 3.54 ve 3.78 MPa düzeyine yükselmiştir. Bu değerlerin pozolanik şerbet emdirilmemiş GDA’lı GPB’lerin yarmada çekme dayanımlarına göre artış oranı yaklaşık %8 olmuştur. Genel olarak pozolanik şerbet emdirilmiş GDA’lı GPB’lerin dayanımları arasında belirgin bir fark oluşmamıştır.

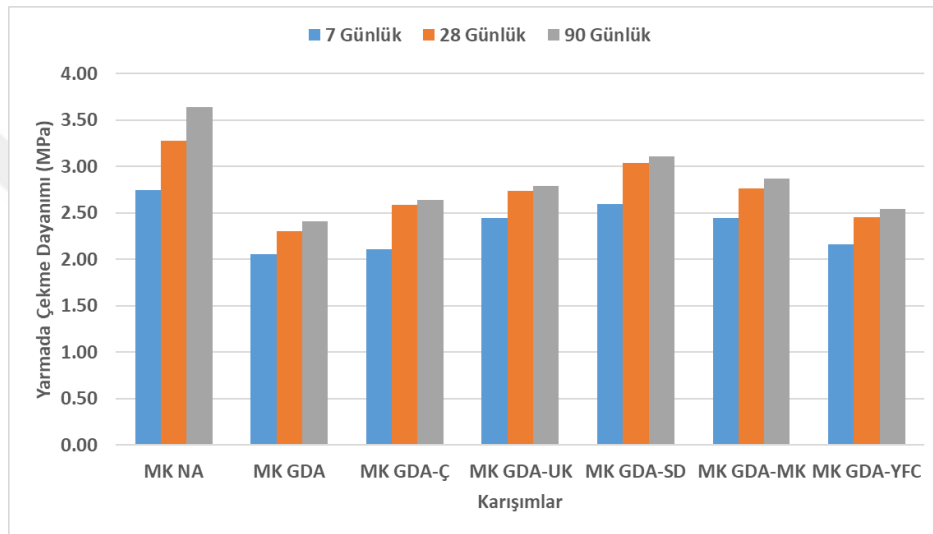


Şekil 3.7. YFC esaslı GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları

Şekil 3.8’de MK esaslı GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen MK esaslı GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla 2.74, 3.27 ve 3.64 MPa olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB’lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla % 25, 30 ve 34 azalarak 2.1, 2.3 ve 2.41 MPa’a düşmüştür. Pozolanik emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen MK esaslı GPB’lerin yarmada çekme dayanımları belirgin bir şekilde artmıştır. En yüksek dayanımlar silis dumanı içeren şerbet emdirilen GDA’lı GPB’den elde edilmiştir. Dayanım artış oranları 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla %26, %32 ve %29 olmuştur.

Alqarni vd. (2021)'nin yaptığı çalışmada ise silika dumanı şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen betonların yarmada çekme dayanımları, herhangi bir işleme tabi tutulmayan GDA'larla üretilen betonlardan %58 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Zhao vd. (2013)'nin yaptığı çalışmada ise farklı çimentolar, silis dumanı ve uçucu kül içeren şerbetler emdirilen GDA'larla kullanılarak üretilen betonların eğilme dayanımları, herhangi bir işleme tabi tutulmamış GDA ile üretilen betona göre yaklaşık %20 oranında artmıştır.



Şekil 3.8. MK esaslı GPB'lerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları

GDA içeren GPB'lerde yarmada çekme dayanımının normal agregalı betonlara göre azalmasının sebebi GDA bünyesinde bulunan aşırı gözenekli eski harç tabakasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca GDA üretimindeki kırma, eleme ve beton üretiminde karıştırma sırasında GDA'nın hasar görmesi gibi etkenlerden dolayı da yarmada çekme dayanımları azalmıştır. Genellikle tüm puzolanik şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerin yarmada çekme dayanımları artmış olsa da en yüksek dayanımları YFC esaslı GPB'ler vermiştir.

3.6. Su Emme Deneyi

Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de GPB'lerin 28 ve 90 günlük su emme yüzdeleri gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK, YFC ve MK ile üretilen GPB'lerin 28 günlük su emme yüzdeleri %3.75, %2.3 ve %3.20 olarak belirlenmiştir. Puzolanik şerbet emdirme

işlemi uygulanmayan GDA'larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %123, %148, %128 artarak % 8.36, %5.71 ve %7.27'ye çıkmıştır.

Puzolanik şerbet emdirme işlemi uygulanan GDA'larla üretilen GPB'lerin su emme değerleri belirgin olarak azalmıştır. Bağlayıcı tipinden bağımsız olarak, SD ve MK şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin su emme yüzdelerindeki azalma en fazla olmuştur. SD ve MK emdirilen GDA'larla üretilen UK esaslı GPB'lerin su emmeleri %37.5 ve % 33.25 oranında azalmıştır. YFC esaslı GPB'lerde bu azalmalar %26.8 ve %22.4, MK esaslı GPB'lerde ise %31.6 ve %29.2 oranındadır. SD ve MK şerbetlerinin diğer puzolanik şerbetlerin su emmede daha etkin iyileşme sağlamalarının sebebi SD ve MK'nın yüksek inceliği ve puzolanik aktivitesidir (Shi vd., 2018).

NA kullanılarak üretilen UK, YFC ve MK ile üretilen GPB'lerin 90 günlük su emme yüzdeleri %3.47, %2.08 ve %2.85 olarak belirlenmiştir. Puzolanik şerbet emdirme işlemi uygulanmayan GDA'larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %132, %163 ve %142 artarak %8.05, %5.45 ve %6.88'e çıkmıştır.

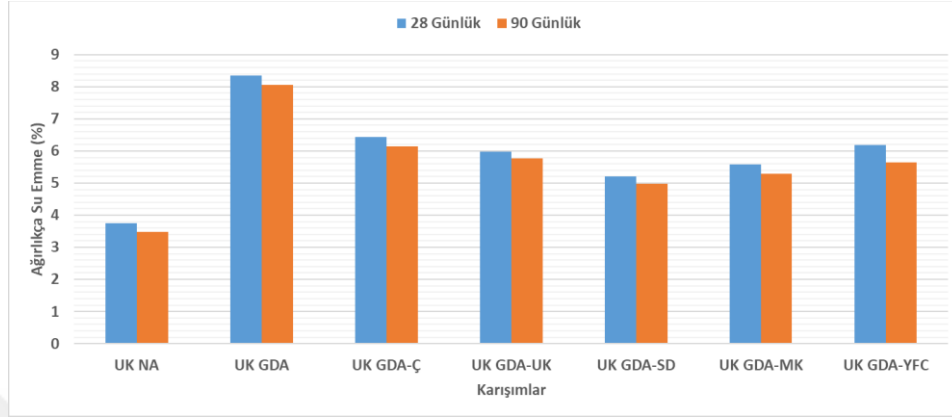
90 günlük GPB'lerin su emme değerlerinde 28 güne kıyasla ortalama %0.4 düzeyinde bir fark görülmüştür. GPB'lerin su emme yüzdelerinin numune yaşı ilerledikçe azalmasının sebebi, beton içerisindeki ilerleyen polimerizasyon reaksiyonu sonucunda GPB'nin iç yapısının daha boşluksuz hale gelmesidir. 90 günlük betonlarda da 28 günlükteki gibi en düşük su emme değerleri SD ve MK şerbetleriyle elde edilmiştir. UK esaslı GPB'lerin su emme yüzdeleri bu puzolanlar için sırasıyla %38.5 ve %34.7 oranında azalmıştır. YFC esaslı GPB'lerde bu azalmalar %27.9 ve %24.6; MK esaslı GPB'lerde ise %33.1 ve %30.4 olmuştur. Görüldüğü gibi en çok azalma %38.5 ile UK esaslı GPB'lerde SD emdirilen GDA'larla sağlanmıştır.

Alqarni vd. (2021), yaptıkları çalışmada çimento ve silis dumanı şerbeti emdirdikleri GDA ile ürettikleri betonların su emmelerinin yaklaşık %10 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Sasanipour vd. (2020) ise SD şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen betonların su emme yüzdelerinin normal GDA ile üretilen betonlara göre %20 azaldığını rapor etmiştir.

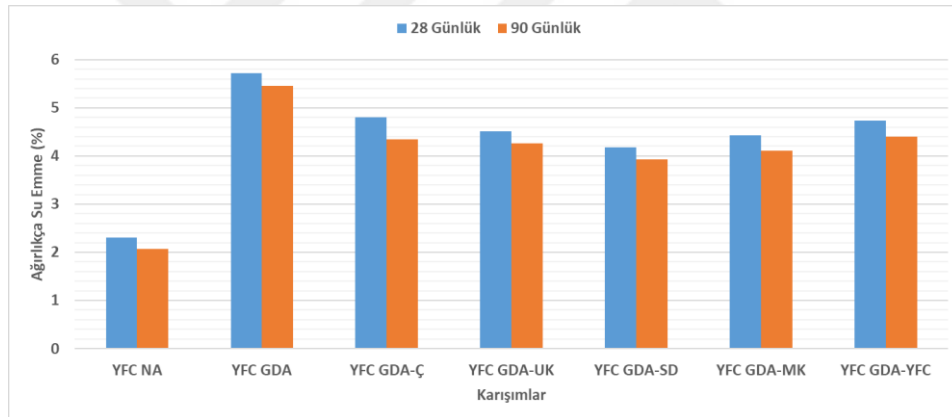
Bu çalışmalarla kıyaslandığında çalışmamızda SD emdirilen GDA'larla üretilen UK esaslı GPB'lerin su emmesinde elde edilen %38.5 oranındaki azalmanın oldukça belirgin bir iyileşme olduğu söylenebilir.

Genel olarak GDA'lara puzolanik şerbet emdirme işleminin betonun su emmesinde oluşturduğu iyileşmenin nedeni puzolanik maddelerin GDA'nın üzerindeki eski harç

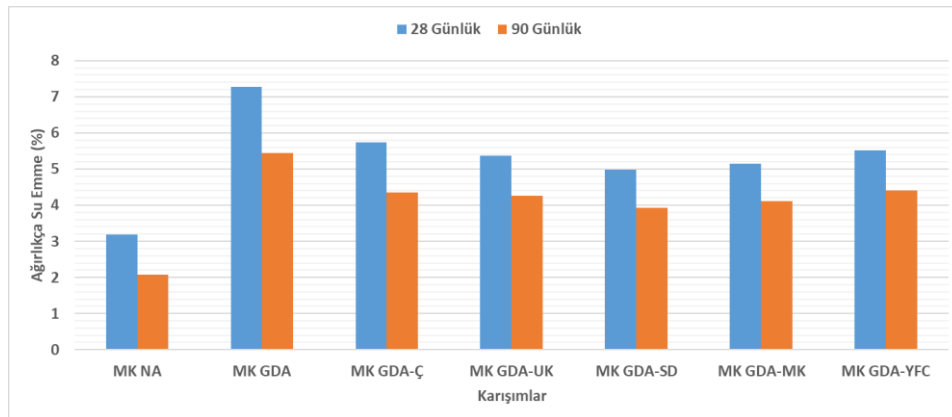
tabakasındaki hidrate çimentonun yapısındaki boşlukları azaltması ve GDA yüzeyindeki gözenekleri doldurması şeklinde açıklanmaktadır (Sasanipour vd., 2021).



Şekil 3.9. UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri



Şekil 3.10. YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri



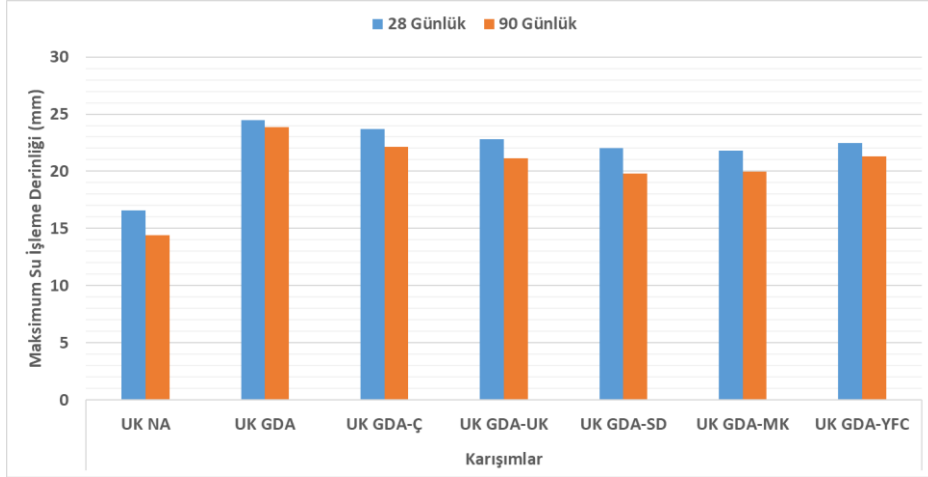
Şekil 3.11. MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ağırlıkça su emme değerleri

3.7. Basınç Altında Maksimum Su İşleme Derinliği

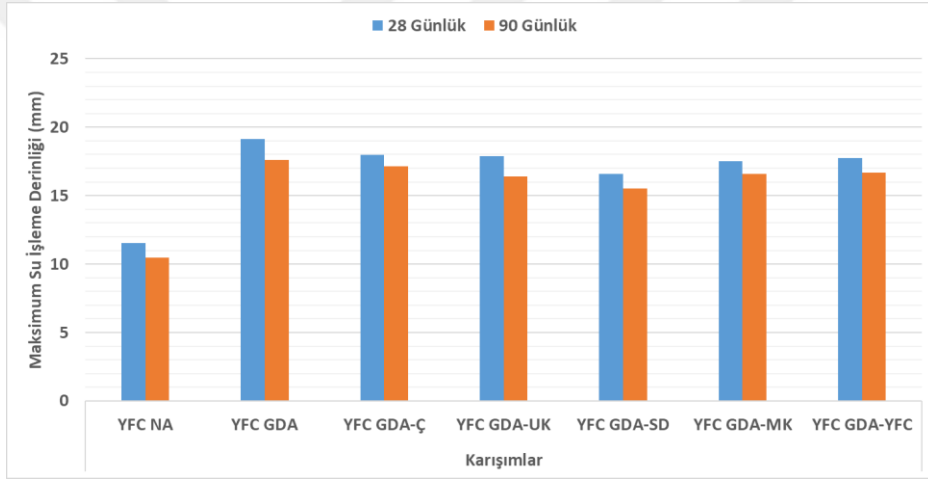
Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği değerleri gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK, YFC ve MK ile üretilen GPB'lerin 28 günlük su işleme derinliği değerleri sırasıyla 16.58, 11.54 ve 13.32 mm olarak belirlenmiştir. Pozolanik şerbet emdirme işlemi uygulanmayan GDA'larla üretilen betonlarda bu değerler sırasıyla 24.49, 19.15 ve 21.62 mm'ye yükselmiştir. 90 günlük su işleme derinlikleri ise sırasıyla 14.42, 10.49 ve 12.49 mm olarak belirlenmiştir. GDA'larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla 23.88, 17.61 ve 20.96 mm'ye yükselmiştir.

Genel olarak numune yaşı arttıkça ilerleyen geopolimerizasyon reaksiyonundan dolayı GPB'lerin basınç altında su işleme derinliklerinin azaldığı söylenebilir. Pozolanik şerbet emdirme işlemi tüm bağlayıcı tipleri için, GDA'lı GPB'lerin su işleme derinliklerinde %3 ile %18 arasında bir azalma sağlamıştır. Genel olarak GPB'nin dayanımı ve kalitesi arttıkça GDA'ya uygulanan şerbet emdirme işleminin, basınçlı su işleme derinliği üzerindeki etkisi oransal olarak azalmaktadır. Örneğin en yüksek dayanımı ve en düşük basınçlı su işleme derinliğini veren YFC'li GPB'lerin su işleme derinlikleri en fazla %13 azalırken, UK ve MK ile üretilen GPB'lerde %18'e varan azalmalar görülmüştür. Tüm GPB tiplerinde çimento şerbeti emdirme işlemi su işleme derinliğine en az etki etmiş, SD ve MK'li şerbetler ise en yüksek azalmayı sağlamışlardır.

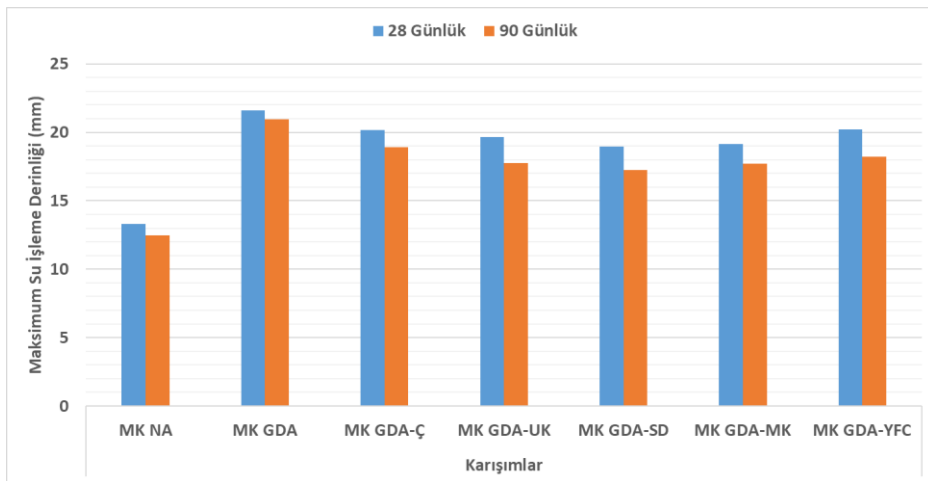
GDA kullanılarak üretilen GPB'lerde GDA'nın yapısında bulunan boşluklu eski harç tabakasının geçirimli yapısından dolayı GPB'nin basınç altında su işleme derinliği NA'lı GPB'lere göre artmıştır. Şerbet emdirme işleminin su işleme derinliğini azaltmasının sebebi GDA içinde bulunan eski harç tabakasının pozolanik ve filler etki neticesinde geçirimsizlik özelliklerinin azalmasıyla açıklanabilir (Shaban vd., 2019). Benzer sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Güneyisi vd., 2014; Zhang vd., 2016).



Şekil 3.12. UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği



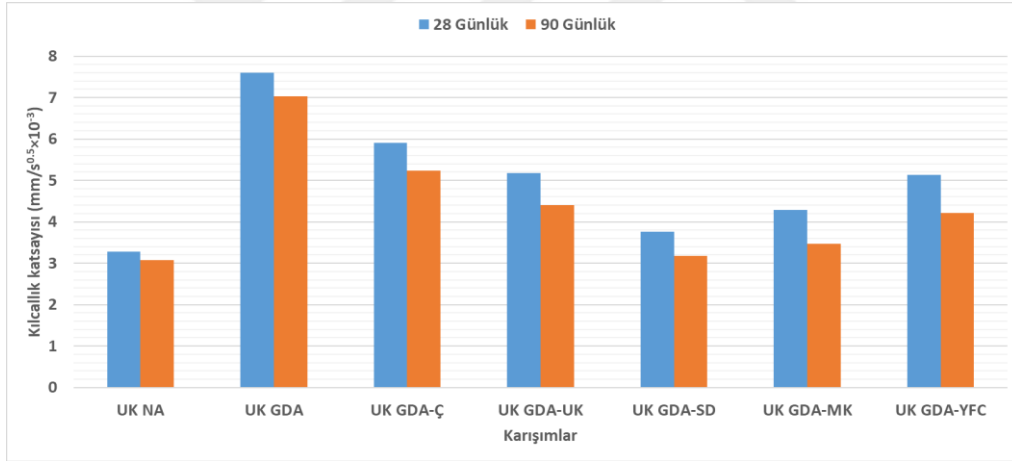
Şekil 3.13. YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği



Şekil 3.14. MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük maksimum su işleme derinliği

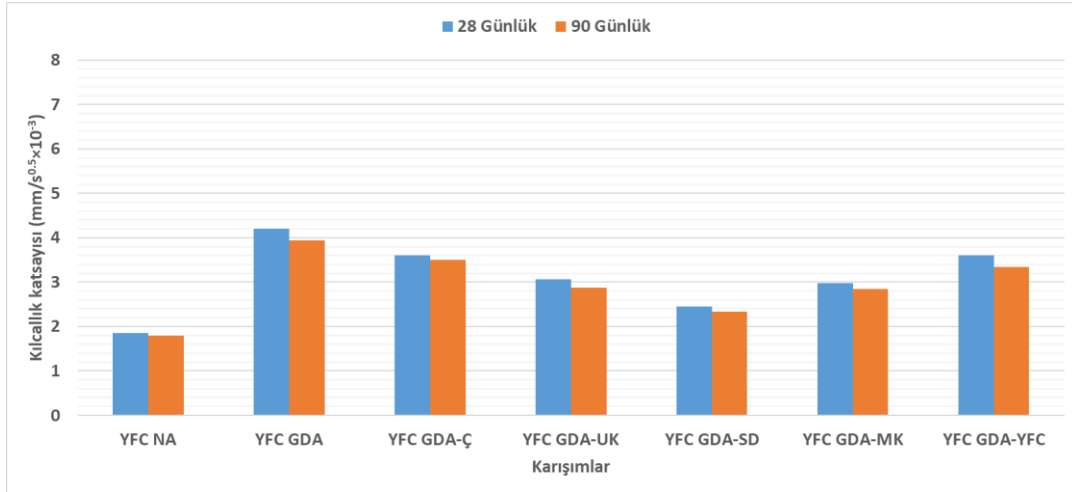
3.8. Kılcal Su Emme Deneyi

Şekil 3.15'te UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları $\text{mm/sn}^{0.5}$ cinsinden gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları sırasıyla 3.28×10^{-6} ve $3.08 \times 10^{-6} \text{ mm/sn}^{0.5}$ olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları sırasıyla %132 ve %129 artarak 7.6×10^{-6} ve $7.03 \text{ mm/sn}^{0.5}$ 'e yükselmiştir. Pozolanik emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen UK esaslı GPB'lerin kılcallık katsayıları belirgin bir şekilde azalmıştır. Kılcallık katsayısını azaltmada en etkili olan pozolanik şerbetler SD ve MK ikameli şerbetlerdir. Bu betonların kılcallık katsayıları GDA'lı GPB'ye göre 28 günde sırasıyla %50.33 ve %43.48 oranında azalmıştır. 90 günde ise bu azalmalar %54 ve %50.6 düzeyinde olmuştur. NA'lı GPB'nin kılcallık katsayısının neredeyse SD şerbeti emdirilen GPB'lerin kılcallık katsayısına eşit olduğu görülmektedir.



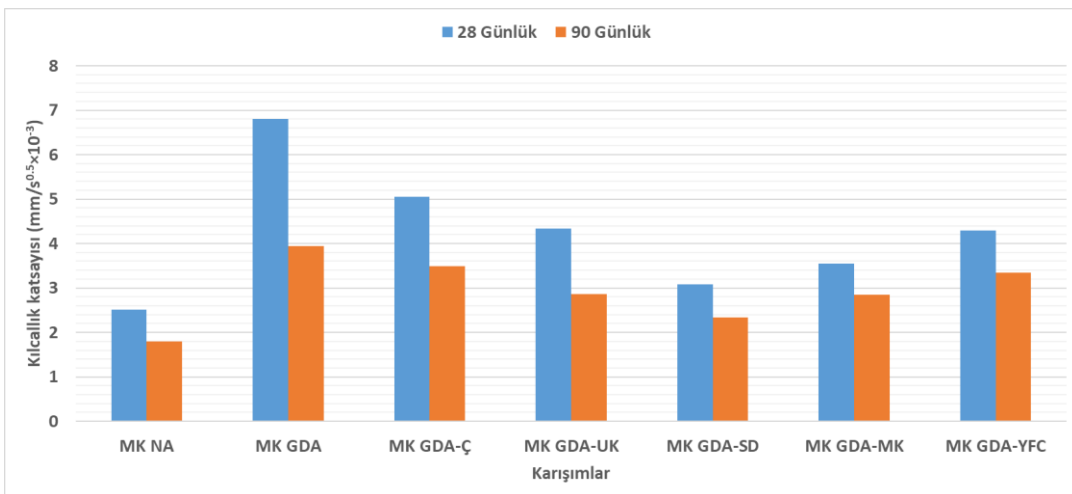
Şekil 3.15. UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları

Şekil 3.16'da YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları görülmektedir. NA kullanılarak üretilen YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları sırasıyla 1.89×10^{-6} ve $1.79 \times 10^{-6} \text{ mm/sn}^{0.5}$ olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB'lerin 28 ve 90 kılcallık katsayıları sırasıyla %127 ve %119 artarak 4.21 ve $3.94 \times 10^{-6} \text{ mm/sn}^{0.5}$ olmuştur. Pozolanik emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'lerin kılcallık katsayılarında azalma olmuş, en düşük kılcallık katsayısı SD içeren pozolanik şerbet emdirilen GPB'lerde görülmüştür. Bu azalmalar 28 ve 90 gün için sırasıyla %41.81 ve %40.6 olmuştur.



Şekil 3.16. YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları

Şekil 3.17'de MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları verilmiştir. NA kullanılarak üretilen MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları sırasıyla 2.51 ve $2.11 \times 10^{-6} \text{ mm/sn}^{0.5}$ olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB'lerin 28 ve 90 kılcallık katsayıları sırasıyla %171 ve %192 artarak 6.8 ve $6.18 \times 10^{-6} \text{ mm/sn}^{0.5}$ 'e yükselmiştir. Puzolanik emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen MK esaslı GPB'lerin kılcallık katsayıları belirgin olarak azalmıştır. UK esaslı GPB'lerde görüldüğü gibi, MK esaslı GPB'lerde de en düşük kılcallık katsayıları SD şerbetiyle elde edilmiştir ve bu betonlarda 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları %54.71 ve %47.8 oranında azalmıştır.



Şekil 3.17. MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük kılcallık katsayıları

Tüm betonlar birlikte değerlendirildiğinde UK esaslı GPB’lerin kılcallık katsayılarının en yüksek olduğu, YFC esaslı olanların ise en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak beton kalitesi yükseldikçe şerbet emdirme işleminin GPB’lerin kılcal su geçirimsizliği üzerindeki etkisinin daha az olduğu söylenebilir. Örneğin UK ve MK esaslı GPB’lerin kılcallık katsayıları çok yüksekken, şerbet emdirme işlemi uygulamasıyla kılcallık katsayılarında dramatik bir azalma görülmüş, nispeten düşük kılcallığa sahip YFC esaslı GPB’lerde şerbet emdirme işlemi sonunda kılcallık katsayısında oluşan azalmaların diğer betonlardaki düzeyde olmadığı söylenebilir.

GDA’lara puzolanik şerbet emdirme işlemi sonucunda GDA tanelerinin yoğunluğu artarak kılcal su emme özellikleri azalmıştır. GDA üzerine yapışmış olan eski harç tabakasının içinde yüksek miktarda kalsiyum hidroksit kristalleri bulunmaktadır. Özellikle yüksek inceliğe ve puzolanik atkiviteye sahip SD ve MK gibi puzolanların kullanımı GDA içinde bulunan kalsiyum hidroksit kristalleriyle reaksiyona girerek GDA üzerindeki eski harcın içinde ve etrafında hem boşlukları fiziksel olarak doldurup hem de yeni CSH jelleri oluşturarak GDA’nın su geçirimsizliğini azaltmaktadır (Shaban vd., 2019).

3.9. Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi

Tablo 3.2’de ASTM C 1202 standardına göre betonların hızlı klorür geçirimsizlik değerlerinin sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 3.2. ASTM C 1202 standardına göre beton hızlı klorür geçirim sınıfları

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

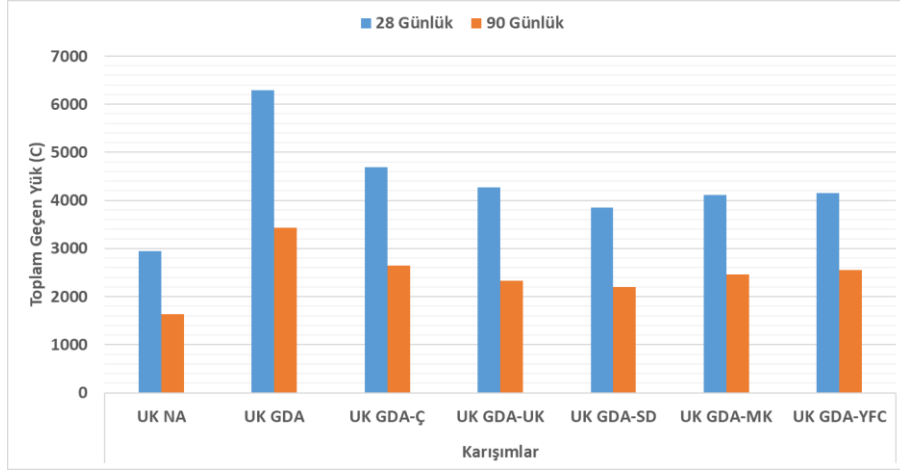
Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de GPB’lerin 28 ve 90 günlük klorür geçirimsizlikleri gösterilmiştir. NA ile üretilen UK, YFC ve MK esaslı GPB’lerin 28 günlük klorür geçirimsizlikleri sırasıyla 2944 C, 1055 C ve 2819 C olarak belirlenmiş ve ASTM C1202’ye göre sırasıyla orta, düşük ve orta geçirim sınıfına girmiştir. Puzolanik şerbet emdirme işlemi uygulanmayan GDA’larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla

%114, %51 ve %91 artarak 6288 C, 1595 C ve 5419 C'a yükselmiştir. ASTM C 1202'ye göre bu betonlar birer sınıf atlayarak yüksek, düşük ve yüksek geçirimlilik sınıfına girmiştir. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerde 28 günlük hızlı klorür geçirimlilikleri %15-40 arasında azalmıştır. Klorür geçirimliliklerindeki en fazla azalma SD şerbeti emdirilen GDA'larla %24 oranında elde edilmiştir. Sasanipour vd. (2021), yaptıkları çalışmada SD şerbeti emdirilmiş GDA'lı betonların klorür geçirimliliklerinin yaklaşık %20 oranında azaldığını rapor etmiştir. Klorür geçirimliliğindeki bu azalmanın sebebinin SD şerbetinin GDA'nın porozitesini azaltarak daha geçirimsiz bir yapı oluşturması ve AGB'nin daha güçlü olması ile açıklamıştır.

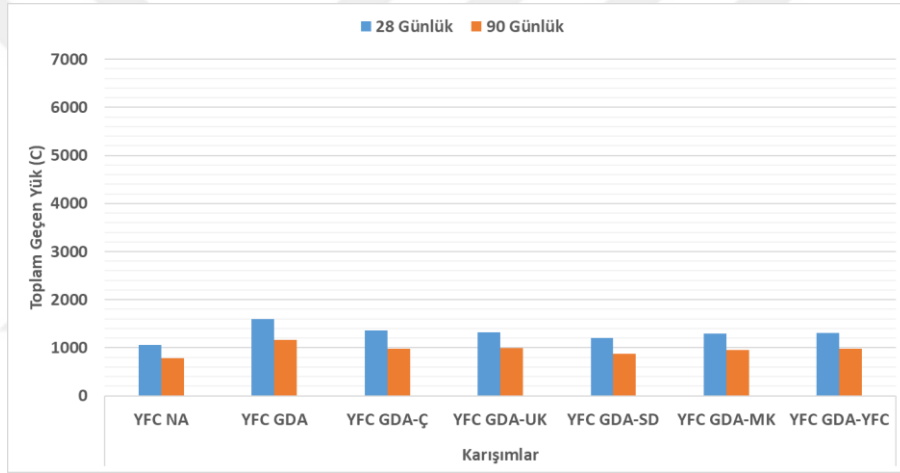
NA'lı GPB'lerin 90 günlük klorür geçirimlilikleri ise UK, YFC ve MK esaslı GPB'ler için sırasıyla 1630 C, 768 C ve 1209 C olarak belirlenmiştir. Bu değerler ASTM C1202'ye göre sırasıyla düşük, çok düşük ve düşük geçirimlilik sınıfına girmektedir. Emdirme uygulanmamış GDA'larla üretilen betonlarda bu değerler aynı sırayla %111, %48 ve %94 artarak 3435 C, 1163 C ve 2338 C'a yükselmiş ve yüksek, düşük ve orta geçirim sınıfına girmiştir. SD şerbeti emdirilmiş GDA'lı GPB'lerin 90 günlük klorür geçirimlilikleri ise UK, YFC ve MK bağlayıcıları için sırasıyla %36.0, %24.5 ve %39.5 oranında azalmıştır.

YFC esaslı GPB'lerin, UK ve MK esaslılara göre çok daha düşük klorür geçirimliliğine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun YFC esaslı GPB'lerin diğerlerine kıyasla yüksek birim ağırlıkları, su emmeleri ve basınç dayanımlarına sahip olmaları ile uyum içinde olduğu söylenebilir. Bu GPB'lerde özellikle silis dumanı emdirilmiş GDA'lar kullanıldığında elde edilen klorür geçirimliliği 878 C değeri ile neredeyse normal agregalı GPB'nin klorür geçirimliliği olan 786 C değerine yaklaşmıştır.

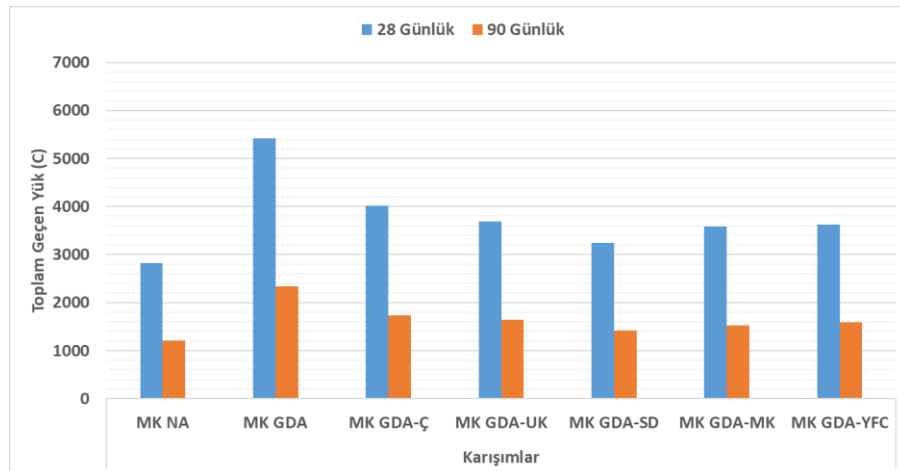
Betonun klorür geçirgenliği agregaların su emme kapasiteleriyle de ilgilidir. GDA içeren betonlarda GDA'nın içindeki eski harç fazının ve bu harcın kalitesinin betonun su emme özelliğini etkilediği gibi betonun klorür iyonlarının taşınmasında da etkili olduğu bilinmektedir. GDA'nın NA'ya göre daha yüksek poroziteye ve geçirgenliğe sahip olmasından dolayı klorür iyonlarının betona giriş yapması daha kolay hale gelir. Birçok araştırmacı GDA'nın kalitesinin iyileştirilmesinin betonun klorür geçirimliliğini azalttığını rapor etmiştir (Bao vd., 2020; Pedro vd., 2014; Zhu vd., 2019; Zhang vd., 2018).



Şekil 3.18. UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük klorür geçirim değerleri



Şekil 3.19. YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük klorür geçirim değerleri



Şekil 3.20. MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük klorür geçirim değerleri

3.10. Elektriksel Özdirenç Deneyi

Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te GPB'lerin 28 ve 90 günlük elektriksel özdirenç değerleri gösterilmiştir. UK, YFC ve MK ile üretilen NA'lı GPB'lerin 28 günlük elektriksel özdirenç değerleri sırasıyla 19.9 k Ω .cm, 64.2 k Ω .cm ve 19.4 k Ω .cm olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi YFC esaslı GPB'nin elektriksel özdirenç değeri UK ve MK esaslı GPB'lerden oldukça yüksek çıkmıştır. GDA'lı GPB'lerde ise elektriksel özdirençler sırasıyla %39, %24 ve %33 azalarak sırasıyla 12.1 k Ω .cm, 48.7 k Ω .cm ve 13.0 k Ω .cm olmuştur. GDA'nın yüksek su emmesi ve boşluklu yapısının klorür iyonlarının betonun içerisine daha kolay nüfuz edebilmesini ve betonun boşluklarındaki boşluk çözeltisinin yükselen iyon konsantrasyonunun elektriksel iletkenliği artırarak betonun elektriksel özdirencini düşürdüğü rapor edilmiştir (Koushkbaghi vd., 2019).

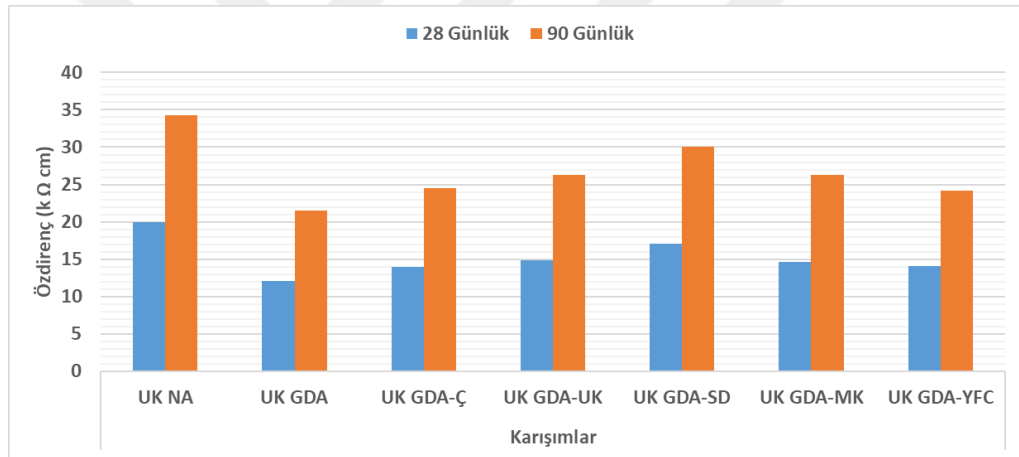
Puzolanik şerbet emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin elektriksel özdirençleri artmıştır. UK esaslı GDA'lı GPB'lerde en yüksek özdirenç değerini SD şerbeti emdirilen GDA'lı GPB'ler vermiştir. Bu betonlarda oluşan artış %41 düzeyindedir. YFC esaslı GPB'lerde puzolanik şerbet emdirilmiş GDA'larla üretilen betonların özdirençlerinde elde edilen iyileşmeler diğer bağlayıcı GPB'lere göre daha az olmuş, birbirleri arasında da çok belirgin farklar oluşmamıştır. Bu GPB'lerin elektriksel özdirençleri ortalama olarak 51.5 k Ω .cm olmuştur. Özdirenç değerini en çok artıran SD'li şerbet %12.8 artış sağlamıştır. MK esaslı GPB'lerde şerbet emdirme işleminin özdirenç değerlerinde sağladığı iyileşme %22-%41 arasında olmuştur. En yüksek özdirenç değeri SD emdirilmiş GPB'lerde görülmüştür.

Tüm beton tiplerinde 90 günlük özdirenç değerleri, 28 günlüklere göre artmıştır. Aynı beton karışımlarının 28 ve 90 günlük özdirenç değerleri karşılaştırıldığında; 90 günde MK esaslı GPB'lerin özdirençlerindeki artış ortalama %125 düzeyinde olurken, UK ve YFC esaslılarda %76 ve %34 olmuştur. UK ve YFC esaslı GPB'lere buhar kürü uygulandığından bu betonların geopolimerizasyon reaksiyonları hızlanmış, dolayısıyla 28 günde nihai değerlere daha yaklaşmıştır. Bu nedenle 28 ile 90 günlük betonların özdirençleri arasındaki fark, MK esaslılar kadar fazla değildir. UK, YFC ve MK ile üretilen NA'lı GPB'lerin 90 günlük elektriksel özdirenç değerleri sırasıyla 34.3 k Ω .cm , 86.2 k Ω .cm ve 29.0 k Ω .cm olarak belirlenmiştir. Puzolanik şerbet emdirme uygulanmayan GDA'larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %37, %25 ve %35 azalarak 21.5 k Ω .cm, 65.1 k Ω .cm ve 29.0 k Ω .cm olmuştur. Tüm beton tiplerinde elektriksel özdirenç değerlerindeki en fazla artış, SD ve MK şerbet emdirilen GDA'lardan elde edilmiştir. Şerbet emdirilen GDA'larla üretilen

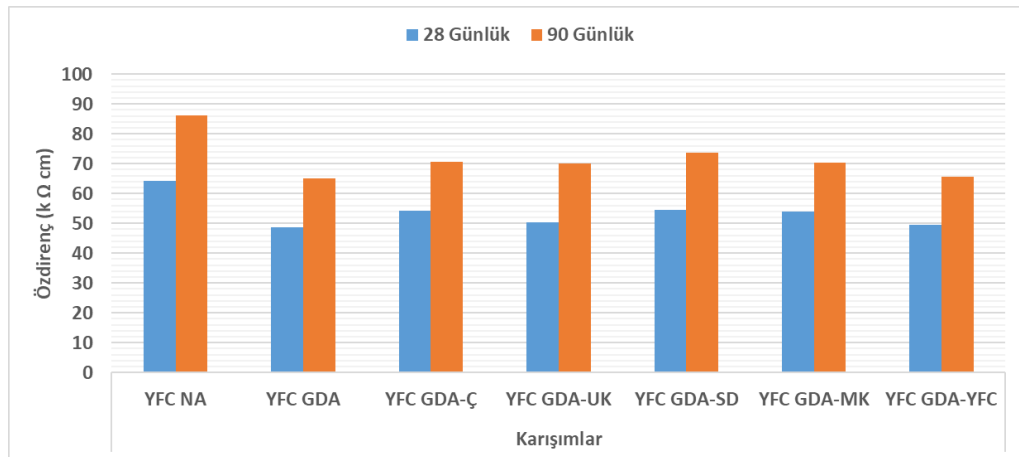
YFC'li GPB'lerde ise 90 günlük öz direnç değerleri arasında çok belirgin bir farklılık olmasa da en yüksek değeri veren SD emdirilmiş GPB'dir.

Keke vd. (2019), puzolanik şerbet ile kaplanmış GDA ile üretilen GPB'lerin elektriksel öz direncinin GDA'ların porozitesine oldukça bağlı olduğunu rapor etmiştir. GDA'ya uygulanan puzolanik şerbetin GDA'nın boşluklarını yeni hidratasyon jelleri ile doldurarak GDA porozitesini azalttığını ve betonun elektriksel öz direncinin direncin arttığını rapor etmiştir.

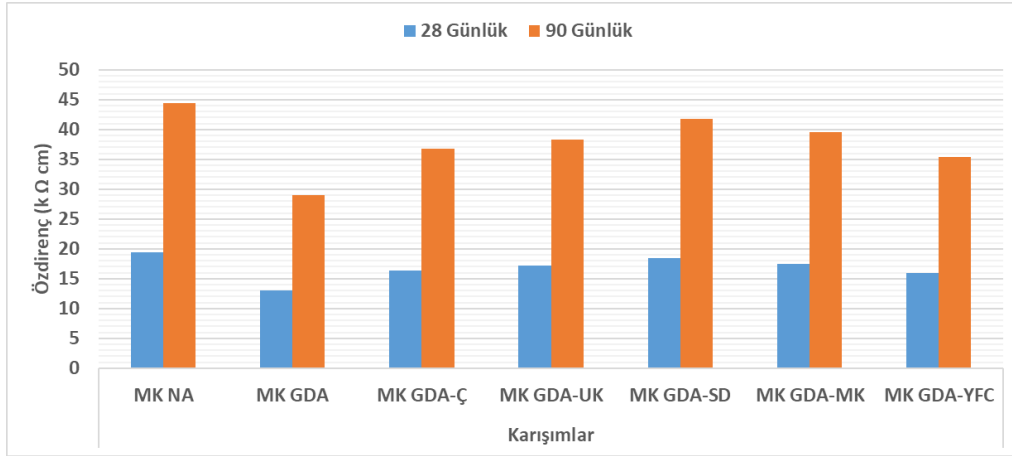
GDA'ların karbonasyon kürüyle daha geçirimsiz hale getirilerek betonda kullanıldığı bir çalışmada GDA'nın boşluk yapısının daha geçirimsiz hale getirilmesiyle betonun hem klorür geçirimsizliğinin azaldığı hem de elektriksel öz direncinin arttığı rapor edilmiştir (Chaparro vd., 2012).



Şekil 3.21. UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük elektriksel öz direnç değerleri



Şekil 3.22. YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük elektriksel öz direnç değerleri



Şekil 3.23. MK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük elektriksel özdirenç değerleri

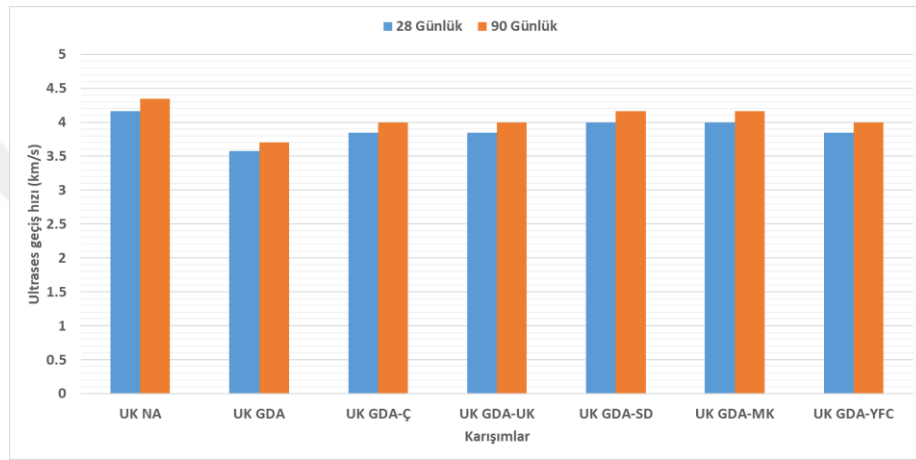
3.11. Ultrases Hızları

Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da GPB’lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK, YFC ve MK esaslı GPB’lerin 28 günlük ultrases hızları sırasıyla 4.17 km/s, 5.0 km/s ve 4.35 km/s olarak belirlenmiştir. 28 günlük UK ve MK ile üretilen GPB’lerin ultrases hızları IS 13311 standardına göre iyi kalitede beton sınıfına girerken YFC ile üretilen GPB’ler mükemmel sınıfa girmiştir. Pozolanik şerbet emdirme uygulanmayan GDA’larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %14, %9 ve %11 azalarak sırasıyla 3.57 km/s, 4.55 km/s ve 4.00 km/s’ye azalmıştır. Bu GDA’ların kullanımı betonların ultrases kalite sınıflarında herhangi bir değişime neden olmamış yani betonlar aynı sınıflarında kalmıştır. Ultrases hızının betonun porozitesi arttıkça azaldığı bilinmektedir (Sasanipour ve Aslani, 2020; Lafhaj vd., 2006)

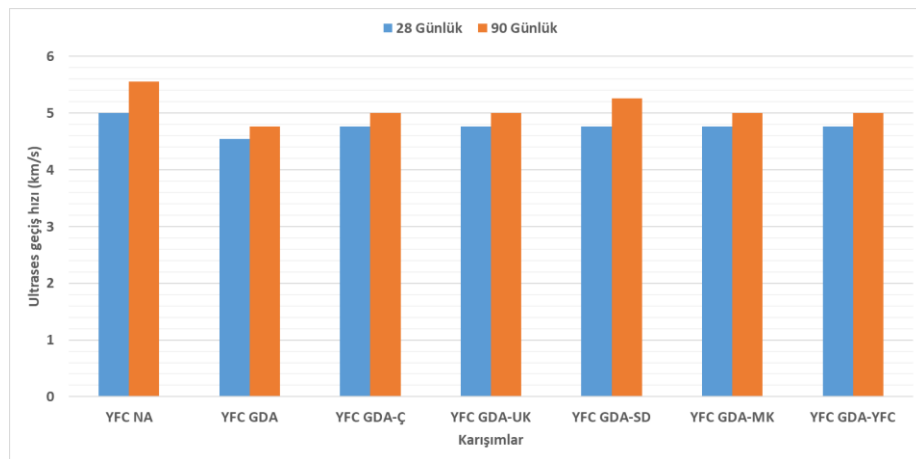
NA kullanılarak üretilen UK, YFC ve MK esaslı GPB’lerin 90 günlük ultrases hız değerleri sırasıyla 4.35 km/s, 5.56 km/s ve 4.55 km/s olarak belirlenmiştir. MK ile üretilen GPB, bir üst sınıfa çıkarak mükemmel sınıfına girmiştir. MK ile üretilen betonların ultrases sınıflarının ileriki yaşlarda (90 gün) bir üst sınıfa geçmesinin sebebi; UK ve YFC ile üretilen GPB’lerin aksine buhar kürüne tabi tutulmayıp oda sıcaklığında yavaşça dayanım gelişimi sağlamasıdır. Pozolanik şerbet emdirme işlemi uygulanmayan GDA’larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %15, %14 ve %12 azalarak sırasıyla 3.70 km/s, 4.76 km/s ve 4.0 km/s olmuştur.

Betonda ultrases hızı pasta ile agrega arasındaki AGB'nin yoğunluğu ve aderansı ile ilişkilidir (Lin vd., 2003; Naik vd., 2003). Dolayısıyla agregaların yoğunluğu arttıkça GPB'lerin ultrases hızlarının artması beklenir.

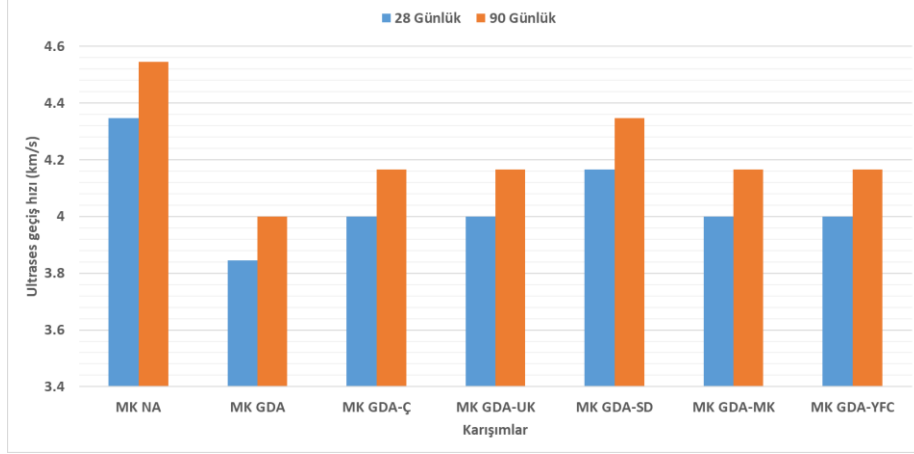
Puzolanik şerbet emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin ultrases hızları artmış olsa da IS 13311 standardına göre bir üst sınıfa geçirememiştir. Tüm beton tiplerinde SD ve MK şerbetleri çok yüksek olmasa da en belirgin artışı sağlamıştır. Bu artış MK esaslı GPB'lerde diğerlerine oranla daha yüksektir.



Şekil 3.24. UK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları

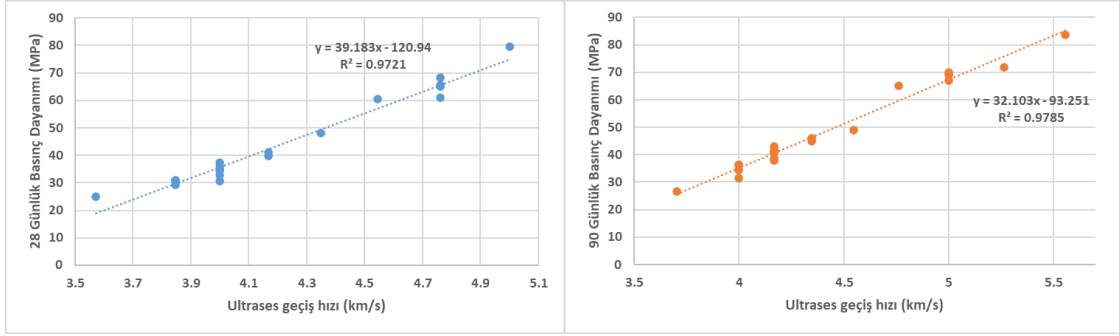


Şekil 3.25. YFC esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları



Şekil 3.26. MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları

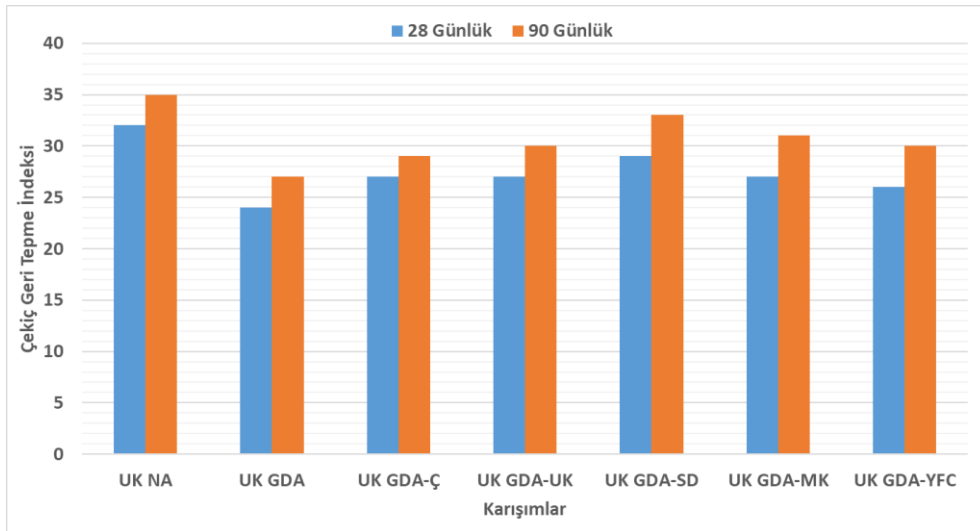
Beton içinden geçen ses dalgasının hızıyla betonun basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki bulunmasa da ses üstü dalganın hızıyla betonun yoğunluğu arasında belirgin bir ilişki bulunmaktadır. Betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça ses üstü dalganın hızı daha az olmaktadır. Ultrasonik test yöntemiyle herhangi bir betonun basınç dayanımını hassas olarak bulabilmek zor olsa da herhangi bir beton içerisinden geçen ses üstü dalganın hızı o betonun içerdiği boşluk miktarı ile yakından ilgili olduğu için elde edilen ses üstü hız ile betonun kalitesi hakkında genel bir ilişki kurmak mümkündür (Erdoğan T., 2003). Şekil 3.27'de üretilen tüm GPB'lerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı ilişkileri görülmektedir. 28 günlük GPB'lerin dayanım-ultrases geçiş hızı ilişkisinde determinasyon katsayısı 0.972 iken 90 günde 0.979 olmuştur. Görüldüğü gibi her iki yaşta da determinasyon katsayıları yüksektir. Bu da ilişkinin anlamlı olduğunun göstergesidir. Benzer şekilde, Ghosh vd. UK esaslı GPB'lerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki olduğunu rapor etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada farklı tiplerde UK ile üretilen GPB'lerin determinasyon katsayılarının 0.91 ile 0.96 arasında olduğunu belirtmişlerdir (Ghos vd., 2018).



Şekil 3.27. 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı-basınç dayanımı ilişkisi

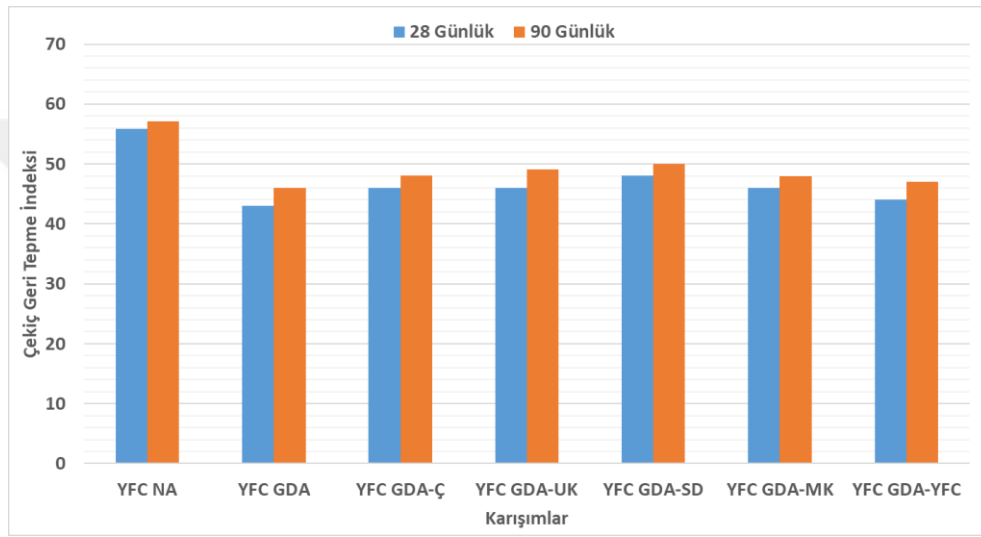
3.12. Schmidt Çekici Deneyi

Şekil 3.28’de UK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen UK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük çekiç geri tepme indeksleri sırasıyla 32.1 ve 35.0 olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB’lerin 28 ve 90 günlük çekiç geri tepme indeksleri ise sırasıyla %25 ve %23 azalarak 24.0 ve 27.0’a düşmüştür. Puzolanik emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen UK esaslı GPB’lerin çekiç geri tepme indeksleri belirgin bir şekilde artmıştır. En yüksek artış SD’li şerbetlerle elde edilmiştir. SD’li şerbet emdirilen GDA’lı GPB’nin geri tepme indeksleri normal GDA’lılara göre 28 günde %20.8 artmışken 90 günde ise %22.2 artmıştır.



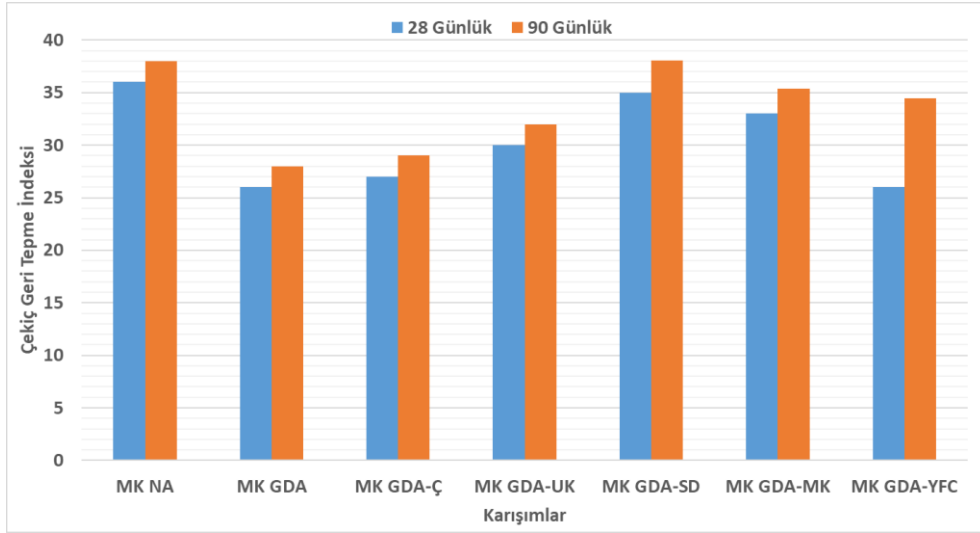
Şekil 3.28. UK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri

Şekil 3.29’da YFC esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük geri tepme indeksleri gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen YFC esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük geri tepme indeksleri sırasıyla 55.85 ve 57.15 olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB’lerin 28 ve 90 geri tepme indeksleri sırasıyla %23 ve %20 azalarak 43 ve 46’ya düşmüştür. Puzolanik emdirme işlemi uygulanan GDA ile üretilen YFC esaslı GPB’lerin geri tepme indekslerindeki artış diğer bağlayıcılı GPB’ler kadar belirgin değildir. En yüksek artış 28 günde %11.74, 90 günde ise %8.8 ile SD emdirilmiş GPB’lerde görülmüştür.



Şekil 3.29. YFC esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri

Şekil 3.30’da MK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük geri tepme indeksleri gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen MK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük geri tepme indeksleri sırasıyla 36.05 ve 38 olarak belirlenmiştir. GDA ile üretilen GPB’lerin 28 ve 90 günlük geri tepme indeksleri sırasıyla %28 ve %26 azalarak 25 ve 28’e düşmüştür. UK ve YFC’li GPB’lerle karşılaştırıldığında MK’li GPB’lerin geri tepme indekslerindeki değişim oldukça yüksektir. SD şerbeti emdirilen GDA’larla üretilen GPB’lerin geri tepme indeksleri 28 günde %34.62, 90 günde % 35.9 artış göstermiştir. Bu betonların 90 günlük geri tepme indeksi 38.05 değeri, NA’lı GPB’nin geri tepme indeksi olan 38.0 değerini aşmıştır.



Şekil 3.30. MK esaslı GPB'lerin 28 ve 90 günlük Schmidt çekici geri tepme indeksleri

3.13. Aşınma (Böhme) Deneyi

Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.32'te GPB'lerin 28 ve 90 günlük böhme aşınma değerleri gösterilmiştir.

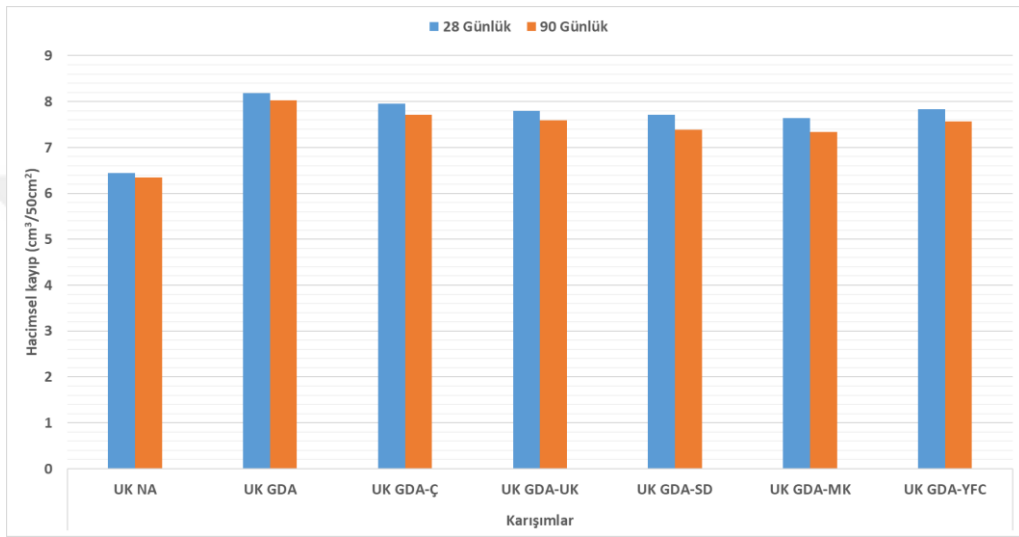
NA'lı GPB'lerin 28 günlük böhme aşınma değerleri UK, YFC ve MK bağlayıcıları için sırasıyla 6.44, 3.71 ve 6.09 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Pozolanik şerbet emdirme uygulanmayan GDA'larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %27, %26 ve %25 artarak sırasıyla 8.18, 4.64 ve 7.65 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ 'e yükselmiştir.

Normal agregalı UK, YFC ve MK esaslı GPB'lerin 90 günlük aşınma değerleri ise sırasıyla 6.35, 3.49 ve 5.81 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Pozolanik şerbet emdirme uygulanmayan GDA'larla üretilen betonlarda ise bu değerler sırasıyla %27, %25 ve %24 artarak sırasıyla 8.03, 4.37 ve 7.22 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ 'ye yükselmiştir. 28 ile 90 günlük aşınma değerleri arasında belirgin bir fark olmadığı görülmektedir. Görüldüğü gibi genel olarak UK esaslı GPB'lerin aşınması en yüksek olmuştur. En düşük aşınma değerleri ise YFC'li GPB'lerden elde edilmiştir.

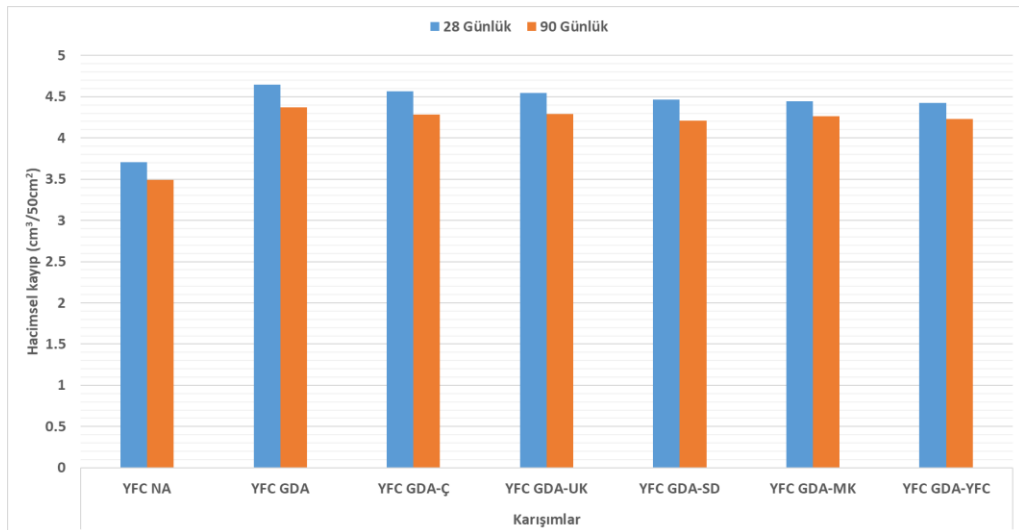
Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerin aşınma değerlerine bakıldığında ise UK esaslı GPB'lerde en fazla iyileşme MK emdirilen GDA'larla sağlanmıştır. İyileşme 28 günde %7.1, 90 günde ise %9.4 düzeyinde olmuştur. YFC esaslı GPB'lerde ise şerbet emdirme işlemi 28 ve 90 günde aşınma değerlerinde %4'ten fazla iyileştirme sağlayamamış, Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerin aşınma değerleri arasında da bu açıdan belirgin bir fark

oluşmamıştır. MK esaslı GPB’lerde ise hem 28 hem de 90 günde en fazla %5 iyileşme görülmüştür.

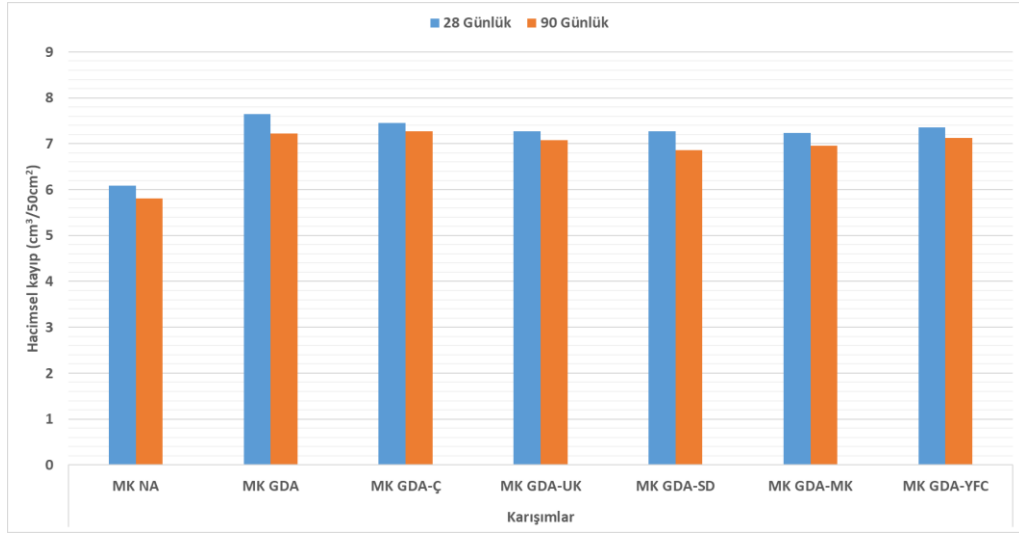
Görüldüğü gibi şerbet emdirme işlemi her 3 bağlayıcı tipi için GPB’lerin Böhme aşınma değerinde çok önemli iyileşmeler sağlayamamıştır. GPB’ler, GDA’lara emdirilen şerbet tipinden nispeten bağımsız olarak basınç dayanımlarına paralel şekilde aşınma kaybı göstermiştir.



Şekil 3.31. UK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük hacimsel aşınma kayıpları



Şekil 3.32. YFC esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük hacimsel aşınma kayıpları



Şekil 3.33. MK esaslı GPB’lerin 28 ve 90 günlük hacimsel aşınma kayıpları

3.14. Yüksek Sıcaklık Etkisi

3.14.1. Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’da UK, YFC ve MK esaslı GPB’lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonucunda elde edilen basınç dayanımları gösterilmiştir.

Şekil 3.34’e bakıldığında UK esaslı NA’lı GPB’nin 41.08 MPa olan basınç dayanımının, 300 °C sonunda %7.7, 600 °C sonunda %29.2 ve 900 °C sonunda %63.3 oranında azaldığı görülmektedir. UK esaslı GDA’lı GPB’nin 28.1 MPa olan basınç dayanımı ise 300 °C sonunda %13.2, 600 °C sonunda %32.2 ve 900 °C sonunda %54.5 oranında azalmıştır. Görüldüğü gibi 300 °C’de GDA’lı betonun dayanım kaybı NA’ya göre daha fazla olmuştur.

Şerbet emdirilen GDA’lı GPB’lerde 300 °C’de en çok dayanım kaybını %13.5 ile çimento şerbeti emdirilen GDA’lı GPB’ler vermiştir. 600 °C’de ise dayanım kayıpları arasındaki fark azalmış, en az dayanım kaybını %23.7 ile MK şerbeti emdirilmiş GDA’lı GPB’ler vermiştir. 900 °C’de ise tüm GDA’lı GPB’lerin dayanımları ortalama 14 MPa düzeyine inmiştir. UK esaslı GPB’lerde tüm sıcaklıklar için en az dayanım kayıpları MK şerbeti emdirilen GDA’lı GPB’lerden elde edilmiştir.

Nuaklong vd. (2020), UK esaslı GDA’lı GPB’lerin yüksek sıcaklık altındaki özelliklerini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda hem NA’lı hem de GDA’lı GPB’lerin 1 saat boyunca 925°C’de kalması durumunda, basınç dayanımlarının normal dayanımın

%13'ü düzeyinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Bizim çalışmamızda ise benzer koşullarda bu değerler NA'lı GPB'ler %37, GDA'lı GPB'ler için ise %45 olmuştur.

Şekil 3.35'e bakıldığında YFC esaslı NA'lı GPB'nin 79.6 MPa olan basınç dayanımının, 300 °C sonunda %15.9, 600 °C sonunda %47.5 ve 900 °C sonunda %65.2 oranında azaldığı görülmektedir. YFC esaslı GDA'lı GPB'nin 60.42 MPa olan basınç dayanımı ise 300 °C sonunda %9.9, 600 °C sonunda %46.2 ve 900 °C sonunda %57.9 oranında azalmıştır. NA'lı GPB'lerle kıyaslandığında GDA'lı GPB'lerin dayanım kayıplarının nispeten daha az olduğu görülmektedir.

Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerde 300 °C'de ortalama %13 dayanım kaybı oluşmuştur. En fazla dayanım kaybı %15.7 ile SD emdirilmiş GPB'lerde oluşmuştur. 600 °C'de emdirme uygulanmış GPB'lerin dayanım kayıpları ortalama %48.2, 900 °C'de ise %60.1 olmuştur. 900 °C'de basınç dayanımı değerleri neredeyse aynı seviyede olmuştur.

Şekil 3.36'ya bakıldığında MK esaslı NA'lı GPB'nin 48.1 MPa olan basınç dayanımının, 300 °C sonunda %18.3, 600 °C sonunda %33.8 ve 900 °C sonunda %59.3 oranında azaldığı görülmektedir. MK esaslı GDA'lı GPB'nin 60.42 MPa olan basınç dayanımı ise 300 °C sonunda %14.1, 600 °C sonunda %30.4 ve 900 °C sonunda %47 oranında azalmıştır.

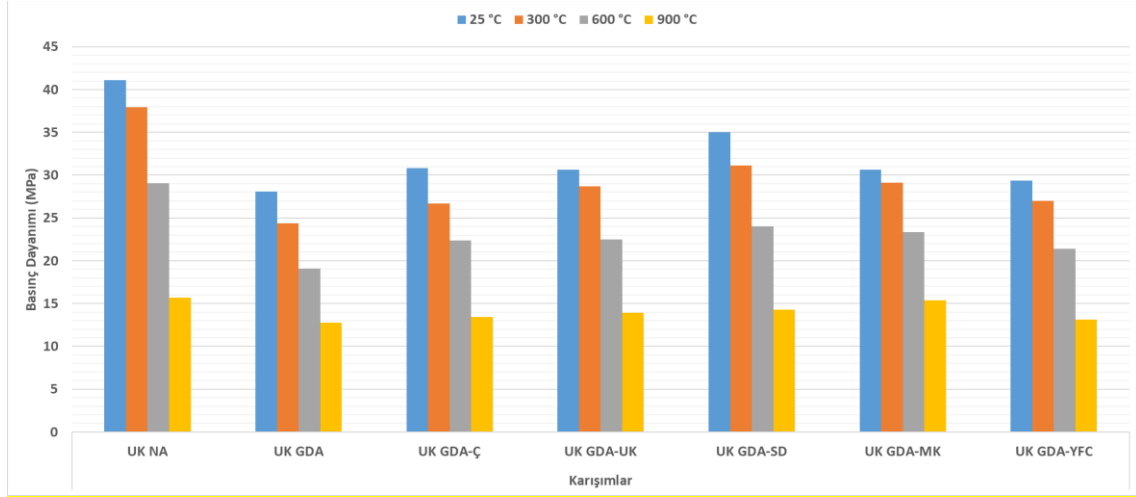
300 °C'de şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerin dayanımları, normal GDA'lılardan daha yüksek çıkmıştır. Bu sıcaklıkta SD şerbeti emdirilen GDA'lı GPB'ler 31.74 MPa ile en yüksek basınç dayanımını vermiştir.

Sıcaklık yükseldikçe şerbet emdirme işleminin GDA'lı GPB'lerin dayanımlarındaki etkisi kaybolmuş ve basınç dayanımları birbirine oldukça yaklaşmıştır. 600 °C'de ortalama basınç dayanımları 24.1 MPa, 900 °C'de ise 16.9 MPa düzeyinde olmuştur. Dayanım kayıpları ise 600 °C'de ortalama %32.9, 900°C'de ise %53.2 olmuştur.

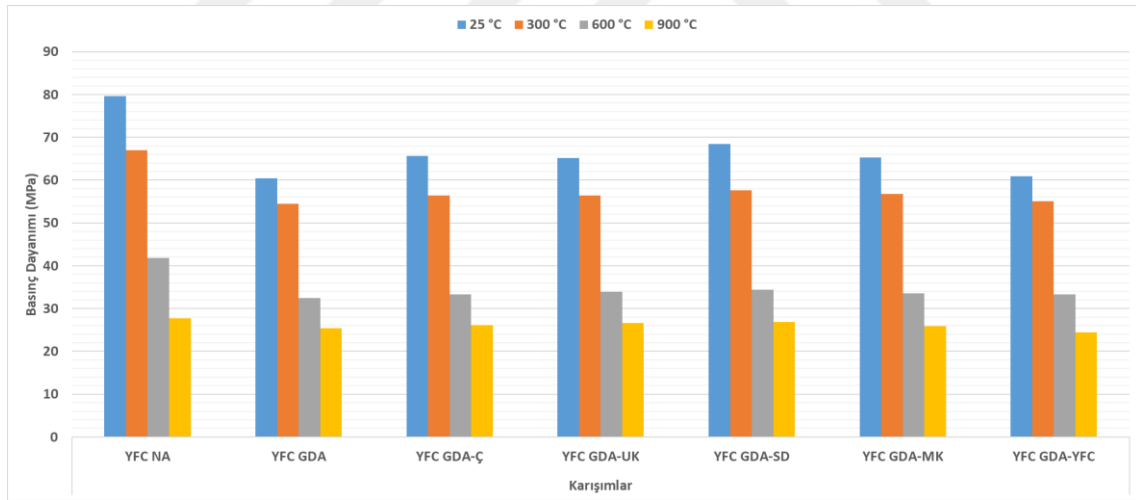
Fares vd. (2010), 600 °C'de oluşan dayanım kaybını, GDA yapısında bulunan eski harç tabakasındaki portlanditin sıcaklık etkisiyle serbest kirece ayrışması ve hidrate jellerin yapısındaki mikro gözeneklerdeki suyun ortamı terk ederek büzülme sonucu çatlaklar oluşması şeklinde açıklamışlardır.

Bazı araştırmacılara göre, GDA'lı GPB'lerin dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan önemli dayanım kaybının sebebi GDA yapısındaki eski harcın içindeki çimento pastasının yüksek sıcaklık etkisi sonucunda yapısının tamamen bozulmaya başlamasıdır. Bunun bir sebebi de GDA'daki eski harç tabakasındaki çimento pastası, yeni geopolimer

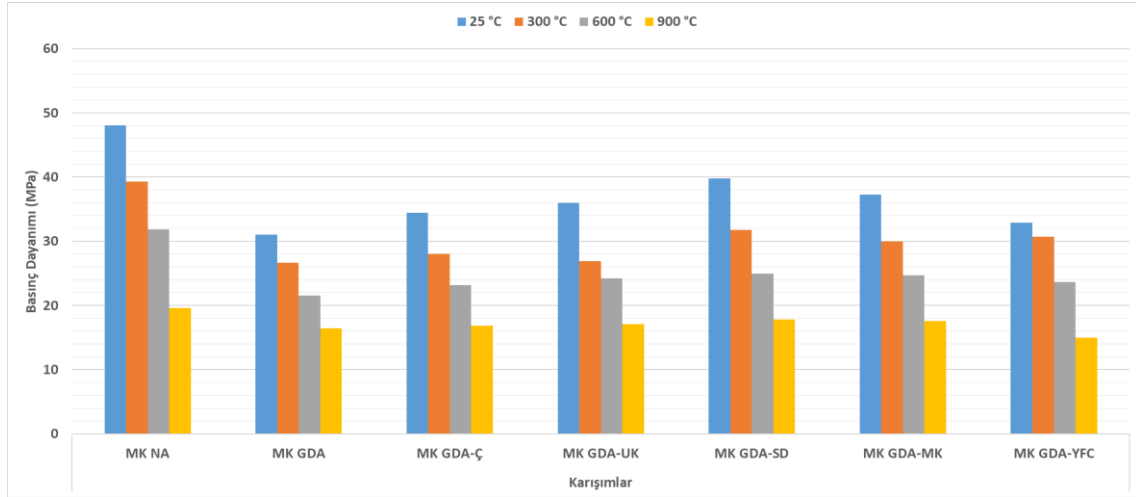
üretiminden bağlayıcı jelin ve agregaların ısı genleşmeleri arasındaki farktan dolayı betonun içinde makro termal çatlaklar oluşmasıdır (Chan vd., 1999; Fu vd., 2006).



Şekil 3.34. UK esaslı GPB’lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki ve oda sıcaklığındaki basınç dayanımları



Şekil 3.35. YFC esaslı GPB’lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki ve oda sıcaklığındaki basınç dayanımları



Şekil 3.36. MK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki ve oda sıcaklığındaki basınç dayanımları

3.14.2. Yüksek Sıcaklığın Ultrases Hızı Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.37'de UK esaslı GPB'lerin sıcaklık değişimine bağlı olarak ultrases hızları görülmektedir. NA'lı GPB'nin 4.17 km/s olan 28 günlük ultrases hızı, 300 °C sonunda %7.7, 600 °C sonunda %33 ve 900 °C sonunda %59 oranında azalmıştır. GDA'lı GPB'nin 3.57 km/s olan ultrases hızı ise 300 °C sonunda %15, 600 °C sonunda %43 ve 900 °C sonunda %66 oranında azalmıştır. Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerde ultrases hızı 300 °C'de ortalama %15, 600 ve 900 °C'de ise %43 ve %66 oranında azalmıştır.

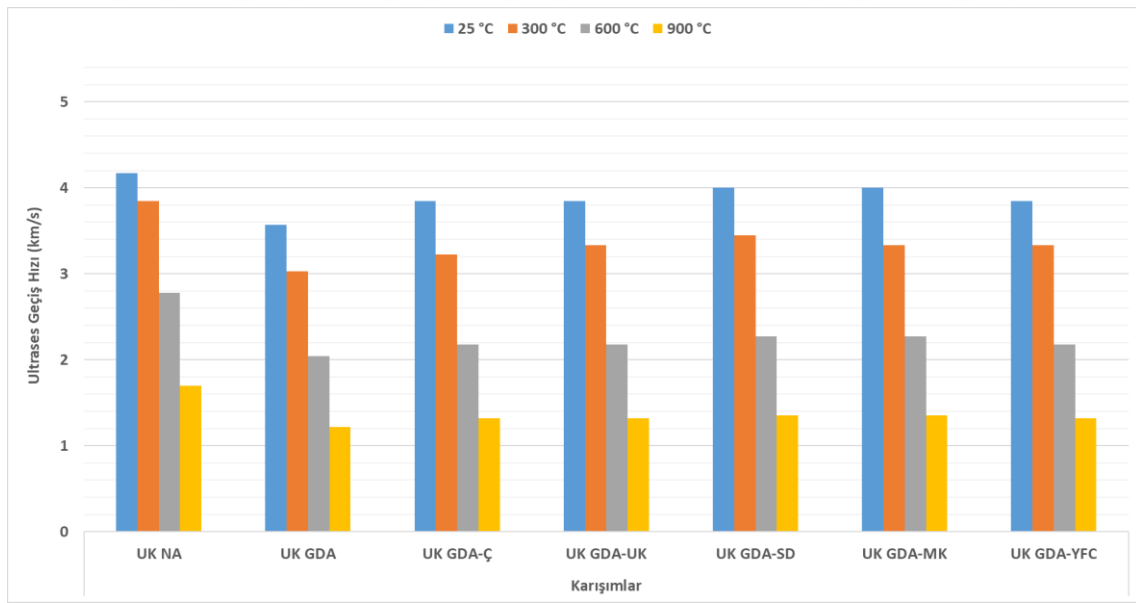
Şekil 3.38'de YFC esaslı GPB'lerin sıcaklık değişimine bağlı olarak ultrases hızları görülmektedir. NA'lı GPB'nin 5.00 km/s olan 28 günlük ultrases hızının, 300 °C sonunda %13, 600 °C sonunda %23 ve 900 °C sonunda %59 oranında azaldığı görülmektedir. GDA'lı GPB'nin 4.55 km/s olan ultrases hızı ise 300 °C sonunda %15, 600 °C sonunda %31 ve 900 °C sonunda %67 oranında azalmıştır. Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerde ultrases hızı 300 °C'de ortalama %12, 600 ve 900 °C'de ise %30 ve %68 oranında azalmıştır.

MK esaslı GPB'lerin sıcaklık değişimine bağlı olarak ultrases hızları Şekil 3.39'da görülmektedir. NA'lı GPB'nin 4.35 km/s olan 28 günlük ultrases hızı, 300 °C sonunda %8, 600 °C sonunda %28 ve 900 °C sonunda %59 oranında azalmıştır. GDA'lı GPB'nin 3.85 km/s olan ultrases hızı ise 300 °C sonunda %13, 600 °C sonunda %42 ve 900 °C sonunda %67 oranında azalmıştır. Şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerde ultrases hızı 300 °C'de ortalama %12, 600 ve 900 °C'de ise %30 ve %68 oranında azalmıştır.

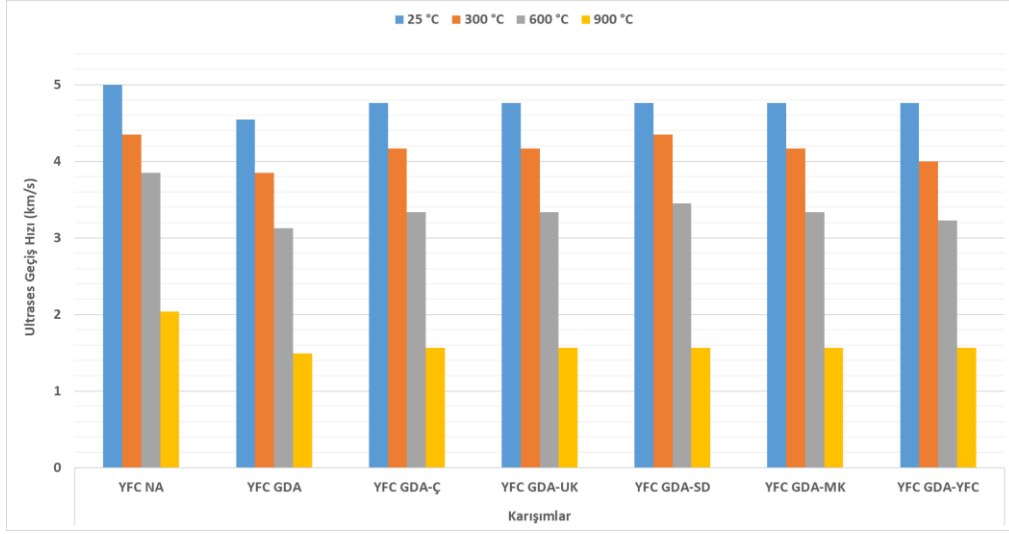
Grafikler birlikte değerlendirildiğinde GDA'lı GPB'lerin 900 °C sıcaklık etkisi sonucunda elde edilen ultrases hızlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tüm GPB'lerde 600 °C sıcaklıktan itibaren GPB'lerin ultrases hızlarında basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde belirgin azalma görülmüştür. Sıcaklık 900 °C'ye çıktığında bu azalma daha da artmıştır. Sıcaklık arttıkça hem GDA üzerindeki eski harçta hem GPB'nin bağlayıcı geopolimer jellerinde görülen yapısal bozulmalardan dolayı GPB'nin iç yapısının kalitesi düşmüş ve daha boşluklu bir yapıya dönüşmüştür. Sonuç olarak ses dalgaları boşluklu GPB'de daha zor iletildiği için GPB'lerin ultrases geçiş hızları tıpkı basınç dayanımı sonuçlarında görüldüğü gibi önemli oranda azalmıştır.

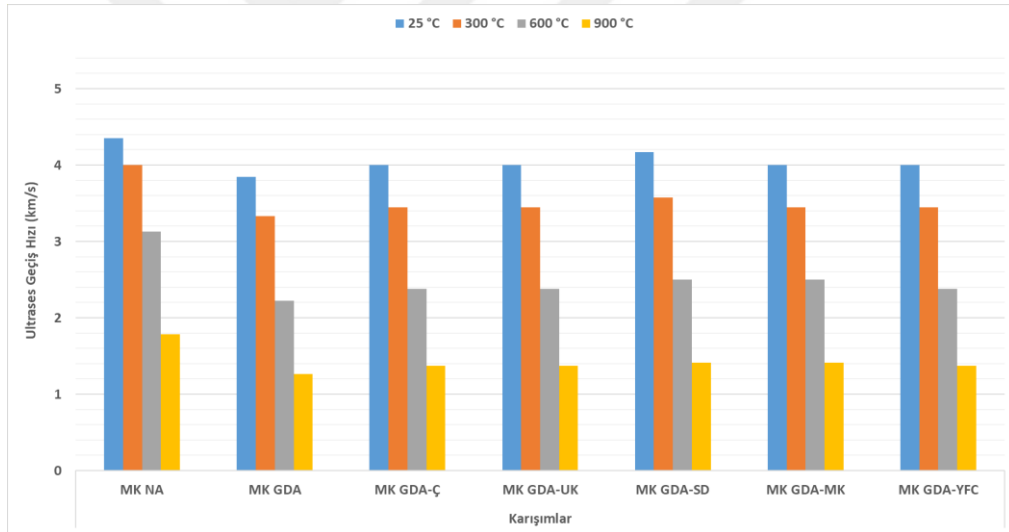
Şekil 3.40, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42'de UK, YFC ve MK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi gösterilmiştir. GPB'lerin basınç dayanımı-ultrases ilişki grafiklerine bakıldığında, 300°C ve 600°C'de determinasyon katsayılarının 0.9'un üzerinde olduğu görülmektedir. 900°C'ye çıkıldığında ise determinasyon katsayıları oldukça düşmektedir. Zira numuneler yüksek sıcaklığın etkisiyle basınç dayanımı ile ultrases hızları arasında bir ilişki kurulamayacak kadar tahrip olmuştur.



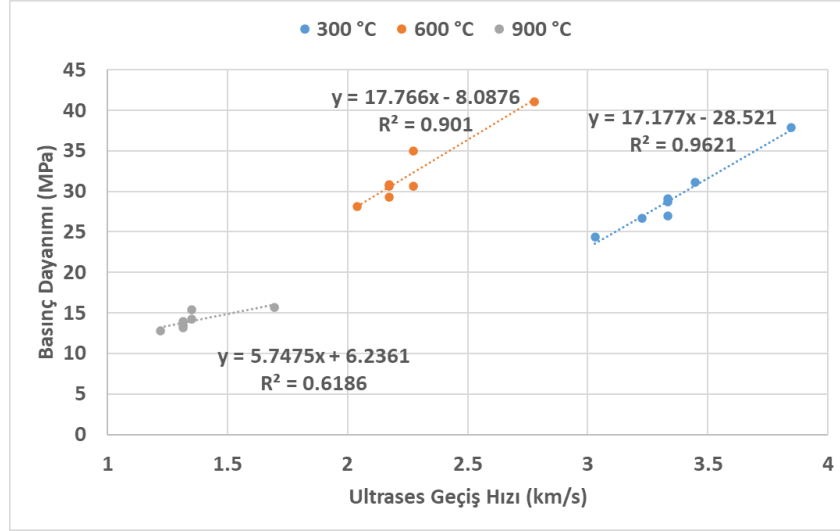
Şekil 3.37. UK esaslı GPB'lerin 25, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıktaki ultrases geçiş hızları



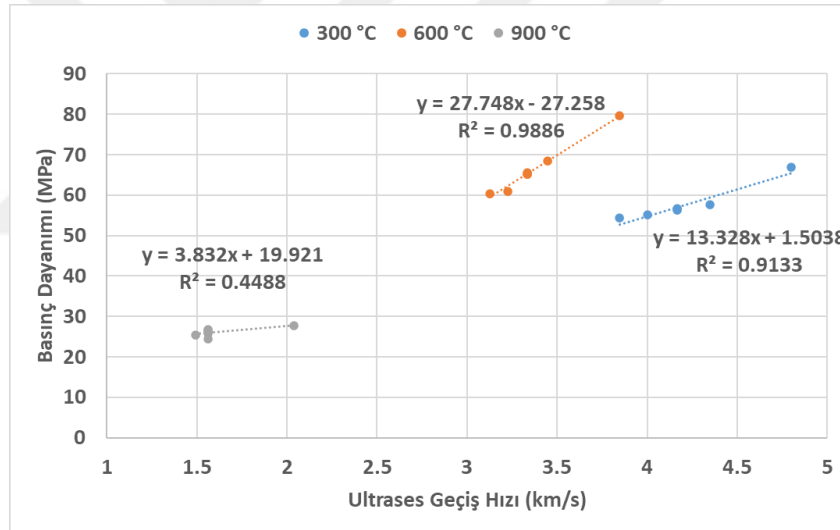
Şekil 3.38. YFC esaslı GPB'lerin 25, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıktaki ultrases geçiş hızları



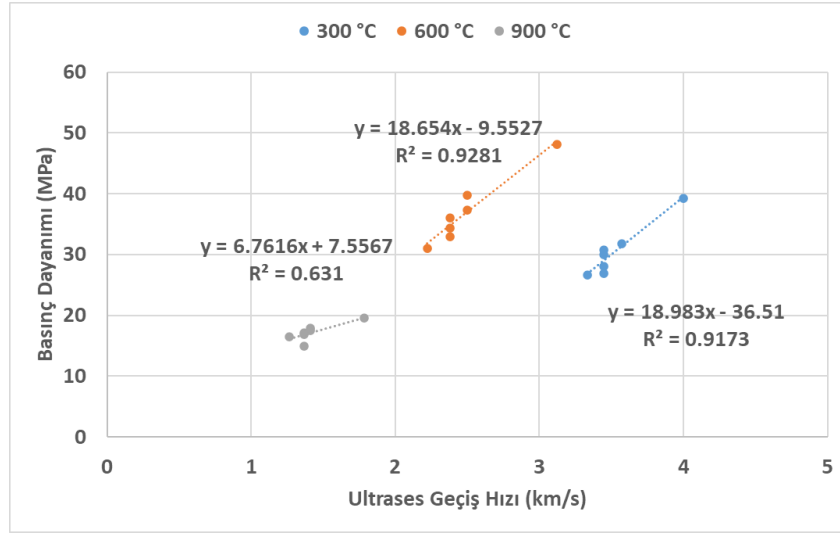
Şekil 3.39. MK esaslı GPB'lerin 25, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıktaki ultrases geçiş hızları



Şekil 3.40. UK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi



Şekil 3.41. YFC esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi



Şekil 3.42. MK esaslı GPB’lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımı-ultrases hızı ilişkisi

3.14.3. Yüksek Sıcaklığın Ağırlık Kaybı Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.43, Şekil 3.44 ve Şekil 3.45’te UK, YFC ve MK esaslı GPB’lerde 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık etkisi sonucunda oluşan ağırlık kayıpları gösterilmiştir. NA kullanılarak üretilen GPB’lerin 300 °C sonunda ağırlık kayıpları UK, YFC ve MK için sırasıyla %2.82, %4.06 ve %4.0 olarak belirlenmişken GDA içeren betonlarda ise bu değerler sırasıyla %28, %27 ve %30 azalarak %3.03, %3.85 ve %3.81 olmuştur.

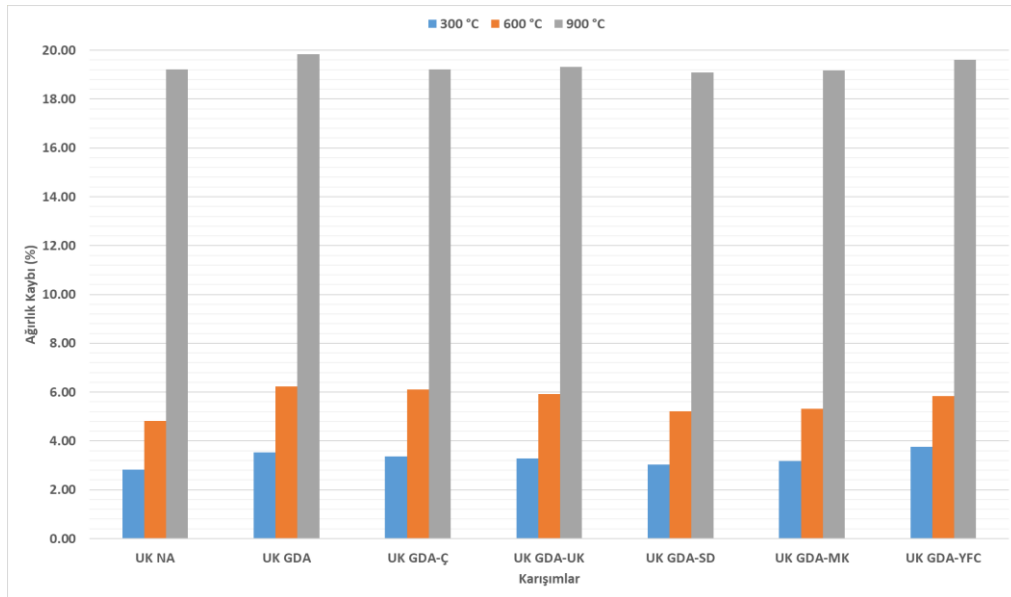
Tüm GPB tiplerinde 300 °C sıcaklık etkisi sonrasında betonlardaki ağırlık kayıpları, betonun basınç dayanımı ve ultrases sonuçlarına benzer bir eğilimdedir. Bu sıcaklıkta tüm bağlayıcı tipleri için benzer olarak SD ve MK şerbeti emdirilmiş GDA’lı GPB’ler çok az bir farkla da olsa en az ağırlık kaybını göstermiştir. Kong ve Sanjanyan’a göre, 300 °C sıcaklık etkisi neticesinde GPB’deki boşluk suyu buharlaşıp geopolimer matrisi büzülmeğe başlarken agregalar da sıcaklıktan dolayı hafif bir genleşme gösterir. Araştırmacılar, yaptığı çalışmalarında geopolimer matrisinin büzülmesi ile agreganın genleşmesi neticesinde oluşan iç gerilmelerin birbirini dengelediğinden 300 °C sıcaklık etkisi sonucunda GPB’lerde %2- 4 arasında çok düşük bir ağırlık kaybı oluştuğunu belirtmişlerdir (Kong ve Sanjanyan, 2010).

NA’lı betonların 600 °C sonunda ağırlık kayıpları UK, YFC ve MK esaslı GPB’lerde sırasıyla %4.82, %6.93 ve %5.69 olarak belirlenmişken GDA’lı GPB’lerde bu değerler sırasıyla % 6.23, %7.78 ve %6.66’ya çıkmıştır. GPB’lerin 600 °C sıcaklık sonrasında ağırlık kayıpları birbirine giderek yaklaşmıştır fakat SD ve MK şerbeti ile iyileştirilen GDA’lı

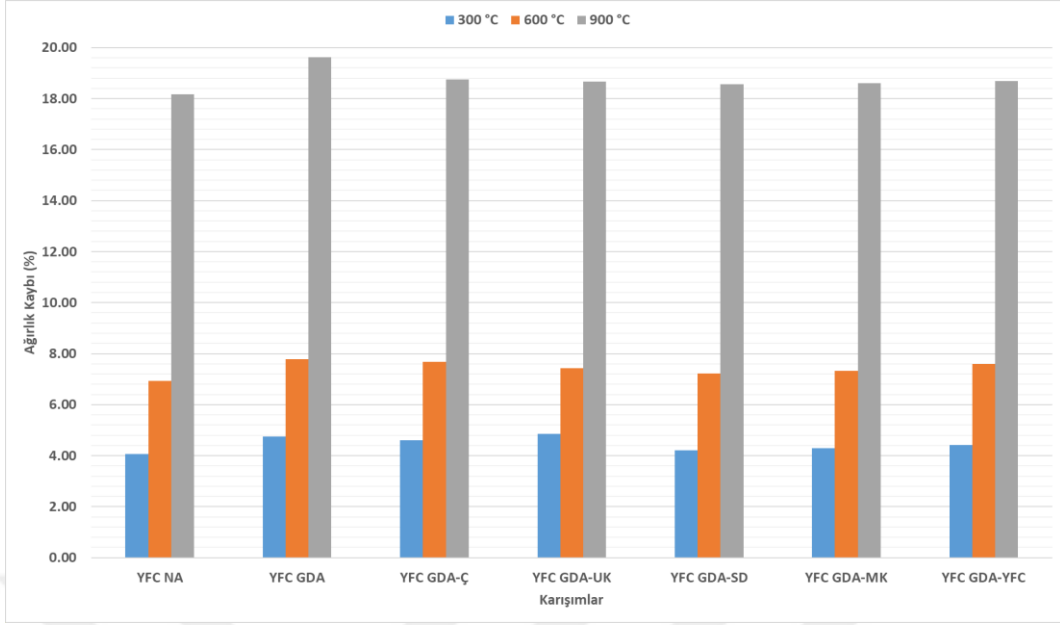
GPB'lerin ağırlık kaybı diğer betonlara göre bir miktar azdır. Örneğin, SD ve MK şerbeti emdirilen GDA'larla üretilen UK esaslı GPB'lerde ağırlık kaybı %16.2 ve %14.8, YFC esaslı GPB'lerde %7.3 ve %5.9, MK esaslı GPB'lerde ise %21.3 ve %20.1 daha az olmuştur.

600 °C'de ağırlık kaybının bir sebebi CaOH_2 'nin CaO ve H_2O 'ya dönüşmesi reaksiyonu sonucunda oluşan H_2O 'nun, yüksek sıcaklık etkisi altında buharlaşarak ortamı terk etmesidir. Buharlaşan bu su molekülleri matris içinde yüksek buhar basıncına sebep olarak betonun iç yapısında çatlakların genişlemesine ve betonun yüzeyinde iç gerilmeler sonucunda dökülmeler olmasına sebebiyet vermektedir. GDA ile üretilen GPB'lerde ise GDA üzerindeki eski harç tabakası içindeki boşluk suyunun da buharlaşması ve bu bölgede de büzülme oluşmasından dolayı, NA'lı GPB'lere kıyasla GDA'lı GPB'lerdeki zarar daha fazla olmuştur (Khoury vd., 2002; Merchant vd., 2021).

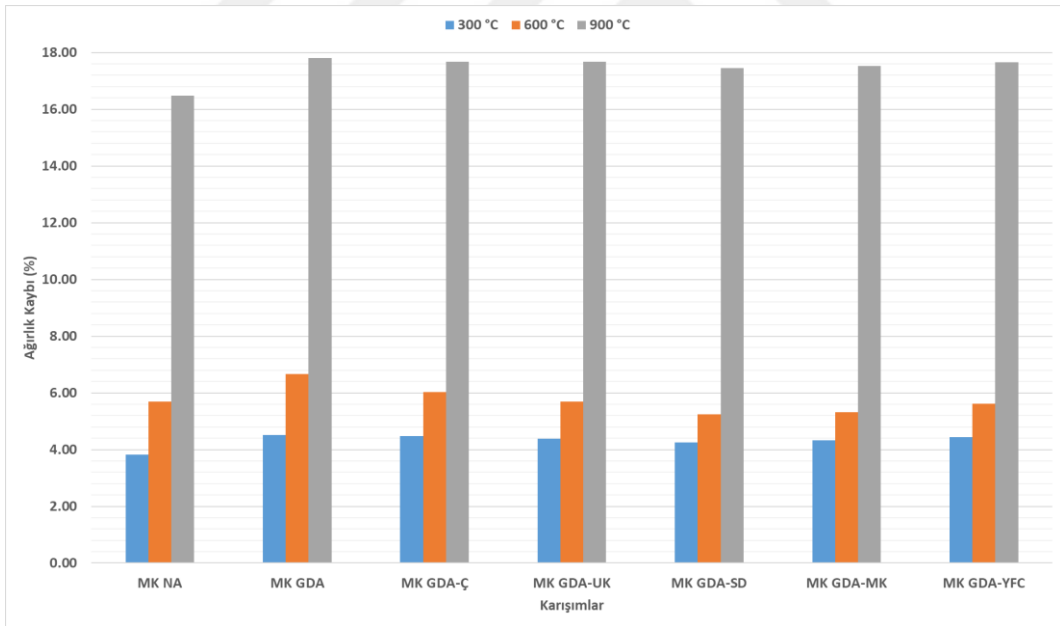
900 °C sonunda ise NA'lı betonların ağırlık kayıpları sırasıyla %19.2, %18.2 ve %18.7 olarak belirlenmişken GDA içeren betonlarda bu değerler sırasıyla % 19.8, %19.6 ve %17.8'e çıkmıştır. 900 °C'de agrega tipinden bağımsız olarak tüm GPB'lerin ağırlıkları belirgin bir şekilde azalmıştır. Bu sıcaklık etkisi altında GPB'nin bağlayıcı fazı olan alüminosilikat jeli deforme olup yapısal kararlılığını kaybetmiştir. Yapısı bozulan bağlayıcı jeller, agrega ve matrisin farklı ısıl genleşmesinden dolayı oluşan gerilmeleri karşılayamadığından numune üzerinde gözle görülebilecek çatlaklar ve gözenekler oluşmasına neden olmuştur (Palomo vd., 1999).



Şekil 3.43. UK esaslı GPB'lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda ağırlık kayıpları



Şekil 3.44. YFC esaslı GPB’lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda ağırlık kayıpları



Şekil 3.45. MK esaslı GPB’lerin 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda ağırlık kayıpları

Şekil 3.46’da sıcaklığa maruz kalan GPB numunelerinin fotoğrafları gösterilmiştir. Görseller incelendiğinde 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin yüzeylerinde kılcal çatlaklar oluşmuşken, sıcaklık arttıkça bu çatlaklar daha derin ve yaygın şekle gelmiş ve GP

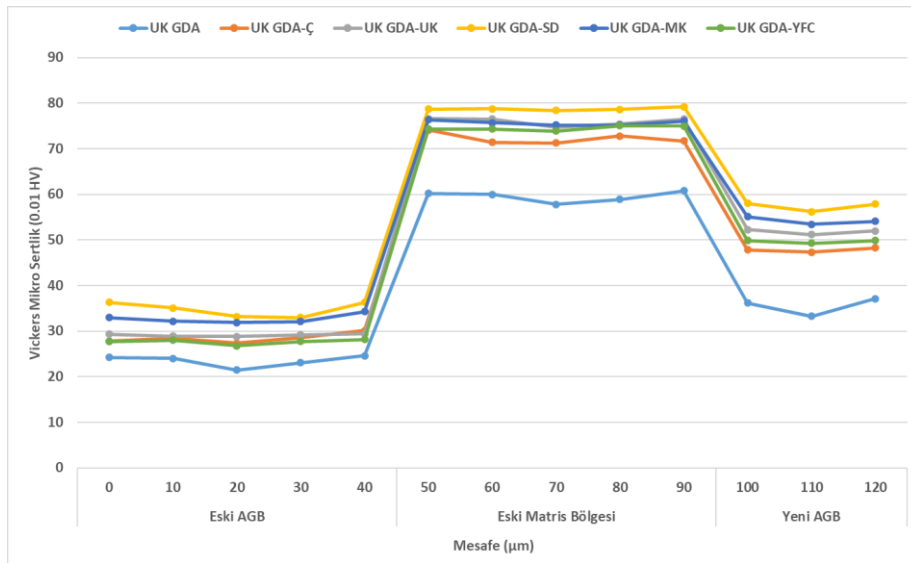
matrisi pembeleşmeye başlamıştır. Bu renk değişimi, bağlayıcı matrisin formunun bozulmaya başladığının bir göstergesidir.



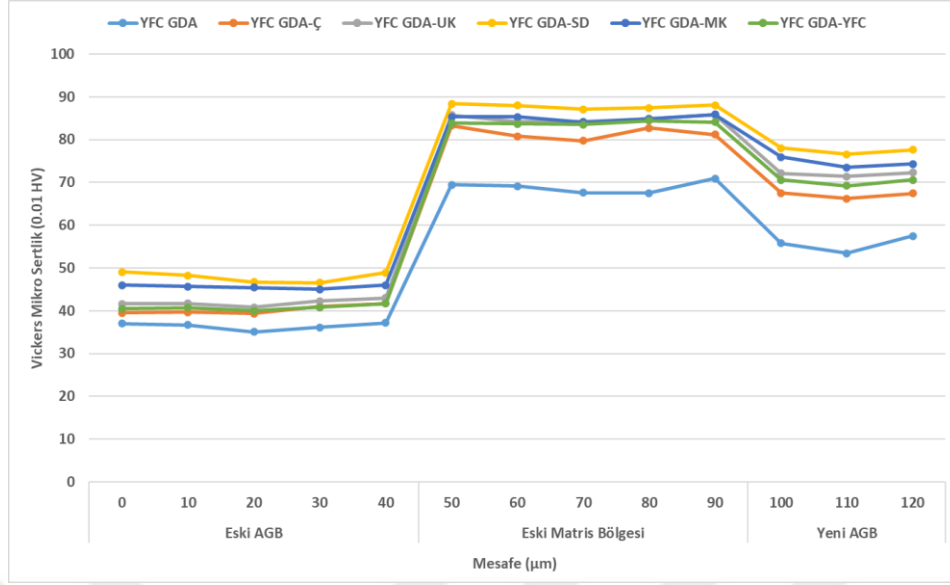
Şekil 3.46. Soldan sağa 300, 600 ve 900 °C sıcaklık etkisi sonunda GPB numunelerinin görselleri

3.15. Mikro Sertlik Deneyi

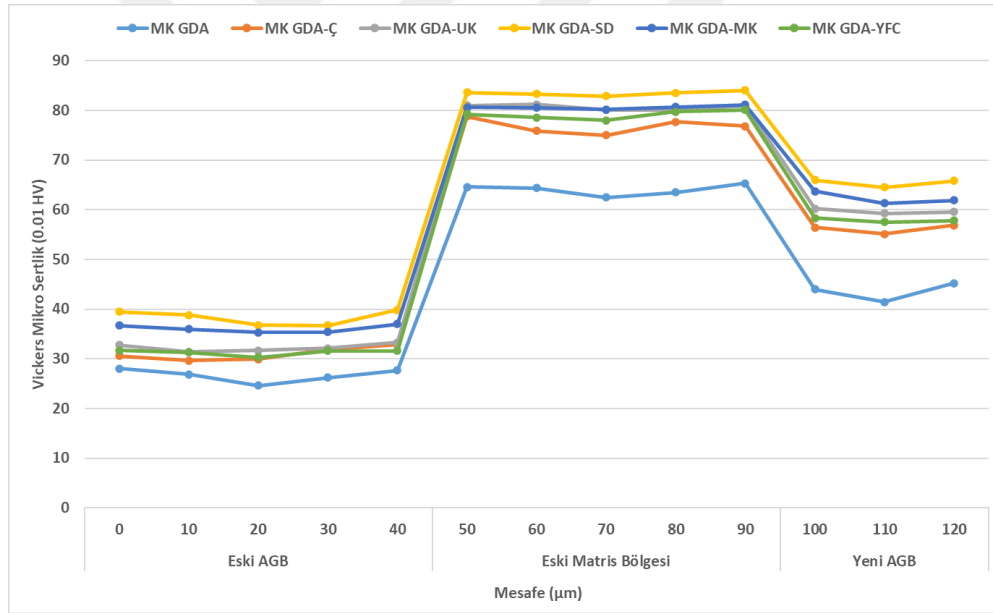
Şekil 3.47, Şekil 3.48 ve Şekil 3.49’da sırasıyla UK, YFC ve MK esaslı GDA içeren GPB’lerin mikrosertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Yapılan ölçümlerde eski AGB, eski matris bölgesi ve yeni AGB üzerinde ölçümler yapılarak GDA’lara şerbet emdirme işleminin GDA ve AGB kalitesi üzerindeki etkisi belirlenmiştir.



Şekil 3.47. UK esaslı GPB’lerin mikrosertlik sonuçları



Şekil 3.48. YFC esaslı GPB'lerin mikrosertlik sonuçları



Şekil 3.49. MK esaslı GPB'lerin mikrosertlik sonuçları

Tüm GPB tiplerinde literatüre paralel bir şekilde GDA üzerindeki eski AGB'nin sertliği yeni AGB'den daha düşük çıkmıştır (Otsuki vd., 2003).

Her üç grafik birlikte değerlendirildiğinde, şerbet emdirme işleminin GDA'nın mikro yapısını daha boşluksuz bir hale getirmesi dolayısıyla şerbet emdirilen GDA'ların mikrosertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tüm GPB tiplerinde, şerbet emdirilen GDA'ların eski AGB bölgesinin sertliği, emdirilmemişlerle kıyaslandığında en yüksek oranı SD ve MK şerbeti emdirilen GDA'ların verdiği görülmektedir. SD ve MK şerbeti emdirilmiş GDA'lardaki eski AGB'nin sertliği UK esaslı olanlarda sırasıyla ortalama %48 ve %39, YFC esaslı olanlarda %32 ve %25, MK esaslılarda ise %44 ve %35 artmıştır.

Eski matris bölgeleri incelendiğinde de aynı eğilim görülmüştür. En yüksek sertlik değerleri SD şerbeti emdirilmiş GDA'larda ölçülmüştür. Bu sertlik değerlerinin şerbet emdirilmemiş GDA'larınkine oranları UK esaslı GPB'lerde ortalama %32, YFC esaslılarda %27 ve MK esaslılarda %30'dur.

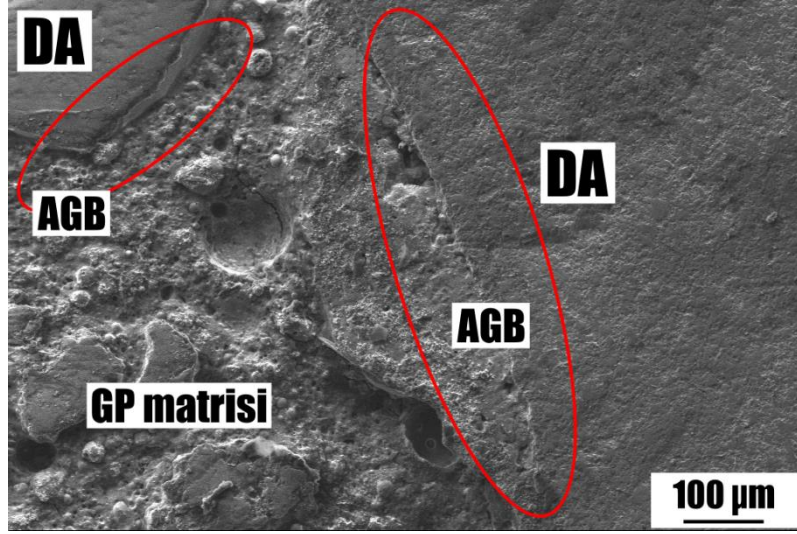
SD şerbeti emdirilmiş GDA'ların yeni matris bölgesindeki sertlikleri ise UK esaslı GPB'lerde %61, YFC esaslılarda %39, MK esaslılarda ise %50 oranında artmıştır.

GDA üretilirken uygulanan kırma ve eleme işleminden dolayı eski AGB ve eski harç bölgesinde olan çatlaklardan dolayı bu bölgelerin sertliği, yeni üretilen GPB matrisinden daha düşüktür (Kong vd., 2010; Li vd., 2012).

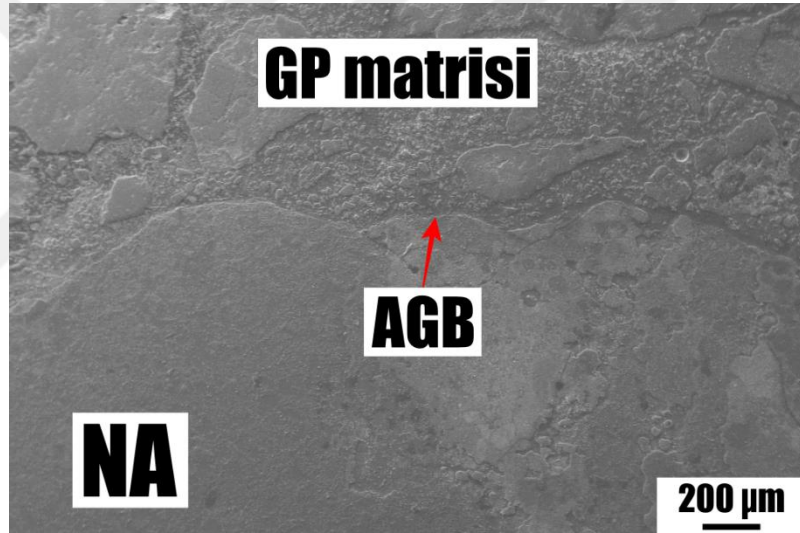
Bu sonuçlar şerbet emdirme işleminin hem eski AGB'nin hem GDA üzerindeki eski harç tabakasının ve hem de yeni AGB'nin sertliğini iyileştirdiğinin bir göstergesidir. Oluşan daha yoğun arayüzey bölgeleri ve boşlukları dolan eski harç tabakası sayesinde önceki başlıklarda vurgulanan daha yüksek mekanik özellikler ve daha az geçirimsilik özellikleri elde edilebilmiştir. Bu iyileşmeler SD şerbeti emdirilen GDA'lar için çok daha belirgin olmuştur.

3.16. Mikroyapı Analizi

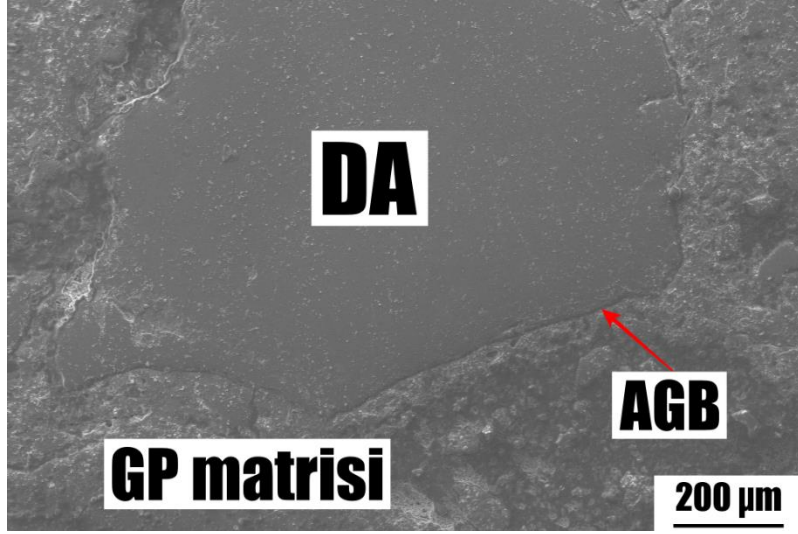
Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52'de NA ile üretilen UK, YFC ve MK esaslı GPB'lerin SEM fotoğrafı görülmektedir. Her üç fotoğrafta da NA ile yeni GP matrisi arasındaki AGB'nin çatlaksız ve boşluksuz olduğu, yeni matris ile NA arasında iyi bir aderansın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.50. NA ile üretilen UK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü

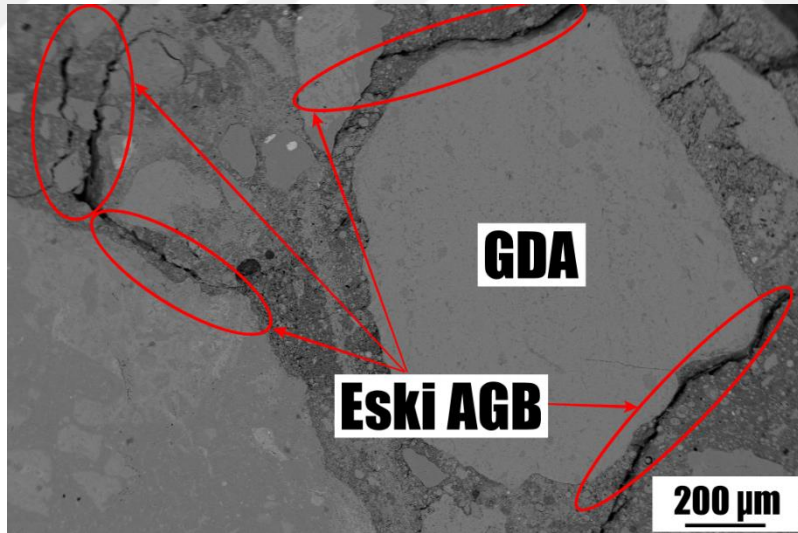


Şekil 3.51. NA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin SEM görüntüsü

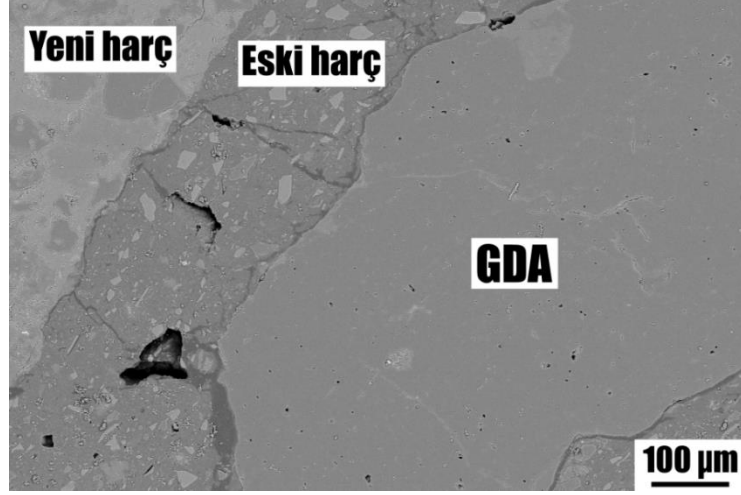


Şekil 3.52. NA ile üretilen MK esaslı GBP'nin SEM görüntüsü

Şekil 3.53'te GDA ile üretilen UK esaslı GBP'nin, Şekil 3.54'te MK esaslı GBP'nin SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde GDA üzerine yapışmış olan eski harç ve eski AGB'nin boşluklu ve çatlaklı yapıları görülebilmektedir.

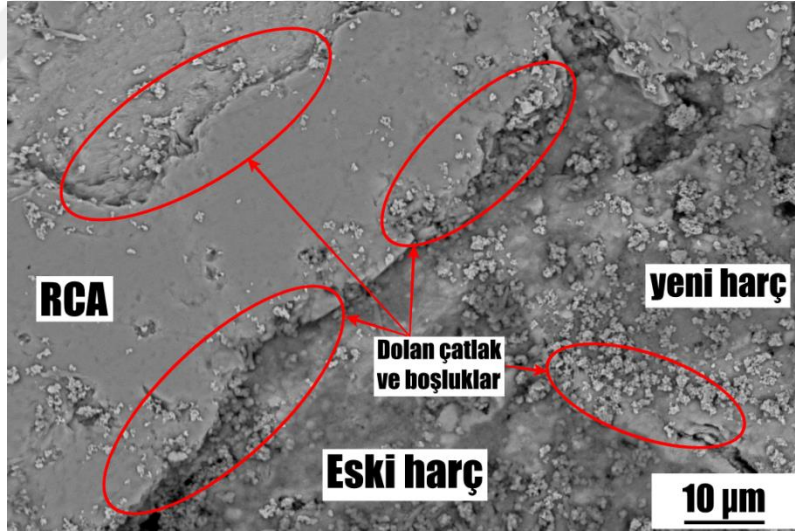


Şekil 3.53. GDA ile üretilen UK esaslı GBP'nin SEM görüntüsü



Şekil 3.54. GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü

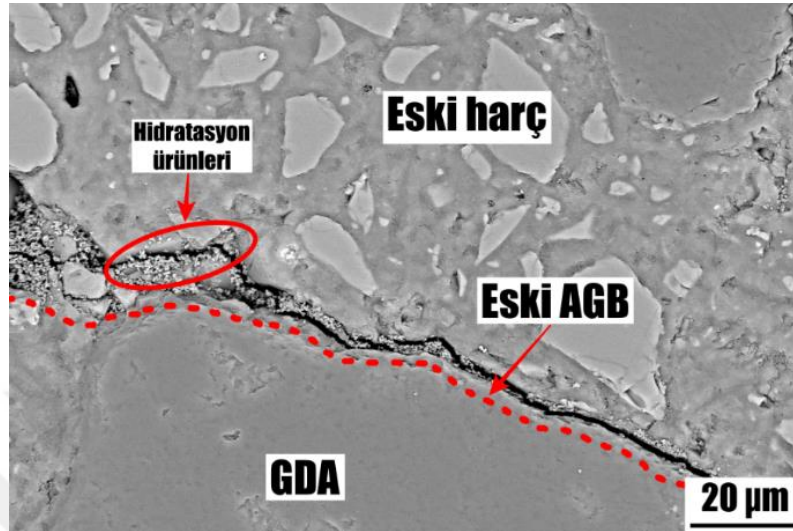
Şekil 3.55'te SD şerbeti emdirilmiş GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin SEM fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde GDA'da bulunan eski AGB'nin şerbet emdirme işlemi sonucunda hidrasyon ürünleri ile doldurulduğu gözükmemektedir.



Şekil 3.55. Şerbet emdirilmiş GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü

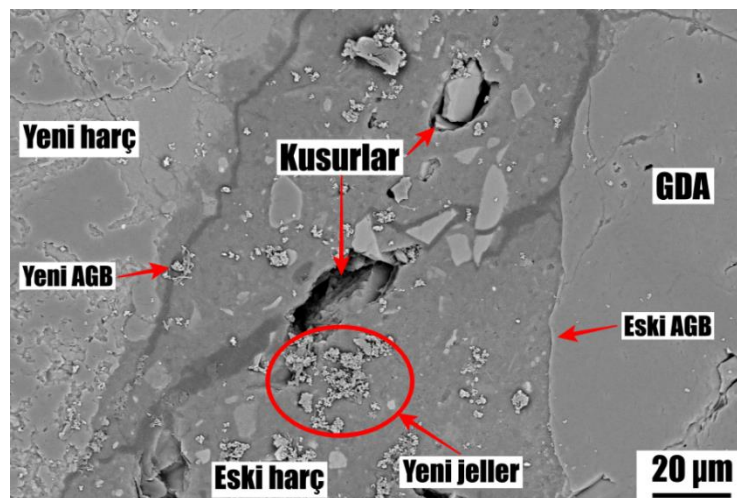
Şekil 3.56'da SD şerbeti emdirilmiş GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin SEM görüntüsü gösterilmiştir. GDA ile yeni matris arasındaki AGB'nin çatlaklı ve boşluklu olduğu açıkça görülebilmektedir. AGB üzerinde şerbet emdirme işleminden kaynaklı yeni

hidratasyon ürünleri görülmüştür. Ayrıca AGB’de tamamen hidrate olamamış SD tanecikleri çatlak ve kusurları fiziksel olarak doldurarak filler etkisi göstermiştir.



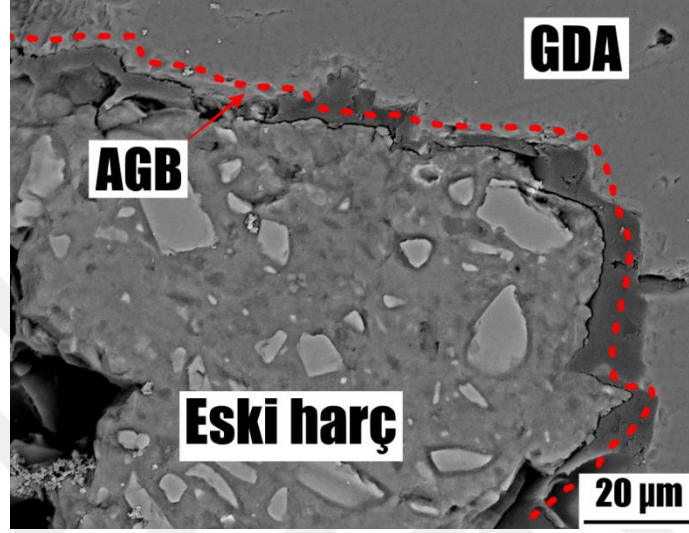
Şekil 3.56. Şerbet emdirme işlemi uygulanmış GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin SEM görüntüsü

Şekil 3.57’de Şerbet emdirilmiş GDA kullanılarak üretilen MK esaslı GPB’nin SEM fotoğrafı gösterilmiştir. GDA ile yeni GP harcı arasındaki AGB’nin çatlaklı ve kusurlu olduğu ve bu kusurların şerbet emdirme işlemi sonucunda oluşan yeni hidratasyon ürünleri ile doldurulduğu görülebilmektedir.



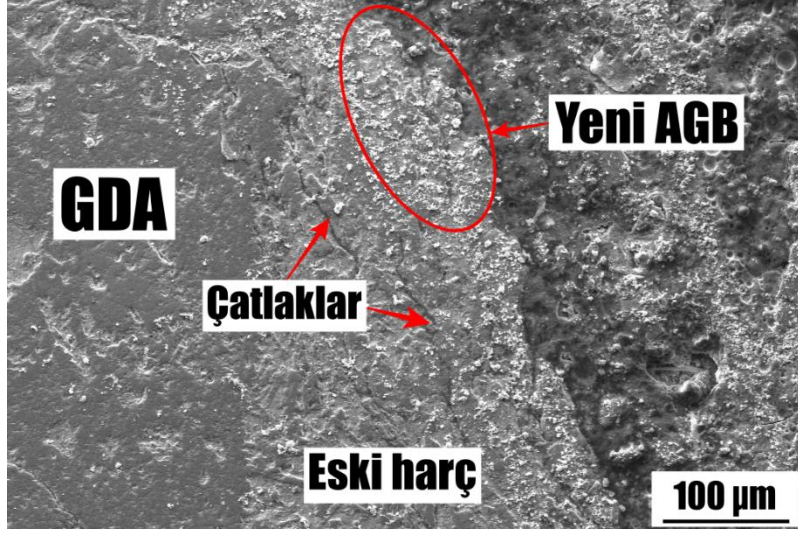
Şekil 3.57. Şerbet emdirme işlemi uygulanmış GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin SEM görüntüsü

Şekil 3.58’de GDA kullanılarak üretilen YFC esaslı GPB’nin 300 °C sıcaklık sonrası SEM fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde GDA ile eski harç tabakası arasındaki AGB’de çatlaklar oluştuğu ve eski harç tabakasının yapısında ısıl etkiden dolayı bozulma olmadığı gözükmemektedir.



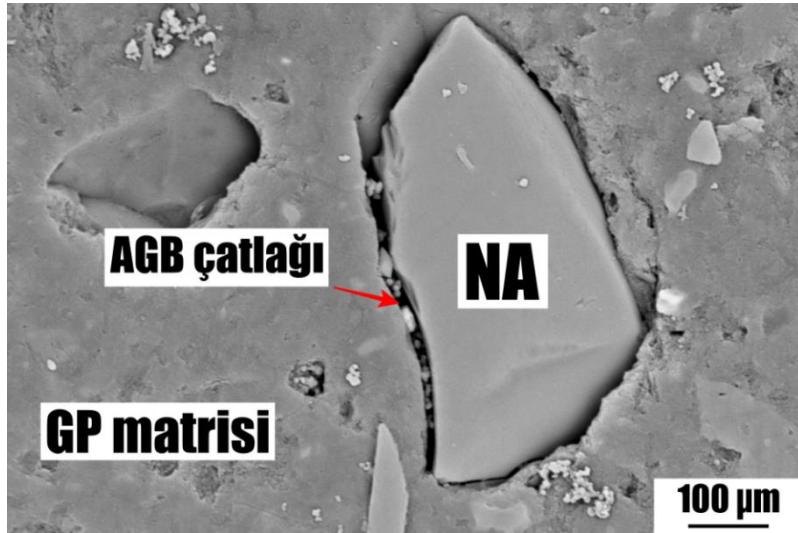
Şekil 3.58. GDA ile üretilen YFC esaslı GPB’nin 300 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

Şekil 3.59’da şerbet emdirilmiş GDA kullanılarak üretilen UK esaslı GPB’nin 300 °C sıcaklık sonrası SEM fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde GDA ve yeni GP matrisi üzerinde sıcaklığın herhangi bir olumsuz etkisi görülmemektedir. GDA’nın üzerine yapışan eski harç tabakasında ise seyrek şekilde termal çatlaklar olduğu, puzolanik şerbet emdirme işlemi neticesinde oluşan hidratasyon ürünlerinin biriktiği görülmektedir.



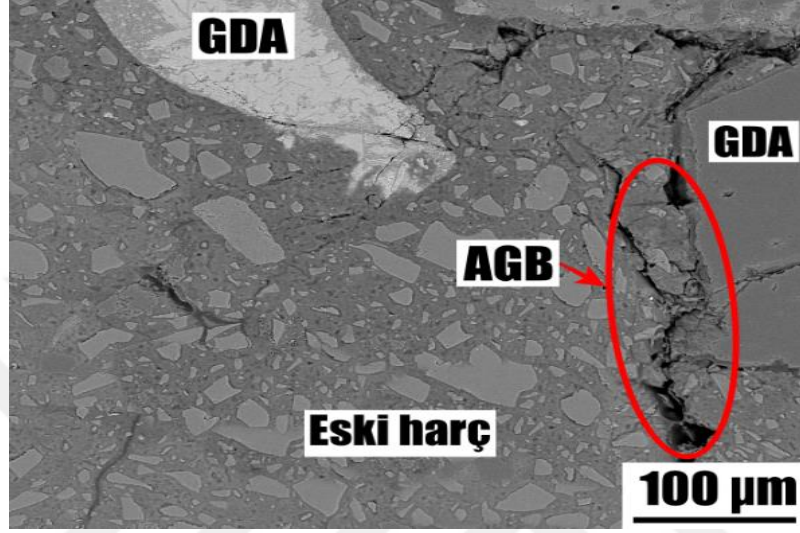
Şekil 3.59. Şerbet emdirilmiş GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin 300 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

Şekil 3.60'ta NA ile üretilen MK esaslı GPB'nin 600 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü görülmektedir. 600 °C sıcaklık etkisi sonucunda GP matrisi üzerinde yer yer boşluklar oluşmuş olsa da NA üzerinde herhangi bir deformasyon görülmemiştir. Agrega ile matrisin ısı genleşme farkından dolayı NA ile GP matrisi arayüzeyinde çatlaklar oluşmuştur.



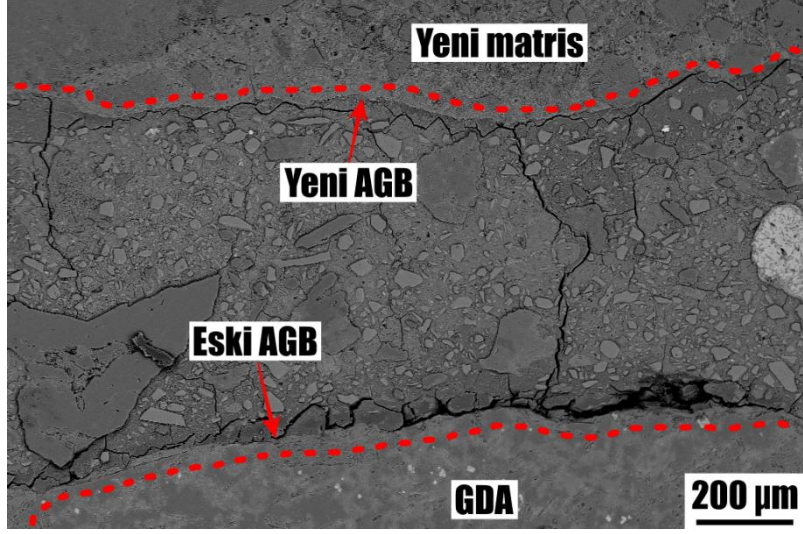
Şekil 3.60. NA ile üretilen MK esaslı GPB'nin 600 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

Şekil 3.61’de GDA ile üretilen YFC esaslı GPB’nin 600 °C sıcaklık etkisi sonrası eski harç ve AGB’de oluşan çatlaklar gözükmemektedir. Şekil incelendiğinde eski harç tabakasında yaygın bir şekilde olmasa da mikroçatlaklar olduğu ve bu çatlakların AGB’de yoğunlaştığı görülebilmektedir.



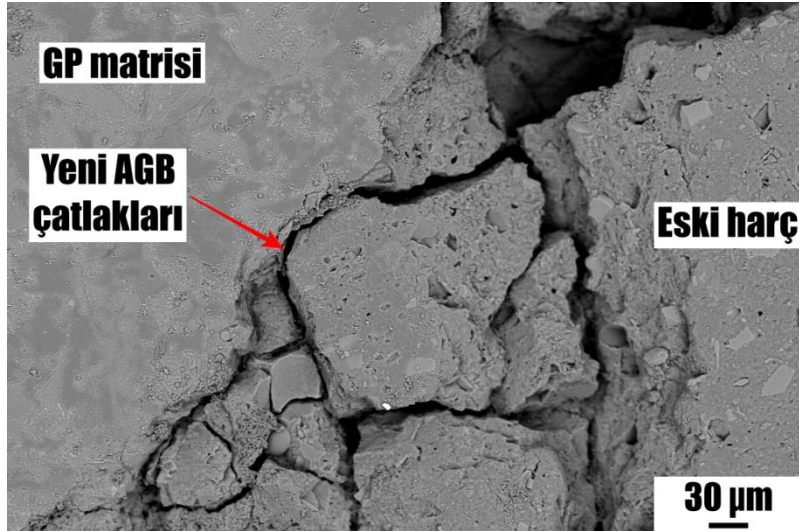
Şekil 3.61. GDA ile üretilen YFC esaslı GPB’nin 600 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

Şekil 3.62’de GDA kullanılarak üretilen YFC esaslı GPB’nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde yeni GP matrisinde mikro çatlaklar olduğu ve eski AGB ve GDA’nın üzerine yapışık olan eski harcın çatladığı ve formunu kaybettiği görülebilmektedir.



Şekil 3.62. GDA ile üretilen YFC esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

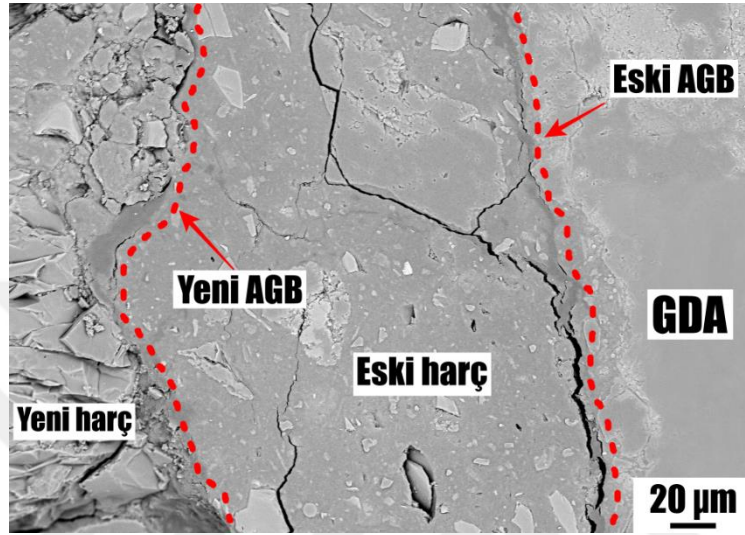
Şekil 3.63'te GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü görülmektedir. 900 °C sıcaklık etkisi sonucunda GP matrisi ile GDA arasında kalan eski harç tabakasında büyük çatlaklar ve boşluklar oluşarak yapısal kararlılığının bozulduğu görülmektedir.



Şekil 3.63. GDA ile üretilen MK esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

Şekil 3.64'te SD şerbeti emdirilmiş GDA kullanılarak üretilen UK esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM fotoğrafı görülmektedir. Şekil incelendiğinde eski agregada birkaç

mikroçatlak haricinde bir deformasyon olmadığı fakat hem yeni hem de eski AGB'de boydan boya çatlaklar ve boşluklar oluştuğu görülebilmektedir. Eski harç tabakasında ise belirgin bir şekilde çatlaklar ve boşluklar oluşmuştur. Yeni GP harç bölgesinde ise bağlayıcı GP jellerinin yapılarının bozulduğu ve çatladığı görülmektedir.



Şekil 3.64. GDA ile üretilen UK esaslı GPB'nin 900 °C sıcaklık sonrası SEM görüntüsü

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada puzolanik şerbet emdirme işleminin GDA'lı GPB'lerin performansına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Ön deneylerle en uygun şerbet emdirme yöntemleri belirlenmiştir. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'lar kullanılarak UK, YFC ve MK esaslı GPB'ler üretilmiştir. GDA'lara emdirilen şerbetler çimento ve çimentoyla ikame edilmiş halde UK, SD, MK ve YFC'dir. Üretilen GPB'lerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Ön deneyler sonucu belirlenen en uygun şerbet emdirme yöntemi bağlayıcı/su oranı 2/10 olan şerbetin GDA'lar ile karıştırılarak 4 saat boyunca her 15 dakikada bir karıştırılması ve süzdürülerek laboratuvar ortamında kurutulması şeklinde olmuştur.
2. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'ların su emme yüzdeleri, Los Angeles aşınma yüzdeleri ve agrega darbe indeksleri azalmıştır. GDA özelliklerinde en fazla iyileşme sağlayan şerbetler %100 çimento, çimento + %30 SD, çimento + %20 MK, çimento + %50 UK ve çimento + %40 YFC içeren şerbetler olmuştur.
3. GPB üretiminde GDA kullanımı ile işlenebilirlik azalmıştır. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'ların kullanımı ile GPB'lerin işlenebilirliği artmıştır. İşlenebilirlikteki en fazla iyileşme UK şerbeti emdirilen GDA'larla sağlanmıştır. GDA'lı GPB'lere göre UK ve MK esaslı GPB'lerde %25, YFC esaslı GPB'lerde %38 oranında artış gözlenmiştir.
4. GDA ile üretilen GPB 'lerin sertleşmiş birim ağırlıkları NA'lı GPB'lere göre ortalama %4.5 oranında azalmıştır. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin sertleşmiş birim ağırlıkları artmıştır. En yüksek artış SD içeren şerbet ile ortalama %9.8 düzeyinde olmuştur.
5. GDA ile üretilen GPB'lerin 90 günlük basınç dayanımları NA'lı GPB'lere göre UK esaslılarda %41, YFC esaslılarda %23, MK esaslılarda %32 oranında azalmıştır. Puzolanik şerbet emdirilen GDA'lı GPB'lerin basınç dayanımları artmıştır. En fazla dayanım artışı SD şerbeti emdirilen GDA'ların kullanımıyla sağlanmıştır. SD şerbeti emdirilmiş GDA'lar 90 günlük basınç dayanımlarında UK esaslı GPB'lerde %56.5 , MK esaslı GPB'lerde % 39.0 gibi önemli oranlarda iyileşme sağlamıştır.
6. YFC esaslı GPB'lerin dayanım düzeyleri diğer bağlayıcılardan çok üstün olmuş, puzolan şerbeti emdirilmiş GDA'lar 90 günlük basınç dayanımında ortalama %8 iyileşme sağlamıştır.

7. Yarmada çekme dayanımlarında emdirilen şerbet tipinden bağımsız olarak UK esaslı GPB'lerde 90 günde % 33, YFC esaslı GPB'lerde %8, MK şerbeti emdirilenlerde % 29 olmuştur.
8. Pozolanik şerbet emdirilen GDA'larla üretilen GPB'lerin su emme, basınçlı su emme ve kılcal su emme değerleri, herhangi bir işlem uygulanmayan GDA'lı GPB'lerden daha az olmuştur. SD şerbeti emdirilen GDA'lar kullanıldığında su emmede %38, kılcal su emmede %54, klorür geçirimliliğinde %39 oranında artışlar sağlanmıştır.
9. SD şerbeti emdirilmiş GDA'lı GPB'lerin 90 günlük klorür geçirimlilikleri UK, YFC ve MK bağlayıcıları için sırasıyla %36.0, %24.5 ve %39.5 oranında azalmıştır. Hızlı klorür geçirimliliği ve elektriksel özdirenç değerlerinde sağlanan iyileşmeler birlikte değerlendirildiğinde pozolanik şerbet emdirme işleminin GDA'lı GPB'lerin donatı korozyonuna karşı direncini arttırdığı söylenebilir.
10. Şerbet emdirme uygulanan GDA'lı GPB'lerin ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme indekslerinin betonun genel kalitesiyle paralel olduğu görülmüştür.
11. Her 3 bağlayıcı tipi için pozolanik şerbet emdirme işlemi uygulanan GDA'ların kullanımı GPB'lerin Böhme aşınma değerinde çok önemli iyileşmeler sağlayamamıştır. Aşınmadaki en fazla iyileşme %9.4 oranında UK esaslı GPB'lerde MK emdirilen GDA'larla sağlanmıştır.
12. GDA'lı GPB'lerin yüksek sıcaklık etkisi sonucu basınç dayanımı kayıpları NA'lı GPB'lerden daha fazla olmuştur. Şerbet emdirme işlemi uygulanan GDA'lı GPB'lerin yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanım kayıpları ve kütle kayıpları daha az olmuş fakat 900°C'de bu farklar azalmıştır.
13. GPB'lerin yüksek sıcaklık etkisi sonucunda basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişkiye ait determinasyon katsayıları, uygulanan sıcaklık arttıkça birbirinden uzaklaşmış yani arasındaki ilişki zayıflamıştır.
14. Şerbet emdirme işlemi GDA'ların eski AGB, eski matrix bölgesi ve yeni AGB'nin mikrosertlik değerlerini belirgin bir şekilde artırmıştır.
15. Mikroyapı analizi sonucunda NA ile yeni GP matrisi arasındaki AGB'nin çatlaksız ve boşluksuz olduğu, yeni matris ile NA arasında iyi bir aderansın olduğu görülmüştür. GDA'lı GPB'lerin SEM fotoğrafları incelendiğinde şerbet emdirme işleminin GDA'da bulunan eski AGB'nin boşluklarını yeni hidratasyon ürünleri ile doldurduğu, ayrıca bu bölgelerde hidrate olamamış SD taneciklerinin de çatlak ve kusurları fiziksel olarak doldurduğu tespit edilmiştir.

16. 300 °C sıcaklık sonrasında GDA ile eski harç tabakası arasındaki AGB’de çatlaklar oluştuğu ve eski harç tabakasının yapısında ısıl etkiden dolayı bozulma olmadığı, puzolanik şerbet emdirilen GDA’lardaki termal çatlakların daha az olduğu ve çatlaklar içerisinde hidrasyon ürünlerinin biriktiği görülmüştür. 600 °C’de GP matrisi üzerinde yer yer boşluklar görülmüş; 900°C’de ise hem GP matrisinde hem de GDA üzerindeki eski harç tabakasında büyük çatlakların oluştuğu görülmüştür.
17. Bu konu ile ilgili ileride yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada etkinliği görülen puzolanik şerbet emdirilmiş GDA’lı GPB üretiminde farklı karıştırma yöntemleri, farklı bağlayıcılar, farklı dozajlar, alkali çözelti molariteleri ve GPB’ye uygun farklı kimyasal akışkanlaştırıcılar denenebilir. Bu GPB’lerin rötre ve sülfata dayanıklılık özellikleri belirlenebilir. Ayrıca, beton sektöründe bir kum krizinin varlığı düşünüldüğünde sadece iri GDA’ların değil ince GDA’ların da iyileştirilerek GPB’de kullanılabilirliği araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Adak, D., Sarkar, M. ve Mandal, S., 2014. Effect of Nano-Silica on Strength and Durability of fly Ash Based Geopolymer Mortar, Construction and Building Materials, 70, 453-459.
- Adam, A. ve Horianto, A., 2014. The Effect of Temperature and Duration of Curing on the Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar, Procedia Engineering, 95, 410-414.
- Akbarnezhad, A., Huan, M., Mesgari, S. ve Castel, A., 2015. Recycling of Geopolymer concrete, Construction and Building Materials, 101, 152–158.
- Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., Zhang, M.H., Tam, C.T. ve Foo, T.W.J., 2011. Microwave-Assisted Beneficiation of Recycled Concrete Aggregates, Construction and Building Materials, 25, 8, 3469–3479.
- Al Bakri, M.A.M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I.K., Rafiza, A.R. ve Zarina, Y., 2012. The Processing, Characterization, and Properties Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Reviews on Advanced Materials Science, 30.
- Alabi, S.A. ve Mahachi, J., 2021. Chloride Ion Penetration Performance of Recycled Concrete With Different Geopolymers, Materials Today Proceedings, 38, 762–766.
- Albitar, M. ve Visintin, D., 2017a. Durability Evaluation of Geopolymer and Conventional Concretes, Construction and Building Materials, 136, 374-385.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M.S. ve Visintin, P., 2017b. Experimental Study on Fly Ash and Lead Smelter Slag-based Geopolymer Concrete Columns, Construction and Building Materials, 141, 104-112.
- Alhawati, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A. ve Sahmaran, M., 2022. Properties of Geopolymers Sourced from Construction and Demolition Waste: A Review, Journal of Building Engineering, 50, 104104.
- Ali, M.B., Saidur, R. ve Hossain, M.S., 2011. A Review on Emission Analysis in Cement Industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 5, 2252-2261.
- Al-Majidi, M.H., Lampropoulos, A., Cundy, A. ve Meikle, S., 2016. Development of Geopolymer Mortar Under Ambient Temperature for In Situ Applications, Construction and Building Materials, 120, 198-211.
- Al-Mashhadani, M.M., Canpolat, O., Aygormez, Y., Uysal, M. ve Erdem, S., 2018. Mechanical and Microstructural Characterization of Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer Composites, Construction and Building Materials, 167, 505-513.
- Alnahhal, W ve Aljidda, O., 2018. Flexural Behavior of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates, Construction and Building Materials, 169, 165–178.

- Alqarni, A.S., Abbas, H., Al-Shwikh, K.M. ve Al-Salloum, Y.A., 2021. Treatment of Recycled Concrete Aggregate to Enhance Concrete Performance, Construction and Building Materials, 307, 124960.
- Alqarni, A.S., Abbas, H., Al-Shwikh, K.M., ve Al-Salloum Y.A., 2021. Treatment of Recycled Concrete Aggregate to Enhance Concrete Performance, Construction and Building Materials, 307, 124960.
- Amerikan Beton Enstitüsü, Consistency, Plastic consistency and Workability, 2020.
- Ammon, K., 2004. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate, Journal of Materials in Civil Engineering, 16, 6.
- Antoni Satria, J., Sugiarto, A. ve Hardjito, D., 2017. Effect of Variability of Fly Ash Obtained from the Same Source on the Characteristics of Geopolymer, MATEC Web Conference.
- Anuradha, R., Sreevidya, V., Venkatasubramani, R. ve Rangan, B.V., 2012. Modified Guidelines for Geopolymer Concrete Mix Design Using Indian Standard, Asian Journal of Civil Engineering, 13, 3, 353-364.
- Architecture & Design News, 2013.
- Arora, S., Jangra, P., Lim, Y.Y. ve Pham, T.M., 2021. Effective Utilisation of Ultrafine Slag to Improve Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregates Geopolymer Concrete, Cleaner Engineering Technology, 5, 100330.
- Aslam, M.S., Huang, B. ve Cui, L., 2020. Review of Construction and Demolition Waste Management In China and USA, Journal of Environmental Management, 264, 110445.
- Assi, L., Ghahari, S.A., Deaver, E.E., Leaphart, D. ve Ziehl, P., 2016. Improvement of the Early and Final Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete at Ambient Conditions, Construction and Building Materials, 123, 806-813.
- Assi, L.N., Eddie Deaver, E. ve Ziehl, P., 2018. Effect of Source and Particle Size Distribution on the Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Construction and Building Materials, 167, 372-380.
- ASTM C 490, 2021. Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1202-19, 2019. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1240-20, 2020. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM C1585-20, 2020. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes., ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618-22, 2022. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M.M. ve Uysal, M., 2020. Elevated Temperature, Freezing-Thawing and Wetting-Drying Effects on Polypropylene Fiber Reinforced Metakaolin Based Geopolymer Composites, Construction and Building Materials, 235, 117502.
- Ayub, T., Mahmood, W. ve Khan, A.U.R., 2021. Durability Performance of SCC and SCGC Containing Recycled Concrete Aggregates: a Comparative Study, Sustainability, 13, 8621.
- Bai, G, Zhu, C, Liu, C ve Liu, B., 2020. An Evaluation of the Recycled Aggregate Characteristics and the Recycled Aggregate Concrete Mechanical Properties, Construction and Building Materials, 240, 117978.
- Bakharev, T., 2006. Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing, Cement and Concrete Research, 36, 1134–1147.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G. ve Cheng, Y.B., 1999a. Alkali Activation of Australian Slag Cements, Cement and Concrete Research, 29, 113-120.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G. ve Cheng, Y.B., 1999b. Effect of Elevated Temperature Curing on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Research, 29, 1619-1625.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G. ve Cheng, Y.B., 2002. Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Research, 32, 211-216.
- Bao, J., Li, S., Zhang, P., Ding, X., Xue, S., Cui, Y. ve Zhao, T., 2020. Influence of the Incorporation of Recycled Coarse Aggregate on Water Absorption and Chloride Penetration into Concrete, Construction and Building Materials, 239, 117845.
- Bao, Z, Lee, W.M.W. ve Lu, W., 2020. Implementing on-Site Construction Waste Recycling In Hong Kong: Barriers and Facilitators, Science of the Total Environment, 747, 141091.
- Behera, M., Bhattacharyya, S.K., Minocha, A.K., Deoliya, R. ve Maiti, S., 2014. Recycled Aggregate From C&D Waste and Its Use In Concrete – A Breakthrough Towards Sustainability In Construction Sector: A Review, Construction and Building Materials, 68, 501–516.
- Berrocal, CG., 2017. Corrosion of Steel Bars in Fibre Reinforced Concrete: Corrosion Mechanisms and Structural Performance, Chalmers University of Technology.

- Bhardwaj, B. ve Kumar, P., 2021. Performance Assessment of Graphene Oxide–Reinforced Sustainable Geopolymer Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 33, 04021322.
- Bhikshma, V. ve Divya, K., 2012. Study on the Permeability of the Recycled Aggregate Concrete Using Fly Ash, 37th Conference on Our World in Concrete and Structures.
- Bhowmick, A. ve Ghosh, S., 2012. Effect of Synthesizing Parameters on Workability and Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar, International Journal of Civil and Structural Engineering, 3, 1.
- Brandt, A.M., 2008. Fibre Reinforced Cement-Based (FRC) Composites After over 40 Years of Development in Building and Civil Engineering, Composite Structures, 86, 1-3, 3–9.
- Brough, A.R. ve Atkinson, A., 2002. Sodium Silicate-Based, Alkali- Activated Slag Mortars: Part I. Strength, Hydration and Microstructure, Cement and Concrete Research, 32, 865-879.
- BS 812-112, 1990. Specification Method to Determine the Aggregate Impact Value (AIV) for Coarse Aggregate, British Standards, London.
- BS EN 450-1, 2012. Fly Ash for Concrete Definition, Specifications and Conformity Criteria, British Standards, London.
- Bu, C., Liu, L., Lu, X., Zhu, D., Sun, Y., Yu, L., Ouyang, Y., Cao X. ve Wei, Q., 2022. The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: A Review, Materials, 15, 3, 1110.
- Butler, L., West, J. S., ve Tighe, S. L., 2013. Effect of Recycled Concrete Coarse Aggregate from Multiple Sources on the Hardened Properties of Concrete with Equivalent Compressive Strength, Construction and Building Materials, 47, 1292–1301.
- Cakir, O., 2014. Experimental Analysis of Properties of Recycled Coarse Aggregate(RCA) Concrete with Mineral Additives, Construction and Building Materials, 68, 17–25.
- Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M.M., Aygörmez, Y. ve Uysal, M., 2018. High-Temperature Behavior and Mechanical characteristics of Boron Waste Additive Metakaolin Based Geopolymer Composites Reinforced with Synthetic Fibers, Construction and Building Materials, 187, 1190–1203.
- Chan, Y.N., Peng, G.F. ve Anson, M., 1999. Residual Strength and Pore Structure of High-Strength Concrete and Normal Strength Concrete after Exposure to High Temperatures, Cement and Concrete Composites, 21, 23-27.
- Chaparro, W.A., Bastidas, D. M. ve Hernando, J., 2012. Mechanical Properties and Absorption of Chlorides in Alkali Activated Slag Concrete and Exposed to Carbonation, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 189–195.

- Chen, G.M., He, Y.H., Yang, H., Chen, J.F. ve Guo, Y.C., 2014. Compressive Behavior of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures, Construction and Building Materials, 71, 1–15.
- Cheng, T.W. ve Chiu, J.P., 2003. Fire-Resistant Geopolymer Produce by Granulated Blast Furnace Slag, Minerals Engineering, 16, 205-210.
- Chi, B., Lu, W., Ye, M., Bao, Z. ve Zhang, X., 2020. Construction Waste Minimization in Green Building: A Comparative Analysis Of LEED-NC 2009 Certified Projects in the US and China, Journal of Cleaner Production, 256, 120749.
- China Construction Eighth Engineering Bureau Co., 2008. LTD. Work report of Shanghai International Aviation Service Center (X-1 Project).
- Claisse, P.A., El-Sayad, H. ve Shaaban, I.G., 1999. Permeability and Pore Volume of Carbonated Concrete, ACI Materials Journal, 96, 3, 378–381.
- Daniel L.Y. Kong ve Jay G. Sanjayan, 2010. Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete, Cement and Concrete Research, 40, 2, 334-339.
- Danish, A. ve Mosaberpanah, M.A., 2022. A Review on Recycled Concrete Aggregates (RCA) Characteristics to Promote RCA Utilization in Developing Sustainable Recycled Aggregate Concrete (RAC), European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26, 13, 6505–6539.
- Danish, A., Salim, M. U., ve Ahmed, T., 2019. Trends and Developments in Green Cement–A Sustainable Approach, Sustainable Structures and Materials, an International Journal, 2, 1, 45–60.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers Inorganic Polymeric New Materials, Journal of Thermal Analysis, 37, 1633–1656.
- Davidovits, J., 2008. Geopolymer Chemistry and Applications, Institut Geopolymere, Saint-Quentin, Fransa.
- Davidovits, J., Izquierdo, M., Querol, X., Antennuci, D., Nugteren, H., Butselaar-Orthlieb, V., Fernandez-Pereira, C. ve Luna, Y., 2014, The European Research Project GEOASH: Geopolymer Cement Based on European Coal Fly Ashes, Technical Paper #22, Institut Geopolymere.
- de Brito, J, Gonçalves, A.P. ve Santos, R., 2006. Recycled Aggregates in Concrete Production: Multiple Recycling of Concrete Coarse Aggregates, Revista Ingenieria de Construccin, 21, 1, 33–40.
- Dhir, R.K., Henderson, N.A., Limbachiya, M.C., 1998. Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and held at the Department of Trade and Industry Conference Centre, London, UK on 11 – 12 November 1998.

- Douglas, E., Bilodeau, A., Brandstetr, J. ve Malhotra, V.M., 1991. Alkali Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag Concrete: Preliminary Investigation, Cement and Concrete Research, 21, 101-108.
- Douglas, S. ve Beveridge, T.J., 1998. Mineral Formation by Bacteria in Natural Microbial Communities, FEMS Microbiology Ecology, 26, 2, 79–88.
- Duxon P., Fernandez-Jiminez, A., Provis, J.L., Luckey, G.C., Palomo, A., Van Deventre, J.S.J., 2007. Geopolymer Technology: The Current State Of The Art, Journal of Material Science, 42, 2917–2933.
- Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M. ve Van Deventer, J.S.J., 2007c. The Effect of Alkali and Si/Al Ratio on the Development of Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymers, Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 292, 1, 8-20.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. ve Van, D., 2007a. The Role of inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete, Cement and Concrete Research, 37, 1590-1597.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. ve Van, D., 2007b. Geopolymer Technology: The Current State of the art, Journal of Material Science, 42, 2917-2933.
- Edwards, B., 1999. Sustainable architecture: European directives and building design. Butterworth Architecture.
- Elchalakani, M. ve Elgaali, E., 2012. Sustainable Concrete Made of Construction and Demolition Wastes Using Recycled Wastewater in the UAE, Journal of Advanced Concrete Technology, 10, 3, 110–125.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası, Ankara, 2003.
- Exteberria, M., Va'Squez, E. ve Mari, A. R., 2007. Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete, Cement and Concrete Research, 37, 735–742.
- Fan, F., Liu, Z., Xu, G., Peng, H. ve Cai, C.S., 2018. Mechanical and Thermal Properties of fly Ash Based Geopolymers, Construction and Building Materials, 160, 66-81.
- Fareed, F. ve Nasir, M., 2011. Compressive Strength and Workability Characteristics of Low-Calcium Fly Ash-Based Self-Compacting Geopolymer Concrete, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 5, 64-70.
- Fares, H., Remond, S., Noumowe, A. ve Cousture, A., 2010. High Temperature Behaviour of Self-Consolidating Concrete Microstructure and Physicochemical Properties, Cement and Concrete Research, 40, 488-96.
- Ferdous, W., Manalo, A., Khennane, A. ve Kayali, O., 2015. Geopolymer Concrete-Filled

- Pultruded Composite Beams - Concrete Mix Design and Application, Cement and Concrete Composites, 58, 1-13.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Puertas, F., 1997. Alkali-Activated Slag Cements: Kinetic Studies, Cement and Concrete Research, 27, 3, 359-368.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Puertas, F., 2002. The Alkali-silica Reaction in Alkali-Activated Granulated Slag Mortars with Reactive Aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 1019-1024.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J.G. ve Puertas, F., 1999. Alkali-Activated Slag Mortars: Mechanical Strength Behaviour, Cement and Concrete Research, 29, 1313-1321.
- Fernandez-Jimenez, A.M., Palomo, A. ve Lopez-Hombrados, C., 2006. Engineering Properties of Alkali-Activated Fly Ash Concrete, ACI Materials Journal, 103, 2, 106-112.
- Froudinstou-Yannas, S., 1977. Waste Concrete as Aggregate for New Concrete, ACI Journal, 74, 373-376.
- Fu, Y., Wong, Y., Poon, C. ve Tang, C., 2006. Literature Review of Study on Mechanism of Explosive Spalling in Concrete at Elevated Temperatures, Journal of Building Materials, 9, 3, 323-329.
- Ganesh, A.C. ve Muthukannan, M., 2019. Effect of Elevated Temperature over Geopolymer Concrete, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 9, 450-453.
- Gao, C., Huang, L., Yan, L., Jin, R. ve Chen, H., 2020. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Modified by Nano-Particles, Construction and Building Materials, 241, 118030.
- Gao, D. ve Zhang, L., 2018. Flexural Performance and Evaluation Method of Steel Fiber Reinforced Recycled Coarse Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 159, 126-136.
- Gao, Q., Ma, Z., Xiao, J. ve Li, F., 2018. Effects of Imposed Damage on the Capillary Water Absorption of Recycled Aggregate Concrete, Advances in Materials Science and Engineering, 2018.
- García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Wang, J., Belie N. De, Morán-Del, Pozo, J.M., Guerra-Romero, M.I. ve Juan-Valdes, A., 2017. Quality Improvement of Mixed and Ceramic Recycled Aggregates by Biodeposition of Calcium Carbonate, Construction and Building Materials, 154, 1015-1023.
- García-Lodeiro, I., Palomo, A. ve Fernandez-Jimenez, A., 2007. Alkali-Aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems, Cement and Concrete Research, 37, 2, 175-183.

- Ghafoor M.T., Khan Q.S., Qazi A.U., Neaz Sheikh M. ve Hadi M.N.S., 2021. Influence of Alkaline Activators on the Mechanical Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature, Construction and Building Materials, 273, 121752.
- Ghosh, G., Sagar, S.P., Kumar, A., Gupta, S.K. ve Kumar, S., 2018. Estimation of Geopolymer Concrete Strength from Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Using High Power Pulser, Journal of Building Engineering, 16, 39-44.
- González-Fonleboia, B. ve Martínez-Abella, F., 2008. Concretes with Aggregates from Demolition Waste and Silica Fume Materials and Mechanical Properties, Building and Environment, 43, 4, 429–437.
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. ve Poon, C., 2017. Influence of the Quality of Recycled Aggregates on the Mechanical and Durability Properties of High Performance Concrete, Waste Biomass Valorisation, 8, 1421–1432.
- Görhan G. ve Kürklü, G., 2014. The Influence of the NaOH Solution on the Properties of the Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures, Composites Part B: Engineering, 58, 371–377.
- Grabiec, A.M., Klama, J., Zawal, D. ve Krupa, D., 2012. Modification of Recycled Concrete Aggregate by Calcium Carbonate Biodeposition, Construction and Building Materials, 34, 145–150.
- Guneyisi, E., Gesoglu, M., Algin, Z. ve H. Yazici, 2014. Effect of Surface Treatment Methodson the Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregates, Construction and Building Materials, 64, 172–183.
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.C., Zhang, H. ve Wang, Y., 2018. Durability of Recycled Aggregate Concrete – A Review, Cement and Concrete Composites, 89, 251–259.
- Hansen, T.C., 1986. Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-Of-The-Art Report Developments, 1945–1985, Materials and Structures, 19, 3, 201–246.
- Haq, E.U., Padmanabhan, S.K., Zubair, M., Ali, L. ve Licciulli, A., 2016. Intumescence Behaviour of Bottom Ash Based Geopolymer Mortar Through Microwave Irradiation - As Affected by Alkali Activation, Construction and Building Materials, 126, 951-956.
- Hardjito, D. ve Rangan, B.V., 2005. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Research Report GC 94, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D. ve Rangan, B.V., 2004. Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Construction Material for Sustainable Development, Concrete World: Engineering and Materials, American Concrete Institute, Hindistan.

- Hassan, A., Arif, M. ve Shariq, M., 2019. Use of Geopolymer Concrete for a Cleaner and Sustainable Environment – A Review Of Mechanical Properties and Microstructure, Journal of Cleaner Production, 223, 704–728.
- He, Z.H., Hu, H.B., Casanova, I., Liang, C.F. ve Du, S.G., 2020. Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Creep of Recycled Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 254, 119312.
- Ho, H.L., Huang, R., Lin, W.T., Cheng, A., 2018. Pore-Structures and Durability of Concrete Containing Pre-Coated Fine Recycled Mixed Aggregates Using Pozzolan and Polyvinyl Alcohol Materials, Construction and Building Materials, 160, 278–292.
- Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y. ve Tam V.W.Y., 2019. Physical-Mechanical Properties of Fly Ash/Ggbfs Geopolymer Composites with Recycled Aggregates, Construction and Building Materials, 226, 139–51.
- Huda, S.B. ve Alam, M.S., 2014. Mechanical Behavior of Three Generations of 100% Repeated Recycled Coarse Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 65, 574–582.
- Hussain, R.R. ve Ishida, T., 2009. Critical Carbonation Depth for Initiation of Steel Corrosion In Fully Carbonated Concrete and Development of Electrochemical Carbonation Induced Corrosion Model, International Journal of Electrochemical Science, 4, 8, 1178–1195.
- IS 13311: Part 1, 1992. Non-Destructive Testing Of Concrete - Methods Of Test – Ultrasonic Pulse Velocity, Indian Standard.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L, Nicolas, R.S., Brice, D.G, Kilcullen, A.R., Hamdan, S. ve van Deventer, J.S.J., 2013. Influence of Fly Ash on the Water and Chloride Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars and Concretes, Construction and Building Materials, 48, 1187–1201.
- Japan Construction Federation, 2019. Promoting Diffusion Of Recycled Aggregate Concrete - Contribution To Construction Of A Low-Carbon, Recycling-Oriented Society.
- Jiang, X., Xiao, R., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y. ve Huang, B., 2020. A Laboratory Investigation of Steel to Fly Ash-Based Geopolymer Pastebonding Behavior After Exposure to Elevated Temperatures, Construction and Building Materials, 254, 119267.
- Jin, R., Yuan, H. ve Chen, Q., 2019. Science Mapping Approach to Assisting the Review of Construction and Demolition Waste Management Research Published Between 2009 and 2018, Resources Conservation and Recycling, 140, 175–188.
- Jindal, B. B., 2018. Feasibility Study of Ambient Cured Geopolymer Concrete -A Review, Advances in Concrete Construction, 6, 4, 387–405.

- Johansen, I.L., 2011. Chapter 2 - The Problem of Stress, Developments in Geotechnical Engineering, 39, 29-63.
- Jumrat, S., Chatveera, B. ve Rattanadecho, P., 2011. Dielectric Properties and Temperature Profile of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38, 2, 242-248.
- June, J., Politecnica, U., Lloyd, N. A., Rangan, B.V., Chong, L.F., James, S.P., Poon, K.Y. ve Warren, A.D., 2010. Geopolymer Concrete with Fly Ash. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.
- Katkhuda, H. ve Shatarat, N., 2017. Improving the Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregate Using Chopped Basalt Fibers and Acid Treatment, Construction and Building Materials, 140, 328–335.
- Keke, S., Xiaoqin, P., Shuping, W. ve Lu, Z., 2019. Design Method for the Mix Proportion of Geopolymer Concrete Based on the Paste Thickness of Coated Aggregate, Journal of Cleaner Production, 232, 508–517.
- Khan, M.N.N., Jamil, M., Karim, M.R., Zain, M.F.M. ve Kaish, A.B.M.A., 2017. Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar, KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 1, 274–284.
- Khater, H.M. ve Abd El Gawaad, H.A., 2016. Characterization of Alkali Activated Geopolymer Mortar Doped with MWCNT, Construction and Building Materials, 102, 1, 329-337.
- Khoury, G.A., Majorana, C.E., Pesavento, F. ve Schrefler, B.A., 2002. Modelling of Heated Concrete, Magazine of Concrete Research, 54, 2, 77–101.
- Kim, J., 2022. Influence of Quality of Recycled Aggregates on the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concretes: an Overview, Construction and Building Materials, 328, 127071.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G. ve Galetakis, M., 2015. Effect of Synthesis Parameters on the Quality of Construction and Demolition Wastes (CDW) Geopolymers, Advanced Powder Technology, 26, 2, 368–376.
- Kong, D.L.K., Sanjayan, J.G. ve Crentsil, K.S., 2007. Comparative Performance of Geopolymers Made with Metakaolin and Fly Ash After Exposure to Elevated Temperature, Cement and Concrete Research, 37, 1583–1589.
- Kong, D.L.Y. ve Sanjayan, J.G., 2010. Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete, Cement and Concrete Research, 40, 334–339.
- Kong, D.Y., Lei, T., Zheng, J.J., Ma, C.C., Jiang, J. ve Jiang, J., 2010. Effect and Mechanism of Surface-Coating Pozzolanic Materials around Aggregate on Properties and Itz Microstructure of Recycled Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 24, 701–708.

- Kotrayothar, D., 2012. Recycled Aggregate Concrete For Structural Applications, Doktora Tezi, Western Sydney University, Sydney.
- Kotwal, A.R., Kim, Y.J., Hu, J. ve Sriraman, V., 2015. Characterization and Early Age Physical Properties of Ambient Cured Geopolymer Mortar Based on Class C Fly Ash, International Journal of Concrete Structures and Materials, 9, 35-43.
- Kou, S.C. ve Poon, C.S., 2010. Properties Of Concrete Prepared With PVA-İmpregnated Recycled Concrete Aggregates, Cement and Concrete Composites, 32, 8, 649–54.
- Koushkbaghi, M., Alipour, P., Tahmouresi, B., Mohseni, E., Saradar, A., ve Sarker, P. K., 2019. Influence of Different Monomer Ratios and Recycled Concrete Aggregate on Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Concretes, Construction and Building Materials, 205, 519–528.
- Krishnan, T. ve Purushothaman, R., 2017. Optimization and Influence of Parameter Affecting the Compressive Strength of Geopolymer Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate: Using Full Factorial Design Approach, Proceedings of the International Conference on Civil Engineering and Infrastructural Issues in Emerging Economies, Thanjavur, Hindistan, 17–18 Mart 2017.
- Kumar, H., Prasad, R., Srivastava, A., Vashista, M. ve Khan, M.Z., 2018. Utilisation of Industrial Waste (Fly Ash) in Synthesis of Copperbased Surface Composite Through Friction Stir Processing Route for Wear Applications, Journal of Cleaner Production, 196, 460-468.
- Kurda, R., de Brito, J., ve Silvestre, J.D., 2017. Combined Influence of Recycled Concrete Aggregates and High Contents of Fly Ash on Concrete Properties, Construction and Building Materials, 157, 554–572.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A. ve Kaczmarek, M., 2006. Correlation Between Porosity, Permeability and Ultrasonic Parameters of Mortar with Variable Water/Cement Ratio and Water Content, Cement and Concrete Research, 36, 4, 625–633.
- Larbi, J.A., Heijnen, W.M.M., Brouwer, J.P. ve Mulder, E., 2000. Preliminary Laboratory Investigation of Thermally Treated Recycled Concrete Aggregate for General Use in Concrete. Editors. In: Woolley, GR, Goumans, JJM, Wainwright, PJ (Eds.), Waste Materials İn Construction: Science And Engineering Of Recycling For Environmental Protection. Elsevier Science, Burlington, 129–139.
- Lauritzen, E., 1998. The Global Challenge of Recycled Concrete. Insustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium Organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and Held at the Department of Trade and Industry Conference Centre, Thomas Telford Publishing, November, Dundee, 505–519.
- Le, H.B. ve Bui, Q.B., 2022. Predicting the Compressive Strength of Geopolymer Concrete: An Empirical Model for Both Recycled Andnatural Aggregates. Incigos

- 2021, *Emerging Technologies And Applications For Green Infrastructure*; Springer: Singapore, 2022, 793–802.
- Le, H.B., Bui, Q.B. ve Tang, L., 2021. Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: From Experiments To Empirical Models, Materials, 14, 5, 1180.
- Ledesma, E., Jiménez, J., Fernández, J., Galvín, A., Agrela, F. ve Barbudo, A., 2014. Properties Of Masonry Mortars Manufactured With Finerecycled Concrete Aggregates, Construction and Building Materials, 71, 289–298.
- Lee, B., Kim, G., Kim, R., Cho, B., Lee, S. ve Chon, C.M., 2017. Strength Development Properties of Geopolymer Paste and Mortar with Respect to Amorphous Si/Al Ratio of Fly Ash, Construction and Building Materials, 151, 512-519.
- Lei, B., Li, W., Tang, Z., Li, Z. ve Tam, V.W.Y., 2020. Effects of Environmental Actions, Recycled Aggregate Quality and Modification Treatments on Durability Performance of Recycled Concrete, Journal of Materials Research and Technology, 9, 6, 13375–13389.
- Levy, S.M. ve Helene, P., 2004. Durability of Recycled Aggregates Concrete: A Safe Way to Sustainable Development, Cement and Concrete Research, 34, 1975–1980.
- Li, K.L., Huang, G.H., Chen, J., Wang, D. ve Tang, X.S., 2005. Early Mechanical Property And Durability Of Geopolymer ,*Proceedings, World Congress Geopolymer*, Institut Geopolymer, Saint Quentin, 117-120.
- Li, L., Poon, C.S., Xiao, J. ve Xuan, D., 2017. Effect of Carbonated Recycled Coarse Aggregate on the Dynamic Compressive Behavior of Recycled Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 151, 52–62.
- Li, W.G., Xiao, J.Z., Sun, Z.H., Kawashima, S. ve Shah, S.P., 2012. Interfacial Transition Zones in Recycled Aggregate Concrete with Different Mixing Approaches, Construction and Building Materials, 35, 1045–1055.
- Liang Y.C., Ye, Z.M., Vernerey, F. ve Xi, Y., 2015. Development of Processing Methods to Improve Strength of Concrete With 100% Recycled Coarse Aggregate, Journal of Materials in Civil Engineering, 27, 5, 4014163.
- Likes, L., Markandeya, A., Haider, M.M., Bollinger, D., McCloy, J.S. ve Nassiri, S., 2022. Recycled Concrete and Brick Powders as Supplements to Portland Cement for More Sustainable Concrete, Journal of Cleaner Production, 132651.
- Lim, Y.Y. ve Pham, T.M., 2021. Effective Utilisation of Ultrafine Slag to Improve Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregates Geopolymer Concrete, Cleaner Engineering and Technology, 2021, 5, 100330.
- Lin, Y., Lai, C.P. ve Yen, T., 2003. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete, ACI Materials Journal, 100, 1, 21-28.

- Liu, Z., Cai, C.S., Peng, H. ve Fenghong, F., 2016. Experimental Study of the Geopolymeric Recycled Aggregate Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 28, 9, 04016077.
- Lokuge, W., Wilson, A., Gunasekara, C., Law, D.W. ve Setunge, S., 2018. Design of Fly Ash Geopolymer Concrete Mix Proportions Using Multivariate Adaptive Regression Spline Model, Construction and Building Materials, 166, 472-481.
- Lotfi, S., Deja, J., Rem, P., Mr'Oz, R., Van Roekel, E. ve Van Der Stelt, H., 2014. Mechanical Recycling of EOL Concrete Into High-Grade Aggregates, Resources, Conservation and Recycling, 87, 117-25.
- Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., Jdid, E.A., Fernandez, C. ve Vale, J., 2007. Immobilization of a Metallurgical Waste Using Fly Ash-Based Geopolymers. World coal ash.
- Lydon, F. ve Balendran, R., 1986. Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete, Cement and Concrete Research, 16, 314-324.
- Ma, M., Tam, V.W.Y., Le, K.N. ve Li, W., 2020. Challenges in Current Construction and Demolition Waste Recycling: A China Study, Waste Management, 118, 610-625.
- Malesev, M., Radonjanin, V., ve Marinkovi, S., 2010. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production, Sustainability, 2, 5, 1204-1225.
- Malkawi, A.B., Nuruddin, M.F., Fauzi, A., Almattarneh, H. ve Mohammed, B.S., 2016. Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars, Procedia Engineering, 148, 710-717.
- Marie, I., ve Quiasrawi, H., 2012. Closed-Loop Recycling of Recycled Concrete Aggregates, Journal of Cleaner Production, 37, 243-248.
- Maruyama, I., Sogo, M., Sogabe, T., Sato, R., ve Kawai, K., 2004. Flexural Properties of Reinforced Recycled Beams, Proceedings of International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, 1, 525-535.
- Mathew, G. ve Joseph, B., 2018. Flexural Behaviour of Geopolymer Concrete Beams Exposed to Elevated Temperatures, Journal of Building Engineering, 15, 311-317.
- Matias, D., De Brito, J., Rosa, A., ve Pedro, D., 2013. Mechanical Properties of Concrete Produced with Recycled Coarse Aggregates – Influence of the Use of Superplasticizers, Construction and Building Materials, 44, 101-109.
- Mcneil, K., ve Kang, T.H.K., 2013. Recycled Concrete Aggregates: A Review, International Journal of Concrete Structures and Materials, 7, 1, 61-69.
- Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth, Materials and Structures, 21, 453-455, 1988.

- Mehra, P., Thomas, B.S., Kumar, S., Gupta ve R.C., 2016. Jarosite Added Concrete Along With Fly Ash: Properties and Characteristics in Fresh State, Perspectives in Science, 8, 69–71.
- Mehta, A. ve Siddique, R., 2016. An Overview of Geopolymers Derived From Industrial By-Products, Construction and Building Materials, 127, 183-198.
- Mehta, A. ve Siddique, R., 2017. Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete Incorporating OPC as Partial Replacement of Fly Ash, Construction and Building Materials, 150, 792-807.
- Mehta, P.K. ve Monteiro, P.J.M., 2017. Concrete Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill Education, 2014.
- Merchant, I.J., Macphee, D.E., Chandler, H.W. ve Henderson, R.J., 2001. Toughening Cement Based Materials through the Control of Interfacial Bonding, Cement and Concrete Research, 31, 12, 1873–1880.
- Mesgari, S., Akbarnezhad, A. ve Xiao, J.Z., 2020. Recycled Geopolymer Aggregates As Coarse Aggregates for Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete: Effects on Mechanical Properties, Construction and Building Materials, 236, 117571.
- Mindess, D., Francis, S. ve Darwin, Y.J., Concrete, 2nd ed. Prentice Hall. Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 2003.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M.M., Bo, M.W. ve Darmawan, S., 2016. Strength Development and Microfabric Structure of Construction and Demolition Aggregates Stabilized with Fly Ash-Based Geopolymers, Journal of Materials in Civil Engineering, 28, 11, 04016141.
- Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z.S. ve Tang, W., 2017. Engineering and Microstructural Assessment of Fibre-Reinforced Self-Compacting Concrete Containing Recycled Coarse Aggregate, Journal of Cleaner Production, 168, 605–613.
- Moro, C., Francioso, V. ve Velay-Lizancos, M., 2020. Nano-TiO₂ Effects on High Temperature Resistance of Recycled Mortars, Journal of Cleaner Production, 263, 121581.
- Muduli, R. ve Mukharjee, B.B., 2019. Effect of Incorporation of Metakaolin and Recycled Coarse Aggregate on Properties of Concrete, Journal of Cleaner Production, 209, 398-414.
- Mukharjee, B.B. ve Barai, S.V., 2017. Mechanical and Microstructural Characterization of Recycled Aggregate Concrete Containing Silica Nanoparticles, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 6, 1, 37–53.
- Mulder, E., de, Jong T.P.R. ve Feenstra, L., 2007. Closed Cycle Construction: An

- Integrated Process for the Separation and Reuse of C&D Waste, Waste Management, 27, 10, 1408–1415.
- Musaddiq Laskar, S. ve Talukdar, S., 2017. Development of Ultrafine Slag-Based Geopolymer Mortar for Use as Repairing Mortar, Journal of Materials in Civil Engineering, 29, 5.
- Naik, T.R., Malhotra, V.M. ve Popovics, J.S., 2003. The Ultrasonic Pulse Velocity Method, In: Handb. Nondestruct. Test. Concr. Second Ed.
- Nath, P. ve Sarker, P.K., 2017. Flexural Strength and Elastic Modulus of Ambient-Cured Blended Low-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete, Constructin and Building Materials, 130, 22-31.
- Nedeljkovic, M., Visser, J., Savija, B., Valcke, S. ve Schlangen, E., 2021. Use of Fine Recycled Concrete Aggregates in Concrete: A Critical Review, Journal of Building Engineering, 38, 102196.
- Neville A.M, Properties of Concrete. 4th Ed., Dorling Kindersley Publishing, Inc., 1997.
- Ng, T.S., ve Foster, S.J., 2008. Development Of High Performance Geopolymer Concrete, Proceedings Of The 20th ACMSM, Futures In Mechanics Of Structures And Materials, Toowoomba, 2-5 December 2008.
- Nixon, P.J., 1978. Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete-A Review, Matériaux et Construction, 11, 5, 371–378.
- Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V. ve Chindaprasirt, P., 2020. Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Fire Resistance of Recycled Aggregate High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete, Journal of Cleaner Production, 252, 119797.
- Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V. ve Chindaprasirt, P., 2020. Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Fre Resistance of Recycled Aggregate High-Calcium Fy Ash Geopolymer concrete, Journal of Cleaner Production, 252, 119797.
- Nuaklong, P., Sata, V. ve Chindaprasirt, P., 2016. Influence of Recycled Aggregate on Fly Ash Geopolymer Concrete Properties, Journal of Cleaner Production, 112, 2300–2307.
- Nuaklong, P., Sata, V. ve Chindaprasirt, P., 2018. Properties of Metakaolin-High Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Recycled Aggregate from Crushed Concrete Specimens, Construction and Building Materials, 161, 365–373.
- Nuaklong, P., Sata, V., Wongsa, A., Srinavin, K. ve Chindaprasirt, P., 2018. Recycled Aggregate High Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete with Inclusion of OPC and Nano-SiO₂, Construction and Building Materials, 174, 244-252.

- Nuaklong, P., Wongs, A., Boonserm, K., Ngohpok, C., Jongvivatsakul, P., Sata, V., Sukontasukkul, P. ve Chindaprasirt, P., 2021. Enhancement of Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Containing Fine Recycled Concrete Aggregate with Micro Carbon Fiber, Journal of Building Engineering, 41, 102403.
- Nuaklong, P., Wongs, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J. ve Chindaprasirt, P., 2019. Properties of High-Calcium and Low-Calcium Fly Ash Combination Geopolymer Mortar Containing Recycled Aggregate, Heliyon, E02513.
- Nurruddin, M.F., Haruna, S., Mohammed, B.S. ve Shaaban, I.G., 2018. Methods of Curing Geopolymer Concrete: A Review, International Journal of Advanced and Applied Sciences, 5, 1, 31–36.
- Oikonomou, N.D., 2005. Recycled Concrete Aggregates, Cement and Concrete Composites, 27, 2, 315–318.
- Otsuki, N., Miyazato, S. ve Yodsudjai, W., 2003. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 15, 5, 443-451.
- P.N. Lemougna, Mackenzie, K.J. ve Melo, U.C., 2011. Synthesis and Thermal Properties of Inorganic Polymers (Geopolymers) for Structural and Refractory Applications from Volcanic Ash, Ceramica, 37, 8, 3011–3018.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. ve Blanco M.T., 1999. Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, Cement and Concrete Research, 29, 8, 1323–1329.
- Pan, Z., Sanjayan, J.G. ve Collins, F., 2014. Effect of Transient Creep on Compressive Strength of Geopolymer Concrete for Elevated Temperature Exposure, Cement and Concrete Concrete Research, 56, 182–189.
- Pappu, A., Saxena, M. ve Asolekar, S.R., 2007. Solid Wastes Generation in India and Their Recycling Potential in Building Materials, Building and Environment, 42, 6, 2311–2320.
- Park, W. ve Noguchi, T., 2013. Influence of Metal Impurity on Recycled Aggregate Concrete and Inspection Method for Aluminum Impurity, Construction and Building Materials, 40, 1174–1183.
- Parthiban, K. ve Mohan, S.R., 2017. Influence of Recycled Concrete Aggregates on the Engineering and Durability Properties of Alkali Activated Slag Concrete, Construction and Building Materials, 133, 65–72.
- Pasupathy, K., Berndt, M., Sanjayan, J., Rajeev, P. ve Cheema, D.S., 2017. Durability of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete Culvert in a Saline Environment, Cement and Concrete Research, 100, 297-310.
- Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Jiménez, J.R., Fernández-Rodríguez, J.M., Suescum-Morales, D., 2021. Geopolymer Concrete with Treated Recycled

- Aggregates: Macro and Microstructural Behavior, Journal of Building Engineering, 44, 103317.
- Pedro, D., De Brito, J. ve Evangelista, L., 2014. Influence of the Use of Recycled Concrete Aggregates from Different Sources on Structural Concrete, Construction and Building Materials, 71, 141–151.
- Pedro, D., de Brito, J.D., ve Evangelista, L., 2017. Structural Concrete with Simultaneous Incorporation of Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates: Mechanical, Durability and Long-term Properties, Construction and Building Materials, 154, 294–309.
- Phoongernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Rittirud, C., Hatanaka, S. ve Chindaprasirt, P., 2016. Compressive Strength, Bending and Fracture Characteristics of High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement Cured at Ambient Temperature, Arabian Journal for Science and Engineering, 41, 1263–1271.
- Pimraksa, K., Chindaprasirt, P., Rungchiet, A., Sagoe-Crentsil, K. ve Sato, T., 2011. Lightweight Geopolymer Made of Highly Porous Siliceous Materials with Various Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ Ratios, Materials Science and Engineering: A, 528, 21, 6616–6623.
- Pinghua, Z., Minqi, H., Hui, L., Xinjie, W. ve Chunhong, C., 2020. Interfacial Evaluation of Geopolymer Mortar Prepared with Recycled Geopolymer Fine Aggregates, Construction and Building Materials, 259, 119849.
- Posi, P., Thongjapo, P., Thamultree, N., Boontee, P., Kasemsiri, P. ve Chindaprasirt, P., 2016. Pressed Lightweight Fly Ash-OPC Geopolymer Concrete Containing Recycled Lightweight Concrete Aggregate, Construction and Building Materials, 127, 450–456.
- Provis, J.H. ve Van Deventer J.S.J., 2009. Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, First Edition, Woodhead Publishing Limited, İngiltere, 2009.
- Provis, J.L. ve Van Deventer, J.S.J., 2009. Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, Geopolymers: Structures, Processing, Properties And Industrial Applications.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S. ve Vazquez, T., 2000. Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cements, Cement and Concrete Research, 30, 10, 1625–1632.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., Vázquez, T. 2000. Strength Behaviour and Hydration Products, Cement and Concrete Research, 30, 1625–1632.
- Rahal, K., 2007. Mechanical Properties of Concrete with Recycled Coarse Aggregate, Building and Environment, 42, 1, 407–415.

- Rajamane N.P., Natraja M.C., Dattatreya J.K., Lakshmanan N. ve Sabitha D., 2012. Sulphate Resistance and Eco-Friendliness of Geopolymer Concretes, Indian Concrete Journal, 86, 13-21.
- Ramujee, K. ve Potharaju, M., 2017. Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites, Materials Today: Proceedings, 4, 2937-2945.
- Rangan, B., Hardjito, D., Studies On Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Geopolymer, Saint, 2005.
- Rangan, B.V., Engineering Properties Of Geopolymer Concrete, Technical Report, Curtinuniversity of Technology, Perth, 2009.
- Rangan, B.V., Studies On Fly-Ash Based Geopolymer Concrete. Malaysian Constr. Res. J. 3., 2008.
- Rattanasak, U. ve Chindaprasirt, P., 2009. Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer, Minerals Engineering, 22, 12, 1073–1078.
- Ren, X. ve Zhang, L., 2019. Experimental Study of Geopolymer Concrete Produced From Waste Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 31, 04019114.
- Ren, X. ve Zhang, L., 2016. The Complete Recycling of Waste Concrete to Produce Geopolymer Concrete. Geo-Chicago 2016, Reston, VA.
- Research and Laboratory Building for Life Sciences of the Humboldt University of Berlin, 2009, Berlin.
- Roy, D.M. ve Idorn, G.M., 1982. Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortar, and Concrete, Journal of the American Concrete Institute, 79, 444-457.
- Saha, S., Rajasekaran, C. ve Gupta, P., 2020. Performance of Eco-Friendly Mortar Mixes Against Aggressive Environments, Advances in Concrete Construction, 10, 237–245.
- Salem, R.M., Burdette, E.G., ve Jackson, N.M., 2003. Resistance to Freezing and Thawing of Recycled Aggregate Concrete, Materials Journal, 100, 3, 216–221.
- Salihi, K. ve Younis, K.H., 2021. Rheological Behavior of Self-Compacting Geopolymer Concrete Containing Recycled Aggregates: Effect of Na₂SiO₃/NaOH and Molarity of NaOH, Key Engineering Materials, 872, 79–84.
- Saloni, Parveen, Lim, Y.Y. ve Pham, T.M., 2021. Effective Utilisation of Ultrafine Slag To Improve Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregates Geopolymer Concrete, Cleaner Engineering and Technology, 5, 100330.
- Sanchez, F. ve Sobolev, K., 2010. Nanotechnology in Concrete – A Review, Construction and Building Materials, 24, 11, 2060–2071.

- Sanusi, O., Tempest, B., Ogunro, V. ve Gergely, J., 2016. Leaching Characteristics of Geopolymer Cement Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 20, 04016002.
- Saraswathy, V. ve Song, H.W., 2007. Corrosion Performance of Rice Husk Ash Blended Concrete, Construction and Building Materials, 21, 8, 1779–1784.
- Saravanakumar, P., Abhiram, K. ve Manoj, B., 2016. Properties of Treated Recycled Aggregates and Its Influence on Concrete Strength Characteristics, Construction and Building Materials, 111, 611–617.
- Sasanipour, H. ve Aslani, F., 2020. Durability Assessment of Concrete Containing Surface Pretreated Coarse Recycled Concrete Aggregates, Construction and Building Materials, 264, 120203.
- Sasanipour, H. ve Aslani, F., 2020. Durability Properties Evaluation of Self-Compacting Concrete Prepared with Waste Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates, Construction and Building Materials, 236, 117540.
- Sasanipour, H., Aslani, F. ve Taherinezhad, J., 2021. Chloride Ion Permeability Improvement of Recycled Aggregate Concrete Using Pretreated Recycled Aggregates by Silica Fume Slurry, Construction and Building Materials, 270, 8, 121498.
- Sasanipour, H., Aslani, F. ve Taherinezhad, J., 2021. Chloride Ion Permeability Improvement of Recycled Aggregate Concrete Using Pretreated Recycled Aggregates by Silica Fume Slurry, Construction and Building Materials, 270, 121498.
- Sata, V. ve Chindaprasirt, P., 2020. Use of Construction and Demolition Waste (CDW) For Alkali-Activated or Geopolymer Concrete, Advances in Construction and Demolition Waste Recycling, 385–403.
- Šeps, K., Fládr, J. ve Broukalová, I., 2016. Resistance of Recycled Aggregate Concrete to Freeze-Thaw and Deicing Salts, Procedia Engineering, 151, 329–336.
- Shaban, W.M., Yang, J., Su, H., Liu, Q.F., Tsang, D.C.W., Wang, L., Xie, J. ve Li, L., 2019. Properties of Recycled Concrete Aggregates Strengthened by Different Types of Pozzolan Slurry, Construction and Building Materials, 216, 632–647.
- Shaban, W.M., Yang, J., Su, H., Liu, Q. Feng, Tsang, D.C.W., Wang, L., Xie, J. ve Li, L., 2019. Properties of Recycled Concrete Aggregates Strengthened by Different Types of Pozzolan Slurry, Construction and Building Materials, 216, 632–647.
- Shadnia, R., Zhang, L. ve Li, P., 2015. Experimental Study of Geopolymer Mortar With Incorporated PCM, Construction and Building Materials, 84, 95–102.
- Shaikh, F.U.A., 2016. Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Recycled Coarse Aggregates, International Journal of

Sustainable Built Environment, 5, 277–287.

- Shekhovtsova, J., Kearsley, E.P. ve Kovtun, M., 2014. Effect of Activator Dosage, Water-To- Binder-Solids Ratio, Temperature and Duration of Elevated Temperature Curing on the Compressive Strength of Alkali-Activated Fly Ash Cement Pastes, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 56, 44-52.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L. ve Xie, Z., 2016. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregate – A Review, Journal of Cleaner Production, 112, 466–472.
- Shi, C., Wu, Z., Cao, Z., Ling, T.C. ve Zheng, J., 2018. Performance of Mortar Prepared with Recycled Concrete Aggregate Enhanced by CO₂ and Pozzolan Slurry, Cement and Concrete Composites, 86, 130-138.
- Silva, R.V., Brito, J de ve Dhir, R.K., 2018. Fresh-state Performance of Recycled Aggregate Concrete: A Review, Construction and Building Materials, 178, 19–31.
- Silva, R.V., Neves, R., Brito, J.De, Dhir, R.K., 2015. Carbonation Behaviour of Recycled Aggregate Concrete, Cement and Concrete Composites, 62, 22–32.
- Singh, L.P., Bisht, V., Aswathy, M.S., Chaurasia, L. ve Gupta, S., 2018. Studies on Performance Enhancement of Recycled Aggregate by Incorporating Bio and Nano Materials, Construction and Building Materials, 181, 217–226.
- Smith, J.T., 2010. Recycled Concrete Aggregate – A Viable Aggregate Source for Concrete Pavements, Doktora Tezi, Waterloo Üniversitesi.
- Sofi, M., Deventer, J.S.J., Mendis, P.A. ve Lukey, G.C., 2007. Bond Performance of Reinforcing Bars in Inorganic Polymer Concrete (IPC), Journal of Materials Science, 42, 3107-3116.
- Spaeth, V. ve Djerbi Tegguer, A., 2013. Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by Polymer Treatments, International Journal of Sustainable Built Environment, 2, 2, 143–152.
- Srinivas, T. ve Sukesh Reddy, G., 2019. Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Made With Partial Replacement of Coarse Aggregate by Recycled Aggregate, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 9, 2301–2304.
- Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J. ve Li, Q., 2013. Synthesis and Thermal Behavior of Geopolymer-Type Material from Waste Ceramic, Construction and Building Materials, 49, 281–328.
- Takenaka Corporation, 2019. High Quality Recycled Coarse Aggregate "Cyclite" Acquired No. 1 Accreditation For Japan Building Center "New Building Technology Accredited Project".
- Tam, V.W.Y. ve Tam, C.M., 2007. Assessment of Durability of Recycled Aggregate

- Concrete Produced by Two-Stage Mixing Approach, Journal of Materials Science, 42, 10, 3592–3602.
- Tam, V.W.Y., Butera, A. ve Le, K.N., 2016. Carbon-Conditioned Recycled Aggregate in Concrete Production, Journal of Cleaner Production, 133, 672–680.
- Tam, V.W.Y., Butera, A., Le, K.N. ve Li, W., 2020. Utilising CO2 Technologies for Recycled Aggregate Concrete: A Critical Review, Construction and Building Materials, 250, 118903.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M. ve Le, K.N., 2007. Removal of Cement Mortar Remains From Recycled Aggregate Using Pre-Soaking Approaches, Resources, Conservation and Recycling, 50, 1, 82–101.
- Tang, Y., Xiao, J., Liu, Q., Xia, B., Singh, A., Lv, Z. ve Song, W., 2022. Natural Gravel-recycled Aggregate Concrete Applied in Rural Highway Pavement: Material Properties and Life Cycle Assessment, Journal of Cleaner Production, 334, 130219.
- Tchakoute Kouamo, H., Mbey, J.A., Elimbi, A., Kenne Dikko, B.B. ve Njopwouo, D., 2013. Synthesis of Volcanic Ash-Based Geopolymer Mortars by Fusion Method: Effects of Adding Metakaolin to Fused Volcanic Ash, Ceramics International, 39, 2, 1316-1321.
- Thaarrini, J. ve Ramasamy, V., 2015. Feasibility Studies on Compressive Strength of Ground Coal Ash Geopolymer Mortar, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59, 3.
- Thomas, C., Setien, J., ve Polanco, J., 2016. Structural Recycled Aggregate Concrete Made with Precast Wastes, Construction and Building Materials, 114, 536–546.
- Thomas, M.D.A., Hooton R.D., Scott, A., Zibara H., 2012. The Effect of Supplementary Cementitious Materials on Chloride Binding in Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, 42, 1, 1–7.
- Topal, Ö., Karakoç, M.B. ve Özcan, A., 2021. Effects of Elevated Temperatures on the Properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag(GGBFS) Based Geopolymer Concretes Containing Recycled Concrete Aggregate, European Journal of Civil Engineering, 26, 4847–4862.
- Tran, N.T., 2020. Experimental Study of Geopolymer Concrete Using Re-Cycled Aggregates Under Various Curing Conditions, Proceedings Of The International Conference On Green Technology And Sustainable Development, Da Nang City, Vietnam, Kasım, 469–478.
- TS 699/T1, 2009. Doğal Yapı Taşları-İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2020. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 12350-5, 2019. Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5: Yayılma Tablası Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-2, 2019. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması Ve Küre Tabi Tutulması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-8, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tunneltech, Geopolymer Concrete For Durable Linings; Tom Glasby, John Day, Michael Kemp, Wagners, Toowoomba, James Aldred, AECOM, Sydney, Australia.
- Ugwu, O., ve Haupt, T. 2007. Key Performance Indicators and Assessment Methods for Infrastructure Sustainability—A South African Construction Industry Perspective, Building and Environment, 42, 2, 665–680.
- Umniati, B.S., Risdanareni, P. ve Zein, F.T.Z., 2017. Workability Enhancement of Geopolymer Concrete Through the Use of Retarder,. AIP Conf. Proc. 1887.
- URL-1, www.pavement.com/downloads/TS/EB043P/TS043.5P.Pdf, A.C.P.A. Properties of Concrete Containing RCA. 5 Ocak 2023.
- URL-2, www.dabonline.de/2015/04/29/kreislauf-aus-beton-recycling-greenbuilding-hochbau-wiederverwertung-recyclingbeton-r-beton-energieeffizienz-nachhaltigkeit/, Circular Use of Concrete. 11 Şubat 2023.
- URL-3, www.Beton.Org/İnspiration/Architektur/ObjektDetails/ErweiterungDer-Schulanlage-Hirzenbach-in-Zuerichch, Floating Building From Recycled Concrete. 21 Şubat 2023.
- URL-4, www.ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/news_alert/issue_88_Case_Study_168_Zurich.Pdf, European Commission, A Low Carbon, Circular Economy Approach To Concrete. 21 Şubat 2023.
- URL-5, www.kreislaufwirtschaft-bau.de/arge/bericht-11.pdf. Mineral Construction Waste Monitoring. 13 Haziran 2022.
- URL-6, www.Geopolymer.Org/Applications/Geopolymer-Cement/, Geopolymer cement

and Geopolymer Concrete. 21 Şubat 2023.

- URL-7, www.Geopolymer.Org/Applications/Hazardous-And-Radioactive-Waste-Encapsulation-Treatment/, Hazardous-And-Radioactive-Waste-Encapsulation-Treatment. 21 Şubat 2023.
- URL-8, www.heinze.de/architekturobjekt/forschungs-und-laborgebaeude-fuer-lebenswissenschaften-der-humboldt-universitaet-zu-berlin/12671706/, Research and Laboratory Building for Life Sciences of the Humboldt University of Berlin. 21 Şubat 2023.
- Vaibhav, K.S., Nagaladinni, M., Madhushree, M. ve Priya, B.P., 2019. Effect of Silica Fume on Fly Ash Based Geopolymer Mortar with Recycled Aggregates, Sustainable Construction and Building Materials, 595–602.
- Valencia Saavedra, W.G. ve Mejía De Gutierrez, R., 2017. Performance of Geopolymer Concrete Composed of Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures, Construction and Building Materials, 154, 229-235.
- Verian, K., 2012. Using Recycled Concrete as Coarse Aggregate in Pavement Concrete, Yüksek Lisans Tezi, Purdue Üniversitesi.
- Verian, K.P., Ashraf, W. ve Cao, Y., 2018. Properties of Recycled Concrete Aggregate and Their Influence in New Concrete Production, Resources, Conservation and Recycling, 133, 30–49.
- Villoria Sáez, P. ve Osmani, M., 2019. A Diagnosis Of Construction and Demolition Waste Generation and Recovery Practice in the European Union, Journal of Cleaner Production, 241, 118400.
- Wagih, A.M., El-Karmoty, H.Z., Ebid, M. ve Okba, S.H., 2013. Recycled Construction and Demolition Concrete Waste as Aggregate for Structural Concrete, HBRC Journal, 9, 3, 193–200.
- Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J. ve Rangan, B.V., 2005. Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Under Sulphate and Acid Exposure, Geopolymer: Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, 153-156.
- Wallah, S.E., Rangan, B.V., 2006. Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. Curtin University Of Technology, Perth , Australia.
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., ve Kasal, B., 2021. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Resources, Conservation and Recycling, 171, 105565.
- Wang, C., Xiao, J., Zhang, G. ve Li, L., 2016. Interfacial Properties of Modeled Recycled Aggregate Concrete Modified by Carbonation, Construction and Building Materials, 105, 307–320.

- Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y. ve Guo, J., 2017. An Environmentally Friendly Method to Improve the Quality of Recycled Concrete Aggregates, Construction and Building Materials, 144, 432–441.
- Waqas, R.M., Butt, F., Danish, A., Alqurashi, M., Mosaberpanah, M.A., Masood, B. ve Hussein, E.E., 2021. Influence of Bentonite on Mechanical and Durability Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete With Natural and Recycled Aggregates, Materials, 14, 7790.
- Wazien, A.Z.W., Abdullah, M.M.A.B., Abd Razak, R., Rozainy, M.A.Z.M.R. ve Tahir, M.F.M., 2016. Strength and Density of Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature for Use as Repair Material, IOP Conference Series: Materials Science And Engineering.
- Wirquin, E., Zaharieva, R. ve Buyle-Bodin, F., 2000. Use of Water Absorption by Concrete as a Criterion of the Durability of Concrete - Application to Recycled Aggregate Concrete, Materials and Structures, 33, 403–408.
- Xiao, J., Li, J. ve Zhang, C., 2005. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Loading, Cement and Concrete Research, 35, 6, 1187–1194.
- Xie, J., Chen, W., Wang, J., Fang, C., Zhang, B. ve Liu, F., 2019. Coupling Effects of Recycled Aggregate and GGBS/Metakaolin on Physicochemical Properties of Geopolymer Concrete, Construction and Building Materials, 226, 345–359.
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C. ve Fang, C., 2019. Effects of Combined Usage of GGBS and Fly Ash on Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Geopolymer Concrete With Recycled Aggregate, Composites Part B: Engineering, 164, 179–190.
- Xie, J., Wang, J., Zhang, B., Fang, C. ve Li, L., 2019. Physicochemical Properties of Alkali Activated GGBS and Fly Ash Geopolymeric Recycled Concrete, Construction and Building Materials, 204, 384–398.
- Yan, B., Huang, L., Yan, L., Gao, C. ve Kasal, B., 2017. Behavior of Flax FRP Tube Encased Recycled Aggregate Concrete with Clay Brick Aggregate, Construction and Building Materials, 136, 265–276.
- Yang, K.H., Chung, H.S. ve Ashour, A.F., 2008. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties, ACI Materials Journal, 105, 3, 289–296.
- Yuan, Q., Shi, C., De Schutter, G., Audenaert, K. ve Deng, D., 2009. Chloride Binding of Cement-Based Materials Subjected to External Chloride Environment – A Review, Construction and Building Materials, 23, 1, 1–13.
- Zaharaki, D., Galetakis, M. ve Komnitsas, K., 2016. Valorization of Construction and Demolition (C&D) and Industrial Wastes through Alkali Activation, Construction and Building Materials, 121, 686–693.

- Zawrah, M.F., Gado, R.A., Feltin, N., Ducourtieux, S. ve Devoille, L., 2016. Recycling and Utilization Assessment of Wastefired Clay Bricks (Grog) with Granulated Blast-furnace Slag for Geopolymer Production, Process Safety and Environmental Protection, 103, 237–251.
- Zega, C.J. ve Di Maio, A.A., 2011. Use of Recycled Fine Aggregate in Concretes with Durable Requirements, Waste Management, 31, 2336–2340.
- Zergaoui, M., 2009. State of the Art on Geopolymer Concrete, Proceedings of Balisage: The Markup Conference, 1.
- Zhang, H., Ji, T., Liu, H. ve Su, S., 2018. Modifying Recycled Aggregate Concrete by Aggregate Surface Treatment Using Sulphoaluminate Cement and Basalt Powder, Construction and Building Materials, 192, 526–537.
- Zhang, H., Liu, W., Lin, X., Su, S., ve Zhao, B., 2021. To Ameliorate the Performance of Recycled Aggregate Concrete (RAC) by Pre-Treating Aggregate in Sulfoaluminate Cement Slurry and Water Glass Solution, Journal of Building Engineering, 44, 103364.
- Zhang, H., Zhao, Y., Meng, T. ve Shah, S.P., 2015. The Modification Effects of a Nano-Silica Slurry on Microstructure, Strength, and Strain Development of Recycled Aggregate Concrete Applied in an Enlarged Structural Test, Construction and Building Materials, 95, 721–735.
- Zhang, H., Zhao, Y., Meng, T., Shah, S.P. ve Dist M., 2016. Surface Treatment On Recycled Coarse Aggregates with Nanomaterials, Journal of Materials in Civil Engineering, 28, 2, 04015094.
- Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L. ve Wang, F., 2016a. Thermal Behavior and Mechanical Properties of Geopolymer Mortar After Exposure to Elevated Temperatures, Construction and Building Materials, 109, 17–24.
- Zhang, J., Shi, C., Li, Y., Pan, X., Poon, C-S. ve Xie, Z., 2015. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates Through Carbonation, Journal of Materials in Civil Engineering, 27, 11, 4015029.
- Zhao R., ve Sanjayan J.G., 2011. Geopolymer and Portland Cement Concretes in Simulated Fire, Magazine of Concrete Research, 63, 163–73.
- Zhao, X., Ma, X., Chen, B., Shang, Y. ve Song, M., 2022. Challenges Toward Carbon Neutrality in China: Strategies and Countermeasures, Resources, Conservation and Recycling, 176, 105959.
- Zhao, Z., Wang, S., Lu, L. ve Gong, C., 2013. Evaluation of Pre-Coated Recycled Aggregate for Concrete and Mortar, Construction and Building Materials, 43, 191–196.
- Zhu, P., Hao, Y., Liu, H., Wei, D., Liu, S. ve Gu, L., 2019. Durability Evaluation of Three

Generations of 100% Repeatedly Recycled Coarse Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 210, 442–450.

Zhu, Q., Jiang, L., Chen, Y., Xu, J. ve Mo, L., 2012. Effect of Chloride Salt Type on Chloride Binding Behavior of Concrete, Construction and Building Materials, 37, 512–517.

Zhutovsky, S. ve Kovler, K., 2012. Effect of Internal Curing on Durability-Related Properties of High Performance Concrete, Cement and Concrete Research, 42, 20–26.



ÖZGEÇMİŞ

Memduh NAS, İlk ve orta öğrenimini Dumlupınar İlköğretim Okulunda, lise öğrenimini ise Trabzon Kanuni Anadolu Lisesinde tamamladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemesi Bilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalında araştırma görevlisi kadrosuna atandı ve halen görevine devam etmektedir. NAS, ileri seviyede İngilizce bilmekte olup, evlidir.