

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

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**JEOPOLİMER BAĞLAYICILI SÜNEK KOMPOZİTLERDE OTOJEN
KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME DAVRANIŞININ TAŞINMA ÖZELLİKLERİ
BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

MUHAMMED FARUK GÜNAL

AĞUSTOS 2020

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Muhammed Faruk GÜNAL tarafından hazırlanan JEOPOLİMER BAĞLAYICILI SÜNEK KOMPOZİTLERDE OTOJEN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME DAVRANIŞININ TAŞINMA ÖZELLİKLERİ BAKIMINDAN İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN _____

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

JEOPOLİMER BAĞLAYICILI SÜNEK KOMPOZİTLERDE OTOJEN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME DAVRANIŞININ TAŞINMA ÖZELLİKLERİ BAKIMINDAN İNCELENMESİ

GÜNAL, Muhammed Faruk

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM

Ağustos 2020, 267 Sayfa

Altyapısal sistemlerde sürdürülebilirlik konusu son zamanlarda tüm dünyada önem kazanmaya başlamıştır. Portland çimentosu tüketimi altyapısal sistemlerin eş zamanlı olarak gelişmesi ile sürekli olarak artmaktadır. Portland çimentosu üretiminin tüm dünyada en fazla enerji ihtiyacına gereksinim duyan endüstrilerden bir tanesi olduğu ve insan kaynaklı karbondioksit (CO₂) salınımlarının yaklaşık %5-8'inden sorumlu olduğu iyi bilinmektedir. Ayrıca Portland çimentosu üretiminde doğal kaynaklardan elde edilen malzemeler kullanılmaktadır. Bu sebeple daha uzun süreli sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi açısından çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Çevre dostu malzemeler geliştirilmesi bakımından geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak son yıllarda jeopolimerler göz önüne çıkmaktadır. Jeopolimerler tamamen çimentosuz alüminosilikat esaslı bağlayıcılar olarak tanımlanmaktadır.

Sürdürülebilirlik sağlayan önemli konulardan birisi betonun servis ömrüne de katkı sağlayan kendiliğinden iyileşme konusudur. Çatlak oluşumu beton gibi gevrek malzemeler için kaçınılmaz bir durumdur. Çatlaklarını kendiliğinden iyileştiren beton tasarımı yapıların daha uzun süre hizmet vermelerine olanak sağlamaktadır. Geleneksel betonlarda düşük çekme dayanımı dolayısıyla çatlak kontrolünün olmayışı kendiliğinden iyileşme etkinliğini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu nedenle aşırı mekanik yüklemeler altında dahi şekil değiştirme sertleşmesi sayesinde mikron

mertebesinde çatlak oluşturma kabiliyetine sahip tasarlanmış lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Gerçek altyapısal sürdürülebilirliğin ancak çevre dostu malzemelerin üretimi ve yüksek yapısal dayanıklılığın birlikte sağlanması yoluyla elde edilebileceği düşünülmektedir. Jeopolimerler geleneksel betona benzer şekilde gevrek malzemelerdir. Bu nedenle bir yapı daha “çevre dostu” malzemelerden yapılmış olsa dahi çatlak oluşumu göstererek düşük servis ömrüne sahip olmakta ve bu durum yapıları daha sürdürülemez kılmaktadır.

Bu tez, altyapısal sistemler için çevre dostu ve dayanıklı tasarlanmış lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozit malzemelerin geliştirilmesine ve kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesine odaklanmıştır. Tasarlanmış lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozitler, jeopolimer ve tasarlanmış lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitin entegre edilerek geliştirilmesiyle üretilmiştir. Türkiye’de kentsel dönüşümden yaklaşık 6,5 milyonun üzerinde yapının etkileneceği belirtilmektedir. Bu nedenle jeopolimer sistemler için gerekli alüminosilikat kaynaklı bağlayıcı malzemeler her geçen gün göz ardı edilemeyecek miktarlara ulaşan ve kontrolsüz bir biçimde artmaya devam eden çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, beton, cam gibi inşaat ve yıkıntı atıkları olarak belirlenmiştir. Ayrıca geliştirilen jeopolimer kompozitlerde agrega olarak geri dönüşüm beton agregası kullanılmıştır.

Tez çalışmaları kapsamında, 90 günün sonunda, 27,8-53,5 MPa basınç dayanımına, 8,8-12,8 MPa eğilme dayanımına, 23,6-48,3 mm orta açıklık deformasyonuna sahip farklı kompozisyonlarda tasarlanmış lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı sünek kompozitler geliştirilmiştir. Geliştirilen kompozit malzemelerdeki mikro çatlakların otojen kendiliğinden iyileşme davranışı literatürde ilk defa kılcal su emme, elektriksel empedans, hızlı klorür iyonu geçirimsizliği ve su emme testleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapı Malzemeleri, Jeopolimer, Mekanik Özellikler, İnşaat ve Yıkıntı Atıkları, Geri Dönüşüm Agregası, Otojen Kendiliğinden İyileşme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF AUTOGENOUS SELF-HEALING BEHAVIOUR OF DUCTILE GEOPOLYMER COMPOSITES THROUGH TRANSPORT PROPERTIES

GÜNAL, Muhammed Faruk

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gürkan YILDIRIM

August 2020, 267 pages

Recently the issue of sustainability in infrastructure systems has begun to gain importance around the world. Portland cement consumption is constantly increasing with the simultaneous development of infrastructural systems. Portland cement manufacturing is well known to be one of the industries that require the most energy needs in the world and is responsible for about 5-8 percent of human-driven carbon dioxide (CO₂) emissions. Additionally, products derived from natural sources are used in portland cement manufacture. For this reason, it is very important to develop environmentally friendly building materials in order to ensure long-term sustainability. It is therefore necessary to develop eco-friendly construction materials to ensure long-term sustainability. Geopolymers are considered an alternative to conventional Portland cement as regards the production of environmentally friendly materials. Geopolymers are defined as cement-free binders based on aluminosilicate materials.

One of the essential principles of sustainability is self-healing, which also contributes to the service life of the concrete. Crack formation is inevitable for brittle materials such as concrete. Concrete construction, which repairs cracks by itself, permits a longer service life for structures. The absence of crack control due to low tensile strength substantially reduces the self-healing capacity in traditional concrete. Composite materials have therefore been developed with fiber-reinforced cementitious binders, which are capable of forming cracks under extremely mechanical loads in the

micron range. It is assumed that true sustainability in infrastructure can only be achieved by manufacturing eco-friendly sustainable materials and high structural durability. Geopolymers are brittle materials similar to traditional concrete. For this reason, Even if the structure is constructed from more "eco-friendly" materials, the structure has a crack formation and a low service life, which means structures are less sustainable.

This thesis mainly focuses on the development of eco-friendly and durable fiber reinforced geopolymer binder composite materials for infrastructural systems and the evaluation of self-healing performance. Engineered fiber-reinforced geopolymer composites are developed by integrating geopolymer and engineered fiber-reinforced cementitious composites. Makeover about 6.5 million urban transformations in Turkey is reported to be affected. For this purpose, aluminosilicate-based materials required for geopolymer systems have been determined as construction and demolition wastes such as roof tiles, hollow bricks, red clay bricks, concrete and glass wastes, which continue to increase in an uncontrolled manner, reaching quantities that cannot be ignored every day. In addition, the recycled concrete aggregate was used as aggregate in the development of geopolymer composites.

Within the scope of thesis studies, fiber-reinforced geopolymer binder composites have been developed in different compositions with 27.8-53.5 MPa compressive strength, 8.8-12.8 MPa flexural strength, 23.6-48.3 mm mid-span deflection at the end of 90 days. The autogenous self-healing behavior of microcracks in the composite materials developed was evaluated for the first time in the literature by sorptivity, electrical impedance, rapid chloride permeability and water absorption tests.

Keywords: Building Materials, Geopolymer, Mechanical Properties, Construction and Demolition Waste, Recycling Aggregate, Autogenous Self-Healing

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce tez çalışmalarımın başladığı ilk andan itibaren bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Gürkan Yıldırım’a paha biçilemez rehberliği için yürekten teşekkür ederim. Hocamın işine olan ilgisi, bakış açısı, tarafıma yaklaşımı ve bitmek bilmeyen enerjisinin başlı başına bir ilham kaynağı olduğunu ve destekleri için ömür boyu kendisine minnettar kalacağımı belirtmek isterim.

Çalışmam sırasında değerli fikirlerini, bilgilerini, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmamın gerçekleşmesi için gerekli ortamı sağlayan Sayın Prof. Dr. Mustafa Şahmaran hocama yürekten teşekkür ederim.

Değerli yorumları ve tavsiyeleri için saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. İlhami Demir’e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özer Sevim’e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesi sırasında ve tez hazırlama aşamasında yanımda olan fikir alışverişinde bulunduğum özellikle Hacettepe Üniversitesindeki tüm çalışma arkadaşlarım ve hocalarıma teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun (TÜBİTAK) MAG-117M447 numaralı araştırma projesi kapsamında tamamlanan tez çalışmalarım sırasında mali desteğini esirgemeyen TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Son olarak yüksek lisans çalışmalarım sırasında beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, beni yetiştiren ve hayatımın her kademesinde maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xvii
KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel.....	1
1.2. Araştırma Hedefleri ve Tez Organizasyonu.....	7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
2.1. Jeopolimer ve Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerin Gözden Geçirilmesi.....	11
2.1.1. Jeopolimer.....	11
2.1.1.1. Gelişim Tarihi.....	11
2.1.1.2. Jeopolimer Bağlayıcılı Malzemelerin Kimyası.....	15
2.1.1.3. Jeopolimer Bağlayıcı Malzemelerde İnşaat Yıkıntı Atıklarının Kullanımı.....	19
2.1.2. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler.....	22
2.1.2.1. Gelişim Tarihi.....	22
2.1.2.2. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozit Tasarımı Hakkında Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	27
2.1.3. Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozitler.....	31
2.1.3.1. Gelişim Tarihi.....	31
2.1.3.2. Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozit Tasarımı İçin Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	33
2.1.4. Çözülmemiş Problemler.....	37
2.2. Kendiliğinden İyileşmenin Gözden Geçirilmesi.....	39

2.2.1.	Kendiliğinden İyileşme	39
2.2.1.1.	Gelişim Tarihi	39
2.2.1.2.	Kendiliğinden İyileşme Hakkında Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar	41
2.2.1.3.	Çözülmemiş Problemler	45
2.3.	Geri Dönüşüm Agregasının Gözden Geçirilmesi	46
2.3.1.	Geri Dönüşüm Agregası	46
2.3.1.1.	Gelişim Tarihi	46
2.3.1.2.	Geri Dönüşüm Agregası Hakkında Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar	49
2.3.1.3.	Çözülmemiş Problemler	52
3.	DENEYSEL PROGRAM	55
3.1.	Kullanılan Malzemeler	55
3.1.1.	Bağlayıcı Toz Malzemeler	55
3.1.1.1.	Kiremit ve Tuğla Tozları	58
3.1.1.2.	Cam Tozu	60
3.1.1.3.	Beton Tozu	62
3.1.1.4.	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	63
3.1.1.5.	Bağlayıcı Toz Malzemelerin Fiziksel ve Yapısal Özellikleri	65
3.1.2.	Alkali Aktivatörler	72
3.1.2.1.	Sodyum Hidroksit	75
3.1.2.2.	Sodyum Silikat	77
3.1.2.3.	Kalsiyum Hidroksit	79
3.1.3.	Geri Dönüşüm Agregası	82
3.1.4.	Lifler	86
3.1.4.1.	Polivinil Alkol Lif	89
3.1.4.2.	Polietilen Lif	91
3.1.4.3.	Naylon-mono Lif	93
3.1.4.4.	Polipropilen Lif	95
3.2.	Yöntem	97
3.2.1.	Karışımların Hazırlanması	97
3.2.2.	Önyükleme ve Kendiliğinden İyileşmenin Taşınma Özellikleri Bakımından Değerlendirme Yöntemleri	101

3.2.3.	Kür Koşulları.....	102
3.2.4.	Deney Prosedürleri.....	104
3.2.4.1.	Basınç Dayanımı Deneyi	104
3.2.4.2.	Eğilme Dayanımı Deneyi	104
3.2.4.3.	Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi	106
3.2.4.4.	İşlenebilirlik ve Priz Süreleri Deneyleri	107
3.2.4.5.	Kılcal Su Emme Deneyi	110
3.2.4.6.	Elektriksel Empedans Deneyi.....	111
3.2.4.7.	Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizlik Deneyi	114
3.2.4.8.	Su Emme Deneyi	116
3.2.4.9.	Mikroskopik Gözlem ve Analiz.....	117
4.	JEOPOLİMER BAĞLAYICILI KOMPOZİT TASARIMI.....	118
4.1.	Giriş.....	118
4.2.	Ön Çalışmalar.....	119
4.3.	Matris Tasarımı	125
4.3.1.	DeneySEL Çalışmalar.....	127
4.3.2.	DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma.....	129
4.4.	Kompozit Tasarımı.....	142
4.4.1.	DeneySEL Çalışmalar.....	142
4.4.2.	DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma.....	144
5.	JEOPOLİMER BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN MEKANİK PERFORMANSI.....	149
5.1.	Giriş.....	149
5.2.	DeneySEL Çalışmalar.....	149
5.3.	DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma.....	150
5.3.1.	Basınç Dayanımı	150
5.3.2.	Eğilme Dayanımı	153
5.3.3.	Yarmada Çekme Dayanımı	161
5.3.4.	İşlenebilirlik ve Priz Süresi	165
5.3.5.	Mikroskopik Gözlem ve Analiz.....	170
6.	JEOPOLİMER BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME PERFORMANSI.....	179
6.1.	Giriş.....	179

6.2.	Deneysel Çalışmalar.....	181
6.3.	Deneysel Sonuçlar ve Tartışma.....	182
6.3.1.	Kılcal Su Emme	182
6.3.2.	Elektriksel Empedans.....	193
6.3.3.	Hızlı Klorür İyonu Geçirirnililiği	203
6.3.4.	Su Emme	210
6.3.5.	Mikroskopik Gözlem ve Analiz	216
7.	SONUÇLAR	225
	KAYNAKLAR	232



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde İYA esaslı malzemelerin kullanımının uygulanabilirliğine dair gerçekleştirilen çalışmalar	20
2.2. ECC malzemesinin tipik karışım oranları	24
2.3. İnce geri dönüşüm beton agregasının özellikleri ile ilgili literatürde mevcut çalışmalar	50
3.1. Uçucu külün kimyasal analizi	58
3.2. Soda-kireç camının tipik kimyasal analizi	60
3.3. Bağlayıcı toz malzemelerin ortalama tane boyutları.....	67
3.4. Bağlayıcı toz malzemelerin kimyasal analizleri	67
3.5. Pul formda sodyum hidroksitin kimyasal analizi.....	77
3.6. Sıvı sodyum silikatın kimyasal analizi.....	79
3.7. Toz kalsiyum hidroksitin kimyasal analizi	81
3.8. İnce geri dönüşüm beton agregasının ve referans kumun karakteristik özellikleri	85
3.9. PVA-1 ve PVA-2 liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	90
3.10. PE lifinin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	91
3.11. NM lifin fiziksel ve mekanik özellikleri	94
3.12. (a) PP-1, (b) PP-2 ve (c) PP-3 liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	95
4.1. Tekli jeopolimer hamurların karışım oranları	121
4.2. Beşli jeopolimer hamurların karışım oranları	124
4.3. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları	130
4.4. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları	131
4.5. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların karışım oranları	134
4.6. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların karışım oranları	135

4.7. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları.....	138
4.8. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları.....	140
5.1. Nihai EGC karışımların karışım oranları	150
5.2. Farklı kompozisyona sahip EGC karışımlarının Marsh-hunisi ve mini-çökme yayılma deney sonuçları.....	166
5.3. Farklı kompozisyona sahip EGC karışımların priz süreleri.....	168
6.1. Nihai EGC karışımların karışım oranları	182
6.2. EGC numunelerinin kılcal su emme değerleri	186
6.3. EGC numunelerinin elektriksel empedans değerleri.....	195
6.4. EGC numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimsilik değerleri.....	204
6.5. S1 kodlu EGC numunesine ait hızlı klorür iyonu geçirimsiliği deneyi esnasında cihazdan okunan veriler	207
6.6. Beton numunesine ait hızlı klorür iyonu geçirimsiliği deneyi esnasında cihazdan okunan veriler.....	208
6.7. EGC karışımlarının su emme değerleri.....	211

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

2.1. Purdon'nun 1940 yılında çeşitli aktivatör kombinasyonlarını kullanarak geliştirdiği alkali aktif cürufun basınç dayanımı sonuçları	12
2.2. Alkali aktif bağlayıcı kullanılarak yapılmış (a) 20 katlı bina (b) Alkali aktif bağlayıcı kullanılarak yapılmış 9 katlı bina	13
2.3. Düşük kalsiyum içeren alkali aktif sistemler için kavramsal jeopolimerizasyon modeli.....	17
2.4. Yüksek kalsiyum içeren alkali aktif sistemler için daha ayrıntılı kavramsal model	18
2.5. Eksenel çekme yükleri altında kırılğan (gevrek) beton, şekil değiştirme yumuşaması davranışı sergileyen LDB ve şekil değişime sertleşmesi davranışı sergileyen YPLDÇK malzemelerin davranışları.....	23
2.6. ECC malzemesinin (a) tipik çekme-şekil değiştirme eğrisi ve (b) ortalama çatlak açıklığı gelişimi.....	25
2.7. ECC malzemesinin eğilme yükleri altındaki tipik davranışı.....	26
2.8. ECC malzemesinin uygulama örnekleri: (a) beton barajın yapısal tamiri (b) istinat duvarının tamiri (c) köprü-tabliyesi bağlantı levhası (d) köprü-tabliye kaplaması (e) (f) yüksek katlı binalar için yapısal damperler.....	27
2.9. (a) Griffith tipi ve (b) kararlı durum düz çatlak oluşumu	28
2.10. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösteren kompozit için tipik çatlak köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) eğrisi.....	30
2.11. Çimento bağlayıcılı malzemelerde otojen kendiliğinden iyileşmeye sebep olabilecek mekanizmalar.....	43
2.12. İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak hazırlanan EGC'de bulunan farklı arayüzey geçiş bölgelerinin şematik olarak gösterilmesi.....	53
3.1. (a) (b) Çeneli kırıcı ve (c) (d) bilyalı değirmenin görüntüleri.....	56
3.2. İnşaat yıkıntı atıklarının, mineral katkıların ve portland çimentosunun SiO_2 - Al_2O_3 - CaO üçlü diyagramı üzerindeki pozisyonları.....	57
3.3. Uçucu külün XRD faz diyagramı.....	57

3.4. Çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlanın dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında ham, kırılmış, öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü).....	59
3.5. Cam atığının dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında ham, kırılmış, öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)	62
3.6. Beton atığının dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında ham, kırılmış, öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)	63
3.7. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)	65
3.8. Bağlayıcı toz malzemelerin tane boyutu dağılımları	66
3.9. Bağlayıcı toz malzemelerin XRD faz diyagramları	69
3.10. Bağlayıcı toz malzemelerin FTIR analizleri	71
3.11. Pul formda sodyum hidroksitin paketli ve açık haldeki görüntüleri	77
3.12. Sıvı sodyum silikatın paketli ve açık haldeki görüntüleri	79
3.13. Toz kalsiyum hidroksitin paketli ve açık haldeki görüntüleri.....	81
3.14. (a) İnce geri dönüşüm beton agregasının ve (b) referans kumun görüntüleri ...	83
3.15. İnce geri dönüşüm beton agregasının ve referans kumun tane boyutu dağılımı eğrileri	84
3.16. İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak hazırlanan EGC karışımlarda bulunan farklı arayüzey geçiş bölgelerinin türlerinin mikroskop altındaki görüntüsü	85
3.17. Çeşitli sentetik lifler	88
3.18. (a) PVA-1 ve (b) PVA-2 liflerinin dijital kamera altındaki görüntüsü	90
3.19. PE lifinin dijital kamera altındaki görüntüsü	91
3.20. NM lifinin dijital kamera altındaki görüntüsü	94
3.21. (a) PP-1, (b) PP-2 ve (c) PP-3 liflerinin dijital kamera altındaki görüntüsü	95
3.22. Deneysel programın şematik gösterimi.....	98
3.23. EGC karışımının hazırlanması	99
3.24. EGC karışımlarının üretiminde kullanılan kalıplar.....	100
3.25. Numunelerin önyüklenmesi ve mikro çatlak hasarının oluşturulması.....	102

3.26. EGC karışımlarının I-K döngüsüne maruz bırakılmaları.....	103
3.27. Basınç deney düzeneğinin şematik gösterimi	104
3.28. Dört noktalı eğilmede çekme deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	106
3.29. Yarmada çekme deney düzeneğinin şematik gösterimi	107
3.30. (a) Marsh-hunisi ve (b) kesik koninin şematik gösterimi	108
3.31. Vicat aletinin şematik gösterimi.....	109
3.32. Kılcal su emme deney düzeneğinin şematik gösterimi	111
3.33. Elektriksel empedans deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	114
3.34. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney düzeneğinin şematik gösterimi	115
3.35. Su emme deney düzeneğinin şematik gösterimi	116
4.1. Hamur karışımlara ısı kütür uygulanması	120
4.2. Tekli jeopolimer hamurların basınç dayanımı sonuçları.....	121
4.3. Beşli jeopolimer hamurların basınç dayanımı sonuçları	124
4.4. Isı kütürün ardından suda bekletilen jeopolimer numuneler.....	126
4.5. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları.....	130
4.6. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları.....	132
4.7. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları.....	134
4.8. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları.....	136
4.9. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları	138
4.10. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları	140
4.11. (a) Alkali aktivatör solüsyonunda bekletilmiş ve (b) ısı kütür maruz bırakılmış liflerin görüntüsü.....	144
4.12. Farklı liflerle üretilen kompozitlerin 28 günün sonundaki eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafikleri	146
4.13. PE lif takviyeli kompozitin eğilme yükleri altındaki davranışı ve çoklu mikro çatlakların oluşumu	147

4.14. PE ve NM liflerinin hibridizasyonu ile üretilen kompozitin 28 günün sonundaki eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafiği	148
5.1. Farklı kompozisyona sahip EGC karışımlarının basınç dayanım sonuçları	150
5.2. Basınç dayanımı testinden önce ve sonra EGC numuneleri (soldan sağa lifli kırılmamış, lifsiz kırılmış, lifli kırılmış)	152
5.3. EGC karışımlarının 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafikleri.....	154
5.4. S3 kodlu EGC malzemesinin eğilme yükleri altındaki tipik davranışı ve orta açıklık çatlak gelişimi	159
5.5. EGC malzemesinin (a) tipik çekme-şekil değiştirme eğrisi ve (b) ortalama çatlak genişliği gelişimi	160
5.6. EGC karışımlarının 7, 28, 90 günlük yarmada çekme dayanımı - deformasyon grafikleri.....	162
5.7. Yarmada çekme yüklemesi altında S2 kodlu EGC numunenin tipik davranışı	163
5.8. (a) Marsh-hunisi ve (b) (c) mini-çökme yayılma deneylerinin gerçekleştirilmesi	167
5.9. Priz başlama ve sona erme süresi ölçümlerinin gerçekleştirilmesi.....	168
5.10. (a) PE ve (b) NM lifinin EGC matris içerisinde SEM altındaki görüntüsü	170
5.11. S2 kodlu EGC matrisinde oluşan N-A-S-(H) jeli ve zeolitik yapıları	171
5.12. S3 kodlu EGC matrisinde oluşan C-A-S-H ve N-A-S-(H) jelleri.....	172
5.13. Reaksiyona girmemiş tanecik	173
5.14. EGC karışımların 90 günlük XRD sonuçları	174
5.15. EGC karışımlarının 90 günlük FTIR analizi sonuçları	176
6.1. Zamanın karekökünün bir fonksiyonu olarak kılcal su emiliminin tipik grafiği	183
6.2. Kılcal su emme deneyi	183
6.3. Kendiliğinden iyileşmenin EGC karışımlarının kılcal geçirimsizlikleri üzerine etkisi (a) sağlam (b) önyüklenmiş.....	190
6.4. Kılcal su emme deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri .	192
6.5. Elektriksel empedans deneyi.....	193
6.6. Elektriksek empedans deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri	202
6.7. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi	203

6.8. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri.....	209
6.9. Su emme deneyi	210
6.10. Su emme deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri	215
6.11. S1 kodlu EGC karışımının 90 gün I-K döngüsü sonrası çatlakların iyileşme ürünleriyle kapanması	216
6.12. S3 kodlu EGC karışımının 90 gün sürekli hava kürü sonrası çatlak görüntüleri	217
6.13. S5 kodlu EGC karışımının 30 gün I-K döngüsü sonrası çatlakların şişme etkisiyle kapanması.....	218
6.14. Sodyum karbonat (Natrite - Na_2CO_3) oluşumu ve EDX analizi	220
6.15. Kalsiyum karbonat (Calcite - CaCO_3) oluşumu ve EDX analizi	220
6.16. Kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat ürünlerinin birlikte oluşumu.....	221
6.17. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin XRD analizi	222
6.18. Çiçeklenme ürünlerinin XRD analizi.....	224

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

E_m	Harç matrisin elastik modülü
J_b'	Tamamlayıcı enerji
J_{tip}^i	Çatlak ucu tokluğu
K_m	Matris kırılma tokluğu
δ	Çatlak açıklığı
δ_0^i	Maksimum çatlak köprüleme gerilmesindeki çatlak açıklığı
δ_{ss}^i	Kararlı durum çatlak açıklığı
σ	Çatlak köprüleme gerilmesi
σ_0^i	Maksimum çatlak köprüleme gerilmesi
σ_{fc}^i	İlk çatlak oluşum dayanımı

KISALTMALAR DİZİNİ

AGB	Arayüzey geçiş bölgesi
Al_2O_3	Alüminyum oksit
BT	Beton tozu
C	Coulomb
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat
CaO	Kalsiyum oksit
C-A-S-H	Kalsiyum alüminat silikat hidrat jeli
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat jeli
CO_2	Karbondiyoksit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat jeli
ÇK	Çatı kiremiti
ECC	Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler
EDX	Enerji ayrımlı X-ışını analizi
EGC	Tasarlanmış jeopolimer bağlayıcılı kompozitler
Fe_2O_3	Demir oksit

FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre analizi
GDA	Geri dönüşüm agregası
HKİG	Hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi
HT	Harman tuğla
I-K	Islanma-kuruma döngüsü
İGDBA	İnce geri dönüşüm beton agregası
İYA	İnşaat yıkıntı atığı
K/B	Kum/Bağlayıcı
K ₂ O	Potasyum oksit
KK	Kızdırma kaybı
LDB	Lif donatılı beton
MgO	Magnezyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
NaCl	Sodyum klorür
NaOH	Sodyum hidroksit
N-A-S-(H)	Sodyum alüminat silikat hidrat jeli
NM	Naylon-mono lif
ÖGYFC	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
PE	Polietilen lif
PP	Polipropilen lif
PVA	Polivinil alkol lif
S/B	Su/Bağlayıcı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiO ₂	Silisyum oksit
SO ₃	Kükürt trioksit
UK	Uçucu kül
V	Volt
XRD	X-ışını kırınım analizi
YPLDÇK	Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitler

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Çimento, yüksek kullanım hacmi ve çevresel etkileri sebebiyle dünyadaki en önemli yapı malzemelerinden biri olup esas olarak beton üretimi için kullanılmaktadır (Worrell ve diğerleri, 2001). Günümüzde sudan sonra en çok tüketilen malzeme betondur. Dünyada kişi başına yılda yaklaşık üç ton beton kullanılır ve kullanım miktarları göz önüne alındığında diğer tüm yapı malzemelerinin yaklaşık iki katı kadar beton kullanıldığı bilinmektedir. Betonun temel bağlayıcı malzemesi olan çimentonun üretim miktarı incelendiğinde ise her yıl üretimin katlanarak arttığı görülmektedir. 2000 yılında 1,6 milyar ton olan çimento üretimi 2014 yılında ise 4,2 milyar tona ulaşmıştır (Baker, 2018). 2050 yılının sonunda üretim miktarının yaklaşık 6 milyar tona ulaşması beklenmektedir (Environment ve diğerleri, 2018). Tüm yapılarda olduğu gibi çeşitli altyapısal uygulamalarda kullanılan beton, tarihsel olarak servis süresinin başında belirli özelliklere sahip olacak ve önceden belirlenen bir kullanım ömrünü tamamlayacak şekilde tasarlanmaktadır. İnsanlar sürekli artan nüfus sebebiyle her ne kadar ömür boyu kullanılabilir yapıların inşa edilmesini arzu etse de Avrupa standartları uyarınca geniş çaplı kamusal işlerde kullanılan beton karışımlarından en az 75 yıllık hizmet ömrü beklenmektedir. Ancak mekanik ve çevresel yüklerin ortak etkisi altında 20 ila 30 yıl arasında bozulmanın başladığı göz önünde bulundurulduğunda, bir önceki yüzyılın ikinci yarısında inşa edilen birçok yapının sürekli olarak azalmakta olan işlevsellik sebebiyle servis ömürlerinin sonuna yaklaştıkları belirtilebilir. Yapıların kendilerinden beklenen işlevselliği karşılayamamaları hizmet süresi boyunca bozulan yapısal elemanların sürekli olarak tekrarlanan bakım, onarım ve/veya yenileme işlemlerini beraberinde getirerek yüksek trafik yoğunluğu, yakıt tüketimi, gaz salınımı vb. sorunları doğurmaktadır. Tüm bunlara ek olarak tekrarlı olarak uygulanan bu işlemler uzun ömürlü olmayabilmekte ve bu durum yapıların tamamen yıkılması ve yeniden inşa edilmesi gibi sonuçları doğurabilmektedir. Beklenilebileceği üzere, mevcut yapıların yıkımı ve yeniden inşasına ek olarak bakım, onarım ve/veya yenileme işlemleri sonucunda çok ciddi miktarlarda atık malzeme ortaya çıkmakta ve bu atıklar genel olarak inşaat ve yıkıntı

atıkları (İYA) olarak adlandırılmaktadır. 1980’li yıllardan bu yana inşaat, yıkım, yenileme ve bakım/onarım uygulamalarının sonrasında ciddi miktarlarda İYA’nın ortaya çıkması sebebiyle önemli ölçülerde temiz toprağa karışan İYA’nın azaltılabilmesi ve İYA ile alakalı depolama/ortadan kaldırma sorunlarının ortadan kaldırılabilmesi için sürekli bir çaba içerisinde girilmiştir. Literatürde, çeşitli yenilikçi teknolojiler aracılığı ile geri dönüştürme seçeneğinin sağlanmasına ek olarak çeşitli İYA tiplerinin tekrar kullanılabilmesinin mümkün olduğunu açıkça gözler önüne seren birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak tekrar kullanım ve geri dönüştürme seçenekleri her ne kadar mümkün olsa da İYA çoğu zaman temiz toprağa karışmakta ve bu durum çevresel kirliliği beraberinde getirmektedir. Bu sebeple konu, özellikle İYA geri kazanım farkındalığını henüz tam anlamıyla özümseyememiş, gelişmekte olan ülkelerde daha da önem arz eden bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkemizde Kentsel Dönüşüm Yasası kapsamında ne kadar yapının dönüştürüleceğine yönelik bilimsel ve objektif bir çalışma bulunmamakla birlikte yaklaşık 6,5 milyon yapının bu yasadan etkileneceği tahmin edilmektedir. Toplam yapı stoğumuzun ise 19-20 milyon civarında olduğu tahmin edilmektedir. Basit bir oransal hesaplama ile dahi ortaya çıkacak yıkıntı atıklarının çok yüksek seviyelere ulaşacağı belirtilebilir. Her ne kadar çevre ve sağlık üzerine etkileri göz ardı edilemeyecek kadar önemli olsa da atık yönetimiyle ilgili genel değerlendirmeler ekonomik getiriler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Genel anlamda belirtilmesi gerekirse atık yönetimiyle ilgili hem ekonomik hem de çevresel olarak ciddi farkların yaratılmasının yolu, önlem alınmazsa temiz toprağa karışacak kaçınılmaz İYA’nın tekrar kullanılması ve/veya geri dönüştürülmesi için sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesinden geçmektedir. Yeni malzemelerin üretimi ve taşınımı temiz sular ve hava kirliliğini arttırmak suretiyle insan sağlığını ciddi ölçüde etkilese de bu durum İYA’nın uygun şekilde tekrar kullanım, muhafaza ve geri dönüştürülmesiyle ortadan kaldırılabilir. Bu durum ayrıca zararlı sera gazı salınımlarının azaltılması hususunda da büyük önem arz etmektedir. İşlenmemiş malzeme stokları kullanılarak gerçekleştirilen orijinal üretime kıyasla geri dönüştürme seçeneği enerjinin tasarruf edilmesinde çok daha verimli bir yöntemdir. Bu sebeple İYA’nın olabilecek en uygun yöntemlerle kontrol altına alınması çevresel, sosyal ve ekonomik bağlamda oldukça büyük bir önem arz etmektedir.

Beton ve benzeri malzemelerin İYA olarak önemli ölçülerde açığa çıkmalarına ek olarak üretimleri sırasında da doğa ciddi hasara uğratılmakta, önemli ölçüde enerji ihtiyacı ortaya çıkmakta ve çevresel kirlilik tetiklenmektedir. Beton malzemesinin üretimi sırasında kullanılan bileşenlerin temini çevresel kirlilik, yüksek enerji ihtiyacı, doğal kaynakların tüketimi ve maliyet sorunlarının temelini oluşturmaktadır. Geleneksel beton malzemesinin bağlayıcısı olarak kullanılan portland çimentosunun üretimi yüksek enerji tüketiminin sebeplerinin başında gelmektedir. Öncelikli olarak çimento üretimi sırasında doğal kaynaklarımızdan elde edilen malzemeler kullanılmaktadır. Üretim sırasında kullanılacak ham madde temini için yapılan kazı çalışmalarında verimli toprak tabakası ve yeşil alanlar yok edilmektedir. Ayrıca 1 ton portland çimentosu üretilmesi için yaklaşık olarak 4 Giga-joule gibi büyük bir enerjinin kullanılması gerekmektedir. Tüm dünyada yıllık çimento üretim miktarının 4 milyar tonun üzerinde olduğu belirtilmektedir. Portland çimentosu üretimi sırasında ihtiyaç duyulan yüksek enerji seviyelerine ilaveten ayrıca 1 ton portland çimentosu üretimi yaklaşık olarak 1 ton karbondioksit gazının (CO₂) atmosfere salınımına sebebiyet vermektedir (Gartner, 2004). Tüm dünyadaki karbondioksit salınımının %8'i çimento endüstrisinden kaynaklanmaktadır ve bu salınım miktarı esas olarak klinker üretiminden kaynaklanmaktadır (Kajaste ve Hurme, 2016). Portland çimentosuna ek olarak beton karışımlarının tasarlanması sırasında üretimleri yüksek enerji gerektiren ve ciddi miktarlarda atık meydana getiren farklı boyutlarda agregaların kullanımına da ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca farklı bölgelerde gerçekleştirilen inşaat uygulamaları için her zaman iri ve ince agrega bulunamayabilmekte ve bu durum nakliye işlemlerinin daha uzun mesafelere yapılmasına sebep olarak ulaştırma maliyetini önemli ölçüde arttırabilmektedir. Türkiye küresel ısınmaya sebep olan karbondioksit gazının salnımında Avrupa'da 7. sırada bulunmaktadır. Bunun çevreye verdiği zararı gözetip gerekli önlemleri almak da sürdürülebilir kalkınma için gereklidir. Çimento ve beton üretiminde silis dumanı, uçucu kül ve cüruf gibi atık malzemelerin kullanılması, gerek ekonomik, gerek teknik ve gerekse çevresel katkılarıyla sürdürülebilir kalkınma için günümüzün olumlu bir uygulaması olmakla birlikte bu tür malzemelerin kullanım oranları çoğu zaman düşük seviyelerde kalmaktadır.

Altyapısal sistemlerde sürdürülebilirlik konusu son zamanlarda tüm dünyada önem kazanmaya başlamıştır. Daha önce belirtildiği gibi portland çimentosu tüketimi

küresel anlamda sürekli olarak artmaktadır ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde altyapısal sistemlerinde eş zamanlı olarak gelişmesi bu eğilimin devam edeceğini göstermektedir. Portland çimentosu üretiminin tüm dünyada en fazla enerji ihtiyacına gereksinim duyan endüstrilerden bir tanesi olduğu ve insan kaynaklı karbondioksit salınımlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu iyi bilinmektedir (Kajaste ve Hurme, 2016). Bu sebeple daha uzun süreli sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi açısından çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Diğer taraftan gelişmiş ülkelerde yaşlanmış altyapılarla ilgili sorunlar ortaya çıkmaktadır. Sadece ABD'de gelecek 20 yıl içerisinde bozulan yol ve köprülerin bakım maliyetinin 18 milyar dolar civarında olduğu tahmin edilmektedir. Asya kıtası için bu maliyet 20 milyar dolar civarındadır. Birçok Avrupa ülkesinde onarım işleri için ayrılan maliyet yeni inşaat tutarını aşmış durumdadır. Ülkemiz açısından bu konuda düzenli bir istatistiki bilgi tespit edilememiş olmasına rağmen, ülkemiz mevcut durumunun, Dünya'nın geri kalanından çok daha kötü durumda olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bakım/onarım uygulamaları her zaman sürdürülebilir değildir. Geleneksel onarım malzemelerinin yarısının, onarımın yapılması gereken fiili arazi koşullarında başarısız olduğu rapor edilmektedir. (Mather ve Warner, 2003) Bu bağlamda, yüksek dayanıklılığın daha uzun servis ömrü ve onarım işlerinin daha az sıklıkla yapılabilmesi için önemli bir parametre olduğu belirtilebilir. Gerçek altyapısal sürdürülebilirliğin ancak çevre dostu malzemelerin üretimi ve yüksek yapısal dayanıklılığın sağlanması yoluyla elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu gelişmeler kapsamında, son yıllarda patentli ismi Engineered Cementitious Composites (ECC) olan tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozit adı verilen yeni bir kompozit türü geliştirilmiştir. ECC'nin malzeme özelliklerinden biri olan şekil değiştirme sertleşmesi davranışı, matrisin kararlı durum çoklu çatlak oluşturması ile ilişkilidir. ECC'de kendinden kontrollü ve çelik donatı oranından bağımsız olan çatlak genişliği genellikle 100 µm'dan daha az genişliğe sahiptir. Bu özelliği üstün dayanıklılık ve kendiliğinden iyileşme performansı açısından onu benzersiz bir malzeme yapmaktadır. Son yıllarda çatlaklı betonun kendiliğinden iyileşme yeteneği sıkça araştırılan bir araştırma konusudur. Kendiliğinden iyileşme yüz yıl önce gözlemlenmiş olmasına rağmen (Lauer, 1956; Nijland ve diğerleri, 2007) bu konudaki araştırmalar son yıllarda artmıştır (Li ve Herbert, 2012; Van Tittelboom ve De Belie, 2013). Çimento bağlayıcılı malzemelerin kendiliğinden iyileşme çalışmalarının artmasının arkasındaki asıl neden olarak,

yukarıda da belirtildiği gibi betonla üretilen altyapıların dayanıksızlığı ve bozulmalar sebebiyle düşük servis ömrüne sahip olmaları gösterilmektedir. Otojen kendiliğinden iyileşmenin yapı malzemelerinin ve dolayısıyla yapının ömrünü arttırması beklenmektedir (Li ve Herbert, 2012). Literatürde boş liflerin kullanılması, kimyasal maddeler içeren kapsüller, bakteri kaynaklı iyileşme, genleşen katkı maddeleri ve kontrollü mikro çatlak oluşturma gibi farklı kendiliğinden iyileşme teknikleri vardır. Otojen kendiliğinden iyileşme, diğer yöntemlerden farklı olarak herhangi bir dış tetikleyiciye ihtiyaç duymamaktadır. Bu nedenle mevcut literatürde var olan kendiliğinden iyileşme çalışmalarının çoğu, otojen kendiliğinden iyileşme üzerine odaklanmaktadır. Deneysel araştırmalar ve pratik deneyimler, beton malzemedeki çatlakların kendiliğinden iyileşme potansiyeli olduğunu göstermiştir. Çimento bağlayıcı malzemelerde kendiliğinden iyileşme genellikle “devam eden ilave hidrasyona”, “kalsiyum karbonat oluşumuna”, “çatlak yanlarındaki betonun genişlemesine”, “çatlakların sudaki katı madde ile kapatılmasına” ve sonuçta beton üzerindeki çatlakların kapanmasına bağlanmaktadır (Jacobsen ve diğerleri, 1995). Tolere edilebilir çatlak genişlikleri belirlenirken çatlakların kendiliğinden iyileşmesi dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmalarda bir çatlakta kendiliğinden iyileşmenin tamamen gerçekleşebilmesi için sırasıyla 5 ile 10 µm, 100 µm, 200 µm, 205 µm ve 300 µm olarak maksimum çatlak genişlikleri önerilmiştir (Jacobsen ve diğerleri, 1995; Reinhardt ve Jooss, 2003; Edvardsen, 1999; Aldea ve diğerleri, 2000; Clear, 1985). Bir çatlağın tamamen iyileşmesi için kritik parametrenin tolere edilebilir çatlak genişliği olduğu da belirtilmektedir. Geleneksel beton mekanik yükleme altında kırılğan bir şekilde deforme olma eğilimine sahip olduğu için, bu tür küçük çatlak genişlikleri elde etmek oldukça zor olabilmektedir. Çatlak genişliği beton malzemelerin çatlakları kendiliğinden iyileştirmesinde anahtar bir faktör olarak tanımlandığından, ECC'deki dar çatlak genişliklerinin kendiliğinden iyileşme performansı göstermesi sürpriz olmamaktadır.

Bununla birlikte tipik bir ECC karışımı iri agregaların eksikliği sebebiyle geleneksel beton karışımlarının 2 ila 3 katından daha fazla portland çimentosu içermektedir (Wang ve Li, 2007). Daha önce bahsedildiği gibi portland çimentosunun çevresel zararları büyüyen bir endişe kaynağıdır. Karbondioksit salınımının dünya çapındaki küresel ısınmanın en önemli sebeplerinden biri olduğu ve sadece portland çimentosu

retiminin tüm dünyadaki karbondioksit salınımının yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu dşnldğnde (Kajaste ve Hurme, 2016), portland çimentosunun kısmi olarak puzolanik malzemelerle değiştirilmesinin bu malzemelerin üretiminin çimentodan daha az enerji gerektirmesi ve karbondioksit salınımını azaltmaları gibi sebeplerden ötürü toplam malzeme maliyetini ve çevresel zararı azaltmaları beklenebilir. Farklı puzolanik malzemeler arasından uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu mevcut durumda en yaygın bulunabilecek puzolanik malzemelerdendir. Bu endüstriyel yan ürünler fazla miktarlarda sürekli ortaya çıkmakta olup, genel olarak çimentoya kıyasla daha ucuz ve doğaldırlar. nceki alışmalar ECC karışımlarında portland çimentosunun değişik oranlarda farklı puzolanik malzemelerle yer değiştirilebileceğini gösterse de (Wang ve Li, 2007; Yang ve diğerleri, 2007), tam anlamıyla evre dostu ve maliyeti daha da düşürülmüş ECC karışımlarının geliştirilmesi ve bu malzemelerin çok daha yaygın bir şekilde kullanılabilmeleri adına bağlayıcı fazının tamamen çimentosuz yenilikçi bir sistemle (r. jeopolimer) değiştirilmesi sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir. Jeopolimer geleneksel portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilecek, yeni nesil sürdürülebilir alkali aktif bir bağlayıcı malzeme çeşidi olarak nitelendirilebilir. Sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak jeopolimerlerin kimyasal ve mühendislik özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Jeopolimerlerin normal portland çimentosuna kıyasla çevresel duyarlılıklarının çok daha fazla olması, ECC'nin ise üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmaları sebebiyle bu iki malzemenin bir araya getirilerek geliştirilmesi sürdürülebilir altyapısal gelişmeye önemli katkı sağlayabilir. Engineered Geopolymer Composites (EGC) olarak adlandırılan tasarlanmış jeopolimer bağlayıcı kompozitler ile ilgili son dönemlerde çok kısıtlı da olsa çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. şekil değiştirme sertleşmesi sayesinde çoklu mikro çatlak oluşumu sergileyen EGC'lerin özellikle dayanım, dayanıklılık ve kendiliğinden iyileşme özelliklerinin değerlendirildiği detaylı herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır ve bu konu EGC'lerin yaygın kullanımları ve geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Tez kapsamında bu eksikliğin önemli ölçüde giderilmesi planlanmaktadır.

Şekil değiştirme sertleşmesi özelliğiyle beraber gelen çoklu mikro çatlak hasarı oluşturabilme kabiliyetiyle ECC karışımlarının, üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmasının yanı sıra (Şahmaran ve Li, 2010) mikro çatlakları dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın otojen bir şekilde kendiliğinden iyileştirebildiği iyi bilinmektedir. EGC karışımların da benzer olarak otojen şekilde çatlakları kendiliğinden iyileştirebilmesi ihtimali tezin nihai hedeflerinden birisidir. Gerçekleştirilen tez çalışmaları kapsamında, tamamen İYA kullanılarak geliştirilmesi planlanan harçlar kullanılarak üretilecek EGC karışımlarının deneysel tabanlı tasarım yaklaşımı kullanılarak mikro çatlak hasarı sergilemelerinin sağlanmasının ardından literatürde henüz hiç çalışılmamış bir konu olan EGC'nin otojen kendiliğinden iyileşme davranışının taşınma özellikleri bakımından incelenmesi tez çalışmasının özgün noktalarından bir tanesidir.

1.2. Araştırma Hedefleri ve Tez Organizasyonu

Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmesi düşünülen araştırma planı çerçevesinde, İYA'lardan temiz toprağa karışmadan yüksek performanslı yeni yapı malzemeleri geliştirerek mümkün olabilecek en büyük faydanın sağlanması hedeflenmektedir. İYA'ların yapı malzemeleri üretiminde herhangi bir ön işlem gerektirmeksizin sadece tasnifleme, kırma ve öğütme gibi temel ve basit işlemlerden geçirilmesi ile kullanılabilir hale getirilmesi, inşaat ve yıkıntı atıklarının değerlendirilebilmesi ve yüksek performans gösteren yeni nesil yapı malzemelerinin üretilmesi hususuna özgün bir değer kazandırmaktadır.

Ayrıca geri dönüşüm agregalarının kullanım açısından hala belirli alan ve oranlarda kısıtlı kalması ve yeterli performans göstermemeleri sebepleri ile bu agregaların %100 oranda, üretilecek EGC karışımlarında kullanılması tez konusu kapsamında ele alınacak önemli hususlardan biridir. Tez çalışmaları kapsamında İYA'ların önemli bir bölümünü oluşturan ve tekrar kullanımı kısıtlı kalmış çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, cam ve beton atıklarının kullanılması planlanmıştır. Tezin temel amacı; çevre, ekonomi ve toplum üzerinde göz ardı edilemeyecek ölçüde negatif etkiler yaratan İYA'nın etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi için yaygın uygulanabilirliğe

sahip yöntemler kullanarak yeni nesil çevre dostu üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip, aşırı çekme yüklemeleri altında dahi çoklu mikro çatlak hasarı oluşturma ve şekil değiştirme sertleşmesi özelliğinden ödün vermeyen ve kararlı durum düz çatlak oluşumu sayesinde otojen kendiliğinden iyileşme performansına sahip olan, aynı zamanda geleneksel beton üretimine göre çok daha az enerji ve maliyet gerektiren ve kolay uygulanabilir bir yöntem olan jeopolimerizasyon tekniği aracılığıyla tekrar kullanarak ve/veya geri dönüştürerek tamamen atık malzemelerden elde edilmiş, EGC'nin geliştirilmesi ve bu sayede inşaat endüstrisinde tekrar kullanım ve/veya geri dönüştürme fikrinin çok daha yaygın bir hale getirilmesidir. Bunun yanı sıra üretilecek EGC malzemesinin otojen kendiliğinden iyileşmesi ve oluşacak iyileşme ürünlerinin taşıma özelliklerini nasıl etkilediği de üretilmesi planlanan yeni nesil yapı malzemeleri konusuna özgün değerler kazandırmaktadır. Tez kapsamında elde edilmesi beklenen çıktıların son yıllarda ülkemiz ve tüm dünyada insan hayatını önemli ölçüde tehdit eden küresel ısınma hızının azaltılmasına katkı sağlaması da beklenmektedir. Tezin temel amaçlarının elde edilebilmesi amacıyla aşağıda sıralanan spesifik amaçlar belirlenmiştir:

1. İnşaat ve yıkıntı atığı sahalarında ciddi miktarlarda ortaya çıkan İYA'nın içsel kısmının önemli bir bölümünü oluşturan ve tekrar kullanımı geleneksel yöntemlerle kısıtlı kalmış çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, cam ve beton atıklarının çok daha az enerji ve maliyet gerektiren ve kolay uygulanabilir bir yöntem olan jeopolimerizasyon tekniği aracılığıyla tekrar kullanarak ve/veya geri dönüştürerek tamamen İYA ve atık malzemelerden elde edilmiş, çevre dostu hamur karışımlarının elde edilmesi ve mekanik performanslarının belirlenmesi,
2. Bir numaralı amaçtan elde edilecek uygun performansa sahip hamur fazları içerisinde nihai EGC malzemelerin çoklu mikro çatlak hasarı oluşturma ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı (yüksek süneklik) özelliklerinden ödün vermeden mümkün olabilecek en büyük miktar ve tane boyutunda tamamı %100 oranında, İYA'dan elde edilmiş ince geri dönüşüm agregaların kullanılmasıyla jeopolimerik harç (matris) karışımlarının geliştirilerek mekanik performanslarının belirlenmesi ve bu sayede İYA geri dönüşüm

miktarının arttırılarak daha uzun süreli sürdürülebilirlik ve çevresel duyarlılığın tetiklenmesinin ardından geliştirilen harçların EGC üretiminde etkin bir şekilde kullanıma hazır karışım dizaynlarının hazırlanması,

3. Bir önceki spesifik amaçta belirtildiği üzere tamamen İYA ve atık malzemeler kullanılarak geliştirilecek harç karışımlarının çok yönlü ve daha yaygın kullanım amaçlı üretilmek üzere deneysel tabanlı tasarım yaklaşımı uygulanarak tasarlanmak suretiyle uygun görülen lif donatılarla güçlendirilmesi ve yeni nesil çevre dostu, farklı kompozisyonlara sahip EGC malzemelerin geliştirilmesi, ardından geliştirilen EGC malzemelerin yaygın kullanımlarının arttırılabilmesi ve gerçek saha koşulları altında nihai performanslarının belirlenebilmesi adına çok çeşitli dayanım , dayanıklılık ve işlenebilirlik testleri gerçekleştirilerek malzeme performansının ortaya konması,
4. Nihai EGC malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından incelenmesi ve performans değerlendirmelerinin yapılmasıdır.

Tez, yukarıda sıralanan spesifik amaçlar doğrultusunda aşağıda açıklandığı gibi yedi bölüm halinde yapılandırılacaktır.

Bölüm 1 giriş bölümüdür; bu bölümde araştırmanın önemi, çalışmanın amacı, hedefleri ve kapsamı ile birlikte açıklanmaktadır. Bu bölüm ayrıca tez organizasyonunu sunmaktadır. Belirlenen amaçlar kapsamında giriş bölümünü takiben, Bölüm 2 bir literatür araştırması sunmaktadır. Bu bölümde çevre dostu, sünek ve dayanıklı EGC malzemelerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Hem jeopolimer hem de ECC'nin önceki araştırma ve geliştirme çalışmalarını özetlemekte ve aynı zamanda iki malzeme teknolojisinin birleştirilmesindeki teknik zorlukları sunmaktadır. Bu bölüm aynı zamanda EGC'nin tasarımı ve kendiliğinden iyileşme özelliklerinin performansı ile ilgili daha önce yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla ilgili bir literatür araştırması sunmaktadır. Bu bölümün son kısmı geri dönüşüm agregası ile ilgili daha önce gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme

alışmalarıyla ilgili bir literatür araştırması sunmaktadır. Bölüm 3 deneysel programdır. Bu bölümde malzeme özellikleri, numunelere uygulanan testler ve kendiliğinden iyileşmenin taşınma özellikleri bakımından değerlendirme yöntemlerinden bahsedilmektedir. Bölüm 4’te EGC malzemelerin geliştirilmesi adına jeopolimer bağlayıcılı hamur karışımlar geliştirilmiş ardından harç karışımlar geliştirilerek mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra seçilen harç karışımlar üzerinden deneysel tabanlı malzeme tasarım yaklaşımı uyarınca uygun matris, lif ve matris-lif arayüz özelliklerinin belirlenmesinin ardından bu üç fazın bir sinerji içerisinde birbirleriyle uyumlu şekilde çalışmaları sağlanarak farklı kompozisyonlara sahip EGC malzemeleri geliştirilmiştir. Bölüm 5’te, Bölüm 4’te geliştirilen farklı kompozisyonlara sahip EGC malzemelerinin detaylı mekanik performansları ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Bölüm 6’da, Bölüm 4’te geliştirilen ve Bölüm 5’te detaylı mekanik ve reolojik özellikleri incelenen farklı kompozisyonlara sahip EGC malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansı incelenmiştir. Mikro çatlaklar oluşturmak için numunelere önyüklemeye uygulanmış ve daha sonra ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılan EGC karışımlarının taşınma özellikleri bakımından kendiliğinden iyileşme performansı değerlendirilmiştir. Kendiliğinden iyileşme ürünleri çeşitli mikroyapısal ve kimyasal analizlerle gözlemlenmiştir. Bölüm 7 sonuç bölümüdür. Bu bölümde deneysel çalışmaların sonuçları sunulmakta ve tartışılmaktadır. Nihai EGC karışımlarının mekanik ve reolojik özellikleri ve kendiliğinden iyileşme performansından sorumlu ana mekanizmalar, onu etkileyen faktörler ve öneriler bu bölümde sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Jeopolimer ve Tasarlanmış Çimento Bağlayıcı Kompozitlerin Gözden Geçirilmesi

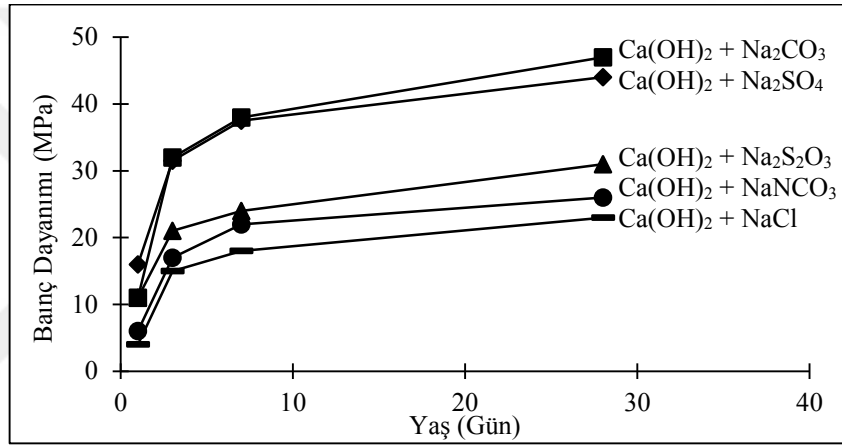
Bu bölüm jeopolimer ve ECC olmak üzere iki malzeme teknolojisi hakkında literatür araştırması sunmaktadır. Jeopolimer bağlayıcıların gelişim tarihi, kimyası, bileşen malzemeleri ve İYA bazlı jeopolimer bağlayıcı malzemelerle ilgili daha önce gerçekleştirilen çalışmalar kısaca sunulmuştur. ECC malzemelerinin gelişim tarihi, mikromekanik tabanlı tasarım kriterleri değerlendirilerek uygulama ve malzeme performansı kısaca gözden geçirilmiştir. Bölüm 1'de belirtildiği gibi çevre dostu ECC'lerin geliştirilmesi için daha sürdürülebilir bir yaklaşım, ECC karışım bileşenindeki portland çimentosunu bir jeopolimer bağlayıcı ile tamamen değiştirmektir. Bu nedenle bu bölümün ilerleyen kısmında iki malzeme teknolojisinin birleştirildiği ve bu yüksek lisans araştırmasının ana odaklarından biri olan EGC'lerin geliştirilmesi hakkında daha önce gerçekleştirilen çalışmalar gözden geçirilerek literatür araştırması sunulmuştur. Daha sonra gerçekleştirilen literatür araştırmasına dayanarak, iki teknolojinin birleştirilmesindeki zorluklar göz önünde bulundurularak çözülmemiş sorunlar ana hatlarıyla verilmiştir.

2.1.1. Jeopolimer

2.1.1.1. Gelişim Tarihi

Jeopolimerler veya alkali aktif bağlayıcılar, yüksek oranda alüminosilikat içeren kaynak malzemenin, alkali bir çözelti ile reaksiyona sokulmasıyla elde edilen malzemelerdir. Jeopolimer bağlayıcı sistemler hakkındaki ilk çalışmalar 1900'lerin başlarına dayanmaktadır: Alman kimyager Kuehl, 1908 yılında ABD'de patentli bir bağlayıcı oluşturmak için metalurjik cüruf tozunun alkali çözeltilerle reaksiyonları üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir (Kuehl, 1908). Ardından Chassevent 1937 yılında cürufun alkali çözeltilerle reaktivitesini araştırmıştır (Chassevent, 1937). Bu

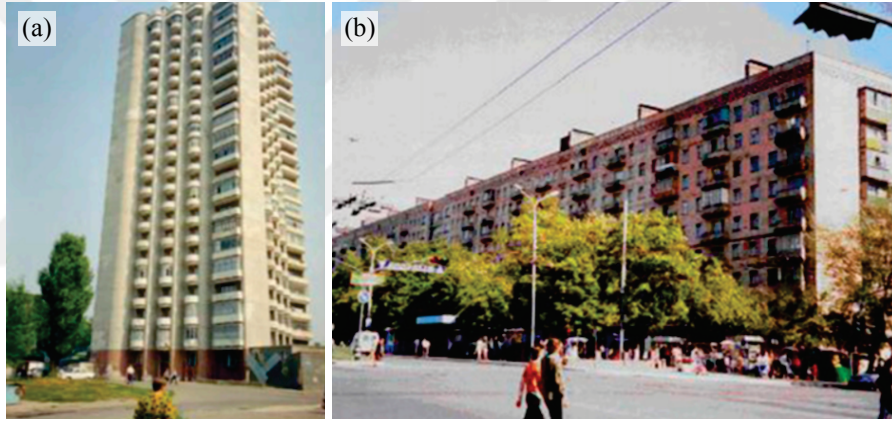
tür bağlayıcıların inşaat amaçlı ayrıntılı bilimsel temeli Purdon tarafından 1940 yılında Belçika'da atılmıştır (Purdon, 1940). Purdon çimentosuz bağlayıcı malzeme geliştirme üzerine yaptığı kapsamlı laboratuvar çalışmasında, alkali aktif cürufun portland çimentosu betonu ile karşılaştırılabilir seviyede iyi mukavemet, orta derecede büzülme ve düşük su geçirimsiliği sağlayabildiğini göstermiştir (Purdon, 1940). Alkali aktif bağlayıcılar üzerine araştırmalar Batı dünyasında 1980'lere kadar sınırlı kalmıştır (Roy, 1999). Batı dünyasında o yıllarda, araştırmacıların birincil odak noktası portland çimentosu betonunun üretimi ve optimizasyonu olarak görülmektedir (Provis ve diğerleri, 2014).



Şekil 2.1. Purdon'nun 1940 yılında çeşitli aktivatör kombinasyonlarını kullanarak geliştirdiği alkali aktif cürufun basınç dayanımı sonuçları (Purdon, 1940)

Bu arada 1950'lerin ortalarında Ukraynalı bilim adamı ve mühendis Glukhovsky, Roma ve Mısır'daki eski beton yapıları incelemiş, üstün dayanıklılığa sahip eski çimentoların tipik olarak kalsiyum (Ca) bakımından düşük ve alkaliler, alüminosilikat (Al ve Si) bakımından zengin olduğunu keşfetmiştir (Glukhovsky, 1959). Araştırmaya dayanarak Glukhovsky, alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonu için genel bir mekanizma önererek bu tür bağlayıcılar için “soil cements” bu bağlayıcılardan üretilen betona ise “soil silicates” adı verilen alkali alüminosilikat bağlayıcılı sistemler geliştirmiştir (Glukhovsky, 1959; Glukhovsky, 1994). Bu bağlayıcıları, ham madde olarak kullanılan malzemelerin bileşimine dayanarak iki gruba ayırmıştır. Birinci grup

alkali bağlayıcı sistemler ve ikinci grup toprak alkali bağlayıcı sistemlerdir. Başlangıçta birçok araştırmacı Glukhovsky'nin ikinci bağlayıcı grubuna (kalsiyum içeren) odaklanmıştır. Ancak son zamanlarda Glukhovsky'nin ilk bağlayıcı grubuna (düşük miktarda kalsiyum içeren veya kalsiyum içermeyen) yapılan araştırmalarda büyüme olmuştur (Shi ve diğerleri, 2011; Shi ve diğerleri, 2012). Bu tür malzemeler üzerine yapılan aktif araştırmalar bu tarihten sonra hız kazanmaya başlamıştır. Glukhovsky'nin buluşu ayrıca çok çeşitli uygulamalarda yer bulmuştur. Ukrayna'daki araştırma enstitüsü, apartman binaları, su boruları ve sulama kanalları yapımında alkali aktif cüruf kullanılmıştır (Duxson ve Van Deventer, 2009). Alkali aktif cüruf kullanılarak inşa edilen yapılarının yüksek dayanıklılığı çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Xu ve diğerleri, 2008; Deja, 2002).



Şekil 2.2. Alkali aktif bağlayıcı kullanılarak yapılmış (a) 20 katlı bina (Lipetsk, Rusya Federasyonu, 1987-1989) (b) Alkali aktif bağlayıcı kullanılarak yapılmış 9 katlı bina (Mariupol, Ukrayna, 1960) (Palomo ve diğerleri, 2015)

Son yıllarda, alkali aktif bağlayıcılar için ana itici güç, ekonomik açıdan ziyade teknik avantajlara ve çevresel kaygılara kaymıştır. 1970'lerin sonunda, Davidovits, kalsine kaolin kili olan metakaolin bazlı bir dizi alkali aktif bağlayıcı geliştirmiştir. Geliştirdiği alüminosilikat bazlı ürünün patentini alarak ürünleri için "jeopolimer" terimini üretmiştir. Ayrıca ürünleri için "Pyrament, Geopolycem and Geopolymite" isimli ticari bir marka oluşturmuştur (Davidovits, 1994). Malzeme teknolojisi başlangıçta

yangına dayanıklı uygulamalar için geliştirilmiş ancak kısa bir süre sonra, yüksek erken dayanımı ABD Ordusunun askeri uygulamalar için dikkatini çekmiştir (Malone ve diğerleri, 1985). 1980'lerden itibaren, yüksek erken dayanım kazanımı, yangına dayanıklılık, kimyasal ve boyutsal kararlılık ve düşük geçirimsizlik gibi teknik avantajları nedeniyle alkali aktif bağlayıcılar üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları dünya çapında genişlemeye başlamıştır. Bununla birlikte, metakaolin esaslı jeopolimerlerin birincil kullanımı bugüne kadar küçük ölçekli inşaat uygulamalarıyla sınırlı kalmıştır. Çünkü metakaolinin büyük miktarlarda üretilmesi pahalıdır ve kalsinasyon işlemi nedeniyle yüksek enerji gereksinimi vardır. Daha sonra, 1993 yılında kömürle çalışan elektrik santrallerinden endüstriyel yan ürün olarak açığa çıkan uçucu kül kullanılarak alkali aktif bağlayıcı malzemeler üzerine ilk makale yayınlanmıştır (Wastiels ve diğerleri, 1994). O yıllardan beri, uçucu kül bazlı jeopolimerlere yönelik araştırmalar, çevresel faydaları nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır. Özellikle, uçucu külden elde edilen jeopolimerlerin çimentolu bağlayıcılardan çok daha düşük karbondioksit salınımı birçok çalışmada vurgulanmıştır (Duxson ve diğerleri, 2007; McLellan ve diğerleri, 2011). Ayrıca uçucu kül bazlı jeopolimerlerin uçucu külün geri dönüşüm oranını arttıracakları düşünülmektedir. Dünya çapında büyük miktarda uçucu kül üretilirken, bunların çoğu sadece düzenli depolama alanlarına atılmaktadır. Örneğin, ülkemizde 2008 yılında Türkiye İstatistik Kurumunun açıkladığı verilere göre 25,5 milyon ton mineral atık (kül, uçucu kül, cüruf, alçı) üretilmiş ancak toplam atığın yaklaşık %20'si ancak kullanılabilmiştir (Tangüler ve diğerleri, 2015). Dünya uçucu kül üretiminin %9 kullanımla 600 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir (Kayali ve diğerleri, 2008). Uçucu külün bertaraf edilmesi sorunu, çimentolu bağlayıcıların en büyük kullanıcıları olan ve küresel karbondioksit salınımında büyük payı olan ABD, Çin ve Hindistan'da büyük öneme sahiptir. Küresel ısınma, doğal kaynakların tükenmesi ve atıkların yok edilmesi gibi dünya çapındaki çevresel kaygılardan hareketle, büyük ölçekli inşaat uygulamaları için uçucu kül bazlı jeopolimerlerin kullanımı artık hem akademik hem de endüstriyel araştırma topluluklarında önemli bir konu haline gelmiştir (Duxson ve diğerleri, 2007). Uçucu kül bazlı jeopolimerlerin geliştirilmesi, jeopolimer teknolojisinde farklı malzemeleri kullanmaya yönelik başka bir araştırma dalgasını teşvik etmiş ve birkaç yıl sonra metakaolinin alkali aktivasyonu ile ilgili dört önemli makale yayınlanmıştır (Rahier ve diğerleri, 1996a; Rahier ve diğerleri, 1996b; Rahier

ve diğerleri, 1997; Rahier ve diğerleri, 2003). Sonuç olarak jeopolimer üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda akademik ve endüstriyel ortamlarda önemli miktarda ilgi ve popülerlik kazanmıştır. Teorik olarak amorf alüminosilikat kaynaklı malzemeler jeopolimer üretimi için bağlayıcı toz malzeme olarak kullanılabilir. Bugüne kadar jeopolimer üzerine yapılan mevcut araştırmaların çoğu, birincil alüminosilikat kaynağı olarak cüruf, uçucu kül gibi endüstriyel atıklara ve metakaolin gibi kalsine edilmiş kil bazlı malzemelere odaklanmıştır. Diğer atıkların ve özellikle İYA'ların jeopolimerizasyonu hala büyük bir sorun olmaya devam etmektedir. Bu nedenle İYA'larda bulunan inorganik alüminosilikat malzemelerin jeopolimer üretiminde bağlayıcı toz malzeme olarak yeniden kullanılması önemli bir seçenek haline gelmiştir (Torres-Carrasco ve Puertas, 2015; Komnitsas ve diğerleri, 2015). Son yıllarda çatı kiremiti tozu, tuğla tozu, cam tozu, beton tozu gibi İYA'ların jeopolimer üretimi için bağlayıcı toz malzeme olarak kullanılabilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Allahverdi ve Najafi Kani, 2009; Ahmari ve diğerleri, 2012; Reig ve diğerleri, 2013; Komnitsas ve diğerleri, 2015; Zaharaki ve diğerleri, 2016; Robayo-Salazar ve diğerleri, 2017a; Robayo-Salazar ve diğerleri, 2017b).

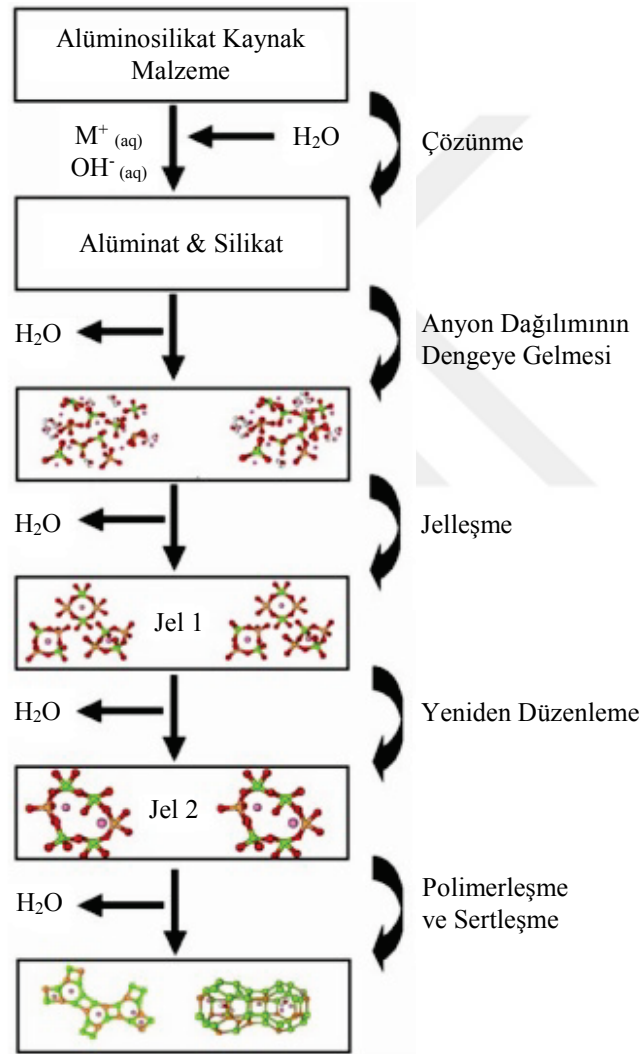
2.1.1.2. Jeopolimer Bağlayıcı Malzemelerin Kimyası

Jeopolimer, mekanik performans ve dayanıklılık açısından portland çimentosuna benzer ve portland çimentosundan belirgin şekilde daha düşük karbondioksit salınımına sahip olan, alüminosilikat kaynak malzemenin alkali aktivasyonu ile oluşturulan bir bağlayıcıdır. Kimyasal olarak jeopolimerler portland çimentosundan farklı bir sisteme dayanmaktadır. Portland çimentosu, öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonuna dayanan bir hidrolik bağlayıcı iken, jeopolimer, alkali aktivasyon ile alüminosilikatların polikondenzasyonuna dayanır ve genellikle kalsiyum içermez ya da çok az kalsiyum içerir. Her biri benzersiz özelliklere sahip olan çeşitli alüminosilikat kaynaklardan yapılabilen birçok farklı jeopolimer türü vardır. Portland çimentosuna benzer şekilde kullanılan malzemeler, sentez koşulları, kür koşulları gibi birçok parametre sonuçta meydana gelen reaksiyon ürünleri üzerinde etkili olabilir, bu da jeopolimerin taze ve sertleştirilmiş özelliklerini etkilemektedir.

Jeopolimer bağlayıcılar, yaygın olarak alkali aktif bağlayıcılar olarak bilinen bir bağlayıcı sınıfına girmektedir. Alkali aktif bağlayıcılar kullanılan malzemelere ve oluşan reaksiyon fazlarına bağlı olarak bileşim açısından iki ana kategoriye ayrılabilir (Palomo ve diğerleri, 1999). Birincisi, silika ve kalsiyum bakımından zengin malzemelerin (portland çimentosu, cüruf veya C sınıfı uçucu kül gibi) hafif alkali çözeltilerle aktivasyonunu içermektedir. İkincisi, silika ve alümina açısından zengin malzemelerin (metakaolin veya F sınıfı uçucu kül gibi) güçlü alkali çözeltilerle aktivasyonunu içermektedir. Literatürde, tam olarak bir jeopolimeri neyin oluşturduğuna dair oldukça fazla tartışma vardır, birçok araştırmacı kalsiyum açısından zengin malzemelerin jeopolimer olarak adlandırılmaması gerektiğine inanmaktadır (Fletcher ve diğerleri, 2005). Örneğin, cüruf çok fazla kalsiyum içerdiğinden, ortaya çıkan bağlayıcı, portland çimentosuna benzer bir kalsiyum silikat sistemidir ve bu nedenle bu tanım altında bir jeopolimer değildir (Provis ve Van Deventer, 2009). Bu tez kapsamında, jeopolimer terimi, kalsiyum içeriğinin kesin olarak silika ve alümina birleşiminden daha az olduğu ve aktivasyonun yüksek alkali çözeltilerle gerçekleştirildiği, alüminosilikat malzemenin alkali aktivasyonuna dayanan bir bağlayıcıya atıfta bulunacaktır.

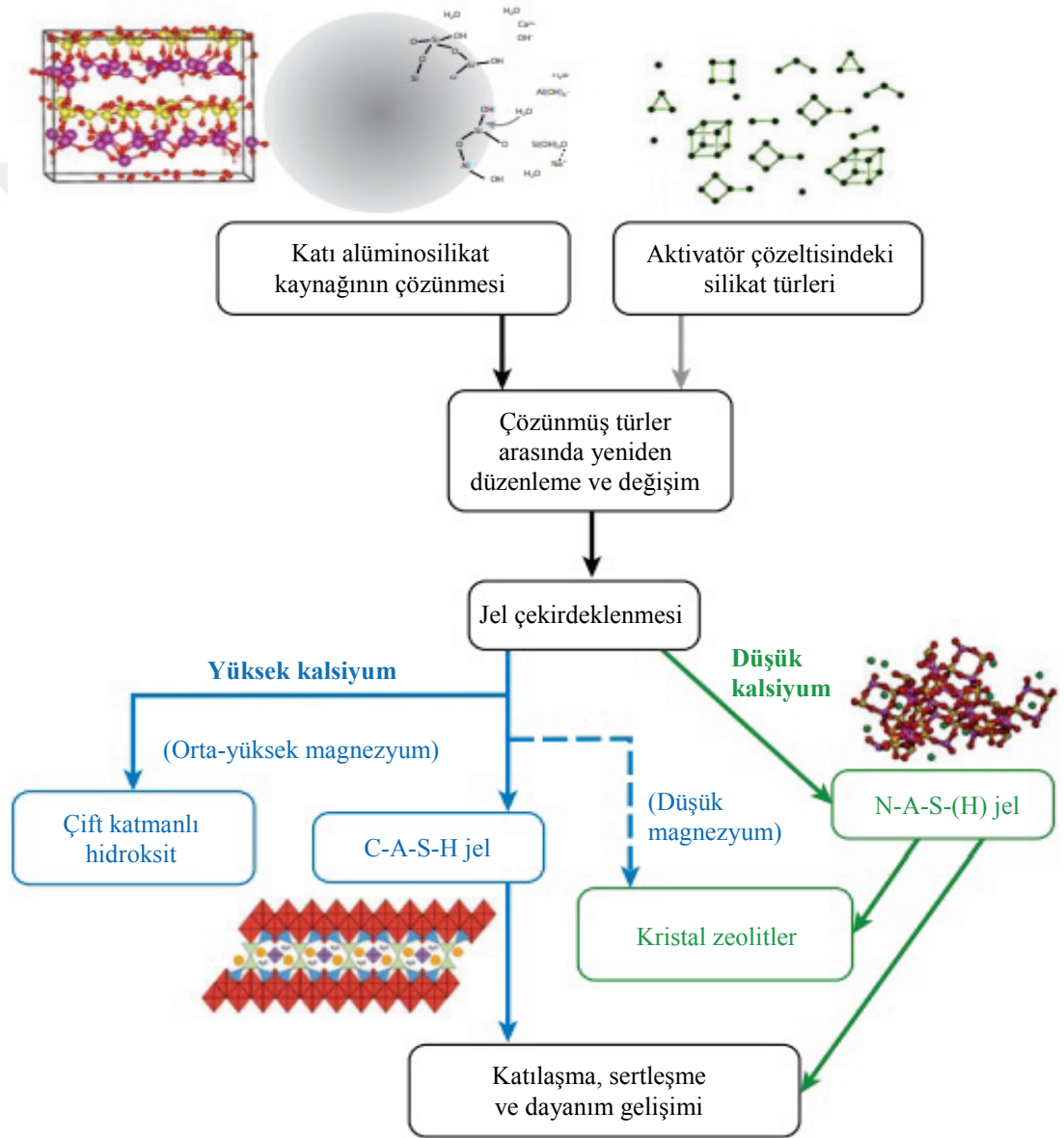
Ekonomik, teknik ve çevresel itici güçlerin desteğiyle, alkali aktif bağlayıcı malzemeler 1960'lardan beri aktif olarak incelenmiştir. Araştırma konuları arasında, alüminosilikat kaynağının alkali aktivasyonunda, taze özelliklerinin davranışı ve işlenebilirliğinin ayarlanması ve sertleşmiş matrisin kimyasal yapısı, mikroyapısı ve makroskopik özellikleri yer almaktadır. Ancak gerçekleştirilen çalışmalar bunlarla sınırlı değildir. Reaksiyon mekanizmaları ve süreçleri ile ilgili çalışmalar, jeopolimerlerin malzeme tasarımı için büyük öneme sahiptir. Glukhovsky, alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonu için genel bir reaksiyon mekanizmasını öneren ilk kişidir (Glukhovsky, 1959). Glukhovsky tarafından önerilen mekanizma “jeopolimerizasyon” kimyası üzerine sonraki çalışmalar için bir temel oluşturmuştur. Glukhovsky tarafından geliştirilen ilk kavramsal reaksiyon modeli reaksiyon mekanizmaları, yapısı ve bileşimi hakkında yeni bilgiler ortaya çıktıkça birçok araştırmacı tarafından genişletilmiş ve geliştirilmiştir (Davidovits, 1991; Rahier ve diğerleri, 1996a; Rahier ve diğerleri, 1996b; Rahier ve diğerleri, 1997; Xu ve Van Deventer, 2000; Palomo ve diğerleri, 2004; Fernández-Jiménez ve diğerleri, 2005;

Provis ve Van Deventer, 2007). Bu çalışmalara dayanarak, Duxson ve diğerleri (2007), jeopolimerizasyon süreçlerini ve reaksiyon mekanizmasını oldukça basitleştirilmiş şekliyle şematik olarak göstermiştir (Şekil 2.3). Gösterilen reaksiyon mekanizması, çözünme, yeniden düzenleme, sertleşme işlemlerini ana hatlarıyla açıklamaktadır. Doğrusal olarak gösterilmesine rağmen bu süreçler tamamen doğrusal olarak ilerlemez, aksine eşzamanlı olarak meydana gelen birleşik reaksiyonlar olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 2.3. Düşük kalsiyum içeren alkali aktif sistemler için kavramsal jeopolimerizasyon modeli (Duxson ve diğerleri, 2007)

Önerilen partikül-jel dönüşüm mekanizması daha sonra gerçekleştirilen çalışmalarda doğrulanmıştır (Hajimohammadi ve diğerleri, 2010, 2011; White ve diğerleri, 2012; White ve diğerleri, 2013). Daha yakın zamanlarda, Provis ve Bernal (2015), bu modellemenin alkali aktif cüruf gibi kalsiyum açısından zengin alkali aktif sistemler için uygun olmadığını belirtmişlerdir. Bu kapsamda Provis ve Bernal (2014), daha ayrıntılı bir kavramsal diyagramı şematik olarak göstermiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Yüksek kalsiyum içeren alkali aktif sistemler için daha ayrıntılı kavramsal model (Provis ve Bernal, 2014)

2.1.1.3. Jeopolimer Bağlayıcı Malzemelerde İnşaat Yıkıntı Atıklarının Kullanımı

Son yıllarda, daha önce belirtildiği gibi İYA'nın jeopolimerizasyon yöntemlerinde kullanılması dünya çapında araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. İYA'ların çeşitli endüstriyel yan ürünlere benzer şekilde yüksek silika ve alümina içeriğine sahip olmaları, bu malzemelerin inşaat sektöründe yeniden kullanılabilirliklerini mümkün hale getirmektedir. Son zamanlarda literatürde çeşitli İYA'lar sürdürülebilir jeopolimer esaslı ürünlerde başarıyla kullanılabilmiş olsa da elde edilen performanslar farklılık göstermiştir. Bu bölümde temel olarak, İYA esaslı jeopolimerler üzerine daha önce gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları sunulmuştur (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde İYA esaslı malzemelerin kullanımının uygulanabilirliğine dair gerçekleştirilen çalışmalar

Kaynak	İYA esaslı jeopolimer bileşenleri	Kür koşulları	İncelenen parametreler	Basınç dayanımı aralığı	Başlıca sonuçlar
Allahverdi ve Najafi Kani (2009)	Atık tuğla, atık beton, NaOH çözeltisi, sıvı sodyum silikat.	%95 bağıl nemde oda sıcaklığında 24 saat sonrasında suda bekletilmiş.	Basınç dayanımı, priz süresi, FTIR ve SEM analizleri.	10-40 MPa, hamur dayanımı.	Jeopolimerizasyon sürecinde atık tuğla, atık betona kıyasla daha iyi reaksiyon göstermiştir. Na ₂ O konsantrasyonları priz bitiş süreleri üzerinde son derece etkili olmuştur.
Ahmari ve diğerleri (2012)	Atık beton, F-sınıfı uçucu kül, NaOH çözeltisi (%98 saflıkta), sıvı sodyum silikat.	24 saat boyunca oda sıcaklığında ve sonrasında plastik torbalarda 6 gün.	Basınç dayanımı, XRD, SEM/EDX ve FTIR analizleri.	6-34 MPa, hamur dayanımı.	Atık beton kullanımının kimyasal kompozisyon bakımından basınç dayanımını arttırmada bir eşiğinin olduğu görülmüştür. Daha yüksek NaOH konsantrasyonlarında, daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.
(Khater, 2012)	Atık beton, çimento esaslı malzemeler bulunduran yıkılmış duvar, sönmüş kireç, metakaolin, NaOH çözeltisi (%99 saflıkta), sıvı sodyum silikat.	1. Oda sıcaklığında çeşme suyu içersinde, 2. 40 °C'de %100 bağıl nem, 3. oda sıcaklığında su küründen sonra 80°C sıcaklıkta 24 saat kuruma.	Basınç dayanımı, XRD, SEM ve FTIR analizleri.	1,5-27 MPa, hamur dayanımı.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ oranları için 3,0-3,8 aralığında daha iyi mekanik özellikler elde edildiği bildirilmiştir. Sönmüş kirecin alkali çözeltideki alüminosilikat esaslı malzemelerin çözünabilirliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Farklı kür koşulları farklı performanslar sergilemiştir.
Komnitsas ve diğerleri (2015)	Atık beton, tuğla, kiremit, deniz tortulları, KOH çözeltisi, sıvı sodyum silikat.	-	Basınç dayanımı, FTIR ve SEM analizleri.	3-55 MPa, hamur dayanımı.	Deniz tortullarının tuğlalar/kiremitlerle kısmi olarak kullanılmalarının ham maddelerde yeterli Si/Al bulunması sebebiyle güçlü jeopolimerik bağ oluşumu için kullanılabileceği belirtilmiştir.

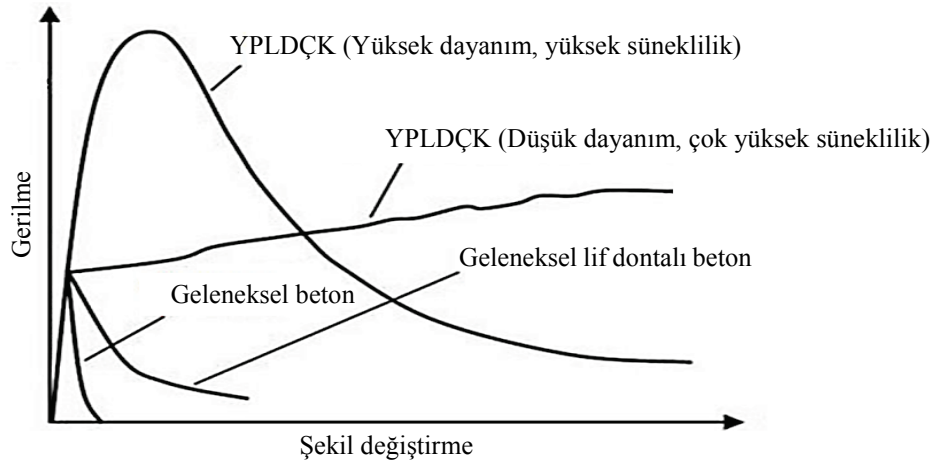
Çizelge 2.1. (devam)

Kaynak	İYA esaslı jeopolimer bileşenleri	Kür koşulları	İncelenen parametreler	Basınç dayanımı aralığı	Başlıca sonuçlar
Zawrah ve diğerleri (2016)	Atık ateş tuğlası, granüle yüksek fırın cürufu, sıvı sodyum silikat, NaOH çözeltisi (%99 saflıkta).	24 saat polietilen levhayla, ardından 90 gün sonuna kadar oda sıcaklığında.	Basınç dayanımı, görünür porozite, yoğunluk, su emme, XRD, SEM/EDX ve FTIR analizleri.	3-83 MPa, hamur dayanımı.	Tam jeopolimerizasyon işlemi için çevresel şartlarda kür uygun bulunmamıştır. Granüle yüksek fırın cürufunun kil tuğla esaslı jeopolimere eklenmesi daha iyi fiziko-mekanik özelliklerin elde edilmesine sebep olmaktadır.
Rovnaník ve diğerleri (2016)	Uçucu kül, tuğla tozu, NaOH çözeltisi, sıvı sodyum silikat.	21±2°C sıcaklığı ile %50±5 bağıl nemde.	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk, SEM analizleri.	5-65 MPa, hamur dayanımı.	%50-%50 uçucu kül-tuğla tozu, harmanlanmış jeopolimerler için optimum basınç dayanımını sergilemiştir. Ayrıca tuğla tozu esaslı jeopolimer, uçucu küllü (tek bileşenli) jeopolimere kıyasla daha az kompakt bir yapı sergilemiştir.
Vásquez ve diğerleri (2016)	Atık beton, metakaolin, portland çimentosu, NaOH çözeltisi, sıvı sodyum silikat.	Polietilen filmde muhafaza edilerek: 1. oda sıcaklığı, 2. 70°C sıcaklıkta 24 saat, ardından %90 bağıl nemde kür kabininde.	Basınç dayanımı, XRD, SEM ve FTIR analizleri.	3-55 MPa, hamur dayanımı.	Na ₂ O'nun yüzdesi, basınç dayanımı sonuçlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Metakaolin ve portland çimentosunun sisteme eklenmesinin, beton atıklarındaki kristal fazların daha iyi çözünmesini sağladığı ve sonuç olarak gelişmiş jeopolimerizasyon sürecine sebep olduğu belirtilmiştir.

2.1.2. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler

2.1.2.1. Gelişim Tarihi

Alkalilerle aktif edilen bağlayıcılar gibi geleneksel lif donatılı betonun (LDB) modern gelişimi de 1960'ların başında başlamıştır: Romualdi ve Baston (1963) ve Romualdi ve Mandel (1964), rastgele yönlendirilmiş çelik tel eklenerek güçlendirilmiş betonun çekme mukavemetinin geliştiğini gösteren dönüm noktası sayılabilecek çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmaları, geleneksel lif donatılı betonun yenilikçi bir inşaat malzemesi olduğunu göstererek hem akademik hem de endüstriyel topluluklarda büyük ilgi görmüştür (Zollo, 1997). Lif donatılı betonun araştırılması ve geliştirilmesi o zamandan bu yana hızlı bir gelişme göstermiştir. Bu gelişme son yıllarda çeşitli liflerin (cam, karbon, sentetik, doğal lifler ve bunların kombinasyonları) beton içerisine eklenerek çekme mukavemetini iyileştirmeye yönelik birçok çalışmayla devam etmiştir (Li, 2008). Geleneksel beton çekme dayanımı düşük kırılğan (gevrek) yapıya sahip bir yapı malzemesidir. Betonun kırılğan (gevrek) yapısını iyileştirmek için birçok araştırma yapılmıştır. Lifler ilk olarak betonun düşük çekme mukavemetini arttırmak için eklenmiştir (Li, 2002). Liflerin tokluğu - kopmadan önce emilen enerji - arttırma potansiyeli daha sonraki zamanlarda araştırmacılar tarafından fark edilmiştir. 1970'lerin başında Aveston ve diğerleri (1971), çatlak davranışını kontrol etmek için sürekli hizalanmış lifler ile yaptığı çalışmadan beri, betonda yüksek süneklik elde etmeye yönelik önemli araştırma ve geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. (Aveston, 1971; Aveston ve diğerleri, 1973; Li, 1998; Naaman, 2007). Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Bağlayıcılı Kompoziti (YPLDÇK) LDB'den, yüksek sünekliği ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ayırmaktadır. Geleneksel beton Şekil 2.5'te gösterildiği gibi çekme yükleri altında ilk çatlak oluşumundan sonra gevrek bir biçimde kırılmaktadır. LDB ise Şekil 2.5'te gösterildiği gibi çekme yükleri altında ilk çatlak oluşumundan sonra yük taşıma kapasitesi düşerek şekil değiştirme yumuşaması davranışı göstermektedir. YPLDÇK ise tipik olarak ilk çatlak oluşumuyla birlikte lifler fazladan yükü matrise transfer edebilmektedir. Yükün artmasıyla birlikte 100 µm'dan dar çatlak genişliğinde çoklu mikro çatlakların ardışık oluşumunun meydana geldiği yerde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemektedir.



Şekil 2.5. Eksenel çekme yükleri altında kırılğan (gevrek) beton, şekil değiştirme yumuşaması davranışı sergileyen LDB ve şekil değişime sertleşmesi davranışı sergileyen YPLDÇK malzemelerin davranışları

Sonuç olarak Şekil 2.5'te gösterildiği gibi YPLDÇK malzemesi, geleneksel beton ve diğer geleneksel lif donatılı betonlara kıyasla normalden daha yüksek şekil değiştirme kapasitesi sağlamaktadır. Bu tür yüksek süneklik ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ilk olarak sürekli, hizalanmış lifler ve/veya yüksek lif içeriği (toplam kompozit hacminin %10-%20'si) kullanılarak elde edilmiştir. Bu tip malzemeler çoğunlukla büyük ölçekli ve yerinde döküme uygun olmayan, özel işlem metotları gerektiren malzemelerdir (Li, 1998). Bu nedenle başlangıçta YPLDÇK, geliştirme sürecinin ilk zamanlarında laboratuvar çalışmaları ve yapısal olmayan uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Daha sonra, kısa, süreksiz, rastgele yönlendirilmiş lif donatılı kompozitlerin teorik temeli oluşturulmuştur (Aveston ve diğerleri, 1973; Naaman, 1973 ve diğerleri; Naaman ve Shar 1976; Gopalaratnam ve Shah, 1987; Wang ve Li, 1988; Wang ve diğerleri, 1989). Sonuç olarak, ekonomik açıdan uygulanabilir, yapısal uygulamalarda sahada dökülebilir YPLDÇK malzemeleri 1990'larda ortaya çıkmıştır (Li ve diğerleri, 1991; Li ve Wu, 1992; Li ve Leung, 1992). Kısa lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerin elde edilebilmesi için çok ölçekli bir modelleme (matris, lif, matris-lif arayüzü, lif hacimsel oranı ve lif geometrisi gibi parametreler) geliştirilmiştir (Li ve diğerleri, 1991; Li ve Wu, 1992; Li ve Leung, 1992). Geliştirilen modelleme sonucunda, YPLDÇK'lerin çok özel ve yeni bir türü olan ve patentli ismi Engineered

Cementitious Composites (ECC) olan şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyen tasarlanmış çimento bağlayıcılı sünek kompozit geliştirilmiştir (Li, 1993). ECC, mikro çatlakların oluşmasıyla birlikte yüksek süneklik göstermekte ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemektedir. ECC'nin bu özelliği sünek metalin davranışına benzemektedir. ECC %1,5 ile %5 arasında değişen lif hacmi kullanılarak farklı dayanımlarda üretilebilmektedir. ECC üretiminde hacimsel lif oranının %2 kullanımı ile tek eksenli çekme yüklemesi altında çekme-birim şekil değiştirme deformasyonu %3 ile %5 arasında kalmaktadır. Bu değer LDB'nin yaklaşık olarak 300 katıdır. ECC çevresel koşullar altında daha dayanıklıdır ve mekanik yükler altında bile diğer beton türlerine göre çok daha az geçirgendir (Şahmaran ve Li, 2007; Şahmaran ve diğerleri, 2007). Ek olarak ECC'nin eksenel çekme yükleri altında 100 µm'dan daha az çatlak genişlikleri göstermesi, kendiliğinden iyileşme performansı açısından onu benzersiz bir malzeme yapmaktadır. ECC'nin bu benzersiz özellikleri araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür. ECC, 1990'lardan itibaren yoğun bir şekilde incelenmeye başlanmıştır. Araştırmalar sırasında, kendini kontrol eden mikro çatlakların üstün dayanıklılık ve esneklikte önemli bir rol oynadığı keşfedilmiştir. Geleneksel lif donatılı betonlarda çatlak genişliği 500-750 µm civarlarında ve bazen yük altında 1 mm olsa da ECC malzemelerinde, çatlak genişliği genel olarak 100 µm'dan daha az olacak şekilde oluşmaktadır, bu da zararlı maddelerin çatlaklardan hızla nüfuz etmesini önleyecek kadar sızdırdır. Ek olarak yüksek bir yük altında bile, kompozitin hasarı lokalize değildir. Yük, yapısal bütünlüğü koruyan çoklu mikro çatlaklara dağıtılır. Böylelikle, kompozitin mekanik özelliklerindeki bozulma, çatlamadan sonra bile sınırlı kalmaktadır.

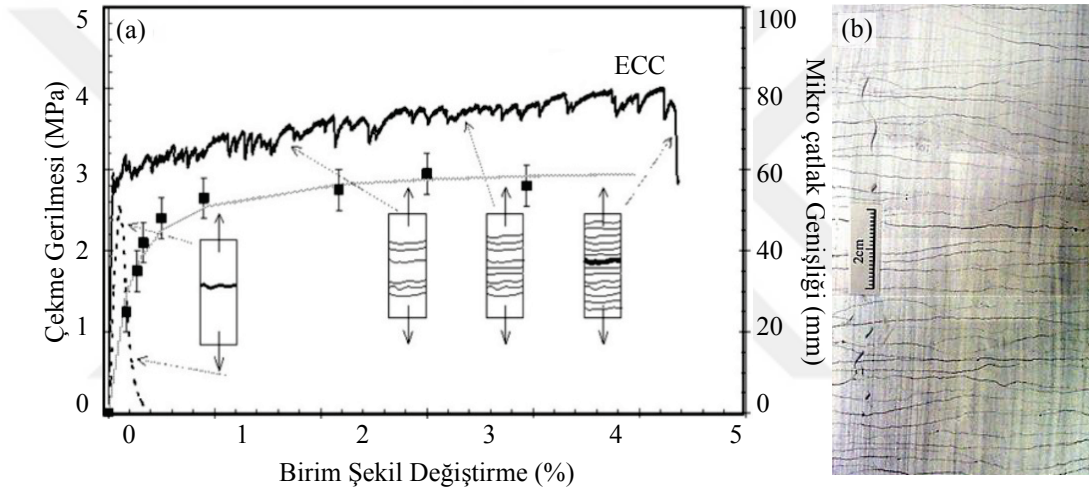
Çizelge 2.2. ECC malzemesinin tipik karışım oranları

Çimento	Su	Kum	Uçucu Kül	SA	Lif
1,00	0,58	0,80	1,20	0,013	2,00

SA= süperakışkanlaştırıcı. Lif hariç tüm bileşenlerin ağırlıkça oranları.

ECC'nin karışım tasarımında bileşenler geleneksel LDB'ye benzerdir. Bununla birlikte ECC'de mikro çatlakların oluşmasıyla birlikte göstermiş olduğu şekil

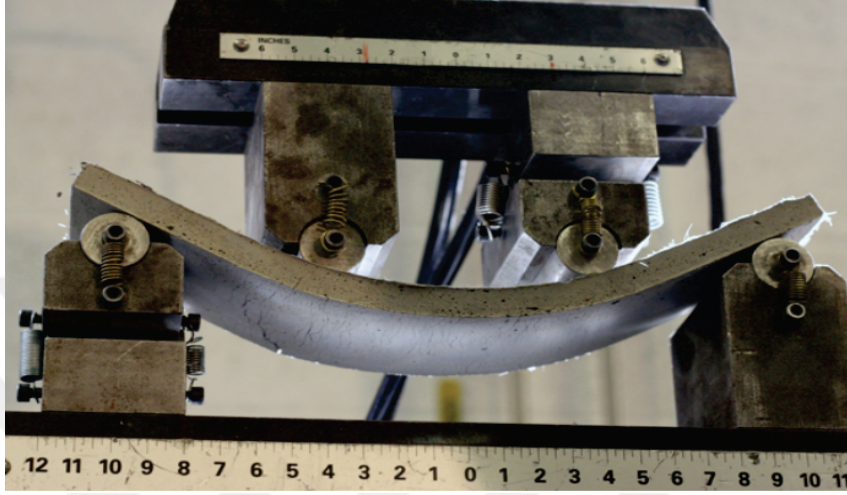
değiştirme sertleşmesi davranışı, bileşenlerin (çimento, lif ve kum) arasındaki arayüz özelliklerinin kontrolü ve mikromekanik tasarım yoluyla elde edilmektedir (Mehta, 1994; Morgan, 1996). Matrisin özellikleri karışım oranları sayesinde belirlenmektedir. Kullanılacak lifin dayanım, elastik modül ve en/boy oranı gibi özellikleri ECC’de kullanım amacına göre uyarlanmaktadır. Matris-lif arayüz özellikleri ECC’de kullanılmak üzere optimize edilmiştir. Polivinil alkol lifler kullanılarak üretilen ECC’nin geleneksel karışım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Hacimsel olarak %2 oranında polivinil alkol lif kullanılarak üretilen ECC’nin tipik eksenel çekme-birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.6’da gösterilmektedir (Heiman ve Koerstz, 1991).



Şekil 2.6. ECC malzemesinin (a) tipik çekme-şekil değiştirme eğrisi ve (b) ortalama çatlak açıklığı gelişimi (Heiman ve Koerstz, 1991)

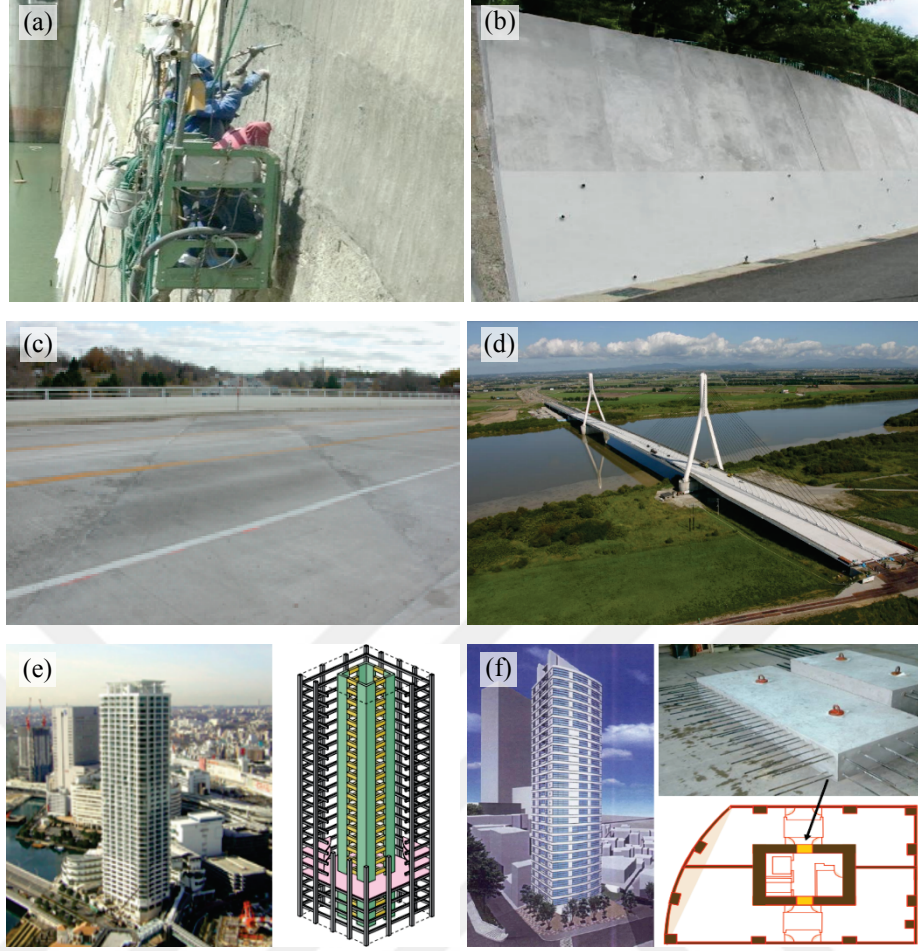
Şekil 2.6.a’da görüldüğü gibi ECC, ilk çatlaktan sonra çoklu mikro çatlaklar oluşturarak şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Çoklu mikro çatlakların plastik deformasyonla birlikte oluşumu da Şekil 2.6.b’de gösterilmiştir. Şekil 2.6.b’den görüldüğü gibi maksimum yük taşıma kapasitesinde bile, kompozitin hasarı lokalize değildir. Yükün yapısal bütünlüğü koruyan çoklu mikro çatlaklara dağıldığı görülmektedir. Bu sayede maksimum yük taşıma kapasitesinde bile çatlak genişlikleri 100 μ m seviyesini geçmemiştir. Ek olarak ECC’de meydana gelen ve kendini kontrol eden mikro çatlakların genişliği çelik donatı oranından bağımsızdır.

Yüksek eğilme yükü altında, ECC malzemesi Şekil 2.7’de gösterildiği gibi sünek bir metal gibi plastik deformasyon göstermektedir. ECC malzemesinin basınç dayanımı ise normal veya yüksek dayanımlı betona benzer şekilde 30-60 MPa arasında değişmektedir (Emmons ve diğerleri, 1993).



Şekil 2.7. ECC malzemesinin eğilme yükleri altındaki tipik davranışı

Laboratuvar çalışmalarında teyit edilen üstün dayanıklılık ve süneklik sayesinde ECC, büyük ölçekli yapısal uygulamalar için umut vaat etmiştir. Gösterdiği mükemmel özelliklerden dolayı, ECC şimdiden dünya çapında bir dizi tam ölçekli saha uygulamasında yer bulmuştur (Li, 2008). Daha da önemlisi, bu yapıların dayanıklılığının arttığı teyit edilmiştir.

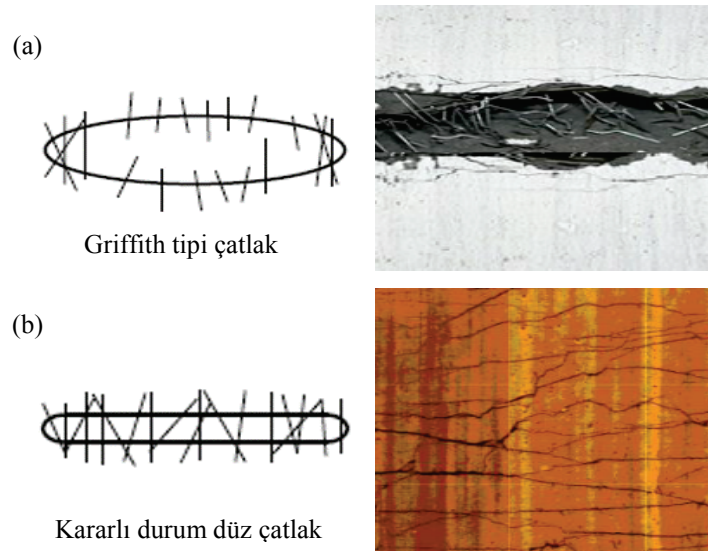


Şekil 2.8. ECC malzemesinin uygulama örnekleri: (a) beton barajın yapısal tamiri (Kunieda ve Rokugo, 2006), (b) istinat duvarının tamiri (Kunieda ve Rokugo, 2006), (c) köprü-tabliyesi bağlantı levhası (Li, 2012), (d) köprü-tablie kaplaması (Kunieda ve Rokugo, 2006), (e) (f) yüksek katlı binalar için yapısal damperler (Kunieda ve Rokugo, 2006; Li, 2012)

2.1.2.2. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcı Kompozit Tasarımı Hakkında Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar

1990'larda ECC'nin ilk icadından bugüne kadar çeşitli tipte ECC türleri geliştirilmiştir. ECC'nin yüksek süneklik ve çoklu mikro çatlama vasıtasıyla şekil değiştirme sertleşmesi davranışının yanı sıra ilave fonksiyonları arasında kendiliğinden yerleşmesi (Kong ve diğerleri, 2003), hafif olması (Wang, 2005), püskürtülebilir

olması (Kim ve diğerleri, 2003), erken yüksek dayanıma ulaşması (Wang ve Li, 2006) ve kendiliğinden iyileşmesi (Yang ve diğerleri, 2009) gibi özellikleri bulunmaktadır. Daha yakın zamanlarda, ECC'nin daha çevre dostu versiyonlarının geliştirilmesi için çaba gösterilmiştir (Li ve diğerleri, 2004; Yang ve diğerleri, 2007; Lepech ve diğerleri, 2008; Huang ve diğerleri, 2013; Huang ve diğerleri, 2013; Siad ve diğerleri, 2015). ECC şaşırtıcı bir şekilde sadece on yıl içinde geliştirilmiştir. Böyle hızlı bir gelişme, bu tez çalışmasında kısaca gözden geçirilen sistematik bir mikromekanik tabanlı tasarım yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. ECC'nin şekil değiştirme sertleşmesi davranışıyla birlikte sergilediği yüksek süneklik, ardışık çoklu mikro çatlakların kararlı durum düz çatlak oluşumu sayesinde gerçekleşmektedir. Bir çatlak ECC'de önceden var olan bir kusurdan başladığında, çatlak kararlı bir şekilde yayılarak sabit bir açıklığı korur. Buna karşılık, geleneksel lif donatılı betonlarda çatlak açıklığı, çatlak ilerledikçe çatlak uzunluğuyla beraber gittikçe artar. Sürekli artan çatlak açıklığı, çatlak ucundan uzakta olan liflerin çoğunlukla dışarı çekilmesine veya kopmasına neden olur. Geleneksel lif donatılı betonun şekil değiştirme yumuşaması davranışı - yani yük taşıma kapasitesinin azalması - “Griffith tipi” çatlama köprü liflerinin kaybından kaynaklanmaktadır (Griffith, 1921). Bu nedenle kararlı durum çoklu çatlak elde etmek için çatlak yayılma tipinin kontrol edilmesi önemlidir.



Şekil 2.9. (a) Griffith tipi ve (b) kararlı durum düz çatlak oluşumu (Li ve Leung, 1992)

Marshall ve Cox (1988), lif donatılı gevrek matrise sahip kompozitlerde kararlı durum düz çatlak oluşumu için enerji bazlı bir kriter elde etmiştir. Bu çalışmaya dayanarak, Li ve Leung (1992), lif donatılı çimento bağlayıcılı sünek kompozitlerde kararlı durum çoklu çatlak oluşumunu elde etmek için iki gerekli eşitlik sunmuştur:

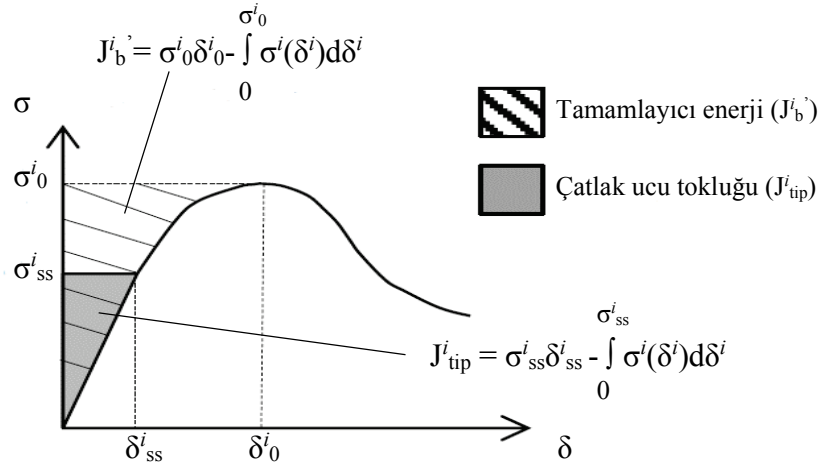
Dayanım kriteri:

$$\sigma_0^i > \sigma_{fc}^i \quad (2.1)$$

Enerji kriteri:

$$J_b^i = \sigma_0^i \delta_0^i - \int_0^{\sigma_0^i} \sigma^i(\delta^i) d\delta^i \geq J_{tip}^i \approx \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2.2)$$

Bir çatlağın, bir kompozitin herhangi bir i düzleminden başladığını düşünün (teorik olarak sonsuz sayıda düzlem tanımlanabilir). Kompozitteki malzeme ve üretim kusurlarına bağlı değişkenlik nedeniyle farklı düzlemler farklı kusur boyutu dağılımlarına ve çeşitli yönlendirme açılarına sahip köprüleme liflerine sahiptir. Sonuç olarak, harç matrisinde ilk çatlak oluşum dayanımı (σ_{fc}^i) maksimum çatlak köprüleme gerilmesi (σ_0^i), çatlak ucu tokluğu (J_{tip}^i) ve çatlak köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) ilişkisi düzlemler arasında farklılık gösterir. Dayanım ve enerji eşitliklerinden birinin gerçekleşmemesi halinde, çatlak ucundan uzakta olan liflerin çoğunlukla çekildiği veya koptuğu oval şekilli Griffith tipi çatlak oluşumu ile sonuçlanır. Her iki eşitlik de sağlandığında, sabit çatlak açıklığı ve yük taşıma kapasitesi korunarak çoklu mikro çatlakların kararlı durum düz çatlak oluşumu ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gerçekleşir. Dayanım kriterinde Eşitlik 2.1'deki ilk koşul herhangi bir i düzleminde çatlağı başlatmak için harç matrisinde ilk çatlak oluşum dayanımının (σ_{fc}^i) kompozitin maksimum çatlak köprüleme gerilmesinden (σ_0^i) daha düşük olmasını gerektirir. Bu eşitliğin ihlali sonucunda çatlak bölgeselleşip çoklu çatlak oluşumu meydana gelemeyecektir.



Şekil 2.10. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösteren kompozit için tipik çatlak köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) eğrisi (Wang ve Li, 2004)

Eğer herhangi bir i düzleminde çatlak başlatılabilirse, çoklu mikro çatlakların kararlı durum düz çatlak oluşumu Eşitlik 2.2'deki enerji kriteri tarafından belirlenir. Kararlı durum çatlak açıklığı sıfırdan sabit/kararlı bir duruma (δ_{ss}^i) ulaşınca, dış yükten uygulanan enerji kısmen köprüleme liflerinde gerilim enerjisi olarak tüketilir/sönümlenir. Geri kalan enerji - tamamlayıcı enerji (J_b^i) - çatlak ucunun yayılması için kullanılabilir. Eşitlik 2.2'de i düzleminde çatlak ucu tokluğunun (J_{tip}^i) mevcut maksimum tamamlayıcı enerjiden (J_b^i) daha düşük olmasını gerektirir. Bu kriterin ihlali, Griffith tipi çatlak yayılımı ile sonuçlanır. Sonuç olarak çatlak genişliği δ_0^i değerini aşınca çatlak köprüleme gerilmesi düşmeye başlar. Bu durum çatlakın bölgeselleşmesine neden olur.

Yukarıda verilen dayanım ve enerji kriterlerinde dört değişkenin (σ_{fc} , σ_0 , J_{tip} , J_b) anlaşılmasının, çoklu mikro çatlakların kararlı durum düz çatlak oluşumunu elde etmek için gerekli olduğu açıktır. Dört değişkenden ikisinin belirlenmesi kolaydır; ilk çatlak oluşum dayanımı (σ_{fc}) ağırlıklı olarak düzlemin maksimum kusur boyutuna ve matris kırılma tokluğuna (K_m) bağlıdır. Çatlak ucu tokluğu (J_{tip}) düşük lif içeriğinde K_m^2/E_m olarak yaklaşık olarak tahmin edilebilir, E_m harç matrisin elastik modülüdür. Bu iki değişken ve ilişkili parametreler deney ile kolayca ölçülebilir ve kırılma mekaniği teorilerinden tahmin edilebilir. Diğer iki değişken maksimum çatlak köprüleme gerilmesi (σ_0) ve tamamlayıcı enerji (J_b) daha karmaşıktır; matris, lif ve

matris-lif arayüz özellikleri parametrelerine ve bunların etkileşimlerine bağlı olan çatlak köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) ilişkisinden belirlenir. Bu nedenle verilen parametrelerden çatlak köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) ilişkisini tahmin etmek için kapsamlı bir modele ihtiyaç vardır. Li ve diğerleri (1991), bu nedenle “mikromekanik parametreleri” ve “makroskopik kompozit davranışını” ilişkilendiren mikromekanik tabanlı bir model oluşturmuştur. ECC’nin mikromekanik tasarım yaklaşımı ile ilgili literatürde daha kapsamlı bilgiler bulunabilir. Ek olarak daha önce de bahsedildiği üzere ECC’nin mikromekanik tabanlı tasarım yaklaşımı ile aşırı yük koşullarında bile çoklu mikro çatlak hasarı sergilemesi üstün dayanım ve dayanıklılık özellikleriyle birlikte kendiliğinden iyileşme gibi özellikleri de beraberinde sağlamaktadır. Literatürde birçok araştırmacı ECC malzemesinin otojen kendiliğinden iyileşme davranışı üzerine çalışmalar yapmıştır.

2.1.3. Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcı Kompozitler

2.1.3.1. Gelişim Tarihi

ECC, mikro çatlakların oluşmasıyla birlikte yüksek süneklik göstermekte ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyen benzersiz bir çimento bağlayıcı yapı malzemesidir (Li ve Wu, 1992; Li ve Leung, 1992; Li ve Kanda, 1998). ECC üretiminde hacimsel lif oranının %2 kullanımı ile tek eksenli çekme yüklemesi altında çekme-birim şekil değiştirme deformasyonu %3 ile %5 arasında kalmaktadır. Bu değer geleneksel LDB’nin yaklaşık olarak 300 katıdır. Tipik bir ECC karışımı iri agregaların eksikliği sebebiyle geleneksel beton karışımlarının 2 ila 3 katından daha fazla portland çimentosu içermektedir. Bununla birlikte, yüksek çimento içeriği, otojen büzülmeyi, hidrasyon ısısını istenmeyecek ölçülerde arttırabilmekte ve ECC’nin genel malzeme maliyetini yükseltmektedir. Ayrıca çimento üretimi yüksek enerji gerektiren bir endüstri olarak kabul edilmektedir. Karbondioksit salınımının dünya çapındaki küresel ısınmanın en önemli sebeplerinden biri olduğu ve sadece portland çimentosu üretiminin tüm dünyadaki karbondioksit salınımının yaklaşık %8’inden sorumlu olduğu düşünüldüğünde bu durum ECC’nin sürdürülebilirlik performansını tehlikeye atmaktadır (Wang ve Li, 2007; Yang ve diğerleri, 2007). Portland çimentosunun kısmi

olarak puzolanik malzemelerle ikame edilmesinin, bu malzemelerin üretiminin çimentodan daha az enerji gerektirmesi ve karbondioksit salınımını azaltmaları gibi sebeplerden ötürü toplam malzeme maliyetini ve çevresel etkileri azaltıp doğallığı arttırmaları beklenebilir. Farklı puzolanik malzemeler arasında uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu mevcut durumda en yaygın bulunabilecek puzolanik malzemelerdendir. Bu endüstriyel yan ürünler fazla miktarlarda mevcut olup, genel olarak çimentoya kıyasla daha ucuz ve doğaldırlar. Önceki çalışmalar ECC karışımlarında portland çimentosunun değişik oranlarda farklı puzolanik malzemelerle yer değiştirilebileceğini gösterse de (Wang ve Li, 2007; Yang ve diğerleri, 2007), tam anlamıyla çevre dostu ve maliyeti daha da düşürülmüş ECC karışımlarının geliştirilmesi ve bu malzemelerin çok daha yaygın bir şekilde kullanılabilmesi adına daha önce belirtildiği gibi bağlayıcı fazının tamamen çimentosuz yenilikçi bir sistemle (ör. jeopolimer) değiştirilmesi sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir. Jeopolimer, portland çimentosu bağlayıcıya gelecek vaat eden sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sağladığı iddia edilen, çimento içermeyen yeni bir bağlayıcıdır. Daha önce de belirtildiği gibi jeopolimerin sentezi, portland çimentosu üretimine kıyasla daha az karbondioksit salınımına neden olur ve daha az enerji gerektirir.

Yüksek süneklik ve düşük çevresel etki gibi tipik özelliklere sahip olan EGC malzemesi gittikçe daha fazla araştırmacının ilgisini çekmektedir. Bununla birlikte genel olarak EGC ile ilgili araştırmalar, ECC ile karşılaştırıldığında bugüne kadar oldukça sınırlıdır. Önceki çalışmalarda jeopolimer harç ve betonların, portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara benzer şekilde gevrek bir yapıya sahip oldukları ve çatlak oluşumuna karşı hassas oldukları belirtilmiştir (Suwan ve diğerleri, 2016). Bu sebepten ötürü düz jeopolimer matrislerin geliştirilmesi üzerinde yapılan kapsamlı çalışmalara ek olarak jeopolimerlerin gevrek davranışını iyileştirmek içinde çeşitli kompozitler araştırılmıştır. Bununla birlikte jeopolimer bağlayıcılı sistemlerin sünekliğini arttırmak için şimdiye kadar çok fazla çalışma yapılmamıştır. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyen ve yüksek sünekliğe sahip bir tür lif donatılı sistem olan ECC ve jeopolimerin avantajlarını birleştirerek, yeni bir malzeme türü olan yüksek sünekliğe sahip EGC'lerin geliştirilmesi için fizibilite çalışmaları son zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Literatürde kısıtlı sayıda gerçekleştirilen çalışmalarda istenen mekanik özelliklere sahip birkaç EGC malzemesi rapor edilmiştir

(Lee ve diğerleri, 2012; Nematollahi, 2017; Choi ve diğerleri, 2015; Shaikh ve diğerleri, 2018; Al-Majidi ve diğerleri, 2018; Ohno ve Li, 2018; Kan ve diğerleri, 2019) Farklı çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda tamamen çimentosuz lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozit malzemelerden her ne kadar umut verici sonuçlar elde edilmiş olsa da literatürdeki çalışmalar oldukça yeni ve kısıtlı sayıdadır. Bu sebeple ilgili çalışma alanı üzerine daha detaylı ilave çalışmaların gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.3.2. Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozit Tasarımı İçin Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar

Jeopolimerlerin normal portland çimentosuna kıyasla çevresel duyarlılıklarının çok daha fazla olması, YPLDÇK'lerin özel bir çeşidi olan ECC'nin ise üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmaları sebebiyle bu iki malzemenin birbirine entegre edilerek geliştirilmesi sürdürülebilir altyapısal gelişmeye önemli katkı sağlayabilir. ECC'nin daha çevre dostu versiyonlarının geliştirilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda bugüne kadar çeşitli tipte EGC türleri geliştirilmiştir. Geliştirilen EGC malzemeleri de ECC'ye benzer şekilde yüksek süneklik ve çoklu mikro çatlak oluşumu vasıtasıyla şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemektedir. Bununla birlikte geliştirilen EGC sistemlerin bazılarında mükemmel özellikler gözlemlenmiştir. Bu bölümde, bu araştırma konusu ile ilgili mevcut çalışmalar sunulmaktadır.

Lee ve diğerleri (2012), gerçekleştirdikleri çalışmada cüruf bazlı jeopolimer bağlayıcı ile EGC üretiminin fizibilitesini deneysel olarak tespit etmiştir. İki farklı aktivatör kombinasyonu ve farklı S/B oranları kullanılarak üç farklı karışım oranı hazırlanmıştır. Karışımların K/B oranı sabit 0,4 seçilmiş ve ince silis kumu kullanılmıştır. 12 mm uzunluğunda, 39 µm çapında ve yüzeyi ağırlıkça %1,2 oranında yağla kaplı polvinil alkol lifi hacimce %2 oranında kullanılmıştır. Taze karışımlar plastik plaka ile kapatılarak laboratuvarında 24 saat ortam sıcaklığında ($23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$) kürlenmiştir. Sertleştirilmiş karışımlar daha sonra kalıplardan çıkarılarak ortam sıcaklığında 28 gün boyunca bir su tankında kürlenmiştir. Yoğunluk, basınç dayanımı, ilk çatlak dayanımı,

nihai çekme dayanımının ve çekme şekil değiştirme kapasitesinin aktivatör tipine ve S/B oranına bağlı olarak 28 günde sırasıyla 1970-2020 kg/m³, 19,4-30,6 MPa, 2,55-3,87 MPa, 2,83-4,69 MPa ve %1,53-4,48 arasında olduğu bildirilmiştir. Uygulanan eksenel çekme testi neticesinde tüm kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterdiği, düzgün bir süneklikle çoklu mikro çatlak oluşumuna müsaade ettikleri bildirilmiştir.

Ohno ve Li (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada uçucu kül bazlı jeopolimer bağlayıcı ile EGC üretiminin fizibilitesini deneysel olarak tespit etmiştir. A ve B olmak üzere iki farklı tipte F sınıfı uçucu kül ve sodyum bazlı aktivatör kombinasyonu içeren bir karışım oranı, deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Yeterli priz süresine sahip bir karışım hazırlamak için iki farklı tipte uçucu kül kullanılmıştır. Sodyum bazlı aktivatör olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Karışımların K/B oranı sabit 0,4 seçilmiş ve karışımlarda ince silis kumu kullanılmıştır. 12 mm uzunluğunda, 39 µm çapında ve yüzeyi ağırlıkça %1,2 oranında yağla kaplı polivinil alkol lifi hacimce %2 oranında kullanılmıştır. Tüm karışımlar 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak üç gruba ayrılmış ve üç farklı kür koşuluna tabi tutulmuştur. Karışımlar kalıptan çıkarıldıktan sonra ilk grup, testten 28 gün öncesine kadar oda sıcaklığında (23°C ± 3°C) havada kürlenmiştir. İkinci ve üçüncü gruplar, sırasıyla 4 ve 8 saat boyunca 60°C'de bir fırına yerleştirilerek ısıl kür uygulanmıştır. Daha sonra, testten 28 gün öncesine kadar oda sıcaklığında (23°C ± 3°C) hava ile kürlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada kompozitler, kür koşullarına bağlı olarak 28 günde düşük ila orta derecede basınç dayanımı 17,4-27,6 MPa, düşük ila orta derecede nihai çekme dayanımı 2,9-3,4 MPa ve çok yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesi %2,7-4,3 sergilemiştir.

Choi ve diğerleri (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada petrol kuyusu uygulamaları için düşük viskoziteli EGC üretmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ön çalışmalarla dört karışım oranı belirlenmiştir. Aktivatör olarak toz halinde kalsiyum hidroksit ve sodyum sülfatın bir kombinasyonu kullanılmıştır. 8 mm uzunluğunda, 39 µm çapında ve yüzeyi ağırlıkça %0,6 oranında yağla kaplı polivinil alkol lifi kullanılmıştır. İncelenen tüm karışımların basınç dayanımlarının, 15 MPa olan hedef dayanım değerinden fazla olduğu bildirilmiştir. Kompozitler lif miktarına ve S/B oranına bağlı

olarak 28 günde, 1,08-1,53 MPa ilk çatlak dayanımı, 1,41-2,26 MPa nihai çekme dayanımı ve %1,02-2,38 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Karışımlar arasında S/B oranı 0,4 olan ve %1,3 lif hacmine sahip olan karışım, en yüksek basınç ve çekme dayanımlarını ve çekme şekil değiştirme kapasitesini, sırasıyla 18,3 MPa, 2,26 MPa ve %2,38 göstermiştir.

Choi ve diğerleri (2016), gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada, yüksek dayanımlı polietilen lifleri ile takviye edilmiş EGC'nin mekanik özelliklerini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmiştir. 12 mm uzunluğunda, 16 µm çapında, 112 GPa elastik modüle sahip ve 3030 MPa çekme dayanımı olan polietilen lifleri hacimce %1,75 oranında kullanılmıştır. Cüruf esaslı jeopolimer kompozitler S/B oranına bağlı olarak 28 günde 31,3-43,0 MPa basınç dayanımı, 1,80-2,64 MPa ilk çatlak dayanımı, 5,96-7,89 MPa nihai çekme dayanımı ve %5,32-5,92 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir.

Choi ve diğerleri (2016), bir devam çalışması niteliğinde, daha önce geliştirilmiş polietilen lif donatılı cüruf bazlı jeopolimer bağlayıcılı kompozitin özelliklerini geliştirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. S/B oranı 0,26'dan 0,38'e yükseltilerek dört farklı karışım oranı hazırlanmıştır. Bu çalışmada önceki çalışmalarında kullanılan cüruf tipi ve aktivatör tipi kullanılmıştır. Homojen lif dağılımını sağlaması adına uygun reolojiyi sağlamak için uygun miktarda süper akışkanlaştırıcı, viskozite değiştirici katkı maddesi ve köpük önleyici kullanılmıştır. Bu çalışmada polietilen lifleri hacimce %1,75 kullanılmıştır ancak kullanılan lifin özelliklerinin önceki çalışmalarında kullanılanlardan farklı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, 18 mm uzunluğa, 12 µm çapa, 88 GPa'lık elastik modüle ve 2700 MPa'lık çekme dayanımına sahip polietilen lifleri kullanılmıştır. Cüruf esaslı jeopolimer kompozitler 28 günde S/B oranına bağlı olarak, 36,3-54,8 MPa basınç dayanımı, 3,37-4,87 MPa ilk çatlak dayanımı, 5,06-13,06 MPa nihai çekme dayanımı ve %4,58-7,50 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Tüm karışımlardaki ortalama çatlak aralığı ve çatlak açıklığının, sırasıyla 2,25 mm ve 101 µm'dan az olduğu belirtilmiştir.

Nematollahi ve diğerleri (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada EGC üretiminde bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül kullanmıştır. İki farklı sodyum bazlı, potasyum bazlı

ve kalsiyum bazlı olmak üzere dört farklı alkali aktivatörün farklı kombinasyonları oluşturularak çeşitli karışım oranları hazırlanmış ve jeopolimer bağlayıcılı kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ve çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyeti üzerine çeşitli araştırmalar gerçekleştirmiştir. 8 mm uzunluğunda, 40 µm çapında polivinil alkol lifi hacimce %2 oranında kullanılmıştır. Sodyum bazlı jeopolimer kompozitler kullanılan aktivatör tipi ve molariteye bağlı olarak, 30,8-63,7 MPa basınç dayanımı, 3,2-3,7 MPa ilk çatlak dayanımı, 3,9-4,7 MPa nihai çekme dayanımı ve %0,42-4,3 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Potasyum bazlı jeopolimer kompozitler 37,6 MPa basınç dayanımı, 1,4 MPa ilk çatlak dayanımı, 1,8 MPa nihai çekme dayanımı ve %2 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Kalsiyum bazlı jeopolimer kompozitler 13,6 MPa basınç dayanımı, 1,3 MPa ilk çatlak dayanımı, 1,7 MPa nihai çekme dayanımı ve %1,1 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir.

Nematollahi ve diğerleri (2017), gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada ise F sınıfı uçucu kül ile standart cüruf ve alçısız cüruf olmak üzere iki farklı cürufu hazırladıkları karışımlarda alüminosilikat kaynağı bağlayıcı malzeme tipinin mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkisi üzerine incelemelerde bulunmuştur. 8 mm uzunluğunda, 40 µm çapında polivinil alkol lifi hacimce %2 oranında kullanılmıştır. Standart cüruf kullanılan jeopolimer kompozitler kür koşullarına bağlı olarak 3,3-4,1 MPa ilk çatlak dayanımı, 4,4-4,6 MPa nihai çekme dayanımı ve %3,6-4,2 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Alçısız cüruf kullanılarak üretilen jeopolimer kompozitler ise kür koşullarına bağlı olarak 3,4-3,9 MPa ilk çatlak dayanımı, 4,3-4,4 MPa nihai çekme dayanımı ve %2,6-3,7 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Cüruf tipine bakılmaksızın, kür koşullarının basınç dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı fakat ortam koşullarında kür edilen kompozitlerin ısı küre tabi tutulan kompozitlere kıyasla üstün eksenel çekme performansı sergilediği bildirilmiştir.

Nematollahi ve diğerleri (2017), jeopolimer kompozitlerin süneklik performansını arttırabilmek adına gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada EGC üretiminde bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül ve cüruf kullanılmıştır. Sabit alkali aktivatör oranlarına sahip karışımlar hazırlanmış ve jeopolimer bazlı kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ve çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyetinin incelenmesi adına polivinil

alkol lif takviyeli jeopolimer kompozitlere ek olarak polietilen lif takviyeli jeopolimer kompozitler üretilmiş ve söz konusu kompozitlerde reolojik ve kür koşullarının mekanik performans üzerine etkilerini incelemiştir. 8 mm uzunluğunda, 40 µm çapında polivinil alkol lifi hacimce %2 oranında kullanılmıştır. Ayrıca 12 mm uzunluğunda, 12 µm çapında polietilen lifi de hacimce %2 oranında kullanılmıştır. Gerçekleştirilen işlenebilirlik testleri neticesinde jeopolimer matrislerin tiksotropik özellik sergilediği ve homojen lif dağıtımını destekleyebilecek yeterlilikte işlenebilirliğe sahip olduğu bildirilmiştir. Polietilen lif esaslı jeopolimer kompozitler kür koşullarına bağlı olarak 2,1-2,8 MPa ilk çatlak dayanımı, 3,3-4,2 MPa nihai çekme dayanımı ve %4,9-5,5 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Polivinil alkol lif esaslı jeopolimer kompozitler ise ortam küründe 4,1 MPa ilk çatlak dayanımı, 4,6 MPa nihai çekme dayanımı ve %4,2 çekme şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir.

2.1.4. Çözülmemiş Problemler

Reaksiyon mekanizması/süreçleri ve bunların jeopolimerizasyondaki etkili faktörleri üzerinde çok fazla çalışma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen birçok şey hala bilinmemektedir. Özellikle İYA bazlı jeopolimerler en karmaşık sistemlerden biridir. Benzer bileşenler, karışım oranları ve üretim yöntemleri kullanıldığında bile bazen farklı çalışmalar arasında çelişkili sonuçlar ortaya çıkmaktadır. İnşaat yıkıntı atığı bazlı jeopolimerlerin en büyük teknik zorluklarından biri, alüminosilikat bazlı malzemelerin özelliklerindeki büyük değişkenliktir. Yıkıntı atığının tane boyutu, morfolojisi, bileşimi ve reaktivitesi büyük ölçüde değişebilmektedir. Ayrıca İYA'ların kristallliği de jeopolimerizasyon reaksiyonlarında büyük öneme sahiptir. Atıklar içindeki göreceli miktarlarda kristal ve amorf fazlar, nihai ürünün çözünme davranışını ve sonuçtaki özelliklerini belirlemektedir. Bu karmaşıklık nedeniyle her bir yıkıntı atığının kimyasını tam olarak anlamak ve karşılık gelen jeopolimerin özelliklerini tahmin etmek için gelişmiş karakterizasyon teknikleri gereklidir. Bununla birlikte İYA bazlı jeopolimerin tasarımı genellikle deneme yanılma yaklaşımına dayanmaktadır. Çeşitli faktörler (yıkıntı atığı tipi, alkali aktivatör tipi, kür sıcaklığı, vb.) isteğe bağlı olarak seçilir ve ilgili bir özellik üzerindeki etkileri (tipik olarak basınç dayanımı veya işlenebilirlik) değişkenlik gösteren bir dizi deney vasıtasıyla değerlendirilir. Ancak

yukarıda bahsedildiği gibi kapsamlı laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve bulgular her atığın kaynağına özgü olabilmektedir. Ayrıca İYA'lar için önerilen tasarım yöntemlerinin çoğu evrensel olarak uygulanabilir olmayabilir. Bu nedenle farklı bir İYA kaynağı kullanıldığında başka bir deney turunun yapılması gerekebilir. Genel olarak yeni bir malzeme geliştirmek veya mevcut olanı doğrulamak için deney önemlidir. İYA bazlı jeopolimerlerin malzeme tasarımına daha sistematik ancak pratik yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. ECC malzemelerinin geliştirilmesinde, tasarım işlemi tipik olarak matris tasarımıyla başlamaktadır. Karışım bileşenleri, oranları ve kür yöntemi ilk olarak istenen bir işleve (ör. yüksek mekanik performansa sahip, hafif, kendiliğinden yerleşebilen, vb.) ulaşmak için belirlenir. Daha sonra uygun lif ve hacim miktarı seçilerek matris-lif arayüz özellikleri deneysel olarak belirlenir. Bu nedenle istenen özelliğe sahip matris geliştirildikten sonra, sonraki karakterizasyon sistematik olarak yapılabilir. Matris tasarımı, çimento bağlayıcılı malzemeler hakkında birikmiş bilimsel ve ampirik bilgilerden yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Tasarım parametrelerinin (S/B oranı, çimento ve agrega tipleri, kütleme süreci, vb.) çeşitli özellikler üzerindeki etkileri (basınç dayanımı, matris tokluğu/sertliği, işlenebilirlik, vb.) portland çimentolu bağlayıcı malzemeler için uzun süredir araştırılmıştır. Matris tasarımında istenen bir özelliğe ulaşmak için yeterli veri ve literatür böylece mevcuttur. Daha kısa gelişme sürecine sahip jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde ise matris gelişimi kapsamlı deneme yanılma yaklaşımlarına dayanmaktadır. Başka bir sorun, çoklu mikro çatlak oluşumu ile ilgilidir. İstenen özelliğe sahip matris başarılı bir şekilde geliştirilebiliyorsa sonraki kompozit tasarım aşamasında sadece lif veya matris-lif arayüz özellikleri ile oynanması idealdir. Ancak bazı durumlarda, tasarım parametrelerinin gerçekçi olmayan bir şekilde değiştirilmesi gerekebilir. Çok yüksek lif dayanımı, çok küçük lif çapı ve özel işlem metotları gerektiren yüksek miktarda lif içeriği buna iyi örneklerdir. Bu durumlarda matris özelliklerinin modifikasyonu da gerekli olur ancak bu modifikasyon önceki matris tasarım aşamasında elde edilen ilave fonksiyonu da etkileyebilecektir. Bu nedenle EGC tasarımında asıl zorluk yaratan şey yüksek süneklik ve istenen ek işlevleri aynı anda elde etmek için tüm parametrelerin optimize edilmesidir.

2.2. Kendiliğinden İyileşmenin Gözden Geçirilmesi

Bu bölümde kendiliğinden iyileşme hakkında literatür araştırması sunulmuştur. Kendiliğinden iyileşmenin tarihsel gelişimi çimento bağlayıcılı malzemelerde çatlakların kendiliğinden iyileşme mekanizması ve karakteristik özellikleri üzerinde durularak önceki araştırma sonuçları değerlendirilerek performansı kısaca gözden geçirilmiştir. Bu bölümün ilerleyen kısmında bu yüksek lisans araştırmasının ana odağı olan jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansı hakkında mevcut çalışmalar gözden geçirilerek kısaca literatür araştırması sunulmuştur. Son olarak gerçekleştirilen literatür araştırmasına dayanarak, jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin kendiliğinden iyileşme mekanizması ve karakteristik özellikleri üzerindeki zorluklar göz önünde bulundurularak çözülmemiş sorunları ana hatlarıyla verilmiştir.

2.2.1. Kendiliğinden İyileşme

2.2.1.1. Gelişim Tarihi

Kendiliğinden iyileşme, dışarıdan herhangi bir harici müdahale olmaksızın hasarların kendi kendini onarması ve iyileştirmesi olarak tanımlanmaktadır. Kendiliğinden iyileşme evrende yaygın bir olaydır. Kemik kırığının iyileşmesi buna örnek olarak verilebilir. Bilindiği gibi iskelet sistemine sahip canlıların kemiklerindeki kırık kendiliğinden iyileşme özelliğine sahiptir. Kendiliğinden iyileşme, çimento bağlayıcılı malzemelerde de çatlakların, devam eden hidrasyon ve karbonatlaşmanın bir sonucu olarak kapanmasıyla meydana gelebilmektedir (Neville, 2002). Beton gibi çimento bağlayıcılı malzemelerdeki çatlakların kendiliğinden iyileşmesi, çatlak genişliklerinin azalmasını sağlayarak betonun dayanım ve dayanıklılık performansını arttırabilmektedir. Çimento bağlayıcılı sistemlerde otojen ve otonom olmak üzere iki tip kendiliğinden iyileşme yöntemi vardır (De Rooij ve diğerleri, 2013). Otojen kendiliğinden iyileşme, malzeme bileşenlerinin kendiliğinden iyileşme için özel olarak tasarlanmadığı, mevcut olabilecek malzeme bileşenlerinin kullandığı kendiliğinden iyileşme işlemi olarak tanımlanmıştır. Otonom kendiliğinden iyileşme ise mevcut

malzeme bileşenlerine ek olarak malzemede bulunmayan malzeme bileşenlerinin kullandığı kendiliğinden iyileşme işlemi olarak tanımlanmıştır. Çimento bağlayıcı sistemlerin kendiliğinden iyileşme davranışı hakkındaki ilk gözlemler 1800'lerin başlarına dayanmaktadır. Betondaki çatlakların otojen kendiliğinden iyileşmesi ilk olarak 1836 yılında Fransız Bilim Akademisi tarafından su tutma yapıları, menfezler ve borularda fark edilmiş ve çimentonun hidratasyonu sırasında üretilen kalsiyum hidroksitin karbonatlaşması olarak tanımlanmıştır (Ferrara ve Krelani, 2013). O yıllardan itibaren birçok araştırmacı sadece beton çatlaklarında otojen kendiliğinden iyileşme ürünlerinin varlığını gözlemlemekle kalmamış, aynı zamanda otojen kendiliğinden iyileşme davranışını fizikokimyasal olarak doğrulamaya çalışmıştır. Daha sonra otojen kendiliğinden iyileşme davranışı 19. yüzyılın sonunda Hearn (1998) ve Hyde ve Smith (1889) tarafından incelenmiştir. Abrams (1913), çekme testleri sırasında betonarme üzerinde oluşan çatlakların, numunelerin testten sonra bırakıldıklarında kapandığını gözlemlemiştir. Abrams, gözlemlenen otojen iyileşmenin “çimentonun gecikmiş veya kesintili hidrolikliğinin etkisi” olduğuna inanmıştır (Abrams, 1913). Betondaki çatlakların otojen kendiliğinden iyileşme davranışı ile ilgili daha sistematik çalışmalar Glanville (1931) tarafından gerçekleştirilmiştir. Zaten o zaman kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden tıkanma arasında bir ayrım yapılmıştır. İlk durumda betonun mukavemeti geri kazanılırken, ikinci durumda çatlaklar kapatılacak ancak mukavemet geri kazanımı elde edilmeyecektir. Glanville'nin çalışmalarının ardından, köprü tabliyeleri üzerindeki çatlakların kendiliğinden iyileşme davranışının gözlemlendiği çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Soroker ve Denson, 1926; Brandeis, 1937). Otojen kendiliğinden iyileşme üzerine yapılan ilk kapsamlı çalışma ise Lauer (1956) tarafından gerçekleştirilmiştir. Lauer (1956), gerçekleştirdiği çalışmalar kapsamında kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kalsiyum hidroksit ve kalsiyum karbonat kristallerinin bir kombinasyonu olduğunu belirtmiştir. Kalsiyum karbonat oluşumunun, kalsiyum hidroksitin su veya havada bulunan karbondioksit ile reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıktığını belirtmiştir. Dhir (1973), çimento içeriği yüksek ve S/B oranı düşük harçların otojen kendiliğinden iyileşme performansı gösterdiklerini belirtmiştir. Wagner (1974), 0,05 ve 0,1 mm çapına sahip çatlakların sırasıyla 60 saat ve bir yıllık süre boyunca kendiliğinden iyileştiğini belirtmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda 1980'lerin başında, yüksek bağlayıcı içerikli lif

donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerin su ile kürlendiğinde otojen kendiliğinden iyileşme işlevselliği gösterdiği tespit edilmiştir (Hannant ve Keer, 1983; Gray, 1984). Bununla birlikte, literatürde birçok araştırmacı tarafından belirtildiği gibi otojen kendiliğinden iyileşmenin bazı kısıtlamaları bulunmaktadır (Aldea ve diğerleri, 2000; Reinhardt ve Jooss, 2003; Şahmaran ve diğerleri, 2008; Van Tittelboom ve De Belie, 2013). İlk olarak, hidrate olmamış çimento taneciklerinin hidratasyonu, betonun yaşına büyük ölçüde bağlıdır. İkinci olarak su, kendiliğinden iyileşme ürünlerinin oluşması için gerekli reaksiyonların gerçekleşmesi için gereklidir. Üçüncü olarak otojen kendiliğinden iyileşme, 150 µm'dan küçük çatlakların kapatılmasında çok etkilidir ancak daha büyük çatlakların otojen kendiliğinden iyileşmesinde yeterince etkili değildir.

2.2.1.2. Kendiliğinden İyileşme Hakkında Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar

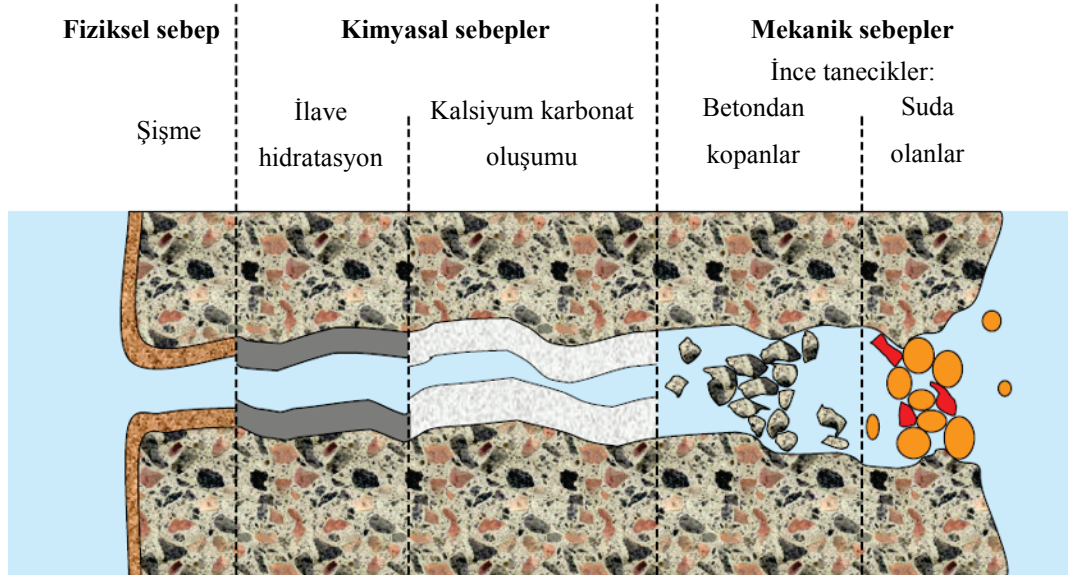
Betondaki çatlakların otojen kendiliğinden iyileşme davranışı 100 yıldan fazla bir süre önce gözlemlenmiş olmasına rağmen (Lauer, 1956; Nijland ve diğerleri, 2007), bu konudaki araştırmalar son yıllarda artmıştır. Kendiliğinden iyileşme zamanla azalan çatlak genişliğidir. Zamanla azalan çatlak genişliğinin altında yatan farklı nedenler bulunmaktadır. Çimento bağlayıcılı malzemelerde otojen kendiliğinden iyileşme performansı ile ilgili çalışmalara dayanarak fiziksel, kimyasal ve mekanik kökenli 3 mekanizma bulunmaktadır (Reinhardt ve diğerleri, 2013).

Fiziksel mekanizma incelendiğinde, çatlak yanlarındaki çimento hamurunun genişlemesi (şişmesi) sayesinde gerçekleştiği görülmektedir. Şişme, suyun, çimento hamuru bileşenleri arasındaki boşluğa ulaştığında gerçekleşmektedir. Şişmenin etkisi kısıtlı olmasına rağmen çatlak içerisinde %10'a kadar sıvı akışını azaltabilmektedir.

Kimyasal mekanizmalar incelendiğinde “reaksiyona girmemiş çimentonun hidratasyonu”, “kalsiyum karbonat oluşumu” ve “puzolanik reaksiyon” olmak üzere 3 ana mekanizmanın var olduğu görülmektedir. Birincisi reaksiyona girmemiş çimentonun devam eden ilave hidratasyonudur. Su eksikliği nedeniyle matristeki

hidrate olmamış çimentonun çatlaklarda su ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve diğer hidratasyon ürünlerinin çatlağın boş alanına doğru büyüyerek oluşmasıyla gerçekleşmektedir. Hidratasyon ürünleri hidrate olmamış çimento tanesinin iki katı kadar yer kaplamaktadır. Devam eden hidratasyonun, bir çatlağın tamamen kendiliğinden iyileşmesi için yeterli olmadığı söylenmektedir. Ancak 100 µm'dan daha küçük çatlak genişliğine sahip çatlakların aynı anda genişleme (şişme) ve devam eden ilave hidratasyon etkisini varsayarak kendi kendini iyileştirebildiği belirtilmektedir. Bununla birlikte daha büyük çatlak genişliği ile bu etki önemsiz hale gelmektedir. İkincisi kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşumudur. Kalsiyum karbonat oluşumu hidratasyon ürünlerinden sızan kalsiyum iyonlarının çatlak yüzeylerde atmosferik karbondioksitten çözülmüş karbonat iyonlarıyla reaksiyona girmesi sonucu oluşabildiği gibi kalsiyum hidroksitin karbondioksit varlığında doğrudan karbonatlaşmasıyla da oluşabilmektedir. Bu mekanizmanın kendiliğinden iyileşmeye en önemli katkıyı sağladığı gösterilmiştir. Üçüncüsü pozolanik reaksiyonlardır. Matristeki silika veya alümina türleri ve kalsiyum hidroksit su ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratların ve diğer hidratasyon ürünlerinin çatlağın boş alanına doğru büyüyerek oluşmasıyla gerçekleşmektedir.

Mekanik mekanizmalar incelendiğinde, su içerisindeki taneciklerin ve/veya çatlak yüzeylerinde kırılmış küçük beton taneciklerinin çatlak içerisine birikmesi sayesinde çatlakların kapanmasıyla gerçekleşmektedir. Her ne kadar bu şekilde çatlakların kapandığı görülse de bu etkilerin önemsiz olduğu belirtilmektedir. Çimento bağlayıcılı malzemelerde yukarıda bahsedilen kendiliğinden iyileşme mekanizmaları Şekil 2.11'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Çimento bağlayıcılı malzemelerde otojen kendiliğinden iyileşmeye sebep olabilecek mekanizmalar (Reinhardt ve diğerleri, 2013)

Yukarıda da belirtildiği gibi çimento bağlayıcılı malzemelerde kendiliğinden iyileşmenin sağlanabilmesi için genellikle kimyasal sebeplerin (ilave hidratasyon reaksiyonları ve kalsiyum karbonat oluşumu) gerçekleşmesi gerekmektedir. Teorik olarak bu durum, sadece su ve karbondioksit varlığında gerçekleşebilmektedir (yani çoğu yapının normal koşulu altında). Çatlakların kendiliğinden iyileşmesinde ilave hidratasyon reaksiyonları ve kalsiyum karbonat oluşumu olmak üzere her iki sebep etkili olsa da kalsiyum karbonat oluşumu ve ilave hidratasyon reaksiyonlarının taşınma özelliklerini etkilediği, ilave hidratasyon reaksiyonlarının ise mekanik özellikleri etkilediği düşünülmektedir.

Kendiliğinden iyileşme, çimento bağlayıcılı malzemelerde kapsamlı bir şekilde incelenen bir alandır ancak jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde son zamanlarda büyüyen bir araştırma konusudur. Bu nedenle jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin kendiliğinden iyileşme davranışı hakkındaki çalışmalar çok sınırlıdır. Aşağıdaki bölümde, jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde kendiliğinden iyileşme performansının incelendiği mevcut çalışmalar sunulmaktadır.

Ali ve diğeri (2015), kendiliğinden iyileşme performansının incelenmesi adına gerçekleştirdikleri çalışmada bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmıştır. Numuneler üç noktalı eğilme testi ile önyüklenildikten sonra, 90°C'de ısı küre maruz bırakılarak kendiliğinden iyileşme performansı incelenmiştir. Oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerinin, reaksiyona girmemiş taneciklerin daha fazla jeopolimerizasyonunun bir sonucu olduğu belirtilmiştir.

Ohno (2017), uçucu kül bazlı EGC'lerin kendiliğinden iyileşme performansını araştırmıştır. Bağlayıcı olarak uçucu kül ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak elde edilen jeopolimerler polivinil alkol lifi ile güçlendirilerek EGC karışımları hazırlamıştır. 7 günlük su küründen sonra çatlakların tamamen kapandığı gözlemlenirken, hava ile kürlenmiş numunelerde iyileşme belirtisi gözlenmemiştir. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin Si ve Al bakımından zengin ancak Ca bakımından düşük olduğu bildirilmiştir. Çeşitli analizler sonucunda, oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerinin ilave jeopolimerizasyondan kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Çimentolu sistemlerde gözlenen iyileşme ürünü olan kalsiyum karbonatın jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde oluşamayacağı belirtilmiştir.

Kan ve diğeri (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada alüminosilikat kaynağı olarak iki farklı tip uçucu kül (yüksek ve düşük kalsiyum tipi) ve metakaolin kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen kompozitler, yüzeyi yağ kaplı polivinil alkol lifi kullanılarak güçlendirilmiştir. Numuneler tek eksenli çekme deneyi ile önceden önyüklenmiş ve daha sonra sürekli hava ve ıslanma-kuruma döngülerine maruz bırakılmıştır. Kürün sonunda kendiliğinden iyileşme ürünleri, çatlak özellikleri ve çekme özellikleri kimyasal ve mikroyapısal analizlerle analiz edilmiştir. Analizler sonucunda EGC'nin yüksek şekil değiştirme sertleşmesi performansı sergilediği ve 25 µm'dan küçük olan çatlakların oluştuğu belirtilmektedir. Kendiliğinden iyileşme gelişimi açısından hava ile kürlenmenin ıslanma-kuruma döngülerinden daha etkili olduğu belirtilmektedir. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin, esas olarak jeopolimerizasyondan kaynaklanan jel benzeri malzemeler olan amorf alüminosilikat fazları olduğu çeşitli analizler gerçekleştirilerek belirtilmiştir.

Guo ve Yang (2020), gerçekleştirdikleri çalışmada bağlayıcı olarak uçucu kül ve cürufun çeşitli kombinasyonlarını kullanarak kompozit üretimi gerçekleştirmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın bir kombinasyonu kullanılmıştır. Yeterli süneklik sağlamak için polivinil alkol lifi tercih edilmiştir. Kompozitlerin basınç dayanımı, çekme özellikleri ve mikro çatlak özellikleri araştırılmıştır. Analizlerden sonra, daha iyi mekanik özelliklere sahip numuneler dört noktalı eğilme testi ile önceden yüklenmiş ve 56 gün boyunca sürekli hava kürü sonrasında kendiliğinden iyileşme özellikleri incelenmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak, çatlaklarda gözlenen kendiliğinden iyileşme ürünlerinin yapısında C-S-H ve N-A-S-(H) jelleri bulunmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde kendiliğinden iyileşmenin, reaksiyona girmemiş parçacıkların daha fazla jeopolimerizasyon reaksiyonlarına atfedilebileceği yani çimentolu malzemeler için rapor edilen devam eden hidratasyon kavramına benzer olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

2.2.1.3. Çözülmemiş Problemler

Kendiliğinden iyileşme reaksiyon mekanizması ve oluşan kendiliğinden iyileşme ürünleri hakkında jeopolimer bağlayıcılı malzemeler üzerinde çok fazla çalışma gerçekleştirilmemiş ve bu nedenle birçok şey hala bilinmemektedir. Özellikle İYA bazlı jeopolimer malzemelerde kendiliğinden iyileşme performansı hakkında literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle İYA bazlı jeopolimerin kendiliğinden iyileşme mekanizmasını ve oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerinin yapısının belirlenmesi gerekmektedir. Ek olarak kendiliğinden iyileşme, portland çimentolu bağlayıcı malzemeler için kapsamlı bir şekilde uzun bir süredir araştırılmıştır. Çimento bağlayıcılı malzemelerde kendiliğinden iyileşmenin sağlanabilmesi için genellikle kimyasal sebeplerin (ilave hidratasyon reaksiyonları ve kalsiyum karbonat oluşumu) gerçekleşmesi gerekmektedir. Çatlakların kendiliğinden iyileşmesinde ilave hidratasyon reaksiyonları ve kalsiyum karbonat oluşumu olmak üzere her iki sebebin etkili olduğu düşünüldüğünde jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde kendiliğinden iyileşmeye sebep olan mekanizmalar önemli farklılıklar

gösterecektir. Ek olarak jeopolimer bağlayıcı malzemelerde geleneksel kür koşulu olarak ısıtılma tercih edilmekte ve ısıtılma jeopolimer matrisin nihai dayanımına oldukça kısa sürelerde ulaşmasını sağlamaktadır. Bu durum çimento bağlayıcı malzemelerde kendiliğinden iyileşme mekanizmasının bir diğer sorumlusu olan devam eden hidrasyon reaksiyonlarının jeopolimer bağlayıcı malzemelerde de devam eden reaksiyonlar ile oluşması yolunu kapatmaktadır. Bu nedenle ortam koşullarında ve suda kür edilerek dayanım kazanma kabiliyeti jeopolimer bağlayıcı malzemelerin kendiliğinden iyileşme işlevselliği gösterebilmeleri için önem arz etmektedir.

2.3. Geri Dönüşüm Agregasının Gözden Geçirilmesi

Bu bölümde geri dönüşüm agregası hakkında literatür araştırması sunulmuştur. Geri dönüşüm agregasının tarihsel gelişimi, içeriği ve karakteristik özellikleri üzerinde durularak önceki araştırma bulguları değerlendirilerek performansı kısaca gözden geçirilmiş ve geri dönüşüm agregasının kullanım zorlukları göz önünde bulundurularak çözülmemiş sorunları ana hatlarıyla verilmiştir.

2.3.1. Geri Dönüşüm Agregası

2.3.1.1. Gelişim Tarihi

Kaliteli agregaların azalması ve agrega gereksinimindeki artış, ham maddelerin bulunabilirliğini daha nadir hale getirmiştir. Bununla birlikte İYA'ların beton üretiminde agrega olarak kullanılması araştırmacıların uzun süredir ilgisini çeken konulardan biridir (Khalaf ve DeVenny, 2004). İYA'nın agrega olarak efektif bir biçimde kullanılması doğal agrega kullanımını azaltarak doğal agreganın üretiminde harcanan enerji sarfiyatını, kurulan madenler ile doğaya verilen zararı minimuma indireyecek ve doğrudan İYA'nın sorumlu olduğu çevresel problemlerin ve ekonomik zararların önüne geçebilecek bir potansiyele sahiptir (Limbachiya ve diğerleri, 2012).

İYA'nın bağlayıcı olarak ya da geri dönüşüm agregası olarak geri dönüşümü yapı malzemelerinin yaşam döngüsünü arttırarak sürdürülebilir yapı malzemelerine yönelimin önünü açacak en önemli etkenlerden biridir. İYA'nın geri dönüşümü ilk olarak İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Almanya'da gerçekleştirilmiştir (Khalaf ve DeVenny, 2004). Almanya'da, İkinci Dünya Savaşı'ndan hemen sonra yeniden yapılanma döneminde, inşaat malzemelerine muazzam bir talep artışı gerçekleşmiştir. O dönemde İYA'ların yeniden kullanımı, yapı malzemelerine olan ihtiyacı karşılamak ve yıkılan şehirlerden yıkıntı atıklarının çıkarılmasını mümkün kılmıştır. İYA'ları tekrar kullanmak için o zamanki Federal Almanya Cumhuriyeti'nde yıkıntı atığı geri dönüşüm tesisleri kurularak 1955 yılı sonuna kadar yaklaşık 11,5 milyon m³ geri dönüşüm agregası üretilmiştir (Hansen, 1986). İYA'nın agrega olarak geri dönüşümüyle ilgili bilimsel araştırmalar, özellikle İkinci Dünya Savaşı'nın sona ermesinden sonra hız kazanmıştır (Kou, 2006; Leite, 2001; Solyman, 2005). 1978'de Nixon, konuyla ilgili ilk modern makaleyi yayınlamıştır (Nixon, 1978). Nixon (1978), gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda, ince geri dönüşüm agregasının kullanımının, betonun basınç dayanımı üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığını, bununla birlikte işlenebilirliğini azalttığını belirtmiştir. Hansen (1986), gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda, geri dönüşüm agregası kullanılırken 2 mm'nin altındaki tanelerin beton üretimi için kullanılmaması gerektiğini açıkça belirtmiş ve bunları kullanmanın başka yollarını önermiştir. Gottfredsen ve Thøgersen (1994), gerçekleştirdikleri çalışmalar sonucunda, doğal agregaların geri dönüşüm agregası ile değiştirilmesinin sadece 4 mm'den büyük taneler için geçerli olduğunu, çünkü diğer taneler ile yapılan betonun dayanımı ve işlenebilirliğinin zayıf olduğunu bildirmiştir. 1980'lerin başından bu yana, geri dönüşüm agregası kullanımı Avrupa ülkelerinde çevre dostu beton üretiminde önem kazanmıştır. O yıllardan beri, geri dönüşüm agregası kullanılarak betonun farklı özelliklerini değerlendirmek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Önceki çalışmalar geri dönüşüm agregasının beton üretmek için doğal agregaların yerine başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ve normal yapısal betonun gerekli performansını karşıladığını göstermiştir. Günümüzde hem yapısal hem de yapısal olmayan uygulamalar için geri dönüşüm agregası beton içerisinde kullanılmaktadır. Birçok ülkede İYA'nın geri dönüşümü için geri dönüşüm tesisleri hali hazırda faaliyet göstermektedir. Kullanımının ticari ve teknik olarak uygun olduğu tespit edilmiştir.

Geri dönüşüm agregasının beton içerisinde kullanımı kurallar ve prosedürler gerektirmektedir. Bu nedenle bazı ülkeler, beton üretimi için geri dönüşüm agregasının kullanım sınırlarını ve kabul kriterlerini belirleyen mevcut şartlara yeni şartnameler veya ekler hazırlamaktadır. Genel olarak ince geri dönüşüm agregasının beton üretiminde kullanımı, sıklıkla yukarıda belirtilen ilk araştırmalar temelinde, betonun taze ve sertleştirilmiş özelliklerini tehlikeye atabilecek daha büyük su emilimi nedeniyle oldukça kısıtlıdır veya hatta yasaklanmıştır. Bunun nedeninin, zayıf arayüzey geçiş bölgesi yaratan ve matris ile ince tozlar arasında düzgün bağlanmayı önleyen yüksek yüzey alanına ve eski yapışık harçtan dolayı olduğu düşünülmektedir (Tam ve diğerleri, 2005; Katz ve Baum, 2006). Daha önceki araştırmalar ışığında geri dönüşüm agregası ile üretilen betonda, her zaman kaba geri dönüşüm agregasının doğal kum ile birlikte kullanılması tavsiye edilir. Uygulanan bu sınırlamalara ve önerilere rağmen daha yeni bilimsel çalışmalar, ince geri dönüşüm agregasının yapısal betonda kullanılmasının ve özelliklerinin kabul edilebilir seviyelerde tutulmasının mümkün olduğunu göstermiştir (Leite, 2001; Solyman, 2005; Khatib, 2005; Evangelista ve de Brito, 2007; Evangelista ve de Brito, 2010). İnşaat ve yıkıntı atıkları daha önce de belirtildiği gibi katı atıkların önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Beton atığı yaklaşık %40'lık bir yüzdeyle en büyük inşaat ve yıkıntı atığı bileşenini oluşturmaktadır (Oikonomou, 2005). Yukarıda verilenler ışığında İYA agregaları 2 tipe ayrılmıştır. %95'i ve daha fazlası kırma betondan elde edilen agregalar geri dönüşüm beton agregası ve %100 oranında yığma yapılardan elde edilen agregalar ise geri dönüşüm agregası olarak tanımlanmaktadır. Ezilmiş betondan veya doğrudan inşaat ve yıkıntı atıklarından üretilen farklı geri dönüşüm agregaları, onlarla yapılan betonu çok farklı şekillerde etkileyen farklı özelliklere sahip olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Hansen, 1986; Nixon, 1978; Solyman, 2005; Schubert ve diğerleri, 2012). Tez çalışmaları kapsamında %100'ü kırma betondan elde edilen ince geri dönüşüm beton agregası kullanılmıştır. Bu nedenle ince geri dönüşüm agregasının özellikleri incelenmemiştir.

2.3.1.2. Geri Dönüşüm Agregası Hakkında Geçmişte Gerçekleştirilen Çalışmalar

Tane yoğunluğu ve su emilimi, geri dönüştürülmüş agregaların kalite kontrolünün en önemli parametreleri olarak kabul edilir. Betondan elde edilen ince geri dönüşüm beton agregası doğal kaba agrega ve yapışık harçtan oluşur. Eski çimento harcı çoğunlukla ince agrega, sulu ve susuz çimento tanecikleri içerir. Geri dönüşüm beton agregası kalitesi çoğunlukla uygulanacak geri dönüşüm yöntemlerine bağlı olmakla birlikte geri dönüşüm beton agregasının özellikleri esas olarak elde edildiği orijinal betonun S/B oranına bağlıdır (Hansen ve Narud, 1983). Geri dönüşüm beton agregası üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda ince normal agrega ile ince geri dönüşüm beton agregası arasındaki en belirgin farkın su emme kapasitesi olduğu görülmektedir. Geri dönüştürülen beton atığının agregalarının üzerine yapışmış halde bulunan çimento harcı sebebi ile yüksek su emme kapasitesine sahiptir (Poon ve diğerleri, 2004). Geri dönüşüm beton agregalarının gösterdiği yüksek su emme kapasitesi, hidrate olmuş çimento hamuru ile geri dönüşüm agregası arasında oluşan 2-4 µm genişliğindeki çatlaklar ile ilişkilendirilmiştir. Aynı zamanda ince geri dönüşüm beton agregasının yoğunluğunun ve birim hacim ağırlığının da ince normal agregaya göre düşük olduğu kabul edilmektedir. Bunun ana nedeni de agregaların üzerine yapışmış halde bulunan çimento harcıdır (Evangelista ve de Brito, 2007). Geri dönüşüm beton agregası üzerinde kalan harcın hacmi agrega boyutuna göre %25 ila %60 arasında değişmektedir (Hansen ve Narud, 1983). Bazı uluslararası komitelerin tavsiyelerine göre, su emme kapasitesi iri agregalar için %7'den fazla ve ince agregalar için %13'ten fazla olmaması arzu edilmektedir (Li, 2004). Geri dönüşüm beton agregasının üzerindeki kalıntı, yapışmış harç miktarı ile su emme kapasitesi doğru orantılı bir ilişki gösterebilir de agreganın yoğunluğu ile su emme kapasitesi ters orantılı bir ilişki içerisindedir (De Juan ve Gutiérrez, 2009). Geri dönüşüm beton agregası normal agregaya kıyasla düşük yoğunluğa sahiptir fakat bu yoğunluk farkının su emme kapasitelerinde olduğu kadar belirgin olmadığı bilinmektedir. Yoğunluk agregaya dair temel parametrelerden biri olmakla birlikte, beton karışımlarının tasarımı ve nihai ürünün birçok özelliğini belirleyen en önemli etkidir. Literatürde ince geri dönüşüm beton agregasının yoğunluğu ve su emme kapasitesi gibi karakteristik özelliklerine dair gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen veriler Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

Çizelge 2.3. İnce geri dönüşüm beton agregasının özellikleri ile ilgili literatürde mevcut çalışmalar (Evangelista ve de Brito, 2014'ten değiştirilerek)

Kaynak	Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	Su Emme (%)
Hasaba ve diğerleri (1981)	-	-	-	11
Chan (1998)	2,28	-	2,31	9,8
Fumoto ve Yamada (2002)	1,99-2,18	-	-	8,1-11,4
Gómez-Soberón (2002)	2,17	-	-	-
Katz (2003)	2,23	-	-	12,7
Lin ve diğerleri (2004)	2,25	-	-	11,3
Khatib (2005)	2,34	-	-	6,2
Solyman (2005)	2,36	2,56	2,48	8
Poon ve Chan (2007)	2,31	-	-	-
Evangelista ve de Brito (2007)	1,91	2,56	2,17	13,1
Levy ve Helène (2007)	-	-	2,32	10,3
Tangchirapat ve diğerleri (2008)	-	-	-	11,9
Corinaldesi ve Mariconi (2009)	-	-	-	8,8
Kou ve Poon (2009)	2,34	-	-	11,9
Pereira ve diğerleri (2012)	2,01	2,57	2,23	10,9
Yaprak ve diğerleri (2011)	2,31	-	-	4,28
Wang (2012)	1,95	-	2,16	10,7

ECC'nin ham maddelerinden biri olan kum neredeyse tükenmiştir, bu nedenle farklı çalışmalarda ince geri dönüşüm beton agregası kuma alternatif olarak kullanılmıştır.

Li ve diğerleri (2017), ince geri dönüşüm beton agregasının ECC üretiminde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için silis kumu yerine alternatif olarak kullanım potansiyelini araştırmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada maksimum tane büyüklükleri 2,36 mm 1,18 mm 600 µm ve 300 µm olan 4 farklı tane büyüklüğüne sahip ince geri dönüşüm beton agregası kullanarak ECC'nin mekanik performansını değerlendirmiştir. Maksimum tane boyutu 300 µm olan ince geri dönüşüm beton agregası kullanılarak üretilen ECC karışımlarının referans ECC karışımıyla basınç dayanımlarının aynı olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum ince geri dönüşüm beton agregası boyutu 300 µm'dan 600 µm'a yükseldiğinde, basınç dayanımının %20 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak daha büyük ince geri dönüşüm beton agregası kullanımının toplam arayüzey geçiş bölgesi

miktarını azaltmasına rağmen, 600 µm'luk daha büyük ince geri dönüşüm beton agregası kullanımı ile daha iri tanelerin matrisin hidratasyonu üzerindeki hızlandırıcı etkisini azaltmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte ince geri dönüşüm beton agregası boyutunun sürekli artmasıyla, basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak ince tanelerin matrisin hidratasyonu üzerindeki hızlandırıcı etkisinin artık önemli olmadığını ve bununla birlikte zayıf arayüzey geçiş bölgesi miktarının daha fazla azaltılmasıyla olduğu belirtilmiştir. Bütün karışımlar, kararlı durum çoklu çatlak oluşumu ve buna bağlı olarak şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermiştir. Ayrıca ince geri dönüşüm beton agregasının tane boyutunun eğilme dayanımları ve çekme şekil değiştirme üzerindeki etkisinin de basınç dayanımı üzerindeki etkisi ile benzer olduğu belirtilmiştir. Bu durum, matris gücünün azalmasının çoklu mikro çatlak oluşumunu desteklediğini ve ince geri dönüşüm beton agregası kullanılarak üretilen ECC'nin çekme şekil değiştirme kapasitesini arttırdığını göstermektedir. Ayrıca ince geri dönüşüm beton agregası içeriği arttıkça hem eğilme dayanımı hem de çekme şekil değiştirme kapasitesi azalmıştır. Bu, mikroyapısal incelemede ayrıntılı olarak incelenen artan matris tokluğuna bağlanmaktadır.

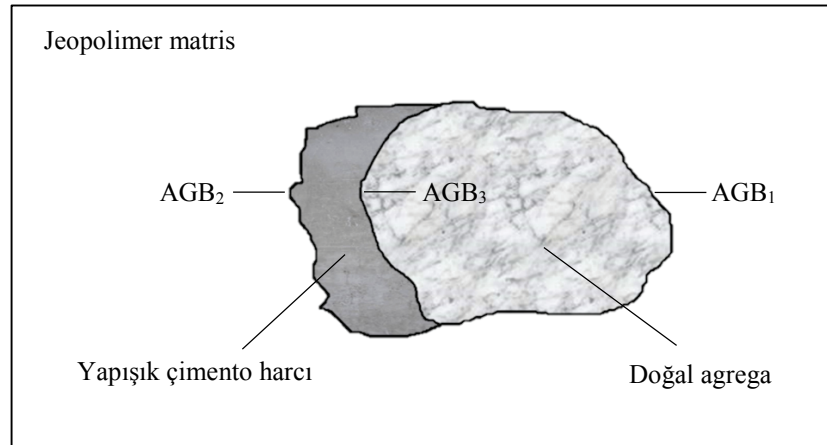
Gao ve diğerleri (2020), gerçekleştirdikleri çalışmada ince geri dönüşüm beton agregasının ECC üretiminde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için kum yerine alternatif olarak potansiyel kullanımını araştırmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada maksimum tane büyüklüğü 1,18 mm olan ince geri dönüşüm beton agregası kullanarak ECC'nin mekanik performansını değerlendirmiştir. Çalışmada, atık betonlar kırılmış ardından 1,18 mm'lik bir elekten elenerek ince geri dönüşüm beton agregası elde edilmiştir. Aradaki farkın daha etkin bir biçimde belirlenebilmesi için ince geri dönüşüm beton agregası ve ince agreganın özellikleri ayrıntılı olarak test edilmiştir. İnce geri dönüşüm beton agregası ve ince agrega ile hazırlanan ECC'nin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Hem ince geri dönüşüm beton agregası hem de ince agrega kullanılarak gerçekleştirilen karışımların her ikisi de lif ilavesi ile performanslarının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 lif içeren karışımlar için, ince geri dönüşüm beton agregası kullanıldığı karışımların basınç dayanımları ince agrega kullanılan karışımlardan sırasıyla %10,58, %6,67, %15,51, %18,45 ve %18,19 daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Eğilme dayanımları da basınç dayanımlarına benzer şekilde daha

yüksektir. %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 lif içeren örnekler için, ince geri dönüşüm beton agregasının kullanıldığı karışımların eğilme dayanımları, ince agregaya kullanılan karışımlara göre sırasıyla %2,17, %10,71, %13,21, %20,18 ve %22,5 daha yüksektir.

2.3.1.3. Çözülmemiş Problemler

ECC'nin mikromekanik tabanlı tasarım ilkelerine göre, agregaya içeriği ve tane büyüklüğü ECC'nin özelliklerini düzenleyen önemli faktörler olarak belirlenmiştir. Bu nedenle agregaya içeriği ve tane büyüklüğünün matris özelliklerini, matris-lif arayüz özelliklerini ve sonuçta ortaya çıkan EGC'nin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Sonuç olarak kompozitte sağlam bir şekil değiştirme davranışı sağlamak için EGC'de kullanılan agreganın miktarı ve tane boyutu iyi seçilmelidir. Bu çalışmada EGC hazırlamak için normal agreganın yerine maksimum tane boyutu 2 mm olan ince geri dönüşüm beton agregası kullanılmasına karar verilmiştir. Geri dönüşüm beton agregasının doğal agregaya kıyasla daha hızlı ve yüksek su emme kapasitesine sahip olması sebebi ile aynı S/B oranında doğal agregaya içeren bir karışıma kıyasla işlenebilirliği daha düşük olmakta ve bu işlenebilirliğin normal seviyelere yükseltilebilmesi için gereken sıvı miktarı da artış göstermektedir. İYA bazlı jeopolimerlerde S/B oranının mekanik performansı büyük ölçüde değiştirdiği düşünülmektedir. İnce geri dönüşüm beton agregası tane boyutu dağılımı, agregaya şekli ve boyutu, yoğunluğu, gözenekliliği, su emilimi gibi bazı belirgin özellikleri, betonda kullanılmadan önce mutlaka değerlendirilmelidir. Bu kapsamda tez çalışmalarında kullanılan ince geri dönüşüm beton agregası ve ince agreganın tane boyutu, yoğunluk ve su emme gibi karakteristik özellikleri ayrıntılı olarak test edilerek karşılaştırılacaktır. İnce geri dönüşüm beton agregası, doğal ince agregaya göre daha fazla ince malzeme içerir. Bu durum yukarıda bahsedildiği gibi gerekli işlenebilirliğin sağlanması açısından edişe uyandırmaktadır. Bununla birlikte ince geri dönüşüm agregasının yüksek ince malzeme içeriği ve buna bağlı olarak daha yüksek su emme oranı, işlenebilirlik kaybı yaşanmadığı takdirde, jeopolimer matriste belirli bir aktivite ve iyi bir dolgu etkisi sağlayacaktır. Böylece, ince geri dönüşüm beton agregası basınç dayanımını olumlu etkileyecektir. Daha yoğun matris nedeniyle ince geri dönüşüm beton agregası ile üretilen EGC karışımlarda, matris ve lif arasında daha yüksek bir

bağ oluşacaktır. İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı sağlanacağı da düşünülmektedir. Ancak bununla birlikte, ince geri dönüşüm beton agregasının pürüzlü yüzeylere sahip olması sonucu çekilen liflerin ciddi hasar görebileceği düşünülmektedir. Geri dönüşüm beton agregası eski yapışık harç veya onu çevreleyen çimento macununun varlığı nedeniyle eski bir arayüzey geçiş bölgesine sahiptir. Geri dönüşüm beton agregasının mikroyapısı, özellikle arayüzey geçiş bölgesinde (AGB) doğal agregadan çok farklı ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte doğal agrega ve jeopolimer matris arasındaki arayüzey geçiş bölgesi de geleneksel betondan farklıdır. İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak üretilen jeopolimer matrislerde Şekil 2.12’de gösterildiği üzere üç farklı arayüzey geçiş bölgesi bulunmaktadır. Birinci arayüzey geçiş bölgesi (AGB₁), geri dönüşüm beton agregası içerisindeki doğal agrega ve jeopolimer matris arasında bulunur. İkinci arayüzey geçiş bölgesi (AGB₂), geri dönüşüm beton agregası içerisindeki yapışık çimento harcı ile jeopolimer matris arasında bulunur. Son olarak, üçüncü arayüzey geçiş bölgesi (AGB₃), geri dönüşüm beton agregası üzerinde doğal agrega ve yapışık çimento harcı arasındadır. Dolayısıyla jeopolimer harcın mekanik performansı, arayüzey geçiş bölgesinin dayanım özelliğini önemli ölçüde etkilemesinden dolayı, her üç arayüzey geçiş bölgesinin performansının bir sonucudur.



Şekil 2.12. İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak hazırlanan EGC’de bulunan farklı arayüzey geçiş bölgelerinin şematik olarak gösterilmesi

İnşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi sonucunda kaba agregaya ek olarak önemli miktarda ezilmiş ince malzeme (0-2 mm veya 0-4 mm) açığa çıkmaktadır. İnce malzemenin 0-2 mm'lik kısmının yaklaşık %20 ile %40 arasında olduğu düşünülmektedir. Bu durum, İYA'lerden açığa çıkan ezilmiş ince malzeme miktarlarının önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artacağını göstermektedir. EGC'nin hazırlanmasında gerekli kırma ve eleme işlemlerinin ardından orijinal tane büyüklüğü dağılımı olan ince geri dönüşüm beton agregası kullanılmıştır. Tez çalışmaları kapsamında bu şekilde iki ana hedefe ulaşılması beklenmektedir. İlk olarak ham madde sürecindeki adımları ve toz kirliliğini azaltmak, ikinci olarak ise şekil değiştirme sertleşmesi davranışına ve yüksek basınç ve eğilme dayanımlarına sahip EGC üretmek için daha büyük boyut ve daha yüksek miktarda ince geri dönüşüm beton agregası kullanımını EGC'de bir avantaj haline getirmektir.

3. DENEYSEL PROGRAM

Bu bölümde, kullanılan malzemeler kısmında tez çalışmasının deneysel çalışmalarında kullanılan malzemelerin elde edilişı, boyut ve içerik özellikleri gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilerek analizleri detaylı olarak sunulmuştur. Yöntem kısmında çalışmanın aşamaları, karışım yöntemleri, karışımların üretim prosedürleri, karışımların kürü, test parametreleri tüm detayları ile sunulmuştur.

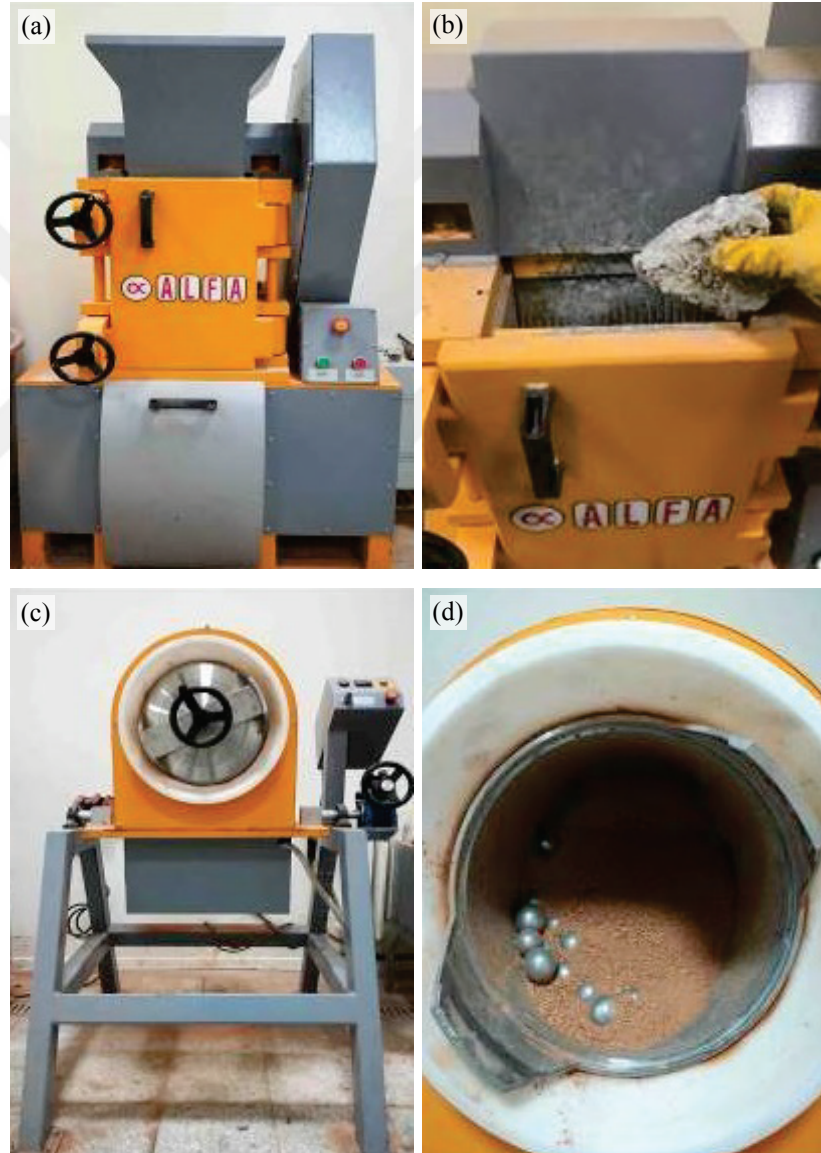
3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde, bağlayıcı toz malzemeler kısmında çatı kiremiti (ÇK), harman tuğla (HT), delikli tuğla (DT), cam tozu (CT), beton tozu (BT) ve öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun (ÖGYFC) fiziksel ve kimyasal özellikleri detaylı olarak sunulmuştur. Alkali aktivatör kısmında sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) fiziksel ve kimyasal özellikleri detaylı olarak sunulmuştur. Geri dönüşüm agregası kısmında ince geri dönüşüm beton agregasının (İGDBA) karakteristik özellikleri sunulmuştur. Son olarak lifler kısmında tez çalışmaları kapsamında kullanılan polivinil alkol (PVA), polietilen (PE), naylon-mono (NM) ve polipropilen (PP) liflerin tüm özellikleri detayları ile sunulmuştur. Her bir malzemenin kullanılma nedeni hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Bağlayıcı Toz Malzemeler

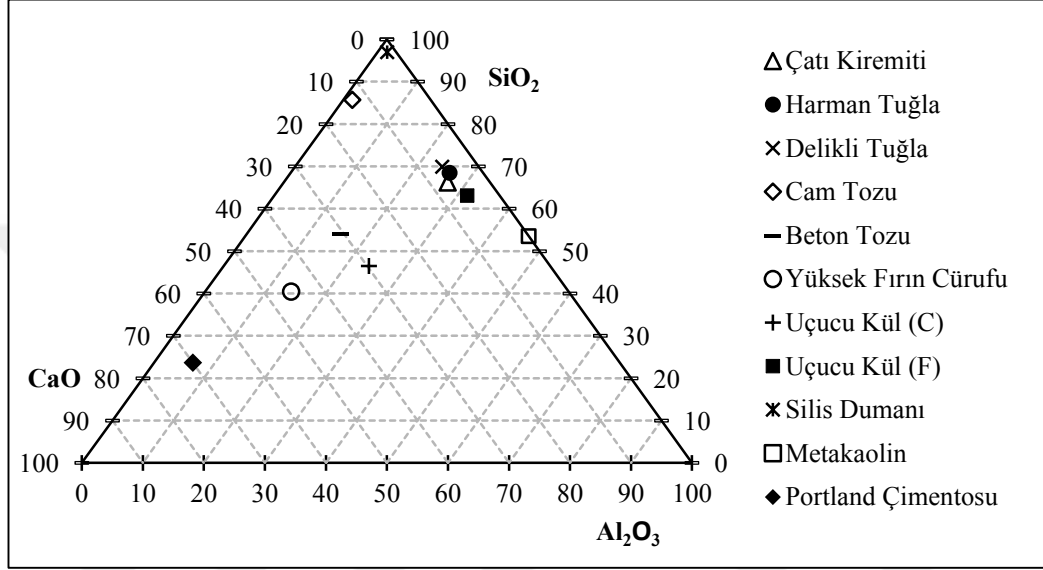
Tez çalışmaları kapsamında üretimlerde inşaat ve yıkıntı atığı tabanlı malzemeler bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler; çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, cam tozu ve beton tozu olmak üzere 5 farklı gruba ayrılmıştır. Bu malzemelere ek olarak demir-çelik üretiminde yan/atık ürün olarak açığa çıkan ve geleneksel beton ve jeopolimer teknolojisinde başarılı bir şekilde kullanılan öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun bazı karışımlarda kullanılmasına karar verilmiştir. Ankara'nın çeşitli bölgelerinden seçici yıkım metoduyla elde edilen inşaat yıkıntı atığı tabanlı

malzemeler her biri ayrı ayrı olarak laboratuvar tipi çeneli kırıcının çene aralıkları 1 mm'ye getirilerek kırılmıştır (Şekil 3.1). Daha sonra yine laboratuvar tipi olan bilyalı değirmende 1 saat öğütülmüştür (Şekil 3.1). Optimum öğütme süresi olarak belirlenen 1 saat sonunda bütün malzemeler yaklaşık çimento inceliğine getirilmiştir. Çeşitli inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen bağlayıcı kaynak malzemelerin ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri bu bölümde detaylı olarak sunulmuştur.

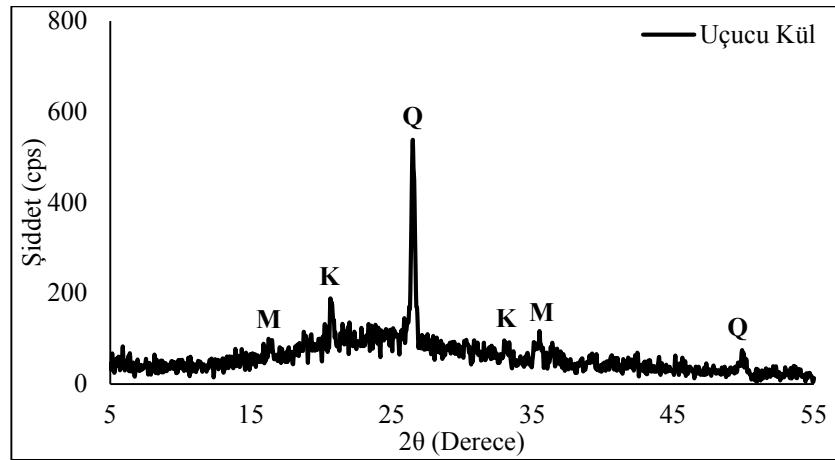


Şekil 3.1. (a) (b) Çeneli kırıcı ve (c) (d) bilyalı değirmenin görüntüleri

İnşaat yıkıntı atıklarının ve referans olması açısından uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin ve çimentonun SiO_2 - Al_2O_3 - CaO üçlü diyagramındaki pozisyonları Şekil 3.2’de görülmektedir. Ayrıca literatürde jeopolimer üretiminde başarılı bir şekilde kullanılan kaynak malzemelerinden birisi olan uçucu külün XRD analizi Şekil 3.3’te ve XRF analizi ise Çizelge 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.2. İnşaat yıkıntı atıklarının, mineral katkıların ve portland çimentosunun SiO_2 - Al_2O_3 - CaO üçlü diyagramı üzerindeki pozisyonları



Şekil 3.3. Uçucu külün XRD faz diyagramı (K: Katoite, M: Mullite, Q: Quartz)

Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal analizi

Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	KK
Uçucu kül	60,67	21,35	7,41	0,99	1,82	0,22	0,99	2,91	2,61
KK: Kızdırma kaybı									

3.1.1.1. Kiremit ve Tuğla Tozları

Çeşitli inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen kiremit ve tuğla tozlarının özelliklerini incelerken kiremit ve tuğlaların üretim yöntemleri ve üretiminde kullanılan ham maddelerin özelliklerini de incelemek gerekmektedir. Kiremit ve tuğla ham maddesi kaynakları, bünyesinde yüksek miktarda kil içeren killi topraklardır. Killi toprakların bünyesinde kil ile birlikte bir miktar siltin bulunması da istenmektedir. Kiremit ve tuğlalar kil bazlı toprağın standartlara uygun şekilde toplanıp uygun şartlarda depolanmasının ardından, öğütülerek şekillendirilmeye hazır hale getirilip, kurutularak yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen yapı malzemeleridir (Zal, 2010). Kiremit ve tuğla üretim aşamalarında ilk olarak gerekli standartları karşılayan ham maddenin seçilmesi ve hazırlanması gelmektedir. Ham madde seçiminde kil bazlı toprağın kalitesi kiremit ve tuğlanın ürün kalitesi açısından en önemli noktaların başında gelmektedir. Kiremit ve tuğla üretiminde genel olarak illit, kaolinit ve az miktarda montmorillonit kil mineralleri kullanılmaktadır. Bu minerallere ek olarak kilin bünyesinde az miktarda kalker, kuvars ve demir mineralleri de bulunmaktadır. Kiremit ve tuğla üretiminde ham madde olarak seçilen kil bazlı toprağın bünyesinde %20'den az kum, %8'den az demir oksitler, %8'den az kalsiyum oksit ve çok az miktarda demir karbonatlar, demir sülfatlar ve organik maddeler bulunması gerekmektedir. Ayrıca tuğla ve kiremit üretimi için seçilen kil bazlı toprağın bünyesinde kum, çakıl gibi iri materyaller içermemesi gerekmektedir. Ham madde seçimi ve seçilen ham maddelerin depolanmasının ardından ham madde işlenmesi sırasında daha homojen hale gelebilmesi ve gerekli işlenebilirliği sağlaması için istenilen tane boyutuna kadar öğütülmektedir. Öğütme işleminin ardından kil yeterli plastikliği sağlayacak şekilde su ile karıştırılıp homojen bir kil hamuru elde edilmektedir. Homojen ve yeterli plastiklikte kil hamuru elde edildikten sonra bir süre dinlendirilmektedir. Daha sonra kalıplama, presleme ve ekstrüde yöntemleri

kullanılarak kil hamuru şekillendirilmektedir. Ardından şekillendirilen kil hamurunun bünyesindeki su, suni ve doğal kurutma yöntemleri ile uzaklaştırılmaktadır. Kurutma işleminin ardından pişirme işlemine geçilerek kil hamuru çeşitli kimyasal reaksiyonlara uğramaktadır. Pişirme esnasında ilk olarak 300°C sıcaklığa maruz kalan kilin bünyesinde organik maddelerin hepsi yanmaktadır. Sıcaklık 450°C-650°C değerlerine ulaştığında ise kil molekül suyunu kaybetmektedir. Son olarak sıcaklık 850°C-900°C değerlerine ulaştığında yeni bir malzeme oluşur ve bu sıcaklıklarda pişen kil; sert, belirli dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip bir malzemedir. Daha sonra pişirilen kil hamuru ani soğutma ile 600°C'ye kadar soğutulmaktadır. Bu değerden sonra yavaş soğuma ile 600°C-450°C'ye kadar soğutulmaktadır. Daha sonra normal soğutma ile 450°C'den soğutulmaktadır. Çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlanın özgül ağırlıkları sırasıyla 2,88, 2,81 ve 2,89 g/cm³'tür. Çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlanın dijital kamera altındaki görüntüsü ve morfolojik özelliklerini tanımlamak için SEM altındaki görüntüsü Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlanın dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında ham, kırılmış, öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)

3.1.1.2. Cam Tozu

Camın insanlar tarafından ilk üretimi, arkeologların el yapımı cam boncuklar buldukları MÖ 3500 yılı Mezopotamya Uygarlığına dayanmaktadır (Le Bourhis, 2014). Cam yapım teknolojisi, o zamandan beri, birçok modern tesisle açıkça ilerlemiştir (Le Bourhis, 2014). Günümüzde cam üretiminde temel ana ham madde olarak kum, soda külü, kireç taşı ve kırık cam kullanılmaktadır. Bu malzemeler ve çeşitli katkı maddeleri yaklaşık 1500°C'ye kadar ısıtılır, eritilen karışım istendiği şekle kalıplanarak soğutulur ve cam üretilir (Le Bourhis, 2014). Ticari olarak üretilen cam tipleri; soda-kireç camı, kurşun cam, soda borosilikat cam, alüminosilikat cam, silika cam (%96 ve %99), erimiş silika cam olmak üzere altı ana kategoriye ayrılmaktadır. Günümüzde ticari olarak en ekonomik ve en yaygın olan soda-kireç camı kullanılmaktadır (Varshneya ve Mouro, 2019). Üretilen tüm camların yaklaşık %90'ını soda-kireç camları oluşturmaktadır (Keser, 2010). Soda-kireç camları; pencere, ampul, bardak, kavanoz camlarında kullanılmaktadır. Çizelge 3.2'de soda-kireç camının tipik kimyasal analizi gösterilmektedir (Varshneya ve Mouro, 2019).

Çizelge 3.2. Soda-kireç camının tipik kimyasal analizi (Varshneya ve Mouro, 2019)

Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O
Soda-kireç camı	72	2	12	13

Dünya çapında yılda ortalama 65 milyon tonu aşan miktarlarda atık cam açığa çıkmaktadır (Escalante-Garcia, 2015). Atık cam geri dönüşüm oranları son derece düşüktür. Açığa çıkan atık miktarının 20 milyon tondan daha azı geri dönüştürülmüştür (Martinez-Lopez ve Escalante-Garcia, 2016). Geri dönüştürülebilirliği arttırmaya yönelik bir girişim olarak birçok araştırmacı camın çimento içerisinde puzolanik özelliğini araştırmıştır. Araştırmacılar ince cam tozunun yeterli puzolanik özelliklere sahip olduğunu bildirilmiştir (Shao ve diğerleri, 2000; Shi ve diğerleri, 2005; Schwarz ve diğerleri, 2008; Shayan ve Xu, 2006; Mirzahosseini ve Riding, 2014). Çimentonun cam tozu ile kısmen değiştirilmesiyle yapılan betonlar, uçucu kül ikameli betonlarla

kıyaslanabilir bir performans göstermiştir (Schwarz ve diğerleri, 2008). Bununla birlikte son yıllarda birçok araştırmacı alkali aktif bağlayıcılara ilave olarak farklı kaynaklardan atık cam tozu kullanarak çalışmalar gerçekleştirmiştir (El-Naggar ve El-Dessouky, 2017; Lu ve Poon, 2018). Birçok durumda jeopolimerlerin karşılaştığı en büyük sorunlardan birinin alüminosilikat malzemelerin mevcudiyeti ve mevcut malzemelerdeki değişkenlik sorunu olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, camı kullanmanın daha verimli bir yolu aktivatörün bir parçası olmaktan ziyade kaynak malzeme olarak kullanılmasıdır. Bu durum, camın jeopolimerler için bir kaynak malzemesi olarak araştırılmasına ve atık cam tozunun jeopolimerin oluşumu için yetersiz reaktif alümina içerdiğinin farkına varılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte yıkıntı atıklarının yetersiz reaktif silika içeriğinin olduğu durumlar da olabilmektedir. Kimyasal içeriklerine göre malzemelerin tek başlarına kullanılması söz konusu olabileceği gibi birden fazla malzemenin belirli oranlarda bir araya gelmesiyle de kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu iki durum göz önüne alınarak tez çalışması kapsamında öncelikle atık camın alkali aktivasyonu ve yıkıntı atıklarına ilavesiyle doğal olarak yetersiz alümina içeriğinin artırılmasının etkilerine dayanan bir jeopolimer sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Atık cam tozunun jeopolimer bağlayıcı sisteminin aşağıda sıralanan özellikleri etkileme potansiyeli vardır:

- Aktivatör çözeltisinde sodyum silikat formunda önceden çözülmüş silika ihtiyacını azaltarak geliştirilen jeopolimer bağlayıcılı malzemenin kaynaklanan karbondioksit salınımı daha da azaltılabilir,
- İnşaat yıkıntı atığı bazlı alüminosilikat kaynak malzemelerin yetersiz SiO_2 içeriğinin, amorf SiO_2 açısından iyi bir kaynak olan cam tozu eklenerek kaynak malzemenin kalitesi iyileştirilebilir,
- Birçok ülkede şu anda büyük bir sorun olan atık camın geri dönüşüm miktarı artırılabilir.

Ek olarak camın tanecik boyutu, daha küçük taneciklerin daha hızlı çözündüğü çözünme hızı ve derecesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olması nedeniyle çok önemlidir (İler, 1979). Ancak tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda cam atığı da diğer atıklar ile aynı sürede öğütülerek kullanılmıştır. Cam tozunun özgül

ağırlığı 2,51 g/cm³'tür. Cam tozunun dijital kamera altındaki görüntüsü ve morfolojik özelliklerini tanımlamak için SEM altındaki görüntüsü Şekil 3.5'te sunulmuştur.

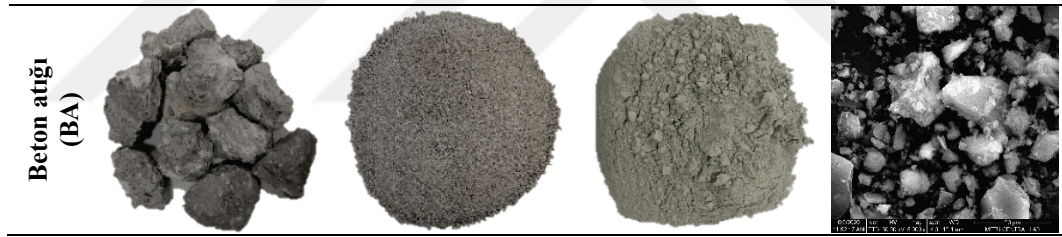


Şekil 3.5. Cam atığının dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında ham, kırılmış, öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)

3.1.1.3. Beton Tozu

Çok az araştırmacı atık betonun tamamen geri dönüşümünü araştırmıştır (Tomosawa ve Noguchi, 2014). Bu tam geri dönüşüm yöntemlerinin, standart çimento fırını prosedürlerini kullanarak hidrasyona uğramış çimentoyu yeniden klinker etmesi ve böylece önemli miktarda enerji tüketmesi ve büyük miktarda karbondioksit salınımına sebebiyet vermesi gerekmektedir. Atık betonu sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde tamamen geri dönüştürmek ve kullanmak için, yüksek sıcaklıkta yeniden klinker gerektirmeyen bir yöntem kullanılmalıdır. Atık betonun tamamen geri dönüştürülebilmesi için, beton içerisinde bulunan agregaların ve sertleşmiş çimento harcının birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu, beton atığının içerisinde bulunan agregaların ve sertleşmiş çimento harcının birlikte kırılarak geri dönüşüm agregası olarak kullanılması veya birlikte öğütülerek dolgu maddesi olarak ve jeopolimer bağlayıcı olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Agregaya yüzeyindeki yapışık çimento harcı, beton atıklarının geri dönüşüm beton agregası olarak kullanılmasını sınırlandıran en büyük engellerden biridir. Beton atığının jeopolimer bağlayıcı olarak kullanılmasıyla agregaya yüzeyindeki yapışık çimento harcı agregayla birlikte öğütüldüğünde silika ve kalsiyum kaynağı olarak jeopolimerizasyona katılacak ve yeni bağlayıcı oluşturacaktır. Atık betonun jeopolimerizasyon yoluyla geri dönüşümü

hakkında sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır (Allahverdi ve Najafi Kani, 2009; Yang ve diğerleri, 2009; Yang ve diğerleri, 2010). Beton tozunun kimyasal kompozisyonu incelendiğinde, jeopolimer bağlayıcılar için öncü alüminosilikat kaynak malzeme olarak kullanılabileceği görülmektedir. Bununla birlikte, beton atıklarının yarı kristalli yapısı nedeniyle yüksek dayanımlara ulaşmak için ek olarak reaktif alüminosilikat kaynağının kullanılması gerekmektedir. Tez çalışmalarında özellikle beton atığında, hidrate olmamış ürünlerin elde edilebilmesi için farklı kırıcı açıklıklarından öğütme ve eleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ancak yapılan ön denemeler neticesinde farklı açıklıkta kırıldıktan sonra öğütülen beton tozları için dayanım sonuçlarının benzer olduğu görülmüştür. Bu sebeple öğütme işleminin daha etkili olması amacıyla beton atığı da herhangi farklı bir işleme tabi tutulmadan içerisindeki agrega ile beraber öğütülmüştür. Beton tozunun özgül ağırlığı $2,68 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Beton tozunun dijital kamera altındaki görüntüsü ve morfolojik özelliklerini tanımlamak için SEM altındaki görüntüsü Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6. Beton atığının dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında ham, kırılmış, öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)

3.1.1.4. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Basitçe "cüruf" olarak da adlandırılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, demir üretim tesislerinde bulunan yüksek fırınlarda pik demir üretimi esnasında çıkan metalik olmayan bir yan ürün olan yüksek fırın cürufunun çeşitli işlemlerden geçirilmesiyle puzolanik özellik kazandırılması sonucu oluşan kısmen hidrolik özelliği olan bir malzemedir. Eriyik halde yüksek fırından çıkarılan cüruf soğutma işlemine

bağlı olarak 2 tipte oluşturulabilmektedir. Havada soğutma yöntemi uygulanarak yavaş bir şekilde soğutulursa kristal yapıya sahip olmaktadır. Bu tip cüruf lar hidrolik bağlayıcı özellik göstermezler. Peletleme ya da su jetleriyle soğutma yöntemi uygulanarak çok hızlı soğutulursa iri kum tanelerine benzer amorf yapıya sahip granül bir malzeme olmaktadır. Daha sonra bu malzeme öğütülerek kısmen hidrolik bağlayıcı olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruf u elde edilmektedir.

Cüruf un ana bileşenlerinin %90'ını kalsiyum oksit (CaO), silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve magnezyum oksit (MgO) oluşturmaktadır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri, demir üretiminde kullanılan ham maddelere ve endüstriyel süreçte bağlı olarak değişmektedir (Bakharev ve diğerleri, 1999). Cüruf ve su arasında herhangi bir önemli reaksiyonun meydana gelmesi için bir aktivatör gereklidir. Yüksek alkali ortamların uygun aktivatörler olduğu kanıtlanmıştır. Neyse ki, çimento hamurunun gözenek çözeltisi temel olarak alkali hidroksitlerden oluşur ve bu nedenle mükemmel bir aktivatör sağlar. Cüruf 1905 yılından itibaren portland çimentosuyla harmanlanarak beton üretiminde kullanılmaktadır. Cüruf un alkali aktivasyonu ve geleneksel betonda portland çimentosuyla birlikte kullanımı, endüstriyel yan ürünlerin kullanılması ve çimento üretiminde enerji tasarrufu için büyük bir potansiyele sahiptir (Idorn ve Roy, 1984). Son yıllarda çimentoya alternatif bağlayıcılara olan büyük ilgi nedeniyle cüruf ların alkali aktivasyonu ile ilgili birçok araştırma yapılmış ve çimentoya iyi bir alternatif olduğu bildirilmiştir (Palomo ve diğerleri, 1999; Bakharev ve diğerleri, 1999; Gruskovnjak ve diğerleri, 2006). İYA'ların jeopolimerizasyon sürecinde ortaya çıkan dezavantajlarını bertaraf etmek ve özelliklerini geliştirmek amacıyla seçilen karışımlara cüruf ikame edilmesine karar verilmiştir. İYA esaslı jeopolimerlerin zengin kalsiyum içerikli cüruf ile beraber üretildiklerinde jeopolimerlerin mekanik özelliklerinin ortam şartlarında geliştirilebilir olduğu düşünülmüştür. Alüminosilikat kaynaklı malzemelerin cüruf karışımları sonucu cüruf ekstra C-A-S-H jeli oluşturmaktadır (Richardson ve diğerleri, 1994; Brough ve Atkinson, 2002; Ravikumar ve diğerleri, 2010; Puertas ve diğerleri, 2011; Bernal ve diğerleri, 2012). İYA bazlı jeopolimerlerde N-A-S-(H) jeli oluşmaktadır (Mahmoodi ve diğerleri, 2020). Bu durumda İYA ile cüruf karışımlarında N-A-S-(H) ve C-A-S-H olmak üzere iki farklı jel oluşur. Bu kapsamda her iki jelin oluşması ve performansın geliştirilmesi adına çeşitli karışımlarda %20 oranında ikame edilmiş cüruf

kullanılmasına karar verilmiştir. Karışımlarda kullanılan cüruf Türkiye'deki Hatay-İskenderun Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Cürufun özgül ağırlığı 2,8 g/cm³'tür. Cürufun dijital kamera altındaki görüntüsü ve morfolojik özelliklerini tanımlamak için SEM altındaki görüntüsü Şekil 3.7'de sunulmuştur.

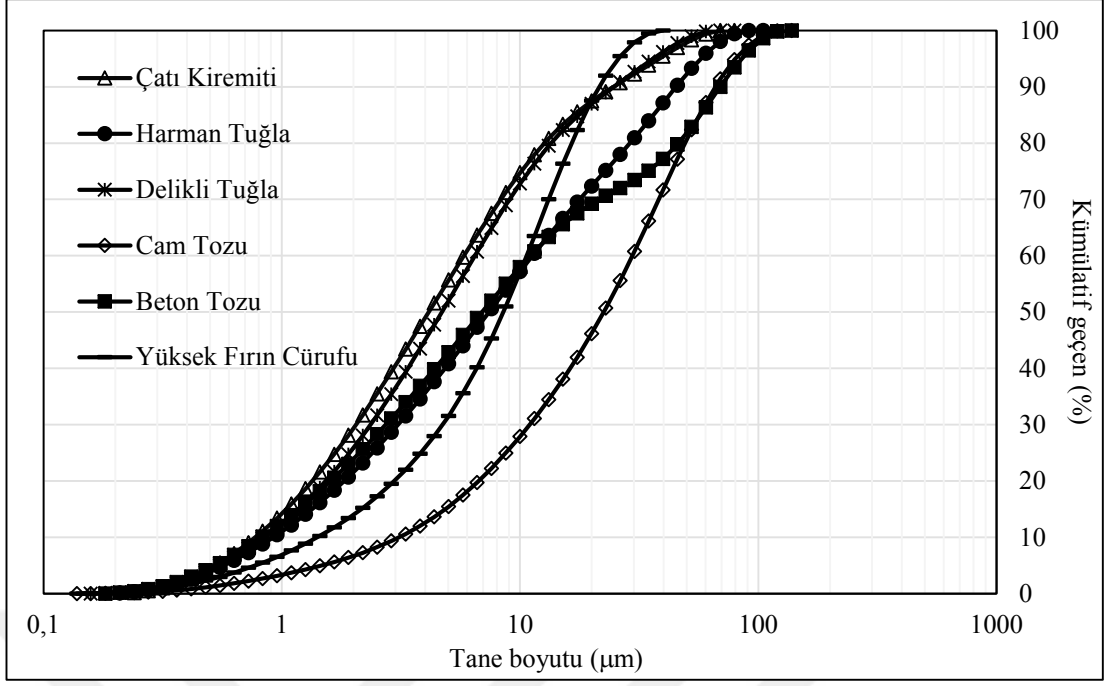


Şekil 3.7. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun dijital kamera ve SEM görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; dijital kamera altında öğütülmüş ve SEM altında öğütülmüş görüntüsü)

3.1.1.5. Bağlayıcı Toz Malzemelerin Fiziksel ve Yapısal Özellikleri

Bağlayıcı toz malzemelerin fiziksel ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi adına çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu dağılımları lazer dağılımı yöntemi ile kimyasal içerikleri X-ışını floresans (XRF) analizi ile kristal yapıları ise X-ışını kırınım (XRD) analizi ile morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Ayrıca üretilen jeopolimer numunelerinin molekül yapısı ve bağlarının daha iyi belirlenmesi adına toz malzemelere Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre (FTIR) analizi yapılmıştır. Malzemelerin her birinin özellikleri aşağıda sunulmuştur.

Bağlayıcı toz malzemelerin lazer dağılımı yöntemi ile belirlenen tane boyutu dağılımları Şekil 3.8'de karakteristik tane çapları Çizelge 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.8. Bağlayıcı toz malzemelerin tane boyutu dağılımları

Tez çalışmalarında kullanılan bağlayıcı kaynak malzemeler optimum öğütme süresi olarak belirlenen 1 saat süre boyunca bilyalı değirmende ayrı ayrı öğütülmüştür. Her malzeme aynı öğütme süresinde ve aynı bilya optimizasyonunda farklı öğütülebilirlik seviyesi ve farklı kinetik davranış göstermektedir. Bu nedenle optimum öğütme süresi boyunca öğütülen malzemelerin tane boyutu dağılımları ve yüzey özellikleri farklılık göstermektedir. Öğütmeden önce, sabit bir öğütme süresi boyunca, farklı İYA bazlı malzemelerin, farklı doğaları nedeniyle farklı tane boyutu dağılımlarına ve yüzey özelliklerine ulaşacağı öngörülmüş olsa da her malzemenin benzer tane boyutu dağılımına sahip olması için özel bir dikkat gösterilmemiştir. Tahmin edilebileceği gibi belirli bir yapı yıkıldığında/inşa edildiğinde, farklı türdeki atıklar birlikte elde edilir ve farklı türdeki atıkları bir araya getirmeden aynı anda geri dönüştürmek çok daha az emek gerektirir. Bu nedenle farklı İYA esaslı malzemeler için öğütme süresinin sabit tutulması, gelecekteki planlanan çalışmalar için farklı tipte İYA esaslı malzemelerin geri dönüşümü olasılığı dikkate alınarak yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Bağlayıcı toz malzemelerin ortalama tane boyutları

Toz Malzeme	Yüzey ağırlıklı ortalama boyut	Hacim ağırlıklı ortalama boyut	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
	D[3,2] (µm)	D[4,3] (µm)			
Çatı kiremiti	2,317	10,262	0,889	4,753	28,384
Harman tuğla	2,885	18,002	1,058	8,502	51,847
Delikli tuğla	2,446	10,448	0,969	5,390	28,423
Cam tozu	6,932	33,419	3,554	25,741	75,661
Beton atığı	2,665	24,879	0,994	7,953	79,563
Yüksek fırın cürufu	3,680	11,696	1,624	9,780	24,678

Çizelge 3.3'te görülen yüzey ağırlıklı ortalama tane boyutu ve hacim ağırlıklı ortalama tane boyutu değerlerine göre eşit süre öğütülen inşaat ve yıkıntı atıkları arasında en küçük ortalama tane boyutuna sahip olan atıklar çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğladır. Tane boyutları çok küçük olan bu malzemelerin işlenebilirlikle ilgili zorluk çıkarabilme ihtimali akla gelmektedir. Bununla birlikte, aynı öğütme süresinde diğerlerinden daha ince hale gelmeleri, daha az enerjiyle daha kısa sürede uygun inceliğe gelebileceklerini de göstermektedir.

Bağlayıcı toz malzemelerin XRF analizi ile belirlenen kimyasal analizleri Çizelge 3.4'te sunulmuştur

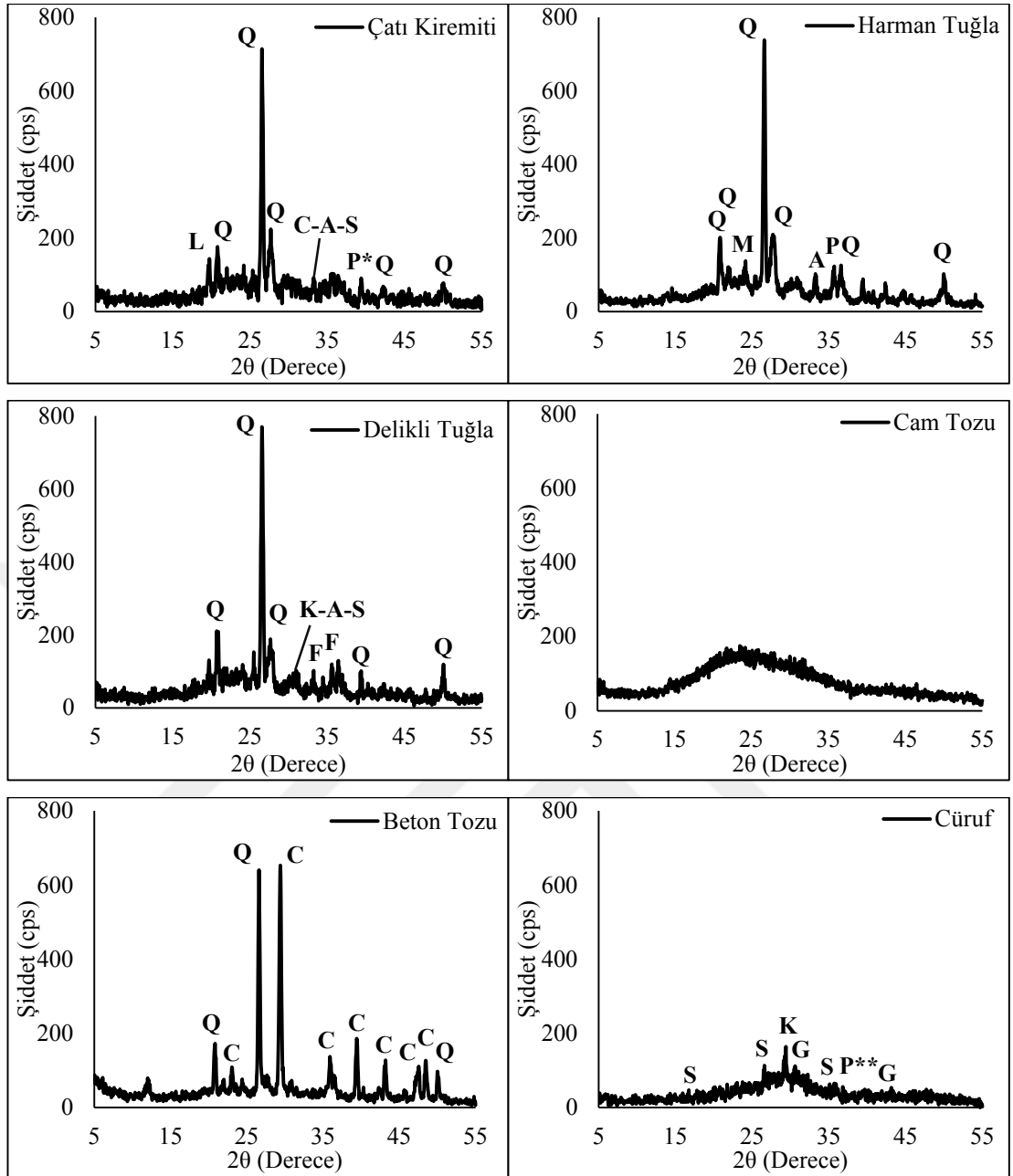
Çizelge 3.4. Bağlayıcı toz malzemelerin kimyasal analizleri

Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	KK
Çatı kiremiti	49,30	20,00	8,16	5,16	3,29	0,79	1,23	3,67	6,64
Harman tuğla	52,40	19,90	7,92	4,18	2,84	0,95	1,58	3,72	4,68
Delikli tuğla	53,50	19,30	7,45	4,21	2,61	1,46	1,50	3,58	4,91
Cam tozu	73,42	1,27	0,18	10,96	0,18	0,10	12,77	0,08	0,29
Beton tozu	37,40	10,70	3,82	21,20	1,29	0,54	1,96	2,22	19,70
Yüksek fırın cürufu	32,10	11,20	0,62	36,10	5,64	1,21	0,31	0,83	9,09

KK: Kızdırma kaybı

İYA'lar arasında çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğla tozları, jeopolimer üretimi için ham madde olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Görüldüğü üzere çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğla tozlarının kimyasal bileşimleri, küçük farklılıklar dışında oldukça benzerdir. Söz konusu tozların kimyasal bileşimi esas olarak alkali aktivasyon için temel bileşenler olan SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşmaktadır ancak aynı zamanda önemli miktarlarda CaO , Fe_2O_3 ve MgO içermektedir. SiO_2 miktarları bakımından incelendiğinde, çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğla tozlarının uçucu küle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Al_2O_3 miktarları bakımından da söz konusu tozların uçucu küle benzediği görülmektedir. Cam tozunun düşük Al_2O_3 içeriği dolayısıyla tek başına ham madde olarak kullanımı durumunda yeterli performans sağlayamayacağı düşünülmekle birlikte SiO_2 açısından iyi bir kaynak olduğu düşünülmektedir. Tez çalışmalarında kimyasal içeriklerine göre malzemelerin tek başlarına kullanılması söz konusu olabileceği gibi birden fazla malzemenin belirli oranlarda bir araya gelmesiyle ikili, üçlü veya beşli karışımların da kullanılabileceği düşünülmektedir. Ek olarak cam tozunun Na_2O_3 içeriğinin %12 civarında oluşu jeopolimer bağlayıcılı beton üretiminde kullanımı durumunda reaktif silis içermeyen agrega kullanımını gerektirmektedir. Beton tozunun %20 civarındaki kızdırma kaybının betondaki karbonatlaşmış kısımlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. CaO içerikleri açısından ise beklendiği gibi beton tozu yüksek değer vermiştir.

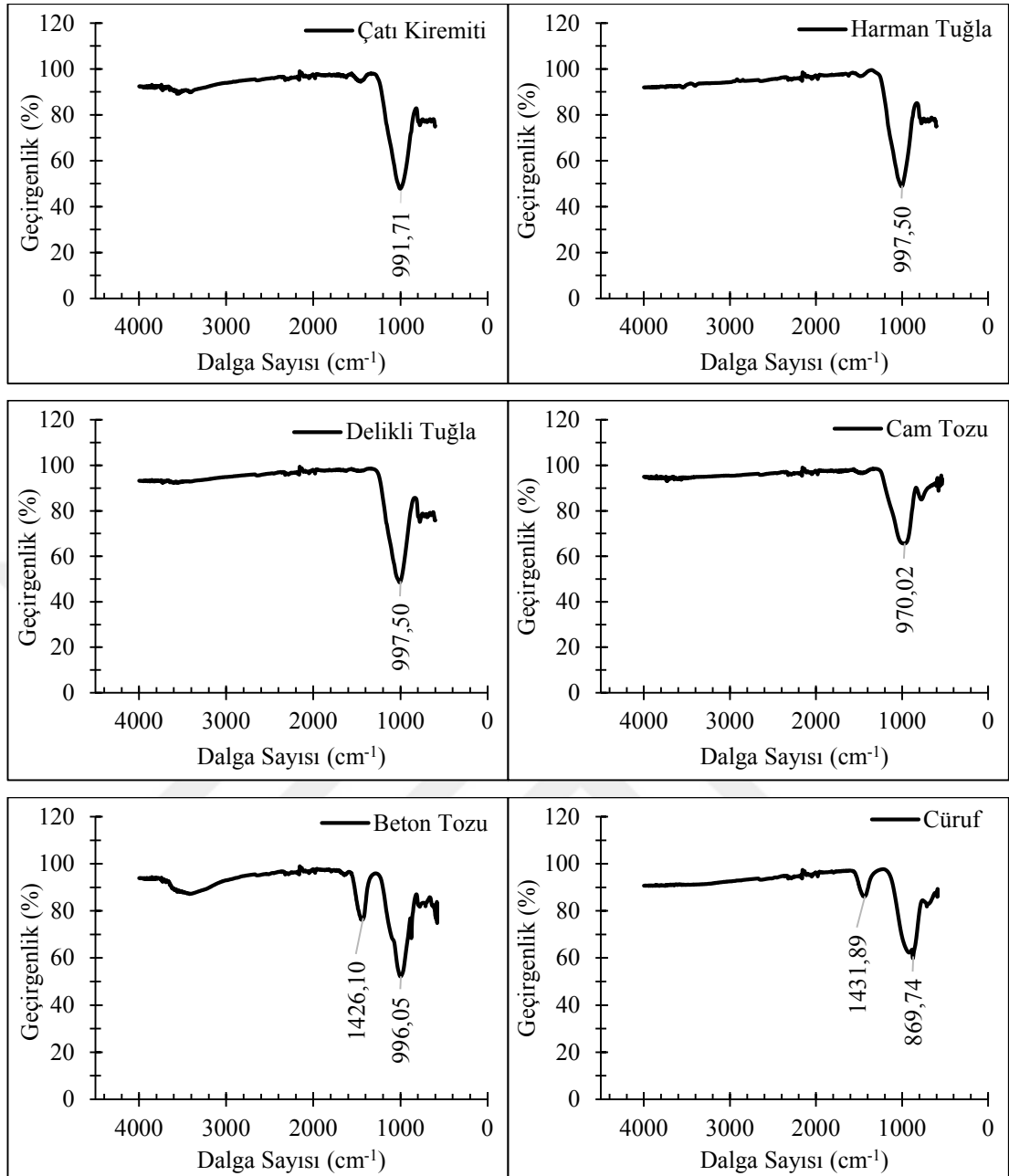
Bağlayıcı toz malzemelerin XRD analizi ile belirlenen kristal yapıları Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Bağlayıcı toz malzemelerin XRD faz diyagramları (A: Analcime, C: Calcite, F: Ferrite, G: Grossular, K: Katoite, M: Muscovite, P: Pyrope, P*: Pyroxene, P**: Periclase, L: Lazurite, Q: Quartz, S: Sillimanite)

Şekil 3.9’da, XRD analizi ile elde edilen İYA esaslı malzemelerin kristal yapıları sonuçları değerlendirildiğinde çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlanın kristal yapılarının çok benzer olduğu görülmektedir. Çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğla için büyük kristal bileşimin quartz olduğu görülmektedir. En büyük kristal bileşimi quartz mineralinin yanı sıra çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlada analcime, lazurite, pyrope, pyroxene, ferrite, muscovite pikleri de mevcuttur. Ayrıca literatürde jeopolimer üretiminde en yoğun şekilde kullanılan kaynak malzemelerinden birisi olan uçucu külün kristal yapısına en yakın olan atık malzemelerin çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğlanın olduğu da XRD faz diyagramlarından açıkça görülmektedir. Kullanılan cam tozunun, tamamen amorf olduğu görülmektedir. Cürufun XRD analizi incelendiğinde ise pik veren herhangi bir kristal görülmemektedir. Bu durum cürufun amorf olduğunun bir göstergesidir. Farklı bölgelerden toplanan İYA esaslı malzemelerin beton tozu kısmında beklenildiği üzere quartz ve calcite pikleri mevcuttur. Beton tozu içerisinde birbirinden farklı hidrasyon ürünleri, hidrate olmamış çimento tanecikleri ve agrega gibi unsurlar barındırdığı görülmektedir.

Üretilen jeopolimer numunelerinin molekül yapısı ve bağlarının daha iyi belirlenmesi adına toz malzemelere Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre (FTIR) analizi yapılmış ve ölçümler $400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı toz malzemelerin FTIR analizi Şekil 3.10’da sunulmuştur.



Şekil 3.10. Bağlayıcı toz malzemelerin FTIR analizleri

3.1.2. Alkali Aktivatörler

Kullanılan alkali aktivatör tipi jeopolimer bağlayıcılı sistemlerde jeopolimerizasyon reaksiyonları için alüminosilikat bazlı kaynak malzemeden sonra en önemli bileşendir. Kullanılan alkali aktivatörün jeopolimerizasyon reaksiyonlarında oynayacağı birçok rol vardır (Criado ve diğerleri, 2007; Somna ve diğerleri, 2011; Rajamma ve diğerleri, 2012; Mijarsh ve diğerleri, 2014; Hanjitsuwan ve diğerleri, 2014). İlk olarak reaksiyonların gerçekleşebileceği bir sıvı sağlamaktadır. İkincisi, sistemi yüksek pH değerine ulaştırarak alüminosilikat bazlı kaynak malzemelerin hızlı bir şekilde çözünmesini sağlamaktadır. Üçüncüsü, mevcut alkali kasyonlar, nihai jeopolimerin yapısında rol oynamaktadır. Dördüncüsü, alkali aktivatör çözeltisi içindeki silika, daha hızlı bir priz süresi, daha yüksek mekanik performans ve genellikle daha homojen mikroyapı ile sonuçlanan jeopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırabilmektedir.

Jeopolimer üretiminde genel olarak kullanılan iki baskın aktivatör tipi alkalın tuzlar, sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksittir (KOH). Lityum, rubidyum ve sezyum hidroksitler, maliyetlerine ek olarak kıtlıkları ve lityum hidroksitin suda nispeten düşük çözünürlüğü nedeniyle kullanım yaygınlığı sınırlı seviyelerde kalmıştır (Monnin, 2005). Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksitin jeopolimerin taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisi birbirlerinden farklıdır. Bununla birlikte karşılaştırıldığında hem sodyum hem de potasyum hidroksit yüksek konsantrasyonlara kadar suda çözünebilmektedirler. Sodyum hidroksit, jeopolimer üretiminde kullanılan en yaygın aktivatördür (Bondar ve diğerleri, 2011). Alkali hidroksit çözeltilerinde fazlaca karşılaşılan bir sorun olan çiçeklenme (özellikle beyaz karbonat veya bikarbonat kristallerinin oluşumu nedeniyle), fazla alkalinin atmosferik karbondioksit ile reaksiyona girdiği çok yüksek konsantrasyona sahip hidroksit çözeltisi ile aktif edilen bağlayıcılarda görülen bir sorundur. Bu sorun görsel olarak estetik problemlere yol açmaktadır ancak malzemenin yapısal bütünlüğüne her zaman zararlı olmadığı düşünülmektedir. Çiçeklenme genellikle sodyum hidroksitle aktif edilen bağlayıcılarda potasyum hidroksite göre daha da belirgindir. Kullanılan alkali aktivatör konsantrasyonu, alüminosilikat bazlı malzemenin çözünme hızında doğrudan etkiye sahiptir. Hem sodyum hidroksit hem de potasyum hidroksit ile hazırlanan alkali aktivatör çözeltilerinde alüminosilikat bazlı kaynak malzemenin

çözünme hızının artan alkali konsantrasyon ile arttığı bilinmektedir (Mikuni ve diğerleri, 2007; Weng ve Sagoe-Crentsil, 2007). Sodyum hidroksit ile hazırlanan alkali aktivatör çözeltilerin alüminosilikat bazlı kaynak malzemelerin daha yüksek oranda çözünmesine neden olduğu bulunmuştur (Xu ve Van Deventer, 2000). Sodyum hidroksit çözeltilerinin daha etkili çözünme kabiliyetinin etkisi, çözünmüş ve çözünmemiş türlerinin dengesinin daha düşük alkalinite düzeylerine ulaşmasıdır (Panagiotopoulou ve diğerleri, 2007). Sodyum hidroksit ayrıca düşük maliyeti nedeniyle de kullanılan en yaygın aktivatördür. Sodyum hidroksit tipik olarak aynı molaritede potasyum hidroksitten daha iyi alüminosilikat bazlı kaynak malzemelerin çözünmesini sağlarken, basınç dayanımları genel olarak potasyum hidroksit ile daha yüksektir (Xu ve Van Deventer, 2000; Bondar ve diğerleri, 2011). Bununla birlikte alkali aktivatör çözeltisindeki sodyum iyonları (Na^+) tipik olarak potasyum iyonlarından (K^+) daha düzenli bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Bunun nedeni Na^+ iyonlarının spesifik yüzey alanının daha küçük olmasıdır. Bu durum küçük Na^+ iyonlarının jelde büyük K^+ iyonlarından daha kolay gezinmelerini sağlamaktadır (Duxson ve diğerleri, 2007). Na^+ ve K^+ iyonları üzerindeki yük aynı olsa da boyut farklıdır ve bu nedenle Na^+ iyonları, daha küçük silikat oligomerleri ile iyon çiftleri oluşturmak için daha yüksek bir çekim gücüne sahiptir fakat K^+ iyonları büyük silikat oligomerleri ile eşleşmeyi tercih etmektedir (McCormick ve diğerleri, 1989; Hendricks ve diğerleri, 1991). Silika ve alümina türlerinin reaksiyonu sonucu oluşan alüminosilikatların, Si içeriği ve katyon boyutu arttıkça arttığı bulunmuştur. Bu, daha önce yapılan Na^+ iyonunun çözünmeyi hızlandırdığı iddiasını güçlendirirken, K^+ iyonunun jelleşmeyi ve yoğunlaşmayı hızlandırdığını ve daha fazla jeopolimerizasyona yol açtığını göstermektedir (Duxson ve diğerleri, 2005). Daha yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonları, reaksiyonun erken yaşlarında basınç dayanımını arttırmaktadır. Fakat ilerleyen yaşlarda dayanım kayıplarına neden olabilmektedir. Bu durum, nihai ürünlerin istenmeyen morfolojisini ve homojenliğini etkileyen çözeltideki aşırı hidroksil iyonundan (OH^-) kaynaklanmaktadır. Sodyum hidroksit ile hazırlanan alkali aktivatörlerin jeopolimerlerde yaygın kullanımıyla ilişkili diğer bir avantaj, asitlerin ve sülfatın bulunduğu agresif koşullarda gelişmiş dayanıklılığa sahip olmasıdır. Sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit içeren alkali aktivatör çözeltilerle oluşturulan jeopolimerlerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri çeşitli araştırmacılar tarafından karşılaştırılmıştır (van Jaarsveld ve Van Deventer,

1999; García-Lodeiro ve diğerleri, 2007). Potasyum hidroksit içeren alkali aktivatör çözeltilerle üretilen jeopolimerlerin biraz daha yüksek basınç dayanımlı, bununla birlikte asit saldırısına karşı daha düşük dirence sahip olduğu bulunmuştur (van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999).

Jeopolimerizasyon reaksiyonları alkali hidroksitler ve çözünebilir silikatların birlikte kullanılmasıyla hızlanmaktadır (Palomo ve diğerleri, 1999). Bu nedenle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit genel olarak bir alkali aktivatör çözeltisi üretmek için sodyum silikat veya potasyum silikat ile birleştirilerek kullanılmaktadır (Davidovits, 1999; Barbosa ve diğerleri, 2000; Swanepoel ve Strydom, 2002). Silikat içeren alkali aktivatör çözeltilerdeki reaksiyonlar, yalnız alkali hidroksitler ile karşılaştırıldığında çok daha yüksektir ve alüminosilikat bazlı kaynak malzeme ile çözelti arasındaki reaksiyonu arttırmaktadır (Palomo ve diğerleri, 1999). Mekanik özellikler ve elastik modül, alkali aktivatör çözeltisinde silikat iyonlarının varlığına bağlı olarak önemli bir iyileşmeye sahiptir (Fernandez-Jimenez ve diğerleri, 2006). Kullanılan alkali aktivatöre sodyum silikatların eklenmesi, mekanik özellikleri yalnız hidroksit ile hazırlanan alkali aktivatör ile üretilen jeopolimerlerin kapasitesinin ötesine taşımaktadır. Bununla birlikte, karışım içindeki oran dikkatlice uygulanmalı ve ayarlanmalıdır.

Çalışmalarda karışımlara sodyum hidroksit ve sodyum silikata ek olarak kalsiyum hidroksitin kullanılmasına karar verilmiştir, Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) içeriği de jeopolimer harçta priz süresini ve mukavemeti etkileyen önemli bir faktördür. Jeopolimerlerin diğer özelliklerini de etkileyebileceğine dair göstergeler de vardır (Rashad, 2013). Bu nedenle jeopolimer karışımlara optimum miktarda kalsiyum hidroksit içeriği ilave edilmesi, alkali ile aktif edilen İYA'ların mekanik performansını arttıracığı düşünülmektedir. Daha önceki çalışmalar kalsiyum ilavesinin jeopolimerik bağlayıcının mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Krivenko, 1994; Van Jaarsveld ve diğerleri, 1999; Granizo ve diğerleri, 2002; Yip ve Van Deventer, 2003; Dombrowski ve diğerleri, 2007; Buchwald ve diğerleri, 2007) ancak jeopolimerizasyon işlemi sırasında kalsiyumun kesin rolü belirsizliğini korumaktadır. Ca^{2+} iyonunun, jeopolimer bağlayıcı yapısı içinde bir yük dengeleme katyonu olarak işlev görebildiği düşünülse de (Davidovits, 1991) bu durum

kesin olarak kanıtlanmamıştır. Bununla birlikte İYA esaslı jeopolimerden kaynaklanan bazı atıklara kalsiyum ilave edilmesinin, gerekli alkali sıvı miktarını ve nihai kimyasal ve mineralojik bileşimi etkileyeceği açıktır. Aslında, bir jeopolimer sistemine kalsiyum eklemenin en önemli yönlerinden biri, ortam sıcaklığında sertleşebilmesidir. Bu araştırma aynı zamanda, bir kalsiyum bileşiğinin, ortam sıcaklığında kürlenene İYA esaslı jeopolimer malzemelerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerinin bir karşılaştırmasını da vermektedir.

Tez kapsamında 3 tip alkali aktivatör kullanılmıştır. Yapılan kapsamlı literatür taraması ve ön çalışmalar sonucunda pul formda sodyum hidroksit (NaOH), sıvı formda sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve toz formda kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) aktivatör olarak tercih edilmiştir. Kullanılan farklı aktivatörlerin özellikleri aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

3.1.2.1. Sodyum Hidroksit

Kostik soda ya da lye olarak da bilinen sodyum hidroksit (NaOH) kimya ve endüstride yaygın olarak kullanılan temel bir bileşiktir. Sodyum hidroksit, sodyum klorür suyunun çeşitli elektroliz türleri ile üretilmektedir (O'Brien ve diğerleri, 2007). Beyaz renkte, kokusuz ve nem çekici bir maddedir. Suda kolaylıkla çözünerek çözelti oluşturmaktadır. Sıvı ve katı halde bulunabilmektedir. Sıvı halde genelde sulu çözelti şeklinde bulunmaktadır. Katı halde ise pul, boncuk gibi şekillerde bulunmaktadır. Hepsi aynı kimyasal bileşime sahiptir (O'Brien ve diğerleri, 2007). Sodyum hidroksitin çözelti içinde Na^+ ve OH^- iyonlarına ayrılması son derece ekzotermiktir. 10 mol sodyum hidroksitin bir litre suda çözündürülmesi sırasında açığa çıkan ısı yaklaşık 400 kJ'dür, bu da suyun sıcaklığını 90°C'ye kadar arttırmak için yeterlidir (Provis ve Van Deventer, 2009). Bu hızlı sıcaklık artışı, sodyum hidroksit ile çalışırken gerekli güvenlik önlemlerinin alınmasını gerektirmektedir. Ayrıca jeopolimeri kontrollü bir laboratuvarın dışında uygulamak için de gerekli güvenlik önlemlerinin detaylı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Sodyum hidroksit, OH^- iyonu sağlamak için en yaygın kullanılan alkali aktivatördür. Jeopolimerizasyondaki sodyum hidroksitin rolü, çözeltide katı alüminosilikat bazlı kaynak malzemenin çözündürülmesi, Si, Al ve diğer

iyonların çözeltiye bırakılması için gereken OH^- iyonlarını sağlamasıdır. Çözünme için minimum bir OH^- iyonu konsantrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır ve literatürde pH'da (OH^- konsantrasyonu) bir artışın alüminosilikat bazlı kaynak malzemenin çözünme artışına neden olduğu ve bunun da basınç mukavemetindeki bir artışla bağlantılı olduğu bulunmuştur (Xu ve Van Deventer, 2000; Hardjito ve diğerleri, 2004; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005; Li ve diğerleri, 2011). Genel olarak düşük bir konsantrasyonun yaklaşık 1 M, orta konsantrasyonun yaklaşık 5-10 M arası ve yüksek konsantrasyonun yaklaşık 15 M olduğu düşünülmektedir. Sodyum hidroksit konsantrasyonu çok düşükse yeterli çözünme meydana gelmeyecek ve bu nedenle sistemi başarılı bir şekilde birbirine bağlamak için yeterli reaksiyon ürünü oluşmayacaktır (Murayama ve diğerleri, 2002). Öte yandan, çok yüksek bir konsantrasyon bazen reaksiyona girmemiş taneciklerin etrafında hızla reaksiyona girerek reaksiyona girmeyen taneciklerin etrafında oluşan ve daha fazla reaksiyonu önleyen ürünün oluşması ile sonuçlanacaktır. Bir ani priz oluşmasa bile, karışımın reaksiyon derecesi, daha hızlı priz nedeniyle çok yüksek alkali konsantrasyonlarında genellikle daha düşük olmaktadır (Provis ve Van Deventer, 2009). Ek olarak çözelti içerisindeki fazla OH^- iyonu matrisi daha yoğun hale getirirse de düzensiz bir yapı oluşturması nedeniyle basınç mukavemetinde bir azalmaya yol açabilmektedir (Palomo ve diğerleri, 1999). Bu nedenle tez çalışmalarında sodyum hidroksitin kullanım oranı bu etkiler göz önünde bulundurularak belirlenecektir. Tez kapsamında sodyum hidroksit katı pul formunda kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) Koruma Klor Alkali San. Tic. A.Ş. tarafından granül halde olup 25 kg'lık torbalar halinde pul formda olacak şekilde temin edilmiştir. Sodyum hidroksitin dijital kamera altındaki paketli ve açık haldeki görüntüsü Şekil 3.11'de analiz sonuçları ise Çizelge 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.11. Pul formda sodyum hidroksitin paketli ve açık haldeki görüntüleri

Çizelge 3.5. Pul formda sodyum hidroksitin kimyasal analizi

Analiz	Özellik	Birim	Değer
Görünüm	Beyaz pul	-	Beyaz pul
Sodyum hidroksit	Min. 98	%	98,27
Sodyum karbonat	Maks., 0,40	%	0,35
Sodyum klorür	Maks., 0,10	%	0,020
Demir (Fe)	Maks., 15	ppm.	13,17

3.1.2.2. Sodyum Silikat

Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat çözeltisi, genel formülü $\text{Na}_2(\text{SiO}_3)$ ile gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. Sodyum silikatın Eski Mısır'da kullanıldığı düşünülmektedir (Davidovits, 2008). Günümüzde temizleyiciler, deterjanlar, yapıştırıcılar, bağlayıcılar, çözücüler ve jeller yapmak için kullanılan çok yaygın bir endüstriyel kimyasaldır (Iler, 1979). Sodyum silikat, saf silika kumu (SiO_2) ile sodyum karbonat (NaCO_3) karışımlarının 1100°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ergitilmesi ile üretilmektedir (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005). Sodyum silikat çözeltisi (cam suyu) ise katı sodyum silikat tanelerinin otoklavda 140°C sıcaklık ve 5 atm. basınç altında buhar etkisiyle veya ergimiş sodyum silikatın doğrudan atmosfer

basıncı altında dönen bir kazanda sudan geçirilmesi yoluyla yarı viskoz bir sıvıya dönüştürülmesiyle üretilmektedir (Olgun, 2009). Saf bileşimleri renksizdir ancak ticari örnekleri barındırdıkları yabancı maddelerden dolayı mavi ya da yeşilimsi olabilmektedir. Ticari sodyum silikat, deterjanlar gibi uygulamalar için gerekli olan yüksek saflığa sahip değildir. Bununla birlikte, bu saf olmayan sodyum silikatın kullanımı jeopolimerler için geçerli olabilmektedir (Davidovits, 2008). Ticari sodyum silikat çözeltilerinin tipik olarak katı içeriği %37-54 arasında değişmektedir (Olgun, 2009). Sıvı sodyum silikat çözeltileri bileşimde ya $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ modülü ya da SiO_2 , Na_2O ya da $\text{SiO}_2+\text{Na}_2\text{O}$ içeriği ile ifade edilebilir. Endüstride, sodyum silikat ağırlık oranına veya modüle göre derecelendirilir; ticari silikatlar tipik olarak 1,5 ile 3,2 arasında modüle sahiptir (McDonald ve Thompson, 2006; Davidovits, 2008). Ağırlık oranının genel olarak endüstride kullanıldığı ancak modülün jeopolimer biliminde kullanıldığı belirtilmelidir. Yüksek bir modülde, bir sodyum silikat çözeltisinin jelle dönüşmesi açısından kararlılığının belirlenmesinde pH çok önemlidir. Kararlılık pH ile artar (Lawrence ve Vivian, 1961; Davidovits, 2008; Bondar ve diğerleri, 2011). Daha yüksek bir pH daha uzun jelleşme süresine yol açar (Tognonvi ve diğerleri, 2011). Çoğu ticari sodyum silikatın pH aralığı 10,9 ile 13,5 arasındadır. Bazı araştırmacılar, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit çözeltilerinde amorf silika dumanını reaksiyona sokarak kendi sodyum silikat çözeltilerini yapmışlardır. SiO_2 tanecikleri ile ilişkili olası sağlık tehlikeleri olduğu ve silikozun kristal silis solunmasından oluştuğu da bilinmelidir. Amorf silika üzerinde yapılan araştırmalar onu daha güvenli bulmuştur ancak inhalasyondan yine de kaçınılmalı ve her iki şekilde de dikkatli olunmalıdır (Davidovits, 2008). Çalışmalarda kullanılan sodyum silikat çözeltisi (Na_2SiO_3) Emir Kimya firmasınca üretilen ticari ürün olup 5 litrelik bidonlarla temin edilmiştir. Sodyum silikatın dijital kamera altındaki paketli ve açık haldeki görüntüsü Şekil 3.12’de, analiz sonuçları ise Çizelge 3.6’da sunulmuştur.



Şekil 3.12. Sıvı sodyum silikatın paketli ve açık haldeki görüntüleri

Çizelge 3.6. Sıvı sodyum silikatın kimyasal analizi

Analiz	Birim	Değer
SiO ₂	%	24
Na ₂ O	%	11
Modül	SiO ₂ /Na ₂ O	1,9
Bome	20°C, Be ¹	40
Yoğunluk	20°C, gr/cm ³	1,35
H ₂ O	%	65

3.1.2.3. Kalsiyum Hidroksit

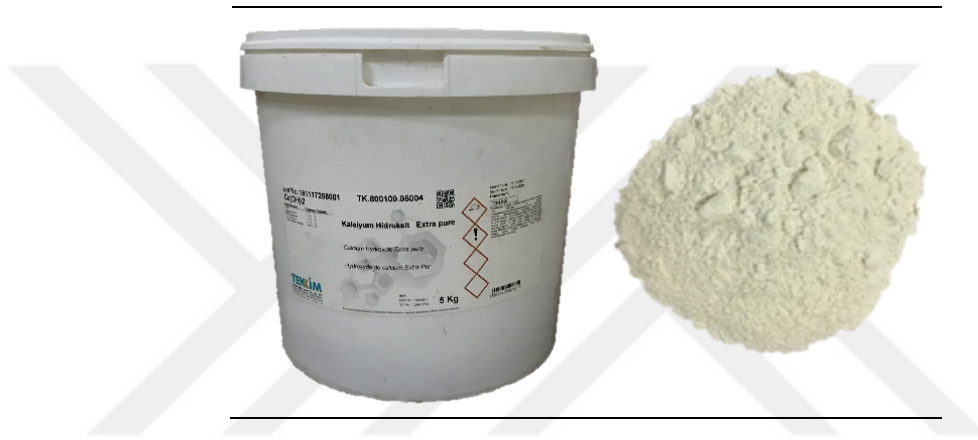
Sönmüş kireç ya da hidratik kireç olarak da bilinen kalsiyum hidroksit, formülü $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile gösterilen kimyasal bir bileşiktir. Kireçli kayaların (en az %90 kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren), kireç fırınlarında 900°C ile 1000°C arasındaki bir sıcaklıkta kalsinasyonu sonucunda sönmemiş kireç (CaO) ve karbondioksit gazı (CO_2) elde edilir (Golley ve diğerleri, 1999). Sönmemiş kirecin suyla tamamen reaksiyona sokulması sonucunda ise kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) elde edilir (Golley ve diğerleri, 1999). İnşaat, tarım, ilaç ve gıda gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Kalsiyum hidroksit alkali bir maddedir, kristal beyaz renkli toz halde bulunur ve hafif aşındırıcıdır. İYA esaslı jeopolimerlere kalsiyum hidroksit ilave edilmesinin, gerekli alkali sıvı miktarını ve nihai kimyasal ve mineralojik bileşimi etkileyeceği açıktır.

Aslında, bir jeopolimer sistemine kalsiyum eklemenin en önemli yönlerinden biri, ortam sıcaklığında sertleşebilmesidir. Bu araştırma ayrıca bir kalsiyum bileşiğinin, ortam sıcaklığında kürlenmiş İYA bazlı jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerinin bir karşılaştırmasını da vermektedir. Alüminosilikat bazlı malzemenin, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak kalsiyum hidroksit varlığında alkali aktivasyonu, hem mekanik hem de mikroyapısal özelliklerde bir artışa sahip olan bir alüminosilikat jeopolimerinin oluşumuna yol açacağı düşünülmektedir. Önceki çalışmalara dayanarak, kalsiyum hidroksitin jeopolimerizasyon sürecinde çeşitli rolleri olduğu söylenebilir, bunlar arasında:

- Kalsiyum hidroksit, amorf veya yetersiz sıralı kristalli kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) veya kalsiyum alüminat silikat hidrat (C-A-S-H) fazlarını çöktürmek için bir sodyum silikat çözeltisi ile reaksiyona girerek karışımın alkaliliğini arttıracak bir su eksikliğine neden olacaktır. Ortamın yüksek alkalitesi, mevcut alüminosilikatların daha yüksek çözünmesine ve dolayısıyla daha yüksek oranda jeopolimerizasyon reaksiyonunun gerçekleşmesini sağlayarak yüksek basınç mukavemetine sahip sert bir yapı oluşabilir.
- Kalsiyum hidroksit, jeopolimer içindeki katyonların yük dengesi sonucunda yer değiştirilmesiyle bir jeopolimer jeli bağlanabilir (Davidovits, 1991; Guo ve diğerleri, 2010)
- Kalsiyum hidroksit, çözünmüş türlerin çöktürülmesi için ekstra çekirdeklenme merkezleri sağlayan ve hızlı sertleşmeye neden olan bir C-S-H jeli oluşturmak üzere çözünmüş silika ve alümina türleriyle reaksiyona girebilir (Temuujin, ve diğerleri 2009; Guo, 2010).
- Bazı kalsiyum içeren jeopolimer sistemlerinde alkali alüminat silikat (yani jeopolimer) ve kısmen alüminyum ikameli kalsiyum alüminat silikat hidrat (C-A-S-H) jelleri arasında faz ayrımı gözlenmiştir. (Allahverdi ve Škvára, 2001; Alonso ve Palomo, 2001; Granizo ve diğerleri, 2002; Yip ve Van Deventer, 2003; Nicholson ve diğerleri, 2005; Yip ve diğerleri, 2005)

Kalsiyum bileşiği ilavesi, yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş jeopolimerin mekanik özelliklerini azaltmaktadır ancak ortam sıcaklığında kürlenmiş numuneler için mekanik performansı arttırmaktadır (Temuujin, 2009). İYA bazlı jeopolimer bağlayıcıların

ortam koşullarında da yüksek dayanımlar elde edilebileceği bu çalışmanın nihai hedeflerinden birisidir. Sonuç olarak yukarıda verilen bilgiler ışığında kalsiyum hidroksit ilavesi İYA bazlı jeopolimerlerin ortam koşullarında mekanik özelliklerini iyileştirecektir. Bu nedenle karışımlarda kalsiyum hidroksit alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Tekkim Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından 5 kg'lık kovalarda toz formda temin edilmiştir. Kalsiyum hidroksitin dijital kamera altındaki paketli ve açık haldeki görüntüsü Şekil 3.13'te, analiz sonuçları ise Çizelge 3.7'de sunulmuştur.



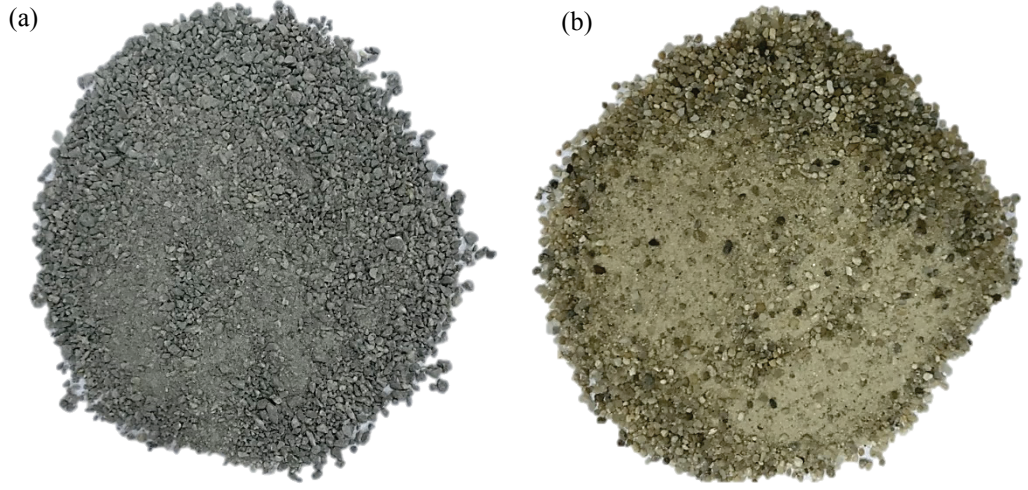
Şekil 3.13. Toz kalsiyum hidroksitin paketli ve açık haldeki görüntüleri

Çizelge 3.7. Toz kalsiyum hidroksitin kimyasal analizi

Analiz	Birim	Değer
M	g/mol	74,09
Yoğunluk	g/cm ³	2,24
Erime noktası	°C	550
Safiyet	%	Min., 87
MgO	%	Maks., 1
Asitte çözünmeyen	%	Maks., 1
Kızdırma kaybı	%	Maks., 3
Partikül boyutu	<90 µm (%)	Min., 90
Sudaki çözünürlük (20°C)	g/lt	1,7

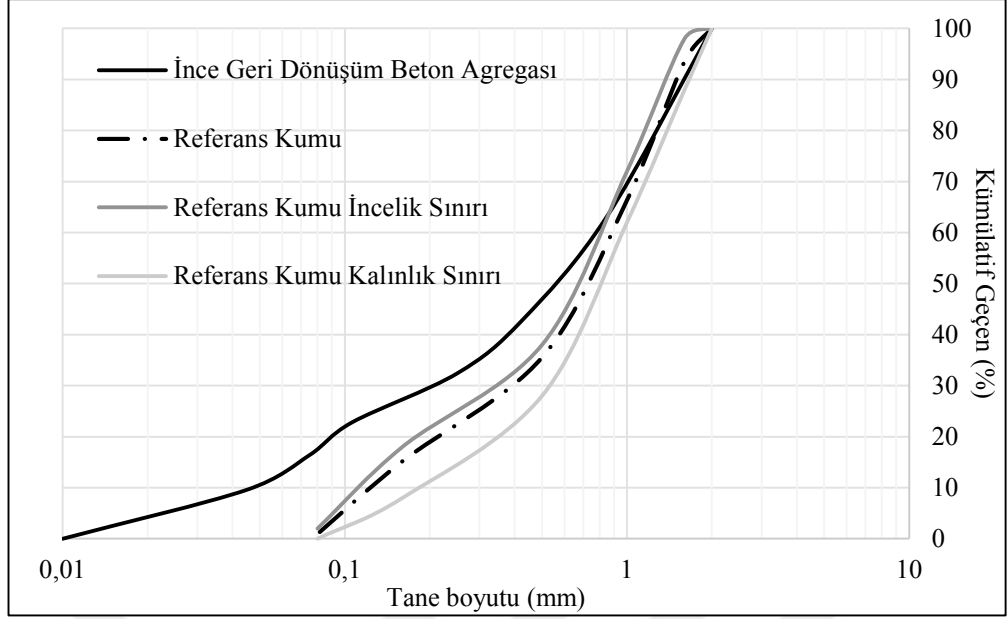
3.1.3. Geri Dönüşüm Agregası

İnşaat ve yıkıntı atıkları daha önce belirtildiği gibi katı atıkların önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Beton atığı yaklaşık %40'lık bir oranla inşaat ve yıkıntı atıkları içerisinde en büyük bileşeni oluşturmaktadır (Oikonomou, 2005). İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüşümünde beton atığının büyük miktarda geri dönüştürülerek değerlendirilmesi yüksek oranda çıkan atık betonun bertaraf edilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Bu kapsamda karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılan atık beton tozuna ek olarak kullanılan agreganın da atık betondan elde edilmesine karar verilmiştir. ECC'nin mikromekanik tabanlı tasarım yaklaşımı uyarınca, çoklu mikro çatlak hasarı oluşumunun (şekil değiştirme sertleşmesi özelliğiyle birlikte gelen yüksek süneklik) önünde engel oluşturan yüksek matris kırılma tokluğu değerlerinin daha düşük seviyelere çekilmesi ve liflerin matris içerisinde daha homojen bir şekilde dağıtılabilmeleri amacıyla karışımlarda iri agrega kullanılmamıştır. Bu kapsamda karışımlarda maksimum tane boyutu 2 mm olan %100 ince geri dönüşüm beton agregası kullanılmıştır. Ankara'da yıkılmış yapılardan elde edilen farklı yaşlardaki ve dayanımları bilinmeyen çeşitli beton atıkları ilk olarak darbeli matkap yardımıyla daha küçük parçalara ayrılmıştır. Daha sonra laboratuvar tipi çeneli kırıcının çene açıklığı 1 mm olacak şekilde ayarlanarak beton atıkları kırıcıdan geçirilmiştir. Kırıcıdan geçirilen tamamı inşaat yıkıntı atığı sonucu elde edilen beton atıkları son olarak 2 mm açıklığa sahip elekten elenerek harmanlanmış, herhangi bir iyileştirme işlemi uygulanmadan karışımlara doğrudan eklenmiştir. Kırılıp harmanlanan beton atıklarından çeyrekleme yöntemiyle yeterli miktarda numune alınarak karakteristik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 3.14. (a) İnce geri dönüşüm beton agregasının ve (b) referans kumun görüntüleri

Şekil 3.14'ten görülebileceği gibi ince geri dönüşüm beton agregasının yüzeyi açısal ve pürüzlü iken, referans kumun yüzeyi nispeten pürüzsüzdür. İnce geri dönüşüm beton agregası ve referans kumun tane boyutu, yoğunluk ve su emme gibi karakteristik özellikleri ayrıntılı olarak test edilerek karşılaştırılmıştır. Çalışmada ince geri dönüşüm beton agregasının referans olması açısından karşılaştırılması için kullanılan standart kum TS EN 196-1 standartlarında belirtilen CEN referans kumudur ve Limak Trakya Çimento Fabrikasında üretilmektedir (TS EN 196-1). İnce geri dönüşüm beton agregasının ve referans kumun tane boyutu dağılımı Şekil 3.15'te sunulmuştur.



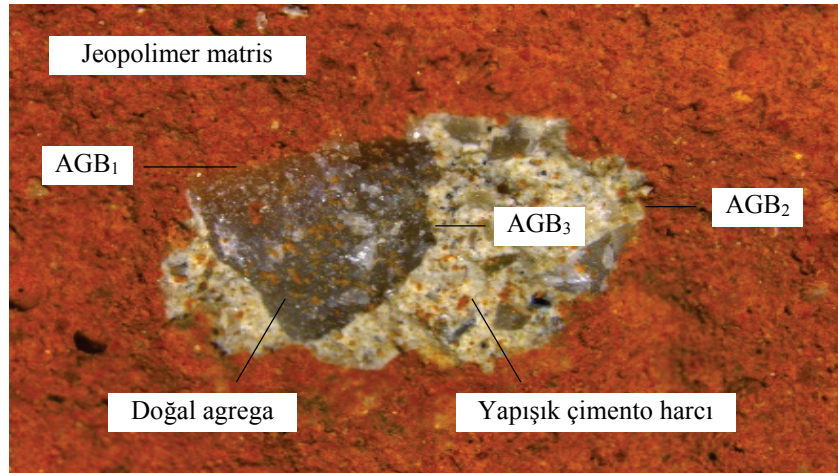
Şekil 3.15. İnce geri dönüşüm beton agregasının ve referans kumun tane boyutu dağılımı eğrileri

Şekil 3.15'te görüldüğü gibi ince geri dönüşüm beton agregası referans kuma göre daha fazla ince malzeme içermektedir. Bu durum gerekli işlenebilirliğin sağlanması açısından edişe uyandırmaktadır. Bununla birlikte ince geri dönüşüm agregasının yüksek ince malzeme içeriği işlenebilirlik kaybı yaşanmadığı takdirde jeopolimer matriste belirli bir aktivite ve iyi bir dolgu etkisi sağlayacaktır. Böylece, ince geri dönüşüm beton agregası dayanımını olumlu etkileyecek ve daha yoğun bir yapı oluşmasını sağlayacaktır. Şekilde çizilen eğriler incelendiği zaman 106 μm altı tane boyutuna sahip ince geri dönüşüm beton agregasının harmanlanan yığının yaklaşık %23'ünü oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca ince geri dönüşüm beton agregasının 2000-850 μm arasındaki kısmının sınır değerler içerisinde olduğu fakat 850 μm tane boyutundan daha küçük tane boyutuna sahip kısmının sınır değer dışında olduğu ve giderek ince malzeme miktarının arttığı görülmektedir. İnce geri dönüşüm beton agregası ve referans kumun yoğunluk ve su emme gibi karakteristik özellikleri ayrıntılı olarak test edilerek karşılaştırılmış ve Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. İnce geri dönüşüm beton agregasının ve referans kumun karakteristik özellikleri

Özellik	Birim	İnce geri dönüşüm beton agregası	Referans kumu
Sıkışık Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	1352,5	1680,6
Gevşek Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	1273,3	1625,8
Kuru Özgöl Ağırlık	-	1,95	2,55
Doygun Kuru Yüzey Özgöl Ağırlığı	-	2,17	2,63
Görünen Özgöl Ağırlığı	-	2,50	2,68
Su Emme Oranı	%	11,1	1,56
Porozite	%	21,68	3,73

İnce geri dönüşüm beton agregası yüksek miktarda yapışık çimento harcı içermektedir. Buna bağlı olarak daha ince tane boyut dağılımına sahiptir ve su emme oranı yüksektir. Geri dönüşüm beton agregasının mikroyapısı, özellikle arayüzey geçiş bölgesinde doğal agregadan çok farklı ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Geri dönüşüm beton agregası ile üretilen jeopolimer harcın farklı arayüzey geçiş bölgeleri Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak hazırlanan EGC karışımlarda bulunan farklı arayüzey geçiş bölgelerinin türlerinin mikroskop altındaki görüntüsü

İnce geri dönüşüm beton agregası kullanılarak gerçekleştirilen jeopolimer bağlayıcılı harç karışımlarda üç tip arayüzey geçiş bölgesi bulunmaktadır. Birinci arayüzey geçiş bölgesi (AGB₁), geri dönüşüm beton agregası içerisindeki doğal agrega ve jeopolimer matris arasında bulunur. İkinci arayüzey geçiş bölgesi (AGB₂), geri dönüşüm beton agregası içerisindeki yapışık çimento harcı ile jeopolimer matris arasında bulunur. Son olarak, üçüncü arayüzey geçiş bölgesi (AGB₃), geri dönüşüm beton agregası üzerinde doğal agrega ve yapışık çimento harcı arasındadır. Jeopolimer harcın mekanik performansı, arayüzey geçiş bölgesinin dayanım özelliğini önemli ölçüde etkilemesinden dolayı, her üç arayüzey geçiş bölgesinin performansının bir sonucudur.

3.1.4. Lifler

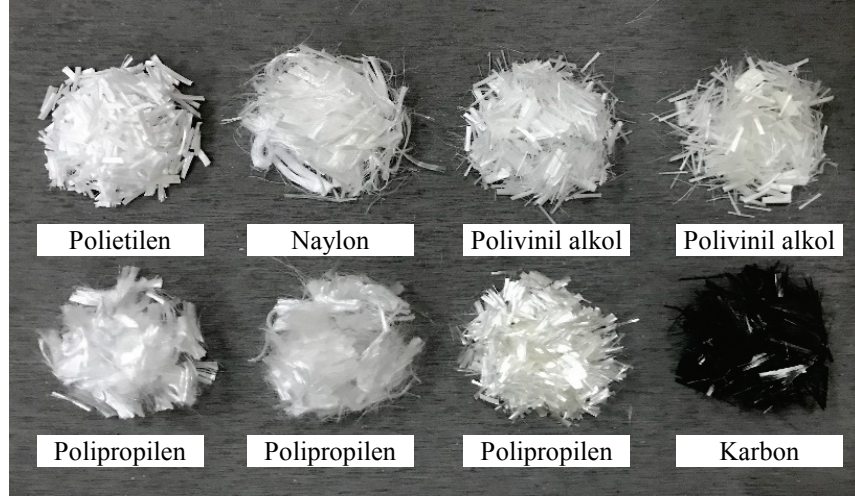
Farklı lifler, jeopolimer kompozitlerin mikro çatlakların oluşmasıyla birlikte yüksek süneklik ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemesi için kullanılabilir. Lif seçiminde, çimentolu ve jeopolimer kompozitlerde üç ana parametre göz önünde bulundurulmalıdır:

- Malzeme özelliklerinin uygulamaya uygunluğu
- Yükleri iletmek için yeterli matris-lif etkileşimi
- Çatlak sonrası sünekliği arttırmak için optimum en/boy oranı

Liflerin özellikleri, lif donatılı jeopolimer kompozitin performansını büyük ölçüde değiştirecektir. Herhangi bir lif donatılı jeopolimer veya çimentolu kompozitin performansı, lifin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Jeopolimer kompozitlerde matris-lif etkileşiminden önce, çimentolu malzemelerde kullanılan liflerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerine genel bir bakış sağlamak önemlidir. Polimerler temel olarak monomer olarak adlandırılan moleküllerin güçlü moleküller arası etkileşimler yoluyla birbirlerine tekrar eden şekilde eklenmesiyle oluşan uzun zincirli molekül yapılarıdır (Siddique ve diğerleri, 2008). Farklı polimerlerin moleküller arası etkileşimi farklıdır ve polimerin özelliklerini değiştirmektedir. Ayrıca bu etkileşim polimerin kristallenmesinde de etkili rol oynamaktadır. Zincirlerin şekline bağlı olarak, polimerler kristalin (%80'den fazla kristallik), yarı kristalin (%10-

80 oranında kristallik) ve amorf (%10'dan az kristallik) polimerler olarak sınıflandırılır (Ko ve diğerleri, 2017; Mehrali ve diğerleri, 2018). Polimerlerin kristalliğinin artırılması mekanik özellikleri, sertliği, çevresel kararlılığı ve yüzey pürüzlülüğünü arttırabilmektedir. Polimerik lifler, ham maddeleri ve üretim süreçlerine göre sentetik ve doğal lifler olarak kategorize edilebilir. Sentetik polimer lifler yaygın olarak ham maddelerden veya plastik atıklardan geri dönüştürülerek üretilmektedir. Çimentolu matrislerde en çok kullanılan sentetik lifler polipropilen, polivinil alkol, polietilen ve naylon liflerdir.

Kompozitlerin taze ve sertleştirilmiş haldeki performansını belirleyen başlıca lif özellikleri; lifin dayanımı, elastik modülü, matris ile kimyasal uyumluluğu ve matris-lif arayüz özelliklerinden oluşmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi liflerin dâhil edilmesi betonun çeşitli taze ve sertleşmiş özelliklerini etkilemektedir ancak liflerin betona dâhil edilmesinin en temel amacı kompozitte çatlakların yayılmasını önlemek veya kontrol etmektir. Malzeme özelliklerinin yanında doğru lif geometrisi belirli bir uygulama için lif seçerken çok önemlidir. Liflerin enine kesiti ve uzunluğu, birim hacimde kompozitteki liflerin yüzey alanı ve lif donatılı matrisin belirli bir düzlemi boyunca liflerin enine kesit alanı gibi geometrik parametreler, lif verimliliğinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken önemli hususlardır. Ayrıca kompozitte performansı etkileyen özellikler sadece lif malzemesi ve hacim dozuna değil, çalışmada kullanılan matris bileşimine de büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle çalışmalarda lif tipleri arasında deneysel sonuçlar karşılaştırılırken bu parametreler dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.17. Çeşitli sentetik lifler

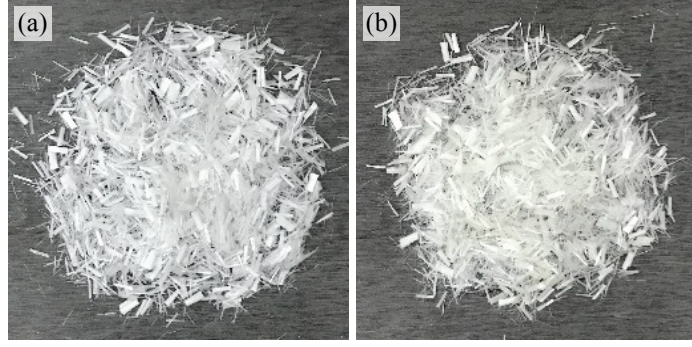
Şekil 3.17’de gösterildiği gibi kompozit üretiminde kullanılabilecek ve kompozitin özelliklerini değiştirecek birçok sentetik lif vardır. EGC üretiminde en çok kullanılan ve tez çalışmaları kapsamında kullanılacak liflerin ana fiziksel ve mekanik özelliklerinin detayları aşağıda bölümlerde açıklanmaktadır.

Bir lif türü sadece sınırlı bir çekme dayanımı ve çatlak açıklığı aralığı için etkili olduğundan, daha geniş bir deformasyon aralığı boyunca istenen özellikleri elde etmek için çoklu lif türleri kullanılabilir. Lif teknolojisi ilerledikçe rapor edilen potansiyel performans artışları ve lif karışımlarının ikili fonksiyonları nedeniyle hibrit lif karışımlarının daha popüler hale gelmesi beklenmektedir. Lif hibridizasyonu, lif ilavesinin faydalarını etkin bir şekilde en üst düzeye çıkarma ve birleştirme tekniği olarak tanımlanmaktadır (Chasioti ve Vecchio, 2017). Hibridizasyon esasen bir optimizasyon işlemidir ve lifler arasındaki pozitif etkileşim genellikle “sinerji” olarak adlandırılmaktadır. Mekanik özelliklere ve boyutlara dayalı lif hibridizasyonu olmak üzere en yaygın kullanılan iki tip lif hibridizasyon yöntemi vardır. Mekanik özelliklere dayalı lif hibridizasyonu yaygın olarak yüksek ve düşük elastik modüle sahip liflerinin kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Boyutlara dayalı lif hibridizasyonu yaygın olarak benzer mekanik özelliklere sahip fakat farklı boyutlarda olan liflerinin kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu iki hibridizasyon kategorisi genel olarak performansa dayalıdır. Malzemelerin performansı oldukça önemli bir

parametredir ancak üretilen malzemelerin maliyeti de en önemli konulardan birisidir. ECC'nin eşsiz süneklik özelliğine, uygun dayanım, elastik modül ve en/boy oranı gibi liflerin seçimi, matris ve lifin etkili arayüz özellikleri ile dikkatlice özelleştirme ve oranlama yoluyla ulaşılır. ECC tipik karışım bileşeninde polivinil alkol lifi kullanılmaktadır. Polivinil alkol lifi kısmen pahalı bir liftir. Bu nedenle birçok araştırmacı ECC'nin maliyetini azaltmak için daha ekonomik lifleri yüzeyi yağla kaplı polivinil alkol lifleri ile birlikte kullanarak performansını incelemiştir (Soe ve diğerleri, 2013; Pan ve diğerleri, 2015; Pakravan ve diğerleri, 2016; Zhang ve diğerleri, 2017; Yu ve diğerleri, 2018). Gerçekleştirilen çalışmalar, diğer ekonomik liflerin yüzeyi yağla kaplı polivinil alkol liflerle kullanılmasının, ECC maliyetini düşürmenin etkili bir yolu olmasıyla birlikte aynı zamanda tatmin edici mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir. Yukarıda verilen bilgiler ışığında çalışmanın ilerleyen aşamalarında EGC üretiminde mekanik performans ve maliyet göz önünde bulundurularak hibrit lifli karışımların kullanılması planlanmıştır.

3.1.4.1. Polivinil Alkol Lif

Polivinil alkol lifi nispeten yüksek mukavemetli sentetik bir liftir (Studinka, 1989; Bentur ve Midness, 1990). PVA lifi yaklaşık olarak 800-2500 MPa çekme dayanımına ve yaklaşık olarak 29-42 GPa elastik modüle sahiptir. Polivinil alkol lifi nispeten pahalıdır (Estefen ve diğerleri, 2016). Polivinil alkol lifi kullanımı, mekanik özellikleri ve çimento matrisi ile kimyasal olarak bağlanma yeteneği nedeniyle birçok çimentolu sistemde kullanılmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında kullanılan iki çeşit polivinil alkol lifinin görüntüsü Şekil 3.18'de fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.18. (a) PVA-1 ve (b) PVA-2 liflerinin dijital kamera altındaki görüntüsü

Çizelge 3.9. PVA-1 ve PVA-2 liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif Türü	Boy (mm)	Çap (μm)	Görünen Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (kg/m^3)
Polivinil alkol-1 (PVA-1)	8	39	1092	42,8	1300
Polivinil alkol-2 (PVA-2)	8	15	1600	45	1260

Polivinil alkol lifi hidrofilik özelliğe sahiptir. Hidrofilik özellikte olmasına rağmen çok düşük su emme özelliğine sahiptir. Çimento matrisinin kimyasal ortamıyla çok uyumludur ve 100 yıllık hızlandırılmış yaşlanma testlerinden sonra neredeyse tüm gücünü koruduğu bulunmuştur (Ogawa ve Hoshiro, 2011). Polivinil alkol lifleri güçlü matris-lif bağ özellikleri nedeniyle diğer liflere kıyasla çekilme yerine kopma eğilimindedir (Betterman ve diğerleri, 1995; Hamoush ve diğerleri, 2010). Sertleşmiş betonun eğilme ve çekme mukavemetlerini artırma kabiliyetine sahip olmakla birlikte, tokluğu ve sünekliği de etkili bir şekilde artırma kabiliyetine sahiptir (Shafiq ve diğerleri, 2016). Bu nedenle polivinil alkol lifi, ECC’de en yaygın kullanılan liftir. Polivinil alkol lifi kullanılan ECC, yüksek sünekliği ve çatlak özellikleri ile geleneksel karıştırma teknikleri kullanılarak üretilmesi nedeniyle yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilen bir malzemedir. Polivinil alkol lifi kullanılarak üretilen ECC, sahada büyük ölçekli uygulamalarda da başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Kunieda ve Rokugo, 2006). Bazı ECC türlerinde kullanılan polivinil alkol lifi, şekil değiştirme sertleşmesi davranışı için matris-lif arayüz bağ mukavemetini azaltan ve sünekliği arttıracak hidrofobik (su itici) bir yağla kaplanmaktadır (ağırlıkça %1,2

oranında) (Li, 2003). Asit ve alkalilere karşı mükemmel direnç gösterdikleri bilinmesine rağmen deniz suyu ortamlarında, özellikle tekrarlanan ıslanma-kuruma döngülerden sonra bozulma gösterebileceği bildirilmiştir (Roque ve diğerleri, 2009). Kısmen pahalı oldukları için pratikte daha az yaygındır. Plastik büzülme ve termal çatlak kontrolü gibi yaygın lif kullanımının olduğu uygulamalarda polivinil alkol lifinin genel kullanımının olmaması nedeniyle daha ucuz sentetik lifler kadar satın alınmadıklarından dolayı ancak belirli satıcılardan satın alınabilmektedirler.

3.1.4.2. Polietilen Lif

Polietilen en çok üretilen plastiklerden biridir ve ambalajlamada yaygın olarak kullanılır. Polietilen lifi çeşitli mekanik özelliklerle üretilir. Tarihsel olarak polietilen, polipropilen liflerine benzer şekilde düşük dayanımlı ve düşük elastik modüle sahip karakterize edilmiştir ancak ultra yüksek dayanımlı polietilenin geliştirilmesi polietilen lifin dayanım ve sertlik potansiyelini büyük ölçüde artırmıştır.



Şekil 3.19. PE lifinin dijital kamera altındaki görüntüsü

Çizelge 3.10. PE lifinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif Türü	Boy (mm)	Çap (µm)	Görünen Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (kg/m ³)
Polietilen (PE)	9	12	3500	123	970

Yüksek yoğunluklu polietilen lifinin çekme dayanımı ve elastik modülü sırasıyla yaklaşık 3500 MPa ve 110 GPa kadar yüksek olabilmektedir (Nematollahi ve diğerleri, 2017). Polietilen lifi hidrofobik özelliğe sahiptir (Lu ve diğerleri, 1998). Görülebileceği gibi yüksek yoğunluklu polietilen liflerin çekme dayanımı ve elastik modülü diğer sentetik liflerden daha yüksektir. Yüksek yoğunluklu polietilen lif kimyasal olarak inerttir ve beton ortamda yüksek stabilite ve bozulma direnci sağlamaktadır. Yüksek yoğunluklu polietilen lif ayrıca diğer malzemelerle zayıf bir bağ oluşturmaya neden olan düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir (Marissen, 2011). Bu özellikler nedeniyle çimento matrisi ile mekanik bir bağ oluşturabilmektedir. Ancak yüzey işlemlerinin bağlanma mukavemetini arttırabildiği gösterilmiştir. Wu ve Li (1999), yüzey işleminin yüksek yoğunluklu polietilen liflerinin bağlanma mukavemeti üzerindeki etkisini incelemiş ve lifin üretici tarafından liflere uygulanan yüzey kaplaması nedeniyle çimento matrisi ile kabaca 1 MPa bağ oluşturabileceği sonucuna varmıştır. Aynı çalışmada liflerin plazma işleminin lif yüzeyinin sürtünme katsayısını ve matris-lif bağlanma kuvvetlerini önemli ölçüde arttırabileceği bulunmuştur. Yüksek yoğunluklu polietilen lifleri, polivinil alkol lifi kullanılarak üretilen ECC'ye benzer şekilde yeterli lif hacmi kullanıldığında şekil değiştirme sertleşmesi ve mikro çatlama sergileyen çimentolu kompozitler üretme yeteneğini göstermiştir. Ahmed ve diğerleri (2007), çimento bağlayıcılı kompozitlerin mekanik performansını arttırmak ve süneklik elde etmek için yüksek yoğunluklu polietilen liflerin kullanımını araştırmıştır. Yüksek yoğunluklu polietilen liflerin hacimce %2,5 oranında kullanımıyla şekil değiştirme sertleşmesi ve mikro çatlama davranışıyla birlikte çok yüksek süneklik ve tokluk elde edilmiştir. Bu çalışma aynı zamanda yüksek yoğunluklu polietilen liflerin kaba agregaya içermeyen çimento esaslı kompozitler ile oldukça iyi karıştığını göstermiştir. Benzer araştırmada Ahmed ve Maalej (2009), iki farklı uzunluktaki yüksek yoğunluklu polietilen liflerin performansını incelemiştir. Gerçekleştirdikleri çalışmada 18 mm uzunluğundaki yüksek yoğunluklu polietilen liflerin, kompozitlerin özellikle daha büyük deformasyon seviyelerinde, 12 mm uzunluğundaki yüksek yoğunluklu polietilen liflerden daha fazla sünekliği arttırmada etkili olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni muhtemelen liflerin düşük matris-lif bağlanma mukavemetidir. Bu da daha uzun liflere lif kesit alanı başına daha fazla bağlanma yüzey alanı avantajı sağlamaktadır. Daha yakın zamanlarda Curosu ve diğerleri (2017), gerçekleştirdikleri çalışmada hacimce

%2 oranında yüksek yoğunluklu polietilen liflerin kullanımının şekil değiştirme sertleşmesi ve mikro çatlama gösteren yüksek sünekliğe sahip harçların üretiminde etkili olduğunu göstermiştir. Choi ve diğerleri (2016; 2016), gerçekleştirdikleri çalışmalarda yüksek yoğunluklu polietilen liflerin alkali aktif bağlayıcı malzemelerde kullanımını araştırmıştır. Alkali aktif bağlayıcıların hacimce %1,75 oranında yüksek yoğunluklu polietilen lifin kullanılmasıyla yaklaşık olarak %7,5 çekme şekil değiştirme kapasitesi ile çok yüksek süneklik değerleri elde edilebileceği bulunmuştur. Yüksek yoğunluklu polietilen liflerin düşük matris-lif bağlanma dayanımı, liflerin tam çekme dayanımını ve sertliğini kullanmak için çok güçlü bir bağ ve/veya çok yüksek en/boy oranına ihtiyaç duyulması nedeniyle kullanımı sınırlı kalmıştır. Ek olarak yüksek yoğunluklu polietilen lifleri yüksek performanslı bir üründür, bu nedenle doğrudan üreticiden satın almak pahalıdır.

3.1.4.3. Nylon-mono Lif

Naylon genellikle poliamid polimerlerinin sınıfını belirtmek için kullanılır. Naylonlar veya poliamidler ilk mühendislik plastikleridir ve günümüzde bu malzemelerin en önemli türüdür (Ibeh, 2011). Naylon; giyim, mobilya, tekstil ve ticari uygulamalar gibi birçok farklı endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli mekanik özelliklere sahip naylon lifler retilabilmektedir. Naylon liflerin yüksek mekanik dayanım, aşınmaya karşı direnç, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklıklara kadar özelliklerini koruyabilme yeteneği ve kimyasallara karşı dayanım gibi birçok olumlu özelliği bulunmaktadır. Naylon lifler ilk olarak 1960 yılında Amerikan Ordu Mühendisleri tarafından, patlamaya dayanıklı askeri yapıların inşası için betonda bir katkı maddesi olarak kullanılması önerilmiştir (ACI 544.1R-96, 1996). Tez alışmaları kapsamında kullanılan NM lifinin görüntüsü şekil 3.20’de fiziksel ve mekanik özellikleri izelge 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.20. NM lifinin dijital kamera altındaki görüntüsü

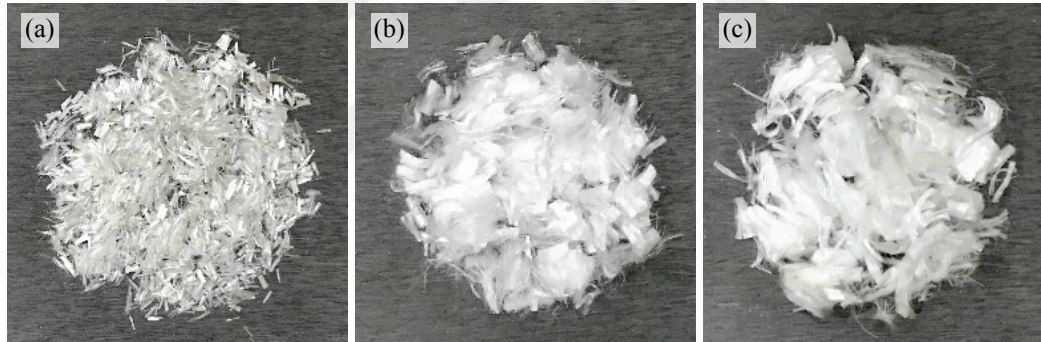
Çizelge 3.11. NM lifin fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif Türü	Boy (mm)	Çap (μm)	Görünen Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (kg/m^3)
Naylon-mono (NM)	19	26	966	25	1140

Naylon lifler betonun dayanımını, dayanıklılığını, tokluğunu ve sünekliğini arttırmak için beton içerisinde kullanılmaktadır (Rafalko ve diğerleri, 2007). Bununla birlikte karışımda homojen yayılması sebebiyle betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini geliştirebilmektedir (Song ve diğerleri, 2005). Naylon lifler hidrofilik özelliğe sahiptir ve karıştırma sırasında %5 mertebelerine kadar su emebilir (ACI 544.1R-96, 1996). Bu özellik, karıştırma suyuna birleşmesi nedeniyle naylon liflerin karıştırma sırasında homojen dağılması için faydalı olduğu düşünülmektedir (Song ve diğerleri, 2005). Bununla birlikte daha yüksek hacimli dozlarda, liflerin su emme kapasitesi, karışım suyunun aşırı emilmesine neden olduğundan karışımın işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Yap ve diğerleri, 2013). Naylon, beton matrisi ile herhangi bir kimyasal bağ oluşturmaz ancak lifler matristen çekildiği için çekme yükü artar. Bununla birlikte naylon liflerin hirofilik özelliğinin lif ve beton arasında yapışmayı sağladığı da düşünülmektedir (Rafalko ve diğerleri, 2007). Daha önce belirtildiği gibi naylon lifler karıştırma suyunu emebilir ve diğer liflere kıyasla işlenebilirliği azaltabilir. Bu özellikler naylon lifleri düşük lif hacimlerine sahip uygulamalarla sınırlandırabilmektedir. Naylon lifler çoğu beton lif distribütöründen kolayca satın alınabilmektedir.

3.1.4.4. Polipropilen Lif

Polipropilen, petrol ürünü propilenin ısı ve basınç altında uygun bir katalizör varlığında polimerizasyonu ile üretilen termoplastik bir malzemedir (Brown ve diğerleri, 2002). 1960'larda ticari olarak piyasaya sürülen polipropilen lifler o yıllardan beri birçok farklı endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Polipropilen lifler ilk olarak ABD Mühendisler Birliği için patlamaya dayanıklı binaların inşası amacıyla Goldfein tarafından bir beton katkı maddesi olarak önerilmiştir (Goldfein, 1965). Polipropilen lif, çimento kimyasıyla mükemmel kimyasal stabilitesi, imalat kolaylığı, bulunabilirliği ve uygun maliyeti nedeniyle inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan beton lifi türüdür. Tez çalışmaları kapsamında kullanılan polipropilen liflerinin görüntüsü Şekil 3.21'de fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.12'de sunulmuştur.



Şekil 3.21. (a) PP-1, (b) PP-2 ve (c) PP-3 liflerinin dijital kamera altındaki görüntüsü

Çizelge 3.12. (a) PP-1, (b) PP-2 ve (c) PP-3 liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

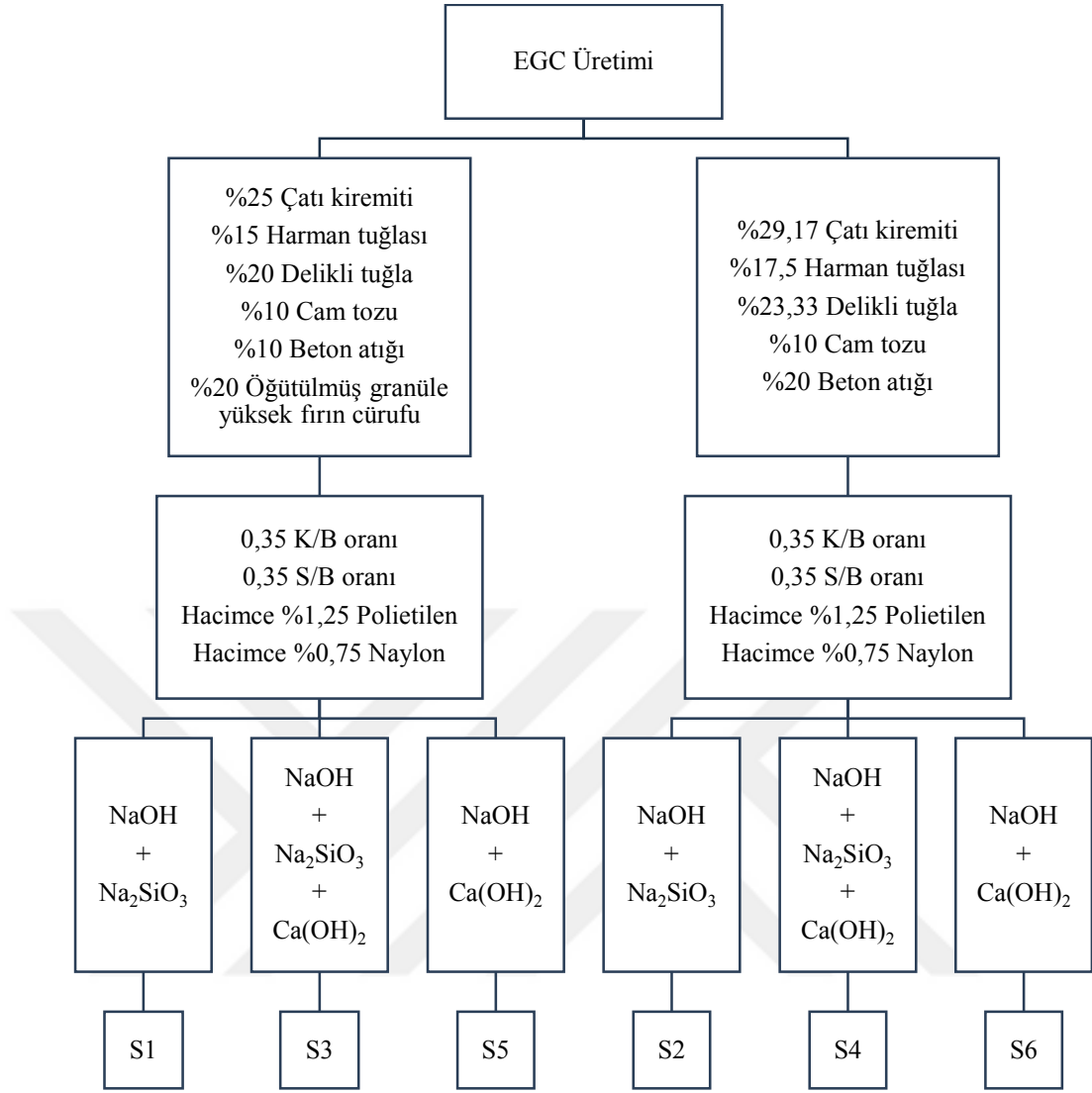
Lif Türü	Boy (mm)	Çap (µm)	Görünen Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (kg/m ³)
Polipropilen-1 (PP-1)	6	-	900	-	1140
Polipropilen-2 (PP-2)	12	30	500	3,5	910
Polipropilen-3 (PP-3)	18	30	500	3,5	910

Polipropilen lifin çeşitli beton karışımlarında kısa, rastgele süreksiz donatı olarak davranışları iyi araştırılmıştır (Singh ve diğerleri, 2004; Pakravan ve diğerleri, 2010; Alhozaimy ve diğerleri, 1996; Toutanji ve diğerleri, 1998). Polipropilen lifler nispeten düşük çekme dayanımlarına ve elastik modüle sahiptir. Her ne kadar geleneksel polipropilen liflere kıyasla çok daha yüksek dayanımlı ve yüksek elastik modüle sahip yeni tip yüksek dayanımlı polipropilen lifler geliştirilmiş olsa da diğer yüksek dayanımlı liflere kıyasla hala dayanımı ve elastik modülü düşüktür. Polipropilen lif düşük dayanımına rağmen, son derece sünek bir elyafır ve bu nedenle özellikle betonun tokluğunu ve darbe direncini arttırabilir. Polipropilen lifler hidrofobik özelliğe sahiptir ve bu özelliğe sahip olması karıştırma sırasında topaklaşmayı önlemesine yardımcı olmaktadır (Ramujee, 2013). Her ne kadar çeşitli karıştırma yöntemleri çalışılmış olsa da polipropilen lifler için özel bir karıştırma gerekliliği yoktur. En başarılı karıştırma yöntemi lifleri mikse dağıtmaktır (Swamy, 1978). Polipropilen liflerin hidrofobik yapısı ve kimyasal stabilitesi zayıf bir matris-lif bağ dayanımı ile sonuçlanabilmektedir (Mu ve diğerleri, 2002; Ranjbar ve diğerleri, 2016; Richardson, 2006). Ayrıca hidrofobik yapısı ve düşük yoğunluğu, yüksek hacimlerde karıştırma problemlerine neden olabilmektedir. Polipropilen lifleri diğer beton liflerinin çoğuna kıyasla nispeten düşük bir erime noktasına sahiptir. Bu nedenle ısıl kütleme gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmamalıdır (Mai, 1980). Düşük erime noktası, beton yapılarda yangınlar sırasında beton hasarını önlemek için kullanılmaktadır (Kalifa ve diğerleri, 2001) Lifler bir yangın sırasında erime noktalarına ulaştığında beton içindeki nemin buharlaşmasından kaynaklanan yüksek derecede basınç için kaçış yolları sağlamaktadır (Lee, 2012). Betonda polipropilen liflerin en yaygın kullanımı, plastik büzülme çatlaklarının kontrolü amaçlıdır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışımların Hazırlanması

EGC karışımlarının mekanik özelliklerini ve kendiliğinden iyileşme performansını araştırmak için deneysel bir program tasarlanmıştır. Deneysel programda altı farklı EGC karışım kullanılmıştır. Deneysel program kapsamında kullanılan altı farklı EGC karışım Bölüm 4'te deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Belirlenen karışımların her biri aynı S/B oranında çok farklı işlenebilirlik özelliklere sahiptir. Bu nedenle su ihtiyacının azaltılmasına ve buna bağlı olarak karışımların işlenebilirliğinin artırılmasına yardımcı olacak katkıların kullanılması düşünülmüştür. Ancak jeopolimer bağlayıcılı malzemeler üzerindeki etkileri bilinmediğinden söz konusu katkılar kullanılmamıştır. Su içeriğinin sabit bir S/B oranına göre mi yoksa belirli bir harç akışına göre mi belirleneceği konusunda kararsızlık yaşanmıştır. Çünkü aynı S/B oranında farklı alkali aktivatör tiplerinin kullanılmasıyla farklı işlenebilirlik özelliklerinin elde edildiğini söylemek mümkündür. Bu nedenle S/B oranı işlenebilirliği en düşük olan matris için lifin matris içerisinde homojen dağılmasını sağlayacak şekilde seçilerek tüm karışımlarda aynı S/B oranı kullanılmıştır. Altı EGC karışımdan oluşan deneysel program Şekil 3.22'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Deneysel programın şematik gösterimi

Tez çalışmasının ana odağı yüksek mekanik performansa ulaşmak olmasa da incelenen jeopolimer bağlayıcıların yeterli mekanik performansa sahip olduklarını doğrulamak ve ayrıca mikroyapı, kimyasal kompozisyon ve mekanik performans arasında karşılaştırma yapmak önemlidir. Bu kapsamda mekanik performans ve mikroyapı arasındaki ilişki önemlidir ve jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde mikroyapının uygulanan karıştırma ve döküm prosedürlerinden büyük oranda etkilendiği düşünülmektedir. Bu nedenle tüm karışımlar aynı karıştırma prosedürü kullanılarak hazırlanmıştır. EGC üretimleri 25 litre kapasiteye sahip Hobart tipi mikser kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EGC karışımlarının hazırlanma prosedürü:

- İlk olarak NaOH pulları hazırlanan sularda tamamen eriyene kadar (yaklaşık 5 dakika) karıştırılarak çözeltiler hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler soğuması için 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Çözeltilerin 24 saat bekletilmesinin nedeni NaOH pulları ve suyun tepkimesi sonucu çözeltinin sıcaklığının yaklaşık 100°C'ye çıkmasıdır. Çözelti sıcaklığı düşürülmeden gerçekleştirilen deneme dökümlerinde çözelti ve bağlayıcı malzemeler çok hızlı reaksiyon vermiş ve kalıba yerleştirmeden sertleşmiştir.
- Toz bağlayıcı malzeme ve ince geri dönüşüm beton agregası birlikte mikserle konularak 60 saniye 100 devir/dakika hızda kuru karışım gerçekleştirilmiştir.
- Hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisinin tümü 100 devir/dakika hızda 60 saniye boyunca eklenerek 120 saniye boyunca 100 devir/dakika hızda karıştırılmaya devam edilmiştir.
- Sodyum silikat çözeltisinin tümü 100 devir/dakika hızda 60 saniye boyunca eklenerek 120 saniye 150 devir/dakika hızda karıştırılmaya devam edilmiştir.
- Kalsiyum hidroksitin tümü 100 devir/dakika hızda 60 saniye boyunca eklenerek 180 saniye devir/dakika hızda karıştırılmaya devam edilmiştir.
- Son olarak polietilen ve naylon-mono lifler eklenerek liflerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanacak yeterli sürede (yaklaşık 180 saniye) 150 devir/dakika hızda karıştırılmış ve EGC karışımları hazırlanmıştır.
- Karışım daha sonra gerekli standartlar uygulanarak kalıplara yerleştirilerek 30 saniye boyunca titreşimli bir masa üzerinde titreştirilmiştir.



Şekil 3.23. EGC karışımının hazırlanması

EGC karışımlarının basınç dayanımlarının belirlenebilmesi için 50x50x50 mm küp numuneler, dört noktalı eğilme dayanımlarının belirlenebilmesi için 15x80x240 (yükseklikxgenişlikxboy) mm kupon numuneler, yarmada çekme dayanımlarının belirlenebilmesi için 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindir numuneler, çatlak özelliklerinin mikroskopla ölçülmesi, incelenmesi ve kendiliğinden iyileşme performansının belirlenebilmesi için 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindir numuneler üretilmiştir.

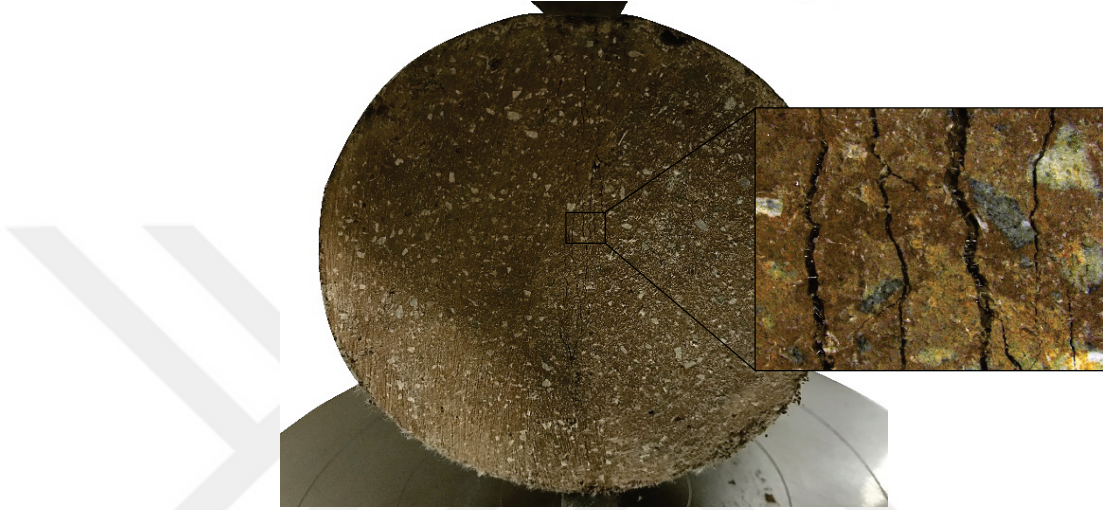


Şekil 3.24. EGC karışımlarının üretiminde kullanılan kalıplar

3.2.2. Önyükeme ve Kendiliğinden İyileşmenin Taşınma Özellikleri Bakımından Değerlendirme Yöntemleri

EGC karışımlarının kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından incelenmesi silindir numuneler üzerinden gerçekleştirilecektir. Silindir numunelerde çoklu mikro çatlak hasarı elde edilebilmesi için yarmada çekme altında önyüklemeye maruz bırakılmaları gerekmektedir. Farklı karışımlardan elde edilen deformasyon değerlerinin birbirine yakın bulunması sebebiyle, EGC numunelerinin önyükleme sınırı olarak yarmada çekme altında nihai deformasyon kapasitelerinin %80'inde karar kılınmıştır. Önyükleme 100 ton kapasiteli deformasyon kontrollü elektro-mekanik test cihazında 0,005 mm/saniye (0,3 mm/dakika) yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Önyüklemeye maruz bırakılmadan önce, nihai yarmada çekme dayanımı ve deformasyon kapasitelerinin belirlenmesi için EGC karışımlarının her birinin yarmada çekme dayanımları ve deformasyon seviyeleri belirlenmiştir. Her karışım için kendiliğinden iyileşme testlerinde kullanılmak üzere 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde ($\varnothing 100 \times 200$ mm) silindir jeopolimer numuneler üretilmiştir. Ardından üretilen silindir numuneler elmas testereyle 3 parçaya kesilerek kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi adına kılcal su emme, elektriksel empedans, hızlı klorür iyonu geçirirmliliği ve su emme testlerinde kullanılmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Her bir karışım için 24 adet, toplamda 144 adet, 100 mm çapında 50 mm yüksekliğinde ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindir numuneler hazırlanmıştır. Bütün numuneler ortalama sıcaklığı $23 \pm 2^\circ\text{C}$ olan ortam koşullarında 7 gün muhafaza edilmiş ve ardından her karışım için hazırlanan numunelerin yarısı önyüklemeye maruz bırakılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi numunelere yarmada çekme altında nihai deformasyon kapasitelerinin %80'ine kadar önyükleme uygulanmıştır. Deformasyonun önceden belirlenen seviyeye ulaşmasının ardından yük boşaltılmıştır. Kalan numuneler ise karşılaştırma amacıyla önyüklemeye maruz bırakılmamıştır. EGC'nin yüksek sünekliği sayesinde, numuneler yarmada çekme dayanımı-deformasyon grafiğinde plastik bölgede kalmış ve bölgesel geniş açıklıklı çatlakların yerine mikro çatlak oluşumu elde edilmiştir (Şekil 3.25). Yükün boşaltılmasından sonra çatlaklarda görülen az miktardaki kapanma dikkate alınmış ve tüm çatlak genişlikleri yüklemenin olmadığı durumlarda ölçülmüştür. Önceden belirlenmiş deformasyon seviyelerine kadar önyükleme uygulanan numuneler test cihazından

alınarak 125 X büyütme kapasitesine sahip dijital kamera entegreli bir optik mikroskop aracılığıyla belirli büyütme oranlarında çatlak özellikleri değerlendirilmiştir. Çatlak genişliklerinin ölçülmesinde “Application Suite Montage” isimli ticari yazılım kullanılmıştır. Önyükleme uygulanan silindir numunelerin çatlak genişliklerinin genellikle 10 ile 200 μm arasında değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 3.25. Numunelerin önyüklenmesi ve mikro çatlak hasarının oluşturulması

3.2.3. Kür Koşulları

EGC karışımlarının mekanik performansının değerlendirilebilmesi amacıyla numuneler 7, 28, 90 gün ortam şartlarında kürlenmiş ve ardından basınç, dört noktalı eğilme ve yarmada çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Testlerle ilgili detaylar Bölüm 3.2.4’te sunulmuştur.

EGC karışımlarının kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesi amacıyla ilk olarak üretilen silindir numuneler 7 gün ortam şartlarında başlangıç kürüne tabi tutularak mikro çatlaklar oluşturmak için yarmada çekme yüklemesi altında belirli bir deformasyon seviyesine ulaşınca kadar önyükleme uygulanmıştır. Önyükleme uygulanan ve sağlam numuneler üzerinde kılcal su emme, elektriksel empedans, hızlı klorür iyonu geçirimsizliği ve su emme testleri gerçekleştirilmiştir.

Testlerle ilgili detaylar Bölüm 3.2.4’te sunulmuştur. Daha sonra önyükleme uygulanan ve sağlam numuneler kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından değerlendirilmesi süresince gerçek saha koşullarını daha iyi temsil ettiği düşünülen çevresel kür koşulu olan ıslanma-kuruma (I-K) döngüsüne maruz bırakılmıştır. Kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilebilmesi için tüm testler 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında tekrarlanmıştır. Kendiliğinden iyileşme nedeniyle taşınma özelliklerindeki değişim, sağlam ve önyükleme uygulanan numuneler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca I-K döngüsü sırasında, kendiliğinden iyileşme ürünlerinin oluşumunu gözlemlemek ve çatlak özelliklerinin incelenmesi için deneyler gerçekleştirilmeden önce optik mikroskop ile çatlaklar fotoğraf olarak kaydedilerek gerekli değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

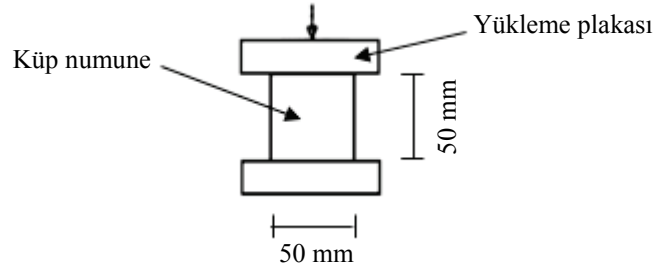


Şekil 3.26. EGC karışımlarının I-K döngüsüne maruz bırakılmaları

3.2.4. Deney Prosedürleri

3.2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Hazırlanan EGC karışımlarının her birinden 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı için her yaşta 3 adet numune kullanılmak üzere 50x50x50 mm boyutlarında toplamda 9 adet küp numunesi hazırlanmıştır. Bütün numuneler ortalama sıcaklığı $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ olan ortam koşullarında deney tarihine kadar muhafaza edilmiştir. Bu kür yönteminin seçilmesinin ana sebebi EGC için uygulanan en uygun kür yönteminin bu şekilde olmasıdır. Testteki olası belirsizlikleri en aza indirmek için üst ve alt yüzeylerin düzlüğünün sağlanması amacıyla numunenin dökümü sırasında üste gelen ve pürüzlü olan yüzey, uygulanan basınç kuvvetine paralel olarak yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı testi, ASTM C39 (2003) standardına uygun olarak 0,9 kN/sn yükleme hızında 100 ton kapasiteli bir test cihazı kullanılarak küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım sonucu üretilen 3 numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı deney düzeneği Şekil 3.27’de şematik olarak gösterilmiştir



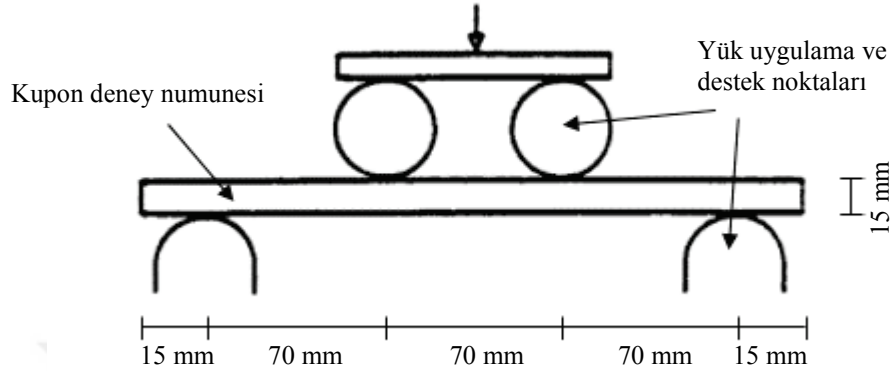
Şekil 3.27. Basınç deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi

Kompozit malzemelerin şekil değiştirme sertleşmesi davranışının belirlenmesi için uygulanabilecek en uygun test eksenel çekme testidir. Bununla birlikte önceki çalışmalarda tam anlamıyla şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyen kompozit

malzemelerin eksenel çekme şekil değiştirme kapasitesiyle eğilmede çekme altındaki orta açıklık deformasyon kapasitesi arasında doğrudan bir ilişki olduğu belirtilmiştir (Qian ve Li, 2008). Elde edilen bağıntı doğrultusunda ve deney esnasında kullanılan numunelerin geometrik özellikleri de dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Bu kapsamda EGC karışımların mekanik özellikleri ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışının belirlenebilmesi için karışımlara dört noktalı eğilmede çekme deneyi uygulanmıştır. Dört noktalı eğilmede çekme deney düzeneği Şekil 3.28’de şematik olarak gösterilmektedir. Hazırlanan EGC karışımlarının her birinden 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları için her yaşta 3 adet numune kullanılmıştır. Her karışımda eğilmede çekme testlerinde kullanılmak üzere 15x80x240 (yükseklikxgenişlikxboy) mm boyutlarında toplamda 9 adet kupon numunesi hazırlanmıştır. Bütün numuneler ortalama sıcaklığı $23\pm2^{\circ}\text{C}$ olan ortam koşullarında deney tarihine kadar muhafaza edilmiştir. Bu kür yönteminin seçilmesinin ana sebebi EGC için uygulanan en uygun kür yönteminin bu şekilde olmasıdır. Eğilmede çekme testi 100 ton kapasiteli deformasyon kontrollü elektro-mekanik test cihazında ASTM D6272 (2010) standardına uygun olarak 0,005 mm/saniye (0,3 mm/dakika) yükleme hızıyla kupon numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kupon numuneler üzerinde 210 mm açıklık eşit olarak üç parçaya bölünerek üzerinde yüklerin uygulanacağı noktalar belirlenmiştir. Daha sonra kupon numunelerinin eğilme yükleri altında özelliklerinin daha net bir şekilde belirlenmesi ve testteki olası belirsizlikleri en aza indirmek için belirlenen noktalar temizlenmiştir. Deney esnasında kupon numunenin orta noktasında oluşacak deformasyon bilgisayar sistemi sayesinde saniyede 10 veri olacak şekilde hassas bir şekilde kaydedilmiştir. Elektro-mekanik test cihazı ile ölçülen değerlerin beklenenden daha yüksek çıkması muhtemeldir. Bunun nedeni cihaz başlıklarının rijit olmasıdır. Bu nedenle elektro-mekanik test cihazının kupon numunelerin orta noktasında oluşacak deformasyon ölçümlerine ek olarak deflaktometre kullanılarak da deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deflaktometre ve elektro-mekanik test cihazıyla gerçekleştirilen ölçümlerin daha yüksek hassasiyet sağlanması açısından ortalamaları alınmış ve nihai değerlere ulaşılmıştır. Test edilen kupon numunelerin ulaştıkları maksimum yük değerleri baz alınarak eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Maksimum eğilme dayanımı yükü değerine karşılık gelen deformasyon değerinin, orta açıklık deformasyon değeri olarak kabul edilmesi düşünülmüş ancak deney esnasında bu noktadan sonrada numunelerin

ciddi oranda yük taşıdığı ve süneklik gösterdiği görülerek orta açıklık deformasyon değeri kupon numunelerin göçtüğü andaki değer olarak kabul edilmiştir. Eğilme dayanımı ve orta açıklık deformasyon sonuçları her yaş için üretilen 3 numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

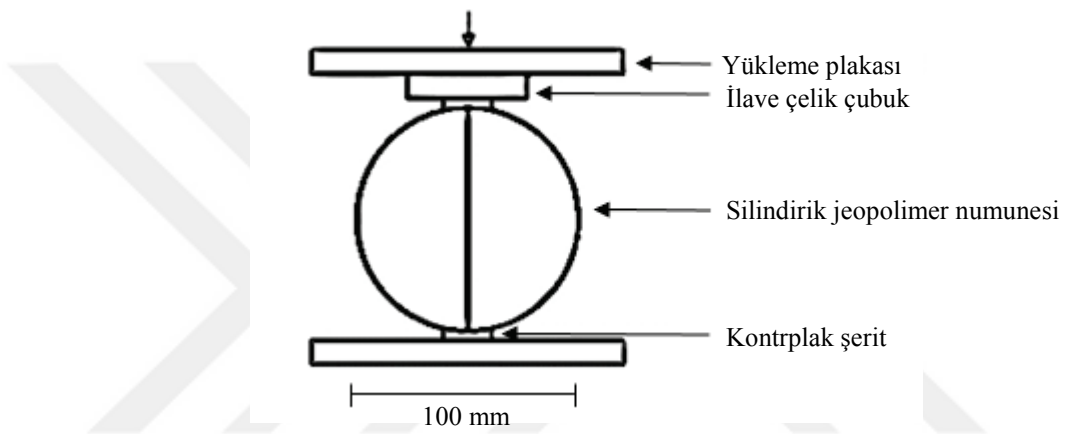


Şekil 3.28. Dört noktalı eğilmede çekme deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.4.3. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

EGC karışımların mekanik özellikleri ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışının belirlenebilmesi için karışımlara dört noktalı eğilmede çekme deneyine ek olarak yarmada çekme deneyi uygulanmıştır. Yarmada çekme deneyi Şekil 3.29’da şematik olarak gösterilmektedir. Hazırlanan EGC karışımlarının her birinden 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları için her yaşta 3 adet numune kullanılmıştır. Her karışımda yarmada çekme testlerinde kullanılmak üzere 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde ($\varnothing 100 \times 200$ mm) silindir jeopolimer numuneler üretilmiştir. Ardından üretilen silindir numuneler elmas testereyle 3 parçaya kesilerek yarmada çekme testlerinde kullanılmak üzere 100 mm çapında 50 mm yüksekliğinde, ($\varnothing 100 \times 50$ mm) toplamda 9 adet silindir numunesi hazırlanmıştır. Bütün numuneler benzer şekilde ortalama sıcaklığı $23 \pm 2^\circ\text{C}$ olan ortam koşullarında deney tarihine kadar muhafaza edilmiştir. Bu kür yönteminin seçilmesinin ana sebebi daha önce belirtildiği gibi EGC için uygulanan en uygun kür yönteminin bu şekilde olmasıdır. Yarmada çekme testi, 100 ton kapasiteli deformasyon kontrollü elektro-mekanik test cihazında 0,005 mm/saniye (0,3 mm/dakika) yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Silindir

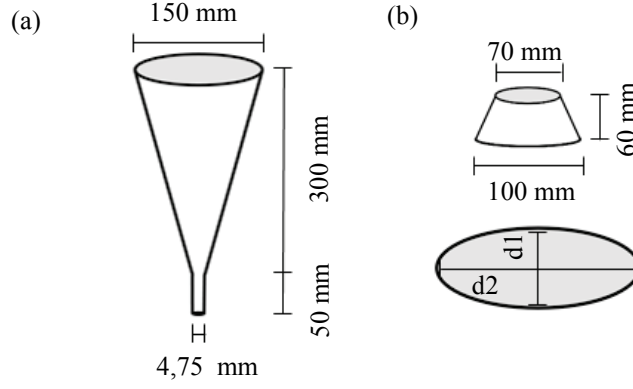
numunelerinin yarmada çekme altında özelliklerinin daha net bir şekilde belirlenmesi, testteki olası belirsizlikleri en aza indirilmesi ve yükleme noktalarında oluşacak kırılmaların önüne geçebilmek için yükleme noktalarıyla numuneler arasına kontrplak şeritler yerleştirilmiştir. Deney esnasında silindir numunede oluşan deformasyon bilgisayar sistemi sayesinde saniyede 10 veri olacak şekilde hassas bir şekilde kaydedilmiştir. Test edilen silindir numunelerin ulaştıkları maksimum yük değerleri baz alınarak yarmada çekme dayanımları hesaplanmıştır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları her yaş için üretilen 3 numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.29. Yarmada çekme deney düzeneğinin şematik gösterimi

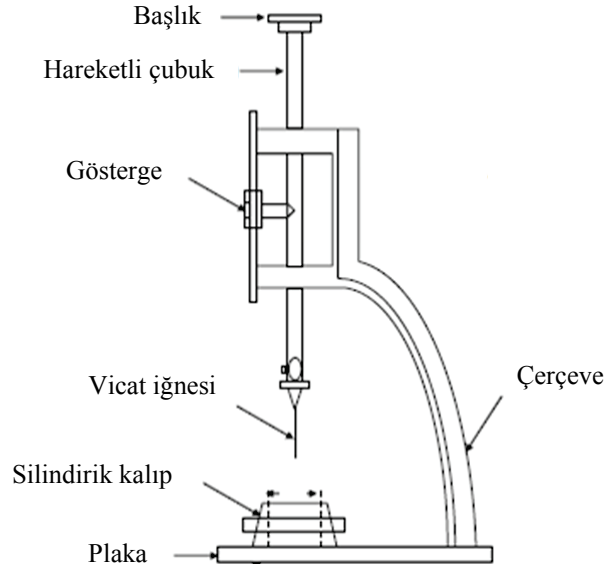
3.2.4.4. İşlenebilirlik ve Priz Süreleri Deneyleri

EGC karışımlarda yüksek süneklik elde etmek için lifin EGC matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılması gerekmektedir. Lifin EGC matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılmadığı durumlarda EGC'nin mekanik performansı azalacaktır. Bu nedenle EGC matrisinin taze özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. EGC matrisinin taze özelliklerinin belirlenebilmesi adına tez çalışmaları kapsamında genel olarak üretilcek nihai EGC karışımlarının taze özellikleri Marsh-hunisi deneyi ve mini çökme-yayılma deneyi kullanılarak belirlenmiştir. Marsh-hunisi ve mini çökme-yayılma deneyinde kullanılan deney ekipmanları Şekil 3.30'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.30. (a) Marsh-hunisi ve (b) kesik koninin şematik gösterimi

EGC karışımların taze özelliklerinin belirlenmesi birçok faktörün etkisi nedeniyle genellikle çok büyük değişiklik göstermektedir. Mikser tipi, karıştırma prosedürü, karıştırma hızı, aktivatörlerin eklenme sırası ve sıcaklığı gibi birçok parametre EGC karışımların taze özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle tez çalışmasında kontrollü laboratuvar koşulları altında karışımların taze özellikleri belirlenmiştir. Her karışımın hazırlanmasında ve test edilmesinde aynı prosedür uygulanmıştır. Ayrıca tüm testler aynı kişi tarafından gerçekleştirilmiştir. Tüm olası varyasyonların etkisini en aza indirmek için testler iki kez tekrarlanarak her bir karışım için sonuçların ortalaması alınmıştır. Mini çökme-yayılma deneyi Şekil 3.30.b’de gösterildiği gibi 100 mm alt çapa, 70 mm üst çapa ve 60 mm yüksekliğe sahip tepesi kesik koni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Koni, cam plaka üzerine yerleştirilerek tamamen harçla doldurulmuş ve yukarı kaldırılmıştır. Harcın akışı durduğunda yayıldığı çap karşılıklı iki yönde ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır. Marsh-hunisi deneyi, belirli bir hacimdeki hamur karışımın standart huniden akması için gerekli sürenin ölçülmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu çalışmada şekilde gösterildiği gibi 1500 mL kapasiteli ve 4,56 mm iç delik çapına sahip plastik huni kullanılmıştır. Koninin alt ucu parmakla kapatılarak içi tamamen hamur karışım ile doldurulmuş, daha sonra alt çıkış açılarak hamur karışımın dışarı akması sağlanmıştır. Hamur karışımın Marsh-hunisi akış süresi, alt çıkışın açılması ile 100 mL hamur akışının süresi arasında saniye cinsinden geçen süre olarak kaydedilmiştir.



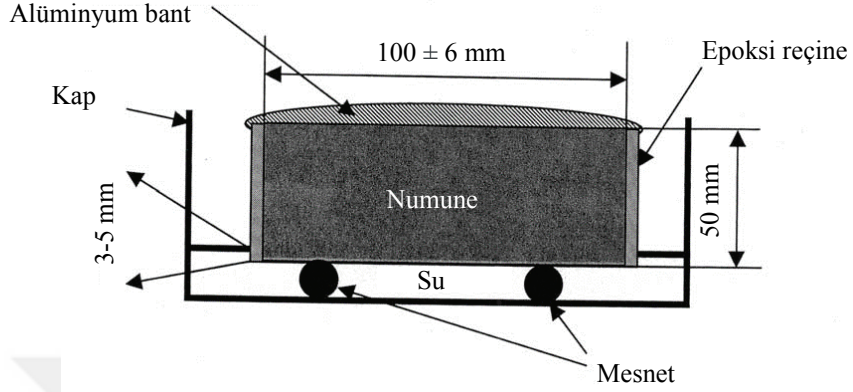
Şekil 3.31. Vicat aletinin şematik gösterimi

Bağlayıcı toz malzeme ile çeşitli alkali aktivatörlerin birleşiminin ardından üretilen hamur karışımlar plastik (şekil verilebilir) haldedir. Bu birleşimin ardından jeopolimer reaksiyonların başlaması ile karışım plastik özelliğini zamanla kaybetmekte ve sertleşmektedir. Bağlayıcı toz malzemenin alkali aktivatör ile birleştiği andan itibaren çeşitli reaksiyonların gerçekleşmesiyle katılaşp plastik özelliğini kaybetmesi boyunca geçen süreye priz alma süresi denilmektedir. EGC hamur karışımların kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna bağlı olarak çok farklı priz sürelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle EGC hamur karışımların priz başlama ve priz sona erme süreleri belirlenmiştir. Karışımların priz süreleri Şekil 3.31’de şematik olarak gösterilen vicat aleti kullanılarak belirlenmiştir. İlk olarak hazırlanan EGC hamur karışımı cam levha üzerindeki vicat halkasına sıkıştırılmadan dikkatli bir şekilde dolduruldu. Daha sonra sarsılmamasına özen gösterilerek doldurulan hamur karışımın yüzeyi spatula ile tesviye edildi. İğne, teğet olacak şekilde jeopolimer hamurunun üst yüzeyine yaklaştırıldı. İğne serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile jeopolimer hamurunun içine inmesi beklendi. İğne ile plaka arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süre priz başlama süresi olarak kaydedildi. İğnenin hamur karışımın yüzeyinden 0,05 mm battığı zamana kadar geçen süre priz sona erme süresi olarak kaydedildi.

3.2.4.5. Kılcal Su Emme Deneyi

Betonun dayanıklılığı büyük ölçüde sıvıların matrise girme ve hareket etme kolaylığına bağlıdır. Kılcal su emme, betonun kılcal emme yoluyla sıvıyı emme ve iletme yeteneğinin bir göstergesidir (Sabir ve diğerleri, 1998). Bu nedenle kılcal su emme ölçümü çatlak iyileşme performansını değerlendirmek için kullanılabilir (De Rooij ve diğerleri, 2013). Kılcal su emme testi birçok araştırmacı tarafından ECC numunelerinde kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilebilmesi için kullanılmıştır (Şahmaran ve diğerleri, 2008; Zhu ve diğerleri, 2012; Kanellopoulos ve diğerleri, 2015; Alghamri ve diğerleri, 2016). Çalışma kapsamında EGC'lerin kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için ASTM C1585 (2013) uyarınca kılcal su emme testi kullanılmıştır. Kılcal su emme deneyi Şekil 3.32'de şematik olarak gösterilmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi kılcal su emme testi malzemenin tek yönden kılcal yolla su emmesine izin verildiğinde belirli zaman aralıklarında numunenin kütlesindeki artışın kaydedilmesinden oluşmaktadır. Kılcal su geçirimsizliği testlerinde kullanılmak üzere her karışımdan 3 adet sağlam 3 adet önyüklenmiş numune test edilmek üzere 50 mm kalınlığında, 100 mm çapında ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindirik numuneler hazırlanmıştır. Kılcal su geçirimsizliği testlerine başlamadan önce, test edilecek numuneler ilk olarak sabit ağırlığa ulaşmaya kadar iki gün boyunca $50 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip fırında kurumaya bırakılmıştır. Tüm EGC silindir numuneler kuruma işleminden sonra 3-5 mm derinliğe sahip olacak şekilde su içerisine daldırılmıştır. Suyun buharlaşmasını engellemek ve numune üzerinde tek yönlü su hareketi sağlamak için silindir numunelerin yan yüzeyleri epoksi reçine ile kaplanmış, suyun buharlaşmasını önlemek için üst yüzeyi ise alüminyum bantla bantlanmıştır. Böylelikle numunelerin sadece çatlak tek yüzü kılcal su emme testi için açık bırakılmıştır. Daha sonra kılcal yolla su emmeye bırakılan EGC silindirik numunelerinin ağırlıklarındaki değişimler belirli aralıklarla kaydedilmiştir (1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 360 dakika). Ağırlıkta gözlemlenen değişimlerin (g) numunelerin kesit alanı (mm^2) ve kaydedilen sıcaklıktaki suyun yoğunluğuna (g/mm^3) bölünmesiyle elde edilen kılcal su emme değerleri (mm) zamanın kareköküne ($\text{dk}^{1/2}$) karşı grafiğe çizilmiştir. Elde edilen grafiklerin eğimleri, EGC karışımlarının ilk 6 saat sonundaki kılcal su emme katsayıları olarak kullanılmıştır. Bütün numuneler için başlangıç kılcal su emme ölçümlerinin

kaydedilmesinden sonra, söz konusu eğim, kılcal su emme değerleri (mm) - zamanın karekökü ($dk^{1/2}$) eğrilerine en küçük kareler yöntemi lineer regresyon analizi uygulanarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.32. Kılcal su emme deney düzeneğinin şematik gösterimi

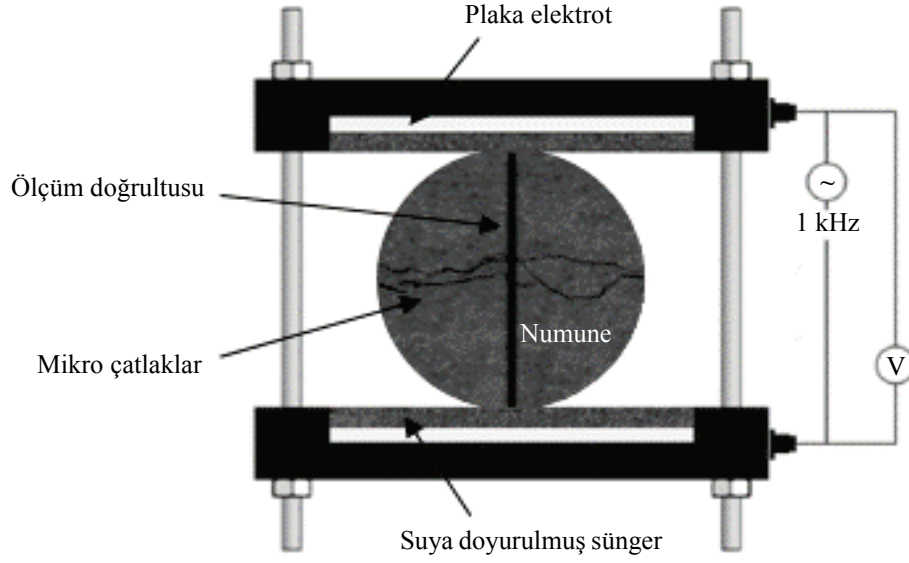
Bu test yöntemi, sadece numunenin yüzeyi suya maruz kaldığında zamanın bir fonksiyonu olarak suyun emilmesinden kaynaklanan, numunenin kütlesindeki artışı ölçerek suyun deney numunesi tarafından emilim oranını belirlemek için kullanılır. Kılcal su emme ölçümleri sadece çatlak sayısına bağlı değildir. Çatlak sayısı kadar çatlak uzunluğu, kıvrımlılığı ve genişliği de kılcal su emme üzerinde büyük öneme sahiptir. Bu nedenle farklı numuneler üzerindeki küçük sapmaların bu etkenlerden dolayı olma ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2.4.6. Elektriksel Empedans Deneyi

Elektriksel empedans ölçümü, beton elektriksel direncini hızlı ve pratik bir şekilde değerlendirmek için kullanılan tahribatsız bir test yöntemidir. Elektriksel empedans testi araştırmacılar tarafından ECC numunelerinde kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilebilmesi için kullanılmıştır (Yıldırım ve diğerleri, 2015; Şahmaran ve diğerleri, 2017; Yıldırım ve diğerleri, 2018). Çalışma kapsamında EGC'lerin kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için elektriksel empedans testi kullanılmıştır. Elektriksel empedans deneyi Şekil 3.33'te şematik olarak

gösterilmektedir. Elektriksel empedans ölçümleri eksenel tek yönlü yapılandırmaya sahip RCON marka standart bir beton direnç ölçer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tip direnç ölçer için yapılandırma ve tipik test düzeneğiyle ilgili ayrıntılar Spragg ve diğerleri'nin (2013) çalışmalarında bulunabilir. Elektriksel empedans testlerinde kullanılmak üzere her karışımdan 3 adet sağlam 3 adet önyüklenmiş numune test edilmek üzere 50 mm kalınlığında, 100 mm çapında ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindirik numuneler hazırlanmıştır. Bu test yönteminde, plaka elektrotlar arasına $\varnothing 100 \times 50$ mm silindirik örnekler 100 mm'lik yüzeyleri plaka elektrotlara dik olacak şekilde yerleştirilir. Elektrotlar ve deney numunesi arasında iletken bir ortamın bulunması şarttır (Newlands ve diğerleri, 2008). Bu nedenle plaka elektrotlar ile örnekler arasında yeterli elektrik teması sağlamak için 5 mm kalınlığında, 150 mm çapında ($\varnothing 150 \times 10$ mm) suya doymuş silindir süngerler kullanılmıştır. Bu yeterli iletken temas aynı zamanda ıslak süngerler yerine iletken jel veya ıslak kağıt havlu ile de elde edilebilmektedir (Spragg ve diğerleri, 2012). Her ölçümden önce kullanılan süngerlerin ağırlıkları ölçülerek aynı miktarda suya doymun olmalarına dikkat edilmiştir. Elektriksel empedans ölçümlerine başlanmadan önce süngerlerin suya doymun halde elektriksel empedans ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sonuç alınamamıştır. Bu nedenle numunelerin elektriksel empedans ölçümleri herhangi bir düzeltme yapılmaksızın sonuçlar cihazdan alındığı gibi kullanılmıştır. Elektriksel empedans ölçümlerinin daha hassas gerçekleştirilmesi için tüm deney numunelerinin süngere temas yüzeyi benzer özelliklerde (büyük boşluklar ve mikro çatlaklar bulundurmayan) seçilmeye dikkat edilmiştir. Tez çalışmaları boyunca kullanılan beton direnç ölçer cihazı alternatif akım empedans tekniğiyle çalışmaktadır. Cihaz çok çeşitli frekans değerlerinde (1 Hz ile 30 kHz) çalışabilmekte ve 0° ile 180° arasındaki faz açısı değerlerini verebilmektedir. Ayrıca cihaz elektriksel empedans ölçümlerini 5 saniyeden daha kısa sürede gerçekleştirmektedir. Cihaz çok çeşitli frekans değerlerinde çalışabilmesine rağmen frekans değeri Hou (2008) tarafından yapılan öneri doğrultusunda seçilmiştir. Hou, 1 kHz frekansa sahip bir alternatif akımının uygulanmasıyla malzemedeki polarizasyon etkisinin ortadan kaldırılabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle çalışma sırasında 1 kHz'lik ortak frekans seviyesinde elektrik empedans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elektriksel empedans testi sırasında aynı numune üzerinde tekrarlanan ölçümlerin numune üzerinde her seferinde aynı noktadan gerçekleştirilmesi için $\varnothing 100 \times 50$ mm'lik silindir numunelerin

kesilen yüzeylerinin tam ortasına çizgi çekilmiş ve çekilen çizgiler referans kabul edilerek ölçümler çizginin yönünde gerçekleştirilmiştir. Çizgiler önyüklenmiş numunelerde mikro çatlaklara dik olacak şekilde çizilmiştir. Bu sayede numunelerin içinden geçen elektriksel akımın mikro çatlaklarla karşılaşma ihtimali arttırılmıştır. Aynı zamanda bu şekilde elektriksel empedans ölçümlerindeki değişimlerin kolay bir şekilde gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Elektriksel empedans ölçümleri esnasında numunelerin nem oranları önemlidir ve nem oranının sonuçları doğrudan etkileyeceği bilinmektedir. Bu durum özellikle önyüklenmiş numuneler için daha da önemlidir. Çünkü test sırasında mikro çatlaklardaki yüksek nem oranı kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesinde hassasiyeti etkileyebilmektedir. Bu nedenle I-K döngüsüne maruz bırakılan numuneler sudan çıkarıldıktan sonra çevresel koşullara (%50±5 bağıl nem, 23±2°C sıcaklık) sahip bir oda içerisinde bir gün boyunca bekletilmiş ardından iki gün boyunca 50°C fırında kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra kurumaya bırakılan numuneler fırından çıkarılan sonra çevresel koşullara sahip bir oda içerisinde 6 saat boyunca bekletilerek deney gerçekleştirilmiştir. Ek olarak elektriksel empedans ölçümlerinin daha hassas olabilmesi için fırında kuruyan numunelerin test sırasında doymuş süngerlerden gelen suyun gözeneklere ve/veya mikro çatlaklara girmesine izin vermemek için deney hızlı gerçekleştirilmiştir. Numunelerin içinden geçen elektriksel akımın hareket ettiği alanın hesaplanması oldukça zordur. Bu nedenle ölçümler doğrudan empedans değerleri olarak verilmiştir. Deney numunelerinin aynı hacimde ve geometride kullanılmasıyla ölçülen empedans değerleri direnç değerleri bakımından ele alınmıştır.

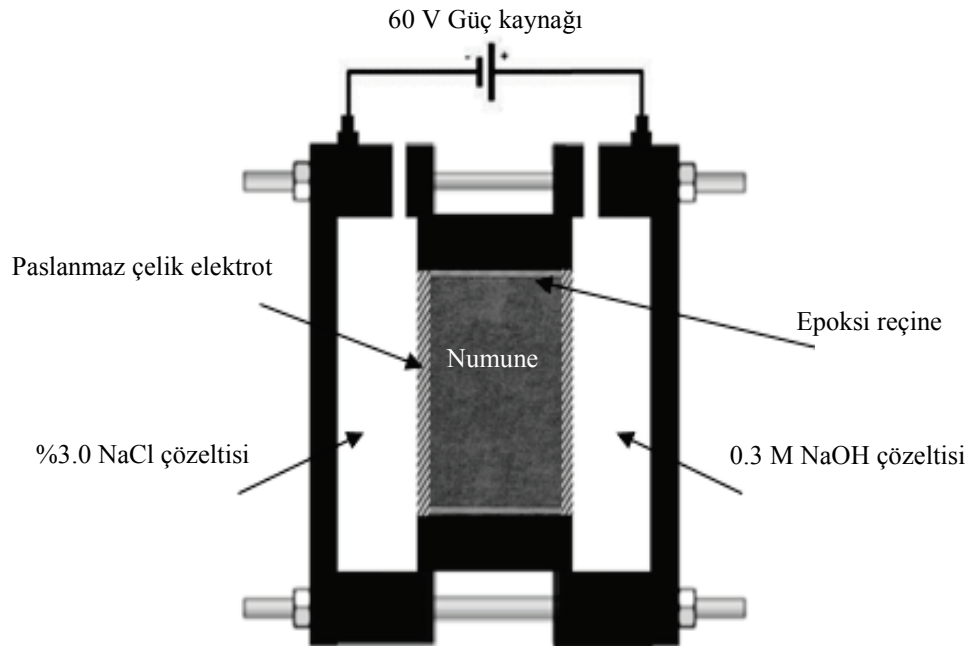


Şekil 3.33. Elektriksel empedans deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.4.7. Hızlı Klorür İyonu Geçirimsilik Deneyi

Hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi betonun dayanıklılığını, özellikle klorür iyonu geçirimsiliğine karşı direncini hızlı ve pratik bir şekilde değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan test yöntemlerinden biridir. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi birçok araştırmacı tarafından ECC numunelerinde kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilebilmesi için kullanılmıştır (Şahmaran ve diğerleri, 2008; Şahmaran ve diğerleri, 2013; Şahmaran ve diğerleri, 2015; Yıldırım ve diğerleri, 2018). Önceki çalışmalar bu test yönteminin başarılı şekilde kullanabileceğini göstermiştir. Çalışma kapsamında EGC'lerin kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için ASTM C1202 (1997) uyarınca hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi kullanılmıştır. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik deneyi Şekil 3.34'te şematik olarak gösterilmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi malzemenin geçirimsiliğini ölçtüğü düşünülmekte olup beton numunelerinin elektriksel iletkenliğinin bir ölçüsüdür. Numuneden geçen yüke göre betonun geçirimsiliği ile ilgili nitel bir derecelendirme yapılmaktadır. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik testlerinde kullanılmak üzere her karışımdan 3 adet sağlam 3 adet önyüklenmiş numune test edilmek üzere 50 mm kalınlığında, 100 mm çapında ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindirik numuneler hazırlanmıştır. Silindirik numunelerin yan yüzeyleri epoksi ile kaplandıktan sonra kuru ortamda 3 saat boyunca vakum

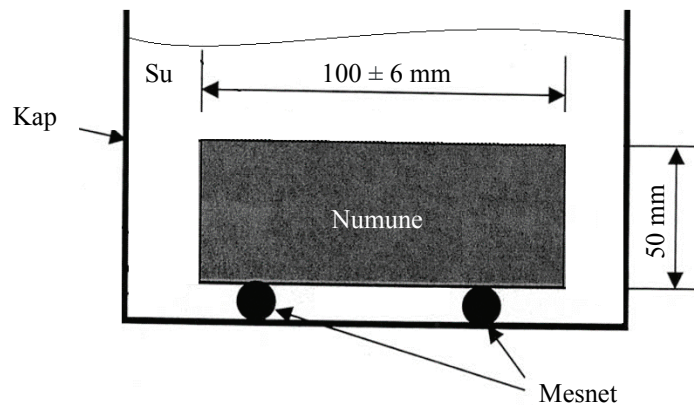
uygulanmaktadır. Vakum uygulanan numuneler, vakum haznesine su doldurularak 1 saat boyunca vakum etkisinde su emmesi sağlanmaktadır. Ardından numuneler deney başlangıcına kadar su içinde bekletilmektedir. Numunelerin su içerisinde bekletilmesinin nedeni suya doymun halde kalmalarını sağlamaktır. Daha sonra deney için sudan çıkarılan numuneler hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi hücrelerinin arasına yerleştirilmiştir. Numuneler yerleştirilerek sistem bağlandıktan sonra test hücresinin sol tarafı (-) %3 sodyum klorür (NaCl) çözeltisi ile sağ tarafı (+) 0,3 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile standartlara uygun şekilde doldurulmuştur. Hücreler içine doldurulan çözeltilerin numuneyle temasına izin veren ve kullanılan silindir numunelere uygun boyutlara sahip bir tasarıma sahiptir. Test, numune üzerine 60 V sabit potansiyel farkı uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Elde edilen akım, toplam 6 saatlik bir süre için her 30 dakikalık aralıkta ölçülür. 6 saatin sonunda numune hücreden çıkarılır ve numuneden geçen toplam elektriksel akım miktarı denklem kullanılarak Coulomb (C) cinsinden hesaplanır. Coulomb cinsinden hesaplanan geçen toplam elektriksel yük, betonun klorür iyonu geçirimsiliğine direnme kabiliyeti ile ilgilidir. Betona daha fazla klorür iyonu göç ettikçe daha fazla akım geçebilir ve 6 saat boyunca geçen toplam yük artar. Toplam yük için yüksek bir değer, klorür iyonunun betona çok nüfuz ettiğini gösterir.



Şekil 3.34. Hızlı klorür iyonu geçirimsiliği deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.4.8. Su Emme Deneyi

Betonun dayanıklılığı büyük ölçüde sıvıların matrise girme ve hareket etme kolaylığına bağlıdır. Su emme, beton içerisindeki boşlukların sıvıyı emme yeteneğinin bir göstergesidir. Çalışma kapsamında EGC'lere ASTM C642 (2013) uyarınca atmosferik basınç altında su emme testi uygulanmıştır. Su emme deneyi Şekil 3.35'te şematik olarak gösterilmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi su emme testi beton malzemenin su emmesine izin verilerek suya doygun hale geldiğinde numunenin kütlesindeki artışın kaydedilmesinden oluşmaktadır. Su emme testlerinde kullanılmak üzere her karışımdan 3 adet sağlam 3 adet önyüklenmiş numune test edilmek üzere 50 mm kalınlığında 100 mm çapında ($\varnothing 100 \times 50$ mm) silindirik numuneler hazırlanmıştır. Su emme testlerine başlamadan önce, test edilecek numuneler ilk olarak sabit ağırlığa ulaşmaya kadar iki gün boyunca $50 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip fırında kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra kurumaya bırakılan numuneler fırından çıkarıldıktan sonra çevresel koşullara ($\%50 \pm 5$ bağıl nem, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık) sahip bir oda içerisinde 6 saat boyunca bekletilerek ağırlıkları kaydedilmiştir. Tüm EGC silindir numuneler kuruma ve ağırlıklarının kaydedilmesinin ardından tüm yüzeyleri su içerisinde olacak şekilde suya daldırılmıştır. Daha sonra su emmeye bırakılan EGC silindirik numuneleri 24 saat sonra su içerisinde çıkarılmış tüm yüzeyleri hafifçe kurulanarak ağırlıkları kaydedilmiştir Ağırlıkta gözlemlenen değişimler belirlenerek EGC karışımlarının ilk 24 saat sonundaki su emme yüzdeleri belirlenmiştir.



Şekil 3.35. Su emme deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.4.9. Mikroskobik Gözlem ve Analiz

Jeopolimerizasyon reaksiyonları sonucu sentezlenen reaksiyon ürünlerinin ve kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kimyasal kompozisyonlarını ve mineralojik oluşumlarını belirlemek için çeşitli mikroyapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan toz bağlayıcı malzemelerin kimyasal içerikleri X-ışını floresans (XRF) analizi ile kristal yapıları X-ışını kırınım (XRD) analizi ile morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile element analizi enerji ayırmalı X-ışını analizi (EDX) ile belirlenmiştir. Üretilen jeopolimer numunelerinin molekül yapısı ve bağları Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre (FTIR) analizi ile belirlenmiştir. Jeopolimerizasyon reaksiyonları sonucu sentezlenen reaksiyon ürünlerinin ve kendiliğinden iyileşme ürünlerinin mikroyapısal görüntülenmesi ve element analizi SEM/EDX analizi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sentezlenen ürünlerin mineralojik oluşumları XRD analizi ile belirlenmiştir.

4. JEOPOLİMER BAĞLAYICILI KOMPOZİT TASARIMI

4.1. Giriş

Jeopolimer ve ECC tasarımı hakkındaki Bölüm 2.1’de yapılan literatür araştırması, iki malzeme teknolojisini birleştirmenin zorluğu üzerindeki etkileri göstermektedir. EGC'nin malzeme tasarımıdaki zorluk; araştırma, geliştirme ve teknolojik uygulamalardaki genel ilerlemeyi yavaşlatmaktadır. EGC'nin hızlı gelişimi ile ilgili zorlukların üstesinden gelmek için, iki malzeme teknolojisinin birleştirme problemini sistematik olarak çözen yeni bir tasarım yöntemi geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde EGC’nin tasarımı ve geliştirilmesi ele alınacaktır. EGC tasarımı, matris tasarımı ve kompozit tasarımı olmak üzere iki aşama vardır. Bu kapsamda EGC tasarımının uygulanabilirliğini ve etkililiğini göstermek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş, basınç dayanımları arttırılarak, kararlı durum düz çatlak oluşumuna bağlı olarak yüksek süneklik sağlanarak daha düşük karbondioksit salınımına ve daha düşük enerji tüketimine sahip optimize edilmiş EGC geliştirilmiştir.

Jeopolimer harcın taze ve sertleşmiş özellikleri, jeopolimer harcının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır ve bu nedenle jeopolimer kimyasının anlaşılması hayati önem taşımaktadır. Bununla birlikte, bu tezde kullanılan jeopolimer bağlayıcıların ana alüminosilikat kaynağı olan inşaat yıkıntı atıkları, aşırı karmaşık mineraloji, morfoloji ve bileşime sahiptir. Farklı kaynaklardan elde edilen yıkıntı atıklarının çeşitli kristal ve camsı bileşenleri ve reaktivite konsantrasyonları vardır. İnşaat yıkıntı atıklarının fizikokimyasal yapısı ile jeopolimerin mekanik özellikleri arasında ilişki kurmak için çeşitli çalışmalar yapılmış olmakla birlikte, bugüne kadar hiçbir ilişki bulunamamış veya çok az ilişki bulunmuştur. Bu nedenle bu çalışmada jeopolimer harcının mekanik özelliklerini, özellikle basınç dayanımını belirlemek için deneysel tabanlı bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde, EGC üretimi için uygulanan deneysel tabanlı tasarım yönteminde, eşzamanlı olarak üç hedefe ulaşmak amaçlanmıştır:

- Basınç dayanımını arttırmak,
- Kararlı durum düz çatlak oluşumuna bağlı olarak yüksek süneklik sağlamak,
- EGC'nin enerji tüketimini ve karbondioksit salınımını azaltmak.

EGC tasarımı, önemli bir kriter olan matris tasarım aşamasıyla başlar. Matris tasarımı ilk olarak daha yüksek basınç mukavemetine sahip optimize edilmiş bir EGC matrisi geliştirmek için gerçekleştirilmiştir. Burada parametrik optimum tasarım çalışmaları gerçekleştirilerek, gerekli mühendislik özelliklerini karşılayan ve gerekli reoloji özellikleri gibi istenen ek işlevlere sahip olan optimum EGC matrisini geliştirmek amaçlanmıştır. Matris tasarımı aşamasında ilk olarak EGC tasarımında önemli bir kriter olan uygun basınç dayanımı hedeflerinin elde edilmesi daha sonra gerekli reoloji özelliklerinin sağlanması amaçlanmıştır. Sonraki kompozit tasarım aşamasında deneysel tabanlı tasarım yaklaşımı uygulanarak çoklu mikro çatlak hasarı sergileyen EGC'nin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak matris için en uygun lifin seçilmesi gerekmektedir. Daha sonra geliştirilen matris, seçilmiş liflerle deneysel tekniklerle ölçülerek performansları belirlenmektedir.

Önerilen tasarım yönteminin yardımıyla EGC malzemeleri sistematik olarak tasarlanabilir. Böylece bu kapsamlı tasarım yöntemi hem akademik hem de endüstriyel topluluklarda araştırma ve geliştirmeyi kolaylaştırabilir. Tasarım yönteminin uygulanabilirliğini ve etkililiğini göstermek için bu bölümün ilerleyen kısımlarında optimize edilmiş EGC tasarlanmıştır.

4.2. Ön Çalışmalar

EGC tasarımının geliştirilmesinden önce, ana alüminosilikat kaynağı olarak inşaat yıkıntı atıklarının kullanıldığı jeopolimer bağlayıcıların fizibilitesini doğrulamak için bir ön çalışma yapılmıştır. Jeopolimer yapının ne derecede oluştuğunun anlaşılabilmesi için uygulanacak en kolay ve etkili yöntem basınç dayanımının ölçülmesidir. Daha fazla tepkimenin gerçekleşmesi daha yoğun bir mikroyapının ve bunu takiben daha yüksek basınç dayanımı sonuçlarının elde edilmesi anlamına

gelmektedir. Bu sebeple öngörülen hamur fazlarının geliştirilmesi ve performans değerlendirmelerinin yapılabilmesi amacıyla temel basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan basınç testi ile ilgili prosedürler Bölüm 3.2.4'te detaylı olarak sunulmuştur. Tez kapsamında ilk olarak jeopolimer matris tasarımı adına yapılan ön çalışmalarda detaylı literatür araştırmaları kapsamında alkali aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit kullanılmıştır. Farklı atık malzemeler, birbirleri ile karıştırılmadan sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan farklı sodyum yüzdelere sahip çözeltiler ile aktif edilmiştir. Bu kapsamda kiremit ve tuğla tozları (çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla), cam tozu ve beton tozu ile 3 farklı sodyum yüzdesinde (%10, %12, %15) hazırlanan alkali aktivatör çözeltileri kullanılarak çeşitli hamur karışımları üretilmiştir. Hazırlanan hamur karışımları için S/B oranı 0,33 seçilmiş, kalıptan çıkarılan numuneler 3 farklı sıcaklıkta (105°C, 115°C, 125°C) ve 72 saat boyunca ısıtma küre bırakıldıktan sonra basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda kullanılan sodyum yüzdesi ve ısıtma küre sıcaklığı kapsamlı literatür araştırması ve çeşitli deneme karışımlarıyla belirlenmiştir. Ön çalışmalar kapsamında üretilen hamurların taze karışım halindeyken kıvamı, işlenebilirliği, ısıtma küre sıcaklığına bağlı olarak sertleşip sertleşmediği, çatlak oluşumu, kalıptan kolay çıkarılabilirliği, aktivatörün karıştırıldıktan sonra bekleme süresinin etkileri gibi durumlar gözlemlenerek üretimler gerçekleştirilmiştir. Karışım oranları Çizelge 4.1'de, basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.2'de sunulmuştur.

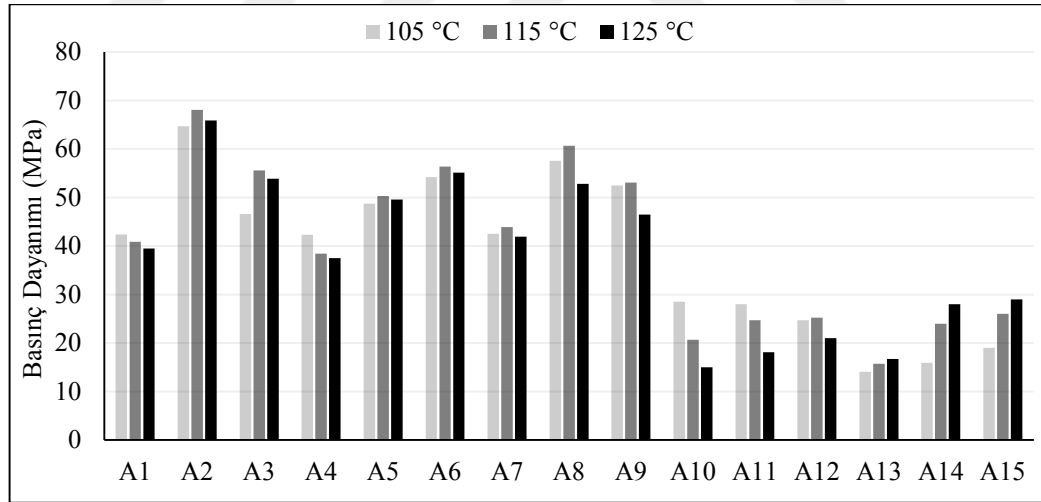


Şekil 4.1. Hamur karışımlara ısıtma küre uygulanması

Çizelge 4.1. Tekli jeopolimer hamurların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	NaOH	Na (%)	Su
A1	1301,8	-	-	-	-	181,1	8	429,6
A2	1229,1	-	-	-	-	256,5	12	405,6
A3	1179,6	-	-	-	-	307,7	15	389,3
A4	-	1287,3	-	-	-	179,1	8	424,8
A5	-	1216,1	-	-	-	253,8	12	401,3
A6	-	1167,7	-	-	-	304,6	15	385,3
A7	-	-	1303,9	-	-	181,4	8	430,3
A8	-	-	1230,9	-	-	256,9	12	406,2
A9	-	-	1181,3	-	-	308,2	15	389,8
A10	-	-	-	1220,5	-	169,8	8	402,8
A11	-	-	-	1156,3	-	241,3	12	381,6
A12	-	-	-	1112,5	-	290,2	15	367,1
A13	-	-	-	-	1259,3	175,2	8	415,6
A14	-	-	-	-	1191,1	248,6	12	393,1
A15	-	-	-	-	1144,6	298,6	15	377,7

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.2. Tekli jeopolimer hamurların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.2’de verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde çatı kiremiti, harman tuğlası ve delikli tuğla içeren karışımların dayanımları %8 sodyum konsantrasyonunda en düşük dayanımları vermiştir. Sodyum konsantrasyonu %12’ye

yükseltildiğinde ise dayanımların arttığı gözlemlenmiştir. Alüminosilikat bazlı atık malzemelerin reaksiyon süresince çözünmesini sağlayan alkali aktivatör, yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında, polimerizasyon reaksiyonlarında bir artışa yol açarak matriste daha yüksek oranda N-A-S-(H) oluşumu tetiklemekte ve böylelikle nihai ürünün performansına olumlu etkisi olmaktadır (Ahmari ve diğerleri, 2012). Sodyum konsantrasyonu %15'e yükseltildiğinde ise harman tuğlası ile üretilen karışımların dayanımları artmış fakat çatı kiremiti ve delikli tuğla içeren karışımlarda dayanımların düştüğü gözlemlenmiştir. Alkali konsantrasyonlarındaki yüksek oranlı artışlar bir noktadan sonra jeopolimer mekanizmasına önemli ölçüde zarar vermektedir. Düşük hareket kabiliyetine sahip alkali iyonların çözeltiden difüzyonları oldukça azalmaktadır. Bunu tetikleyen bir diğer sebep ise yüksek alkali konsantrasyonu ile üretilen karışımlarda çok hızlı ve homojen olmayan reaksiyon ürünlerinin oluşmasıdır. Bu durum da nihai ürünün performansına zarar vermektedir (Palomo ve diğerleri, 2004). Beton tozu içeren karışımların dayanımları tuğla tozlarına benzer şekilde %8 sodyum konsantrasyonunda en düşük dayanımları vermiştir. Cam tozu içeren karışımların dayanımları kullanılan diğer toz malzemelerin aksine %8 sodyum konsantrasyonunda en yüksek dayanımları vermiştir. Alkali aktivatör konsantrasyonunun basınç dayanımlarına etkisinin yanı sıra, numunelere uygulanan ısı kütür sıcaklıklarının da nihai ürünün basınç dayanımlarına oldukça etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde, sıcaklık artışının genel olarak numunelerin basınç dayanımlarını arttırdığı gözlemlenmektedir. Isıl kütür sıcaklıklarındaki artış polimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak jeopolimer hamurun kısa sürede yüksek basınç dayanımlarına ulaşmasını sağlamaktadır. Ancak belli bir noktadan sonra uygulanan yüksek sıcaklıklar, numunelerde nem kaybına yol açarak yüksek boşluk oranına sahip homojen olmayan bir matrise neden olmakta, bunun sonucunda basınç dayanımlarının düşmesine yol açmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık, numunelerde aşırı hacim kaybı oluşturarak rötreye neden olmakta bu da numunelerde rötür çatlakları oluşturarak nihai ürünlerin düşük performanslara sahip olmasına yol açmaktadır.

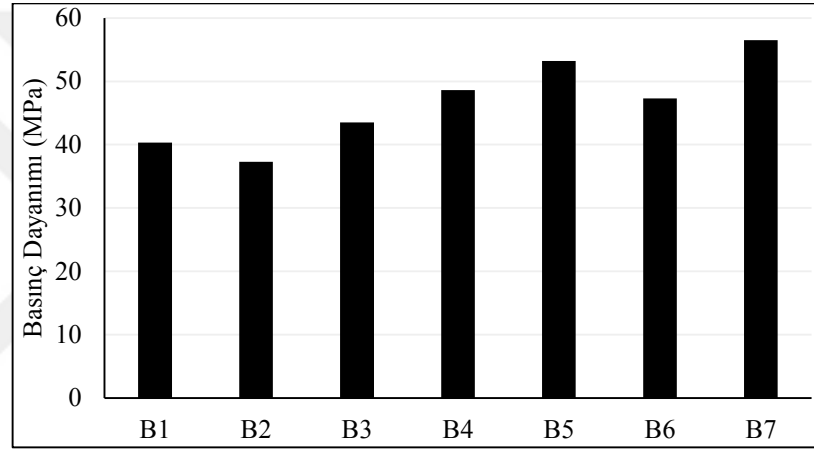
Beton tozu ve cam tozunun alkali aktivasyonunda istenilen neticelere ulaşamamasının sebebi tuğla atıklarına oranla düşük alüminosilikat içeriğine sahip olmalarıdır. Bu nedenle beton tozunun yüksek miktarlarda SiO₂ kaynağı olan cam tozu

ile birlikte alüminosilikat kaynağı olarak kullanıldığı takdirde daha yüksek sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Beton tozu ve cam tozunun birlikte kullanımı ve tuğla tozlarının da bu başarılı kombinasyonun içine dahil edilmesi adına, seçici yıkım metodu uygulanarak yıkımı gerçekleştirilen bir binadan elde edilecek inşaat yıkıntı atıklarının belirli oranlarda karıştırılması ve karıştırılan bu malzemelerin alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin kullanıldığı çözeltilerle aktifleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda daha önce yapılan çalışmalarda tüm malzemeler kıyaslandığında, ortalama en iyi performansı veren %12 sodyum konsantrasyonunda hazırlanan alkali aktivatör çözeltisi kullanılarak çeşitli hamur karışımları üretilmiştir. Hazırlanan hamur karışımların S/B oranı 0,33 seçilmiş, kalıptan çıkarılan numuneler 115°C sıcaklıkta ve 72 saat ısıtılıp küre bırakıldıktan sonra basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak B1 kodlu karışımda çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, cam tozu ve beton tozu oranları karışımda ağırlıkça eşit miktarda tutulmuştur. Daha sonra tuğla atıklarının birbirleri arasındaki uygun oranının bulunması adına beton atığı %20 ve cam tozu %20 sabit olmak üzere karışımda kalan %60'lık kısım, üç farklı tuğla atığının, karışımın basınç dayanımına etkisi gözlemlenmek üzere çeşitli denemeler yapılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda B2 kodlu karışımda tuğla atıkları içerdikleri SiO₂ miktarlarına göre karışımdaki ağırlıkça oranları belirlenmiştir. En yüksek SiO₂ içeriğine sahip harman tuğlası en çok kullanılmış ve en düşük SiO₂ içeriğine sahip çatı kiremiti en az kullanılmıştır. B3 kodlu karışımda ise tuğla atıkları ortalama tane boyutu inceliklerine göre karışımdaki ağırlıkça oranları belirlenmiştir. Ortalama tane boyutu en ince çatı kiremiti en fazla kullanılmış ve ortalama tane boyutu en kalın harman tuğlası en az kullanılmıştır. Tuğla atıklarının birbirleri arasındaki uygun oran bulunduğundan sonra dayanımların arttırılması adına B4, B5, B6 ve B7 kodlu karışımlarda artan tuğla tozları ve azalan beton ve cam tozlarının nihai ürüne etkisi incelenmiştir. Ayrıca dayanımların arttırılması adına B5 ve B6 kodlu karışımlarda beton ve cam tozlarının birbirleri arasındaki oranlar incelenmiştir. Beşli hamur karışımların karışım oranları Çizelge 4.2'de, basınç dayanımı sonuçları ise Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Beşli jeopolimer hamurların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	NaOH	Na (%)	Su
B1	240,8	240,8	240,8	240,8	240,8	251,3	12	397,3
B2	180,5	300,9	240,7	240,7	240,7	251,2	12	397,1
B3	301,2	180,7	240,9	240,9	240,9	251,4	12	397,5
B4	352,9	211,8	282,3	181,5	181,5	252,5	12	399,3
B5	353,5	212,1	282,8	121,2	242,4	252,9	12	399,9
B6	352,4	211,4	281,9	241,6	120,8	252,1	12	398,7
B7	405,1	243,1	324,1	121,5	121,5	253,6	12	401,1

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.3. Beşli jeopolimer hamurların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.3'te sunulan sonuçlar incelendiğinde öncelikle B1, B2 ve B3 kodlu karışımların basınç dayanımlarına bakıldığında çatı kiremiti ikamesinin en yüksek olduğu karışım en yüksek basınç dayanım sonuçları göstermiştir. Harman tuğlasının çalışmada kullanılan atık tuğla malzemelerine kıyasla nispeten en yüksek SiO₂ oranına sahip olmasına rağmen çatı kiremitinin, tuğla tozlarına kıyasla ortalama tane boyutunun nispeten en ince tane boyutuna sahip olması, yüksek ikameli kullanımında diğerlerine göre daha yüksek basınç dayanımları göstermesine neden olmuştur. Sonuç olarak ince malzemenin sahip olduğu yüzey alanının fazla olması nedeni ile daha reaktif davrandığı belirlenmiştir. Tuğla tozlarının optimum karışım oranları bulunduktan sonra, tüm tuğla tozlarının, beton ve cam tozlarına oranla basınç

dayanımlarına gösterdiği etkiyi gözlemlemek amacıyla B4, B5, B6 ve B7 kodlu karışımlar üretilmiş, elde edilen sonuçlara göre tuğla tozlarının ikamesi arttıkça karışımların basınç dayanımlarında bir artış gözlemlenmiştir. Bu dört karışım arasında %80 tuğla tozu bulunan B7 kodlu karışım, 55 MPa basınç dayanımı değerini aşmıştır. Tuğla tozlarının beton ve cam tozlarına oranla daha yüksek dayanım göstermesinin nedeni, jeopolimerizasyona, içerik ve boyut olarak daha uygun alüminosilikat bazlı kaynak malzemeler olmasından kaynaklandığı da literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir (Allahverdi ve Najafi Kani, 2009). Son olarak B5 ve B6 kodlu karışımların basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, beton tozunun cam tozuna göre daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Tezin nihai amaçları göz önünde bulundurularak, jeopolimerlerin üretimi esnasında İYA'nın elde edilip tasniflenmesinin ardından belirli oranlarda birleştirilerek kullanılması durumu, süreci hızlandırma ve kolaylaştırmasının ötesinde yapılardan elde edilen İYA'nın tamamen kullanılıp değerlendirilmesine olanak sağlaması sayesinde çok yönlü ve bütünlük bir kazanımı ortaya çıkaracaktır. Yapılan ön çalışmalar kapsamında alüminosilikat bazlı atık malzemelerin karıştırılması sonucu elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde çalışmanın ilerleyen kısmında üretilecek olan harç ve kompozit karışımlarının temelini oluşturacak, beş farklı İYA malzemesinin birbirleri arasında optimum oranları belirlenmiş ve mekanik özelliklerine bakılarak jeopolimer reaksiyonlarında gösterdiği davranışlar hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

4.3. Matris Tasarımı

Jeopolimer matris, jeopolimer hamur ve agregadan oluşan iki fazlı bir malzeme olarak düşünülmektedir. Jeopolimerin karakteristik özellikleri bileşen maddelerin özelliklerine, dolgu maddesi veya agregaya bağlıdır. Bu kapsamda ilk olarak gerekli mekanik dayanım, dayanıklılık ve liflerin homojen dağılımı için gereken reolojiyi karşılayan bir jeopolimer matrisinin geliştirilmesi gerekmektedir. Jeopolimer matris geliştirme aşamasında jeopolimer bağlayıcılı sistemlerin çimento bağlayıcılı sistemlerden matrise göre katı alüminosilikat kaynağı ve alkali aktivatörünün tipleri, alkali çözeltisinin konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve süresi ayrıca bileşenlerin karışım

oranları gibi daha fazla tasarım değişkeni vardır. Tasarım faktörlerinin matris özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte jeopolimerlerin nispeten kısa geçmişi nedeniyle matris tasarımı hakkındaki bilgi birikimi çimento bağlayıcılı sistemlere kıyasla daha sınırlıdır. Gelişmiş karakterizasyon teknikleri farklı faktörlerin etkilerinin anlaşılmasında yardımcı olmakta ancak sonuçlar özellikle inşaat yıkıntı atıklarında malzeme değişkenliği nedeniyle her alüminosilikat kaynağının kendisine özgü olabilmektedir. Yapılan ön çalışmalarda ısıl kür uygulanan jeopolimer hamur karışımlar yeterli basınç dayanımlarına ulaşmıştır. Ön çalışmalar kapsamında laboratuvar koşullarında ortam kürü uygulanan jeopolimerler yeterli basınç dayanımlarına ulaşmamış hatta üretilen numunelerin priz almadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ısıl kür ile yeterli dayanıma ulaşan numunelerin ise suda parçalandığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Isıl kürün ardından suda bekletilen jeopolimer numuneler

Düşük dayanım ve dayanıklılık özellikle büyük ölçekli yapısal uygulamalarda malzemenin olası uygulama aralığını sınırlandırmaktadır. Ayrıca tez çalışmasının ilerleyen aşamalarında EGC malzemesi ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılarak kendiliğinden iyileşme performansının incelenmesi planlanmaktadır. Bu nedenle jeopolimer matrisinin su ortamında dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kürleme yöntemi olarak jeopolimer için oldukça önemli dayanım sonuçlarına rahatlıkla ulaşılabilen, birçok araştırma sonucuna göre oldukça önemli ve vazgeçilemez derece gerekli olan ısıl kür işleminin aksine, bu çalışmada laboratuvar koşullarında ortam kürüne odaklanılmıştır. Ayrıca numunelerin ıslanma-

kuruma döngüsünde yaşayabileceği performans kayıplarının da ortam kürü ile aşılması hedeflenmektedir. Aynı zamanda jeopolimer reaksiyonları için yadsınamaz derecede önemli olan ısıl kür, beraberinde yüksek oranda enerji sarfıyatı ve kısıtlı kürleme koşulları getirdiği için karışım içeriği, aktivatör tipi ve oranları gibi çeşitli parametrelerin optimize edilmesiyle ortam koşullarında da yüksek dayanımlar elde edilebileceği bu çalışmanın bir diğer nihai hedeflerinden birisidir.

Matris tasarımının ilk aşamasında ilerleyen safhalardaki hedeflere ulaşabilme bakımından önemli bir kriter olan laboratuvar koşullarında ortam küründe yeterli basınç dayanımı hedeflerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Detaylı literatür araştırmaları sonucunda ön çalışmalarda alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksite ek olarak sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak laboratuvar koşullarında ortam küründe yeterli basınç dayanımlarının sağlanacağı düşünülmektedir.

Şimdiye kadar jeopolimer bağlayıcılar üzerinde yapılan büyük araştırmalara rağmen İYA bazlı jeopolimerler için sistematik bir karışım tasarım yöntemi hala bulunmamaktadır. Jeopolimerler günümüzde yoğun iş gücü ve deneme yanılma tasarım yaklaşımı ile üretilmektedir. Araştırmacılar, jeopolimer karışımları tasarlamak için basit ama uygun maliyetli bir yöntem ihtiyacı duymaktadırlar. Bu çalışmanın amacı aynı zamanda jeopolimer karışım tasarımı için yeni bir yöntem geliştirmektir.

4.3.1. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışmaları kapsamında jeopolimer harç geliştirilmesi aşamasında tasarım değişkenlerini azaltmak için İYA'dan elde edilen alüminosilikat bazlı farklı kaynak malzemelerin (çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, cam tozu ve beton tozu) oranları ön çalışmalarda belirlenen en iyi performansa sahip iki farklı nihai toz karışım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan birinci toz karışım %100 İYA atıkları kullanılarak hazırlanmıştır. İkinci toz karışım ise İYA atıklarına ek olarak %20 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ikame edilmesiyle hazırlanmıştır. ECC'de olduğu gibi kaba agrega kararlı durum çoklu çatlak

oluşumunun elde edilmesinde bir dezavantaj olan matris kırılma tokluğunu arttırma eğiliminde olduğu için kullanılmamıştır. Bu nedenle karışımlarda maksimum tane boyutu 2 mm olan ince geri dönüşüm beton agregası kullanılmıştır. Kullanılan ince geri dönüşüm beton agregasının detaylı karakteristik özellikleri Bölüm 3.1.3'te detaylı olarak sunulmuştur. Karışımların S/B oranı ve K/B oranı sabit 0,35 seçilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH), kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında istenilen harç özelliklerini elde etmek amacıyla jeopolimer bağlayıcılar ile ilgili yapılan kapsamlı literatür araştırmalarından ve kişisel tecrübelerden faydalanılarak tasarım değişkenleri olarak sadece aktivatör tipi ve miktarları değişkenlik göstermiş, uygun aktivatör oranı, tipi ve kombinasyonu belirleme için tasarım değişkeni olarak aktivatörlerin birbirleriyle kullanımının optimum oranlarının araştırılmasına karar verilmiştir. Karışımlarda kullanılan toz bağlayıcı karışım oranının, kum boyutunun, K/B oranının ve S/B oranının özellikleri ve miktarları tüm karışımlarda aynı olacağı için tasarım değişkeni olarak değerlendirilmemiştir. Kullanılan alkali aktivatörlerin optimum karışım oranı 3 farklı grupta optimize edilmiştir:

- Sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin optimum birlikte kullanım oranı,
- Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın optimum birlikte kullanım oranı,
- Sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin optimum birlikte kullanım oranı.

Ön deneysel çalışmalarda kazanılan deneyimin ardından farklı alkali aktivatörlerin birlikte kullanımının basınç dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla her karışım için 3 küp örneği üretilmiştir. Birinci grupta 18, ikinci grupta 18 ve son olarak üçüncü grupta 10 karışım olmak üzere üç grup için toplam 46 jeopolimer harç karışımı üretilmiştir. Laboratuvar şartlarında ortamda küre tabi tutulan numunelerden 7 ve 28 günün sonunda basınç dayanımı sonuçları alınmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri ve test metotları Bölüm 3'te detaylı olarak sunulmuştur. Tasarım değişkenleri olarak sadece aktivatör tipi ve miktarlarının değişkenlik gösterdiği, uygun aktivatör oranı, tipi ve kombinasyonu belirlenmesi adına aktivatörlerin birbirleriyle

kullanımının optimum oranlarının araştırılması adına gerçekleştirilen çalışmaların ardından basınç dayanımları değerlendirilerek her bir gruptan en iyi performansa sahip %100 İYA içeren ve İYA'ya ek %20 cüruf ikameli olmak üzere 2 farklı toz bağlayıcı karışım olmak üzere toplamda 6 farklı karışım seçilmiştir. Seçilen karışımlar, tez çalışmaları kapsamında genel olarak üretilecek nihai EGC karışımlarının temelini oluşturmaktadır.

4.3.2. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

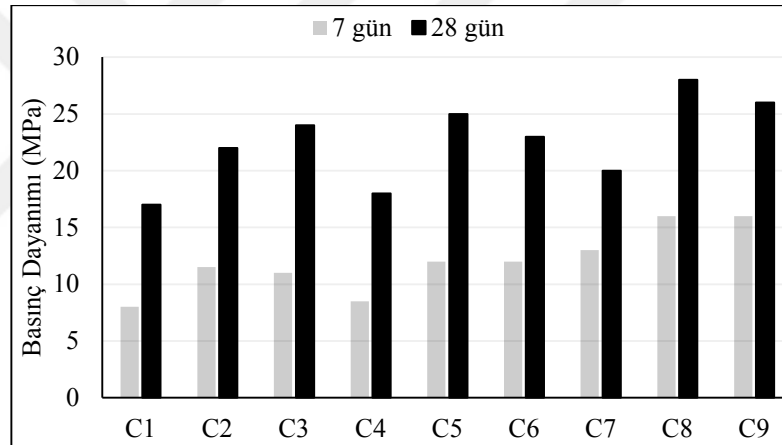
Sodyum Hidroksit ve Kalsiyum Hidroksit Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

Matris tasarımı aşamasında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin (NaOH) ve kalsiyum hidroksitin (Ca(OH)_2) birlikte kullanılarak harç karışımların geliştirildiği çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda üç farklı yüzdede (%6, %8, %10) sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Her bir yüzdedeki sodyum konsantrasyonuna ek olarak karışımlara 3 farklı yüzdede (%6, %8, %10) kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 ilave edilmiştir. Karışımların S/B oranı ve K/B oranı sabit 0,35 seçilmiştir. Bu kapsamda %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip C-1,9 serisinin karışım oranları Çizelge 4.3'te, basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.5'te ve %20 cüruf ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip D-1,9 serisinin karışım oranları Çizelge 4.4'te, basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.3. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na (%)	Ca(OH) ₂	Ca (%)	Su
C1	307,1	184,2	245,6	105,3	210,5	-	368,4	109,8	6	77,9	4	368,4
C2	301,8	181,1	241,4	103,5	206,9	-	362,1	108,0	6	114,9	6	362,1
C3	296,7	178,0	237,3	101,7	203,5	-	356,0	106,2	6	150,5	8	356,0
C4	299,9	179,9	239,8	102,8	205,6	-	359,8	143,0	8	76,1	4	359,8
C5	294,9	176,9	235,8	101,1	202,2	-	353,8	140,6	8	112,2	6	353,8
C6	290,0	174,0	232,0	99,4	198,9	-	348,0	138,3	8	147,2	8	348,0
C7	293,0	175,8	234,4	100,5	200,9	-	351,6	174,7	10	74,3	4	351,6
C8	288,2	172,9	230,5	98,8	197,6	-	345,8	171,9	10	109,7	6	345,8
C9	283,6	170,2	226,8	97,2	194,5	-	340,3	169,1	10	143,9	8	340,3

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.5. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları

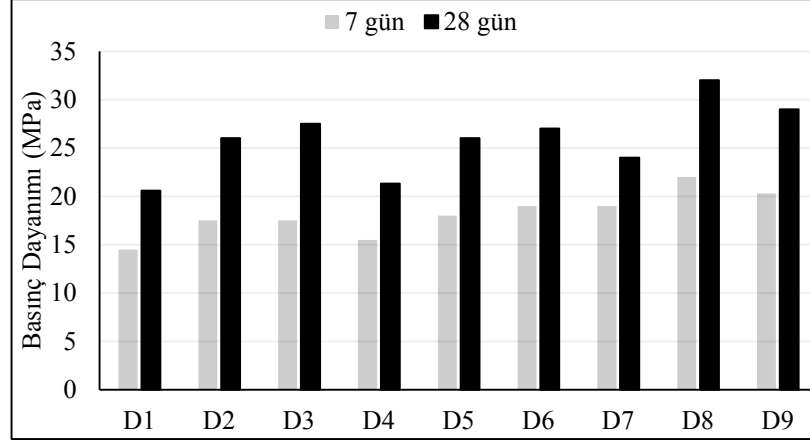
Şekil 4.5'te verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımların basınç dayanımı sonuçları üzerinde kalsiyum hidroksitin olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Genel olarak sodyum hidroksit çözeltisinin sodyum konsantrasyonundaki artışın basınç dayanımı sonuçlarını arttırdığı görülmüştür. Verilen basınç dayanımı sonuçlarına göre %10

sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit çözeltisinin kullanıldığı ve %6 kalsiyum miktarına sahip kalsiyum hidroksitin ilave edildiği C8 kodlu karışım 27,2 MPa dayanım değerine ulaşarak bu çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. Bununla birlikte sodyum hidroksit konsantrasyonunun yüksek olduğu ve kalsiyum hidroksit miktarının arttığı alkali aktivatör çözeltilerinin kullanıldığı karışımlarda kalsiyum hidroksit miktarının belirli bir değeri aşmasıyla birlikte dayanım düşüşleri gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit miktarları ve birbiri arasındaki oranın dayanım sonuçlarını etkilediği belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na (%)	Ca(OH) ₂	Ca (%)	Su
D1	263,4	158,0	210,7	105,4	105,4	210,7	368,7	109,9	6	78,0	4	368,7
D2	258,9	155,3	207,1	103,5	103,5	207,1	362,4	108,1	6	114,9	6	362,4
D3	254,5	152,7	203,6	101,8	101,8	203,6	356,3	106,2	6	150,7	8	356,3
D4	257,2	154,3	205,8	102,9	102,9	205,8	360,1	143,1	8	76,1	4	360,1
D5	252,9	151,8	202,3	101,2	101,2	202,3	354,1	140,8	8	112,3	6	354,1
D6	248,8	149,3	199,0	99,5	99,5	199,0	348,3	138,4	8	147,3	8	348,3
D7	251,3	150,8	201,1	100,5	100,5	201,1	351,9	174,8	10	74,4	4	351,9
D8	247,2	148,3	197,8	98,9	98,9	197,8	346,1	172,0	10	109,8	6	346,1
D9	243,3	146,0	194,6	97,3	97,3	194,6	340,6	169,2	10	144,0	8	340,6

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.6. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.6’da verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde bağlayıcı olarak İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli bağlayıcı toz karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımların %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip karışımlara benzer şekilde basınç dayanımı sonuçları üzerinde kalsiyum hidroksitin olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Sodyum hidroksit çözeltisinin sodyum konsantrasyonundaki artışın basınç dayanımı sonuçlarını arttırdığı görülmüştür. Verilen basınç dayanımı sonuçlarına göre %10 sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit çözeltisinin kullanıldığı ve %6 kalsiyum miktarına sahip kalsiyum hidroksitin ilave edildiği D8 kodlu karışım 33,9 MPa dayanım değerine ulaşarak bu çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. %100 İYA bazlı ve İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışım kullanılarak gerçekleştirilen her iki çalışmada da alkali aktivatör olarak %10 sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit çözeltisinin kullanıldığı ve %6 kalsiyum miktarına sahip kalsiyum hidroksitin ilave edildiği karışımlar en yüksek basınç dayanım sonuçlarını vermiştir. Ayrıca iki karışım değerlendirildiğinde aynı alkali aktivatör kombinasyonunda %20 oranında yüksek fırın cürufu ikamesinin 28 günlük basınç dayanımını yaklaşık olarak %25 oranında arttırdığı görülmektedir. Karışımlara cüruf ve kalsiyum hidroksit gibi yüksek oranda kalsiyum içeriğine sahip malzemelerin

eklenmesi, jeopolimerizasyon ürünlerine ek olarak kalsiyum kaynağı varlığında ikincil bir ürün olarak C-S-H ve C-A-S-H gibi matriste güçlü yapılar oluşmasını sağlayarak basınç dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir.

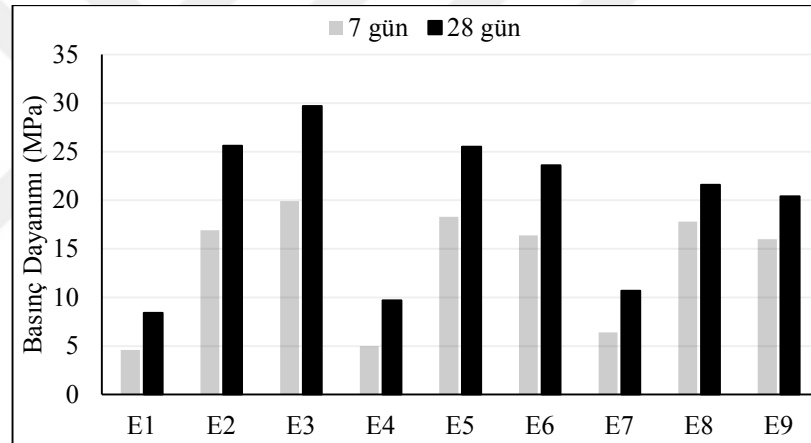
Sodyum Hidroksit ve Sodyum Silikat Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

Matris tasarımı aşamasında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin (NaOH) ve sodyum silikatın (Na_2SiO_3) birlikte kullanılarak harç karışımların geliştirildiği çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda üç farklı yüzdede (%6, %8, %10) sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Her bir yüzdedeki sodyum konsantrasyonuna ek olarak sodyum silikat içermeyen, sodyum hidroksit miktarına eşit miktarda sodyum silikat miktarına sahip ve sodyum hidroksit miktarının iki katı sodyum silikat miktarına sahip olacak şekilde sıvı halde sodyum silikat ilave edilmiştir. Karışımların S/B oranı ve K/B oranı sabit 0,35 seçilmiştir. Karışım suyu miktarı sodyum silikat çözeltisinden gelen su miktarı da göz önünde bulundurularak her bir karışım için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu kapsamda %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip E-1,9 serisinin karışım oranları Çizelge 4.5'te, basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.7'de ve %20 yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip F-1,9 serisinin içerikleri Çizelge 4.6'da ve basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na (%)	Na ₂ SiO ₃	Su
E1	318,1	190,8	254,4	109,1	218,1	-	381,7	113,8	6	0,0	381,7
E2	314,9	188,9	251,8	107,9	215,9	-	377,8	112,6	6	112,6	304,6
E3	311,7	187,0	249,3	106,8	213,7	-	374,0	111,5	6	223,0	229,0
E4	310,4	186,2	248,3	106,4	212,8	-	372,5	148,1	8	0,0	372,5
E5	306,3	183,8	245,0	105,0	210,0	-	367,5	146,1	8	146,1	272,6
E6	302,3	181,4	241,8	103,6	207,3	-	362,7	144,2	8	288,4	175,3
E7	303,1	181,8	242,4	103,9	207,8	-	363,7	180,7	10	0,0	363,7
E8	298,2	178,9	238,5	102,2	204,5	-	357,8	177,8	10	177,8	242,2
E9	293,5	176,1	234,7	100,6	201,2	-	352,1	175,0	10	349,9	124,7

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.7. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları

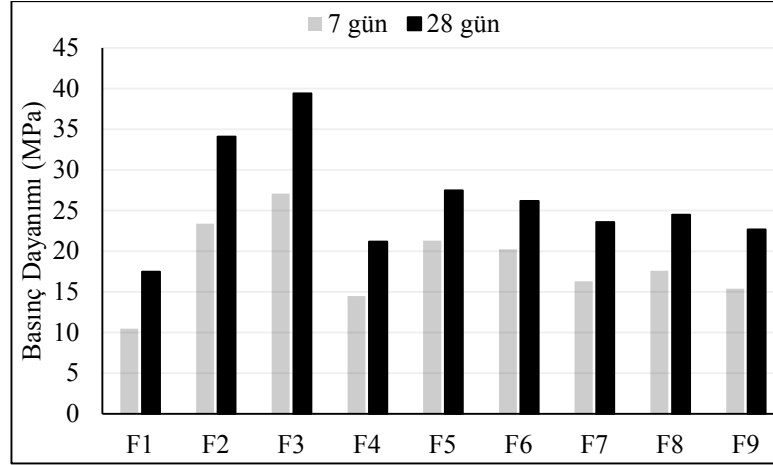
Şekil 4.7’de verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı karışımların basınç dayanımı sonuçları üzerinde sodyum silikatın olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Sodyum hidroksitin alkali aktivatör olarak tek başına kullanılmasından ziyade sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanılmasının basınç dayanımı sonuçları üzerinde önemli etkilerinin olduğu açıkça görülmektedir. Genel olarak sodyum silikat içermeyen karışımlar en düşük

dayanım sonuçlarını vermiştir. Verilen basınç dayanımı sonuçlarına göre %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan alkali aktivatör çözeltisinin kullanıldığı E3 kodlu karışım 29,7 MPa dayanım değerine ulaşarak bu çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. Bununla birlikte sodyum hidroksit konsantrasyonunun yüksek olduğu ve buna bağlı olarak sodyum silikat miktarının arttığı alkali aktivatör çözeltilerinin kullanıldığı karışımlarda dayanım düşüşleri gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre sodyum hidroksit ve sodyum silikatın miktarları ve birbiri arasındaki oranın dayanım sonuçlarına çok büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Alkali aktivatörlerin birlikte kullanılması durumunda her iki aktivatörün miktarının ve birbirleri arasındaki oranın belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın optimum kullanım miktarı ve oranları belirlenerek birlikte kullanımının alüminosilikat malzemenin çözünmesini hızlandırarak güçlü bir matris elde etmeyi sağladığı, bu optimum miktar ve oranın aşılmasından sonraki artışın ise sisteme aşırı alkali yüklemesi sonucu jeopolimerizasyon reaksiyonlarını geciktirerek dayanım düşüşlerine yol açtığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.6. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na (%)	Na ₂ SiO ₃	Su
F1	272,9	163,7	218,3	109,1	109,1	218,3	382,0	113,9	6	0,0	382,0
F2	270,1	162,0	216,1	108,0	108,0	216,1	378,1	112,7	6	112,7	304,8
F3	267,3	160,4	213,9	106,9	106,9	213,9	374,3	111,6	6	223,2	229,2
F4	266,3	159,8	213,0	106,5	106,5	213,0	372,8	148,2	8	0,0	372,8
F5	262,7	157,6	210,2	105,1	105,1	210,2	367,8	146,2	8	146,2	272,8
F6	259,3	155,6	207,4	103,7	103,7	207,4	363,0	144,3	8	288,6	175,4
F7	260,0	156,0	208,0	104,0	104,0	208,0	364,0	180,9	10	0,0	364,0
F8	255,8	153,5	204,6	102,3	102,3	204,6	358,1	177,9	10	177,9	242,4
F9	251,7	151,0	201,4	100,7	100,7	201,4	352,4	175,1	10	350,2	124,8

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.8. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.8’de verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde bağlayıcı olarak İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli bağlayıcı toz karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı karışımların %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip karışımlara benzer şekilde basınç dayanımı sonuçları üzerinde sodyum silikatın olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Verilen basınç dayanımı sonuçlarına göre %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan alkali aktivatör çözeltisinin kullanıldığı F3 kodlu karışım 39,7 MPa dayanım değerine ulaşarak bu çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. %100 İYA bazlı ve İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışım kullanılarak gerçekleştirilen her iki çalışmada da alkali aktivatör olarak %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan alkali aktivatör çözeltisinin kullanıldığı karışımlar en yüksek basınç dayanım sonuçlarını vermiştir. Ayrıca iki karışım değerlendirildiğinde söz konusu alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı karışımlarda %20 yüksek fırın cürufu ikamesinin 28 günlük basınç dayanımını yaklaşık olarak %34 oranında arttırdığı görülmektedir. Sodyum hidroksitin alkali aktivatör olarak tek başına kullanıldığı karışımların dayanım sonuçları

incelendiğinde %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip karışımların aksine basınç dayanımı sonuçları üzerinde söz konusu aktivatörün tek başına kullanımının olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. %20 yüksek fırın cürufu ikamesinin sodyum hidroksitin alkali aktivatör olarak tek başına kullanıldığı karışımların 28 günlük basınç dayanımlarını ortalama yaklaşık olarak %120 oranında arttırdığı belirlenmiştir.

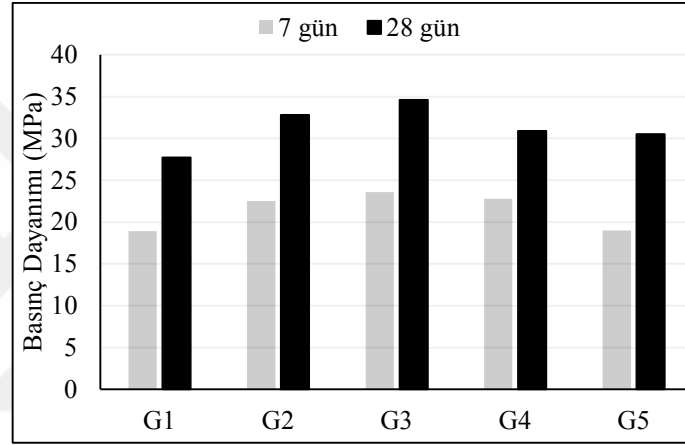
Sodyum Hidroksit, Sodyum Silikat ve Kalsiyum Hidroksit Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

İkili aktivatör kombinasyonlarının kullanımı sonucu elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde 3 tip aktivatörün birlikte kullanılması durumunda matris performansının geliştirilebileceği düşünülerek 3 farklı alkali aktivatörün birlikte kullanım oranları optimize edilmiştir. Bu kapsamda matris tasarımı aşamasında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin (NaOH), sodyum silikatın (Na_2SiO_3) ve kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) birlikte kullanılarak harç karışımların geliştirildiği çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda daha önce sodyum hidroksitin ve sodyum silikatın birlikte kullanılarak gerçekleştirildiği çalışmalardan elde edilen veriler ışığında iki aktivatörün birlikte kullanılarak gerçekleştirildiği en iyi performansı gösteren, %6 sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum hidroksit çözeltisinin iki katı sodyum silikat miktarına sahip olan alkali aktivatör kombinasyonuna ek olarak 5 farklı yüzdede (%1, %2, %3, %4, %5) kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilmiştir. Karışımların S/B oranı ve K/B oranı sabit 0,35 seçilmiştir. Karışım suyu miktarı sodyum silikattan gelen su miktarı da göz önünde bulundurularak her bir karışım için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu kapsamda %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip G-1,5 serisinin karışım oranları Çizelge 4.7’de, basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.9’da, %20 yüksek fırın cürufu ikameli bağlayıcı toz karışıma sahip H-1,5 serisinin karışım oranları Çizelge 4.8’de, basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.10’da sunulmuştur.

Çizelge 4.7. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na (%)	Na ₂ SiO ₃	Ca(OH) ₂	Ca (%)	Su
G1	309,0	185,4	247,1	105,9	211,8	-	370,7	110,5	6	221,0	19,6	1	227
G2	306,3	183,7	245,0	105,0	210,0	-	367,5	109,6	6	219,1	38,8	2	225,1
G3	303,6	182,2	242,9	104,1	208,2	-	364,3	108,6	6	217,2	57,8	3	223,1
G4	301,1	180,6	240,8	103,2	206,4	-	361,2	107,7	6	215,4	76,4	4	221,2
G5	298,5	179,1	238,7	102,3	204,7	-	358,2	106,8	6	213,6	94,7	5	219,3

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.9. %100 İYA bazlı, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları

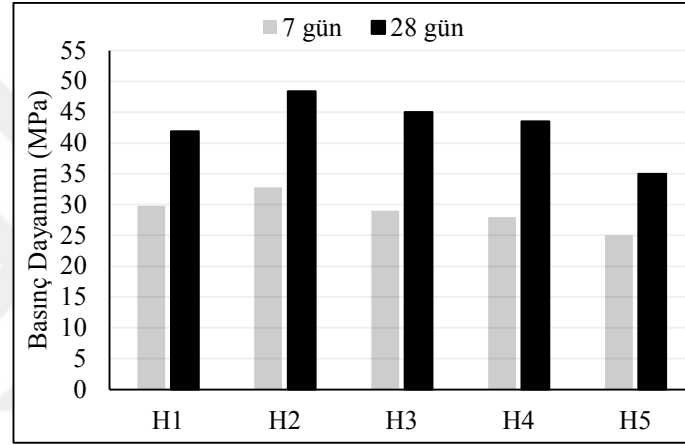
Şekil 4.9’da verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımların basınç dayanımı sonuçları üzerinde 3 tip alkali aktivatörün birlikte kullanımının olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Daha önce alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan alkali aktivatör çözeltisinin kullanıldığı E3 kodlu karışım 29,7 MPa dayanım değerine ulaşarak önceki çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren

karışım olmuştur. Bununla birlikte bu çalışmada %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan ve alkali aktivatör çözeltisine ek olarak %3 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilen G3 kodlu karışım 34,6 MPa dayanım değerine ulaşarak %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. İki karışım değerlendirildiğinde %3 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilmesinin basınç dayanımını yaklaşık olarak %16 oranında arttırdığı görülmektedir. Bu durum, herhangi bir kalsiyum kaynağı içermeyen karışıma kalsiyum kaynağı ilavesi ile önceden bahsedildiği üzere, matriste kalsiyum bazlı yapılar oluşturmuş ve artan kalsiyum içeriği basınç dayanımlarında bir artışa yol açmıştır. Bununla birlikte karışımda gittikçe artan kalsiyum hidroksit miktarının dayanıma bir katkı sağlamadığı ve hızlı prize neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum jeopolimerizasyon reaksiyonlarında bağlayıcı maddelerin alüminosilikat içeriği ile sisteme dahil edilen kalsiyum miktarı arasında önemli bir oran olduğu, bu oranın optimum değerlerinin üzerinde veya altında kaldığı durumlarda jeopolimerizasyon reaksiyonlarının kinetiği zarar görerek ürünün mekanik özelliklerinde olumsuz etkilere yol açacağı bazı literatür araştırmalarında da dile getirilmiştir (Temuujin ve diğerleri, 2009). Bu nedenle nihai EGC karışımlarının üretiminde basınç dayanımı olarak en iyi performansa sahip karışımların seçilmesi düşünülmüş olmasına rağmen gerekli reolojik ve işlenebilirlik performansının da sağlanması gerektiğinden bu grupta %2 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilen ve 32,8 MPa basınç dayanımı sonucu veren G2 kodlu karışım en iyi performans gösteren karışım olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.8. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların karışım oranları

Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na (%)	Na ₂ SiO ₃	Ca(OH) ₂	Ca (%)	Su
H1	265,0	159,0	212,0	106,0	106,0	212,0	371,0	110,6	6	221,2	19,6	1	227,2
H2	262,7	157,6	210,2	105,1	105,1	210,2	367,8	109,7	6	219,3	38,9	2	225,2
H3	260,4	156,3	208,4	104,2	104,2	208,4	364,6	108,7	6	217,4	57,8	3	223,3
H4	258,2	154,9	206,6	103,3	103,3	206,6	361,5	107,8	6	215,6	76,4	4	221,4
H5	256,0	153,6	204,8	102,4	102,4	204,8	358,5	106,9	6	213,7	94,7	5	219,5

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.10. %20 cüruf ikameli, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.10'da verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde bağlayıcı olarak İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımların basınç dayanımı sonuçları üzerinde %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip karışımlara benzer şekilde 3 tip alkali aktivatörün birlikte kullanımının olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Daha önce alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan

alkali aktivatör çözeltisinin kullanıldığı F3 kodlu karışım 39,7 MPa dayanım değerine ulaşarak önceki çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. Bununla birlikte bu çalışmada yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan ve alkali aktivatör çözeltisine ek olarak %2 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilen H2 kodlu karışım 48,4 MPa dayanım değerine ulaşarak bu çalışmada en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. İki karışım değerlendirildiğinde %2 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilmesinin basınç dayanımını yaklaşık olarak %22 oranında arttırdığı görülmektedir. Ayrıca sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımların basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde kalsiyum hidroksit miktarının artmasıyla dayanım sonuçları artış göstermiş ancak artış oranı azalmıştır. Bununla birlikte yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip karışımların %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip karışımlara göre kalsiyum hidroksit ilavesiyle dayanım artışlarının daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum yüksek fırın cürufunun karışımda serbest halde bulunan ve buharlaşmayan suyun varlığında C-S-H ve C-A-S-H gibi ürünler oluşturarak basınç dayanımına katkı sağlayabildiğini göstermektedir. Ayrıca çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan ürünlerden olan kalsiyum hidroksit, puzolanik özelliğe sahip yüksek fırın cürufunun sisteme dahil edilmesiyle, yüksek fırın cürufuyla tepkimeye girerek daha fazla C-S-H ve C-A-S-H gibi ürünleri oluşturma görevi görmektedir. Sisteme dahil edilerek hem yüksek fırın cürufu ile tepkime vermesi hem de sistemde Ca^{+} ve OH^{-} olarak çözünmesi sonucu ekstra kalsiyum kaynağı sağlayarak sistemde C-S-H ve C-A-S-H gibi güçlü ürünler oluşturmaya neden olmasından dolayı eklenen kalsiyum hidroksitin karışımın mekanik özelliklerine katkı yaptığı da düşünülmektedir. Yüksek fırın cürufunun çözünmesiyle, jeopolimerizasyon reaksiyonlarının başlangıcından itibaren matriste N-A-S(H) ve C-A-S-H jelleri bir arada oluşmaktadır (Yip, 2004). Oluşan bu iki tip reaksiyon ürünleri, matriste oldukça güçlü, homojen ve az boşluklu bir yapı oluşturarak bu çalışmada olduğu gibi daha yüksek basınç dayanım sonuçlarına sahip karışımların üretilmesine imkân sağlamaktadır. Dikkat çeken bir diğer nokta ise kür süresinin 28 güne çıkmasıyla numunelerin basınç dayanımlarının, 7 günlük kür süresine göre önemli artışlar

göstermesidir. Bu sonuç reaksiyonların ilerleyen günlerde devam ettiğini göstermektedir. Ayrıca bu seride rastlanılan bir diğer önemli sonuç ise 3 tip aktivatörün birlikte kullanılması durumunda %2 oranında kalsiyum içeriğine sahip olacak şekilde eklenen kalsiyum hidroksit miktarının bu değeri aşması durumunda karışımın hızlı bir şekilde sertleşmiş ve döküm sırasında kalıplara güçlükle yerleştirilmiş olmasıdır. Bu durum jeopolimerin priz süresinin ve genel olarak sertleşmesinin sistem içindeki kalsiyum içeriğinin bir fonksiyonu olduğunu kanıtlamaktadır (Van Jaarsveld ve diğerleri, 2003).

4.4. Kompozit Tasarımı

Gerekli dayanım ve reolojik özellikleri sağlayan matrisin geliştirilmesinin ardından kararlı durum çoklu çatlak oluşumuna bağlı olarak yüksek süneklik gösteren EGC'nin kompozit tasarımı aşamasına geçilmiştir. Kompozit tasarım aşamasında ilk olarak ECC malzemelerinde başarılı bir şekilde kullanılan PVA lifi geliştirilen matrise hacimce %2 oranında ikame edilerek kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitler üzerinde gerçekleştirilen mekanik test sonuçları ve söz konusu kompozitlerin kırılma davranışları üzerine yapılan incelemeler sonucu kompozitlerin beklendiği yüksek sünek davranışı sergilemediği ve kararlı durum çoklu çatlak oluşturmada kırıldığı gözlemlenmiştir. PVA lif kullanılarak üretilen kompozitlerin beklenenin aksine gevrek davranış göstermesi sonucu çeşitli liflerin kompozit tasarımında performanslarının incelenmesine karar verilmiştir.

4.4.1. Deneysel Çalışmalar

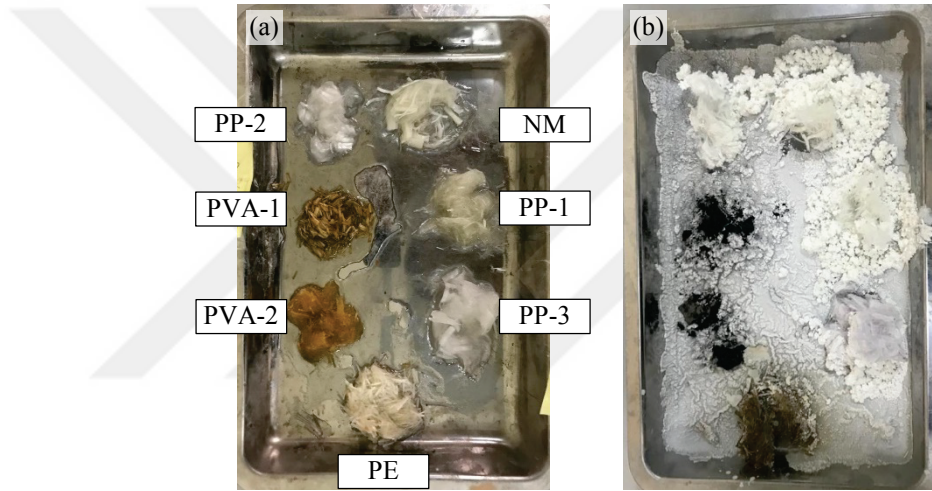
Tez çalışmaları kapsamında yüksek performanslı EGC geliştirilmesi için kullanılan malzemeler jeopolimer harç ve çeşitli liflerden oluşmaktadır. Matrisin geliştirilmesi aşamasında kazanılan deneyimin ardından tüm liflerin homojen bir şekilde dağılabileceği gerekli reolojik özellikleri sağlayan, bağlayıcı olarak İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum

hidroksitin alkali aktivatör çözeltisi olarak birlikte kullanıldığı karışım üzerinden liflerin performansının incelenmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda matris tasarımı aşamasında alkali aktivatör olarak %6 sodyum hidroksit konsantrasyonuna ve sodyum hidroksit miktarının iki katı olacak şekilde sodyum silikat miktarına sahip olan alkali aktivatör çözeltisine ek olarak %2 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilen ve matris tasarımı aşamasında 48,4 MPa değeriyle en iyi basınç dayanımına sahip karışım üzerinden liflerin performansının incelenmesine karar verilmiştir. Farklı özelliklere sahip PVA lifler, PE lif, NM lif ve farklı özelliklere sahip PP lifler olmak üzere farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerde 7 tip lif tüm karışımlarda tasarım değişkenlerini azaltmak için hacimce %2 oranında kullanılmasıyla kompozit üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan lif çeşitleri ve özellikleri Bölüm 3.1.4'te detaylı olarak verilmiştir. EGC malzemesinin hem ısıl kür hem de laboratuvar koşullarında ortam küründe üretilmesi amaçlanmış ve bu kapsamda kompozit üretimine geçilmeden ilk etapta farklı tip liflerin alkali aktivatör solüsyonuna maruz kaldığında nasıl davrandığı ve kür koşullarının lif yapısını nasıl etkilediğinin tespit edilebilmesi için birtakım testler gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında optimum alkali aktivatör çözeltisinin tespiti adına gerçekleştirilen çalışmalarda genel olarak %6 ile %10 oranları arasında sodyum konsantrasyonlarına sahip alkali aktivatörler kullanmış ve bu oranlar göz önünde bulundurularak liflerin alkali aktivatöre direncinin tespit edilmesi adına %8 sodyum konsantrasyonuna (0,35 S/B oranı için 10M) sahip alkali aktivatör çözeltileri hazırlanmış, tüm lifler hazırlanan solüsyonlar içinde 72 saat bekletilmiştir. 72 saat sonunda jeopolimer üretiminde optimum kür sıcaklıklarından biri olarak kabul edilen 105°C sıcaklıkta tüm lifler 24 saat bekletilerek liflerin sıcaklığa karşı tepkisi de incelenmiştir. Daha sonra kompozit üretimlerinde tüm lifler kullanılarak EGC üretimi gerçekleştirilmiştir. Yedi karışım üretilmiş ve her karışım için 3 kupon örneği eğilmede çekme deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan malzemeler ve test metotları detayları Bölüm 3'te detaylı olarak sunulmuştur.

4.4.2. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Farklı Liflerin Yüksek Alkali Ortam ve Isıl Direnci

Farklı tipteki lifler üzerinde gerçekleştirilen testler neticesinde alkali aktivatör çözeltisinde bekletilen ve sonrasında ısıtma işlemi uygulanan lifler çeşitli bozulmalar göstermiştir. Liflerin alkali aktivatör çözeltisi ve sıcaklık kürüne karşı gösterdikleri tepkiye dair görseller Şekil 4.11’de sunulmuştur.



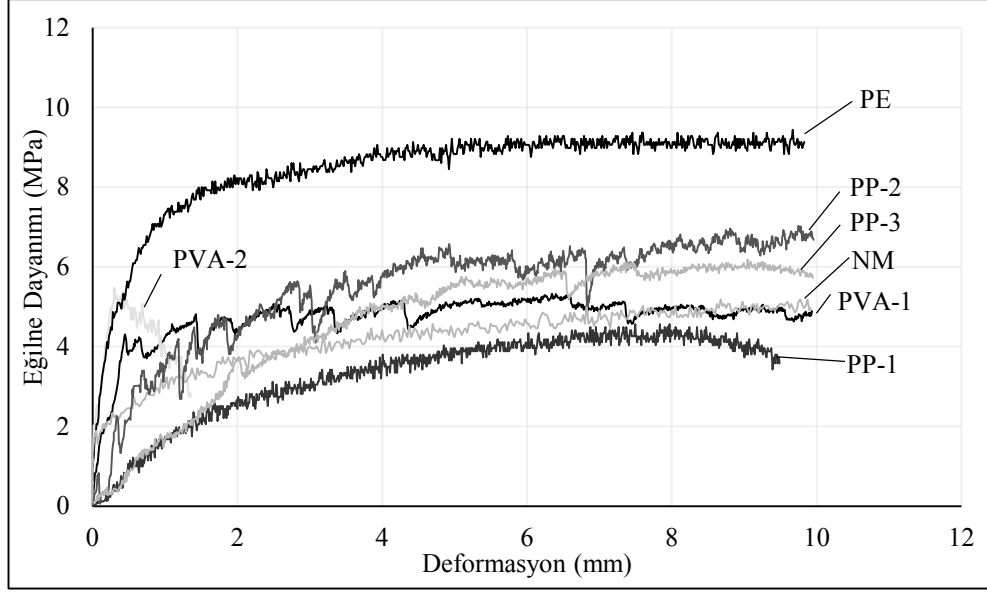
Şekil 4.11. (a) Alkali aktivatör solüsyonunda bekletilmiş ve (b) ısıtma kürüne maruz bırakılmış liflerin görüntüsü

Şekil 4.11’deki verilen görsellerde incelemenin ilk aşamasında 72 saat alkali aktivatör çözeltisinde bekletilen lifler görsel olarak incelenmiş ve PVA-1 ve PVA-2 liflerinde renk değişimleri gözlemlenmiştir. Normal şartlarda beyaz renkte olan ve parlak bir yapıya sahip olan PVA liflerin sodyum hidroksit çözeltisinde bekletildikten sonra renk değişimine uğradığı ve yüzey özelliklerinin görsel olarak değiştiği saptanmıştır. PE ve PP-1 liflerinde de renk değişimi gözlemlenmiş fakat bu değişim PVA liflerinde görülen seviyelerde değildir. NM, PP-2 ve PP-3 liflerinde ise görsel olarak herhangi bir değişime rastlanmamıştır. Sıcaklık uygulamasının ardından PVA-1 ve PVA-2

liflerinin şiddetli seviyede değişime uğradığı, dahası liflerin yanarak tamamen fiziksel stabilitesini kaybettiği ve toz haline geldiği saptanmıştır. PE lifinde de sıcaklık kürünün etkisiyle renk olarak değişim gözlemlense de lifin fiziksel stabilitesini koruduğu saptanmıştır. Test edilen diğer liflerde görsel anlamda değişimler gözlemlenmiş olmasına rağmen liflerin fiziksel stabilitesini koruduğu ve zarar görmediği görülmüştür.

Farklı Lifler Kullanılarak Üretilen EGC Karışımların Eğilme Performansı

Tez çalışmalarında PVA lif donatılı jeopolimer kompozitlerin kararlı durum çoklu çatlak oluşumu ve buna bağlı olarak yüksek süneklik göstermemesinin ardından farklı tipte liflerin alkali aktivatör çözeltisine ve ardından ısıl küre karşı davranışları incelenmiştir. Farklı tipteki lifler üzerinde gerçekleştirilen testler neticesinde alkali aktivatör çözeltisinde bekletilen ve sonrasında ısıl işlem uygulanan liflerin bozulmalar göstermesine rağmen fiziksel stabilitesini koruması ve jeopolimer matris içinde davranışlarının değişkenlik gösterebilme ihtimali sebebi ile tüm lifler hacimce %2 oranında kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar koşullarında ortamda kür edilen kompozitler 28 günün sonunda 10 mm orta açıklık deformasyon seviyesine kadar yüklenmiştir. Farklı lifler kullanılarak üretilen EGC karışımların eğilme dayanımı – orta açıklık deformasyonu grafikleri Şekil 4.12’de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Farklı liflerle üretilen kompozitlerin 28 günün sonundaki eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafikleri

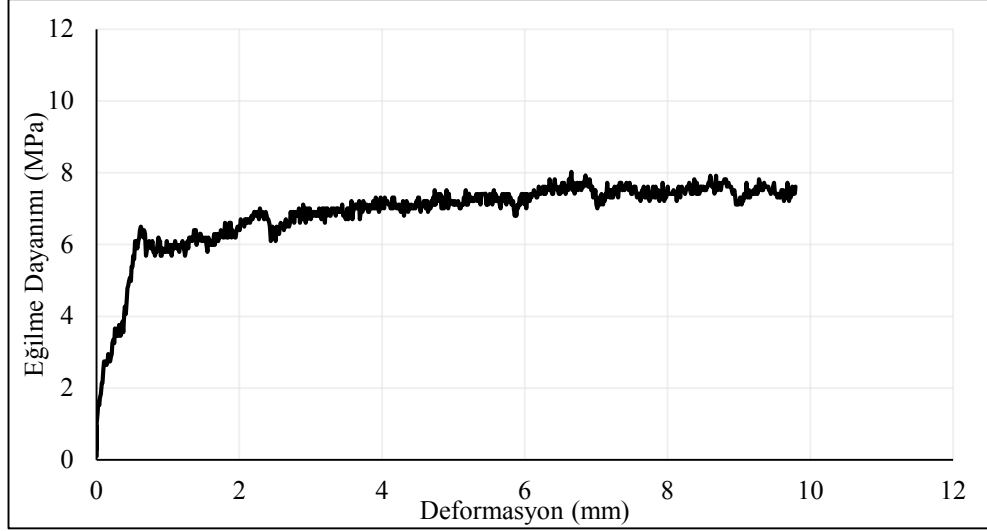
Liflerin alkali aktivatör çözeltisi içerisindeki davranışı ve akabinde ısıtma kuru neticesinde gösterdiği fiziksel değişikliklerle ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda PVA-1 ve PVA-2'nin fiziksel stabilitesini koruyamayarak şiddetli seviyede bozunmaya uğradığı daha önce belirtilmiştir. Bu durumun PVA-2 lifinin kullanıldığı kompozitin davranışının temel nedeni olduğu ve lifin zarar görerek eğilme dayanımına sağlayacağı katkının azaldığı Şekil 4.12'de verilen grafikte açıkça görülmektedir. PVA-2 lifinin kullanıldığı kompozit çoklu mikro çatlak oluşumuna müsaade etmeden dikkate alınmayacak seviyede kısmen sünek davranış sergileyerek kırılmıştır ancak PVA-1 lifinin kullanıldığı karışım ise en az NM lifin kullanıldığı karışım kadar eğilme dayanımı ve deformasyon seviyesi sergilemiştir. PVA-1 lifinin bu performansı göstermesi, kompozitlerin ortam şartlarında kürlenmesi ve jeopolimer matris tarafından sarılan lifin matrise homojen bir biçimde dağılması neticesinde alkali aktivatörün olumsuz etkilerini telafi edebilmesi ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca farklı tipteki lifler üzerinde gerçekleştirilen testler neticesinde alkali aktivatör çözeltisinde bekletilen ve sonrasında ısıtma işlemi uygulanan lifler doğrudan alkali aktivatör çözeltisinde bekletilmiştir. Matris içerisinde ise karışıma diğer bileşenlerin girmesi ile alkali aktivatörün zararlı etkisinin azaldığı düşünülebilir.

En iyi eğilme dayanımını - orta açıklık deformasyonu performansı sergileyen karışımlar ise sırasıyla PE, PP-2 ve PP-3 liflerinin kullanıldığı karışımlardır. Bu üç karışım arasında PE kullanılarak üretilen kompozitin ECC'nin karakteristik özellikleri olan yüksek sünekliği ve çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyetini daha iyi yansıtabildiği görülmüştür. Bununla birlikte NM kullanılarak üretilen kompozitlerin eğilme dayanımının düşük olmasına karşın yüksek sünekliği ve çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyetini en az PE lif kadar iyi yansıtabildiği görülmüştür. Bunun nedeni matris-lif etkileşiminin uyumlu çalışması olarak düşünülmüştür.



Şekil 4.13. PE lif takviyeli kompozitin eğilme yükleri altındaki davranışı ve çoklu mikro çatlakların oluşumu

Daha önce belirtildiği gibi lif hibridizasyonu, lif ilavesinin faydalarını etkin bir şekilde en üst düzeye çıkarma ve birleştirme tekniği olarak tanımlanmaktadır. Tüm liflerin kompozit üretiminde performansının değerlendirilmesinin ardından PE lifinin en iyi performansa sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. PE lifi pahalı bir liftir. Malzemenin performansı en önemli parametredir ancak maliyet de oldukça önemli konulardan birisidir. Bu nedenle EGC'nin maliyetini azaltmak amacıyla PE lifi çok daha ucuz olan NM lifi ile karıştırılarak performansının incelenmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda PE lifi hacimce %1,25 oranında NM lifi ise hacimce %0,75 oranında kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar koşullarında ortamda kür edilen kompozitin 28 günün sonunda eğilme yükleri altındaki davranışı ve çatlak gelişimi Şekil 4.14'te sunulmuştur.



Şekil 4.14. PE ve NM liflerinin hibridizasyonu ile üretilen kompozitin 28 günün sonundaki eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafiği

EGC üretiminde PE ve NM liflerin karıştırılmasıyla tatmin edici mekanik özelliklerin elde edilebildiği görülmektedir. Ayrıca daha ekonomik NM lifinin PE lifle karıştırılması, EGC'nin maliyetini düşürmenin etkili bir yolu olmuş ve aynı zamanda tatmin edici mekanik özellikler sunmuştur. Sonuç olarak tez çalışmaları kapsamında genel olarak üretilecek nihai EGC karışımlarında PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasına karar verilmiştir. Hacimsel olarak PE lifinin daha yüksek dozajlarda kullanılmasının nedeni EGC karışımlarda performans kaybı yaşamamaktır. Ayrıca tez çalışmaları kapsamında kullanılan PE lifinin uzunluğu 9 mm ve kullanılan NM lifinin uzunluğu 19 mm'dir. Bu kapsamda işlenebilirlik kaybının da daha az yaşanması için PE lifinin daha fazla kullanılmasına karar verilmiştir.

5. JEOPOLİMER BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN MEKANİK PERFORMANSI

5.1. Giriş

EGC tasarımının uygulanabilirliğini ve etkililiğini göstermek için Bölüm 4'te inşaat ve yıkıntı atıklarının yapı malzemeleri üretiminde herhangi bir ön işlem gerektirmeksizin sadece tasnifleme, kırma ve öğütme gibi temel ve basit işlemlerden geçirilmesi ile kullanılabilir hale getirilmesi adına deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel tabanlı tasarım yaklaşımı uygulanarak yeterli basınç dayanımına sahip matrisler geliştirilmiş ardından matris, lif ve matris-lif arayüz özelliklerinin bir sinerji içerisinde birbirleriyle uyumlu şekilde çalışmaları sağlanarak çoklu mikro çatlak hasarı sergileyen, sünek ve dayanıklı EGC geliştirilmiştir. Bu sayede çevre, ekonomi ve toplum üzerinde göz ardı edilemeyecek ölçüde negatif etkiler yaratan İYA'nın etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi sağlanmıştır. Bu bölümde, geliştirilen farklı kompozisyonlara sahip EGC malzemelerin yaygın kullanımlarının arttırılabilmesi ve gerçek saha koşulları altında nihai performanslarının belirlenebilmesi adına detaylı mekanik ve işlenebilirlik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

5.2. Deneysel Çalışmalar

EGC karışımlarının mekanik özelliklerini belirlemek için tasarlanan deneysel programda altı farklı EGC karışım kullanılmıştır. Deneysel program kapsamında kullanılan farklı kompozisyonlara sahip 6 farklı harç karışım Bölüm 4'te deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Nihai EGC karışımlarında PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasına yine Bölüm 4'te deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek karar verilmiştir. EGC karışımlarının hazırlanması, kür koşulları ve uygulanan test prosedürleri Bölüm 3.2'de daha önce anlatıldığı için bu kısımda detaylı bilgi verilmemiştir. Altı farklı EGC karışımının karışım oranları Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Nihai EGC karışımların karışım oranları

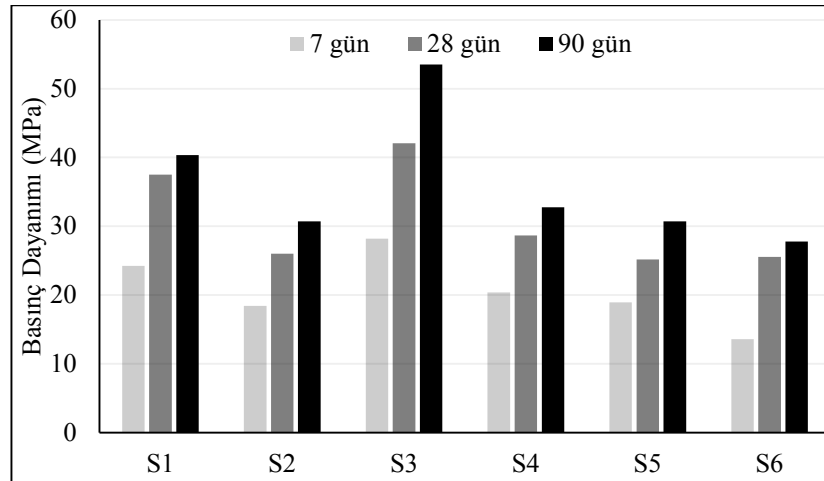
Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf Kum	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Ca(OH) ₂	Su	NM	PE
S1	262,0	157,2	209,6	104,8	104,8	209,6	366,8	109,4	218,7	-	224,6	8,55 12,13
S2	305,4	183,2	244,3	104,7	209,4	-	366,5	109,3	218,5	-	224,4	8,55 12,13
S3	257,4	154,5	205,9	103,0	103,0	205,9	360,4	107,4	214,9	38,1	220,7	8,55 12,13
S4	300,1	180,1	240,1	102,9	205,8	-	360,1	107,4	214,7	38,1	220,6	8,55 12,13
S5	242,3	145,4	193,9	96,9	96,9	193,8	339,2	168,6	-	107,6	339,2	8,55 12,13
S6	282,5	169,5	226,0	96,8	193,7	-	339,0	168,4	-	107,5	339,0	8,55 12,13

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.

5.3. DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma

5.3.1. Basınç Dayanımı

Kullanılan aktivatör tipi ve kombinasyonlarının jeopolimerlerin basınç dayanımı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu daha önce belirtilmiştir. Bölüm 4’te bu etkiler göz önünde bulundurularak 3 tip alkali aktivatörün çeşitli kombinasyonlarda kullanım oranları optimize edilmiş ve gerekli dayanım ve reolojik özellikleri sağlayan 6 farklı harç karışım geliştirilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı kompozisyona sahip EGC karışımlarının basınç dayanım sonuçları

Geliştirilen harç karışımlara PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasıyla üretilen nihai EGC karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 5.1’de sunulmuştur. EGC karışımlarının 90 günlük basınç dayanımı sonuçları kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna göre 27,8-53,5 MPa değerleri arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.1’de verilen basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde, tüm karışımlarda artan numune yaşıyla birlikte basınç dayanım sonuçlarının da arttığı görülmektedir. Bu durum jeopolimerizasyon reaksiyonlarının ileriki yaşlarda da devam ettiğini göstermektedir. İYA bazlı toz bağlayıcı malzemeye ek olarak %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli bağlayıcı toz karışıma sahip S1, S3 ve S5 kodlu karışımlar, %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip S2, S4 ve S6 kodlu karışımlara göre genel olarak daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Cüruf ikameli EGC karışımlarının göstermiş olduğu daha yüksek performans daha önce belirtildiği gibi matriste N-A-S-(H) ve C-A-S-H jellerini bir arada oluşturmasıyla ilişkilidir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu karışım 90 günde 53,5 MPa değerine ulaşarak en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S4 kodlu karışım 32,8 MPa değerine ulaşarak tamamen İYA’larla üretilen ve en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren karışım olmuştur. Bununla birlikte alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S2 kodlu karışım herhangi bir kalsiyum kaynağı takviyesi içermemesine rağmen 30,7 MPa değerine ulaşarak yeterli basınç dayanım sonucu vermiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu karışım 90 günün sonunda 40,3 MPa değerine ulaşmış ve aynı karışıma kalsiyum hidroksit ilavesinin kullanıldığı karışım 53,5 MPa değerine ulaşmıştır. Kalsiyum hidroksitin 90 günlük basınç dayanımını yaklaşık olarak %33 oranında arttırdığı görülmektedir. Ancak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S2 kodlu karışım 90 günün sonunda 30,7 MPa değerine ulaşmış ve aynı karışıma kalsiyum hidroksit ilavesiyle üretilen S4 kodlu karışım 32,8 MPa değerine ulaşmıştır. 3 tip aktivatörün birlikte kullanılması durumunda kalsiyum hidroksitin, %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip matrisin performansını, cüruf

ikameli toz bağlayıcı karışıma sahip matris kadar arttırmadığı belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışım, aynı aktivatör kombinasyonunun kullanıldığı %100 İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma sahip S6 kodlu karışımla erken yaşlarda farklı basınç dayanımı göstermiştir. Ancak numunelerin kür süresinin 28 güne çıkarılmasıyla bunun tersi bir durum gözlemlenmiştir ve her iki karışım da benzer basınç dayanım sonuçları göstermiştir. Ayrıca karışımların 7, 28 ve 90 günlük dayanım artışlarının da birbirinden çok farklı olduğu gözlemlenmiştir. Görüldüğü üzere, özellikle erken yaşlarda, alkali aktivatör olarak sodyum silikat içeren EGC karışımları, diğer karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Basınç dayanımı sonuçları genel olarak değerlendirildiği zaman dayanımı etkileyen en önemli faktörün alkali aktivatör tipi, kombinasyonu olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır.



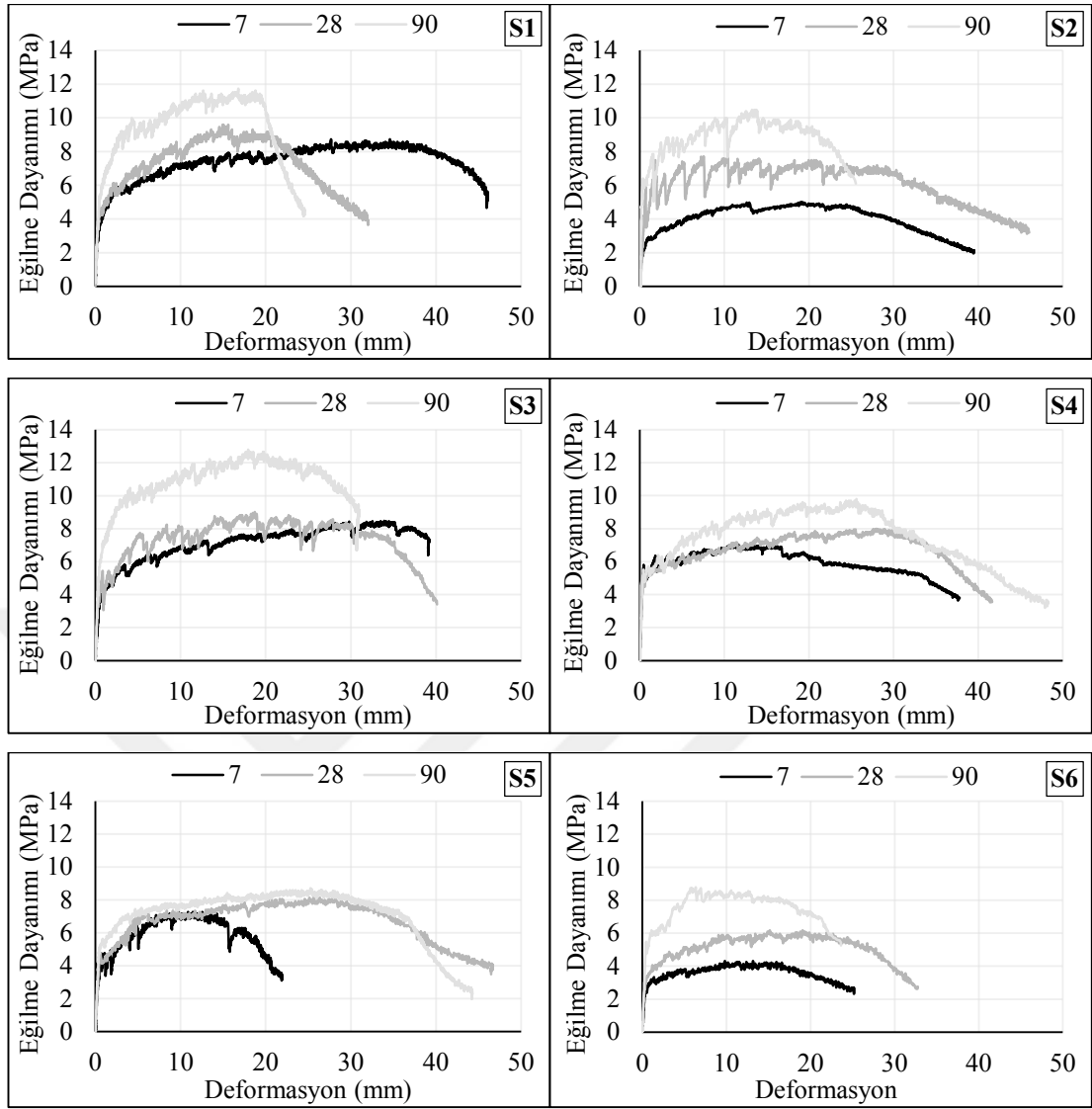
Şekil 5.2. Basınç dayanımı testinden önce ve sonra EGC numuneleri (soldan sağa lifli kırılmamış, lifsiz kırılmış, lifli kırılmış)

Matristeki PE ve NM liflerinin köprüleme etkisi nedeniyle numuneler ani ve kırılgan (gevrek) göçme göstermemiştir. Yükleme sırasında numune yüzeylerinde sürekli gelişip büyüyen dikey çatlaklar görülmüştür. Bununla birlikte Şekil 5.2’de görüldüğü gibi büyük dikey çatlaklar görüldükten sonra bile EGC numunelerinin genel olarak orijinal şekillerini hala koruyabildikleri görülmektedir.

5.3.2. Eğilme Dayanımı

Kullanılan liflerin özellikleri daha önce belirtildiği gibi EGC'nin performansını büyük ölçüde değiştirecektir. Bölüm 4'te bu etkiler göz önünde bulundurularak deneysel tabanlı tasarım yaklaşımı uyarınca matris için en uygun lifin seçilmesi adına çeşitli lifler deneysel tekniklerle ölçülerek performansları belirlenmiştir. Kompozit bir malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi özelliğinin doğrulanabilmesi için en doğru yöntem her ne kadar tek eksenli çekme testi olsa da bu testin uygulanması çeşitli sebeplerden dolayı her zaman kolay olmayabilmektedir. Ancak tam anlamıyla şekil değiştirme sertleşmesi gösteren malzemeler için eğilme testi sonucunda elde edilen orta açıklık deformasyon değerlerinin malzemenin çekme şekil değiştirme kapasitesiyle doğrudan ilişkilendirilebileceği gösterilmiştir (Qian ve Li, 2008). Bu sebeple tez çalışmasında EGC numunelerinin eğilme dayanımı ve sünekliklerinin belirlenebilmesi için dört noktalı eğilmede çekme testi kullanılması uygun bulunmuştur. Geliştirilen harç karışımlara PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasıyla üretilen nihai EGC karışımlarının 7, 28 90 günlük eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafikleri Şekil 5.3'te sunulmuştur.

EGC numunelerin eğilme dayanımı hesabında, eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyonu eğrilerinden alınan maksimum eğilme yükleri esas alınmıştır. Şekil 5.3'te verilen grafikler dört noktalı eğilmede çekme yüklemesi altında test edilen 3 numunenin ortalama değerleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir. EGC karışımlarının 90 günlük eğilme dayanımları ve orta açıklık deformasyon değerleri kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna göre sırasıyla 8,7-12,8 MPa ve 23,6-48,3 mm değerleri arasında değişim göstermiştir.



Şekil 5.3. EGC karışımlarının 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafikleri

Şekil 5.3'te verilen eğilme dayanımı - orta açıklık deformasyon grafikleri incelendiğinde tüm EGC numunelerinin nihai eğilme dayanımlarının her yaş için ilk çatlak mukavemetinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum tüm EGC karışımlarının şekil değiştirme sertleşmesi davranışına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm numuneler için çoklu mikro çatlak oluşumu kolaylıkla gözlemlenebilmiştir.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu karışım ile aynı aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ancak %100 İYA bazlı S2 kodlu karışım incelendiğinde, 7 günde cüruf ikamesinin %100 İYA bazlı karışıma göre eğilme dayanımını ve orta açıklık deformasyonunu yaklaşık olarak sırasıyla %70 ve %16 oranında arttırdığı görülmektedir. Bu durum alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı karışımlarda cüruf ikamesinin erken yaşlarda hem eğilme dayanımını hem de sünekliği olumlu etkilediğini göstermektedir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde ise cüruf ikameli S1 kodlu karışımın 7 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık %10 arttığı ancak orta açıklık deformasyonunun yaklaşık %30 azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte %100 İYA bazlı S2 kodlu karışımın 7 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık %51 arttığı ve aynı zamanda orta açıklık deformasyonunun da yaklaşık %17 arttığı görülmektedir. S1 ve S2 kodlu her iki EGC karışımlarının da 7 günlük sonuçları 28 günlük sonuçları birlikte değerlendirildiğinde artan eğilme dayanımıyla birlikte sünekliğin arttığı ancak belirli bir dayanım seviyesi aşıldığı zaman sünekliğin tekrar azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu davranış hakkında daha net karar verilebilmesi için 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarının da incelenmesi gerekmektedir. 90 günlük sonuçlar incelendiğinde ise cüruf ikameli S1 kodlu karışımın 28 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık %22 oranında arttığı ancak orta açıklık deformasyonunun yaklaşık %23 azaldığı görülmektedir. %100 İYA bazlı S2 kodlu karışımın ise 28 güne kıyasla 90 günlük eğilme dayanımının yaklaşık %36 arttığı ve 28 günlük sonuçların aksine orta açıklık deformasyonunun 90 günde yaklaşık %45 azaldığı görülmektedir. 90 günlük sonuçların da incelenmesiyle birlikte S1 ve S2 kodlu EGC karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük sonuçları arasında artan eğilme dayanımıyla birlikte sünekliğin arttığı ancak belirli bir dayanım seviyesi aşıldığı zaman sünekliğin tekrar azaldığı kesin olarak belirlenmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı tüm EGC karışımların eğilme dayanımındaki artış ve azalış miktarıyla orta açıklık deformasyon seviyesindeki artış ve azalış arasında ilişki olduğu belirlenmiştir.

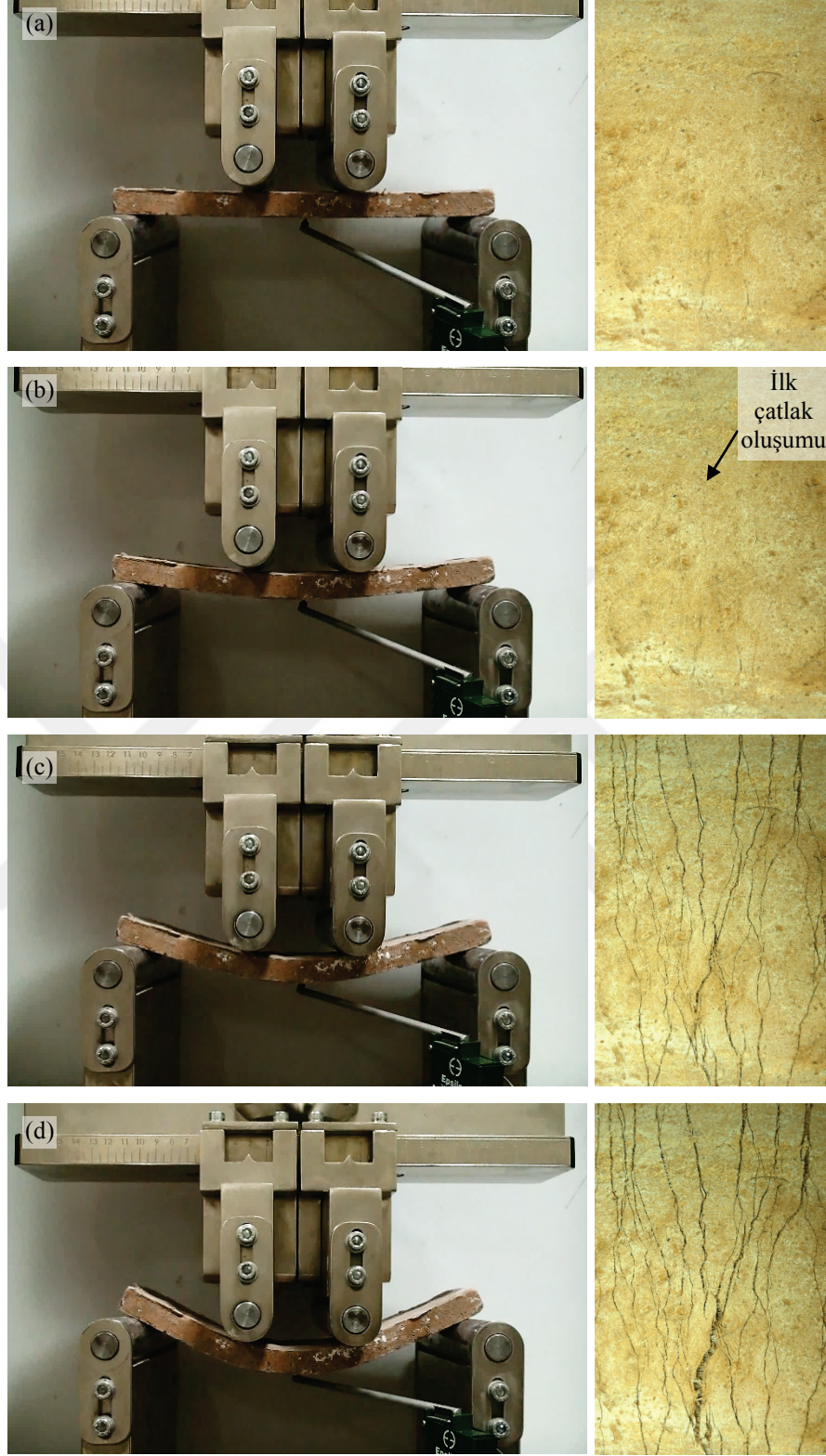
Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu karışım ile aynı aktivatör

kombinasyonlarının kullanıldığı %100 İYA bazlı S4 kodlu karışım incelendiğinde, 7 günde cüruf ikamesinin %100 İYA bazlı karışıma göre eğilme dayanımını %20 oranında arttırdığı ancak orta açıklık deformasyonunu yaklaşık olarak %4 oranında azalttığı görülmektedir. Daha önce alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı S1 ve S2 kodlu EGC karışımlarda S1 kodlu karışımın S2 kodlu karışıma göre erken yaşlarda eğilme dayanımının çok daha yüksek olması cüruf ikamesinin bir sonucu olarak belirtilmişti. Bununla birlikte bu fark alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı karışımlara kalsiyum hidroksit eklenmesiyle azalmıştır. Kalsiyum hidroksitin %100 İYA bazlı EGC karışımlarının erken yaşlarda basınç dayanımını çok değiştirmedeği görülse de erken yaşlarda eğilme dayanımını olumlu etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde ise cüruf ikameli S3 kodlu karışımın 7 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık olarak %7 oranında ve orta açıklık deformasyonunun da yaklaşık olarak %2,5 oranında arttığı görülmektedir. %100 İYA bazlı S4 kodlu karışımın ise 7 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık olarak %13 oranında ve orta açıklık deformasyonunun ise yaklaşık olarak %10 oranında arttırdığı görülmektedir. 90 günlük sonuçlar incelendiğinde ise cüruf ikameli S3 kodlu karışımın 28 güne kıyasla 90 günde eğilme dayanımının yaklaşık %41 arttığı ancak orta açıklık deformasyonunun yaklaşık %23 azaldığı görülmektedir. %100 İYA bazlı S4 kodlu karışımın 28 güne kıyasla 90 günde eğilme dayanımının yaklaşık %22 oranında ve orta açıklık deformasyonunun yaklaşık %16 arttığı görülmektedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı tüm EGC karışımların basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve orta açıklık deformasyonları arasında ilişki olduğu görülmüştür. Daha önce belirtilen, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu EGC karışıma benzer şekilde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu karışımda da artan basınç dayanımıyla birlikte eğilme dayanımının arttığı bununla birlikte orta açıklık deformasyon seviyesinin genel olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı %100 İYA bazlı S2 kodlu EGC karışımından farklı olarak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun

kullanıldığı %100 İYA bazlı S4 kodlu karışımın artan basınç dayanımıyla birlikte eğilme dayanımının arttığı bununla birlikte orta açıklık deformasyonunun da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı karışımlarda kalsiyum hidroksit ilavesinin matris-lif arayüz özelliklerini etkilediği sonucu çıkarılmıştır. Bunun bir sonucu olarak daha önce belirtildiği gibi kalsiyum hidroksit ilavesi tüm karışımların basınç dayanımını arttırmıştır ancak eğilme dayanımı ve sünekliği farklı şekillerde etkilemiştir. Cüruf ikameli S1 ve S3 EGC karışımları birlikte değerlendirildiğinde kalsiyum hidroksit ilavesi erken yaşlarda eğilme dayanımını ve sünekliği azaltmış ancak 90 günde eğilme dayanımını ve sünekliğin artmasını sağlamıştır. %100 İYA bazlı S2 ve S4 kodlu EGC karışımları birlikte değerlendirildiğinde kalsiyum hidroksit ilavesi erken yaşlarda eğilme dayanımının artmasını sağlarken sünekliği bir miktar azaltmıştır. 90 günde ise eğilme dayanımını bir miktar azaltmış ancak sünekliği arttırmıştır. Sonuç olarak kalsiyum hidroksit ilavesi alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S1, S2, S3 ve S4 kodlu karışımlarda nihai ürünün sünekliğini önemli miktarda etkilemiştir. Söz konusu karışımlar genel olarak değerlendirildiğinde cüruf ikameli S3 kodlu EGC karışımının nihai basınç ve eğilme dayanımının diğer EGC karışımlara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte bu dört karışım içerisinde %100 İYA bazlı S4 kodlu karışımın nihai eğilme dayanımının diğer EGC karışımlara kıyasla daha düşük olduğu ancak nihai orta açıklık deformasyon seviyesinin çok daha yüksek olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum kullanılan aktivatör kombinasyonunun değiştirilmesi ve İYA bazlı toz bağlayıcı karışıma cüruf ikame edilmesiyle eğilme dayanımının ve sünekliğin geliştirebileceğini ve istenilen aralıklarda nihai eğilme dayanımına ve orta açıklık deformasyon seviyelerine sahip EGC karışımların üretilabileceğini göstermiştir. Ayrıca diğer bir önemli sonuç İYA bazlı malzemeye cüruf ikame edilmesi EGC kompozitinin daha kırılğan hale geldiğini göstermektedir.

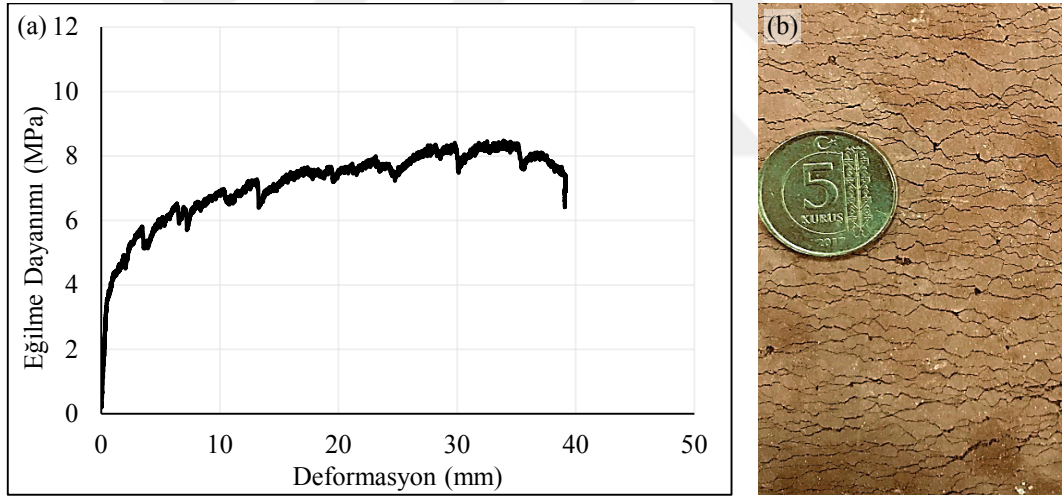
Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışım ile aynı aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ancak %100 İYA bazlı S6 kodlu karışım incelendiğinde, 7 günde cüruf ikamesinin %100 İYA bazlı karışıma göre eğilme dayanımını yaklaşık olarak %70

oranında arttırdığı ancak orta açıklık deformasyonunu yaklaşık olarak %13 oranında azalttığı görülmektedir. Bu durum cüruf ikamesinin erken yaşlarda eğilme dayanımını olumlu ancak sünekliği olumsuz etkilediğini göstermektedir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde ise cüruf ikameli S5 kodlu karışımın 7 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık %12 oranında ve orta açıklık deformasyonunu ise yaklaşık %112 oranında arttığı görülmektedir. Bununla birlikte %100 İYA bazlı S2 kodlu karışımın 7 güne kıyasla eğilme dayanımının yaklaşık %44 oranında ve orta açıklık deformasyonunun da yaklaşık %30 arttığı görülmektedir. S5 ve S6 kodlu EGC karışımlarının 7 günlük sonuçları 28 günlük sonuçları ile kıyaslandığında artan cüruf ikamesinin eğilme dayanımını olumlu etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte erken yaşta cüruf ikamesinin sünekliği azalttığı fakat ilerleyen yaşlarda sünekliği büyük oranda arttırdığı gözlemlenmiştir. 90 günlük sonuçlar incelendiğinde ise cüruf ikameli S5 kodlu karışımın 28 güne kıyasla 90 günde eğilme dayanımının yaklaşık %6 oranında arttığı ancak orta açıklık deformasyonunun yaklaşık %5 azaldığı görülmektedir. %100 İYA bazlı S6 kodlu karışımın ise 28 güne kıyasla 90 günde eğilme dayanımının yaklaşık %42 oranında arttığı ve orta açıklık deformasyonunun ise yaklaşık %28 oranında azaldığı görülmektedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı tüm EGC karışımların basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve orta açıklık deformasyonları arasında ilişki olmadığı görülmüştür. Bu durumun cüruf ikame edilmesi sonucu matris-lif arayüz özelliklerini değiştirmesiyle ilişkili olduğu düşünülmüştür. Söz konusu iki karışım değerlendirildiğinde 90 günde benzer basınç ve eğilme dayanımı değerleri göstermelerine rağmen cüruf ikameli S5 kodlu karışımın çok daha sünek davrandığı görülmüştür. Bu durum da alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı karışımlara cüruf ikamesinin matris-lif arayüz özelliklerini iyileştirdiği ve sinerjiyi arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S5 ve S6 kodlu karışımların S1, S2, S3 ve S4 kodlu EGC karışımlara göre erken yaşlarda daha düşük basınç ve eğilme dayanımı sergilemelerine rağmen orta açıklık deformasyonu değerleri incelendiği zaman daha az sünek davranış gösterdikleri görülmektedir. Bu durum alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanılmasıyla matris-lif etkileşiminin arttığının bir göstergesidir.



Şekil 5.4. S3 kodlu EGC malzemesinin eğilme yükleri altındaki tipik davranışı ve orta açıklık çatlak gelişimi

Tüm numuneler için eğilme davranışı ve çoklu çatlak oluşumu benzer şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 5.4'te S3 kodlu EGC karışımının 7 günde farklı yük seviyelerindeki eğilme yükleri altında eğilme davranışı ve orta açıklık çatlak gelişimi gösterilmektedir. Yük seviyesi arttıkça orta açıklık bölgesinde ilk çatlak oluşumu gözlemlenmiştir (b). Daha sonra yük seviyesi daha da arttıkça orta açıklık üzerinde çatlak genişliği sabit kalırken çatlak sayısının arttığı görülmektedir (c). Bu durum ardışık çoklu mikro çatlakların kararlı durum düz çatlak oluşumu sayesinde gerçekleşmektedir. Mikro çatlaklar yüksek yük seviyesinde bile lokalize değildir. Son olarak yüksek orta açıklık deformasyon seviyesinde herhangi bir zayıf çatlak düzleminin birinde lokalize bir çatlak açıklığı oluşarak ve yük taşıma kapasitesi düşerek numunenin göçmesine neden olmuştur (d). Şekil 5.5'te S3 kodlu EGC malzemesinin 7 günde eğilme yükleri altında tipik çekme-şekil değiştirme eğrisi ve ortalama çatlak genişliği gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.5. EGC malzemesinin (a) tipik çekme-şekil değiştirme eğrisi ve (b) ortalama çatlak genişliği gelişimi

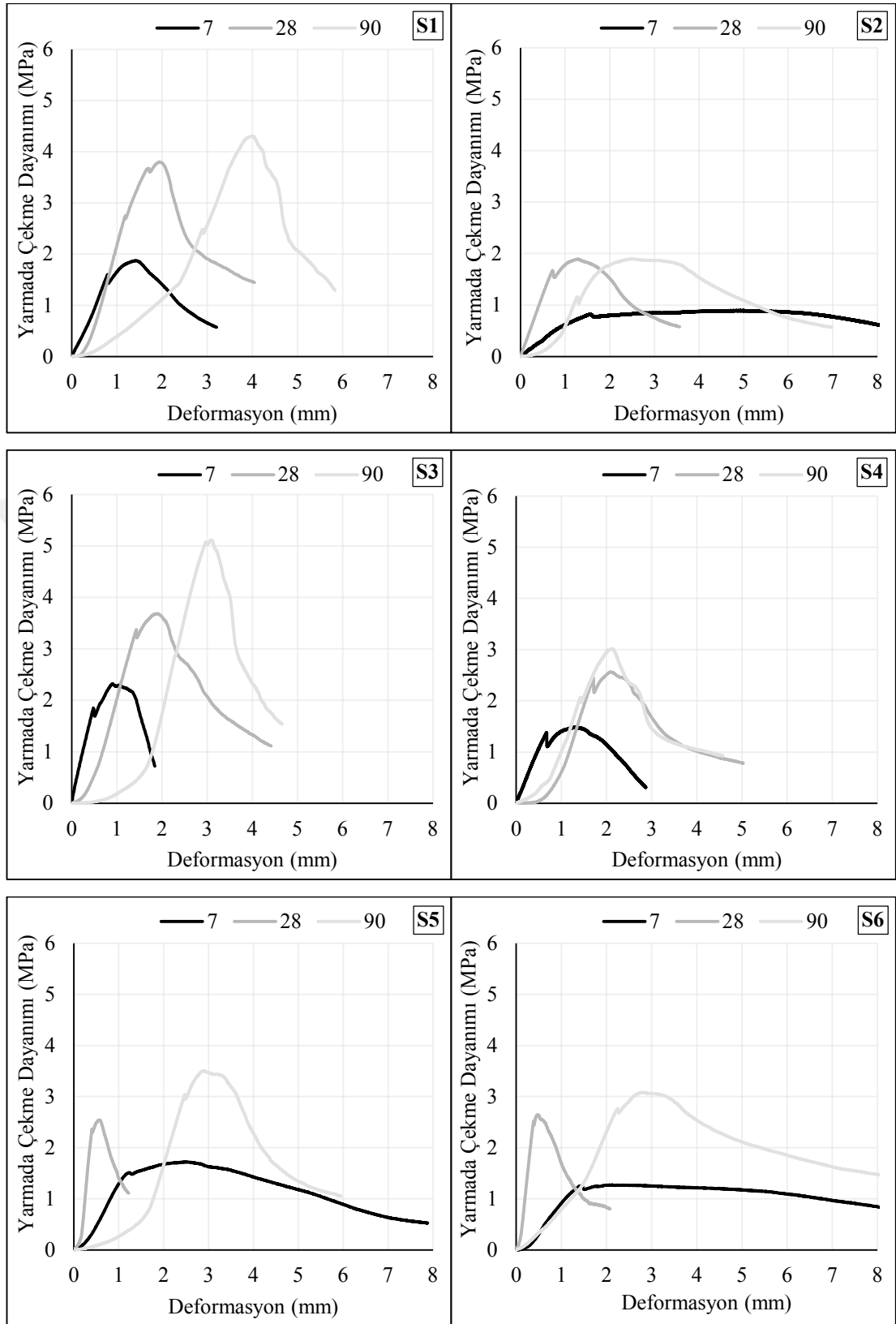
Şekil 5.5'te görüldüğü gibi ilk çatlak ortaya çıkana kadar yük deformasyon ile orantılı olarak artmıştır. Daha sonra ilk çatlak oluşumuyla beraber yük hafifçe düşmüş ve hemen tekrar yükselmiştir. Yük matris çatlak oluşum dayanımını aştığında, çatlak köprüleme gerilmesi ile yeni çatlaklar ortaya çıkarak yük tekrar hafifçe azalmıştır.

Bu işlem mikro çatlaklar dolana kadar tekrarlanmıştır. Daha sonra çatlak sayısı artmamış ancak genişlik artmaya devam etmiştir. Son olarak daha önce belirtildiği gibi zayıf bölümlerden birinde lokalize bir çatlak açıklığı oluşarak yük sürekli olarak azalmış ve numunenin göçmesine neden olmuştur.

5.3.3. Yarmada Çekme Dayanımı

Tez çalışması kapsamında EGC numunelerinin eğilme dayanımı ve sünekliklerinin belirlenebilmesi için dört noktalı eğilmede çekme deneyine ek olarak yarmada çekme deneyi uygulanmıştır. Geliştirilen harç karışımlara PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasıyla üretilen nihai EGC karışımlarının 7, 28, 90 günlük yarmada çekme dayanımı - deformasyon grafikleri Şekil 5.6'da sunulmuştur.

EGC numunelerin yarmada çekme dayanımı hesabında, yarmada çekme dayanımı - deformasyon eğrilerinden alınan maksimum yarmada çekme yükleri esas alınmıştır. Şekil 5.6'da verilen grafikler yarmada çekme yüklemesi altında test edilen 3 numunenin ortalama değerleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir. EGC karışımlarının 90 günlük yarmada çekme dayanımları ve maksimum yük altındaki deformasyon değerleri kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna göre sırasıyla 1,90-5,12 MPa ve 2,1-4,0 mm değerleri arasında değişim göstermiştir.



Şekil 5.6. EGC karışımlarının 7, 28, 90 günlük yarmada çekme dayanımı - deformasyon grafikleri



Şekil 5.7. Yarmada çekme yüklemesi altında S2 kodlu EGC numunenin tipik davranışı

Kompozit bir malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi özelliğinin doğrulanabilmesi için en doğru yöntem her ne kadar tek eksenli çekme testi olsa da eğilme testi sonucunda elde edilen orta açıklık deformasyon değerlerinin malzemenin çekme şekil değiştirme kapasitesiyle doğrudan ilişkilendirilebileceği gösterilmiştir (Li, 2019). Yüksek sünekliğe sahip EGC malzemesinin şekil değiştirme sertleşmesi davranışını ve çoklu mikro çatlak oluşturma özelliğini belirlemek amacıyla çalışma kapsamında farklı kompozisyonlara sahip 6 farklı EGC karışım üzerinde yarmada çekme deneyi de gerçekleştirilmiştir. Karışımların yarmada çekme dayanımı - deformasyon grafiğine göre gösterdiği davranışların tutarsız olduğu görülmüştür. Bu durum numunelerin maksimum yarmada çekme yükü noktasına ulaştığında ezilmeye başlamasıyla ilişkilendirilmiştir (Şekil 5.7).

Bu durum geliştirilen EGC malzemelerinin, şekil değiştirme davranışının ve sünekliğinin yarmada çekme testiyle belirlenmesini zorlaştırmıştır. Bununla birlikte çekme gerilmesi hakkında bir fikir vermesi ve silindirik numunelerde rahatlıkla çoklu mikro çatlaklarının görülebilmesi üzerine tez çalışmaları kapsamında geliştirilen EGC karışımlar üzerinde yarmada çekme testleri de uygulanmıştır.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu karışım ile aynı aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ancak %100 İYA bazlı S2 kodlu karışım incelendiğinde, 7 günde cüruf ikamesinin %100 İYA bazlı karışıma göre yarmada çekme dayanımını ve deformasyonunu arttırdığı görülmektedir. Ayrıca her iki karışımın 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımı - deformasyon eğrileri incelendiği zaman artan numune yaşıyla birlikte yarmada çekme dayanımının ve yarmada çekme dayanımına karşılık gelen deformasyon değerinin arttığı görülmektedir. Bu artış cüruf ikameli S1 kodlu karışımında daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı karışımlarda cüruf ikamesinin hem yarmada çekme dayanımını hem de sünekliği etkilediğini göstermektedir.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu karışım ile aynı aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı %100 İYA bazlı S4 kodlu karışım incelendiğinde, 7 günde cüruf ikamesinin %100 İYA bazlı karışıma göre yarmada çekme dayanımını arttırdığı ancak deformasyonunu azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte ilerleyen yaşlarda her iki karışımın da yarmada çekme dayanımlarının arttığı görülmektedir. S3 kodlu karışımın EGC karışımları arasında her yaşta en yüksek yarmada çekme dayanımı sergileyen karışım olduğu belirlenmiştir. Kalsiyum hidroksitin etkisi değerlendirildiğinde ise cüruf ikameli karışımlarda yarmada çekme dayanımını arttırmış ancak deformasyon değerini düşürmüştür. %100 İYA bazlı karışımlarda ise hem yarmada çekme dayanımını hem de deformasyon kapasitesini arttırdığı görülmektedir. Bu durum alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı karışımlarda kalsiyum hidroksit ilavesinin matris-lif arayüz özelliklerini etkilediği sonucu çıkarılmıştır. Bunun bir sonucu olarak daha önce belirtildiği gibi kalsiyum hidroksit ilavesi tüm karışımların basınç dayanımını arttırmıştır ancak yarmada çekme dayanımı ve deformasyon kapasitelerini farklı şekillerde etkilemiştir. Sonuç olarak kalsiyum hidroksit ilavesi alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S1, S2, S3 ve S4 kodlu karışımlarda nihai ürünün deformasyon kapasitesini önemli miktarda arttırmıştır.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışım ile aynı aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ancak %100 İYA bazlı S6 kodlu karışım incelendiğinde, 7 günde cüruf ikamesinin %100 İYA bazlı karışıma göre yarmada çekme dayanımını ve deformasyon seviyesini arttırdığı görülmektedir. Bununla birlikte ilerleyen yaşlarda her iki karışımın da yarmada çekme dayanımlarının arttığı ancak deformasyon seviyesinin 28 günde azaldığı bununla birlikte 90 günde arttığı görülmektedir. Bu durum S5 ve S6 kodlu karışımların matris-lif bağ dayanımı özelliklerinden ve söz konusu karışımların maksimum yarmada çekme yükü noktasına ulaştığında daha fazla ezilmeye başlamasıyla ilişkilendirilmiştir.

5.3.4. İşlenebilirlik ve Priz Süresi

EGC karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesi için Marsh-hunisi deneyi ve mini çökme-yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir. EGC karışımların Marsh-hunisi akış süreleri ve yayılma çapları Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Mini çökme-yayılma deneyi karışımlara lif eklenmesiyle de ayrıca gerçekleştirilmiş ve Çizelge 5.2’de lif eklenmesine bağlı olarak yüzde değişimler verilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kullanıldığı karışımlar Marsh-hunisinden akmadığından bu karışımlara ait ölçümler deney sonuçları kısmında verilememiştir.

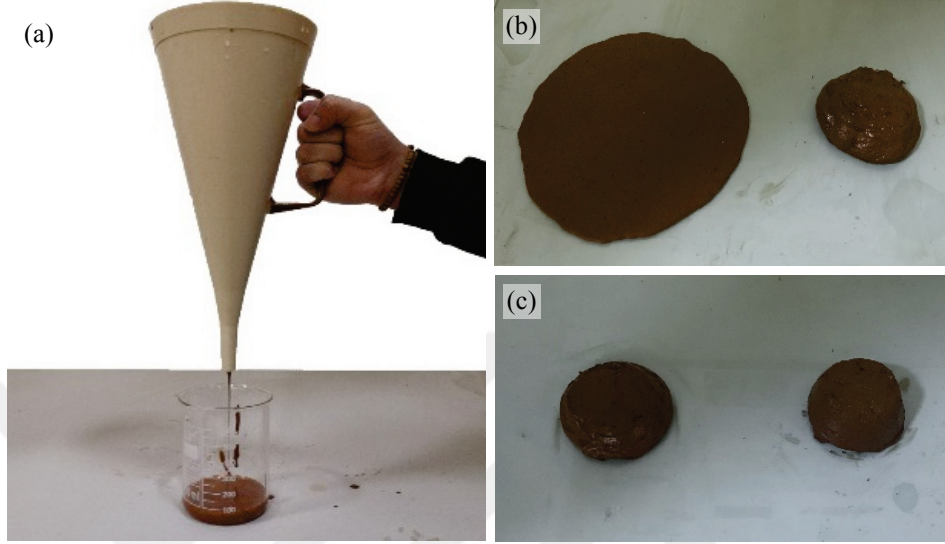
Çizelge 5.2’de verilen sonuçlar değerlendirildiğinde alkali aktivatör kombinasyonunun işlenebilirlik ve reolojik özellikleri etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. Tüm karışımların S/B oranlarının aynı olmasına rağmen sonuçlar arasında fark belirgin olmuştur. Bu farkın giderilmesi için su ihtiyacının azaltılması ve buna bağlı olarak karışımların işlenebilirliğinin artırılmasına yardımcı olacak katkıların kullanılması düşünülmüş ancak daha önce de belirtildiği gibi söz konusu katkıların jeopolimer bağlayıcı malzemelerin özelliklerini nasıl etkileyeceği bilinmediğinden kullanılmamıştır.

Çizelge 5.2. Farklı kompozisyona sahip EGC karışımlarının Marsh-hunisi ve mini-çökme yayılma deney sonuçları

Kod	Mars hunisi (Lifsiz EGC) (sn)	Mini çökme-yayılma (Lifsiz EGC) (mm)	Mini çökme-yayılma (EGC) (mm)	Mini çökme-yayılma çapındaki değişim (%)
S1	316	237	119	49,8
S2	264	252	121	52,0
S3	368	247	123	50,2
S4	288	268	124	53,7
S5	-	115	102	11,3
S6	-	121	105	13,2

EGC matrisinin Marsh-hunisi akış süreleri EGC matrisinin akışkanlığı ile bağlantılıdır. Akış süresi uzadıkça EGC matrisinin akışkanlığı azalmaktadır. S1, S2, S3 ve S4 kodlu karışımların Marsh-hunisinden akış süreleri incelendiğinde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu karışım 316 sn akış süresine sahipken aynı alkali aktivatör kombinasyonuna ek olarak kalsiyum hidroksit ilavesiyle gerçekleştirilen S3 kodlu karışımın akış süresi 368 sn olmuştur. Aynı durum alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S2 ve aynı alkali aktivatör kombinasyonuna ek olarak kalsiyum hidroksit ilavesiyle gerçekleştirilen S4 kodlu karışım arasında da mevcuttur. S2 kodlu karışım 264 sn akış süresine sahipken, S4 kodlu karışımın akış süresi 288 sn olmuştur. Bu sonuçlar ışığında kalsiyum hidroksit Marsh-hunisi akış süresini arttırmıştır. S1, S2, S3 ve S4 kodlu karışımların mini çökme-yayılma çapları incelendiğinde ise benzer durumun aksine kalsiyum hidroksit ilavesiyle yayılma çapının arttığı görülmektedir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu karışım 237 mm yayılma çapına sahipken aynı alkali aktivatör kombinasyonuna ek olarak kalsiyum hidroksit ilavesiyle gerçekleştirilen S3 kodlu karışımın yayılma çapı 247 mm olmuştur. Benzer şekilde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S2 kodlu karışım 252 mm yayılma çapına sahipken S2 aynı alkali aktivatör kombinasyonuna ek olarak kalsiyum hidroksit ilavesiyle gerçekleştirilen S4 kodlu karışımın yayılma çapı 268 mm olmuştur. Daha önce belirtildiği gibi alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kullanıldığı S5 ve S6 kodlu karışımlar

Marsh-hunisinden akmamıştır. S5 ve S6 kodlu karışımların mini çökme-yayılma sonuçları incelendiğinde ise cüruf ikameli S5 kodlu karışımın yayılma çapının daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 5.8. (a) Marsh-hunisi ve (b) (c) mini-çökme yayılma deneylerinin gerçekleştirilmesi

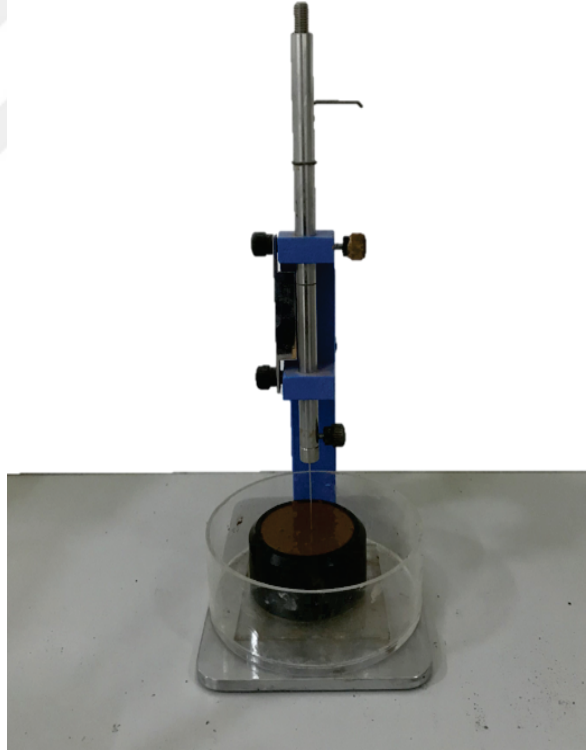
PE ve NM liflerinin eklenmesiyle gerçekleştirilen mini-çökme yayılma deney sonuçları incelendiğinde, mini çökme-yayılma çapı lif eklenmesiyle önemli ölçüde azalmıştır. Bu nedenle PE ve NM liflerinin eklenmesi taze EGC karışımının işlenebilirlik özelliklerini ve reolojik parametreleri önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

Son olarak farklı kompozisyonlara sahip EGC karışımlarının farklı işlenebilirlik seviyelerinde olmalarına rağmen lifin homojen dağılıp dağılmadığının görsel olarak incelenmesi sonucu tüm karışımların sergiledikleri tiksotropik özellik sayesinde homojen lif dağılımına uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sergilenen tiksotropik özellik sayesinde karışımlar kalıplara rahat bir şekilde yerleştirilebilmiştir.

EGC hamur karışımların priz başlama ve priz sona erme süreleri Şekil 5.9'da gösterilen vicat cihazı kullanılarak belirlenmiştir. EGC karışımların priz başlama ve sone erme süreleri Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Farklı kompozisyona sahip EGC karışımların priz süreleri

Kod	Priz başlama süresi (dk)	Priz sona erme süresi (dk)
S1	25	38
S2	26	39
S3	20	31
S4	22	33
S5	35	52
S6	43	62



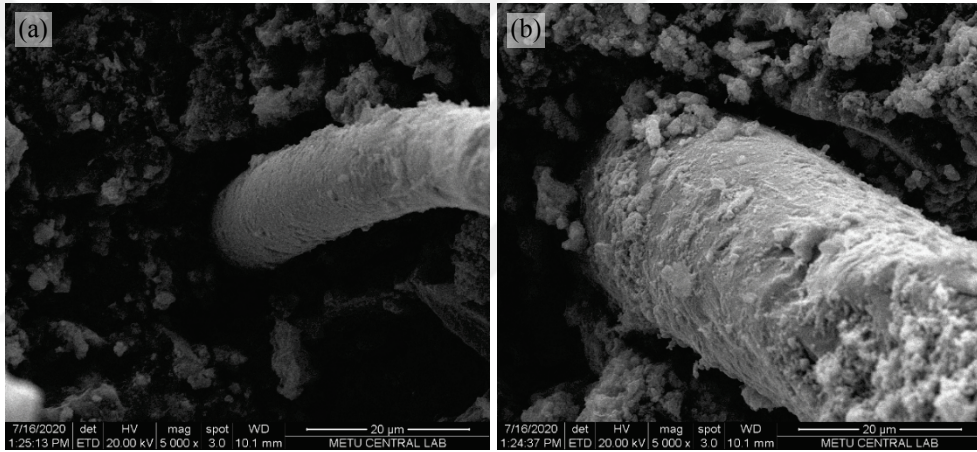
Şekil 5.9. Priz başlama ve sona erme süresi ölçümlerinin gerçekleştirilmesi

Çalışma kapsamında, karışımların priz sürelerini etkileyen en önemli unsur, karışımlarda sodyum silikat kullanımı ile ilgili olmuştur. S1, S2, S3 ve S4 kodlu EGC karışımların priz süreleri incelendiğinde sodyum silikat içeren karışımların kıvamı olumlu etkilenmesine rağmen, priz sürelerinde önemli düşüşler görülmüştür. Sodyum silikatın aşırı reaktif silis içeriğinden dolayı hızlı tepkime vermesi sonucu eklendiği karışımların priz sürelerini bir hayli düşürdüğü başka çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Goberis ve Antonovich, 2004). Ayrıca priz başlama süreleri ve priz sona erme sürelerinin de sodyum silikat eklenen EGC karışımlarda birbirine çok daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kalsiyum hidroksit ve cüruf ikamesinin de karışımların priz sürelerini azalttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte sodyum silikatın etkisi kadar belirgin olmasa da kalsiyum hidroksitin de priz süresini önemli miktarda etkilediği belirtilmelidir. Belirlenen priz başlama ve sona erme sürelerinin, karışımların kalıplara yerleştirilmesi esnasında gözlemlenen sürelerden önemli miktarda farklılıklar göstermesi sonucunda testler yeniden tekrarlanmıştır. Ancak tekrarlanan deneyler sonrasında sonuçların ilk deney turundan da oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 5.3'te sunulan sonuçlar her iki deney sonuçlarının ortalaması alınarak sunulmuştur. Ek olarak EGC karışımların dökümlerinin gerçekleştirilmesi esnasında da priz sürelerinin çok değişken olduğu belirtilmelidir. Özellikle alkali aktivatör olarak sodyum silikatın kullanıldığı karışımlarda kalıplara döküldükten sonra numunelerin üst yüzeylerinde ince bir tabakanın çok hızlı priz aldığı gözlemlenmiştir. Bu durum priz sürelerinin tutarlı bir şekilde belirlenebilmesini zorlaştırmıştır. Yukarıda verilen bilgiler ışığında vicat aletinin jeopolimer bağlayıcı malzemelerin priz başlama ve sona erme sürelerinin belirlenmesinde uygun bir test yöntemi olmadığı belirlenmiştir. Ancak konuyla ilgili daha fazla çalışma gerçekleştirilerek modifiye edilmiş vicat aleti ve yeni bir test yöntemi kullanılabilir.

5.3.5. Mikroskopik Gözlem ve Analiz

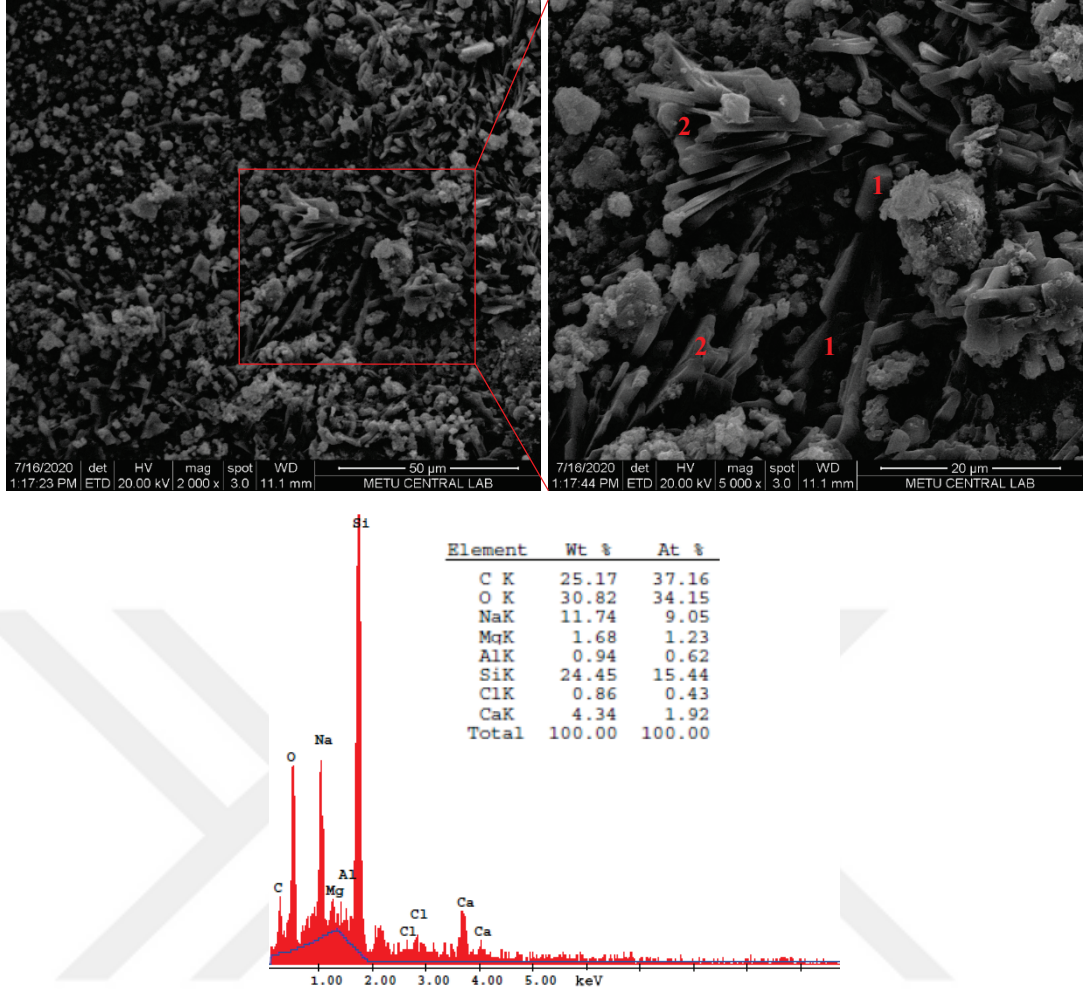
SEM Analizi

EGC karışımlarının mikroyapılarının incelenmesi, oluşan reaksiyon ürünlerinin belirlenebilmesi ve element analizlerinin yapılması adına 90 günlük ortam kürü sonrasında EGC karışımlar üzerinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir. EGC karışımlarının matris-lif etkileşiminin belirlenmesi adına S2 kodlu EGC matrisi içerisinde bulunan PE ve NM lifinin SEM altındaki görüntüsü Şekil 5.10'da sunulmuştur.



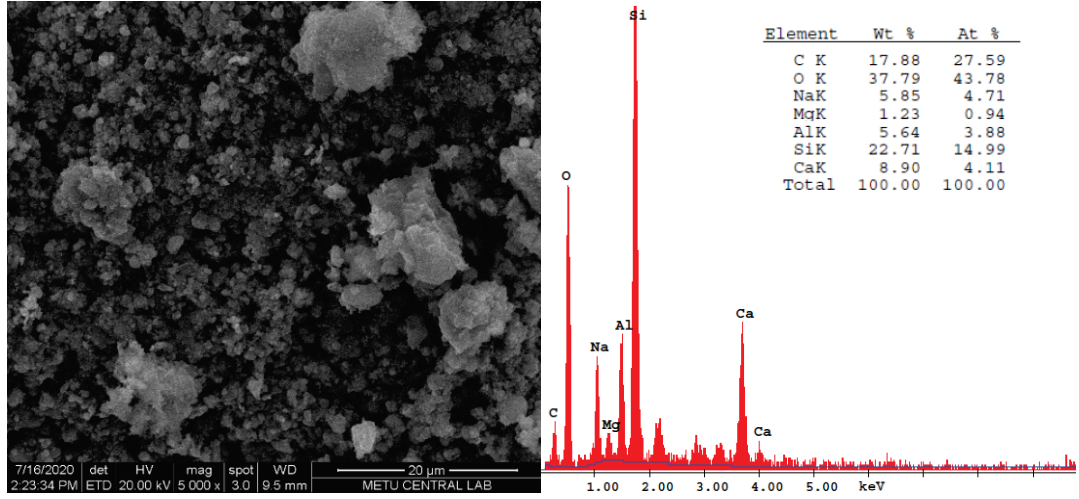
Şekil 5.10. (a) PE ve (b) NM lifinin EGC matris içerisinde SEM altındaki görüntüsü

Şekil 5.10.a incelendiği zaman PE lifinin üzerine yapışan herhangi bir matris parçasının bulunmadığı görülmektedir. Ayrıca kırılmadan sonra lifin çok fazla zarar görmediği de belirlenmiştir. Bu durum PE lifinin jeopolimer matrisle mekanik olarak bağlandığının ve önce matris içerisinden çekilerek ve daha sonra koparak başarısızlık gösterdiğinin bir göstergesidir. Ancak Şekil 5.10.b incelendiği zaman NM lifinin üzerine yapışmış matris parçalarının bulunduğu ve lifin hasar gördüğü görülmektedir. Bu durumun NM lifinin hidrofilik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca her iki lifin de EGC karışımlarının yüksek alkali içeriğine rağmen zarar görmediği belirlenmiştir.



Şekil 5.11. S2 kodlu EGC matrisinde oluşan N-A-S-(H) jeli ve zeolitik yapıları

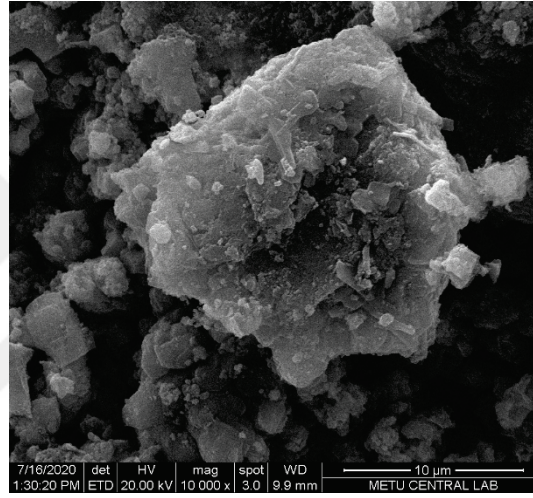
Şekil 5.11’de alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S2 kodlu EGC karışımın SEM/EDX analizi görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde sodyum silikat alüminat hidrat (N-A-S-(H)) oluşumu dikdörtgen yüzlü (1) ve prizmatik yapılar (2) şeklinde görülmektedir (Bădănoiu ve diğerleri, 2015). Ayrıca EDX spektrumlarında, EGC karışımlar arasında en düşük kalsiyum içeriğine sahip S2 kodlu karışımın içinde silika ve alümina türlerinin çözünmesi sonucu oluşan jeopolimer jelin reaksiyon ürünlerinde kalsiyum elementlerinin miktarının önemsiz olduğu ve oluşan yapının esas olarak N-A-S-(H) olduğu görülebilir. N-A-S-(H) jeli, alkali ile aktive edilen malzemelerin dayanım gelişimine karşı sorumlu olan ana reaksiyon ürünüdür (Garcia-Lodeiro ve diğerleri, 2011).



Şekil 5.12. S3 kodlu EGC matrisinde oluşan C-A-S-H ve N-A-S-(H) jelleri

Şekil 5.12’de alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu EGC karışımın SEM/EDX analizi görülmektedir. Jeopolimer kompozitlere farklı katkı maddelerinin ilave edilmesinin ve farklı alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanılmasının, bağlayıcı jellerin oluşumunu ve mikroyapıyı önemli ölçüde etkilediği açıktır. Ortam şartlarında kürlenmiş düşük kalsiyum içeriğine sahip S2 kodlu EGC karışım (Şekil 5.11) ve nispeten yüksek kalsiyum içeriğine sahip S3 EGC karışımının (Şekil 5.12) matrisleri mikroyapısal olarak karşılaştırıldığında, Şekil 5.11’deki SEM görüntüleri incelendiğinde, İYA esaslı malzemelerin alkali aktivatör çözeltisi içinde çözündüğü ve az sayıda reaksiyona girmemiş veya kısmen reaksiyona girmiş taneciklerin bulunduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.11’deki EDX analizi sonuçları değerlendirildiğinde, düşük kalsiyum içeren S2 kodlu EGC karışımında silika ve alümina türlerinin çözünmesi ile oluşan jeopolimer jelin reaksiyon ürünlerinde kalsiyum elementlerinin oldukça düşük olduğu ve esas olarak sodyum alüminat silikat hidrat jel (N-A-S-(H)) oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte nispeten yüksek kalsiyum içeriğine sahip S3 kodlu EGC karışımın Şekil 5.12’deki EDX analizi sonuçları değerlendirildiğinde, reaksiyon ürünlerindeki silisyum, alüminyum ve oksijen ile birlikte hem sodyum hem de kalsiyum türleri için nispeten daha yüksek bir yapının oluşumunu göstermektedir. Bu durum, sisteme kalsiyum hidroksit ve cüruf ilave edilmesiyle alkali ortamda Ca, Si ve Al türlerinin çözünmesi

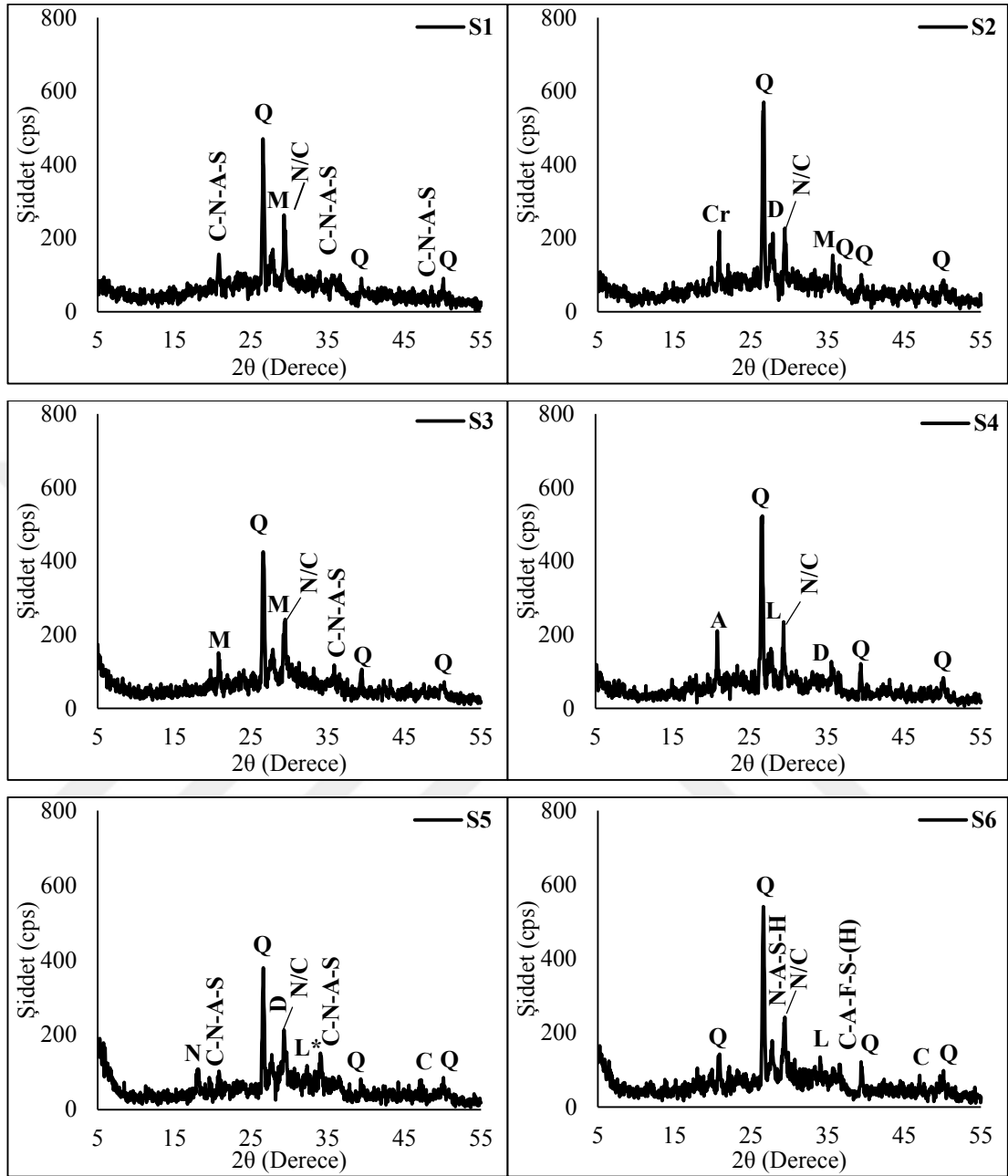
ve sistemdeki diğer çözünmüş İYA bazlı taneler ile polimerizasyon reaksiyonları sonucunda, N-A-S-H jelinin yanında kalsiyum alüminat silikat hidrat (C-A-S-H) olmak üzere ikincil bir jel oluşumu ile açıklanırken daha kompakt ve yoğun bir matris elde edilmesine neden olmuştur. Oluşan reaksiyon ürünlerinin hem İYA bazlı malzemelerin (N-A-S-(H)) hem de cürufun (C-A-S-H) alkali aktivasyonu ile oluştuğu görülmektedir. Böylece jeopolimerlerin mekanik özelliklerini geliştiren modifiye edilmiş bir bağlayıcı sayesinde yüksek basınç dayanımları elde edilebilmiştir (Khan ve diğerleri, 2016).



Şekil 5.13. Reaksiyona girmemiş tanecik

Daha önce belirtildiği gibi matris içerisinde reaksiyona girmemiş tanelerin olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.13'te ise levha şekli itibarıyla tuğla atıklarından geldiği düşünülen, kil kökenli olması muhtemel, tam olarak çözünmemiş bir tanecik görülmektedir. Bu taneciğin etrafında oluşan reaksiyon ürünleri az miktarda da olsa jeopolimerizasyon reaksiyonlarının gerçekleştiğini göstermektedir.

XRD Analizi



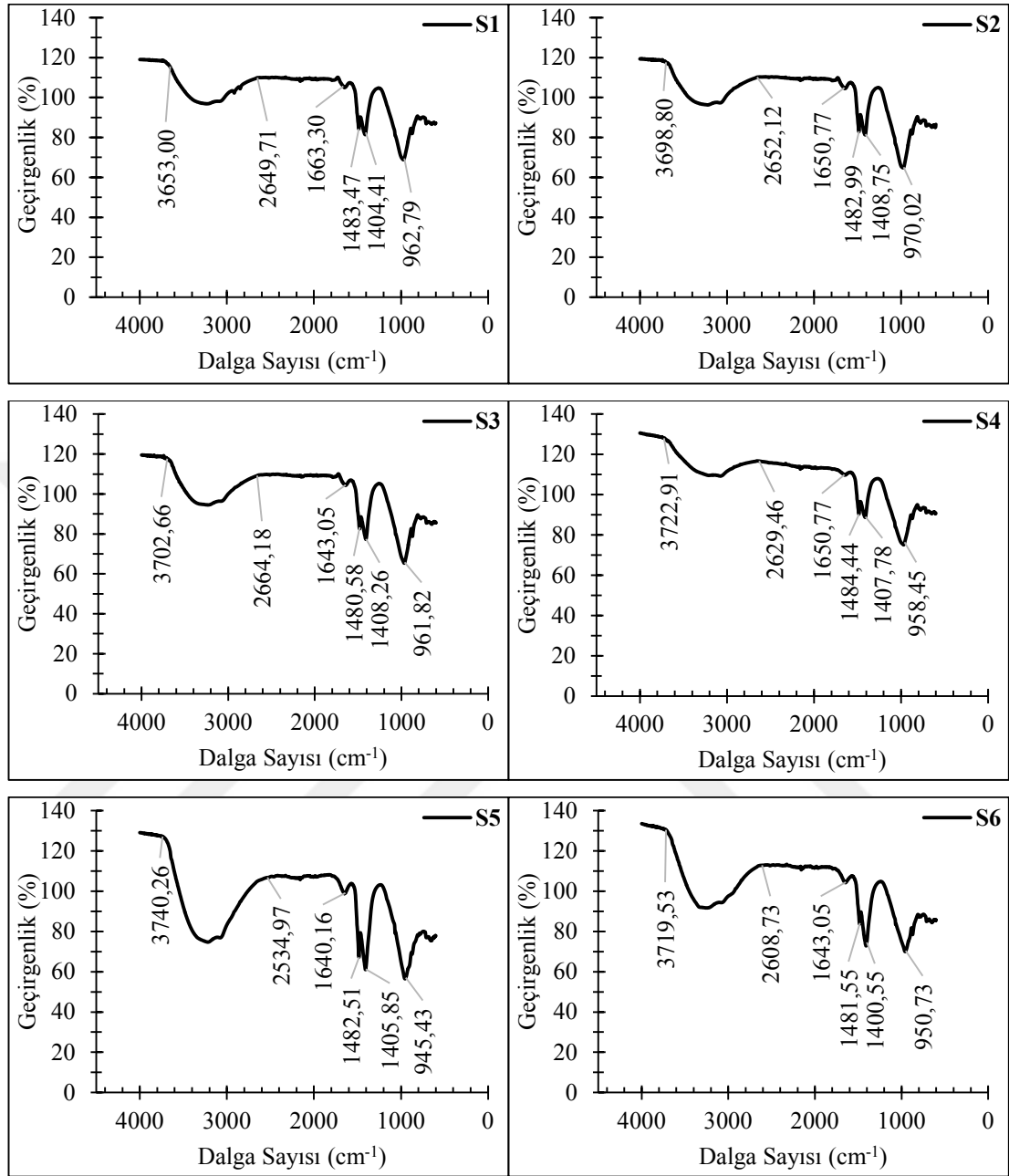
Şekil 5.14. EGC karışımların 90 günlük XRD sonuçları (A: Andradite, C: Calcite, C-A-F-S-(H): C-A-F-S-(H), C-N-A-S: Disodium calcium silicate, Cr: Carnegieite, D: Diopside, L: Lisetite, L*: Lime (Calcium oxide), M: Muscovite, N: Nepheline, N-A-S-H: N-A-S-(H), Q: Quartz)

EGC karışımlarının kristal yapılarının ve oluşan reaksiyon ürünlerinin belirlenebilmesi adına 90 günlük ortam kürü sonrasında tüm karışımlar üzerinde XRD analizi gerçekleştirilmiştir. EGC karışımlarının XRD analizi sonuçları Şekil 5.14'te sunulmuştur.

XRD analizi sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Tüm EGC karışımlarının belirli 2θ değerleri arasında amorf yapıyı gösteren bir kambura sahip olduğu ve bu kamburun üzerinde kristal yapıları gösteren mineral piklerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç jeopolimer matrisin yarı-kristal bir yapıda olduğunu göstermektedir. (Mahmoodi ve diğerleri, 2020).

Bölüm 3.1.1.5'te ham madde olarak kullanılan bağlayıcı toz malzemelerin XRD analizleri verilmiştir. Bağlayıcı toz malzemelerin XRD analizleri ile jeopolimer matrisinin XRD analiz sonuçları karşılaştırıldığı zaman bağlayıcı toz malzemelerdeki quartz piklerinin yüksekliklerinin azalması, dialuminium silicate oxide, periclase gibi alüminosilikat kaynağı olan minerallerin tamamen yok olması kullanılan toz bağlayıcı malzemelerin alüminosilikat çözünürlüklerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Oluşan yeni mineraller jeopolimerizasyon sonucu oluşan jelin kristal kısımlarına işaret etmektedir. Ayrıca cüruf haricindeki bağlayıcı toz malzemelerde merkezi $25\ 2\theta$ değerinde var olan kamburların jeopolimerizasyondan sonra 2θ ekseninde ileri doğru kaydığı belirlenmiş olup bu kayma oluşan jeldeki amorf kısmı göstermektedir (Zhang ve diğerleri 2012; Hajimohammadi ve diğerleri, 2011). S1, S3 ve S5 numunelerinin cüruf içeriği sayesinde C-N-A-S jeli oluşumu gözlenmiş olup bu yapı içerisinde kalsiyum ve sodyum miktarları sabit olmamaktadır. Muscovite sodyum hidroksit ile aktive edilmiş harman tuğlalarda yer alan bir mineral olup (Robayo-Salazar ve diğerleri, 2017a), diopside ise alkali ile aktif edilen inşaat yıkıntı atıklarında bulunan bir mineraldir (Allahverdi ve Kani, 2013). Bazı numuneler calcite piki içermekte olup bu pikler beton atığındaki calcite pikleri ile örtüşmektedir. Ayrıca matristen alınan numunelerin XRD analizinde az miktarda karbonatlaşma gözlenmiş olup cüruf içeren jeopolimerlerde karbonatlaşma doğrudan jel üzerinde gerçekleşmektedir (Puertas ve diğerleri, 2006). S5 ve S6 numunelerinde yer alan lime minerali (CaO) kalsiyum hidroksitin sodyum silikat yokluğunda serbest olarak kaldığını göstermektedir.

FTIR Analizi



Şekil 5.15. EGC karışımlarının 90 günlük FTIR analizi sonuçları

EGC karışımlarının molekül yapısı ve bağlarının belirlenebilmesi adına 90 günlük ortam kürü sonrasında tüm karışımlar üzerinde FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. EGC karışımlarının FTIR analizi sonuçları Şekil 5.15'te sunulmuştur. Farklı alkali aktivatör kombinasyonlarının bağlayıcıların molekül yapısı ve bağları üzerindeki etkisi FTIR analizi sonuçlarında oluşan pik değerleri sayesinde belirlenmiştir.

FTIR analizi sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tüm EGC karışımlarda $500-1000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasında birçok pikin olduğu görülmektedir. Literatürde genel olarak Si-O-Si quartz fazları ile ilişkilendirilen yaklaşık 700 cm^{-1} dalga sayısı civarındaki piklerin, çalışma kapsamında üretilen 6 adet EGC karışımları için benzer sonuçlar içerdiği gözlemlenmektedir. Bu da üretilen karışımlar için kristal yapı olarak her birinin temelinde quartz kristali olduğunu kanıtlamaktadır. EGC karışımlarda yer alıp toz malzemelerde bulunmayan yaklaşık 870 cm^{-1} dalga sayısı civarındaki pikler yapıda CO_3^{2-} varlığını göstermektedir (González-García ve diğerleri, 2017). EGC karışımlarda yaklaşık $950-1000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasında kuvvetli bir pik görülmektedir. Bu pik Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini göstermektedir ve literatürde genel olarak Si-O ve Al-O bağları ile ilişkilendirilmiştir (Davidovits, 2015; Vafaei ve Allahverdi, 2017). Bu pikin varlığının jeopolimerizasyon sürecinin önemli bir kanıtı olduğu ve jeopolimerleşmenin gerçekleştiğinin göstergesi olduğu belirtilmektedir (Phair ve Van Deventer, 2002). Pikin şiddetindeki artış zincir uzunluğunun arttığını ve daha fazla alüminat silikat jel oluştuğunu göstermektedir (Bakharev, 2005). EGC karışımlarında görülen $1410-1484\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasındaki pikler, yüzeyde atmosferik karbonatlaşmanın sonucunda oluşan asimetrik O-C-O bağının gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır ve sodyum bikarbonat $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ varlığını göstermektedir (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005). EGC karışımlarda $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasındaki kambur bölgeler ve yaklaşık olarak 1650 cm^{-1} dalga sayısı civarında görülen pikler, sırasıyla O-H bağlarının gerilme titreşimleri ve fiziksel olarak bağlı sudaki O-H bağlarının eğilme titreşimi ile ilişkilidir. Bu da Si-OH yapılarındaki reaksiyona girmemiş hidroksil iyonlarının varlığını ortaya koymaktadır (Xu ve diğerleri, 2010).

S3 kodlu EGC karışımında $950-1000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasında daha büyük bir yoğunluk oluşması, alüminat silikat jelin daha fazla oranda oluştuğunu göstermektedir. Bu

durum EGC karışımların basınç dayanım sonuçları ile paralellik göstermektedir. Basınç dayanım sonuçları diğer EGC karışımlara göre nispeten düşük olan S5 ve S6 kodlu karışımların FTIR analizi sonuçları değerlendirildiğinde ise $950-1000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasında daha düşük yoğunluk ve daha az pik oluştuğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte S5 ve S6 kodlu karışımların FTIR analizi sonuçlarında $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasındaki kâmbur bölgeler ve yaklaşık olarak 1650 cm^{-1} dalga sayısı civarında görülen piklerin oldukça arttığı ve daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu durum reaksiyona girmemiş hidroksil iyonlarının varlığını göstermektedir. Bunun sonucunda S5 ve S6 kodlu EGC karışımları diğer karışımlara göre nispeten düşük basınç dayanım sonuçları gösterdiği düşünülmektedir.



6. JEOPOLİMER BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME PERFORMANSI

6.1. Giriş

Kendiliğinden iyileşme dışarıdan herhangi bir harici müdahale olmaksızın hasarların kendi kendini onarması ve iyileştirmesi olarak tanımlanmaktadır. Beton gibi çimento bağlayıcılı malzemelerdeki çatlakların kendiliğinden iyileşmesi, çatlak genişliklerinin azalmasını sağlayarak betonun ve dolayısıyla yapının hizmet ömrünü arttırması beklenmektedir (Li ve Herbert, 2012). Ek olarak kendiliğinden iyileşme, özellikle sürekli olarak tekrarlanan bakım onarım ve/veya yenileme işlemlerinin oldukça zor olduğu büyük ölçekli yapılar için bakım onarım ve/veya yenileme maliyetlerini önemli ölçüde azaltabileceği düşünülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi ECC’de aşırı yüklemeler altında dahi kendinden kontrollü çatlak genişliği genellikle 100 µm’den daha az genişliğe sahiptir ve bu özelliği kendiliğinden iyileşme performansı açısından onu benzersiz bir malzeme yapmaktadır. Dar çatlak açıklığı kendiliğinden iyileşme ürünlerinin çatlak içerisinde oluşması ve çatlak tamamen kapatması için faydalıdır. Bununla birlikte daha geniş çatlak açıklığı kendiliğinden iyileşme ürünlerinin çatlak içerisinde oluşması için gereken malzemelerin çatlak içerisine daha kolay girebilmesini sağlayacaktır. Fakat çimento bağlayıcılı malzemeler her ne kadar kendiliğinden iyileşme işlevselliğine sahip olsa da tıpkı insan vücudunun ciddi yaraları kendi başlarına tedavi edememesi gibi çimento bağlayıcılı malzemelerin de büyük çatlakları tamamen kendiliğinden iyileştirmesi mümkün olmamaktadır. Bu kapsamda tolere edilebilir çatlak genişlikleri belirlenirken çatlakların kendiliğinden iyileşmesi dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmalarda çimento bağlayıcılı malzemeler için bir çatlakta kendiliğinden iyileşmenin tamamen gerçekleşebilmesi için sırasıyla 5 ila 10 µm, 100 µm, 200 µm, 205 µm ve 300 µm olarak maksimum çatlak genişliklerini önermişlerdir (Jacobsen ve diğerleri, 1995; Reinhardt ve Jooss, 2003; Edvardsen, 1999; Aldea ve diğerleri, 2000; Clear, 1985). Bu nedenle kontrollü çatlak açıklığı çimento bağlayıcılı malzemelerin kendiliğinden iyileşme potansiyelinin oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Kendiliğinden iyileşme, çimento bağlayıcılı malzemelerde kapsamlı bir şekilde incelenen bir alandır ancak jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde son zamanlarda büyüyen bir araştırma konusudur. Yukarıda verilen bilgiler ışığında jeopolimer bağlayıcı malzemelerde de kendinden kontrollü çatlak genişliği 100 µm'dan daha az açıklığa sahip olacak şekilde kontrol edilebilirse kendiliğinden iyileşme işlevselliği göstermesi mümkündür.

Jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin düşük çekme dayanımı ve çekme şekil değiştirme kapasitesi ile betonlara benzer şekilde gevrek (kırılgan) bir yapıya sahip oldukları bilinmektedir (Suwan ve diğerleri, 2016). ECC'de kendinden kontrollü çatlak genişliği matris-lif arayüz özellikleri optimize edilerek 100 µm'dan daha az genişliğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Tez çalışmaları kapsamında benzer yöntem jeopolimer bağlayıcılı malzemelere de uygulanabilmiştir. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyen, yüksek sünekliğe ve üstün kendiliğinden iyileşme performansına sahip bir tür lif donatılı sistem olan ECC ve jeopolimerin avantajları birleştirilerek yeni bir malzeme türü olan yüksek sünekliğe sahip EGC geliştirilmiştir. EGC nin geliştirilmesi jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde doğrudan iki etki göstermiştir:

- Jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin dayanımı, dayanıklılığı ve sünekliği büyük ölçüde iyileşmiştir,
- Kendiliğinden iyileşme performansı kabiliyeti geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı; kararlı durum çoklu çatlak oluşumu ve buna bağlı olarak yüksek süneklik gösteren EGC'nin mekanik performansının belirlenmesi, ardından üretilen EGC karışımlarının kendiliğinden iyileşme performansının taşıma özellikleri bakımından incelenmesidir. Bu kapsamda EGC tasarımı aşamasında en iyi performansı gösteren harç karışımları belirlenen lif tipi ve miktarları ile üretilerek EGC karışımları geliştirilmiştir. ECC'nin mekanik performansı basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme vb. testleri aracılığıyla birçok çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte hali hazırda EGC'nin mekanik performansının incelendiği çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Fakat İYA bazlı EGC malzemesinin mekanik performansının incelendiği herhangi bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Tez çalışmaları kapsamında literatürdeki bu açığın giderilmesi

adına bu kapsamda ilk defa bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Üretilen EGC karışımların detaylı mekanik performansının belirlenmesi adına numuneler Bölüm 3'te detayları belirtilen basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca literatürde EGC'nin kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından incelendiği herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Tez çalışmaları kapsamında literatürdeki bu açığın giderilmesi adına da ilk defa bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından detaylı incelenmesi amacıyla detayları Bölüm 3'te sunulan kılcal su emme, elektriksel empedans, hızlı klorür iyonu geçirimsizliği ve su emme testleri silindir numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üretilen silindir numunelere önce mikro çatlaklar oluşturmak için yarmada çekme yüklemesi altında belirli bir deformasyon seviyesine ulaşıncaya kadar önyüklemeye uygulanmıştır. Daha sonra sağlam ve önyüklemeye uygulanan numuneler deney süresince ıslanma-kuruma (I-K) çevresel kür koşuluna maruz bırakılmıştır. Kendiliğinden iyileşme nedeniyle taşınma özelliklerindeki değişim, sağlam ve önyüklemeye uygulanan numuneler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca ıslanma-kuruma döngüsü sırasında kendiliğinden iyileşme ürünlerinin oluşumunu gözlemlemek ve çatlak özelliklerinin incelenmesi için deneyler gerçekleştirilmeden önce numuneler alınarak 125X büyütme kapasitesine sahip dijital kamera entegreli bir optik mikroskop ile çatlaklar fotoğraf olarak kaydedilerek gerekli değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Ek olarak kendiliğinden iyileşme ürünlerinin mikroyapısı XRD, SEM/EDX analizleri kullanılarak gözlemlenmiştir.

6.2. Deneysel Çalışmalar

EGC karışımlarının Bölüm 4'te deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek tasarlanması ve Bölüm 5'te temel mekanik özelliklerin belirlenmesinin ardından kendiliğinden iyileşme performansını belirlemek için deneysel bir program oluşturulmuştur. Deneysel programda altı farklı EGC karışımı kullanılmıştır. EGC karışımlarının hazırlanması, kür koşulları ve uygulanan test prosedürleri Bölüm 3.2'de daha önce anlatıldığı için bu kısımda detaylı bilgi verilmemiştir. Altı farklı EGC karışımının karışım oranları Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Nihai EGC karışımların karışım oranları

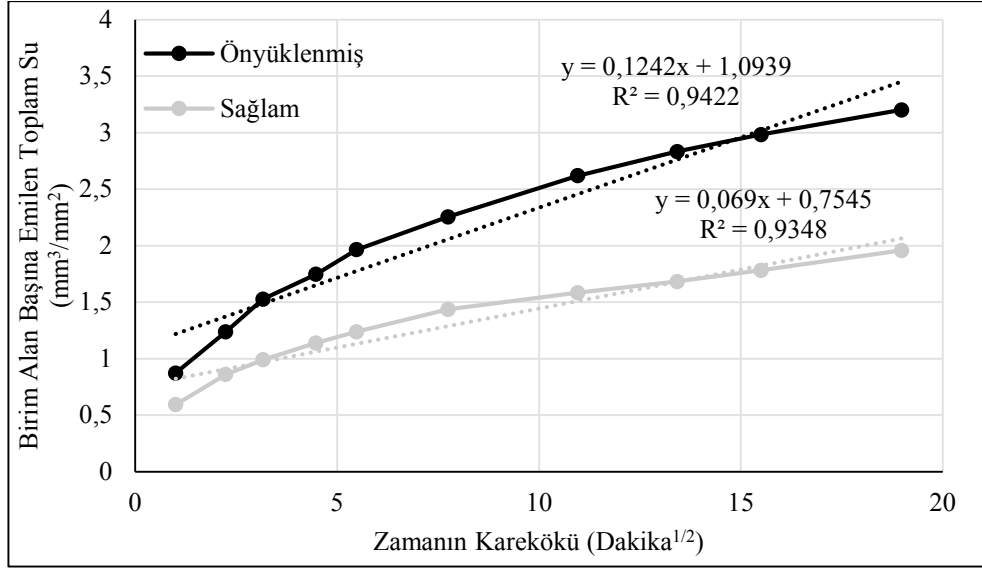
Kod	Çatı kiremiti	Harman tuğla	Delikli tuğla	Cam tozu	Beton tozu	Cüruf	Kum	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Ca(OH) ₂	Su	NM	PE
S1	262,0	157,2	209,6	104,8	104,8	209,6	366,8	109,4	218,7	-	224,6	8,55	12,13
S2	305,4	183,2	244,3	104,7	209,4	-	366,5	109,3	218,5	-	224,4	8,55	12,13
S3	257,4	154,5	205,9	103,0	103,0	205,9	360,4	107,4	214,9	38,1	220,7	8,55	12,13
S4	300,1	180,1	240,1	102,9	205,8	-	360,1	107,4	214,7	38,1	220,6	8,55	12,13
S5	242,3	145,4	193,9	96,9	96,9	193,8	339,2	168,6	-	107,6	339,2	8,55	12,13
S6	282,5	169,5	226,0	96,8	193,7	-	339,0	168,4	-	107,5	339,0	8,55	12,13

Tüm malzemelerin birimi kg/m³ cinsinden verilmiştir.

6.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

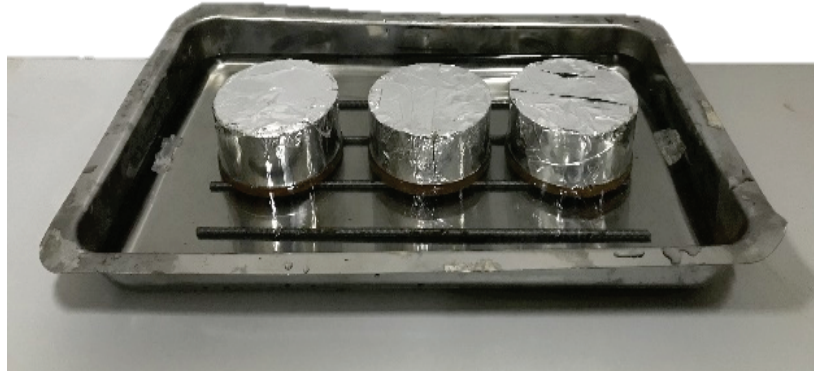
6.3.1. Kılcal Su Emme

Saha şartlarında oldukça yaygın olan çevresel koşullarda (kuru ve/veya kısmen kuru) baskın taşınım mekanizması çoğunlukla matriste bulunan boş kılcal boşlukların oluşturduğu kılcal emme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Martys ve Ferraris, 1997). Bu sebeple saha şartlarında kendiliğinden iyileşmenin daha gerçekçi bir şekilde test edilebilmesi için kendiliğinden iyileşme performansının kılcal geçirimsizlik ölçümleri aracılığıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu eksikliğin giderilebilmesi için tez çalışmalarında sağlam ve önyüklenmiş EGC numunelerinin belirli çevresel koşullara maruz bırakılmadan önce ve sonraki kılcal geçirimsizlik ölçümleri kayıt altına alınarak kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Kılcal su emme deneyi (KSE) ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.2.4.5'te verilmiştir. Zamanın karekökünün bir fonksiyonu olarak kümülatif su emiliminin (birim alanda emilen suyun ağırlıkça miktarı) tipik bir grafiği Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Zamanın karekökünün bir fonksiyonu olarak kılcal su emiliminin tipik grafiği

Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen kılcal su emme deney düzeneği Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar ve ilave I-K kürü sonrasında kılcal su geçirimliliği değerleri Çizelge 6.2’de sunulmuştur.



Şekil 6.2. Kılcal su emme deneyi

Sağlam numunelerden elde edilen değerler incelendiğinde, 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında sonuçların önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Bu değişim sürekli düşüş şeklinde olmamıştır. Örneğin S3 kodlu karışımın 7 günlük ortalama kılcal su geçirimsizliği 0,1326 mm/dakika^{1/2} iken bu değer 10 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında artarak 0,1729 mm/dakika^{1/2} seviyelerine kadar ilerlediği görülmüştür. 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında ise numuneler için sırasıyla düşerek 0,1577, 0,1292 ve 0,0910 mm/dakika^{1/2} seviyelerine gerilediği görülmüştür. Sonuçlardaki değişimler her ne kadar karışım türüne göre farklılık gösterse de genel davranış kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesinden bağımsız olarak tüm karışımlar için benzer olmuştur. Sağlam EGC numunelerinin I-K döngülerine maruz kalmalarının ardından sergilemiş oldukları değişken kılcal su geçirimsizliği değerlerindeki değişimler farklı nedenlerle ilişkilendirilebilir. İlk olarak erken yaşlarda jeopolimerizasyon reaksiyonlarının tam olarak gerçekleşmemesi ortamda serbest olarak bulunan yoğun sodyum iyonu (Na⁺) varlığına neden olmaktadır. Bu nedenle kılcal su emme deneyinde erken yaşlarda çatlaklar sodyum bazlı çiçeklenmenin etkisiyle deney esnasında kapanabilmektedir. Bununla birlikte ilerleyen yaşlarda daha da artan kılcal geçirimsizlik değerleri artan yaşla birlikte azalan çiçeklenme miktarıyla ilişkilendirilmiştir. Daha sonra ilerleyen yaşlarda azalan kılcal geçirimsizlik değerleri ise zamanla kalsiyum alüminat silikat hidrat (C-A-S-H) ve sodyum alüminat silikat hidrat (N-A-S(H)) ürünlerinin oluşumu sayesinde daha yoğun bir mikroyapının ve bağlantısız bir boşluk sisteminin oluşmasına katkı sağlayan jeopolimerizasyonun devamlılığı ile ilişkilendirilmektedir. Sağlam EGC karışımlarının kılcal geçirimsizlik sonuçlarında dikkat çeken bir nokta da başlangıç kürünün ardından S5 kodlu numunelerinden elde edilen düşük kılcal geçirimsizlik sonuçlarının daha önce belirtildiği gibi kalsiyum hidroksitin özellikle erken yaşlarda daha yoğun bir mikroyapı oluşturma üzerindeki etkinliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte ileri yaşlarda da S5 kodlu numunelerden elde edilen düşük kılcal geçirimsizlik sonuçları kalsiyum hidroksitin hem erken yaşlarda hem de ilerleyen yaşlarda diğer EGC karışımlarına göre kılcal su emme performansının daha iyi olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında en düşük ortalama değerlerin sırasıyla 0,0331 0,0628, 0,0826, 0,0763 0,0747 mm/dakika^{1/2} ile alkali

aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışımından elde edilmiş olmasıdır. Basınç dayanım sonuçlarında en iyi performansa sahip karışımlar alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S3 ve S4 kodlu EGC karışımlardan elde edilmiştir. Diğer karışımlara göre nispeten daha düşük basınç dayanım sonuçlarına sahip karışımlar ise alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S5 ve S6 kodlu karışımlardır. Bu bağlamda sağlam numuneler üzerinden elde edilen kılcal su geçirimliliği sonuçları basınç dayanım sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde kılcal geçirimlilik değerlerinde en iyi performansa sahip karışımın kısmen düşük basınç dayanımına sahip S5 kodlu karışımından elde edilmesi kılcal geçirimliliğin dayanımdan daha çok kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Bu durum sodyum silikatın dayanım üzerine etkilerinin baskın olduğunu gösterirken kalsiyum hidroksitin çok daha yoğun bir mikroyapının oluşmasına olanak sağlamasıyla ilişkilendirilebilir. Ek olarak sodyum silikat içeren karışımların diğer karışımlara kıyasla çok daha hızlı priz almaları düzensiz bir yapı oluşma ihtimalini akla getirmiş bu durumun her ne kadar basınç mukavemetinde bir azalmaya yol açmasa da kılcal geçirimlilik sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir. Sağlam numuneler için test sonuçları dikkate alındığında mekanik özelliklerde sabit bir artış ve geçirimlilik özelliklerinin değişken olduğu görülebilir. Bu nedenle önyüklenmiş numunelerin özelliklerinin yaşa göre karşılaştırılması, jeopolimerizasyon reaksiyonları hasarsız örneklerde bile devam ettiği için herhangi bir kendiliğinden iyileşmeye işaret etmeyecektir. Bu nedenle belirli bir yaşta önyüklenmiş ve sağlam numunelerin özelliklerinin sonuçları karşılaştırılarak kendiliğinden iyileşme performansı en iyi şekilde tespit edilebilecektir.

Çizelge 6.2. EGC numunelerinin kılcal su emme değerleri

Kod	Numune Tipi	Kılcal Su Emme (mm/dakika ^{1/2})				
		7	7+10	7+30	7+60	7+90
S1	Önyüklenmiş	0,0958	0,1148	0,1418	0,1362	0,1282
		0,0852	0,1056	0,1272	0,1223	0,1133
		0,1078	0,1227	0,1467	0,1423	0,1321
	Sağlam	0,0613	0,0839	0,0889	0,0934	0,0891
		0,0658	0,0870	0,0920	0,0954	0,0922
		0,0657	0,0810	0,0942	0,0954	0,0899
S2	Önyüklenmiş	0,1959	0,3838	0,4544	0,3903	0,3788
		0,2139	0,3941	0,4682	0,4120	0,4090
		0,1950	0,3808	0,4426	0,3575	0,3373
	Sağlam	0,0968	0,4047	0,4495	0,3392	0,3267
		0,0961	0,3778	0,4554	0,3484	0,3332
		0,1165	0,4060	0,4759	0,3301	0,3140
S3	Önyüklenmiş	0,1493	0,1759	0,1706	0,1590	0,1409
		0,1614	0,1862	0,1781	0,1640	0,1488
		0,1696	0,2020	0,1963	0,1780	0,1583
	Sağlam	0,1227	0,1662	0,1474	0,1238	0,0803
		0,1317	0,1705	0,1563	0,1278	0,0946
		0,1433	0,1821	0,1693	0,1360	0,0980
S4	Önyüklenmiş	0,1747	0,2671	0,3421	0,3080	0,2814
		0,1727	0,2707	0,3554	0,3366	0,2944
		0,1339	0,2218	0,3011	0,2692	0,2456
	Sağlam	0,1307	0,2722	0,3633	0,3104	0,2584
		0,0923	0,2710	0,3428	0,3206	0,2751
		0,1070	0,2487	0,3140	0,2789	0,2630
S5	Önyüklenmiş	0,0950	0,0952	0,1350	0,1357	0,1285
		0,0880	0,0905	0,1173	0,1198	0,1099
		0,0943	0,0973	0,1333	0,1399	0,1337
	Sağlam	0,0308	0,0642	0,0890	0,0823	0,0811
		0,0424	0,0709	0,0923	0,0846	0,0850
		0,0260	0,0532	0,0664	0,0619	0,0579
S6	Önyüklenmiş	0,1317	0,1399	0,1566	0,1268	0,1233
		0,1319	0,1554	0,1706	0,1360	0,1304
		0,1306	0,1544	0,1672	0,1212	0,1208
	Sağlam	0,0566	0,0743	0,1046	0,0681	0,0669
		0,0661	0,0847	0,1136	0,0749	0,0713
		0,0896	0,1037	0,1376	0,0891	0,0895

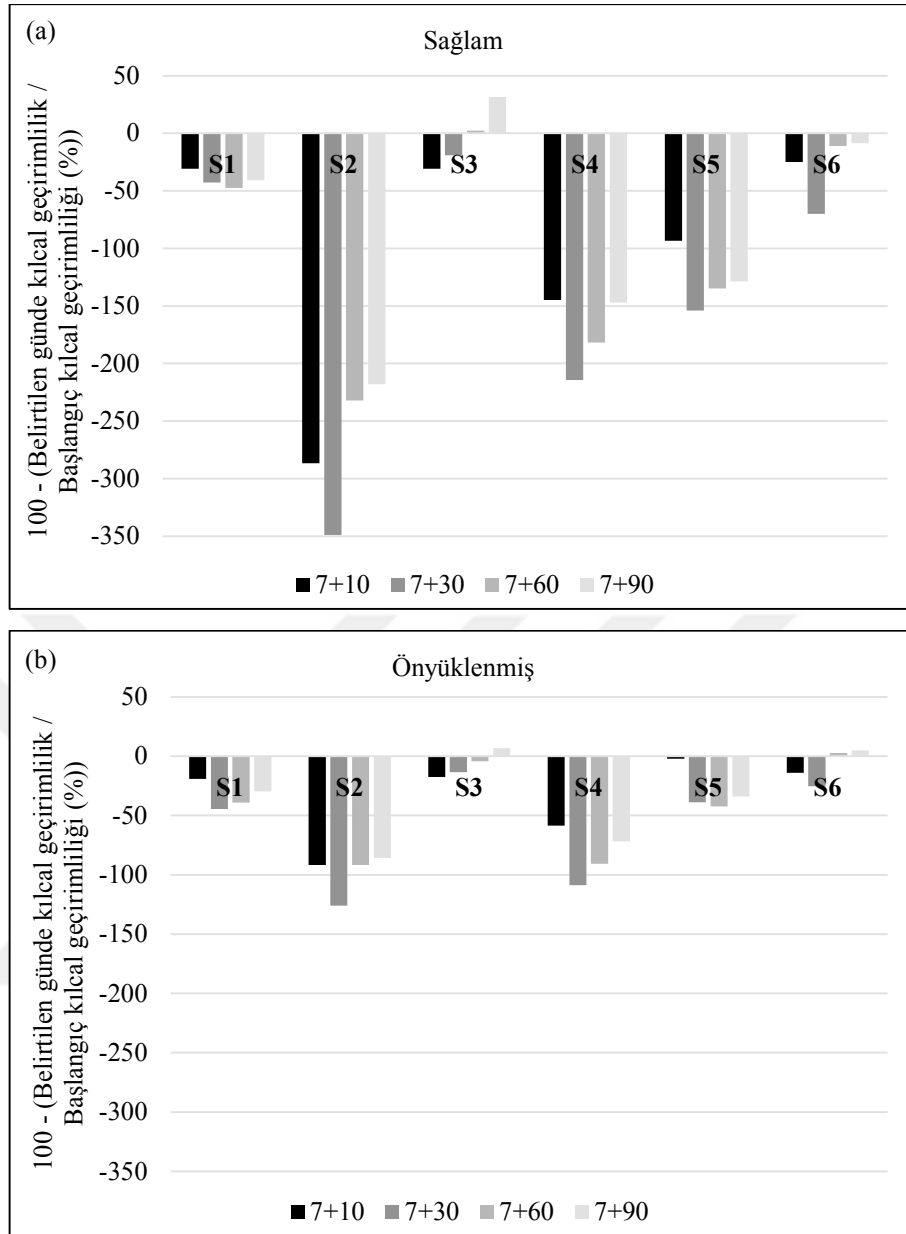
Önyüklemenin farklı EGC karışımlarının kılcal su geçirirnililiği sonuçları üzerindeki etkileri düşünöldüğünde, önyükleme sonucunda EGC karışımlarının kılcal su geçirirnililiği sonuçlarında alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesine bakılmaksızın üstel artışlar meydana gelmiştir (Çizelge 6.2). Bu durum oluşturulan çatlakların kılcal emme yoluyla suyun emilebilmesi için fazladan yol oluşturması sebebiyle beklenen bir sonuçtur. Ayrıca çatlak sayısındaki artışlar da kılcal su emme sonuçlarının artmasına sebep olabilmektedir. Örnek verilecek olursa daha az mikro çatlğa sahip numunelerin kılcal su geçirirnililik değeri, aynı yaştaki daha çok mikro çatlğa sahip numunelerden daha düşük olacaktır. Bu durum üretilen tüm karışımlar için geçerlidir ve önyüklenmiş EGC karışımlarında kılcal boşluklar ile mikro çatlakların çok kısa sürede doygun hala geldiğinin bir göstergesidir. Çatlak özellikleri her ne kadar farklılık gösterse de bu durum bütün karışımlar için benzer bulunmuştur.

Çatlak oluşumunun EGC karışımlarının kılcal su geçirirnililik sonuçları üzerindeki ortak etkisi düşünöldüğünde, daha yüksek basınç dayanımına sahip numunelerde çatlak oluşumunun sonuçlar üzerinde daha etkili olduğu düşünölebilir. Daha yüksek basınç dayanımına sahip numunelerin kılcal geçirirnililik sonuçlarında daha yüksek artışlar görülmesi, daha yüksek basınç dayanımına sahip numunelerde jeopolimer matris ve lifler arasındaki bağı artmasına ve liflerin tamamen kopmasıyla daha bölgesel çatlakların oluşmasına sebep olan yüksek matris kırılma tokluğuyla ilişkilendirilebilir. Ancak jeopolimer matris ve lifler arasındaki etkileşimin İYA bazlı EGC malzemelerde kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ile birlikte değıştiği ve bu değışimin basınç dayanımından bağımsız geliştiği Bölüm 5'te EGC'nin basınç ve eğilme performansının değeriendirildiği çalışmalarda belirtilmiştir. Diğer EGC karışımlara göre nispeten düşük basınç dayanımına sahip, alkali aktivatör sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığđı S5 ve S6 kodlu karışımların özellikle erken yaşlarda diğer EGC karışımlara göre eğilme dayanımı sonuçlarındaki farkın basınç dayanım sonuçlarındaki fark kadar belirgin olmadığđı belirlenmiştir. Bununla birlikte bu söz konusu karışımların erken yaşlarda sünekliğinin de diğer EGC karışımlardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. S1, S2, S3 ve S4 kodlu EGC karışımlarda önyükleme sonucunda sırasıyla ortalama %50, %95, %20 ve %45 oranları arasında kılcal geçirirnililik sonuçlarında artışlar görölmüştür. Ancak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun

kullanıldığı S5 ve S6 kodlu EGC karışımlarda kılcal geçirimsizlik sonuçlarında önyüklemeye sonucunda sırasıyla ortalama yaklaşık %180 ve %85 oranında yüksek artış görülmesi, söz konusu karışımların özellikle erken yaşlarda, jeopolimer matris ve lifler arasındaki bağın yüksek olması ve liflerin tamamen kopmasıyla daha bölgesel çatlakların oluşmasına sebep olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ancak çatlak boyu ve çatlak yolunun ne derece kıvrımlı olduğu da kılcal geçirimsizlik sonuçlarındaki değişimler üzerinde çatlak genişliği kadar öneme sahiptir ve göz ardı edilmemelidir. Uygulanan önyüklemeye sonucunda her ne kadar S5 numunelerinin kılcal geçirimsizlik değerlerinde önemli artışlar yaşansa da başlangıç kürleri ve 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonucunda S5 numunelerinin diğer karışımlardan daha düşük sonuç verdiği görülmektedir ve bu durum S5 kodlu karışımının suyun hareketine karşı sergilediği geçirimsizliğin bir göstergesidir.

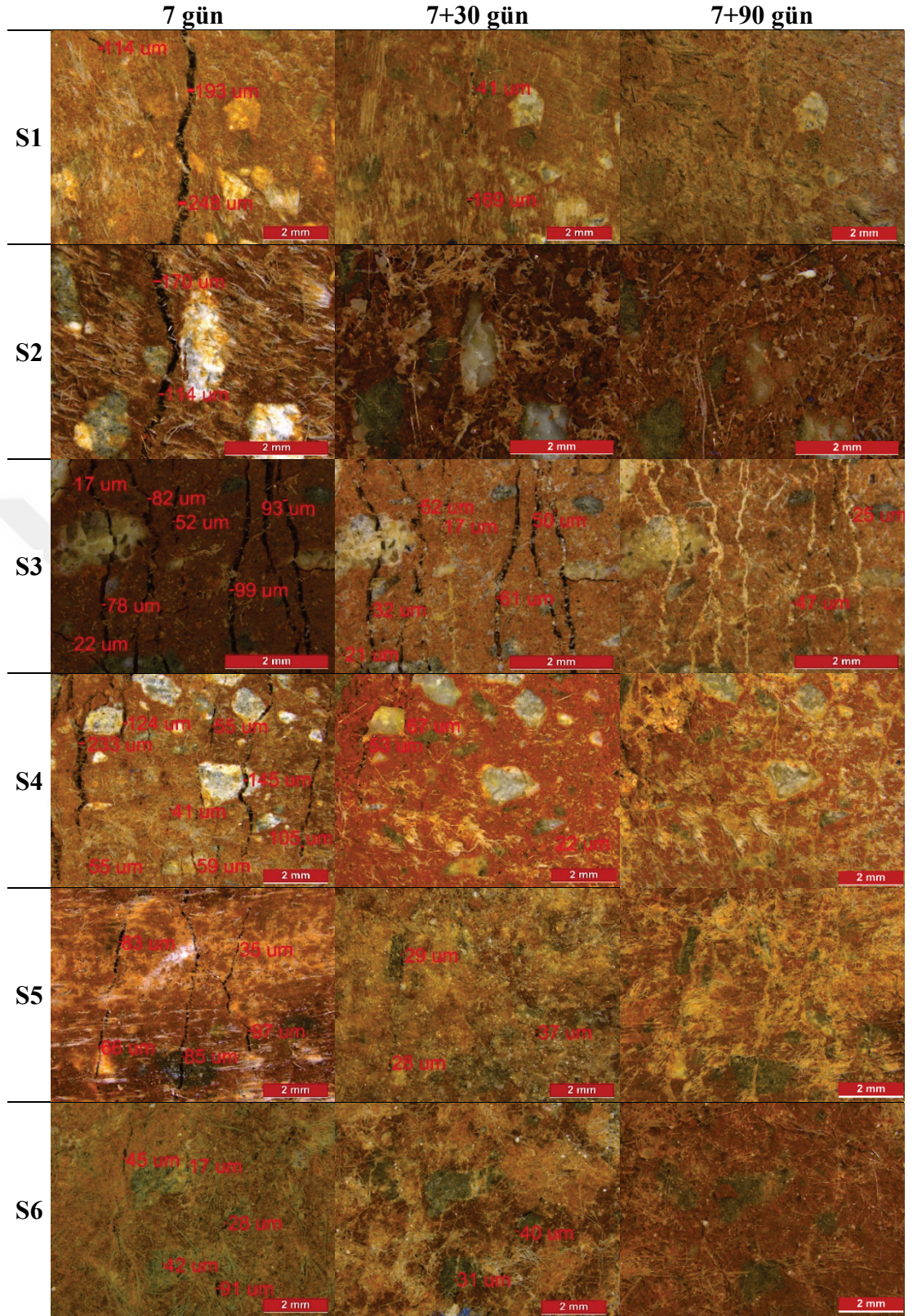
Genel olarak değerlendirildiğinde, 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında sonuçların önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu değişim sürekli düşüş ya da sürekli artış şeklinde olmamıştır. EGC'nin kılcal su emme testi kullanılarak kendiliğinden iyileşme performansı daha önce incelenmemiştir ancak ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansı kılcal su emme ölçümü kullanılarak başarılı bir şekilde değerlendirilmektedir. Alyousif ve diğerleri (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada kılcal su emme testini farklı kompozisyonlara sahip ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilebilmesi için kullanmıştır. ECC numunelerinin kılcal su geçirimsizliği sonuçlarında EGC numunelerine benzer şekilde önyüklemenin uygulanmasıyla üstel artışlar meydana gelmiştir. Ancak ECC numunelerde kılcal su geçirimsizliği sonuçlarının sağlam ve önyüklenmiş numunelerde artan numune yaşıyla birlikte genel itibarıyla sürekli olarak azaldığı belirlenmiştir. Bu azalmanın çimento bağlayıcılı malzemelerde erken yaşlarda çok daha hızlı olduğu görülmektedir ve bu durum hidrate olmamış taneciklerin erken yaşlarda miktarının fazla olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte farklı başlangıç kür sürelerinin kılcal geçirimsizlik sonuçları üzerinde oldukça etkili olduğu da belirtilmiştir. Ayrıca bu sonucun çatlaklı numunelere kıyasla çatlaksız sağlam numunelerde daha belirgin olduğu görülmüştür. Bu sonuç çimento bağlayıcılı malzemelerde önyüklenmiş numunelerde, en az devam eden hidratasyon reaksiyonları kadar kendiliğinden

iyileşme üzerinde etkili olan ayrı bir mekanizmanın (kalsiyum karbonat oluşumu) var olduğunu göstermektedir (Edvardsen, 1999). ECC numunelerde kılcal su geçirimliliği sonuçlarının sağlam ve önyüklenmiş numunelerde artan numune yaşıyla birlikte sürekli olarak azalması kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilebilmesinde kılcal su emme testinin başarılı bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Bununla birlikte tez çalışmaları kapsamında farklı kompozisyonlara sahip EGC karışımların kılcal su emme testleri esnasında erken yaşlarda çatlakların sodyum bazlı çiçeklenmenin etkisiyle deney esnasında kapandığı belirtilmelidir. Bu nedenle erken yaşlarda elde edilen kılcal su geçirimliliği sonuçları ilerleyen yaşlarda çiçeklenme miktarının azalmasıyla birlikte artmıştır. Daha sonra ilerleyen yaşlarda ise çiçeklenmenin etkisi kaybolmuş, çatlakların iyileşmesi, C-A-S-H ve N-A-S-(H) ürünlerinin oluşumu sayesinde daha yoğun bir mikroyapının ve bağlantısız bir boşluk sisteminin oluşmasıyla kılcal su geçirimliliği sonuçları azalmıştır. Bu durum EGC numunelerinin artan numune yaşıyla birlikte değişken sonuçların birbirleriyle kıyaslanmasını ve kendiliğinden iyileşme performansının gözlemlenmesini zorlaştırmıştır. Bu nedenle kendiliğinden iyileşme performansı önyüklenmiş ve sağlam numunelerin kılcal su geçirimliliği sonuçlarındaki artış ya da azalış oranları üzerinden değerlendirilebilecektir. Ek olarak %100 İYA bazlı EGC karışımlarda kılcal su geçirimliliği değerlerinin erken yaşlarda cüruf ikameli EGC karışımlara kıyasla genel olarak artan numune yaşıyla birlikte daha da arttığı belirlenmiştir. %100 İYA bazlı EGC karışımlarda çiçeklenmenin her yaş için daha fazla olduğu belirtilmelidir. Bu durumda kılcal su geçirimliliği arttıkça çiçeklenme miktarının da genel anlamda arttığı söylenebilir. Ayrıca erken yaşlardan itibaren EGC karışımların yüzeylerinde çiçeklenmeye bağlı olarak bir miktar aşınma ve küçük kılcal çatlakların oluştuğu ve bu durumun özellikle %100 İYA bazlı karışımlarda daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda çiçeklenmenin sadece görsel bir sorun olmadığı sonucu çıkarılabilir, çiçeklenme sorununun jeopolimer betonun geçirimliliğini etkileyerek dayanıklılık problemlerine yol açabildiği görülmektedir. Ayrıca bu çalışmada olduğu gibi kendiliğinden iyileşme performansının incelenmesini zorlaştırmıştır. Jeopolimerlerde çiçeklenme probleminin esas olarak serbest sodyum iyonlarından kaynaklandığı bilindiğinden, sodyum iyonlarını tamamen bağlamak için tasarım yapılmalıdır. Ek olarak çiçeklenmenin I-K döngüsüyle çok daha şiddetli oluştuğu da gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. Kendiliğinden iyileşmenin EGC karışımlarının kılcak geçirimsizlikleri üzerine etkisi (a) sağlam (b) önyüklenmiş

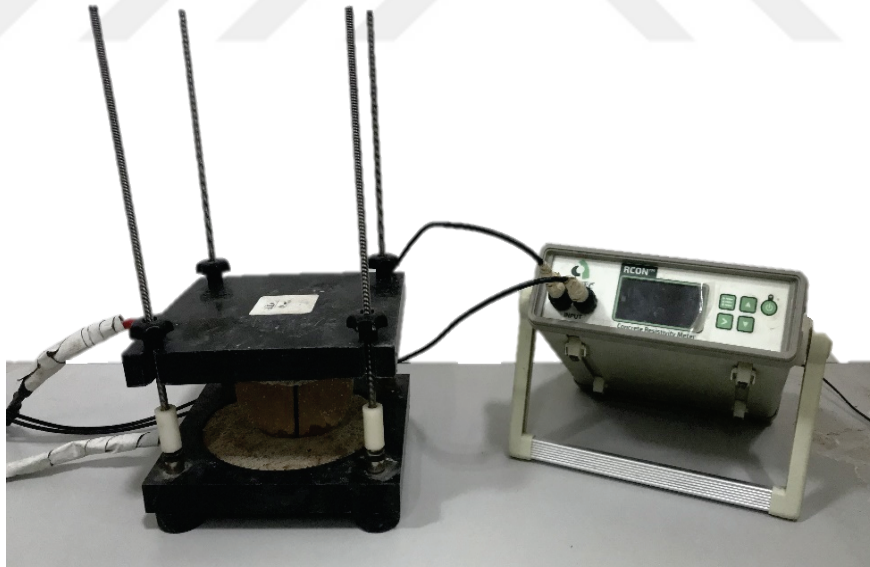
Genel olarak kendiliğinden iyileşme performansı değerlendirildiğinde, kılcal geçirimlilik sonuçları bakımından 90 günlük I-K döngüsü sonrasında kendiliğinden iyileşme çatlaklı numunelerde daha belirgin bir şekilde kendini göstermiştir. Değişken çatlak özellikleri, çatlak genişliği, çatlak yollarının kıvrımlılığı, çiçeklenme problemi ve kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesi gibi muhtemel sebeplerden ötürü her ne kadar bazı numunelerde bu durum etkinliğini yitirse de numunelerin üzerinde ilerleyen I-K döngüsünün sayısının artmasıyla kendiliğinden iyileşmenin görülebilme ihtimali de artmıştır. Çatlaklı numunelerde kendiliğinden iyileşme performansının daha belirgin olması, çatlaklar içerisine çözünmüş CO₂ bulunduran suyun daha kolay girebilmesi ve çatlakların yeni oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerine fazladan yer sağlamasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak çatlaklı numunelerdeki iyileşme her ne kadar daha belirgin bir şekilde kendini gösterse de çatlaklı numunelerin I-K döngüsünden sonraki kılcal geçirimlilik sonuçları çatlaksız numuneler kadar düşük bulunmamıştır. Bu durum, çalışmada üretilen tüm numuneler için geçerliliğini korumuştur. Örneğin, 90 günlük I-K kürü sonrasında, 7 günlük sağlam S5 kodlu EGC numunelerinin ortalama kılcal su geçirimliliği değerleri 0,0747 mm/dakika^{1/2} olurken aynı çevresel koşullar altında önyüklenmiş S5 kodlu EGC numunelerinin değerleri 0,1241 mm/dakika^{1/2} olmuştur.



Şekil 6.4. Kılcal su emme deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri

6.3.2. Elektriksel Empedans

Bölüm 3'te anlatıldığı üzere EGC karışımlarının elektriksel özelliklerinin kendiliğinden iyileşme performansının belirlenebilmesi için alternatif akım empedans tekniğini kullanan bir beton direnç ölçer cihazı kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda EGC numunelerinin faz açılarının her zaman 15 dereceden daha az olduğu tespit edilmiştir. Kosinüs 15° değerinin neredeyse 1'e ($=0,966$) eşit olması sebebiyle empedans değerleri direnç değerleri olarak da kabul edilebilir ve geometrik faktörler aracılığıyla öz direnç değerleriyle kolaylıkla ilişki kurulabilir. Öngörülen test konfigürasyonu sebebiyle, elektriksel akımının hareket ettiği alanın hesaplanması kolay olmadığından çalışma kapsamında sadece elektriksel empedans (EE) sonuçları sunulmuştur. Ancak tüm numuneler için aynı boyutlarda numuneler kullanıldığından farklı karışımlar arasında öz direnç sonuçları bakımından da ilişki kurulabilir. Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen elektriksel empedans deney düzeneği Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.5. Elektriksel empedans deneyi

Sağlam ve önyüklenmiş EGC numunelerinin elektriksel empedans sonuçları Çizelge 6.3'te sunulmuştur. Herhangi bir iyileşme süreci geçirmemiş numunelerin sonuçları sadece 7 günlük başlangıç kür süresinin ardından kaydedilen değerlerin dikkate alınması ile değerlendirilebilir. Çizelge 6.3'e göre elektriksel empedans sonuçları sağlam numuneler için 0,733 ile 11,4 k Ω aralığında değişirken önyüklenmiş numuneler için 1,17 ile 20,6 k Ω değerleri arasında değişmiştir. Farklı karışımlara ait olan bireysel EGC numunelerinden elde edilen elektriksel empedans sonuçları erken yaşlarda birbirine yakın bulunmuştur. Ancak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu sağlam numunelerden elde edilen elektriksel empedans sonuçları diğer EGC karışımlarına kıyasla erken yaşlarda bir miktar fazla bulunmuştur. Bununla birlikte daha önce gerçekleştirilen kılcal su geçirimsizliği sonuçlarında erken yaşlarda en iyi performans gösteren karışım alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışım olmuştur. Malzemenin elektriksel özdirenci üç temel parametre tarafından kontrol edilmektedir: porozite, boşluk çözeltisi ve boşluk ağının kıvrımlılığı. Bu parametreleri etkileyen herhangi bir şey malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu nedenle farklı alkali aktivatörlerin kullanılması karışımların farklı iyon çözeltileri ve alkali derişimleri farklı kompozisyonlara sahip EGC karışımların elektriksel empedans sonuçlarının birbirleriyle kıyaslanmasını zorlaştırmıştır.

Çizelge 6.3. EGC numunelerinin elektriksel empedans değerleri

Kod	Numune Tipi	Elektriksel Empedans (k Ω)				
		7	7+10	7+30	7+60	7+90
S1	Önyüklenmiş	4,7	5,76	8,11	11,6	12,3
		5,7	7,36	8,95	9,5	9,69
		6,8	8,9	10,5	11,3	12,4
	Sağlam	1,9	5,88	8,7	10,43	12,6
		2,4	6,23	7,55	9,17	11
		2,3	6,46	9,11	10,85	12,4
S2	Önyüklenmiş	1,53	6,98	6	3,03	4,73
		3,95	19,9	17	8,5	8,19
		1,17	13,3	10,8	4,7	5,36
	Sağlam	1,73	6,54	12,4	2,28	4,5
		0,73	12,3	25,5	4,19	6,69
		0,98	11,8	19,7	2,14	4,21
S3	Önyüklenmiş	12,7	24,6	42,5	60,8	64,5
		19,6	31,1	42,7	55,6	61,2
		20,6	29,5	38,8	59,8	65,8
	Sağlam	4,29	33	48,8	58,5	70,7
		10,5	32,9	39,8	48,4	58,1
		11,4	36,5	51,5	61,3	70,1
S4	Önyüklenmiş	16,8	31,3	42	29,5	27,3
		16,2	42	49,2	39,3	38
		15,8	58	96	48	34,6
	Sağlam	3,88	37,3	96,8	47,2	34,6
		2,8	44	83,6	60	38,9
		4,6	55	84,5	53	37,2
S5	Önyüklenmiş	4,37	7,57	72,6	77,3	103
		4,4	12,6	63,5	77	129
		4,38	14,9	69,1	78	148
	Sağlam	1,6	3,05	41,4	88,9	128
		1,63	4,27	42,5	64,4	84,4
		1,74	7,24	47,1	89,8	100
S6	Önyüklenmiş	9,21	21,6	29,8	26	25,2
		9,2	19,8	28	23,1	23,4
		12,43	31,2	34	26,3	34,7
	Sağlam	7,54	21,2	31,8	27,4	27,7
		5,23	18	24	25,4	22,9
		4,97	23,2	33,6	33,1	29,5

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S1 kodlu karışım ile alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S3 kodlu karışım incelendiğinde numunelerden 7 gün sonunda kaydedilen elektriksel empedans sonuçlarının kalsiyum hidroksit ikameli karışımlarda daha yüksek olması düşük genel porozite ve boşluk büyüklüğüyle beraber süreksiz boşluk sistemiyle ilişkilendirilmiştir. Aynı durum alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S2 kodlu karışım ile alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S4 kodlu karışımlarda da gözlemlenmiştir. S1, S2, S3 ve S4 kodlu EGC karışımları üzerinde cürufun etkisi değerlendirildiğinde ise porozite ve düşük ortalama boşluk büyüklüklerine ek olarak karışımlara cüruf ikame edilmesinin özellikle erken yaşlarda daha süreksiz bir boşluk yapısı oluşturması beklenmektedir. Bu sebeplerden ötürü, sağlam numunelerden 7 gün sonunda kaydedilen elektriksel empedans sonuçlarının cüruf ikameli karışımlarda daha yüksek olması iyonların taşınımını önemli ölçüde azaltan düşük genel porozite ve boşluk büyüklüğüyle beraber süreksiz boşluk sistemiyle ilişkilendirilmiştir. EGC kompoziti cüruf ikame edilerek üretildiğinde, alkali iyonlarının büyük çoğunluğu boşluk çözeltisine karışmaktan ziyade oluşan ürünlerle birleşmektedir. Bu sebeple cürufun kullanıldığı karışımların yüksek elektriksel empedans sonuçlarının elde edilmesinin arkasındaki sebep bu olabilir. Ancak alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışım ile aynı aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ancak %100 İYA bazlı S6 kodlu karışım incelendiğinde ise 7 gün sonunda kaydedilen elektriksel empedans sonuçlarının cüruf ikameli karışımda daha düşük olduğu görülmektedir. Karışımların farklı iyon çözeltileri ve alkali derişimlerinin erken yaşlarda farklı kompozisyonlara sahip EGC karışımların elektriksel empedans sonuçlarını farklı şekilde etkileyebildiği düşünülmektedir.

Sağlam EGC numunelerinin başlangıç önyüklemesi sonrasında elektriksel empedans sonuçlarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bu davranış tüm karışımlar için geçerli olsa da farklı karışımların artış belirginliği birbirlerinden çok farklı olmuştur. Bu sonuç EGC karışımlarının sergilemiş oldukları farklı çatlak özellikleriyle ilişkilendirilebilir.

Ayrıca numuneler her ne kadar benzer hasarlara maruz bırakılmış olsalar da elektriksel empedans testleri önyüklemenin boşaltılmasından sonra gerçekleştirilmiştir. Bu durum, bazı numuneler üzerindeki küçük mikro çatlakların önyüklemenin kaldırılmasından sonra tamamen kapanmasına sebep olmuştur. Ek olarak bazı numunelerde gözlemlenen daha fazla sayıda çatlağa rağmen EGC karışımlarının elektriksel empedans sonuçları üzerinde çatlak genişliği ölçümlerinin daha belirleyici olduğu gözlemlenmiştir. Önyükleme sonrasında farklı karışımlarda çok farklı elektriksel empedans sonuçlarının elde edilmesi boşlukların süresiz oluşu ve kıvrımlılığıyla da alakalı olabilir. Önyüklenmiş bazı numunelerin daha yüksek elektriksel empedans sonuçları vermesi karşılıklı çatlak yüzeylerini köprüleyen polietilen ve naylon liflerinden kaynaklanmış da olabilir. Söz konusu lifler iletken olmamalarına rağmen yüzeyleri başlangıç önyüklemesi sonrasında sıyrılan ya da çatlak yüzeylerindeki mikro kopmalardan kaynaklanabilecek matris parçalarıyla kaplıdır. EGC numunelerinin değişken matris kırılma tokluğu değerleri ve matris-lif arası bağı göz önünde bulundurulduğunda, lifler yükleme sırasında matrsten sıyrılabilmekte veya kopabilmektedirler. Bu bağlamda daha yüksek lif kopma şansının çatlak köprüleme olasılığını azaltması sebebiyle başlangıç önyüklemesi sonrasında farklı EGC numunelerinden daha farklı elektriksel empedans sonuçları elde edilmiş olabilir.

Çizelge 6.3'te farklı EGC karışımlarına ait 7 günlük sağlam ve önyüklenmiş numunelerin fazladan 10, 30, 60 ve 90 gün boyunca I-K döngüsüne maruz bırakılmaları ardından elde edilen elektriksel empedans sonuçları gösterilmektedir. 7 günlük başlangıç kürünün sonrasında sağlam EGC numunelerinin I-K döngülerine maruz kalmalarının ardından sergilemiş oldukları değişken elektriksel empedans değerleri, farklı nedenlerle ilişkilendirilebilir. Erken yaşlarda genel itibarıyla tüm EGC numunelerinin elektriksel empedans sonuçlarında sürekli artışlar meydana gelmiştir. Ancak ilerleyen yaşlarda kullanılan alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak %100 İYA bazlı S2, S4 ve S6 kodlu karışımlarda elektriksel empedans sonuçlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte cüruv ikameli S1, S3 ve S5 kodlu karışımlarda kullanılan alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak artan numune yaşıyla birlikte elektriksel empedans sonuçlarında sürekli artışlar meydana gelmiştir. İlave jeopolimerizasyon ve cürufun reaksiyonunun zaman

içerisindeki etkisiyle iletken iyonların taşındığı boşluk çözeltisi miktarının ve matrisler içerisindeki iletken yolların azalması sebebiyle söz konusu karışımlardaki sağlam numunelerin elektriksel empedans sonuçlarındaki artışlar normal karşılanmıştır. Farklı EGC karışımlarından alınan sağlam numunelerin 7 günlük başlangıç kürü ve 90 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür. Bu durumun cüruf ikamesi ve alkali aktivatör kombinasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiş ancak cüruf ikamesinin kullanılan alkali aktivatör kombinasyonundan belirgin şekilde daha çok değişikliğe neden olduğu gözlemlenmiştir.

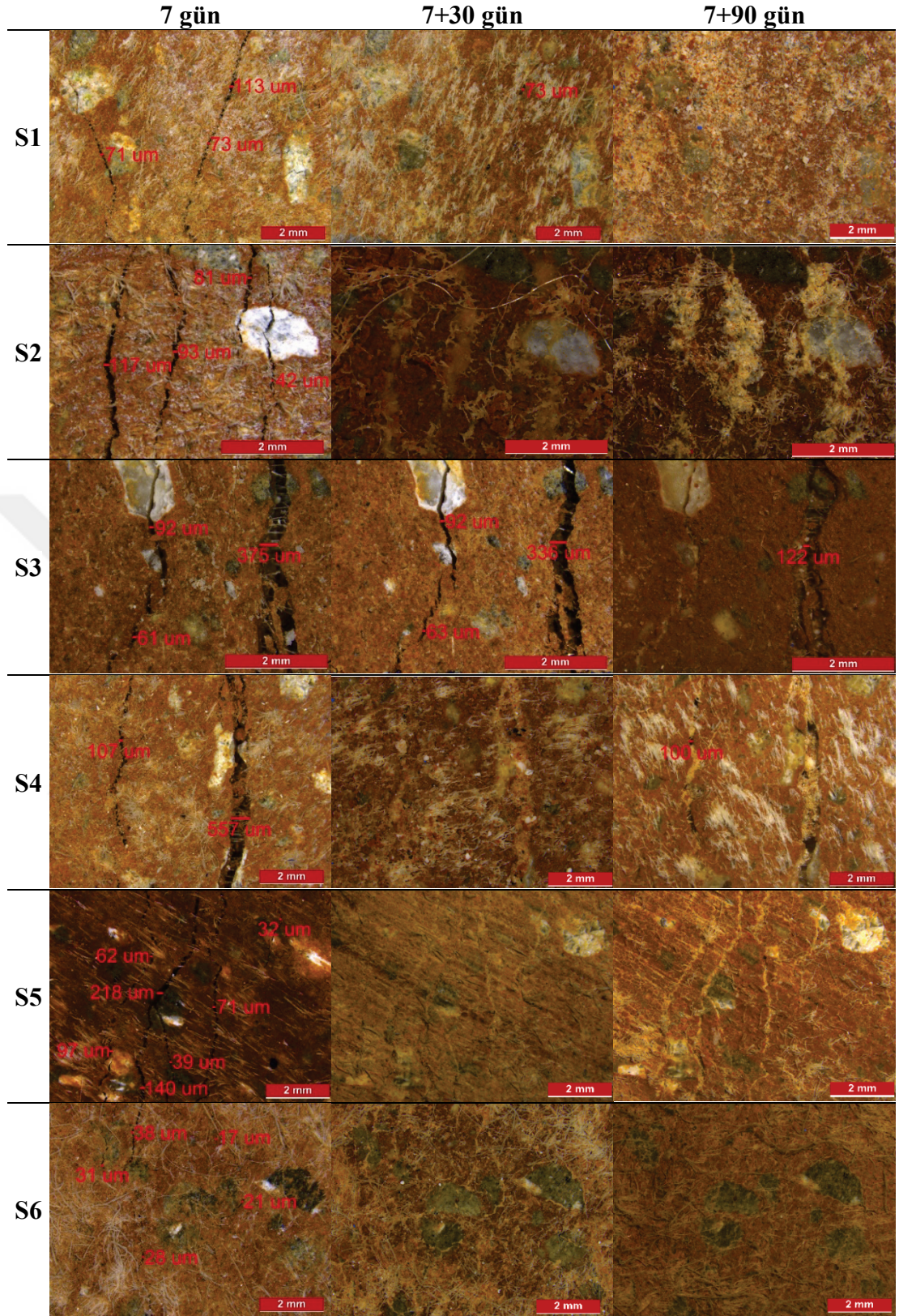
Örneğin alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli sağlam S5 kodlu numunelerin 7 günlük başlangıç kürü ve 90 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçları arasındaki fark ortalama $102,4 \text{ k}\Omega$ ($=104,1-1,7 \text{ k}\Omega$) bulunurken bu farkın aynı alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S6 numuneleri için $20,8 \text{ k}\Omega$ ($=26,7-5,9 \text{ k}\Omega$) olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 7 günlük başlangıç kürü ve 30 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçlarının da birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür. Aynı karışımlar üzerinden değerlendirilecek olursa aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli sağlam S5 kodlu numunelerin 7 günlük başlangıç kürü ve 30 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçları arasındaki fark ortalama $42,0 \text{ k}\Omega$ ($=43,7-1,7 \text{ k}\Omega$) bulunurken bu farkın aynı alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S6 numuneleri için $23,9 \text{ k}\Omega$ ($=29,8-5,9 \text{ k}\Omega$) olduğu görülmüştür. Anlaşılabileceği üzere cüruf ikamesiyle elektriksel empedans değerleri alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı karışımlarda sürekli olarak değişmiştir. Bu değişim farklı alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı karışımlarda tamamen farklı gelişmiştir. Örneğin alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli sağlam S3 kodlu numunelerin 7 günlük başlangıç kürü ve 90 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçları arasındaki fark ortalama $57,6 \text{ k}\Omega$ ($=66,3-8,7 \text{ k}\Omega$) bulunurken, bu farkın aynı alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S4 numuneleri için $33,1 \text{ k}\Omega$ ($=36,9-3,8 \text{ k}\Omega$) olduğu

görülmüştür. Bununla birlikte söz konusu karışımların 7 günlük başlangıç kürü ve 30 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçları değerlendirildiğinde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli sağlam S3 kodlu numunelerin 7 günlük başlangıç kürü ve 30 günlük ilave I-K kürü sonrası elektriksel empedans sonuçları arasındaki fark ortalama $38,0 \text{ k}\Omega$ ($=46,7-8,7 \text{ k}\Omega$) bulunurken bu farkın aynı alkali aktivatör kombinasyonlarının kullanıldığı ve %100 İYA bazlı S4 numuneleri için $84,5 \text{ k}\Omega$ ($=88,3-3,8 \text{ k}\Omega$) olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak zaman içerisinde cüruf ikameli sağlam EGC numunelerinin elektriksel empedans sonuçlarındaki artışlar %100 İYA bazlı EGC numunelerine kıyasla daha belirgin olmuştur. Ancak bu farklar ilerleyen yaşlarda belirgin bir hal almıştır. Çünkü genel olarak değerlendirildiğinde 7 günlük başlangıç kürünün ardından 10 ve 30 günlük I-K döngüsü sonrası sonuçlar incelendiğinde kullanılan alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak genel itibariyle %100 İYA bazlı karışımlarda elektriksel empedans sonuçlarının cüruf içeren karışımlardan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum I-K etkisinin bir sonucu olarak çiçeklenmenin etkisiyle iletken iyonların taşındığı boşluk çözeltisi miktarının ve matrisler içerisindeki iletken yolların kür suyuna karışarak azalması sebebiyle %100 İYA bazlı karışımlardaki sağlam numunelerin elektriksel empedans sonuçlarındaki artışlar normal karşılanmıştır. Bu durum en fazla 30 günlük I-K döngüsü sonunda tüm EGC karışımları için etkisini yitirmiştir. Bununla birlikte %100 İYA bazlı EGC karışımlarda çiçeklenmenin her yaş için daha fazla olduğu ve yüzeylerinde çiçeklenmeye bağlı olarak bir miktar aşınma ve küçük kılcal çatlakların oluşumunun gözlemlendiği daha önce belirtilmiştir. Bu durum sonucunda da %100 İYA bazlı EGC karışımlarda elektriksel empedans değerlerinin erken yaşlarda cüruf ikameli karışımlara kıyasla daha fazla artış gösterdiği düşünülmüştür. Ayrıca jeopolimerlerde çiçeklenme problemi esas olarak serbest sodyum iyonlarından kaynaklanmaktadır ve I-K döngüsü sonrası serbest sodyum iyonları kür suyuna karışmaktadır. Bölüm 3.2.3'te verilen Şekil 3.26'da görüldüğü gibi her bir karışım farklı kaplarda I-K döngüsüne maruz bırakılmış ve tüm karışımların buharlaşmaya ve emilime bağlı olarak azalan kür suyu tüm karışımlara aynı oranda su eklenerek tamamlanmıştır. Bu nedenle kür sularında da farklı oranlarda serbest sodyum iyonlarının olabileceği belirtilmelidir. Bu durumun özellikle daha çok çiçeklenme

gösteren %100 İYA bazlı karışımlarda daha fazla sodyum iyonunun kür suyuna karışması sonucunda kür sularının farklı iyon çözeltileri ve alkali derişimleri farklı kompozisyonlara sahip EGC karışımların elektriksel empedans sonuçlarını özellikle ilerleyen yaşlarda etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca sodyum bazlı çiçeklenme oluşumu çatlak içerisinde gerçekleştiğinde elektriksel empedans sonuçlarını etkileyeceği açıktır. Su ile karıştırıldıklarında, jeopolimer esaslı bileşenler karışım suyuna önemli miktarlarda Na^+ , OH^- ve kısmen Ca^{2+} iyonları sağlamaktadır. Jeopolimerizasyon reaksiyonları sonrasında mevcut iyonların bir bölümü tükenmekte ancak her bir karışımda geriye temel olarak serbest sodyum iyonu ve çözünmüş alkali hidroksitlerden oluşan bir boşluk çözeltisi bırakmaktadır. 25°C'lik sulu bir ortamda, Na^+ ve OH^- iyonlarının iletkenlikleri sırasıyla 50,1 ve 198 $\text{cm}^2 \text{equiv}^{-1} \Omega^{-1}$ olarak kaydedilmiştir (Adamson, 1973). Boşluk çözeltisinde bulunan diğer iyonlara kıyasla OH^- iyonlarının daha yüksek iletkenliğe sahip olması ve cüruf varlığında puzolanik reaksiyonlar aracılığıyla OH^- iyonlarının hızlı bir şekilde tüketilmesi ilerleyen yaşlarda kaydedilen cüruf ikameli S1, S3 ve S5 kodlu numunelerinden yüksek elektriksel empedans sonuçlarının elde edilmesinin arkasındaki sebep olabilir. Cüruf taneciklerinin kimyasal yapısında İYA'lara oranla daha düşük oranlarda Na_2O ve K_2O bulunduğu da belirtilmelidir.

7 günlük başlangıç kürünün ardından 90 günlük I-K sonrasında sağlam numunelerden elde edilen nihai elektriksel empedans sonuçlarıyla karşılaştırıldığında her ne kadar daha belirgin olsa da kullanılan alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak cüruf ikameli önyüklenmiş numunelerin elektriksel empedans sonuçlarında da zaman içerisinde sürekli artışlar meydana gelmiştir. Bununla birlikte %100 İYA bazlı önyüklenmiş numunelerden elde edilen elektriksel empedans sonuçları değerlendirildiğinde, sağlam numunelerden alınan ölçümlere benzer şekilde elektriksel empedans değerlerinin belirli bir yaşa kadar arttığı ancak daha sonra düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 7 günlük başlangıç kürü sonrasında uygulanan ilave I-K sonucunda farklı karışımlarda bulunan önyüklenmiş numunelerin elektriksel empedans sonuçlarındaki yüzdesel değişimler aynı karışımlardaki tüm sağlam numunelerden daha düşük bulunmuştur. Bu durum nihai kendiliğinden iyileşme ürünlerinin oluşumuna katkı sağlayan farklı mekanizmaların elektriksel ölçümler üzerindeki muhtemel etkileriyle ilişkilendirilmiştir.

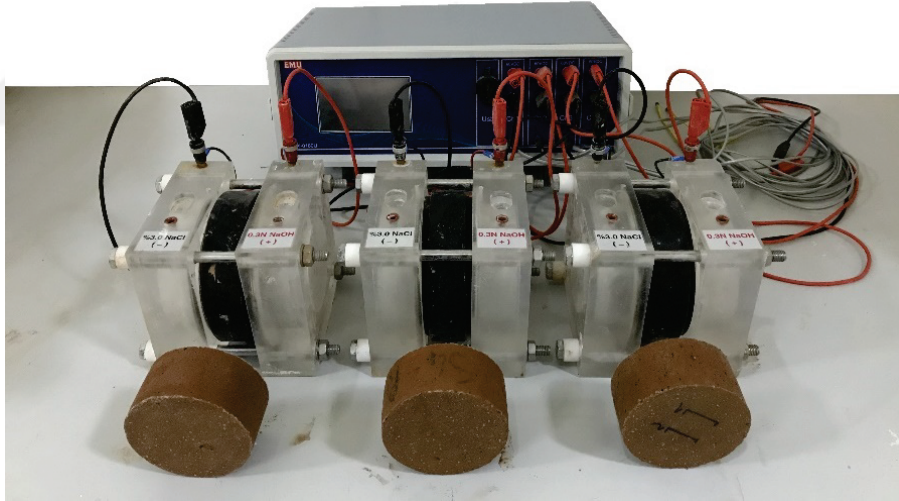
Ayrıca çiçeklenmenin etkisinin I-K döngüsüyle çok daha şiddetli olduğu ayrıca her bir EGC karışımının farklı kaplarda I-K döngüsüne maruz bırakıldığı daha önce belirtilmiştir. Bu durumda her bir kür suyunun iyon konsantrasyonu ve pH değerinin değişiklik göstereceği açıktır. Bu durum farklı karışımların boşluk çözeltisinin pH değerini farklı şekilde etkileyecektir. Boşluk çözeltisinin pH değerinin yüksek olmasıyla, su ve karbondioksit arasındaki reaksiyon sonucunda oluşan karbonik asitin bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat iyonları (CO_3^{2-}) formlarında ayrışması kolaylaşmaktadır. Bu karbonat çeşitleri daha sonra jeopolimer matristen sızan Na^+ ve Ca^{2+} iyonlarıyla reaksiyona girerek sodyum karbonatı ve kararlı kalsiyum karbonat oluşturmaktadır. HCO_3^- ve CO_3^{2-} ($44,5$ ve $72 \text{ cm}^2 \text{ equiv}^{-1} \Omega^{-1}$) (Adamson, 1973) iyonlarının neredeyse Na^+ ve K^+ iyonlarına eşit olacak seviyede yüksek iyonik iletkenliğe sahip olmaları sebebiyle jeopolimer esaslı hamurun elektriksel özellikleri önemli oranda değişim gösterebilir. Bu sebeple %100 İYA esaslı EGC numuneleri için özellikle ilerleyen yaşlarda düşük iyileşme oranlarına sebep olan düşük EE sonuçları, artan pH varlığında boşluk çözeltisine sızan HCO_3^- ve CO_3^{2-} iyonlarının yüksek iyonik iletkenlikleriyle de ilişkilendirilebilir. Her ne kadar detaylı araştırma gerektirse de farklı karbonat çeşitlerinin EGC numunelerinin EE sonuçları bakımından kendiliğinden iyileşme performanslarına olan muhtemel etkilerine ek olarak Na^+ ve Ca^{2+} iyonlarının hangi miktar ve oranda boşluk çözeltisine sızdıkları da ayrıca göz önünde bulundurulması gereken bir konudur. Yukarıda da anlatıldığı üzere, sodyum karbonat ve kalsiyum karbonat kristallerinin oluşabilmesi için nem ve karbondioksitin hali hazırda mevcut olan Na^+ ve Ca^{2+} iyonlarıyla birleşmesi gerekmektedir. Nem ve karbondioksit girişinin kısa mesafedeki alanlar için daha kolay olması, karbonat oluşumunun EGC numunelerinin yüzeye yakın çatlaklarında daha belirgin olması anlamına gelmektedir. Numunelerin yüzeye yakın çatlaklarındaki karbonat katmanının zamanla güçlenmesiyle, daha derindeki çatlakların içinde karbonat oluşumunu sağlayacak gerekli maddelerin (örneğin nem ve karbondioksit) matris içerisine girişi zorlaşmaktadır. Diğer taraftan, cüruf ikame edilmesi matriste N-A-S-(H) jeline ek olarak C-A-S-H jelinin oluşumuna neden olmaktadır. Bunun sonucunda daha süreksiz bir boşluk sisteminin oluşumunu tetikleyerek cüruf ikameli karışımların nihai EE sonuçlarının %100 İYA bazlı karışımlardan farklı olarak sürekli olarak artmasına sebep olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.6. Elektriksek empedans deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri

6.3.3. Hızlı Klorür İyonu Geçirirnililiği

Hızlı klorür iyonu geçirirnililik (HKİG) testi betonun dayanıklılığını, özellikle klorür iyonu geçirirnililiğine karşı direncini hızlı ve pratik bir şekilde değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan test yöntemlerinden biridir. Hızlı klorür iyonu geçirirnililik testi beton numunelerinin elektriksel iletkenliğinin bir ölçüsüdür. Numuneden geçen yüke göre betonun geçirirnililiği ile ilgili nitel bir derecelendirme yapılmaktadır. Hızlı klorür iyonu geçirirnililik testi birçok araştırmacı tarafından ECC numunelerinde kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilebilmesi için başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında EGC'lerin kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için hızlı klorür iyonu geçirirnililik testi kullanılmıştır. EGC karışımlarının klorür iyonu geçişine karşı sergiledikleri direnç ile ilgili fikir veren hızlı klorür iyonu geçirirnililik testi sonuçları Coulomb (C) cinsinden Çizelge 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Hızlı klorür iyonu geçirirnililiği deneyi

Çizelge 6.4. EGC numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimsilik değerleri

Kod	Numune Tipi	Coulomb (C)				
		7	7+10	7+30	7+60	7+90
S1	Önyüklenmiş	3041	3375	3250	2901	2775
		2965	3122	2845	4522	2537
		3740	4102	2792	4018	3647
	Sağlam	3152	2719	2919	3127	4574
		2922	2426	2663	2263	2756
		2960	2726	2682	1684	2890
S2	Önyüklenmiş	2277	2402	2780	3472	4322
		3569	3672	3242	2794	3488
		2765	4162	4002	3814	2921
	Sağlam	3286	3931	4803	3942	4822
		1802	3148	2120	2540	4121
		2736	4245	4201	4442	4278
S3	Önyüklenmiş	3301	3330	3197	2628	2482
		3403	3429	3232	3182	2888
		3615	3700	3402	3255	2985
	Sağlam	3121	3400	3158	2964	2650
		3050	3195	2962	2750	2762
		3100	3420	3178	3002	2920
S4	Önyüklenmiş	3485	3642	3542	2723	3628
		3362	3625	2725	2672	2749
		2619	3480	3067	2815	2152
	Sağlam	2533	2820	3526	3075	4155
		2830	2880	2595	2805	3416
		3230	3710	3458	2705	2482
S5	Önyüklenmiş	2568	2397	2002	3708	2754
		2753	1595	3415	3385	2642
		2896	2674	3987	3623	3147
	Sağlam	3536	2548	3822	2870	4274
		3656	2469	3120	2795	2675
		3773	4850	4260	3698	2799
S6	Önyüklenmiş	2786	2842	3879	4324	4533
		3113	3196	2854	3462	4705
		3648	3553	3804	4669	2400
	Sağlam	2824	3161	2202	3333	3045
		3028	3262	3756	3441	3745
		3185	4385	4100	4070	3204

Hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testi basitliği nedeniyle giderek daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Jeopolimer bağlayıcılı betonun klorür iyonu geçirimsizliğine karşı direncini ölçmek için çeşitli araştırmacılar tarafından bu test kullanılmıştır. Son zamanlarda inşaat sektöründe jeopolimer bağlayıcılı beton kullanımına yönelik artan ilgi ile jeopolimer bağlayıcılı betonun belirli çevresel koşullar altındaki uzun vadeli performansını değerlendirmek için uygun hızlandırılmış test yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde çimento bağlayıcılı beton için geliştirilen mevcut hızlandırılmış test yöntemlerinin jeopolimer bağlayıcılı betonun olası performansını gerçekten nasıl yansıtabileceğini gösteren net bir veri bulunmamaktadır. Bununla birlikte hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testi farklı jeopolimer bağlayıcılı betonlarının çoğu için uygun görülmemiştir. Birçok araştırmacı deney esnasında numuneler üzerindeki sıcaklıkta hızlı artış gerçekleştiğinden jeopolimer bağlayıcılı betonun performansının değerlendirilmesine uygun bir test yöntemi olmadığını bildirmişlerdir (Law ve diğerleri, 2015; Babu, 2018; Lee ve diğerleri, 2019).

Law ve diğerleri (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada hızlı klorür iyonu geçirimsizliği testi başladıktan sonra jeopolimer numunelerin sıcaklığının hızlı bir şekilde artarak 60°C'ye ulaştığını tespit etmiş ve hızlı sıcaklık artışı nedeniyle jeopolimer betonlarının klorür direncini değerlendirmek için uygun bir yöntem olmadığını belirtmişlerdir. Bu durumun jeopolimer sistemindeki iletkenliği etkileyen yüksek sodyum iyonu (Na^+) seviyesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir iletken yoluyla elektrik akışı, akımı taşıyan iyonların hareketliliğini arttırarak ısı üretir, bu da döngüsel bir işlemde daha fazla ısı üreten toplam akım miktarını arttırmaktadır. Gözlemlenen sıcaklıktaki hızlı artış göz önüne alındığında hızlı klorür iyonu geçirimsizlik test yönteminin temel ilkesi olan Ohm yasasının ($V=IR$) geçerliliğiyle çelişmektedir. Bu durum gerçekten de hızlı klorür iyonu geçirimsizliği testinin jeopolimer bağlayıcılı betondaki klorür iyonu geçirimsizliğini ölçmek için uygun bir test yöntemi olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte bu konu hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda Noushini ve Castel (2018), gerçekleştirdikleri çalışmada hızlı klorür iyonu geçirimsizlik test yönteminin jeopolimer betonun klorür geçirimsizliğini değerlendirmek için performansa dayalı uygunluğunu araştırmıştır. Hızlı klorür iyonu geçirimsizlik test yöntemi çoğu jeopolimer beton numunesinden geçen yükü ölçemediğinden, standart

test yönteminde değişiklikler yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda hızlı klorür iyonu geçirimsilik testinin modifiye edilmiş bir versiyonunu önermişlerdir. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik test yönteminde yapılan değişiklik uygulanan voltaj ile ilgili olmuştur. Jeopolimer numuneleri yüksek bir elektrik iletkenliğine sahip olduğundan standart numune üzerine 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmasından ziyade 10 V düşük sabit potansiyel farkı uygulanmasının daha uygun olduğunu önermişlerdir.

Hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi ile ilgili diğer bir problem deney esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıktan ziyade jeopolimer numunelerin gözenek çözeltisinin özelliklerindeki değişiklikten kaynaklanacaktır. Bu durum asıl olarak ölçülen toplam yükün, klorür iyonu akışına karşılık gelen bileşene değil toplam akıma dayanmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü geçirilen akım sadece klorür iyonları tarafından değil, gözenek çözeltisindeki tüm iyonlar tarafından taşınır. Ayrıca sıcaklık artışı iyonların akış özelliklerini de değiştirecektir. Bu nedenle hızlı klorür iyonu geçirimsilik testindeki en büyük sınırlama, sadece toplam iyonlardan farklı olarak klorür iyonları tarafından taşınan akımı hesaba katmamasıdır. Bilindiği üzere gözenek çözeltisinde farklı konsantrasyonlarda OH^- , Cl^- , Na^+ , K^+ , SO_4^{+2} ve Ca^{+2} iyonları bulunabilmektedir. Öte yandan jeopolimer bağlayıcılarda kullanılan ana alüminosilikat kaynağı, kullanılan alkali aktivatör tipi ve miktarı gibi birçok parametre, gözenek çözeltisindeki farklı iyonların konsantrasyonunu azaltabilir ya da arttırabilir. Bu nedenle farklı alkali aktivatör kombinasyonları kullanılarak üretilen jeopolimer bağlayıcıların hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi ile karşılaştırılması, bu malzemelerde yer alan gözenek çözeltisi kimyasının etkisi nedeniyle uygun değildir. Tüm bu yaklaşımlar değerlendirildiğinde, hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi sonuçlarının numunelerdeki sıcaklık artışından, gözenek çözeltisinin iletkenliğinden, gözenekliliğin doğasından büyük ölçüde etkileneceği açıktır.

Hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi her ne kadar betonun dayanıklılığını, özellikle klorür iyonu geçirimsiliğine karşı direncini hızlı ve pratik bir şekilde değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan test yöntemlerinden biri olsa da yukarıda açıklanan sebepler doğrultusunda çalışma kapsamında EGC karışımlar üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda tutarlı veriler alınamamıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan

hızlı klorür iyonu geçirimsilik testi cihazı, güvenlik tedbirleri nedeniyle test esnasında numunelerin aşırı ısınmasını önlemek için akım 500 mA'ya ulaşırsa testi sonlandırmak üzere tasarlanmıştır. Ancak literatürde sıkça karşılaşılan bu sorun tez çalışmaları kapsamında üretilen EGC karışımlarının hiçbirinde gözlemlenmemiştir. Hatta numunelerin deney esnasında ve deneyin tamamlanmasından sonra ısınmadığı belirtilmelidir. Bu durum ölçüm esnasında numuneler üzerinde uygulanan potansiyel farkların 60 V olarak korunamamış olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Aynı karışımlara ait ölçülen numunelerde bile potansiyel fark değerlerinin değişken olduğu gözlemlenmiştir ve bu durum hızlı klorür iyonu geçirimsiliği test sonuçları üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Sonuçlar üzerindeki tutarsızlıklar bu şekilde açıklamaktadır. Ek olarak daha önce belirtildiği gibi hızlı klorür iyonu geçirimsiliği testi esasen elektriksel iletkenliğin bir ölçümüdür ve hem gözenek çözeltisinin kimyasına hem de test edilen örneklerin gözenek yapısı özelliklerine bağlıdır. Gözenek çözeltileri detaylı olarak analiz edilmemesine rağmen gözenek çözeltisinin kimyasının hızlı klorür geçirimsiliği test sonuçlarını gözenek yapısından daha fazla değiştirebileceği düşünülmektedir. Çizelge 6.5'te hızlı klorür iyonu geçirimsilik testinde ölçülen 7 günlük S1 numunesine ait cihazdan okunan veriler sunulmuştur.

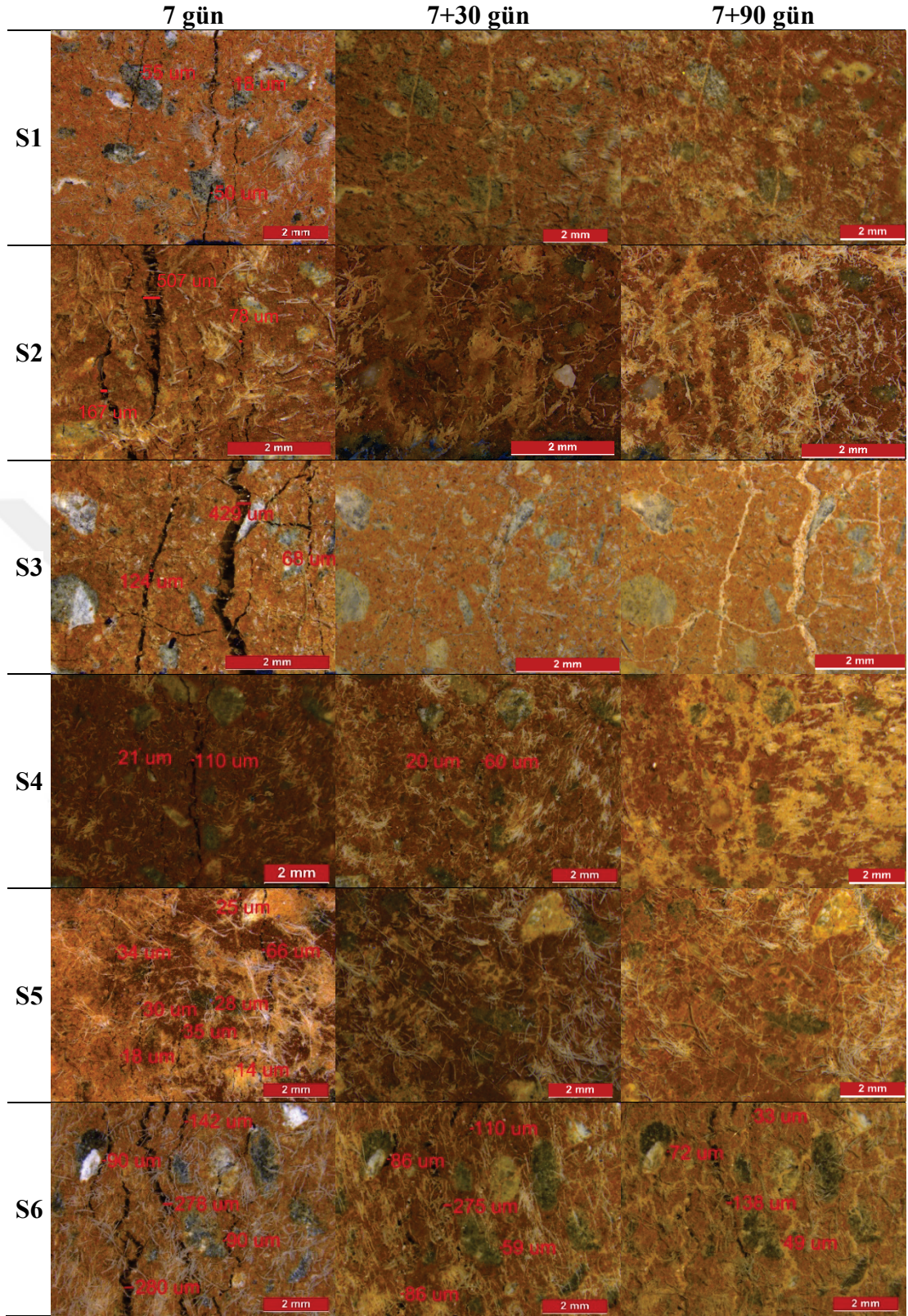
Çizelge 6.5. S1 kodlu EGC numunesine ait hızlı klorür iyonu geçirimsiliği deneyi esnasında cihazdan okunan veriler

Coulomb (C)	Akım (mA)	Voltaj (V)
357	396	6
875	8	2
891	10	2
914	180	5
1417	8	2
1434	315	4
1723	8	2
2268	305	2
2286	166	5
2437	310	2
2453	262	2
3032	200	2
3041	14	5

Çizelge 6.5'te cihazdan okunan veriler değerlendirildiğinde, potansiyel fark değerlerinin 60 V sabit potansiyel fark değerinden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum her iki tarafa karışan iyonların hareket yönünü değiştirerek ters akım oluşturma ihtimalini düşündürmektedir. Bu sorunun cihaz kaynaklı olabileceği de akla gelmiş ancak deneysel çalışmalar sırasında farklı zamanlarda beton numuneleri de test edilmiş ve 60 V sabit potansiyel farkın korunduğu görülmüştür. Çizelge 6.6'da hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testinde ölçülen 28 günlük beton numunesine ait cihazdan okunan veriler sunulmuştur. Sonuç olarak hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testi çalışma kapsamında üretimleri gerçekleştirilen EGC karışımlarının çoğu için uygun görülmemiştir ve bu konu hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Çizelge 6.6. Beton numunesine ait hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi esnasında cihazdan okunan veriler

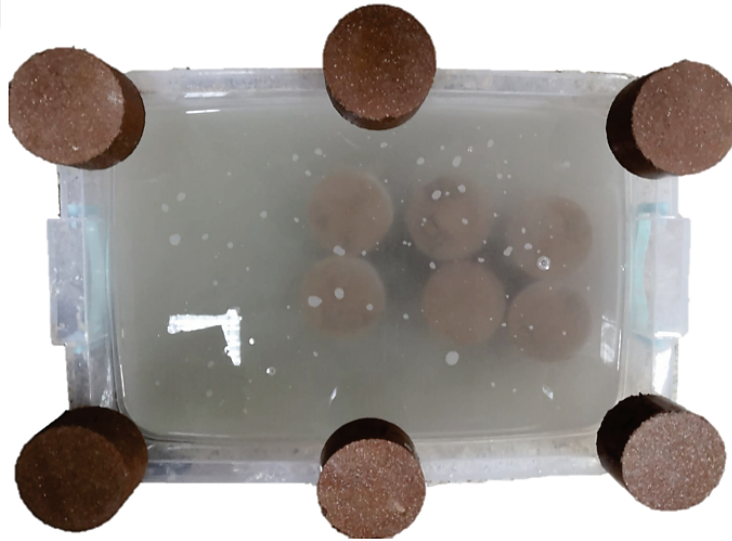
Coulomb (C)	Akım (mA)	Voltaj (V)
107	119	62
326	122	60
573	137	60
846	151	60
1145	165	60
1470	180	60
1821	194	60
2195	208	60
2589	218	60
2999	228	60
3424	235	60
3864	244	60
4083	243	60



Şekil 6.8. Hızlı klorür iyonu geçirirliğı deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri

6.3.4. Su Emme

Betonun dayanıklılığı büyük ölçüde sıvıların matrise girme ve hareket etme kolaylığına bağlıdır. Su emme, beton içerisindeki boşlukların sıvıyı emme yeteneğinin ve betonun gözenekliliğinin bir göstergesidir. EGC'nin hem yüksek süneklik hem de aşırı mekanik yüklemeler altında dahi sıkı çatlak genişliği nedeniyle gelişmiş dayanıklılığa sahip olduğu düşünülmektedir. Gerçek saha şartlarında EGC karışımlarının su emme ve gözeneklilik özelliklerinin gerçekçi bir şekilde test edilebilmesi için EGC karışımlarının su emme oranlarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu eksikliğin giderilebilmesi için tez çalışmalarında sağlam ve önyüklenmiş EGC numunelerinin belirli çevresel koşullara maruz bırakılmadan önce ve sonraki su emme ölçümleri kayıt altına alınarak performansı değerlendirilmiştir. Su emme deneyi ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.2.4.8'de verilmiştir. Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen su emme deney düzeneği Şekil 6.9'da gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Su emme deneyi

EGC'nin çatlak modelleri ve su emmesi, birçok bozulma sürecini yöneten taşınma özellikleri için çok önemlidir. Elde edilen deneysel sonuçlar, EGC'nin diğer dayanıklılık özellikleri üzerine gelecekteki çalışmalarda faydalı olacaktır.

Çizelge 6.7. EGC karışımlarının su emme değerleri

Kod	Numune Tipi	Su emme (%)				
		7	7+10	7+30	7+60	7+90
S1	Önyüklenmiş	5,29	5,93	5,82	5,50	5,65
		4,92	5,40	5,29	5,39	5,56
		4,89	5,03	5,04	5,23	5,47
	Sağlam	3,84	5,13	5,51	5,54	5,58
		4,15	5,44	5,91	5,94	5,69
		4,28	5,56	5,65	6,02	5,92
S2	Önyüklenmiş	6,46	9,31	10,34	9,65	9,53
		6,14	9,18	9,40	8,83	8,56
		6,74	10,57	10,51	10,30	9,95
	Sağlam	5,44	10,08	9,68	9,61	9,10
		5,89	9,39	9,42	9,42	8,93
		5,43	9,73	10,54	10,13	9,32
S3	Önyüklenmiş	4,97	5,23	5,16	5,45	5,26
		4,94	5,20	5,23	5,68	5,34
		4,93	5,26	5,19	5,26	5,07
	Sağlam	4,16	5,19	5,27	5,49	5,23
		4,14	5,32	5,35	5,36	5,15
		4,97	5,23	5,16	5,45	5,38
S4	Önyüklenmiş	4,98	6,66	7,63	8,22	8,06
		5,56	6,76	7,73	8,43	7,62
		5,26	6,49	8,13	7,61	5,92
	Sağlam	3,51	6,02	7,08	7,30	6,77
		3,27	6,39	7,41	8,04	7,82
		3,82	6,44	8,01	8,22	7,61
S5	Önyüklenmiş	4,02	4,44	5,61	5,57	5,03
		3,33	3,68	4,87	4,91	4,22
		3,80	3,86	5,23	5,31	4,70
	Sağlam	2,95	3,69	4,73	5,53	5,08
		2,97	3,84	4,35	4,69	4,49
		2,89	3,63	4,82	5,33	4,87
S6	Önyüklenmiş	5,21	5,77	8,27	7,86	7,38
		5,45	5,44	7,44	7,42	6,84
		5,84	5,70	7,35	7,22	6,29
	Sağlam	4,59	5,42	7,94	8,06	6,93
		4,31	5,19	7,87	7,53	6,57
		4,19	5,14	7,71	7,44	6,64

Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar ve ilave I-K kürü sonrasında su emme değerleri Çizelge 6.7’de sunulmuştur. Görüldüğü üzere, kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesi su emme değerleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. EGC karışımların sağlam numunelerin 7 günde su emme oranı %2,89 ile %5,89 arasında değişim göstermiştir. Tüm karışımlar arasında 7 günde en düşük su emme oranı %2,89 ile alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışıma ait olduğu belirlenmiştir.

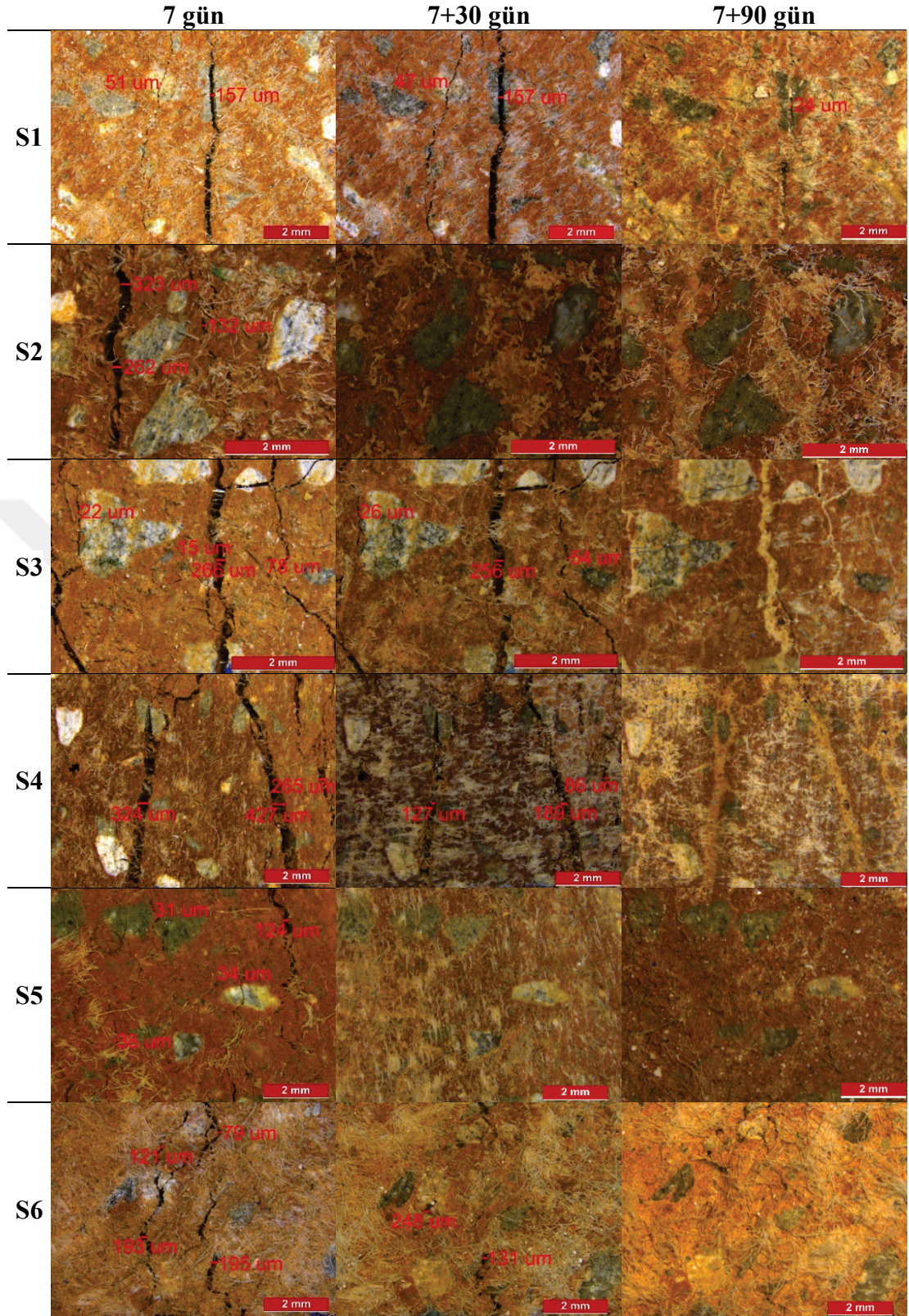
Sağlam numunelerden elde edilen değerler incelendiğinde, 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında sonuçların önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Bu değişim sürekli düşüş ya da sürekli artış şeklinde olmamıştır. Örneğin S3 kodlu karışımın 7 günlük ortalama su emme değeri %4,42 iken bu değer 10, 30 ve 60 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında artarak sırasıyla %5,25, %5,26 ve %5,43 seviyelerine ilerlediği görülmüştür. 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında ise düşerek %5,25 seviyelerine gerilediği görülmüştür. Sonuçlardaki değişimler her ne kadar karışım türüne göre farklılık gösterse de genel davranış kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesinden bağımsız olarak tüm karışımlar için benzer olmuştur. Sağlam EGC numunelerinin I-K döngülerine maruz kalmalarının ardından sergilemiş oldukları değişken su emme değerleri, kılcal su emme değerlerindeki değişime benzer şekilde gerçekleşmiştir. Ancak bu değişimin kılcal su emme değerlerinde daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi çiçeklenmenin I-K döngüsüyle çok daha şiddetli oluştuğuyla ilişkilendirilmiştir. Ek olarak çiçeklenmenin kılcal su emme testi esnasında da şiddetinin arttığı belirtilmelidir. Çiçeklenme, kılcal su emme deneyinin gerçekleştirilmesi esnasında kullanılan alkali aktivatör ve cüruf ikamesinden bağımsız olarak tüm numuneler üzerinde farklı zamanlarda kendini göstermiştir. Özellikle her zaman için geçerli olmasa da %100 İYA bazlı numunelerde ve önyüklenmiş numunelerde çiçeklenmenin, kılcal su emme deneyinin daha erken aşamalarında da kendini gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte su emme deneyinin gerçekleştirilmesi esnasında numuneler doğrudan suya daldırıldıkları için deneyin gerçekleştirilmesi esnasında numuneler üzerinde herhangi bir çiçeklenme belirtisi görülmemiştir. Ancak deneyin tamamlanmasının ardından sudan çıkarılan

numunelerin tüm yüzeyleri beyazlayarak çiçeklenme kendisini şiddetli bir şekilde göstermiştir. Her bir EGC karışımının farklı kaplarda I-K döngüsüne maruz bırakıldığı ve tüm karışımların buharlaşmaya ve emilime bağlı olarak azalan kür suyunun tüm karışımlara aynı oranda su eklenerek tamamlandığı ve kür sularında farklı oranlarda serbest sodyum iyonlarının olabileceği daha önce belirtilmiştir. Bu nedenle I-K döngüsüne maruz bırakılan karışımlarda kısmen çiçeklenme gözlemlenmiştir. Ancak su emme deneyi ayrı bir kapta her seferinde su yenilenerek gerçekleştirilmiş ve su emme deneyinin tamamlanmasının ardından sudan çıkarılan numunelerin tüm yüzeylerinin beyazlayarak çiçeklenmenin kendisini daha da şiddetli bir şekilde gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumda su emme deneyi esnasında çiçeklenme etkisinin olmadığı düşünüldüğünde su emme sonuçlarının herhangi bir etkenle değişmediği düşünülmektedir. Ancak erken yaşlardan itibaren EGC karışımların yüzeylerinde çiçeklenmeye bağlı olarak bir miktar aşınma ve küçük kılcal çatlakların oluştuğu ve bu durumun özellikle %100 İYA bazlı karışımlarda belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda çiçeklenmenin sadece görsel bir sorun olmadığı sonucu çıkarılmıştır. Çiçeklenme sorununun betonun geçirimsizliğini etkileyerek dayanıklılık problemlerine yol açabildiği görülmektedir.

Başlangıç kürünü ardından S5 kodlu numunelerinden elde edilen düşük su emme sonuçlarının daha önce belirtildiği gibi cüruf ve kalsiyum hidroksitin özellikle erken yaşlarda daha yoğun bir mikroyapı oluşturma üzerindeki etkinliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte ileri yaşlarda da S5 kodlu numunelerden elde edilen düşük su emme sonuçları kalsiyum hidroksitin hem erken yaşlarda hem de ileri yaşlarda diğer EGC karışımlarına göre su emme performansının daha iyi olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 10, 30, 60 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında en düşük ortalama değerlerin sırasıyla %2,93, %3,72, %4,64 ve %5,18 ile alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli S5 kodlu karışımından elde edilmiş olmasıdır. Sağlam EGC karışımlarının su emme sonuçlarında dikkat çeken bir nokta da 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında en düşük ortalama değer sağlam numuneden elde edilememiş olmasıdır. 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında en düşük ortalama değer %4,65 ile

alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı ve cüruf ikameli önyüklenmiş S5 kodlu karışımından elde edilmiş olmasıdır. Bu durum mikro çatlaklı EGC'nin kendiliğinden iyileşme etkisinin I-K döngüsü sonrasında EGC'deki mikro çatlakların kapanmasını sağlamasıyla ilişkilendirilmiştir.

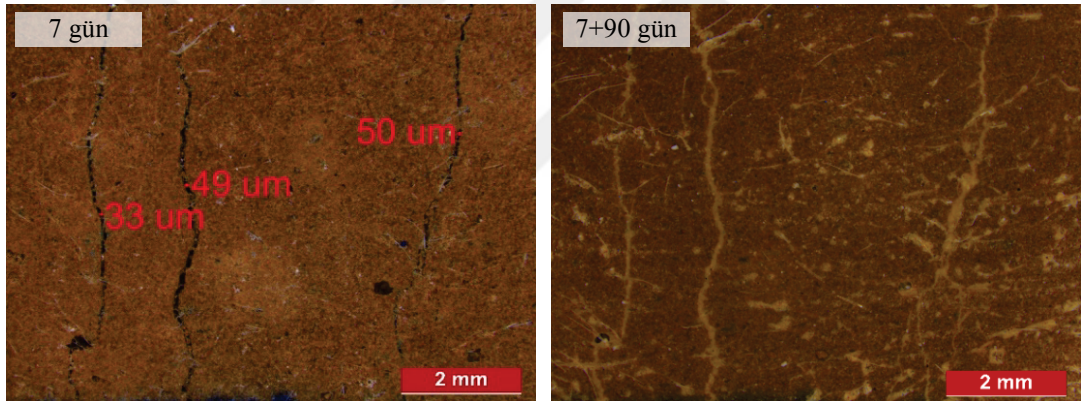
Ayrıca sağlam numuneler üzerinden elde edilen su emme sonuçları basınç dayanım sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, su emme değerlerinde en iyi performansa sahip karışımın kısmen düşük basınç dayanımına sahip S5 kodlu karışımından elde edilmesi su emme performansının dayanımdan daha çok kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Bu durum daha önce belirtildiği üzere sodyum silikatın dayanım üzerine etkilerinin baskın olduğunu gösterirken kalsiyum hidroksitin çok daha yoğun bir mikroyapının oluşmasına olanak sağladığı fikrini güçlendirmiştir. Önyüklemenin farklı EGC karışımlarının su emme sonuçları üzerindeki etkileri düşünüldüğünde önyükleme sonucunda EGC karışımlarının su emme sonuçlarında alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesine bakılmaksızın üstel artışlar meydana gelmiştir (Çizelge 6.7). Bu durum oluşturulan çatlakların suyun emilebilmesi için fazladan alan oluşturması sebebiyle beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak cüruf ikame edilen tüm önyüklenmiş EGC karışımlarının başlangıç kürüne ek olarak 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında sağlam numunelerden daha düşük su emme sonuçları sergilediği görülmektedir. Bu durum mikro çatlaklı cüruf ikameli EGC karışımların kendiliğinden iyileşme etkisinin I-K döngüsü sonrasında EGC'deki mikro çatlakların kapanmasını sağlamasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak %100 İYA bazlı EGC karışımlarında da başlangıç kürüne ek olarak 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında önyüklenmiş numunelerin su emme değerlerinin sağlam numunelere yaklaştığı gözlemlenmiş ancak söz konusu karışımlarda tüm numuneler için sağlam numunelerin daha düşük su emme sonuçları sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 6.10. Su emme deneyine tabi tutulan numunelerin çatlak gelişimi görselleri

6.3.5. Mikroskopik Gözlem ve Analiz

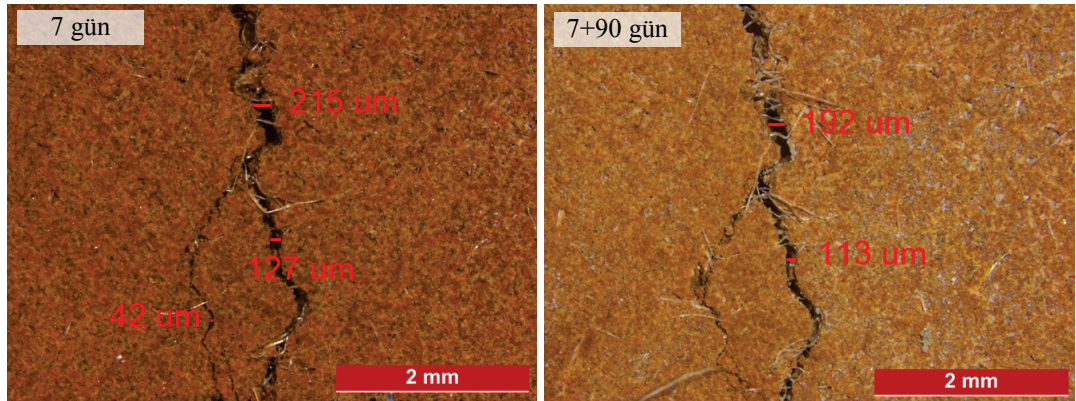
SEM/EDX analizleri sırasıyla kendiliğinden iyileşme ürünlerini görüntülemek, morfolojisi ve kimyasal yapısı hakkında bilgi sahibi olmak için yapılırken XRD analizi ürünlerin kristalografik yapılarını ve mineral oluşumlarını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden iyileşme ürünleri XRD analizi için bir maket bıçağı kullanılarak, kazınarak elde edilmiştir. SEM/EDX analizi için elmas uçlu Dremel kullanılarak numuneler üst yüzeylerinden iyileşme ürünlerini içerecek şekilde küçük parçalara ayrılarak hazırlanmıştır. Ancak bu yöntemle hazırlanan SEM/EDX analizi numuneleri cihaz içerisinde vakum almadığından analizler gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle doğrudan iyileşme ürünlerinden numune alınarak SEM/EDX analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.11. S1 kodlu EGC karışımının 90 gün I-K döngüsü sonrası çatlakların iyileşme ürünleriyle kapanması

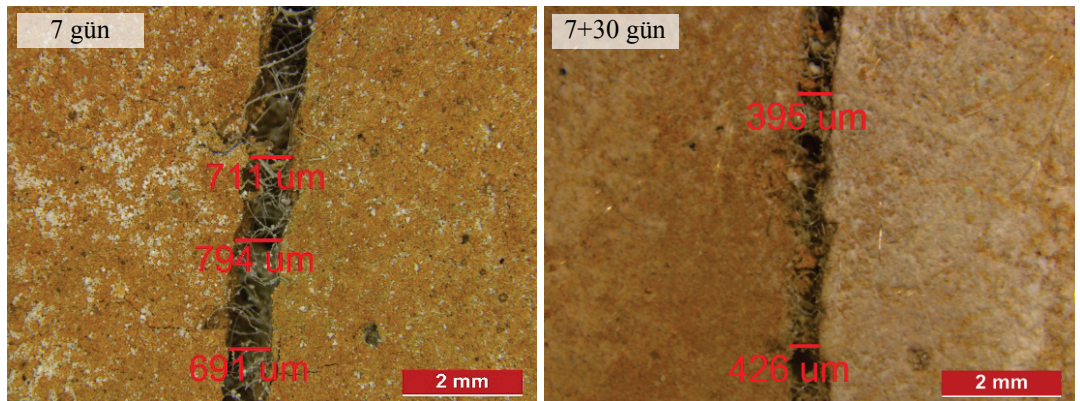
Islanma-kuruma döngüsü sırasında tüm EGC karışımlarının çatlaklarında çökelti oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çökelti bazı numunelerin çatlaklarında beyaz renkte bazılarında turuncuya yakın bir renkte olup oluşan çökelti derecesi bütün numuneler için değişken olmuştur. Bazı çatlaklar beyaz/turuncu çökelti ile tamamen kapanırken bazı çatlaklar sadece kısmen kapanmıştır. Tamamen kapanmış çatlakların bir görüntüsü Şekil 6.11’de gösterilmektedir. Ayrıca her yaş için farklı iyileşme

derecelerinin olduğu bulunmuştur. Önyüklemeden 10, 30, 60 ve 90 gün sonra çekilen mikroskop görüntülerinde tamamen ve kısmen kapalı çatlaklardaki beyaz/turuncu çökeltilerin farklı yaşlarda görülebildiği gözlemlenmiştir. Bu değişkenliğe neden olan faktörler net olmasa da EGC'de kendiliğinden iyileşmenin, mikro çatlakların çoğunun tamamen kapanabildiği ECC'ye kıyasla sınırlı olduğu düşünülmektedir. Bu sınırlı kendiliğinden iyileşme ürünü oluşumu EGC'de daha düşük performans geri kazanımı anlamına gelmektedir. Çimento bağlayıcılı malzemelerin suyun yokluğunda önemli bir iyileşme ürünü göstermediği bilinmektedir. Tez çalışmaları kapsamında deneme amaçlı her EGC karışımından iki adet kupon numune sürekli hava kürüne maruz bırakılmış ve çatlak özellikleri incelenmiştir (Şekil 6.12). Kan ve diğerleri (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada jeopolimer bağlayıcılı malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansı açısından hava ile kürlenmenin ıslanma-kuruma döngülerinden daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada sürekli hava kürüne maruz bırakılan numunelerde herhangi bir çökelti oluşumu gözlemlenmemiş olup bu nedenle suyun varlığının EGC'nin kendiliğinden iyileşmesinde ECC'ye benzer şekilde gerekli olduğu belirlenmiştir. Sürekli hava kürüne maruz bırakılan EGC karışımlarda herhangi bir çökelti oluşumunun gözlemlenmemesi çiçeklenmenin etkisinin sürekli hava kürüne maruz kalan EGC karışımlarda çok daha az olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte çatlak açıklığının bir miktar azaldığı belirtilmelidir.



Şekil 6.12. S3 kodlu EGC karışımının 90 gün sürekli hava kürü sonrası çatlak görüntüleri

Jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde benzer bileşenler, karışım oranları ve üretim yöntemleri kullanıldığında bile farklı çalışmalar arasında çelişkili sonuçlar ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu nedenle katı alüminosilikat kaynağı ve alkali aktivatörün tipleri, alkali aktivatörün konsantrasyonu, kür tipi, sıcaklığı ve süresi, bileşenlerin karışım oranları gibi birçok parametre oluşan nihai ürünü ve kendiliğinden iyileşme performansını büyük ölçüde etkileyecektir. Bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda kendiliğinden iyileşmenin gerçekleşmesi için hangi maruz kalma koşulunun daha uygun ve etkili olduğu bu parametreler doğrultusunda değişkenlik gösterecektir (Ohno, 2017; Kan ve diğerleri 2019). Bu nedenle jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde kendiliğinden iyileşme performansı, reaksiyon mekanizması/süreçleri ve bunların etkili faktörleri üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında I-K döngüsüne maruz bırakılan EGC karışımlarda çatlakların şişme (genişleme) etkisiyle de bir miktar kapandığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.13). Şişme (genişleme) etkisinin özellikle alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S5 ve S6 kodlu EGC karışımlarda erken yaşlarda daha belirgin olduğu belirtilmelidir. Çimento bağlayıcılı malzemelerde şişme etkisinin kısıtlı olduğu ancak çatlak içerisinde %10'a kadar sıvı akışını azaltabildiği bilinmektedir. Bununla birlikte çalışma kapsamında şişme etkisinin jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde çimento bağlayıcılı malzemelere kıyasla daha belirgin olduğu düşünülmektedir.

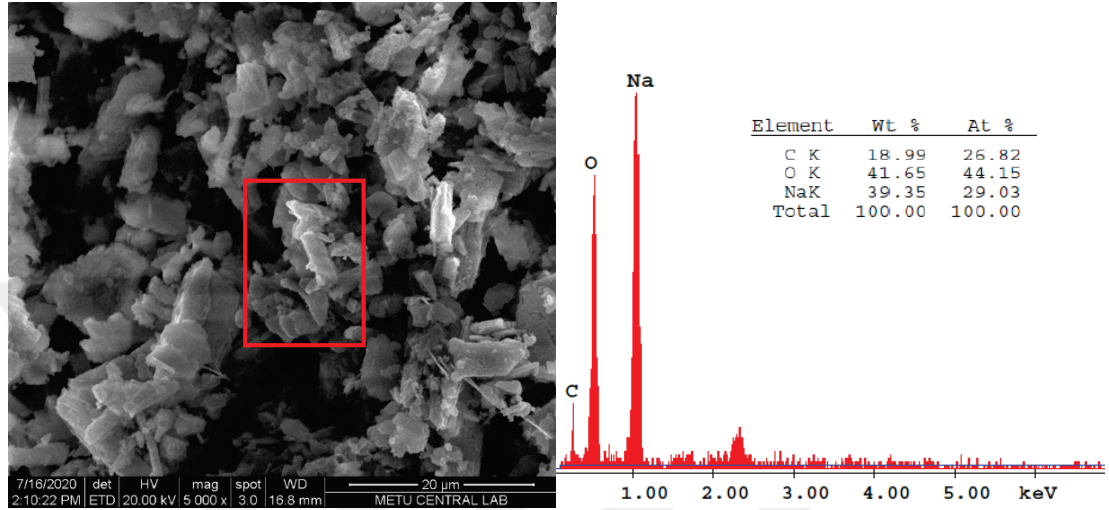


Şekil 6.13. S5 kodlu EGC karışımının 30 gün I-K döngüsü sonrası çatlakların şişme etkisiyle kapanması

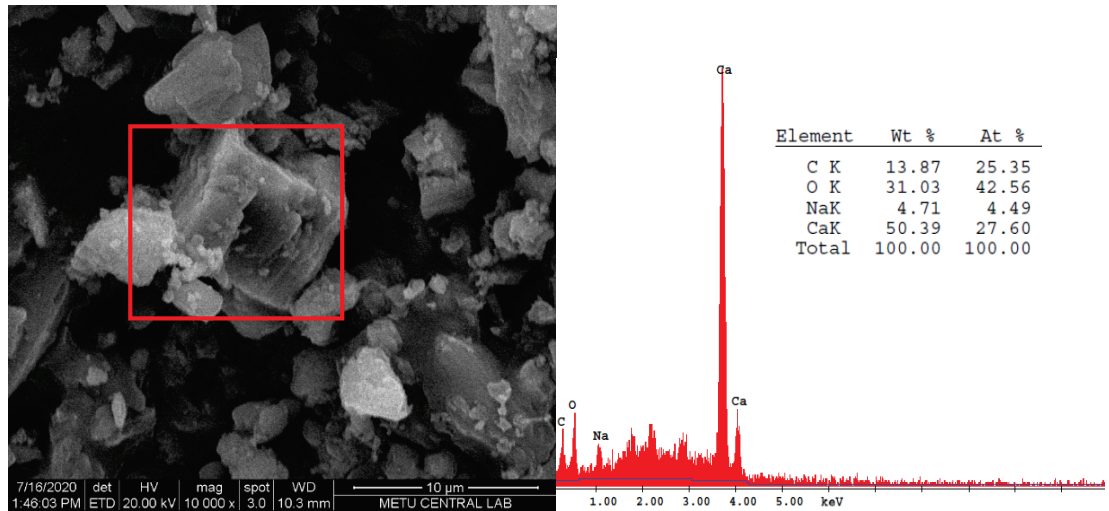
Çatlaklarda beyaz/turuncu çökeltilerin oluşumunun zararlı olabileceği de düşünülmektedir. Jeopolimer yüzeyindeki beyaz çökeltilerin, gözenek çözeltisinden sızan iyonların havadaki CO₂ ile reaksiyonundan kaynaklanan tuz birikintilerinin oluşmasının bir sonucu olduğu bilinmektedir (Provis ve Bernal, 2014). Çimento bağlayıcılı malzemelerde, çiçeklenme sızan kalsiyum iyonlarının su ve CO₂ ile reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır ve genellikle zararsız olarak kabul edilmektedir. Gözenek çözeltisindeki kalsiyum iyonlarının miktarı sınırlıdır ve çiçeklenmenin zararlı etkisi bu nedenle ihmal edilebilir. Ancak jeopolimer bağlayıcılı malzemelerde, alkali iyonlarının yüksek konsantrasyonları nedeniyle çiçeklenmenin önemli bir sorun olabileceği düşünülmektedir (Zhang ve diğerleri, 2013). Zhang ve diğerleri (2014), çiçeklenmenin uçucu kül bazlı jeopolimerlerin basınç dayanımı ve sertliğini olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Çalışma kapsamında her ne kadar mekanik performansı büyük ölçüde etkilemediği düşünülse de özellikle %100 İYA bazlı EGC numunelerin yüzeylerinde çiçeklenmeye bağlı olarak bir miktar aşınma ve küçük kılcal çatlakların oluştuğu ve farklı taşınma özelliklerini etkilediği daha önce belirtilmiştir. Ayrıca çiçeklenmenin etkisinin I-K döngüsüyle çok daha şiddetli olduğu da belirtilmiştir. Bu nedenle oluşan beyaz/turuncu çökelti hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ek olarak çatlak içerisinde oluşan beyaz/turuncu çökeltilerin alkali aktivatör kombinasyonundan bağımsız olarak %100 İYA bazlı karışımlarda daha fazla oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum kendiliğinden iyileşme ürünlerinin çiçeklenmenin etkisiyle karbonatlaşma oluşumu sonucu gerçekleştiği ihtimalini güçlendirmektedir. Bu nedenle EGC'de oluşan beyaz/turuncu çökeltinin çiçeklenmeden kaynaklanıp kaynaklanmadığını belirlemek önemlidir. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kimyasal doğasını tam olarak anlamak için SEM/EDX analizi ve XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi mikro çatlaklarda I-K döngüsü sonucu oluşan beyaz/turuncu çökeltiler önceki araştırmalarda da bildirildiği gibi çiçeklenmenin bir sonucu olabilir. Zhang ve diğerleri (2013), gerçekleştirdikleri bir çalışmada uçucu kül bazlı jeopolimerdeki çiçeklenme ürününün Na₂CO₃.7H₂O olduğunu belirlemiştir. Bu nedenle kendiliğinden iyileşme ürünlerinde bulunan beyaz/turuncu çökeltiler çiçeklenmeden kaynaklanıyorsa nispeten Na veya C miktarı bölgede daha yüksek olmalıdır. Öte yandan, kendiliğinden iyileşme ürünleri çimento esaslı malzemelerde olduğu gibi kalsiyum karbonat oluşumundan kaynaklanıyorsa yüksek bir Ca konsantrasyonuna sahip olmalıdır.

SEM/EDX Analizi

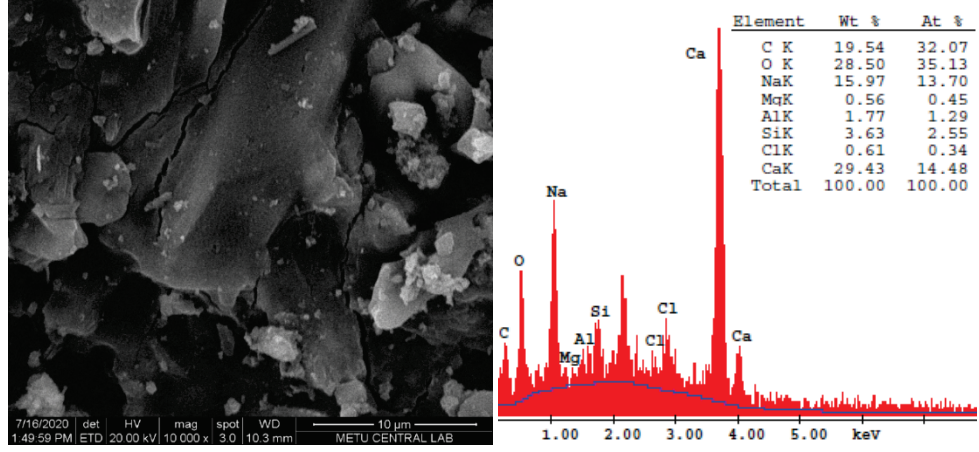
Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da mikro çatlağın iç kısmından ve hemen üzerinden alınan iyileşme ürünlerinin SEM/EDX analizleri sunulmuştur.



Şekil 6.14. Sodyum karbonat (Natrite - Na_2CO_3) oluşumu ve EDX analizi

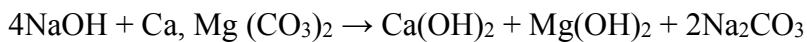
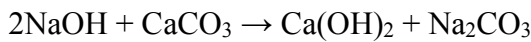


Şekil 6.15. Kalsiyum karbonat (Calcite - CaCO_3) oluşumu ve EDX analizi



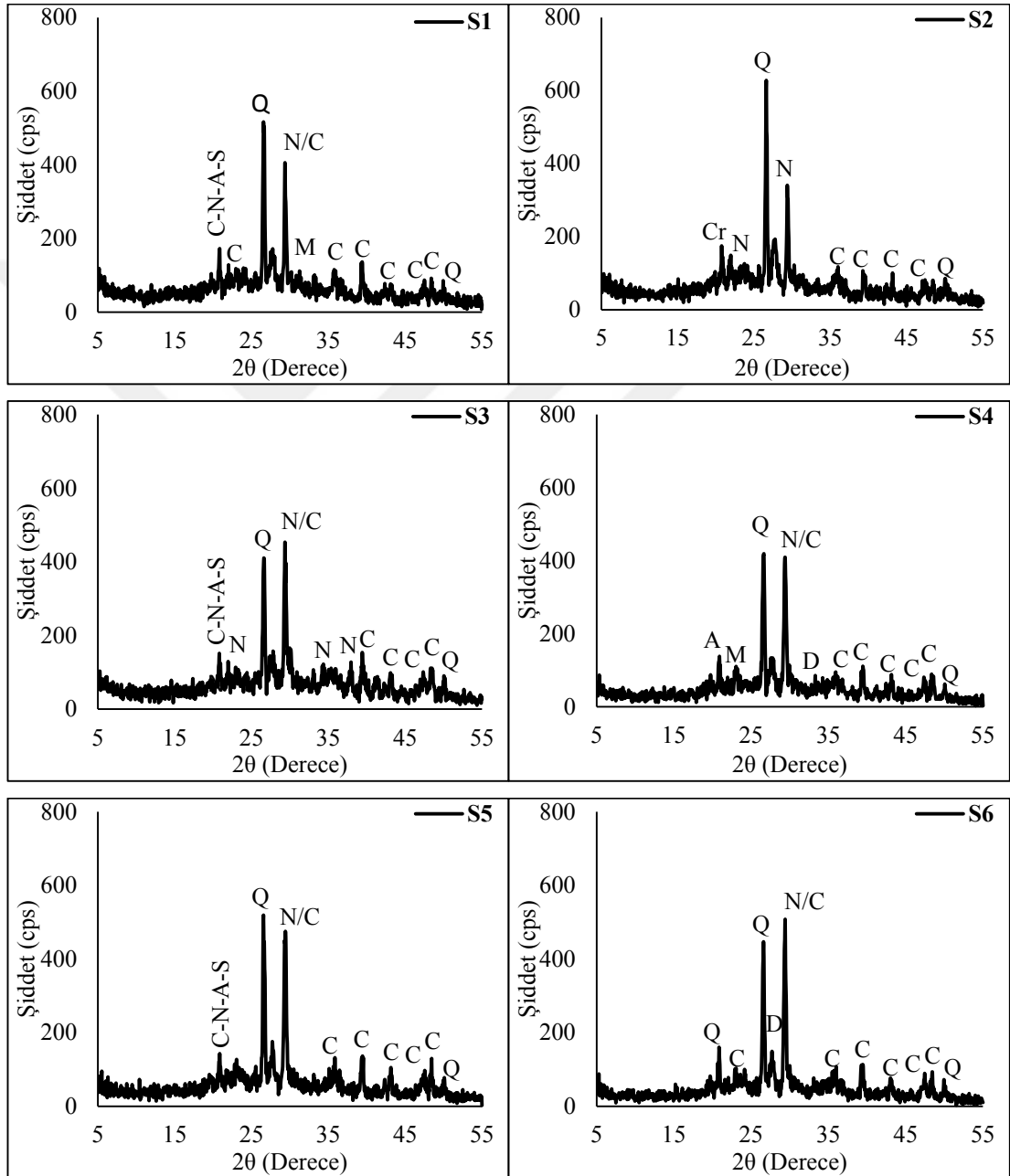
Şekil 6.16. Kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat ürünlerinin birlikte oluşumu

Şekil 6.14'te matris içerisinde çözülmüş olarak bulunan Na^+ iyonlarının havadaki CO_2 'i bağlaması sonucu oluşan (Komnitsas ve Zaharaki, 2007) ve hasarlı numunelerdeki çatlakların kendiliğinden iyileşmesini sağlayan sodyum karbonat minerali görülmektedir. Şekil 6.15'te ise bir diğer kendiliğinden iyileşme ürünü olan kalsiyum karbonat minerali görülmektedir. Kalsiyum karbonat oluşumunun matris boşluk suyu içerisinde bulunan Ca^{+2} iyonlarının atmosferik CO_2 ile reaksiyonu sonucu sonradan oluştuğu Şekil 6.17'de sunulan XRD analizlerinde gösterilmektedir. Ayrıca kalsiyum karbonat oluşan kısımdan alınan EDX analiz sonucuna göre kalsiyum karbonat oluşumunun gözlemlendiği kısımda var olan sodyum, kalsiyum karbonat oluşumuyla beraber sodyum karbonat oluşumunun da gerçekleştiğini göstermekte bu durumda yapılan XRD analizinde aynı 2θ açısında ortaya çıkan kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat minerallerini açıklamaktadır. Yapılan bir çalışmaya göre (Abdel-Gawwad ve diğerleri, 2019), tıpkı bu çalışmada olduğu gibi kalsiyum karbonat oluşumunun zamanla kalsiyum hidroksitle aktivasyonu aşağıda yazılı olduğu şekilde kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonat oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum daha da ilerleyen zamanlarda kalsiyum karbonat miktarının azalarak sodyum karbonat oluşumuna sebep olabileceğini akla getirmiştir.



XRD Analizi

Şekil 6.17’de mikro çatlakın iç kısmından ve hemen üzerinden alınan iyileşme ürünlerinin XRD analizleri sunulmuştur.



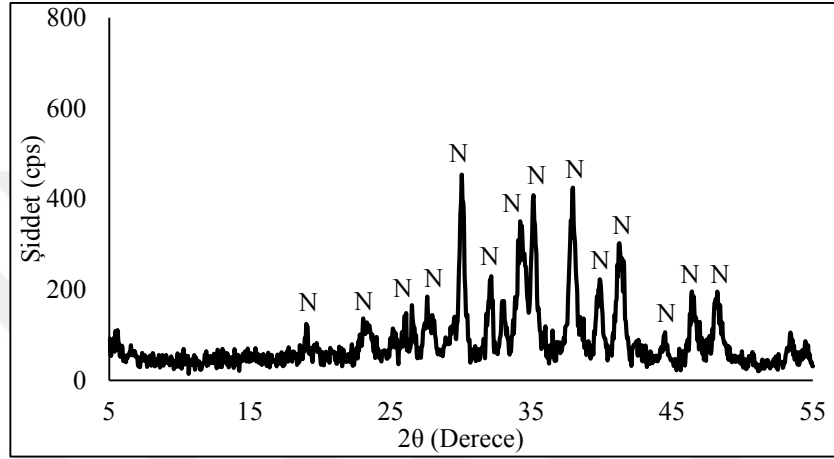
Şekil 6.17. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin XRD analizi (A: Andradite, C: Calcite, Cr: Carnegieite, D: Diopside, M: Muscovite N: Natrite Q: Quartz)

Kendiliğinden iyileşme ürünleri maket bıçağı kullanılarak kazınarak elde edilmiştir. Bu nedenle çatlak içerisindeki kısımlardan numune alırken iyileşen kısımla birlikte EGC matrisinden de bir miktar numunenin koparak geldiği belirtilmelidir. Bundan dolayı iyileşen çatlağın en dış kısmındaki iyileşme ürünlerini belirleyebilmek için daha önce Bölüm 5.3.5'te verilen EGC matrisinin XRD sonuçları ile kıyaslama yapılmıştır. Sonuçlar kıyaslandığında iyileşen kısımlardan alınan numunelerde C-N-A-S, carnegieite, muscovite, andradite, diopside gibi matriste de bulunan ve alkali alüminat silikat hidrat yapıları işaret eden mineraller düşük yoğunluklu şekilde görülmektedir. İyileşen kısımdan toz örneği alınırken bu toz örneğinin altında devam eden jeopolimerizasyon reaksiyonları ile çatlak açıklığı ve derinliğinin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte 29,5 2θ değerindeki pik, iyileşmenin gerçekleştiği yerden alınan numunelerde oldukça öne çıkarak karbonatlaşmanın tüm numunelerde temel iyileşme mekanizması olduğunu göstermektedir (Kan ve diğerleri, 2019; Guo ve Yang, 2020). Söz konusu karbonatlaşma kalsiyum karbonat oluşumu ve sodyum karbonat oluşumu olarak gözlenmiştir. EGC karışımlarında kullanılan bağlayıcı toz malzeme kombinasyonu, cüruf ikamesi, alkali aktivatör tipi ve kombinasyonuna göre kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat oluşumundan birinin baskın olduğu belirlenmiştir.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kullanıldığı S1 ve S2 kodlu EGC karışımları kıyaslandığı zaman cüruf ikameli S1 kodlu karışımın 29,5 2θ değerinde az da olsa %100 İYA bazlı S2 kodlu karışımdan daha yüksek bir karbonatlaşma piki olduğu görülmektedir. Bu durum cüruf ikameli S1 kodlu karışımın cüruf içeriği sayesinde daha fazla Ca^{+2} iyonu sunmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S3 ve S4 kodlu EGC karışımları kıyaslandığı zaman ise 29,5 2θ değerindeki pikler özellikle cüruf ikameli S3 kodlu karışım için spektrum içerisindeki en belirgin pikler haline gelmekte ve bu durum cüruf ve %2 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit ilave edilmesiyle ilişkilendirilmiştir.

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kombinasyonunun kullanıldığı S5 ve S6 kodlu EGC karışımları kıyaslandığı zaman kalsiyum hidroksit miktarının %6 kalsiyum miktarına sahip olacak şekilde toz halde kalsiyum hidroksit eklenerek arttırılmasına karşın kendisiyle reaksiyona girerek bağlayan sodyum silikatın olmayışı kalsiyum hidroksitin bir miktar serbest kalmasına ve doğrudan karbonatlaşma yapmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.18. Çiçeklenme ürünlerinin XRD analizi (N: Natrite)

Şekil 6.18 ise uzun süre tamamen karbonatlaşmaya maruz bırakılmış yüksek sodyum içeriğine sahip bir numunenin yüzeyinden alınmış olup karbonatlaşma piklerinin 2θ ekseninde yeri tespit edilmiş ve iyileşen numunelerin XRD spektrumu üzerindeki karbonatlaşma piklerinin varlığı doğrulanmıştır.

7. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans araştırması altyapı uygulamaları için daha uzun süreli sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi açısından çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesi amacıyla tasarlanmış lif donatılı jeopolimer bağlayıcı kompozitlerin (EGC) geliştirilmesi ve kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesi üzerine odaklanmıştır.

Tez çalışmaları kapsamında çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğa, cam ve beton atıkları sadece tasnifleme, kırma ve öğütme gibi temel ve basit işlemlerden geçirilerek jeopolimerizasyon tekniği aracılığıyla tekrar kullanılarak portland çimentosuna alternatif yeni nesil sürdürülebilir alkali aktif bir bağlayıcı malzeme geliştirilmiştir. Geliştirilen bağlayıcı malzeme %100 oranında, beton atığından elde edilmiş ince geri dönüşüm beton agregaların kullanılmasıyla inşaat yıkıntı atığı bazlı jeopolimerik harç (matris) karışımları geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen harç karışımlar uygun görülen lif donatılarla güçlendirilerek yeni nesil, çevre dostu, farklı kompozisyonlara sahip EGC malzemeleri geliştirilmiştir. Geliştirilen EGC malzemelerin çeşitli mekanik, dayanıklılık ve işlenebilirlik testleri gerçekleştirilmiş ayrıca mikroyapısal analizler gerçekleştirilerek malzeme performansı ortaya konmuştur. Daha sonra geliştirilen EGC malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansı taşınma özellikleri bakımından incelenmiş ve performans değerlendirmeleri yapılarak kendiliğinden iyileşme ürünleri çeşitli mikroyapısal analizler gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiş ve detayları önceki bölümlerde paylaşılan çalışmaların sonuçları her bir bölüm için aşağıda ayrı ayrı özetlenmektedir.

Jeopolimer Bağlayıcı Kompozit Tasarımı

EGC tasarımının geliştirilmesinden önce ana alüminosilikat kaynağı olarak inşaat yıkıntı atıklarının kullanıldığı jeopolimer bağlayıcıların fizibilitesini doğrulamak için bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. İnşaat yıkıntı atıkları kırma işleminin ardından optimum öğütme süresi olarak belirlenen 1 saat süre boyunca bilyalı değirmende ayrı ayrı öğütülmüştür. İnşaat yıkıntı atıklarının farklı doğaları nedeniyle farklı tane boyutu

dağılımlarına ve yüzey özelliklerine ulaşacağı öngörülmüş olsa da her malzemenin benzer tane boyutu dağılımına sahip olması için özel bir dikkat gösterilmemiştir. Bunun nedeni belirli bir yapı yıkıldığında/inşa edildiğinde, farklı türdeki atıklar birlikte elde edilmesidir. Jeopolimer yapının ne derecede oluştuğunun anlaşılabilmesi için ön çalışmalarda kapsamlı literatür araştırmaları sonucunda alkali aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. İnşaat yıkıntı atıklarının tekli olarak kullanılmasıyla jeopolimer hamur karışımları üretilmiş ve ısıl küre bırakıldıktan sonra basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çatı kiremiti, harman tuğla, delikli tuğla, cam ve beton tozlarından sırasıyla en yüksek 68,1, 55,1, 60,7, 28,5 ve 29 MPa basınç dayanım sonuçları elde edilmiştir. Böylelikle inşaat yıkıntı atıklarında bulunan inorganik alüminosilikat malzemelerin jeopolimer üretiminde bağlayıcı toz malzeme olarak yeniden kullanılmasının fizibilitesi doğrulanmıştır. Çatı kiremiti, harman tuğla ve delikli tuğla jeopolimerizasyona içerik ve boyut olarak daha uygun alüminosilikat bazlı kaynak malzemeler olduğundan dolayı beton tozu ve cam tozuna göre daha yüksek basınç dayanımı sonucu göstermiştir.

İnşaat yıkıntı atıklarının bağlayıcı toz malzeme olarak yeniden kullanılmasının fizibilitesinin doğrulanmasının ardından beton tozunun cam tozu ile birlikte alüminosilikat kaynağı olarak kullanıldığı takdirde daha yüksek sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüştür. Beton tozu ve cam tozunun birlikte kullanımı ve tuğla tozlarının da bu başarılı kombinasyonun içine dâhil edilmesi adına, inşaat yıkıntı atıklarının belirli oranlarda karıştırılması ve karıştırılan bu malzemelerin alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin kullanıldığı çözeltilerle aktifleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda beş farklı İYA malzemesinin birbirleri arasında optimum oranları belirlenmiş ve mekanik özelliklerine bakılarak jeopolimer reaksiyonlarında gösterdiği davranışlar hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Çalışma kapsamında inşaat yıkıntı atıklarının farklı oranlarda karıştırılması sonucunda 37,3-56,5 MPa arasında değişken basınç dayanımı sonuçları elde edilmiş ve 56,5 MPa dayanım veren toz bağlayıcı karışım optimum bağlayıcı toz karışım olarak belirlenmiştir.

Optimum bağlayıcı karışım oranının ısıl kür ile belirlenmesinin ardından harç karışımları geliştirme kapsamında %100 oranında İYA'dan elde edilmiş ince geri dönüşüm beton agregaların kullanılmasıyla jeopolimerik harç (matris) karışımlarının

geliştirilerek mekanik performansları belirlenmiştir. Kaba agrega, kararlı durum çoklu çatlak oluşumunun elde edilmesinde bir dezavantaj olan matris kırılma tokluğunu arttırma eğiliminde olduğu için kullanılmamıştır. Bu nedenle karışımlarda maksimum tane boyutu 2 mm olan ince geri dönüşüm beton agregası kullanılmıştır. Ayrıca jeopolimer reaksiyonları için yadsınamaz derecede önemli olan ısıl kür, beraberinde yüksek oranda enerji sarfıyatı ve kısıtlı kürleme koşulları getirdiği için karışım içeriği, aktivatör tipi ve oranları gibi çeşitli parametrelerin optimize edilmesiyle, ortam koşullarında da yüksek dayanımlar elde edilebileceği düşünülmüştür. Bu kapsamda detaylı literatür araştırmaları sonucunda ön çalışmalarda alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksite ek olarak sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak laboratuvar koşullarında ortam küründe yeterli basınç dayanımlarının sağlanacağı düşünülmüştür. Çalışma kapsamında inşaat yıkıntı atıklarının alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak aktifleştirilmesiyle 27,2 MPa, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilmesiyle 29,7 MPa, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak aktifleştirilmesiyle 34,6 MPa basınç dayanımı sonucu gösterdiği belirlenmiştir. Daha sonra karışımlara %20 oranında cüruf ikame edilmiş ve harç karışımların performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda cüruf ikamesinin alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit kullanılarak aktifleştirilmesiyle 33,9 MPa, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilmesiyle 39,7 MPa, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit kullanılarak aktifleştirilmesiyle 48,4 MPa basınç dayanımı sonucu gösterdiği belirlenmiştir.

Daha sonra geliştirilen matris, seçilmiş liflerle deneysel tekniklerle ölçülerek performansları belirlenmiştir. Polietilen lif kullanılarak üretilen kompozitin yüksek sünekliği ve çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyetini daha iyi yansıtabildiği görülmüştür. Bununla birlikte NM kullanılarak üretilen kompozitlerin eğilme dayanımının düşük olmasına karşın yüksek sünekliği ve çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyetini en az PE lif kadar iyi yansıtabildiği görülmüştür. Bu nedenle EGC'nin maliyetini azaltmak amacıyla PE lifi çok daha ucuz olan NM lifi ile karıştırılarak performansının incelenmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda PE lifi hacimce %1,25 oranında NM lifi ise hacimce %0,75 oranında kullanılarak kompozit üretimi

gerçekleştirilmiştir. PE ve NM liflerin karıştırılmasıyla tatmin edici mekanik özelliklerin elde edilmiş ve nihai EGC karışımlarında PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasına karar verilmiştir.

Jeopolimer Bağlayıcı Kompozitlerin Mekanik Performansı

EGC malzemelerin yaygın kullanımlarının artırılabilmesi ve gerçek saha koşulları altında nihai performanslarının belirlenebilmesi adına detaylı mekanik ve işlenebilirlik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Matris tasarımı aşamasında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı, sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı ve sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Her bir aktivatör kombinasyonunun kullanıldığı çalışmadan en iyi performansa sahip %100 İYA bazlı ve %20 cüruf ikameli bağlayıcı toz karışıma sahip 2 karışım seçilerek seçilen karışımlara PE lifinin hacimce %1,25 oranında NM lifinin ise hacimce %0,75 oranında kullanılmasıyla farklı kompozisyonlara sahip 6 farklı EGC karışım üretilmiştir. EGC karışımlarının Marsh-hunisi ve mini çökme-yayılma deneyleriyle işlenebilirlik özellikleri, vicat cihazıyla priz süreleri belirlenmiştir. Harçların akış süresi kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna ve cüruf ikamesine bağlı olarak 266-368 saniye aralığında değişmiştir. Ayrıca mini çökme-yayılma çapı da kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna ve cüruf ikamesine bağlı olarak 115-268 mm arasında değişmiştir. Aynı şekilde kullanılan alkali aktivatör kombinasyonuna ve cüruf ikamesine bağlı olarak priz başlama ve sona erme süresi sırasıyla 20-43 ve 31-62 dk arasında değişmiştir. EGC karışımlarının mekanik performansı basınç, dört noktalı eğilme ve yarmada çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Kullanılan aktivatör tipi ve kombinasyonlarının ve cüruf ikamesinin jeopolimerlerin basınç dayanımı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. EGC kompozitinin basınç dayanımı, kullanılan aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesine bağlı olarak 7 günde 13,6-28,2 MPa, 28 günde 25,2-42,1 MPa ve 90 günde 27,8-53,5 MPa arasında değişim göstermiştir. Tüm karışımlarda artan numune yaşıyla birlikte basınç dayanım sonuçlarının da arttığı görülmektedir. Bu durum ortam koşullarında kürlenmiş jeopolimerlerin jeopolimerizasyon reaksiyonlarının ileriki yaşlarda da devam ettiğini göstermektedir. Kullanılan aktivatör kombinasyonunun ve cüruf ikamesinin

jeopolimerlerin eğilme dayanımı ve sünekliği üzerinde de önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. EGC kompozitinin eğilme dayanımı ve orta açıklık deformasyonu kullanılan aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesine bağlı olarak 7 günde sırasıyla 4,3-8,7 MPa ve 25,2-45,9 mm, 28 günde sırasıyla 6,2-9,6 MPa ve 32,8-46,5 mm, 90 günde sırasıyla 8,7-12,8 MPa ve 23,6-48,3 mm arasında değişim göstermiştir. Kullanılan alkali aktivatör kombinasyonunun ve cüruf ikamesinin matris-lif arayüz özelliklerini büyük ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte alkali aktivatör kombinasyonundan ve cüruf ikamesinden bağımsız olarak EGC numunelerin nihai eğilme dayanımlarının her yaş için ilk çatlak mukavemetinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum tüm EGC karışımlarının şekil değiştirme sertleşmesi davranışına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm numuneler için çoklu mikro çatlak oluşumu kolaylıkla gözlemlenebilmiştir. Sonuç olarak yüksek eğilme dayanımına ve yüksek sünekliğe sahip, aşırı eğilme yüklemeleri altında dahi çoklu mikro çatlak hasarı oluşturma ve şekil değiştirme sertleşmesi özelliğinden ödün vermeyen ve kararlı durum düz çatlak oluşumu gösteren farklı kompozisyonlara sahip EGC karışımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen EGC karışımlarının molekül ve bağ yapısı FTIR analiziyle, sentezlenen ürünler XRD analiziyle, mikroyapısı SEM analiziyle ve element analizi EDX analiziyle belirlenmiştir.

Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozitlerin Kendiliğinden İyileşme Performansı

EGC'nin kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından incelendiği herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Tez çalışmaları kapsamında literatürdeki bu açığın giderilmesi adına da ilk defa bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. EGC karışımlarının kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesi amacıyla ilk olarak üretilen silindir numuneler 7 gün ortam şartlarında başlangıç küreine tabi tutularak mikro çatlaklar oluşturmak için yarmada çekme yüklemesi altında belirli bir deformasyon seviyesine ulaşınca kadar önyüklemeye uygulanmıştır. Önyüklemeye uygulanan ve sağlam numuneler üzerinde kılcal su emme, elektriksel empedans, hızlı klorür iyonu geçirirliiliği ve su emme testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra önyüklemeye uygulanan ve sağlam numuneler kendiliğinden iyileşme performansının taşınma özellikleri bakımından değerlendirilmesi süresince gerçek saha koşullarını daha iyi temsil ettiği düşünülen

çevresel kür koşulu olan ıslanma-kuruma (I-K) döngüsüne maruz bırakılmıştır. Kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilebilmesi için tüm testler 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında tekrarlanmıştır. Kendiliğinden iyileşme nedeniyle taşınma özelliklerindeki değişim, sağlam ve önyükleme uygulanan numuneler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

EGC karışımlarda kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesi değerleri taşınma özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Tüm numunelerden elde edilen değerler genel itibariyle incelendiğinde 7 günlük başlangıç kürü ve başlangıç kürüne ek olarak 10, 30, 60 ve 90 günlük ilave I-K döngüsü sonrasında sonuçların önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Bu değişim sürekli artış ya da sürekli düşüş şeklinde olmamıştır. Bu durum kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesinden bağımsız olarak tüm karışımlar için benzer olmuştur. EGC numunelerinin artan numune yaşıyla birlikte değişken sonuçlar sergilemesi birbirleriyle kıyaslanmasını ve kendiliğinden iyileşme performansının gözlemlenmesini zorlaştırmıştır. Ayrıca tüm EGC karışımlarının mikro çatlaklarında I-K döngüsü sonrası beyaz/turuncu çökeltiler olduğu gözlemlenmiştir. Bazı çatlaklar beyaz/turuncu çökelti ile tamamen kapanırken bazı çatlaklar sadece kısmen kapanmıştır. Bu değişkenliğe neden olan faktörler net olmasa da EGC'de kendiliğinden iyileşmenin, mikro çatlakların çoğunun tamamen kapanabildiği ECC'ye kıyasla sınırlı olduğu düşünülmektedir. Bu sınırlı kendiliğinden iyileşme ürünü oluşumu EGC'de daha düşük performans geri kazanımı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada sürekli hava kürüne maruz bırakılan numunelerde herhangi bir çökelti oluşumu gözlemlenmemiş olup bu nedenle suyun varlığının EGC'nin kendiliğinden iyileşmesinde, çimento bağlayıcılı malzemelere benzer şekilde gerekli olduğu belirlenmiştir. Sürekli hava kürüne maruz bırakılan EGC karışımlarda herhangi bir çökelti oluşumunun gözlemlenmemesi çiçeklenmenin etkisinin sürekli hava kürüne maruz kalan EGC karışımlarda çok daha az olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte kullanılan katı alüminosilikat kaynağı ve alkali aktivatörün tipleri, alkali aktivatörün konsantrasyonu, kür tipi, sıcaklığı ve süresi, bileşenlerin karışım oranları gibi birçok parametre oluşan nihai ürünü ve kendiliğinden iyileşme performansını büyük ölçüde etkileyecektir. Bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda kendiliğinden iyileşmenin gerçekleşmesi için hangi maruz kalma koşulunun daha uygun ve etkili olduğu bu parametreler doğrultusunda değişkenlik gösterecektir.

Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kimyasal içeriğinin ve herhangi bir kristal faz olup olmadığını belirlemek için SEM/EDX ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kendiliğinden iyileşmenin devam eden jeopolimerizasyon reaksiyonları ve karbonatlaşmanın etkisiyle gerçekleştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte karbonatlaşmanın tüm numunelerde temel iyileşme mekanizması olduğu belirlenmiştir. Söz konusu karbonatlaşma kalsiyum karbonat oluşumu ve sodyum karbonat oluşumu olarak gözlenmiştir. EGC karışımlarında kullanılan bağlayıcı toz malzeme kombinasyonu, cüruf ikamesi, alkali aktivatör tipi ve kombinasyonuna göre kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat oluşumundan birinin baskın olduğu belirlenmiştir.

EGC karışımlarda kullanılan alkali aktivatör kombinasyonu ve cüruf ikamesi taşınma özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çalışma kapsamında kendiliğinden iyileşme davranışının incelenmesi adına çeşitli test yöntemleri uygulanmış ancak hızlı klorür iyonu geçirimsizliği testinin jeopolimerler için uygun bir test yöntemi olmadığı belirlenmiştir. EGC karışımların kendiliğinden iyileşme performansının gözlemlenmesinde her ne kadar çiçeklenme, boşluk miktarı, boşluk suyu çözeltisinin alkali iyon miktarı vb. faktörlere bağlı olarak belirli zorluklar yaşansa da kılcal su emme, elektriksel empedans ve su emme testlerinde kendiliğinden iyileşme bir seviyeye kadar incelenebilmiştir. Bununla birlikte sonuçların varyasyonlu olduğu da belirtilmelidir. En kullanışlı, hızlı ve düzgün sonuç veren yöntemin test edilecek malzemelerde kullanılan bağlayıcı malzeme tipine, alkali aktivatör kombinasyonuna ve sistemdeki kalsiyum miktarına göre karar verilmesi gerekmektedir. Ayrıca kendiliğinden iyileşme performansının daha verimli bir şekilde değerlendirilebilmesi için çalışma kapsamında kullanılan testlere eş zamanlı olarak kendiliğinden iyileşmenin mekanik özellikler bakımından incelenmesi de kendiliğinden iyileşme performansının daha etkili bir biçimde belirlenebilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Gawwad, H. A., Rashad, A. M., & Heikal, M. (2019). Sustainable utilization of pretreated concrete waste in the production of one-part alkali-activated cement. *Journal of Cleaner Production*, 232, 318-328.
- Abrams, D. A. (1913). Tests of bond between concrete and steel. Doctoral dissertation. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- ACI 544.1R-96, (1996). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- Adamson, A. W. (1973). Physical chemistry, 2nd edition, Academic Press, Orlando, USA.
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, 718-729.
- Ahmed, S. F. U., & Maalej, M. (2009). Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 23(1), 96-106.
- Ahmed, S. F. U., Maalej, M., & Paramasivam, P. (2007). Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash. *Construction and building materials*, 21(5), 1088-1097.
- Aldea, C. M., Song, W. J., Popovics, J. S., & Shah, S. P. (2000). Extent of healing of cracked normal strength concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 12(1), 92-96.
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 910-921.

- Alhozaimy, A. M., Soroushian, P., & Mirza, F. (1996). Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*, 18(2), 85-92.
- Ali, M. K., Abu-Tair, A. I., Kinuthia, J. M., & Babecki, R. (2015). Self-healing and strength development of geopolymer concrete made with Waste by products. *Building Research & Information*, 43(2), 253-262.
- Allahverdi, A., & Kani, E. N. (2013). Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer cements. In *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Capítulo 18, 439- 475.
- Allahverdi, A., & Najafi Kani, E. (2009). Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 154-160.
- Allahverdi, A., & Škvára, F. (2001). Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements, part I. *Ceramics-Silikáty*, 45(3), 81-88.
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A. P., Cundy, A. B., Tsioulou, O. T., & Al-Rekabi, S. (2018). A novel corrosion resistant repair technique for existing reinforced concrete (RC) elements using polyvinyl alcohol fibre reinforced geopolymer concrete (PVAFRGC). *Construction and Building Materials*, 164, 603-619.
- Alonso, S., & Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47(1-2), 55-62.
- Alyousif, A., Lachemi, M., Yildirim, G., & Şahmaran, M. (2015). Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(3), 112-123
- ASTM Standard C1202. (1997). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM Standard C1585. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard C39. (2003). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM Standard C642. (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D6272-10. (2010). Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials by four point bending. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.
- Aveston, J., & Kelly, A. (1973). Theory of multiple fracture of fibrous composites. *Journal of Materials Science*, 8(3), 352-362.
- Aveston, J., Cooper, G.A., Kelly, A. (1971). Single and multiple fracture. The properties of fiber composites, 15-26.
- Babu, D. V. (2018). Assessing the performance of molarity and alkaline activator ratio on engineering properties of self-compacting alkaline activated concrete at ambient temperature. *Journal of Building Engineering*, 20, 137-155.
- Bădănoiu, A. I., Al-Saadi, T. H. A., & Voicu, G. (2015). Synthesis and properties of new materials produced by alkaline activation of glass cullet and red mud. *International Journal of Mineral Processing*, 135, 1-10.
- Baker, I. (2018). Fifty materials that make the world. Springer International Publishing, Cham.
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete research*, 35(6), 1224-1232.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120.

- Barbosa, V. F., MacKenzie, K. J., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), 309-317.
- Bentur, A., & Mindess, S. (1990). *Fibre reinforced cementitious composites*. Elsevier Applied Science, Essex, England.
- Bernal, S. A., de Gutiérrez, R. M., & Provis, J. L. (2012). Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials*, 33, 99-108.
- Betterman, L. R., Ouyang, C., & Shah, S. P. (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials*, 2(2), 53-61.
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., & Ramezaniapour, A. A. (2011). Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 251-260.
- Brandeis, F. (1937). Autogenous healing of concrete. *Beton und Eisen*, 36(12).
- Brough, A. R., & Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and concrete research*, 32(6), 865-879.
- Brown, R., Shukla, A., & Natarajan, K. R. (2002). Fiber reinforcement of concrete structures. University of Rhode Island Transportation Center (URITC) Project No. 536101, Kingston, R.I.
- Buchwald, A., Hilbig, H., & Kaps, C. (2007). Alkali-activated metakaolin-slag blends - performance and structure in dependence of their composition. *Journal of materials science*, 42(9), 3024-3032.
- Chan, C. (1998). Use of recycled aggregate in shotcrete and concrete. Master's dissertation. University of British Columbia, Canada.

- Chasioti, S. G., & Vecchio, F. J. (2017). Effect of Fiber Hybridization on Basic Mechanical Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*, 114(3), 375-384.
- Chassevent, L. (1937). Hydraulicity of slags. *Comptes Rendus*, 205, 670-672.
- Choi, J. I., Lee, B. Y., Ranade, R., Li, V. C., & Lee, Y. (2016). Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced alkali-activated slag-based composite. *Cement and Concrete Composites*, 70, 153-158.
- Choi, J. I., Song, K. I., Song, J. K., & Lee, B. Y. (2016). Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites. *Composite Structures*, 138, 116-121.
- Choi, S. J., Choi, J. I., Song, J. K., & Lee, B. Y. (2015). Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite. *Construction and Building Materials*, 96, 112-118.
- Clear, C. A. (1985). The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete, USA: Wexham Springs: Cement and Concrete Association.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 23(8), 2869-2876.
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., De La Torre, A. G., Aranda, M. A. G., & Palomo, A. (2007). An XRD study of the effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and concrete research*, 37(5), 671-679.
- Curosu, I., Liebscher, M., Mechtcherine, V., Bellmann, C., & Michel, S. (2017). Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers. *Cement and Concrete Research*, 98, 71-81.
- Davidovits J. (1994). Properties of geopolymer cements. *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes* (edited by Krivenko), Kiev, Ukraine, 1, 131-149.

- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. *Geopolymer '99 International Conference, France*, 99(292), 9-39.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institut Geopolymere, Saint-Quentin, France.
- Davidovits, J. (Eds.). (2015). *Geopolymer Chemistry and Applications*. 4th edition. Institut Geopolymere, Saint-Quentin, France.
- De Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*, 23(2), 872-877.
- De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Schlangen, E. (Eds.). (2013). *Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials (Vol. 11)*. Springer Science & Business Media.
- Deja, J. (2002). Carbonation aspects of alkali activated slag mortars and concretes. *Silicates industriels*, (3-4), 37-42.
- Dhir, R. K., Sangha, C. M., & Munday, J. G. (1973). Strength and deformation properties of autogenously healed mortars. In *Journal Proceedings*, 70(3), 231-236.
- Dombrowski, K., Buchwald, A., & Weil, M. (2007). The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3033-3043.
- Duxson, P., & Van Deventer, J. S. J. (2009). Commercialization of geopolymers for construction—opportunities and obstacles. In *Geopolymers: Structure,*

- processing, properties and industrial applications, J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, Eds. Cambridge (UK): Woodhead Publishing, 379–400.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and Concrete Research*, 37 (12), 1590-1597.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Separovic, F., & van Deventer, J. S. (2005). ²⁹Si NMR study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels. *Langmuir*, 21(7), 3028-3036.
- Edvardsen C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 96(4), 448–455.
- El-Naggar, M. R., & El-Dessouky, M. I. (2017). Re-use of waste glass in improving properties of metakaolin-based geopolymers: Mechanical and microstructure examinations. *Construction and Building Materials*, 132, 543-555.
- Emmons, P. H., Vaysburd, A. M., & McDonald, J. E. (1993). Rational approach to durable concrete repairs. *Concrete International*, 15(9), 40-45.
- EN, T. 196-1, (2016) Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Turkish Standard Institution, Ankara.
- Environment, U. N., Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.
- Escalante-Garcia, J. I. (2015). Overview of potential of urban waste glass as a cementitious material in alternative chemically activated binders. *Journal of Chinese Ceramic Society* 43(10), 1441-1448.

- Estefen, S. F., Lourenço, M. I., Feng, J., Paz, C. M., & Bessa de Lima Jr, D. (2016). Sandwich pipe for long distance pipelines: flow assurance and costs. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, 49965, V005T04A025.
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and concrete composites*, 29(5), 397-401.
- Evangelista, L., & De Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.
- Evangelista, L., & De Brito, J. M. C. L. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129-172.
- Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., & Lopez-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 103(2), 106.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research*, 35(10), 1984-1992.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and concrete research*, 35(6), 1204-1209.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., & Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1313-1321.
- Ferrara, L., Krelani, V., & Carsana, M. (2014). A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, 68, 535-551.

- Fletcher, R. A., MacKenzie, K. J., Nicholson, C. L., & Shimada, S. (2005). The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*, 25 (9), 1471-1477.
- Fumoto, T., & Yamada, M. (2002). Influence of quality of recycled fine aggregate on properties of concrete. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University*, 43, 97-103.
- Gao, D. Y., Lv, M., Yang, L., Tang, J., Chen, G., & Meng, Y. (2020). Experimental Study of Utilizing Recycled Fine Aggregate for the Preparation of High Ductility Cementitious Composites. *Materials*, 13(3), 679.
- García-Lodeiro, I., Palomo, A. Y., & Fernández-Jiménez, A. (2007). Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 175-183.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). Compatibility studies between NASH and CASH gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 923-931.
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete research*, 34(9), 1489-1498.
- Glanville, W. H. (1931). The Permeability of Portland Cement Concrete, *Building Research. Technical Paper* (3), 1-62.
- Glukhovsky, V. D. (1959). *Soil silicates*. Gosstroyizdat Ukrainy Publishing, Kiev.
- Glukhovsky, V. D. (1994). Ancient, modern and future concretes. In *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, VIPOL Stock Company, Kiev, Ukraine*, 1–9.
- Goberis, S., & Antonovich, V. (2004). Influence of sodium silicate amount on the setting time and EXO temperature of a complex binder consisting of high-aluminate cement, liquid glass and metallurgical slag. *Cement and concrete research*, 34(10), 1939-1941.

- Goldfein, S. (1965). Fibrous reinforcement for Portland cement. *Modern Plastics*, 42(8), 156-160.
- Golley, C. R. L., Kostuch, J. A., & Purdey, J. A. (1999). Production of slaked lime. U.S. Patent No. 5,965,103. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC.
- Gómez-Soberón, J. M. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and concrete research*, 32(8), 1301-1311.
- González-García, D. M., Téllez-Jurado, L., Jiménez-Álvarez, F. J., & Balmori-Ramírez, H. (2017). Structural study of geopolymers obtained from alkali-activated natural pozzolan feldspars. *Ceramics International*, 43(2), 2606-2613.
- Gopalaratnam, V. S., & Shah, S. P. (1987). Tensile failure of steel fiber-reinforced mortar. *Journal of Engineering Mechanics*, 113(5), 635-652.
- Gottfredsen, F. R., & Thøgersen, F. (1994). Recycling of concrete in aggressive environment. Third International RILEM Symposium on “Demolition and Reuse of Concrete and Masonry”, 309-317.
- Granizo, M. L., Alonso, S., Blanco-Varela, M. T., & Palomo, A. (2002). Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction. *Journal of the American Ceramic Society*, 85(1), 225-231.
- Gray, R. J. (1984). Autogenous healing of fibre/matrix interfacial bond in fibre-reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, 14(3), 315-317.
- Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 221(582-593), 163-198.
- Gruskovnjak, A., Lothenbach, B., Holzer, L., Figi, R., & Winnefeld, F. (2006). Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in cement research*, 18(3), 119-128.

- Guo, X., & Yang, J. (2020). Intrinsic properties and micro-crack characteristics of ultra-high toughness fly ash/steel slag based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 230, 116965.
- Guo, X., Shi, H., Chen, L., & Dick, W. A. (2010). Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 480-486.
- Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2010). Effect of alumina release rate on the mechanism of geopolymer gel formation. *Chemistry of Materials*, 22(18), 5199-5208.
- Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2011). The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 210-216.
- Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2011). Time-resolved and spatially-resolved infrared spectroscopic observation of seeded nucleation controlling geopolymer gel formation. *Journal of colloid and interface science*, 357(2), 384-392.
- Hamoush, S., Abu-Lebdeh, T., & Cummins, T. (2010). Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2285-2293.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- Hannant, D. J., & Keer, J. G. (1983). Autogenous healing of thin cement based sheets. *Cement and Concrete Research*, 13(3), 357-365.
- 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.

- Hansen, T. C., & Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete international*, 5(1), 79-83.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- Hasaba, S., Kawamura, M., Toriik, K., & Takemoto, K. (1981). Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 3, 55-60.
- Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?. *Materials and structures*, 31(8), 563.
- Heiman, J. L., & Koerstz, P. (1991). Performance of polymer-modified cementitious repair mortars in chloride contaminated concrete. *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering*, 33(3), 169-175.
- Hendricks, W. M., Bell, A. T., & Radke, C. J. (1991). Effects of organic and alkali metal cations on the distribution of silicate anions in aqueous solutions. *The Journal of Physical Chemistry*, 95(23), 9513-9518.
- Hou, T. C. (2008). *Wireless and Electromechanical Approaches for Strain Sensing and Crack Detection in Fiber Reinforced Cementitious Materials*. Doctoral dissertation. University of Michigan, Michigan.
- Huang, X., Ranade, R., Ni, W., & Li, V. C. (2013). Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. *Construction and Building Materials*, 44, 757-764.
- Huang, X., Ranade, R., Zhang, Q., Ni, W., & Li, V. C. (2013). Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 48, 954-960.
- Hyde, G. W., & Smith, W. J. (1889). Results of experiments made to determine the permeability of cements and cement mortars. *Journal of the Franklin Institute*, 128(3), 199-207.

- Ibeh, C. C. (2011). Thermoplastic materials: properties, manufacturing methods, and applications. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Idorn, G. M., & Roy, D. M. (1984). Factors affecting the durability of concrete and the benefits of using blast-furnace slag cement. *Cement, concrete and aggregates*, 6(1), 3-10.
- Iler, K. R. (1979). The chemistry of silica. Solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica. John Wiley and Sons, New York.
- Jacobsen, S., Marchand, J., & Hornain, H. (1995). SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1781-1790.
- Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions—management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041-4052.
- Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. *Cement and concrete research*, 31(10), 1487-1499.
- Kan, L. L., Lv, J. W., Duan, B. B., & Wu, M. (2019). Self-healing of Engineered Geopolymer Composites prepared by fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 125, 105895.
- Kanellopoulos, A., Qureshi, T. S., & Al-Tabbaa, A. (2015). Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*, 98, 780-791.
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and concrete research*, 33(5), 703-711.
- Katz, A., & Baum, H. (2006). Effect of high levels of fines content on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 103(6), 474.

- Kayali, O. (2008). Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Construction and building materials*, 22(12), 2393-2399.
- Keser, B. Y. (2010). Kaliteli cam üretiminde küçük boyutlu silis kumu kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2004). Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 16(4), 331-340.
- Khan, M. Z. N., Hao, Y., & Hao, H. (2016). Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low calcium fly ash. *Construction and Building Materials*, 125, 809-820.
- Khater, H. M. (2012). Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 92-101.
- Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and concrete research*, 35(4), 763-769.
- Kim, Y. Y., Kong, H. J., & Li, V. C. (2003). Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting. *ACI Materials Journal*, 100(6), 511-518.
- Ko, Y. H., Ahart, M., Ko, J. H., & Song, J. (2017). Investigation of polymorphism for amorphous and semi-crystalline poly (-ethylene terephthalate-) using high-pressure Brillouin spectroscopy. *Journal of the Korean Physical Society*, 70(4), 382-388.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals engineering*, 20(14), 1261-1277.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & 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, H. J., Bike, S. G., & Li, V. C. (2003). Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 301-309.
- Kou, S. (2006). Reusing recycled aggregates in structural concrete. Doctoral dissertation. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete composites*, 31(9), 622-627.
- Krivenko, P. V. (1994). Alkaline cements. In *Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, (edited by Krivenko), Kiev, Ukraine, 1, 11-129.
- Kuehl, H. (1998). Slag cement and process of making the same. U.S. Patent No. 900,939. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC.
- Kunieda, M., & Rokugo, K. (2006). Recent progress on HPFRCC in Japan. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 19-33.
- Lauer, K. R. (1956). Autogenous healing of cement paste. *ACI Journal Proceedings*, 52(6), 1083-1098.
- Law, D. W., Adam, A. A., Molyneaux, T. K., Patnaikuni, I., & Wardhono, A. (2015). Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete. *Materials and Structures*, 48(3), 721-731.
- Lawrence, M., & Vivian, H. E. (1961). Reactions of various alkalis with silica. *Australian Journal of Applied Science* 12(1): 96-103.
- Le Bourhis, E. (2014). *Glass: mechanics and technology*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Lee, B. Y., Cho, C. G., Lim, H. J., Song, J. K., Yang, K. H., & Li, V. C. (2012). Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar—a feasibility study. *Construction and Building Materials*, 37, 15-20.

- Lee, G., Han, D., Han, M. C., Han, C. G., & Son, H. J. (2012). Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 34, 313-320.
- Lee, W. H., Wang, J. H., Ding, Y. C., & Cheng, T. W. (2019). A study on the characteristics and microstructures of GGBS/FA based geopolymer paste and concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 807-813.
- Leite, M. B. (2001). Evaluation of the mechanical properties of concretes made with recycled aggregates form construction and demolition waste. Doctoral dissertation. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Lepech, M. D., Li, V. C., Robertson, R. E., & Keoleian, G. A. (2008). Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Materials Journal*, 105(6), 567.
- Levy, S., & Helène, P. (2007). Durability of concrete mixed with fine recycled aggregates. *Exacta*, 5(1), 25-34.
- Li, H., Shi, S., Xu, D. L., Zhuge, L. J., & Zhang, L. L. (2011). Research on the dissolving character of active Si/Al in fly ash activated by alkali. In *Advanced Materials Research*, 150, 1790-1795.
- Li, J. (2004). Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete. Master's dissertation Tongji University, Shanghai.
- Li, J., & Yang, E. H. (2017). Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. *Cement and Concrete Composites*, 78, 33-42.
- Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48.
- Li, V. C. (2002). Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3), 660-686.

- Li, V. C. (2003). On engineered cementitious composites (ECC). *Journal of advanced concrete technology*, 1(3), 215-230.
- Li, V. C. (2008). "Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance," in *Concrete Construction Engineering Handbook*, Nawy E. G., Ed. CRC Press, 1-40.
- Li, V. C. (2012). Can concrete be bendable?. *American Scientist*, 100(6), 484-493.
- Li, V. C. (2019). *Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure*. Springer.
- Li, V. C., & Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218.
- Li, V. C., & Kanda, T. (1998). Innovations forum: engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69.
- Li, V. C., & Leung, C. K. (1992). Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of engineering mechanics*, 118(11), 2246-2264.
- Li, V. C., & Wu, H. C. (1992). Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. *Journal of Applied Mechanics*. Rev., no. 195819, 3487–3489.
- Li, V. C., Lepech, M. D., Wang, S., Weimann, M., & Keoleian, G. A. (2004). Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 181-192.
- Li, V. C., Wang, Y., & Backer, S. (1991). A micromechanical model of tension-softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 39(5), 607–625.

- Limbachiya, M., Meddah, M. S., & Ouchagour, Y. (2012). Performance of Portland/Silica Fume Cement Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, 109(1), 91-100.
- Lin, Y. H., Tyan, Y. Y., Chang, T. P., & Chang, C. Y. (2004). An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cement and concrete research*, 34(8), 1373-1380.
- Lu, J. X., & Poon, C. S. (2018). Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials*, 160, 399-407.
- Lu, W., Fu, X., & Chung, D. D. L. (1998). A comparative study of the wettability of steel, carbon, and polyethylene fibers by water. *Cement and concrete research*, 28(6), 783-786.
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2020). Optimization of brick waste-based geopolymer binders at ambient temperature and pre-targeted chemical parameters. *Journal of Cleaner Production*, 122285.
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2020). Optimization of brick waste-based geopolymer binders at ambient temperature and pre-targeted chemical parameters. *Journal of Cleaner Production*, 122285.
- Mai, Y. W., Andonian, R., Cotterell, B. (1980). Thermal degradation of polypropylene fibers in cement composites. *The International Journal of Cement Composites*, 2(3), 149-155.
- Malone, P. G., Randall, C. J. and Kirkpatrick, T. (1985) Potential applications of alkaliactivated aluminosilicate binders in military operations. GL-85-15, Geotechnical Laboratory Department of the Army, Washington DC.
- Marissen, R. (2011). Design with ultra strong polyethylene fibers. *Materials Sciences and Applications*, 2(05), 319.
- Marshall, D. B., & Cox, B. N. (1988). A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites. *Mechanics of materials*, 7(2), 127-133.

- Martinez-Lopez, R., & Escalante-Garcia, J. I. (2016). Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition. *Construction and Building Materials*, 119, 119-129.
- Martys, N. S., & Ferraris, C. F. (1997). Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and concrete research*, 27(5), 747-760.
- Mather, B. ve Warner, J. (2003). Why do concrete repairs fail. Interview held at University of Wisconsin, Department of Engineering Professional Development, Wisconsin.
- McCormick, A. V., Bell, A. T., & Radke, C. J. (1989). Multinuclear NMR investigation of the formation of aluminosilicate anions. *The Journal of Physical Chemistry*, 93(5), 1741-1744.
- McDonald, M., & Thompson, J. L. (2006). Sodium silicate a binder for the 21st century. National silicates and PQ Corporation of Industrial Chemicals Division, 1-6.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of cleaner production*, 19 (9-10), 1080-1090.
- Mehrali, M., Bagherifard, S., Akbari, M., Thakur, A., Mirani, B., Mehrali, M., ... & Andresen, T. L. (2018). Blending electronics with the human body: a pathway toward a cybernetic future. *Advanced science*, 5(10), 1700931.
- Mehta, P. K. (1994). Concrete technology at the crossroads--problems and opportunities. *ACI Special Publication*, 144, 1-30.
- Mijarsh, M. J. A., Johari, M. M., & Ahmad, Z. A. (2014). Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength. *Construction and Building Materials*, 52, 473-481.

- Mikuni, A., Komatsu, R., & Ikeda, K. (2007). Dissolution properties of some fly ash fillers applying to geopolymeric materials in alkali solution. *Journal of materials science*, 42(9), 2953-2957.
- Mirzahosseini, M., & Riding, K. A. (2014). Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder. *Cement and Concrete Research*, 58, 103-111.
- Monnin, C., & Dubois, M. (2005). Thermodynamics of the $\text{LiOH} + \text{H}_2\text{O}$ system. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 50(4), 1109-1113.
- Morgan, D. R. (1996). Compatibility of concrete repair materials and systems. *Construction and building materials*, 10(1), 57-67.
- Mu, B., Meyer, C., & Shimanovich, S. (2002). Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*, 32(5), 783-787.
- Murayama, N., Yamamoto, H., & Shibata, J. (2002). Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. *International Journal of Mineral Processing*, 64(1), 1-17.
- Naaman, A. E., & Shar, S. R. (1976). Pull-out mechanism in steel fibre-reinforced concrete. *Journal of the Structural Division*, 102(8) 1537-1548.
- Naaman, A. E., Argon, A. S., & Moavenzadeh, F. (1973). A fracture model for fiber reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 3(4), 397-411.
- Nematollahi, B. (2017). Investigation of Geopolymer as a Sustainable Alternative Binder for Fiber-Reinforced Strain-Hardening Composites. Doctoral dissertation, Swinburne University of Technology, Swinburne.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Shaikh, F. U. A. (2014). Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. *Construction and building materials*, 70, 54-64.

- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., & Yang, E. H. (2017). High ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced one-part geopolymer composite: A micromechanics-based investigation. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 555-563.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., & Yang, E. H. (2017). Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, 131, 552-563.
- Neville, A. (2002). Autogenous healing - a concrete miracle?. *Concrete international*, 24(11), 76-82.
- Newlands, M. D., Jones, M. R., Kandasami, S., & Harrison, T. A. (2008). Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete. *Materials and structures*, 41(4), 621.
- Nicholson, C., Fletcher, R., Miller, N., Stirling, C., Morris, J., Hodges, S., ... & Schmucker, M. (2005). Building innovation through geopolymer technology. *Chemistry in New Zealand*, 69(3), 10.
- Nijland, T. G., Larbi, J. A., Van Hees, R. P., Lubelli, B., and De Rooij, M. (2007). Self healing phenomena in concretes and masonry mortars: a microscopic study. Paper presented at the First International Conference on Self Healing Materials, Delft, Holland, 1-9.
- Nixon, P. J. (1978). Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review. *Matériaux et Construction*, 11(5), 371.
- Noushini, A., & Castel, A. (2018). Performance-based criteria to assess the suitability of geopolymer concrete in marine environments using modified ASTM C1202 and ASTM C1556 methods. *Materials and Structures*, 51(6), 146.
- O'Brien, T. F., Bommaraju, T. V., & Hine, F. (2007). *Handbook of Chlor-Alkali Technology*, (1), Springer Science & Business Media, Berlin.

- Ogawa, A., & Hoshiro, H. (2011). Durability of fibres. In *Durability of Strain-Hardening Fibre-Reinforced Cement-Based Composites (SHCC)*, 81-88. Springer Netherlands.
- Ohno, M. (2017). *Green and Durable Geopolymer Composites for Sustainable Civil Infrastructure*. Doctoral dissertation, The University of Michigan, Michigan.
- Ohno, M., & Li, V. C. (2014). A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 57, 163-168.
- Ohno, M., & Li, V. C. (2018). An integrated design method of engineered geopolymer composite. *Cement and Concrete Composites*, 88, 73-85.
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and concrete composites*, 27(2), 315-318.
- Olgun, Z. (2009). Pirinç kabuğu külünden magnezyum silikat üretimi ve kızartma yağlarının rejenerasyonunda kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Pakravan, H. R., Jamshidi, M., & Latifi, M. (2010). Performance of fibers embedded in a cementitious matrix. *Journal of applied polymer science*, 116(3), 1247-1253.
- Pakravan, H. R., Jamshidi, M., & Latifi, M. (2016). Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low-and high-modulus polymeric fibers. *Construction and Building Materials*, 112, 739-746.
- Palomo, Á., Alonso, S., Fernandez-Jiménez, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2004). Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products. *Journal of the American Ceramic Society*, 87(6), 1141-1145.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.

- Palomo, Á., Krivenko A., García-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., and Fernández-Jiménez, A., (2015). A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construcción*, 64(315), e022.
- Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., & Liu, J. (2015). Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, 78, 397-404.
- Panagiotopoulou, C., Kontori, E., Perraki, T., & Kakali, G. (2007). Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2967-2973.
- Pereira, P., Evangelista, L., & De Brito, J. M. C. L. (2012). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 722-729.
- Phair, J. W., & Van Deventer, J. S. J. (2002). Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, 66(1-4), 121-143.
- Poon, C. S., & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(3), 293-305.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2015). Milestones in the analysis of alkali-activated binders. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4(2), 74-84.

- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling. *Chemical engineering science*, 62(9), 2318-2329.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing, Boca Raton.
- Provis, J. L., Duxson, P., Kavalerova, E., Krivenko, P. V., Pan, Z., Puertas, F., & Van Deventer, J. S. (2014). Historical aspects and overview. *Alkali activated materials - RILEM State-of-the-Art Reports*, 13, 11-57.
- Puertas, F., Palacios, M., & Vázquez, T. (2006). Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *Journal of materials science*, 41(10), 3071-3082.
- Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J. S., Rico, A., & Rodríguez, J. (2011). A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(12), 2043-2056.
- Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), 191-202.
- Qian, S., & Li, V. C. (2008). Simplified inverse method for determining the tensile properties of strain hardening cementitious composites (SHCC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(2), 353-363.
- Rafalko, S. D., Brandon, T. L., Filz, G. M., & Mitchell, J. K. (2007). Fiber reinforcement for rapid stabilization of soft clay soils. *Transportation research record*, 2026(1), 21-29.
- Rahier, H., Denayer, J. F., & Van Mele, B. (2003). Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses Part IV Modulated DSC study on the effect of particle size of metakaolinite on the production of inorganic polymer glasses. *Journal of Materials Science*, 38(14), 3131-3136.
- Rahier, H., Simons, W., Van Mele, B., & Biesemans, M. (1997). Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part III Influence of the composition of the silicate solution on production, structure and properties. *Journal of Materials Science*, 32(9), 2237-2247.

- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., & Wu, X. (1996a). Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. *Journal of Materials Science*, 31(1), 71-79.
- Rahier, H., VanMele, B., & Wastiels, J. (1996b). Low-Temperature Synthesized Aluminosilicate Glasses. 2. Rheological Transformations During Low-Temperature Cure and High-Temperature Properties of a Model-Compound. *Journal of Materials Science*, 31(1), 80-85.
- Rajamma, R., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2012). Alkali activation of biomass fly ash–metakaolin blends. *Fuel*, 98, 265-271.
- Ramujee, K. (2013). Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Innovative Research in science, engineering and technology*, 2(8), 3409-3413.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Javadi Pordsari, A., Mehrali, M., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer. *PloS one*, 11(1), e0147546.
- Rashad, A. M. (2013). Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer—An overview. *Construction and Building Materials*, 41, 751-765.
- Ravikumar, D., Peethamparan, S., & Neithalath, N. (2010). Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 399-410.
- Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
- Reinhardt, H. W., & Jooss, M. (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and concrete research*, 33(7), 981-985.
- Reinhardt, H. W., Jonkers, H., Van Tittelboom, K., Snoeck, D., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., Wang, J., and Mechtcherine, V. (2013). Self-

healing phenomena in cement-based materials: Recovery against environmental action, Germany: Springer, 65-117.

Richardson, A. E. (2006). Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions. *Structural survey*, 24, 138-153.

Richardson, I. G., Brough, A. R., Groves, G. W., & Dobson, C. M. (1994). The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (CSH) phase. *Cement and Concrete Research*, 24(5), 813-829.

Robayo-Salazar, R. A., Mejía-Arcila, J. M., & de Gutiérrez, R. M. (2017b). Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. *Journal of Cleaner Production*, 166, 242-252.

Robayo-Salazar, R. A., Rivera, J. F., & de Gutiérrez, R. M. (2017a). Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130-138.

Romualdi, J. P., & Batson, G. B. (1963). Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 89(3), 147-168.

Romualdi, J. P., & Mandel, J. A. (1964). Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. *ACI Journal Proceedings*, 61(6), 657-672.

Roque, R., Kim, N., Kim, B., & Lopp, G. (2009). Durability of fiber-reinforced concrete in Florida environments. University of Florida, Tallahassee FL, USA, 84-85.

Rovnaník, P., Řezník, B., & Rovnaníková, P. (2016). Blended alkali-activated fly ash/brick powder materials. *Procedia Engineering*, 151, 108-113.

Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements opportunities and challenges. *Cement and concrete research*, 29(2), 249-254.

- Sabir, B. B., Wild, S., & O'farrell, M. (1998). A water sorptivity test for martar and concrete. *Materials and Structures*, 31(8), 568.
- Sahmaran, M., Li, M., & Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604.
- Sahmaran, M., Yildirim, G., & Erdem, T. K. (2013). Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 89-101.
- Schubert, S., Hoffmann, C., Leemann, A., Moser, K., & Motavalli, M. (2012). Recycled aggregate concrete: experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 41, 490-497.
- Schwarz, N., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 429-436.
- Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496.
- Shafiq, N., Ayub, T., & Khan, S. U. (2016). Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action. *Composite structures*, 153, 30-41.
- Shaikh, F. U. A., Fairchild, A., & Zammar, R. (2018). Comparative strain and deflection hardening behaviour of polyethylene fibre reinforced ambient air and heat cured geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 163, 890-900.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *cement and concrete research*, 30(1), 91-100.

- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and concrete research*, 36(3), 457-468.
- Shi, C., He, F., & Angel, Palomo, A. (2012). Classification and characteristics of alkali-activated cements. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 40(1), 69-75.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., & Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 987-993.
- Siad, H., Alyousif, A., Keskin, O. K., Keskin, S. B., Lachemi, M., Sahmaran, M., & Hossain, K. M. A. (2015). Influence of limestone powder on mechanical, physical and self-healing behavior of engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 99, 1-10.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste management*, 28(10), 1835-1852.
- Singh, S., Shukla, A., & Brown, R. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and concrete research*, 34(10), 1919-1925.
- Soe, K. T., Zhang, Y. X., & Zhang, L. C. (2013). Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels. *Composite structures*, 104, 320-330.
- Solyman, M. (2005). Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures. Doctoral dissertation. Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel, Kassel.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindapasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124.

- Song, P. S., Hwang, S., & Sheu, B. C. (2005). Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546-1550.
- Soroker, V. J., & Denson, A. J. (1926). Autogenous healing of concrete. *Zement*, 25(30), 76.
- Spragg, R. P., Castro, J., Nantung, T., Paredes, M., & Weiss, J. (2012). Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. *Advances in Civil Engineering Materials*, 1(1), 1-17.
- Spragg, R., Bu, Y., Snyder, K., Bentz, D., & Weiss, J. (2013). Electrical testing of cement-based materials: Role of testing techniques, sample conditioning, and accelerated curing. Publication FHWA/IN/JTRP2013/28, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 10.5703/1288284315230.
- Studinka, J. B. (1989). Asbestos substitution in the fibre cement industry. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11(2), 73-78.
- Suwan, T., Fan, M., & Braimah, N. (2016). Micro-mechanisms and compressive strength of Geopolymer-Portland cementitious system under various curing temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 180, 219-225.
- Swamy, R. N. (Ed.). (1978). Testing and test methods of fibre cement composites: RILEM Symposium Proceedings, Sheffield, The Construction Press, England, 545.
- Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2007). De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1035-1046.

- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2010). Engineered cementitious composites: Can composites be accepted as crack-free concrete?. *Transportation Research Record*, 2164(1), 1-8.
- Şahmaran, M., Keskin, S. B., Ozerkan, G., & Yaman, I. O. (2008). Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 872-879.
- Şahmaran, M., Yıldırım, G., Aras, G. H., Keskin, S. B., Keskin, Ö. K., & Lachemi, M. (2017). Self-Healing of Cementitious Composites to Reduce High CO₂ Emissions. *ACI Materials Journal*, 114 (1), 93-104.
- Şahmaran, M., Yıldırım, G., Noori, R., Ozbay, E., & Lachemi, M. (2015). Repeatability and pervasiveness of self-healing in engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 112(4), 513.
- Tam, V. W., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete research*, 35(6), 1195-1203.
- Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C., & Chindapasirt, P. (2008). Influence of rice husk–bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1812-1819.
- Tangüler, M., Gürsel, P., & Meral, Ç. (2015). Türkiye’de uçucu küllü betonlar için yaşam döngüsü analizi. 9. Ulusal Beton Kongresi, Antalya, 431-441.
- Temuujin, J. V., Van Riessen, A., & Williams, R. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of hazardous materials*, 167(1-3), 82-88.
- Tognonvi, M. T., Rossignol, S., & Bonnet, J. P. (2011). Physical-chemistry of sodium silicate gelation in an alkaline medium. *Journal of sol-gel science and technology*, 58(3), 625-635.

- Tomosawa, F., & Noguchi, T. (2014). 24 Towards completely recyclable concrete. In: Sakai K, editor. Integrated design and environmental issues in concrete technology, E & FN Spon, London, UK, 263–372.
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. Journal of cleaner production, 90, 397-408.
- Toutanji, H., McNeil, S., & Bayasi, Z. (1998). Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. Cement and Concrete Research, 28(7), 961-968.
- V. C. Li, “Engineered Cementitious Composites (ECC) – Tailored Composites through Micromechanical Modeling,” in Fiber reinforced concrete: present and future, Banthia N., Bentur A., Mufti and A. A., Eds. Montreal (Canada): Canadian Society for Civil Engineering, 1998, pp. 64–97.
- Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2017). High strength geopolymer binder based on waste-glass powder. Advanced Powder Technology, 28(1), 215-222.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. Materials Letters, 57(7), 1272-1280.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Schwartzman, A. (1999). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics. Minerals Engineering, 12(1), 75-91.
- van Jaarsveld, J., & Van Deventer, J. S. J. (1999). Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. Industrial & engineering chemistry research, 38(10), 3932-3941.
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials - A review. Materials, 6(6), 2182-2217.
- Varshneya A. K., Mauro J. C. (2019). Fundamentals of inorganic glasses, 3rd Edition. Elsevier.

- Vásquez, A., Cárdenas, V., Robayo, R. A., & de Gutiérrez, R. M. (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste. *Advanced Powder Technology*, 27(4), 1173-1179.
- Wagner, E. F. (1974). Autogenous healing of cracks in cement-mortar linings for gray-iron and ductile-iron water pipe. *Journal (American Water Works Association)*, 358-360.
- Wang, S. (2005). Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites. Doctoral dissertation University of Michigan. Michigan
- Wang, S. ve Li, V. C. (2004). Tailoring of pre-existing flaws in ecc matrix for saturated strain hardening. Paper presented at the Proceedings of FRAMCOS-5, Vail, USA, 1005–1012.
- Wang, S., & Li, V. C. (2006). High-early-strength engineered cementitious composites. *ACI Materials journal*, 103(2), 97-105.
- Wang, S., & Li, V. C. (2007). Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials journal*, 104(3), 233.
- Wang, Y., Backer, S., & Li, V. C. (1989). A statistical tensile model of fibre reinforced cementitious composites. *Composites*, 20(3), 265-274.
- Wang, Y., Li, V. C., & Backer, S. (1988). Modelling of fibre pull-out from a cement matrix. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10(3), 143-149.
- Wang, Z. (2012). The Effects of Aggregate Moisture Conditions in Rheological Behaviors of High-Workability Mortar Prepared with Fine Recycled-Concrete Aggregate. Master's dissertation. Texas State University, San Marcos, TX, USA.
- Wastiels, J., Wu, X., Faignet, S., & Patfoort, G. (1994). Mineral polymer based on fly ash. *Journal of Resource Management and Technology*, 22 (3), 135-141.

- Weng, L., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—Low Si/Al ratio systems. *Journal of materials science*, 42(9), 2997-3006.
- White, C. E., Provis, J. L., Bloomer, B., Henson, N. J., & Page, K. (2013). In situ X-ray pair distribution function analysis of geopolymer gel nanostructure formation kinetics. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(22), 8573-8582.
- White, C. E., Provis, J. L., Proffen, T., & van Deventer, J. S. (2012). Molecular mechanisms responsible for the structural changes occurring during geopolymerization: multiscale simulation. *American Institute of Chemical Engineers journal*, 58(7), 2241-2253.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26 (1), 303-329.
- Wu, H. C., & Li, V. C. (1999). Fiber/cement interface tailoring with plasma treatment. *Cement and Concrete Composites*, 21(3), 205-212.
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International journal of mineral processing*, 59(3), 247-266.
- Xu, H., Li, Q., Shen, L., Zhang, M., & Zhai, J. (2010). Low-reactive circulating fluidized bed combustion (CFBC) fly ashes as source material for geopolymer synthesis. *Waste Management*, 30(1), 57-62.
- Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2), 131-139.
- Yang, E. H., Yang, Y., & Li, V. C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI materials journal*, 104(6), 620-628.
- Yang, E. H., Yang, Y., & Li, V. C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI materials journal*, 104(6), 620.

- Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E. H., & Li, V. C. (2009). Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. *Cement and Concrete Research*, 39(5), 382-390.
- Yang, Z. X., Ha, N. R., Jang, M. S., & Hwang, K. H. (2009). Geopolymer concrete fabricated by waste concrete sludge with silica fume. *Materials Science Forum*, 620-622, 791-795.
- Yang, Z. X., Ha, N. R., Jang, M. S., Hwang, K. H., Jun, B. S., & Lee, J. K. (2010). The performance of geopolymer based on recycled concrete sludge. *Ceramic Transactions*, 210, 221-224.
- Yap, S. P., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2013). Enhancement of mechanical properties in polypropylene–and nylon–fibre reinforced oil palm shell concrete. *Materials & Design*, 49, 1034-1041.
- Yaprak, H., Aruntas, H. Y., Demir, I., Simsek, O., & Durmus, G. (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of Physical Sciences*, 6(10), 2455-2461.
- Yıldırım, G., Aras, G. H., Banyhussan, Q. S., Şahmaran, M., & Lachemi, M. (2015). Estimating the self-healing capability of cementitious composites through non-destructive electrical-based monitoring. *Ndt & E International*, 76, 26-37.
- Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., & Şahmaran, M. (2018). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 87, 172-186.
- Yip, C. K. B. (2004). The role of calcium in geopolymerisation. Doctoral dissertation. The University of Melbourne, Australia.
- Yip, C. K., & Van Deventer, J. S. J. (2003). Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*, 38(18), 3851-3860.

- Yip, C. K., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and concrete research*, 35(9), 1688-1697.
- Yu, J., Yao, J., Lin, X., Li, H., Lam, J. Y., Leung, C. K., ... & Shih, K. (2018). Tensile performance of sustainable strain-hardening cementitious composites with hybrid PVA and recycled PET fibers. *Cement and Concrete Research*, 107, 110-123.
- Zaharaki, D., Galetakis, M., & Komnitsas, K. (2016). Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation. *Construction and Building Materials*, 121, 686-693.
- Zal, B. (2010). Zeolit, tras ve uçucu kül ile tuğla üretimi ve standard tuğla ile karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Zawrah, M. F., Gado, R. A., Feltin, N., Ducourtieux, S., & Devoille, L. (2016). Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237-251.
- Zhang, J., Wang, Q., & Wang, Z. (2017). Properties of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber-reinforced composite with high-strength cement matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017026.
- Zhang, Y. J., Li, S., & Wang, Y. C. (2012). Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(3), 620-624.
- Zhang, Z. H., Yang, T., & Wang, H. (2014). The effect of efflorescence on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer binders. in 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, I, 107–112.
- Zhang, Z., Wang, H., Provis, J. L., & Reid, A. (2013). Efflorescence: a critical challenge for geopolymer applications?. In Concrete Institute of Australia's Biennial National Conference. Concrete Institute of Australia, 1-10.

Zhu, Y., Yang, Y., & Yao, Y. (2012). Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 34, 522-530.

Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and concrete composites*, 19(2), 107-122.

