T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YENİ NESİL JEOPOLİMER BAĞLAYICILI LİF DONATILI KOMPOZİTLER

Hazırlayan

İsmail Raci BAYER

Danışman

Prof. Dr. İlhami DEMİR

Ağustos-2020
KIRIKKALE

İnşaat Anabilim Dalında İsmail Raci BAYER tarafından hazırlanan YENİ NESİL JEOPOLİMER BAĞLAYICILI LİF DONATILI KOMPOZİTLER adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN
Anabilim Dalı Başkanı

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

Prof. Dr. İlhami DEMİR
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN	_____
Üye (Danışman)	: Prof. Dr. İlhami DEMİR	_____
Üye	: Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM	_____
Üye	: Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK	_____
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM	_____

……/…../…….

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

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

YENİ NESİL JEOPOLİMER BAĞLAYICILI LİF DONATILI KOMPOZİTLER

BAYER, İsmail Raci
Kırıkkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Anabilim Dalı, Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR
Ağustos 2020, 203 Sayfa

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi beton olmakla birlikte, çimento üretimi önemli ölçüde enerji tüketiminden ve karbon salınımından sorumludur. Ayrıca beton ve çimento üretimi sırasında farklı amaçlarla çok ciddi seviyede kil, kireçtaşı, alçı gibi doğal kaynaklar da yok olmakta, bu nedenle beton ve çimento sektörünün çevreye verdiği zararlar daha da artmaktadır. Bu sebeple, son zamanlarda çevreye duyarlı ve doğal kaynakları asgari seviyede tüketen çalışmalara ilgi oldukça artmıştır. Portland çimentosuna (PÇ) alternatif olarak, jeopolimer olarak adlandırılan camsı alümino-silisli malzemelerin (örn.: uçucu kül, cüruf, ısıl işlem görmüş kil, vb.) yüksek alkali ortamlarda aktive edilmesi ile elde edilen yeni nesil bağlayıcılar, daha düşük enerji gereksinimi duyan ve düşük CO_2 salınımlı sürdürülebilir kompozitlerin geliştirilmesinde önemli bir aşama olarak görülmektedir. Geçmişte endüstriyel yan ürün olarak adlandırılan birçok malzeme (örn.: farklı sınıf uçucu küller ve cüruf) jeopolimerizasyon mekanizması için bağlayıcı malzeme olarak başarıyla kullanmıştır. Bu malzemelere ek olarak, jeopolimerizasyon için uygun alternatif çevreci hammaddeler bulunması yönünde yoğun araştırmalar yapılmaya başlanmıştır.

Türkiye'de kentsel dönüşümden yaklaşık 6,5 milyonun üzerinde yapının etkileneceği belirtilmektedir. Ortaya çıkacak inşaat yıkıntı atığı (İYA) mevcut durumda dahi oldukça yüksek miktarlara ulaşmış olup, çevresel açıdan çok ciddi bir sorun haline geldiği için İYA'ların geri dönüşümü zorunlu hale gelmiştir. Portland çimentolu sistemlere alternatif olarak jeopolimer bağlayıcılı sistemlerin geliştirilmesinde

İYA'ların değerlendirilmesi çimento ve geleneksel beton üretiminden kaynaklı çevresel problemlerin çözümüne katkı sunup sürdürülebilir olmayan doğal malzemelerimizin yok oluşu engellenmiş olacaktır. Sürdürülebilir çevre dostu "yeşil" yapı malzemeleri olarak tanımlanan jeopolimerler, geleneksel betona benzer şekilde doğası gereği gevrek malzemeler olup üstün özellikleri çatlakların varlığında genellikle kötüleşmektedir. Gevrek malzemelerin özellikle büyük yapılarda kullanıldıkları durumlarda çatlak oluşumunun engellenmesi neredeyse imkansızdır.

Bu tez çalışmasında, çevresel ve ekonomik olarak büyük sorun teşkil eden ve artan nüfusa oranla giderek büyüyen bir problem olan İYA'nın, jeopolimerizasyon tekniği aracılığıyla geri dönüşümünün sağlanması ve çeşitli liflerin eklenmesiyle şekil değiştirme sertleşmesi ve yük altında çoklu mikro çatlak oluşturma özelliği gösterebilen tasarlanmış jeopolimer bağlayıcılı lif donatılı kompozitlerin (EGC) geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede hem günümüzde önemli çevresel problem teşkil eden İYA en aza indirilecek ve Portland çimentosu kaynaklı sera gazı salınımlarının alternatif bir malzeme geliştirilerek önüne geçilmesi sağlanacak, hem de yük altında sünek özellik göstererek çoklu çatlak oluşturabilme kapasitesi ile ani kırılmaların engellendiği bir tasarım geliştirilecektir.

Tez çalışmaları kapsamında, 90 günlük ortam kürünün ardından 27,8-49,6 MPa basınç dayanımına, 8,8-12,8 MPa eğilme dayanımına ve 23,6-48,3 mm orta açıklık deformasyonuna sahip lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kompozit malzemelerin yük altında oluşturduğu çoklu mikro çatlak parametreleri incelenmiş ve 0,043-0,259 mm aralığında çok sayıda mikro çatlak gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: tasarlanmış jeopolimer kompozitler, sentetik lif donatı, inşaat yıkıntı atığı, mekanik ve mikro-mekanik analiz, şekil değiştirme sertleşmesi, çoklu çatlak oluşumu,

ABSTRACT

NEW GENERATION FIBER REINFORCED GEOPOLYMERIC COMPOSITES

BAYER, İsmail Raci
Kırıkkale University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis
Supervisor: Prof. Dr. İlhami DEMİR
August 2020, 203 pages

Although concrete is the most used building material today, cement production is responsible for significant energy consumption and carbon emissions. In addition, during the production of cement and concrete, natural resources such as clay, limestone and gypsum are being exhausted for different purposes, therefore, the detrimental effect on the environment of the concrete and cement industry further increases. Therefore, studies on the use of environmentally friendly materials and researches on minimizing the use of natural materials increased in the last decade. As an alternative to Portland cement (PC), new generation materials which are obtained by alkali activation of aluminous and siliceous materials (such as fly ash, slag, calcined clay, etc.) are becoming more popular in the development of sustainable composites with less energy requirement and less CO_2 emission. In the past, many materials called industrial by-products (eg: different class fly ashes and slag) used successfully as binding material for the geopolymerization mechanism. Additionally, intensive researches have been started to find out alternative eco-friendly raw materials suitable for geopolymerization.

It is stated that approximately 6.5 million buildings will be affected by urban transformation in Turkey. The construction and demolition waste (CDW) is a serious environmental problem currently and the problem will become more severe in future, which makes the use of CDW mandatory. Its use in the production of geopolymers, its potential for being an alternative to PC and its recycling in the constructions are

thought to be the solutions of many problems in the civil engineering field. Geopolymers, defined as sustainable environmentally friendly “green” building materials, are brittle materials by nature, similar to conventional concrete, and their superior properties generally worsen in the presence of cracks. Cracks are almost inevitable in brittle materials, especially in large-scale field applications.

In this thesis study, it is aimed to assess the geopolymerization technique in order to recycle CDW, which is a major problem in terms of environment and economy and a growing problem by the increasing population, and develop engineered geopolymer composites (EGC), which can exhibit strain hardening behavior and forming multiple micro cracks under load by the addition of various fibers. In this way, CDW, which is an important environmental problem today, will be minimized and greenhouse gas emissions caused by Portland cement will be prevented by developing an alternative material, and a design that prevents sudden fractures will be developed with the capacity to formation multiple cracks and showing ductile properties under load.

Within the scope of thesis studies, fiber-reinforced engineered geopolymer composites with 27.8-49.6 MPa compressive strength, 8.8-12.8 MPa flexural strength and 23.6-48.3 mm mid-span deformation have been developed after 90 days of ambient curing. Multiple micro crack parameters under load were examined and a quite number of micro cracks in the range of 0.043-0.259 mm were observed.

Keywords: engineered geopolymer composites, synthetic fiber-reinforced, construction demolition waste, mechanical and micro-mechanical analysis, strain-hardening, multiple crack formation,

TEŞEKKÜR

Bu tezin jüriden geçmesi halinde sadece 2004 yılından bu yana devam eden doktora öğrenimim değil, aynı zamanda 1982 yılında anaokulu ile başlayan ve bu yaşıma dek kesintisiz devam ettirdiğim öğrencilik hayatım da resmen nihayetine ermiş olacak. Bu nedenle teşekkür listemin de o nispette uzun oluşunun anlayışla karşılanacağını ümit ediyorum.

Öncelikle doktora tez danışmanım Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR hocama, hem ODTÜ'den Kırıkkale Üniversitesi'ne naklim sırasında hem de Çevre ve Şehircilik Bakanlığı mensubu olmam hasebiyle çevre ve şehirciliği aynı potada buluşturan bir tez konusu seçme noktasında göstermiş olduğu desteklerden ötürü ne kadar teşekkür etsem azdır.

Hemen akabinde Tez İzleme Komitesi (TİK) üyelerimden ve bu tezin jüri aşamasına gelmesinde her ne kadar resmen olmasa da fiilen yardımcı tez danışmanım gibi bir rol üstlenerek laboratuvar çalışmalarımın görev yaptığım il olan Ankara'da gerçekleştirilmesini temin eden Hacettepe Üniversitesi İnşaat Müh. Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Tabi ki diğer TİK üyem Gazi Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK hocama da 3 yıla yakın süren tez çalışmalarım boyunca gerçekleştirmiş olduğumuz 5 adet TİK toplantılarımızda vermiş olduğu değerli görüş ve katkıları için müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim.

Resmiyette TİK üyeleri harici jüri üyelerim olan fakat fiiliyatta tez çalışmalarım süresince TİK üyelerim gibi her daim desteklerini esirgemeyen Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekan Yardımcısı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM ve İnşaat Müh. Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM hocalarıma da içten teşekkürlerimi sunarım.

Hem yüksek lisans tez danışmanım hem de doktora öğrenimime ilk başladığım ODTÜ İnşaat Müh. Bölümündeki tez danışmanım olan ve şu an Ankara Yıldırım Beyazıt

Üniversitesi İnşaat Müh. Bölüm Başkanlığı görevini yürüten Sayın Prof. Dr. Lutfullah TURANLI hocama hem tez aşamasında bölüm değiştirme konusunda göstermiş olduğu anlayış hem de sonrasında doktoramı tamamlama konusunda hiç eksik etmediği moral ve motivasyon desteği için hassaten teşekkür ederim.

ODTÜ İnşaat Müh. Bölümü sonrası ve Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü öncesi uzun bir süre doktora öğrenimime devam ettiğim ODTÜ Mimarlık Bölümündeki tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Emine Nevin CANER SALTIK hocama hem fark derslerimi tamamlama ve farklı bir bölüme adapte olma konusunda göstermiş olduğu hassasiyet hem de tez aşamasında üniversite değiştirme konusunda göstermiş olduğu anlayış için ayrıca teşekkür ederim.

AB Mali Yardımları Daire Başkanı olarak görev yapmakta olduğum AB ve Dış İlişkiler Genel Müdürlüğü'nün bağlı bulunduğu Çevre ve Şehircilik Bakan Yardımcısı ve aynı zamanda Türkiye Cumhuriyeti İklim Değişikliği Başmüzakerecisi Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin BİRPINAR hocama hem tez çalışmalarım boyunca göstermiş oldukları anlayış ve destek hem de akademi ve bürokrasinin bir arada başarılı bir biçimde yürütülebileceği konusunda bizlere rol model oldukları için sadece kendi adıma değil, yoğun mesailerine rağmen büyük bir özveri ile akademik çalışmalarını devam ettirmeye gayret eden tüm bürokratlar adına teşekkürlerimi arz ederim.

Bu tezin laboratuvar çalışmaları esnasında bana çok yardımcı olan Hacettepe Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü yüksek lisans öğrencisi Sevgili Emircan ÖZÇELİKCİ ve Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü yüksek lisans öğrencisi Sevgili Muhammed Faruk GÜNAL kardeşlerime çok teşekkür eder, kendileri de jüri arefesinde olan bu iki genç ve çalışkan meslektaşıma kariyerlerinde başarılar dilerim.

Son olarak aile üyelerime teşekkür etmek isterim, ama ilk sırada sevgili annem Sebahat BAYER'e, çünkü çeşitli nedenlerle tam 16 yıl süren doktora öğrenimimin yaklaşık ilk 9 yılı evlenmeden önce geçti ve o dönemki stresimi en fazla anneciğim çekti. Annemin hemen ardından babam Fizik Yüksek Mühendisi Haydar BAYER'e teşekkür etmek isterim, çünkü çok hevesli olmasına rağmen ailevi nedenlerden ötürü doktora

öğrenimini ben dünyaya gelmeden önce terk etmek zorunda kalan babam, içinde hep bir ukde olarak kalan bu konuda beni hep teşvik etmiştir.

Kendisi de yüksek lisansını yeni tamamlamış olan sevgili eşim Av. Yasemen MERGEN BAYER'e ve henüz anaokuluna yeni başlayacak olan sevgili oğlumuz Erbay BAYER'e, her ne kadar uzun doktora maratonuma sonradan müdahil olmuş olsalar da, en yoğun dönemi olan son kulvarda göstermiş oldukları sabır ve anlayış için bilhassa müteşekkirim; çünkü zaten yoğun mesaim nedeniyle kendilerine ayırabildiğim vakit son derece kısıtlı iken, bir de üzerine doktora tamamlama mücadelesi eklenince, istemeden de olsa sevgili ailemi bazen ihmal etmek durumunda kaldım, ama inşallah doktora mezuniyetim sonrasında bu durumu fazlasıyla telafi etme niyeti ve heyecanı içerisindeyim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
SİMGELER DİZİNİ xvii
KISALTMALAR DİZİNİ xvii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 6
2.1. Giriş 6
2.2. Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler 6
2.2.1. Sünek Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler 9
2.2.2. Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler 9
2.3.1. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler (ECC) 11
2.3. Jeopolimer Terminolojisi 25
2.3.1. Jeopolimer Aktivatörleri 27
2.3.2. Jeopolimer Bağlayıcılar 29
2.3.3. Jeopolimerlerde Bağ Yapısı ve Matris Özellikleri 37
2.3.4 Jeopolimer Üretiminde İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kullanılması 46
2.3.5. İnşaat Yıkıntı Atığı Bazlı Geri Dönüşüm Agregası 50
2.4. Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozitler (EGC) 55
3. MATERYALLER VE METODOLOJİ 65
3.1. Kullanılan Malzemeler 65
3.1.1. İYA Bazlı Bağlayıcı Malzemeler 65
3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu 71
3.1.3. Uçucu Kül (UK) 72
3.1.4. Alkali Aktivatörler 73
3.1.5. Geri Dönüşüm Agregası (GDA) 77
3.1.6. Lifler 80

3.2. Metodoloji 82
3.2.1. Karışımların Hazırlanması 82
3.2.2. Döküm ve Kalıplara Yerleştirme 82
3.2.3. Kür Koşulları 83
3.2.4. Kıvam ve Priz Testleri 84
3.2.5. Agrega Sağlamlık Testi 88
3.2.6. Lif Deneyleri 90
3.2.7. Basınç ve Eğilme Testleri 91
3.2.8. Mikro-mekanik Analizler 93
4. SONUÇ VE BULGULAR 94
4.1. Jeopolimer Hamur Karışımlarının Geliştirilmesi 95
4.2. Jeopolimer Harç Karışımlarının Geliştirilmesi 103
4.2.1. İYA Esaslı Malzemelerin İkili Kombinasyonu ile GDA Parametrelerinin Fırın Küründe İncelenmesi 103
4.2.2. Jeopolimer Harç Karışımlarında Çeşitli Parametrelerin Değişiminin Etkisinin İncelenmesi 119
4.3. Jeopolimer Kompozit Karışımlarının Geliştirilmesi 127
4.4. Nihai EGC Tasarımlarının Geliştirilmesi 137
4.4.1. Nihai EGC Karışımlarının Mikro-Mekanik Analizleri 158
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER 170
KAYNAKLAR 175
ÖZGEÇMİŞ 201

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL Sayfa

2.1. LDÇK'lerin matris ve lif olmak üzere iki ana bileşene sahip olarak tanımlanması (Naaman, 2008) 8
2.2. LDÇK'lerin Tasarım ve Sınıflandırma Ölçütleri 8
2.3. LDÇK'nin doğrudan çekme gerilmesi altındaki davranışının basit bir sınıflandırması 10
2.4. Çekme gerilmesi altında tipik bir şekil değiştirme-gerilme ve uzama gerilme eğrisi (a) Geleneksel şekil değiştirme yumuşaması davranışlı LDÇK, (b) şekil değiştirme sertleşmesi davranışlı LDÇK veya YPLDÇK (Naaman, 2008) 10
2.5. ECC'nin dar çatlak genişliği kontrolü ile doğrudan şekil değiştirme-çekme gerilmesi tepkisi 12
2.6. Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren kompozitlerin tipik σ(δ) eğrisi 15
2.7. Uçucu küller için temsili üçlü kompozisyon diyagramı (Provis ve van Deventer, 2009) 36
2.8. Geri dönüşüm agregasında AGB oluşumu 54
2.9. Çeşitli bağlayıcı ve ürünlerin süneklilik ve "yeşil" malzeme ilişkisi 55
3.1. Delikli tuğla görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü) 66
3.2. Harman tuğla görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü) 67
3.3. Çatı kiremiti görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü) 67
3.4. Cam tozu görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü) 68
3.5. Beton atığı görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü). 69
3.6. İYA bazlı bağlayıcı malzemelerin tanecik boyut dağılımı 70
3.7. İYA bazlı bağlayıcı malzemelerin ve cürufun XRD analizi 70
3.8. Yüksek fırın cürufu ham görüntüsü 71
3.9. Yüksek fırın cürufunun XRD analizi sonuçları 72

3.10. Uçucu kül görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü). 73
3.11. Uçucu külün XRD analizi sonuçları 73
3.12. Toz kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) 74
3.13. Payet sodyum hidroksitin paketli ve açık haldeki görüntüleri 75
3.14. Sıvı sodyum silikat. 77
3.15. İnce Geri Dönüşüm Agregaları (Soldan sağa; 0,100-0,85mm; 0,85,2,00 mm; 2,00-4,75 mm) 78
3.16. Çalışma kapsamında kullanılan farklı tip lifler 81
3.17. Çalışma kapsamında kullanılan kalıplar 83
3.18. Çalışma kapsamında üretilen numuneler 84
3.19. Vicat aleti ölçümleri 88
3.20. Alkali aktivatör solüsyonunda bekletilmiş ve ısıl küre maruz bırakılmış liflerin davranışı 91
3.21. Çalışma kapsamında üretilen küp numuneler ve basınç dayanım testleri 92
3.22. Çalışma kapsamında üretilen silindir numuneler ve yarmada çekme dayanımı testleri 92
3.23. Çalışma kapsamında üretilen kupon numuneler ve eğilme dayanımı testleri 93
4.1. %100 İYA içeren jeopolimer harç karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları 121
4.2. %100 İYA içeren jeopolimer harç karışımlarının su kürü sonrası basınç dayanım sonuçları 121
4.3. İYA ve cüruf içeren jeopolimer harç karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları 124
4.4. İYA ve cüruf içeren jeopolimer harç karışımlarının su kürü sonrası basınç dayanım sonuçları 125
4.5. %100 İYA içeren jeopolimer kompozit karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları 128
4.6. PE numunesinin eğilme testi altında davranışı 129
4.7. PE takviyeli jeopolimer kompozitin çoklu çatlak oluşturma davranışı 130
4.8. %100 İYA kullanılarak farklı lif takviyeleri ile üretilen jeopolimer kompozitlerin eğilme dayanım sonuçları 130

4.9. İYA ve cüruf içeren kompozit karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları 133
4.10. PE-NM hibrit lifli K5 kompozitin eğilme testi altında davranışı..... 135
4.11. PE-NM hibrit lifli K5 kompozitin çoklu çatlak oluşturma davranışı..... 135
4.12. İYA ve cüruf kullanılarak farklı lif takviyeleri ile üretilen jeopolimer kompozitlerin eğilme dayanım sonuçları 136
4.13. Jeopolimer harç karışımlarından elde edilen mikro çatlaklara dair görseller . 137
4.14. EGC karışımlarının basınç dayanım sonuçları..... 140
4.15. EGC karışımlarının 28 günlük yarmada çekme dayanım sonucu..... 143
4.16. EGC karışımlarının 90 günlük yarmada çekme dayanım sonucu..... 144
4.17. EGC silindir numunelerinin yarmada çekme altında gösterdiği çatlak 147
4.18. İYA ve cüruf içeren EGC karışımlarının (S1,S3,S5) 7 günlük eğilme deformasyon sonucu..... 148
4.19. %100 İYA içeren EGC karışımlarının (S2,S4,S6) 7 günlük eğilme deformasyon sonucu..... 149
4.20. İYA ve cüruf içeren EGC karışımlarının (S1,S3,S5) 28 günlük eğilme deformasyon sonucu..... 149
4.21. %100 İYA içeren EGC karışımlarının (S2,S4,S6) 28 günlük eğilme deformasyon sonucu..... 150
4.22. İYA ve cüruf içeren EGC karışımlarının (S1,S3,S5) 90 günlük eğilme deformasyon sonucu..... 150
4.23. %100 İYA içeren EGC karışımlarının (S2,S4,S6) 90 günlük eğilme deformasyon sonucu..... 151
4.24. EGC kuponların eğilme ve çatlak oluşturma davranışı görselleri 154
4.25. S3 karışımının şekil değiştirme-deformasyon grafiği 155
4.26. EGC kupon numunelerin yükleme sonrası oluşan çoklu mikro çatlak görselleri..... 156
4.27. S3 karışımının dört noktalı eğilme altında deformasyon-çatlak oluşumu görselleri..... 157
4.28. S1 numunesinin SEM/EDX analizi..... 158
4.29. S2 numunesinin SEM/EDX analizi..... 159
4.30. S3 numunesinin SEM/EDX analizi..... 159
4.31. S4 numunesinin SEM/EDX analizi..... 160

4.32. S5 numunesinin SEM/EDX analizi 160
4.33. S6 numunesinin SEM/EDX analizi 161
4.34. EGC karışımlarının XRD analiz sonuçları 165
4.35. EGC karışımlarının FTIR analiz sonuçları 168

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE Sayfa

2.1. Geleneksel beton ve ECC tasarım parametreleri (Wang ve Li'den (2007) 21
2.2. ECC M45 ve ECC R0 karışımlarının içerikleri ve MSG hesaplamak için bileşen değerleri 24
2.3. ECC R0 ve tipik ECC M45'in tek eksenli çekme özellikleri 24
3.1. Delikli tuğla kimyasal kompozisyonu 66
3.2. Harman tuğlası kimyasal kompozisyonu 67
3.3. Çatı kiremiti kimyasal kompozisyonu 68
3.4. Cam atığı kimyasal kompozisyonu 68
3.5. Beton atığı kimyasal kompozisyonu 69
3.6. XRD analizi neticesinde hammaddelerde saptanan kristal fazlar 71
3.7. Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu 72
3.8. Uçucu kül kimyasal kompozisyonu 73
3.9. Toz kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) özellikleri 74
3.10. Payet sodyum hidroksitin analiz sonuçları 76
3.11. Sıvı sodyum silikat kimyasal kompozisyonu 77
3.12. İnce Geri Dönüşüm Agregasının Fiziksel Özellikleri 79
3.13. Kompozit üretiminde kullanılan farklı lif çeşitleri ve özellikleri 81
3.14. Kıvam ve priz tayini ölçmek için üretilen hamur karışımının içeriği 86
3.15. Kıvam deneyi sonuçları 86
3.16. Priz başlangıç ve bitiş süresi sonuçları 88
3.17. Agrega sağlamlık testi sonuçları 89
4.1. Delikli tuğla bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları 96
4.2. Çatı kiremiti bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları 97
4.3. Harman tuğlası bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları 99
4.4. Beton atığı bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları 100
4.5. Cam atığı bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları 101
4.6. İYA bazlı atıkların kombinasyonu ile üretilen jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları 102

4.7. 0,36 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 105
4.8. 0,45 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 106
4.9. 0,55 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 108
4.10. 0,36 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve harman tuğla kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 110
4.11. 0,45 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve harman tuğla kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 111
4.12. 0,55 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve harman tuğla kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 113
4.13. 0,36 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda harman tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 115
4.14. 0,45 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda harman tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 116
4.15. 0,55 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda harman tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları 117
4.16. Çeşitli parametrelerin etkisini incelemek üzere üretilen %100 İYA içeren jeopolimer harç karışımları 120
4.17. Çeşitli parametrelerin etkisini incelemek üzere üretilen İYA ve cüruf içeren jeopolimer harç karışımları 124
4.18. %100 İYA içeren jeopolimer kompozit karışımlarının içeriği 127
4.19. İYA ve cüruf içeren kompozit karışımlarının içeriği 132

4.20. Nihai EGC karışımlarının içeriği 138
4.21. EGC karışımlarının reolojik özellikleri..... 139
4.22. XRD analizi neticesinde saptanan kristal fazlar..... 165

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

E_m	Elastisite Modülü
$J_{b'}$	Kompozitin tamamlayıcı enerjisi
J_{tip}	Çatlak ucu tokluğu
K_m^2	Matris kırılma tokluğu
δ_0	Nihai deformasyon değeri
δ_{fc}	İlk çatlak oluşumundaki deformasyon değeri
σ_0	Nihai dayanım değeri
σ_{fc}	Nihai çatlak oluşumundaki dayanım değeri

KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
BA	Beton Atığı
CA	Cam Atığı
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
C-A-H	Kalsiyum Alüminyum Hidrat
CaO	Kalsiyum Oksit
C-A-S-H	Kalsiyum Alüminosilikat Hidrat
CO	Karbon Monoksit
C-S-H	Kalsiyum Silika Hidrat
ÇK	Çatı Kiremiti
DT	Delikli Tuğla
ECC	Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler
EDX	Enerji Yayılımlı X-Işını
EGC	Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozitler
Fe_2O_3	Demir Oksit
FTIR	Fourier-Transform Kızılötesi Spektroskopisi

GDA	Geri Dönüşüm Agregası
GDAB	Geri Dönüşüm Agregalı Beton
HT	Harman Tuğlası
İYA	İnşaat Yıkıntı Atığı
K/B	Kum/Bağlayıcı
K_2O	Potasyum Oksit
KK	Kızdırma Kaybı
LDB	Lif Donatılı Betonlar
LDÇK	Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler
MgO	Magnezyum Oksit
Na_2O	Sodyum Oksit
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
NaOH	Sodyum Hidroksit
N-A-S-H	Sodyum Alüminosilikat Hidrat
NM	Naylomono
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PVA	Poli-vinil Alkol
S/B	Su/Bağlayıcı
SD	Silis Dumanı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SiO_2	Silisyum Oksit
SLDÇK	Sünek Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler
SO_3	Kükürt
TiO_2	Titanyum Oksit
UK	Uçucu Kül
XRD	X-Işını Difraktometresi
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
YPLDÇK	Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler

1. GİRİŞ

Beton, dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. “Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi: Geri Dönüşüm Betonu (2009)” verilerine göre dünya çapında yılda yaklaşık 25 milyar ton beton üretilmektedir. Öte yandan, herhangi bir donatılandırma takviyesi yapılmamış beton, doğası gereği düşük çekme gerilmesi ve çekme şekil değiştirme kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle oldukça kırılgandır. Bu nedenle beton, yapı malzemesi olarak kullanıldığında donatı çubukları ve/veya lif donatısı gibi çeşitli takviyeler gerekmektedir. Son yıllarda çeşitli liflerin donatı olarak kullanımında giderek artan bir eğilim olmuş ve böylelikle malzemenin çatlak davranışı, çatlak köprüleme yoluyla kontrol edilerek çatlama sonrası sünekliliği sağlamak amaçlanmıştır (Bentur ve Mindess, 2007).

Son yıllarda, lif donatılı çimentolu kompozitler (LDÇK) alanında oldukça önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Nispeten yüksek gerilme seviyelerine kadar çoklu ince çatlakların eşlik ettiği tek eksenli gerilme altında şekil değiştirme sertleşmesi davranışını gösteren özel bir LDÇK sınıfı, yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitler (YPLDÇK) olarak adlandırılmıştır (Naaman, 2008). Çekme, basınç ve eğilme altında, süneklik, tokluk, kırılma enerjisi, şekil değiştirme sertleşmesi, şekil değiştirme kapasitesi gibi özellikleri geliştirdiğinden tek çatlaktan ziyade çoklu çatlak oluşumu arzu edilmektedir (Matsumoto ve Mihashi, 2003). Araştırmacılar çeşitli çalışmaların ardından YPLDÇK’leri çeşitli adlandırmalar ile literatüre kazandırmıştır. Bunlardan en önemlisi “Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler” (patentli ismi ile [Engineered Cementitious Composites] – ECC) olup, eksenel çekme yüklemesi altında %3 ile %5 arasında çekme birim şekil değiştirme deformasyonu davranışını yalnızca hacimsel olarak %2 oranında lif kullanımı ile sağlamaktadır. ECC’nin bu şekil değiştirme deformasyon değeri, geleneksel ve lif donatılı betonun şekil değiştirme deformasyon değerinin yaklaşık 500 katına ulaşabilmektedir. Genel olarak ECC, ilk çatlak oluşumundan sonra şekil değiştirme sertleşmesi ve bununla birlikte oldukça sünek bir davranış sergilemektedir. Devam eden yük altında ise süneklilik özelliğini koruyabilmektedir. Yük altında lifli betonlarda çatlak genişliği 500-750 μm seviyelerinde iken, bu değer ECC için 100 μm'dan az olmaktadır. Bu sayede ECC,

diğer beton türlerine kıyasla çevresel şartlar altında daha fazla dayanıklılığa ve mekanik yüklemeler altında bile çok daha düşük geçirimliliğe sahip olmaktadır (Şahmaran ve Li, 2007).

Günümüzde, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler konusundaki endişeler, özellikle çimento ve betonun, karbondioksit (CO_2) emisyonu ve enerji sarfiyatı gibi negatif etkileri olmak üzere inşaat endüstrisinde önemli bir konu haline gelmiştir. Küresel ısınmanın yaklaşık %65'lik bir kısmını CO_2 emisyonları oluşturmakta ve çimento endüstrisinin de bu emisyonların önemli bir bölümünden sorumlu olduğu bilinmektedir. Büyük bir miktarda enerji gerektiren çimento üretim süreci kapsamında, her bir ton çimento üretiminin 1 ton CO_2 yaydığı kabul edilmiştir (McCaffery, 2002). Örnek olarak, ABD'de bir ton çimento üretimiyle ilişkili toplam enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının sırasıyla ortalama 4.8 GJ ve 0.927 ton olduğu bildirilmiştir (Marceau ve ark. 2006). CO_2 emisyonlarına ek olarak, çimento üretiminin önemli miktarlarda SO_x, NO_x, partikül madde ve diğer kirleticilere de neden olduğu söylenmektedir (Price vd., 2008). Öte yandan, Avrupa Çimento Birliği'ne (CEMBUREAU) (2015) göre, dünya çimento üretimi son yıllarda, 1900'de sadece 10 milyon tona kıyasla 2014 yılında 4,3 milyar tona yükselmiştir. Bu istatistikler, çimentonun insanlar tarafından sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzeme olduğu gerçeğini desteklemekte ve çimento üretimi ile ilgili dünya çapında toplam CO_2 emisyonlarının %5−7'sine neden olduğuna dair net bir bakış açısı getirmektedir (Huntzinger ve Eatmon, 2009). Bu nedenle Portland çimentosuna (PÇ), yüksek performans ve/veya çevresel açıdan sürdürülebilir alternatifler geliştirme üzerine hızla genişleyen bir araştırma alanı araştırmacıların giderek ilgisini çekmektedir.

Jeopolimer terimi ilk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından, alüminosilikat tozu ve alkali solüsyonunun reaksiyonu sonucunda oluşan malzeme tipini tanımlamak için kullanılmıştır (Davidovits 1982a). Bu tip malzemeler ilk etapta Avrupa'da yaşanan bir dizi yangın felaketinin ardından organik ısı ile sertleşen polimerlere karışı yangına dayanıklı bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda karbon fiber kompozitler için koruyucu bir reçine tabaka, ahşap yapılara termal koruma sağlama gibi çok farklı türde alanlarda termal koruyucu malzeme olarak kullanılmıştır. İlerleyen zamanlarda uçucu külün alkali aktivasyonu sonucu üretilen jeopolimerlerin

güvenilir, yüksek performans özellikleri neticesinde bu malzemelerin yapı malzemeleri olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalara yoğunlaşılmıştır (Wastiels ve ark., 1993). Jeopolimerler, jeolojik kökenli malzemelerden (örneğin metakaolin) veya silika ve alümina açısından zengin uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel yan ürünlerden imal edilebilen, büyük ölçüde X-ışını amorf alüminosilikat malzemelerin yüksek alkali aktivatörler ile aktif edilmesi sonucu oluşan ve çimento içermeyen bağlayıcı sınıfıdır. Jeopolimer betonun ticari ve endüstriyel kullanımı, geleneksel PÇ betonuna çevresel olarak sürdürülebilir bir alternatif olarak son yıllarda giderek yaygınlaşmıştır (Davidovits, 1991). Birtakım çalışmalar, uçucu kül bazlı jeopolimer üretiminin PÇ üretimine kıyasla en az %80 daha az CO_2 emisyonuna sahip olduğunu ve yaklaşık %60 daha az enerji gerektirdiğini bildirmiştir (Duxson ve ark. 2007). Aynı şekilde bazı çalışmalar ile, jeopolimer betonun geleneksel PÇ betonuna karşı daha yüksek basınç mukavemeti, kimyasal, yangın ve don direnci gibi üstün özellikler sergilediğini bildirmiştir (Provis ve Van Deventer, 2009).

Endüstriyel yan ürünlerin ve atıkların yanı sıra, beton, tuğla, seramik gibi çeşitli inşaat ve yıkıntı atıklarının (İYA) da jeopolimerizasyon teknolojisi ile değerlendirilmesi son yıllarda önem kazanan bir diğer araştırma konusu olmuştur. İnşaat endüstrisi, doğal kaynakların çıkarılması, enerji tüketimi, kirletici madde salınımı, sera gazı emisyonları ve üretilen atık miktarı açısından büyük bir çevresel etkiye sahip önemli bir sektördür. Dolayısıyla, inşaat sektöründe sürdürülebilirliğin desteklenmesi ve uygulanması, ekosistemlerinin korunmasına, doğal kaynakların korunmasına ve yeryüzündeki tüm canlı organizmaların çevresel koşullarının iyileştirilmesine yardımcı olabilecek potansiyele sahiptir. Dünya genelinde artan nüfusa bağlı gün geçtikçe artan şehirleşme, beraberinde yapı malzemelerinin hem üretim hem atık oluşturma bazında sürekli bir artışına neden olmaktadır. Doğal afetler, bakım/onarım, hizmet ömrünü tamamlayan çeşitli yapıların yıkılıp tekrar inşa edilmesi gibi hususlar sonucu ortaya çıkan inşaat ve yıkıntı atıklarının hem temiz depolama alanlarını işgal etmesi, hem de çevresel kirliliğe neden olacak çeşitli içeriğe sahip olması, bu malzemelerin geri dönüşümünü kaçınılmaz kılmaktadır. Bu nedenlerden ötürü inşaat ve yıkıntı atıklarının, jeopolimerizasyon teknolojisi sayesinde "yeşil" bağlayıcı malzemeler geliştirme hususunda çimentoya alternatif hammadde olarak hem inşaat ve yıkıntı atıklarının hem de çimento üretiminin çevreye verdiği zararları minimize etme

potansiyeli ile dünya çapındaki araştırmacıların dikkatini çekerek yoğunlaştığı önemli bir konu olmuştur.

Bu bağlamda, jeopolimer mekanizması ile çevreye karşı çok daha duyarlı "yeşil" yapı malzemelerin istenilen performansa sahip olacak şekilde geliştirilmesi ve YPLDÇK sınıfının en önemlilerinden biri olan ECC'nin yüksek mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile entegre edilmesi, sürdürülebilir altyapıların geliştirilmesi kapsamında atılacak en önemli adımlardan bir tanesidir. Literatürde "Lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozitler" (Engineered Geopolymer Composites – [EGC]) olarak adlandırılan bu yeni nesil üstün özellikli malzemeler üzerine yeterli sayıda olmasa da çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş ve yukarıda bahsedildiği gibi çeşitli olumlu etkileri kanıtlanmıştır (Bernal ve ark., 2012; Zhang ve ark., 2012; Nematollahi ve ark., 2015). Her ne kadar birtakım çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda tamamen çimentosuz lif donatılı jeopolimer kompozit malzemelerden nispeten umut verici sonuçlar elde edilmiş olsa da literatürdeki çalışmalar oldukça yeni ve kısıtlı sayıdadır. Bu nedenle ilgili çalışma alanı üzerine daha detaylı ilave çalışmaların gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tez kapsamında gerçekleştirilmesi planlanan araştırma planı çerçevesinde, dünyada artarak büyüyen bir sorun haline gelen ve AB üyesi ülkelerin tümünde üretilen toplam atık malzeme miktarının dörtte birinden daha fazla bir miktara tekabül eden İYA'nın temiz toprağa karışmadan yüksek performanslı yeni yapı malzemeleri geliştirerek mümkün olabilecek en büyük faydanın sağlanması hedeflenmektedir. Projenin 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 mikroçatlak hasarı oluşturma ve şekil değiştirme sertleşmesi özelliğinden ödün vermeyen jeopolimer bağlayıcılı kompozit malzemelerin (Engineered Geopolymer Composites [EGC]) geliştirilmesi ve bu sayede inşaat endüstrisinde tekrar kullanım ve/veya geri dönüştürme fikrinin çok daha yaygın bir hale getirilmesidir. Proje 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.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak beton atığı, tuğla ve kiremit atıkları, cam atığı gibi bir takım inşaat ve yıkıntı atığı bazlı malzemelerin, çeşitli alkali aktivatörler ile aktivasyonu sonucu jeopolimer hamur karışımların geliştirilmesi planlanmıştır. Yeterli seviyede bağlayıcılık kapasitesine sahip çeşitli jeopolimer hamur karışımların elde edilmesinin ardından, yine inşaat yıkıntı atığı bazlı beton atıklarından elde edilen geri dönüşüm agregası (GDA), herhangi bir iyileştirme işlemi yapılmadan, karışımlara doğrudan ilave edilerek jeopolimer harç karışımları tasarlanmıştır. Jeopolimer hamur ve harç karışımlarının geliştirilmesi kapsamında, karışımlara sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) gibi literatürde sıklıkla kullanılan alkali aktivatörler çeşitli oranlarda denenerek eklenmiştir. Üretilen jeopolimer ürünler, çeşitli sıcaklık ve periyotlarda fırın kürüne, laboratuvar koşullarında ortam kürüne ve su kürüne tabi tutulmuşlardır. Ayrıca mekanik ve dayanıklılık performanslarına etkisini ölçmek üzere bu karışımlara çeşitli oranlarda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi pozolanik alüminosilikat malzemeler eklenmiştir. İstenilen özelliklere sahip jeopolimer harç karışımları geliştirildikten sonra, karışımlara yüksek performans özellikleri kanıtlanmış çeşitli lif donatılar eklenmiş ve mikro-mekanik tabanlı malzeme tasarımı uyarınca mikro çatlak oluşturabilme kabiliyeti sayesinde yüksek sünekliğe sahip ve birçok metale benzer şekilde şekil değiştirme sertleşmesi özelliği gösteren EGC karışımları geliştirilmiştir. Üretilen jeopolimer kompozitlere basınç ve eğilme testleri yapılarak temel mekanik özellikler test edilmiştir. EGC malzemelerine uygulanan eğilme yüklemesi sonucunda oluşan mikro çatlakların sayısı, genişliği ve dağılımı gibi önemli parametreler de incelenerek nihai ürün tüm özellikleri ile yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Giriş

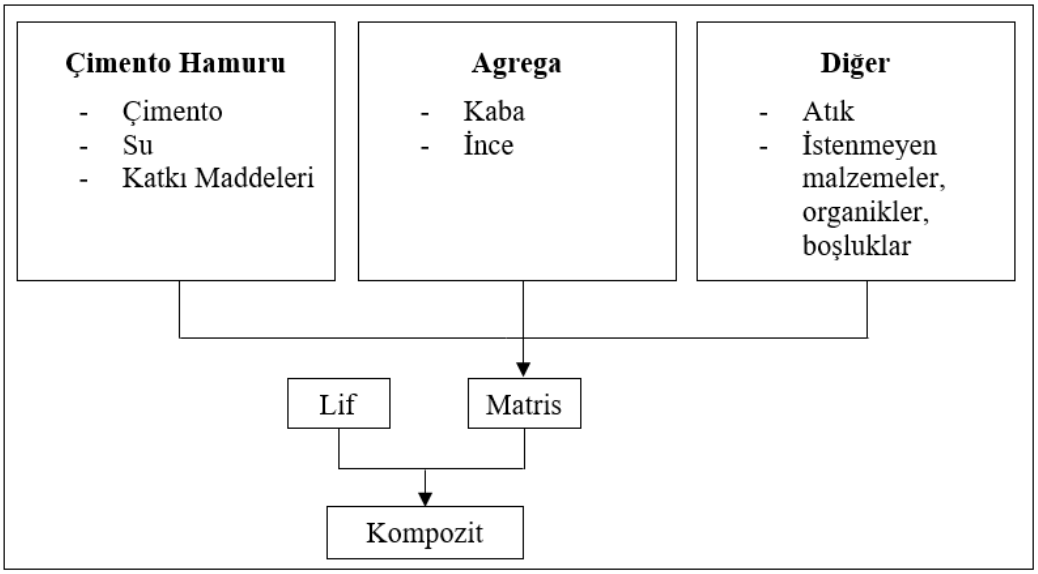
Bu bölümün ilk kısmında LDÇK'ler hakkında bir literatür taraması sunulmuştur. Bu bağlamda, şekil değiştirme sertleşmesi gösteren ECC gibi kompozit malzemelerin mikromekanik tabanlı tasarım kriterleri, uygulama ve sürdürülebilirlik özellikleri üzerinde durulmuştur. Devam eden bölümlerde ise yeni nesil "yeşil" kompozit geliştirilmesi kapsamında jeopolimer teriminden, özelliklerinden ve uygulama alanlarından bahsedilmiş, bu mekanizmanın günümüzün büyük problemlerinden biri olan inşaat ve yıkıntı atıklarına uygulanması ile ilgili çalışmalar araştırılmıştır. Daha sonra ise şekil değiştirme sertleşmesi gösteren kompozitlerin ana bağlayıcı fazı olan çimento, yeni nesil "yeşil" yapı malzemeleri olan jeopolimerler ile değiştirilip, elde edilen EGC ürünün çeşitli özellikleri ve uygulama alanları gözden geçirilmiştir.

2.2. Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler

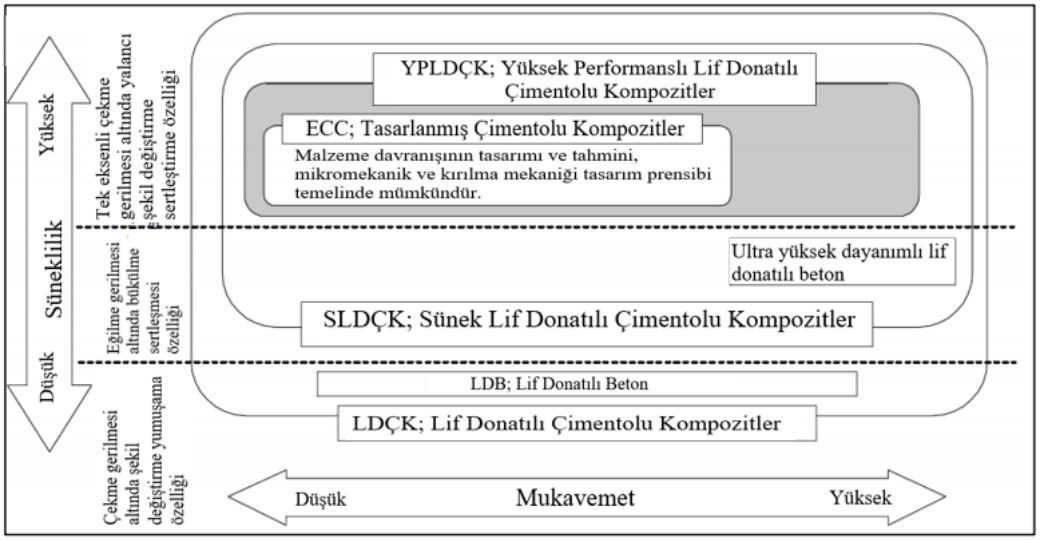
Beton, dünya çapında yılda yaklaşık 25 milyar ton üretimi ile en yaygın kullanılan yapı malzemesidir (Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi: Geri Dönüşüm Betonu, 2009). Bununla birlikte, çimento hamuru, harç ve beton gibi düz ve takviyesiz çimentolu malzemeler, düşük çekme gerilmesi ve çekme şekil değiştirme kapasitesi ile doğada kırılgandır. Çimentolu malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılması için basınç mukavemetinin yanı sıra yeteri kadar çekme mukavemetine de sahip olması gerekir. Bu nedenlerle uzun yıllar boyunca çimentolu malzemeler ile donatı çubukları ve/veya lif donatıları gibi çeşitli takviye elemanları birleştirilerek, istenilen seviyede mukavemet değerlerine ulaşılması amaçlanmıştır. Özellikle son 40 yılda LDÇK kullanımında istikrarlı bir artış olmuştur. LDÇK'lerde lifler, düz çimentolu malzemelerin kırılgan davranışlarını değiştirmek için ya sürekli hizalanmış lifler (Aveston ve diğerleri, 1973) ya da rastgele yönlendirilmiş kısa lifler (Li ve Wu, 1992) olarak kullanılmıştır. Liflerin takviye olarak kullanımı, genellikle "geleneksel" çelik çubuklara alternatif olarak düşünülmemiştir. Sürekli takviye çubukları ve lifler farklı

amaçlar için kullanılmaktadır. Aslında hem liflerin hem de sürekli çelik çubukların aynı anda kullanılacağı birçok uygulama mevcuttur. Malzemelerin mukavemeti orta derecede artma kabiliyetine sahip olsa da lif kullanımının mukavemeti arttırmaya yönelik olmadığı belirtilmelidir. Genel olarak lifler, malzemenin çatlamasını kontrol etmek ve bu çatlaklar arasında köprü oluşturarak matrisin çatlamasından sonra düz çimentolu malzemelerin kırılma davranışını değiştirmek için kullanılmakta ve böylece çatlama sonrasında malzemeye süneklilik sunmaktadır (Bentur ve Mindess, 2007).

Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, pratik amaçlar ve mekanik modelleme için, LDÇK'ler genellikle matris ve lif olmak üzere iki ana bileşene sahip kompozitler olarak tanımlanmaktadır (Naaman, 2008). Matrisin kendisi bazı bileşenlere sahip kompozit bir malzeme olsa da LDÇK'lerin ilk ana bileşenini temsil ettiği varsayılmaktadır. Matrisin, hamur, harç veya beton olmasına bağlı olarak belirtilen tüm katkı maddelerini ve agregaları içerdiği varsayılmaktadır. Ek olarak, matristeki sıkışmış hava boşlukları da matrisin bir parçası olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, LDÇK'lerin ikinci ana bileşeni olan lifin süreksiz olduğu ve kompozit hacim içinde rastgele dağıldığı düşünülmektedir. Lif-matris arayüz bağı sayesinde, lif ve çimentolu matris LDÇK özelliklerini tam anlamıyla yansıtmak için birlikte çalışmaktadır. Literatürde LDÇK'ler farklı parametrelere göre sınıflandırılmıştır. Şekil 2.2'de Japonya İnşaat Mühendisleri Derneği (JSCE), farklı LDÇK türlerini mukavemet ve süneklilik düzeylerine göre sınıflandırmıştır. Farklı LDÇK sınıfları arasında, özellikle ilgi çeken sünek lif donatılı çimentolu kompozitler (SLDÇK) ve YPLDÇK'lerin terminolojisi ve kapsamı aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmaktadır.



Şekil 2.1. LDÇK'lerin matris ve lif olmak üzere iki ana bileşene sahip olarak tanımlanması (Naaman, 2008)



Şekil 2.2. LDÇK'lerin Tasarım ve Sınıflandırma Ölçütleri

2.2.1. Sünek Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler

Düz çimentolu malzemelere (hamur, harç ve beton) benzer geleneksel lif donatılı beton (LDB), ilk çatlamadan sonra ani bir gerilme düşüşü sergiler. SLDÇK'de ise, artan yük ile çoklu çatlama meydana gelir ve ilk çatlamadan hemen sonra oluşan ani düşüşü önlenir. Bu nedenle, SLDÇK pik yükte geleneksel LDB'ye göre daha yüksek eğilme kapasitesine sahiptir, bu da ilk çatlamadan sonra eğilme sertleşmesi ile çoklu çatlaklar ile karakterize edilir.

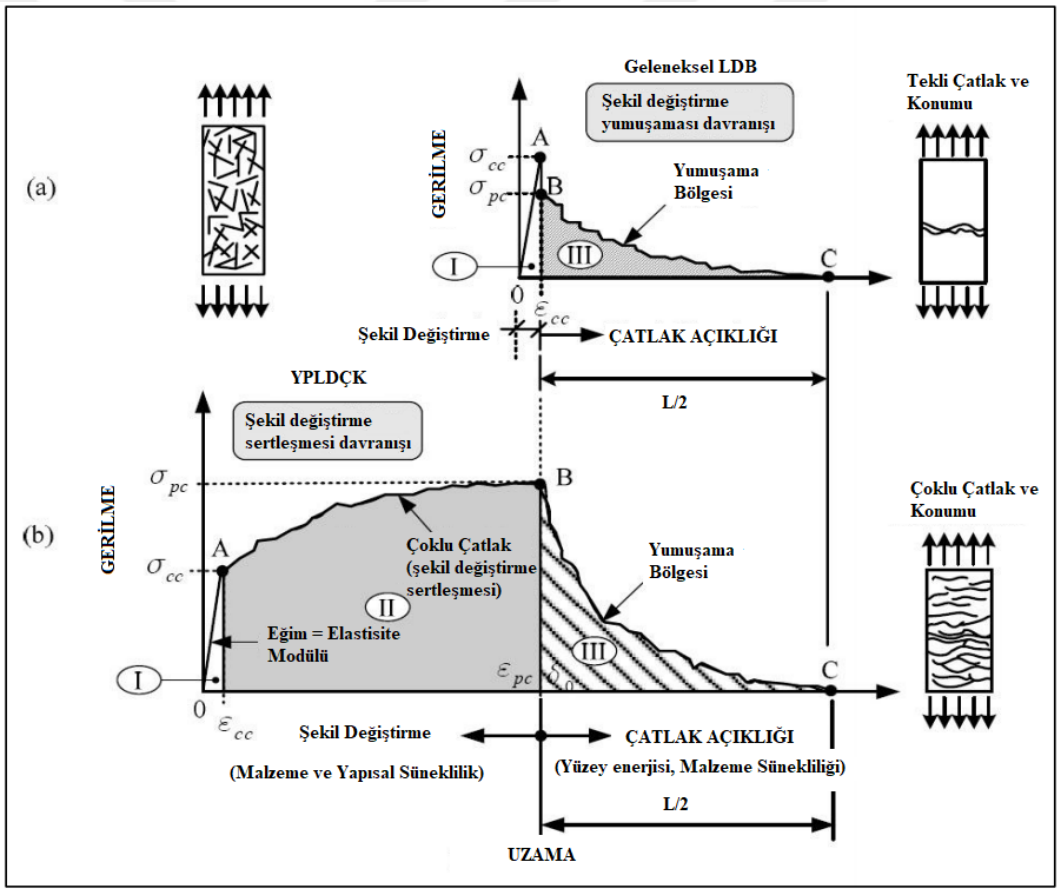
Japonya Beton Enstitüsü (JCI) Komitesi'nin terminolojisine göre, SLDÇK, tek bir çatlak sergileyen geleneksel LDB'lerin aksine, birden fazla çatlama sergileyen bir LDÇK sınıfıdır (Matsumoto ve Mihashi, 2003). Çoklu çatlama, eğilme yüklemesi altında süneklik, tokluk, kırılma enerjisi, şekil değiştirme sertleşmesi, şekil değiştirme kapasitesi gibi özelliklerde gelişmeye yol açan ve arzu edilen bir özelliktir (Matsumoto ve Mihashi, 2003).

2.2.2. Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler

Tek eksenli çekme gerilmesi altında şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemek üzere tasarlanmış, nispeten yüksek gerilme seviyelerine kadar çok sayıda ince çatlak oluşumu sergileyen YPLDÇK'ler özel bir LDÇK sınıfı olarak tanımlanmıştır (Naaman, 2008). Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, YPLDÇK, SLDÇK'den daha dar bir malzeme sınıfıdır. YPLDÇK, doğrudan çekmede ve dolayısıyla eğilmede çoklu çatlama ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösteren bir LDÇK'dir (Naaman, 2008). Bununla birlikte, SLDÇK, sadece eğilmede çoklu çatlak sergileyen bir LDÇK sınıfıdır.



Şekil 2.3. LDÇK'nin doğrudan çekme gerilmesi altındaki davranışının basit bir sınıflandırması

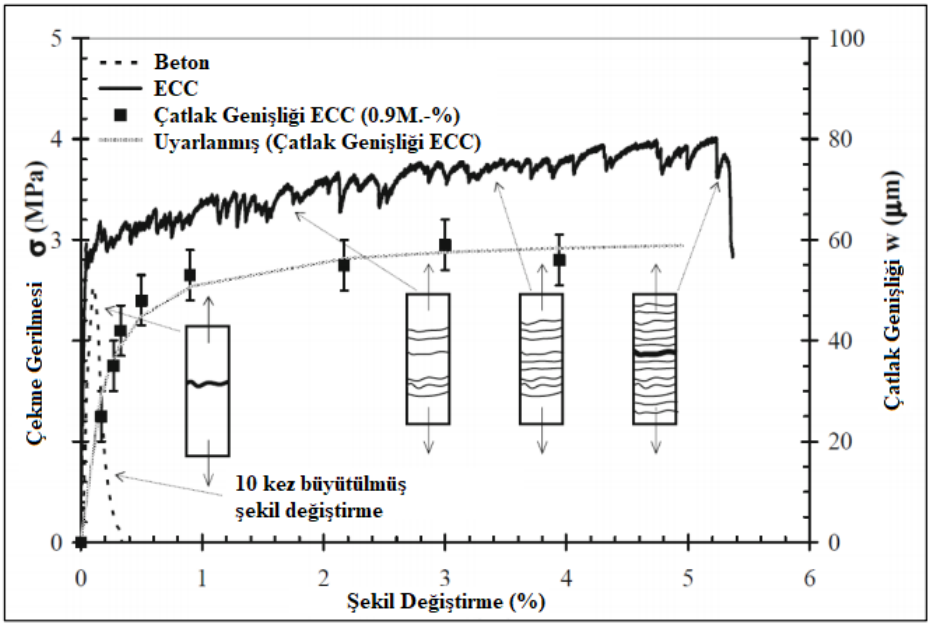


Şekil 2.4. Çekme gerilmesi altında tipik bir şekil değiştirme-gerilme ve uzama gerilme eğrisi (a) Geleneksel şekil değiştirme yumuşaması davranışlı LDÇK, (b) şekil değiştirme sertleşmesi davranışlı LDÇK veya YPLDÇK (Naaman, 2008)

Bir LDÇK'in YPLDÇK olarak sınıflandırılıp sınıflandırılamayacağını belirlemek için Naaman (2008) tarafından önerilen bir yaklaşım, doğrudan çekme gerilmesi altında şekil değiştirme-gerilme tepkisine dayanmaktadır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de gösterildiği üzere, eğer doğrudan çekme gerilmesi altında, kompozitin şekil değiştirme-gerilme eğrisi, ilk çatlak oluşumundan sonra şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergiliyorsa, bu malzeme YPLDÇK olarak sınıflandırılmaktadır. Aksi halde geleneksel bir LDÇK, şekil değiştirme yumuşaması olarak karakterize edilen, ilk çatlak oluşumundan sonra çekme gerilmesi altında ani bir gerilme düşüşü sergilemektedir. Başka bir deyişle, doğrudan çekme gerilmesi durumunda, şekil değiştirme-gerilme eğrisinin, elastik-mükemmel plastik davranışı ile benzer veya daha üstün olduğu söylenebilmektedir.

2.3.1. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler (ECC)

Literatürde çalışılmış birçok YDLDÇK'ler, yaklaşık %1 çekme gerilmesi sünekliği sergilemek için büyük miktarlarda life ihtiyaç duyarken (hacim olarak %4 ila %20), ECC gibi şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento bağlayıcılı kompozitler az miktarda lif kullanılarak (hacim olarak %2 veya daha az) %6'lara kadar bir çekme gerilmesi sünekliği sergileyebilmektedir (Li ve Kanda, 1998; Kong ve ark., 2003). Şekil 2.5'de görüleceği üzere, ECC'ler genel olarak şekil değiştirme sertleşmesi aşamasında dar çatlak genişliğine (tipik olarak 100 μm altında) sahip çok sayıda ince aralıklı çatlak göstermektedir. Bu tür üstün tek eksenli gerilme performansına sahip olan ancak düşük hacimli lif fraksiyonu olan ECC'ler, mikromekanik ve kırılma mekaniği prensiplerine dayanılarak tasarlanabilir (Li, 1998). Bu malzeme, "Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler; ECC" tarafından bu tür şekil değiştirme sertleşmesine sahip çimento bağlayıcılı kompozit materyalleri için Michigan Üniversitesi'nden Profesör Victor Li ve iş arkadaşları (Li ve Leung, 1992) tarafından tanıtılmıştır. Aşağıdaki alt bölümlerde ECC malzemelerinin bileşen malzemeleri, mikromekanik tabanlı tasarım kriterleri, uygulamaları ve malzeme sürdürülebilirliği gözden geçirilmektedir.



Şekil 2.5. ECC'nin dar çatlak genişliği kontrolü ile doğrudan şekil değiştirme-çekme gerilmesi tepkisi

2.3.1.1. ECC Tasarım Parametreleri

Birçok LDÇK tasarımlarına benzer şekilde, ECC gibi şekil değiştirme sertleşmesi gösteren malzemelerin karışımlarında kaba agregalar dışında, ince kum, su, az miktarda katkı maddesi (süper plastikleştirici ve viskozite değiştirici katkı) gibi aynı bileşenler kullanılmaktadır. Kaba agregaların eklenmesi, matris kırılma tokluğunu arttırır, bu da kompozitin arzu edilen şekil değiştirme sertleşmesi davranışını olumsuz etkiler. Tipik ECC karışımlarında kullanılan su/çimento oranı ve kum/çimento oranı genellikle 0,5 veya daha düşüktür (Li ve Kanda, 1998). Her ne kadar kompozitler yapısal uygulamalar için tasarlansa da daha önce de belirtildiği gibi, karışım tasarımında genellikle az miktarda (hacimce %2 veya daha az) kısa lif kullanılır ve kompozit, %6'ya kadar çekme gerilmesi şekil değiştirme kapasitesi ile çok yüksek süneklik gösterir (Li ve Kanda, 1998; Kong ve diğerleri, 2003). Bu, ECC'nin, yaklaşık %1 gerilme sünekliği ile şekil değiştirme davranışı sergilemek için büyük miktarlarda lif (yani hacimce %4 ila %20) kullanan bazı YPLDÇK'lere göre en önemli avantajlarından biridir (Naaman ve Reinhardt, 1995). ECC'nin karıştırma prosedürü,

nispeten az miktarda kıyılmış liflerin kullanılması sayesinde normal betona benzer. Bazı yapısal çalışmalarda ECC'nin ticari uygulanabilirliği ve ekonomik avantajları kanıtlanmıştır (Li ve Kanda, 1998). ECC'de çeşitli lif türleri kullanılabilirken, poli vinil alkol (PVA) ve yüksek modüllü polietilen (PE) lifler, ECC karışımlarında kullanılan en yaygın lif türleridir. Kompozitin doğru karışım oranının mikromekanik esaslı ilkeler tarafından belirlenmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Başka bir deyişle, kompozitte istenen çekme gerilmesi sünekliğini sağlamak için, matris, lif ve arayüz özelliklerinin kombinasyonu, şekil değiştirme sertleşmesi davranışı için mikromekanik tabanlı tasarım kriterlerini karşılamalıdır (Li, 1998; Kanda ve Li, 1998).

2.3.1.2. ECC'nin Mikromekanik Tabanlı Tasarım Kriterleri

Kısa lif donatılı kırılgan matrisli kompozitlerde şekil değiştirme sertleşmesi davranışını tasarlama stratejisi, matris, lif ve lif-matris arayüzü arasındaki etkileşimi gerçekleştirmeye ve uyarlamaya dayanır. Mikromekanik özellikler, malzeme mikro yapıları ve kompozit özellikler arasındaki etkileşimi anlamak için önemli bir araçtır (Yang ve diğerleri, 2010). Lif ile güçlendirilmiş kırılgan matris kompozitinde şekil değiştirme davranışı, matristeki çoklu çatlamanın ardışık gelişmesinden kaynaklanmaktadır. Çoklu çatlama davranışı için temel bir gereklilik, gerilme altında kararlı halde çatlamanın oluşmasıdır (Yang ve diğerleri, 2008). Başka bir deyişle, hava kabarcıkları ve diğer mikro ölçekli heterojenlikler gibi bir kusur bölgesinden başlatılan çatlak, değiştirilmiş griffith çatlak modeli yerine düz bir çatlak modunda yayılmalıdır. Kararlı düz çatlak gelişiminde, yükleme ve çatlak açıklığı sabit kalır ve köprüleme lifleri yükü koparmadan ve azaltmadan sürdürür. İlave yükleme, başka bir kusur bölgesinden başka bir mikro çatlak başlangıcına ve müteakip düz çatlak uzantısına neden olur. Bu tür kararlı çatlaklarının tekrar tekrar oluşumu, kompozitin çoklu çatlamasına ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışına yol açar (Yang ve diğerleri, 2008). Modifiye griffith çatlak modelinin, düz çatlak modeline göre baskın olması, çatlak ucunun arkasındaki çatlak açıklığının sonsuz şekilde artmasına ve sonuçta ya lif çekilmesi ya da kopmasından dolayı lif köprüleme kapasitesinin tüketilmesine neden olur. Köprüleme gerilmesi azaldığından, daha sonra başka bir çatlak oluşumu

başlatılamaz, bu da tek bir çatlağın daha da genişlemesiyle şekil değiştirme yumuşaması davranışına neden olur (Wang, 2005).

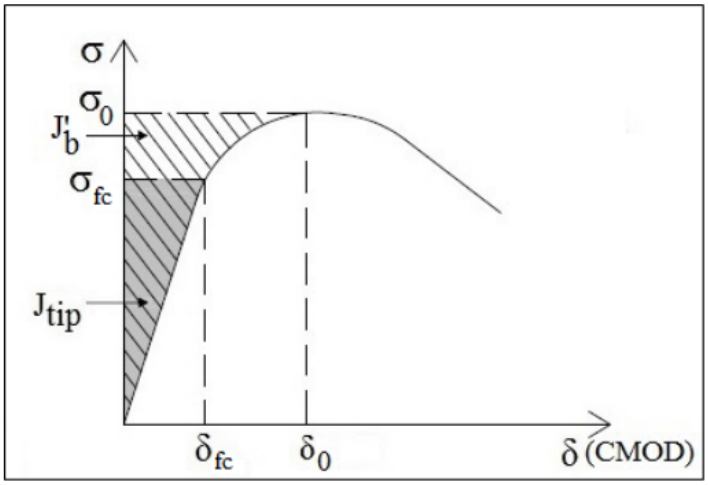
Kararlı durum çatlaması durumu, J-integral yöntemi kullanılarak Marshall ve Cox (1998) tarafından analiz edilmiştir. Lif köprüleme davranışı, köprü çatlak açılma σ (δ) ilişkisi ile karakterize edildiğinde, genellikle şekil değiştirme davranışı için enerji bazlı koşul olarak adlandırılan kararlı durum çatlaması koşulu, aşağıdaki basit formda ifade edilebilir:

$$J_{tip} \leq \sigma_0\delta_0 - \int_0^{\delta 0} \sigma(\delta)\mathrm{d}\,\delta \equiv J_b{}', \qquad (2.1)$$

Burada $J_b{}'$, kompozitin σ(δ) eğrisinden hesaplanan tamamlayıcı enerjidir, σ_0 ise δ_0 çatlak açıklığına karşılık gelen maksimum köprüleme gerilmesidir ve J_{tip} ise küçük lif hacmi fraksiyonu için aşağıdaki denklemden yaklaşık olarak tahmin edilebilen çatlak ucu tokluğudur:

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \qquad (2.2)$$

Burada K_m ve E_m, matrisin sırasıyla kırılma tokluğu ve elastisite modülüdür (Li ve ark. 1995). Denklem (2.1) ile temsil edilen davranış, için enerji bazlı koşul, kararlı durum düz çatlak yayılımı sırasındaki enerji değişiklikleri dikkate alınarak elde edilir (Li ve diğerleri, 2001). σ(δ) eğrisinin altındaki alan, birim çatlak ilerlemesi başına lif köprülemesi sonucunda tüketilen enerjiyi gösterir. Öte yandan, $J_b{}'$ çatlak ilerlemesi için mevcut net enerjiyi temsil eder. Başka bir deyişle, $J_{b'}$, dış etkenler tarafından sağlanan enerji ile lif köprüleme eylemi tarafından tüketilen enerji arasındaki farktır. Bununla birlikte, J_{tip} çatlak ilerlemesine direnç gösteren matris çatlak tokluğu olarak anlaşılmaktadır. Böylece (2.1) denklemi, kararlı durum düz çatlak yayılımı için mevcut olan maksimum enerjinin, matrisin parçalanması için gereken enerjiyi aşması gerektiğini ifade eder (Kanda ve Li, 2006). Bu tür enerji dengesi konsepti şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren kompozitlerin tipik σ(δ) eğrisi (Taranmış alan tamamlayıcı enerjiyi ve gölgeli alan çatlak ucu tokluğunu temsil eder)

Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı için diğer bir koşul, çekme gerilmesi altında ilk çatlama mukavemetinin (σ_{fc}) maksimum lif köprüleme mukavemetini (σ_0) aşmaması gerektiğidir. Genellikle mukavemete dayalı durum olarak adlandırılan bu durum aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$\sigma_{fc} \leq \sigma_0 \qquad (2.3)$$

Burada σ_{fc}, önceden var olan kusur boyutu ve K_m ile belirlenir (Li ve ark., 2001). Kırılgan bir matris şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterdiğinde, kompozitin (σ_{cu}) nihai gerilme mukavemeti σ_0 ile çakışır. Denklem (2.3)'ün sağlandığı durumlarda, lif köprüleme kapasitesinin altında bir yük seviyesinde bir kusur bölgesinden bir mikro çatlağın başlatılmasını sağlar. Başka bir deyişle, mukavemet temelli durum çatlakların başlangıcını yönetir. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösteren kompozit elde etmek için her iki kriter, yani mukavemet ve enerji temelli koşullar yerine getirilmelidir; aksi takdirde, şekil değiştirme yumuşaması davranışı sergileyen geleneksel lif takviyeli beton türü elde edilmiş olur (Yang ve ark., 2008). Standart bir bakış açısı ile, genellikle lif donatılı bir malzemenin çekme gerilmesi altında şekil değiştirme sertleşmesi davranışlı olarak kabul edilebilmesi için, sadece

Denklem (2.1) ve (2.3) 'te sunulan iki koşulu karşılayabilmesi yeterli olmamakta, ayrıca kompozit malzemenin ortalama nihai çekme deformasyonunun en az %0,5'ten büyük olması gerekmektedir.

2.3.1.3 ECC Uygulamaları

2.3.1.3.1.Yapısal Uygulamalar

Geçmişten günümüze ECC gibi şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterebilen çimentolu bağlayıcı içeren kompozit malzemelerin betonarme binaların perde duvar güçlendirmesi, döngüsel yüklemeye maruz kalan kesme elemanlarında yapısal elemanlara uygulanması, kiriş-kolon bağlantılarındaki mekanik birleşim elemanlarında, takviye korozyon kontrolü için dayanıklı kapak olarak betonarme kirişlerde ve genel olarak yapısal beton onarımı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Li ve Kanda, 1998). Bu araştırmaların bazıları, ECC'nin yapısal elemanlara potansiyel uygulanabilirliğini göstermek için aşağıda vurgulanmıştır.

Kanda ve ark. (1998), döngüsel yükleme altında geleneksel donatılandırma ile güçlendirilmiş PVA-ECC kirişlerinin eğilme mukavemeti ve sünekliğini araştırmıştır. Orta açıklığın tam ters çevrilmiş düzgün kesme yüküne maruz bırakıldığı çalışmalarında dört noktalı bir eğilme testi düzeneği kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada açıklık-derinlik oranı ve kayma donatı miktarı gibi parametreler incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda bu numuneler, benzer basınç dayanım değerlerine sahip geleneksel betonarme ile yapılan kontrol örneklerinden önemli ölçüde (yaklaşık 4 kat) daha yüksek çatlak yoğunluğu göstermiştir. Kontrol betonarme numunelerinde çatlak açıklığı mm aralığında iken, çalışma kapsamında araştırılan numuneler ise bu açıklık 0,1 mm seviyelerinde olmuştur. Sonuçlar, geleneksel donatılandırma ile güçlendirilmiş PVA-ECC kirişlerinin konvansiyonel betonarme ile değiştirilmesinin hem çekme gerilmesi hem de basınç gerilmesi altında, kesme kiriş numunelerinin yük kapasitesinde %50 artış sağladığını göstermiştir. Kanda ve ark. (1998), bu numunelerinin geleneksel betonarme numunelerine göre üstün kesme performansına (yük kapasitesi, süneklik ve çatlak kontrolü açısından) sahip oldukları

sonucuna varmıştır. Bu numuneler, enine donatılandırma olmadığında ve kısa kayma açıklığına sahip olsa bile sünek davranış sergilerken, kısa kayma açıklığına sahip betonarme numunelerinin kırılgan bir kopma davranışına sahip olduğu bilinmektedir. Özetle, Kanda ve ark. (1998) çalışması, ECC'nin yapısal makaslama elemanlarına uygulanmasını sağlamıştır.

Mishra (1995), bir kiriş-kolon bağlantısının mafsal bölgesinde ECC uygulamasını inceledi. Normal detaylandırma ile PE-ECC bağlantısında, histerik döngülerin daha fazla yük çevrimi ile daha dolgun olduğu sonucuna vardı. Böylece PE-ECC bağlantısında toplam enerji emilimi, kontrol betonarme örneğinden yaklaşık 2,8 kat daha yüksekti. PE-ECC bağlantısının çatlak deseninin, yukarıda bahsedilen Kanda et al. (1998) çalışmalarına benzer olduğunu bildirdi. Tasarlandığı gibi, hasar, bu çalışmada kullanılan ECC'nin daha düşük ilk çatlak dayanımı sayesinde mafsal bölgesi içinde başlatılmıştır. Özetle, Mishra (1995) çalışmasının deprem gibi aşırı dinamik yüklere maruz kalan kritik yapısal elemanlarda ECC'yi mekanik bir güvence olarak kullanmanın fizibilitesini sağladığı söylenebilir (Li ve Kanda, 1998).

Kabele ve ark. (1997), duvar takviyelerinin inşası için prekast makaslama panellerinde bir PVA-ECC uygulamasını sayısal olarak araştırmak için rijit bir şekilde birleştirilen kesme panellerini simüle eden bir sonlu eleman modeli kullanmıştır. Daha sonra Kanda ve ark. (1998), ECC'nin şekil değiştirme davranışını yansıtan materyal oluşturucu bir model kullanarak bunu araştırmak için deneysel bir çalışma yürüttüler. PVA-ECC kesme panellerinin, düz betonla yapılmış numuneleri kontrol etmek için üstün performans (yük ve deformasyon kapasitesi açısından) sergilediğini ve bunun sonucunda ECC panellerinin yapısal mukavemetini ve sünekliğini arttığını bildirdi. Bu durum, ECC'nin derzlerdeki gevşeme ve hasarı kesme panelinin iç kısmına yeniden dağıtma özelliği ile ilişkilendirilmektedir (Li ve Kanda, 1998). Kanda ve diğ. (1998) ayrıca, çelik cıvata kullanılarak birleşimin kesme testinde oluşan lokal kırıkların, düz betonun ECC ile değiştirilmesiyle önlenebileceğini göstermiştir.

Qudah ve Maalej (2014), ters döngüsel yükleme altında kiriş-kolon bağlantılarının performansını arttırmak için PE-ECC kullanmanın fizibilitesini araştırmıştır. Üçte bir ölçek ile dokuz adet örnek, yüksek sismisite bölgesinde sismik uyarım simülasyonu

ile test edilmiştir. Çalışmada enine donatının miktarı, düzeni ve bağlantının plastik bölgesindeki malzemeler gibi parametreler incelenmiştir. Düz betona alternatif olarak kiriş-kolon bağlantısının plastik bölgesinde PE-ECC kullanılmasının ve enine donatıların kısmen değiştirilmesinin, kiriş-kolon bağlantısının kayma direncini, enerji emme kapasitesini ve çatlama davranışını önemli ölçüde geliştirdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca önemli ölçüde geliştirilmiş bağlantı sismik direnci, bu tip bağlantılarda takviye tıkanıklığını ve inşaat karmaşıklığını azaltmaya neden olmaktadır.

2.3.1.3.2. Yapısal Olmayan ECC Uygulamaları

ECC'nin yapısal olmayan elemanlara uygulanması konusunda şimdiye kadar bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin Maalej ve Li (1995), betonarme yapılarının korozyon dayanıklılığını artırmak için koruyucu bir tabaka olarak bir PE-ECC'nin uygulanmasını araştırmıştır. PE-ECC'nin çoklu ince çatlak oluşturması ve dökülme önleyici gibi özelliklerinin onu betonarme yapılarının korozyon direncini arttırmak için uygun bir malzeme haline getirdiğini bildirmişlerdir. Lim ve Li (1997), ECC'nin betonarme yapılarda bir onarım malzemesi olarak kullanıldığında, yeni çatlak hattı yakalama davranışı sayesinde onarım malzemesinin delaminasyon ve parçalanması gibi bozulma mekanizmalarının ortadan kaldırılabileceğini bildirmiştir. Li ve Kanda'ya (1998) göre ECC, yüksek enerji emici yapılarda veya kısa kolonlar, sönümlendiriciler, çelik elemanlar için bağlantılar ve hibrit çelik betonarme yapıların bağlantıları gibi elemanlarda da kullanılabilir. Buna ek olarak, ECC'nin izotropik enerji emme davranışı sayesinde, otoyol döşemeleri, köprü döşemeleri ve patlamaya dayanıklı bina çekirdek elemanları gibi darbeye veya 3D yüklemeye maruz kalan yapılarda da kullanılabilir (Li ve Kanda, 1998). ECC'nin bir başka potansiyel uygulaması, toprak deformasyonu ile uyumlu olması ve aynı zamanda sızıntının önlenmesi gereken yeraltı yapıları da dahil olmak üzere büyük deformasyonlara maruz kalan yapılarda olabilir (Li ve Kanda, 1998). ECC ayrıca kalıcı kalıplarda, ekstrüde yapı elemanlarında ve lif donatılı plastik betonarme yapılarda kullanım için düşünülebilir.

2.3.1.3.3. ECC'nin Saha Uygulamaları

ECC şu ana kadar ABD, Kore, İsviçre ve Japonya'da bir dizi büyük ölçekli uygulamada kullanılmıştır. Bu uygulamaların çoğunda ECC, Japonya'da bir köprünün ve bir köprünün altı tabliyesinin, Kore'deki bir kanalizasyon hattının, ABD'deki bir beton köprü tabliyesinin ve İsviçre'deki bir tünel kaplamasının onarımı dahil olmak üzere çeşitli altyapıların onarımı için kullanılmıştır (Li, 2003). Diğer büyük ölçekli projelerin bazıları aşağıda vurgulanmıştır.

Kojima ve ark. (2004), 20 mm kalınlığında bir ECC tabakası püskürtülerek 2003 yılında Japonya'da bir barajın onarımının yapıldığını raporlamıştır. Japonya'nın Hiroşima bölgesinde 60 yıl önce inşa edilen 600 $m^{2'}$lik Mitaka Barajı yüzeyinde ciddi hasarlar meydana gelmiş ve burada birkaç çatlak, dökülme ve su sızıntısı gözlemlenmiştir. Li ve ark. (2009), 2003 yılında ECC kullanarak, Japonya'nın Gifu bölgesinde bir toprak istinat duvarının onarıldığını bildirmiştir. İstinat duvarının ciddi çatlama problemi nedeniyle, OPC'nin devam eden çatlamaya neden olacağı için uygun bir onarım malzemesi olmadığı bildirilmiştir. Ancak ECC, bu sorunu en aza indirgemek için ideal bir tamir malzemesi olarak görülmüştür. Bir yıl sonra, istinat duvarının yüzeyinde sadece sıkı çatlak genişliğine sahip mikro çatlakların gözlendiği bildirilmiştir.

ECC ayrıca Japonya'daki yüksek katlı binalarda deprem hasarını azaltmak için bağlantı kirişleri olarak başarıyla kullanılmıştır. Örneğin, Japonya'da 95 m uzunluğundaki Glorio Roppongi isimli yüksek katlı apartmanda 54 adet ECC bağlantı kirişi (kat başına 2) ve Japonya'nın 41 katlı Nabeaure Yokohama Kulesi'nde kat başına 4 bağlantı kirişi kullanılmıştır (Li, 2006). Sismik direnç uygulamalarında ECC, yüksek hasar toleransı, yüksek enerji emilimi ve kesme gerilmesi altındaki deformasyon kapasitesi sayesinde PÇ'ye göre üstün performansa sahiptir (Li, 2006).

2005 yılında Japonya'nın Hokkaido şehrinde 1 km uzunluğundaki Mihara Köprüsü'nde tabaka kalınlığının sadece 5 mm olduğu ince bir kompozit ECC/çelik tabliyesi kullanılmıştır (Li, 2003). ECC'nin çekme gerilmesi sünekliği ve dar çatlak genişliği kontrolü sayesinde, ağırlıkta %40 azalma görülmüş ve tahmini 100 yıllık hizmet

ömrüyle birlikte maliyette önemli bir azalma sağladığı bildirilmiştir. Benzer bir projede, ABD'nin Michigan eyaletinde, eyaletler arası 225 mm kalınlığında bir ECC malzeme ile köprü tabliyesi yapıldı (Kim ve diğerleri, 2004). ECC'nin üstün özellikleri sayesinde, ECC kullanılan köprü döşemesinde, geleneksel beton ile yapılan köprü döşemesine kıyasla daha az malzeme kullanılmıştır. 2005 yılında trafiğe açılan köprü, o zamandan beri hem Michigan Üniversitesi hem de Michigan Ulaştırma Bakanlığı tarafından takip edilmiş, ECC malzemenin konvansiyonel betona göre daha iyi bir dayanıklılık sağladığı gözlemlenmiştir.

2.3.1.4. ECC'nin Malzeme Sürdürülebilirlik Performansı

Yüksek çimento içeriği ECC gibi çeşitli şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento bağlayıcılı kompozitlerin karışım tasarımında yaygın olarak bulunmaktadır. Tipik yüksek modüllü PE-ECC ve PVA-ECC'nin (%100 çimentolu ve uçucu kül içermeyen) karışım oranları, geleneksel yapısal beton ile birlikte Çizelge 2.1'de sunulmaktadır. Görülebileceği gibi, ECC karışım oranının çimento içeriği, geleneksel betondan iki ila üç kat daha yüksektir. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı için matris tokluk kontrolü ve kolay lif dağılımı için reoloji kontrolü tipik ECC'lerde yüksek çimento içeriğinden sorumludur. Bu yüksek çimento içeriği, yüksek malzeme maliyeti ile birlikte istenmeyen yüksek otojen büzülme ve hidratasyon ısısı ile sonuçlanmaktadır (Wang ve Li, 2007; Yang ve diğerleri, 2008).

Ek olarak, PÇ'nin üretimi önemli miktarda CO_2 emisyonu ve enerji tüketimi içermektedir. Farklı ülkelerdeki birçok yazar çimento ve beton üretiminin neden olduğu emisyonları hesaplamıştır. Örneğin, Marceau ve ark. (2006), ABD'de PÇ üretimi ile ilişkili enerji tüketimi ve CO_2 emisyonlarının ayrıntılı analizini rapor etmişlerdir. Yazarlar analizlerinde, çimento fabrikalarına hammadde taşınmasını değerlendirmişlerdir. Toplam enerji tüketimi (gömülü enerji) ve karbon emisyonlarını ortalama olarak çimento tonu başına sırasıyla 4.8 GJ ve 0.927 ton olarak hesaplanmıştır. Islak işleme, çimento ton başına sırasıyla 6.4 GJ gömülü enerji ve 1 ton karbon emisyonu ile en yüksek şekilde sonuçlanmıştır. Masanet ve ark. (2005), Kaliforniya'daki çimento üretiminin 0.932 ton CO_2-e/ton çimento yaydığını

bildirmiştir. Sürdürülebilirlik Merkezi (2006) tarafından geliştirilen yollar için CO_2 tahmin kiti emisyonu ve gömülü enerji giriş değerleri ton başına 0.801 ton CO2-e ve 4.78 MJ olarak sonuçlanmıştır.

Çizelge 2.1. Geleneksel beton ve ECC tasarım parametreleri (Wang ve Li'den (2007)

Malzemeler	Çimento (kg/m^3)	Agrega (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	HPMC (kg/m^3)	HRWRA (kg/m^3)	Lif (kg/m^3)
Geleneksel Beton	390	1717	166	-	-	-
PE-ECC	1205	603	314	0,60	12	17

(Not: Karışım oranları alınmıştır.)
(HPMC: Viskozite modifiye edici, HRWRA: Süper akışkanlaştırıcı)

Avrupa çimento endüstrisinde hem yakıtlar hem de malzemelerle ilişkili karbon emisyonu ve gömülü enerji miktarı, Damtoft et al. (2008) tarafından rapor edilmiştir. Modern, verimli bir döner fırında yakıttan türetilen karbon emisyonlarının ve enerji tüketiminin, klinker kilosu başına 0,31 kg CO_2-e ve klinker tonu başına 3.1 GJ arasında olduğunu bildirmişlerdir. Verimsiz bir ıslak fırın için bu rakamlar, klinker kilosu başına 0,6 kg CO_2-e ve klinker tonu başına 6 GJ arasındaydı. Malzemelerle ilişkili karbon emisyonlarının klinker kilosu başına 0,53 kg olduğu bildirilmiştir.

Yukarıdaki çalışmalara ve tipik ECC karışımlarında kullanılan çimento hacmine (Çizelge 2.1) göre, PÇ üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarının çevre üzerinde önemli bir etkisi vardır. Huntzinger ve Eatmon'a (2009) ve Chen ve ark. (2010), PÇ üretiminin genel olarak küresel ısınmanın ana nedeni olarak kabul edilip, dünyadaki toplam CO_2 emisyonlarının neredeyse %5-7'sinden sorumlu olduğunu bildirmişlerdir. CO_2 emisyonundaki ve gömülü enerjideki ilgili artış, tipik ECC'lerin sürdürülebilirlik performansını tehlikeye atmaktadır (Wang ve Li, 2007; Yang ve diğerleri, 2007). Bu nedenle, süneklik özelliklerini koruyan fakat aynı zamanda çimento üretiminin CO_2

emisyonu ile ilişkili sürdürülebilirlik hususlarını da içeren daha düşük küresel ısınmaya sahip yeşil ECC'lerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Çimento üretiminin enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmak için farklı yaklaşımlar gerçekleştirilmiştir (Damtoft ve ark., 2008, Hasanbeigi ve ark., 2012; Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi, 2009; Worrell ve ark., 2008). Örneğin, çimento üretim prosesinin verimliliği, yüksek fırın cürufu kullanılarak yakılan klinker miktarının azaltılmasıyla önemli ölçüde artırılabileceği bildirilmiştir. Damtoft ve ark. (2008), çimento üretiminin karbon emisyonlarını azaltmanın bir stratejisi olarak, kireçtaşının yerine alternatif yakıtlar ve cüruf gibi atık maddeler kullanılmasını önermişlerdir.

Günümüzde, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin gibi puzolanik malzemeler, çimentoya çeşitli oranlarda ikame edilerek yaygın olarak kullanılmaktadır. Puzolanik malzemelerin dayanıklılık gibi sağlam avantajlarının yanı sıra, bu malzemelerin kısmi çimento değişimi olarak kullanılması, çimento içeriğinin azalması nedeniyle beton üretiminin karbon emisyonlarının da azalmasına neden olmaktadır (Berndt ve diğerleri, 2013). Bu nedenle, "yeşil" ECC'lerin üretilmesi için önemli bir yaklaşım, tipik ECC karışım oranlarındaki çimentonun bir kısmının puzolanik malzemeler ile değiştirilmesidir. Son on yıl içinde, yüksek hacimlerde öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve uçucu külün, PÇ'nin kullanımını azaltmak için ECC karışım tasarımında PÇ ile kısmi olarak değiştirilmesi kapsamında birtakım araştırmalar yapılmıştır; böylece çimento endüstrisinin CO_2 emisyonu ile ilişkili küresel ısınma potansiyelinin azaltılması üzerine önemli adımlar atılmıştır (Ahmed ve ark., 2007; Wang ve Li, 2007; Kim ve ark., 2007; Yang et al., 2007; Şahmaran ve ark., 2009).

Wang ve Li (2007), PÇ'nin kısmi ikamesi olarak yüksek hacimde F Sınıfı uçucu kül içeren ECC'lerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmalarında, uçucu kül / çimento oranı (UK / Ç) 0,1 ile 1,5 arasında değişmektedir. Uçucu kül içeriğinin lif-matris arayüz özellikleri, matris kırılma tokluğu ve elde edilen kompozitlerin çekme performansı üzerindeki niceliksel etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PVA lifi ile ECC matrisi arasındaki sürtünme ve kimyasal bağların, UK / Ç = 0,1 haricinde, uçucu

kül içeriğinin artmasıyla genellikle azaldığını göstermiştir. Yüksek uçucu kül içeriğindeki kimyasal bağdaki azalmanın, sürtünme bağına kıyasla daha önemli olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, uçucu kül içeriğinin kesme sertleşme katsayısı üzerinde marjinal bir etkisi olmuştur. Uçucu kül içeriğinin artmasıyla birlikte, matris kırığı tokluğunda ve çatlak ucu tokluğunda önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Fiber-matris arayüz özellikleri ve matris kırılma tokluğu açısından gözlenen eğilimlerin her ikisi de kompozitte şekil değiştirme sertleşmesi davranışını elde etmek için faydalıdır. Tek eksenli çekme gerilmesi testi sonuçlarına göre, UK / Ç <0,8 olan kompozitler, %1,11 ila %2,69 arasında değişen çekme şekil değiştirme kapasiteleri ile şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Uçucu kül içeren kompozitler arasında, kompozitin çekme kopma mukavemeti ve nihai çekme mukavemeti, UK / Ç = 0,8 hariç, uçucu kül içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalmıştır. Bununla birlikte, uçucu kül içeriğinin artmasıyla kompozitin çekme şekil değiştirme kapasitesinde, UK / Ç = 1,2 ve 1,5 için yaklaşık %2,5'te sabitlendiği durumda iyileşme sağlanmıştır.

Wang ve Li (2007)'nin çalışmasında araştırılan uçucu kül içeren kompozitler arasında PVA-ECC 45 no'lu karışımı (M45) optimum mekanik özellikler sergilemiştir ve bu nedenle çeşitli çalışmalarda ECC M45 tipik ECC karışımı olarak seçilmiştir. Yang ve ark. (2008), ECC M45'in bu alanda en yaygın kullanılan ECC karışımı olduğunu bildirmiştir. ECC R0 (uçucu kül içermeyen) ve tipik ECC M45'ün karışım oranları ve tek eksenli çekme özellikleri sırasıyla Çizelge 2.2 ve 2.3'te sunulmaktadır. Görülebildiği gibi, tipik ECC M45'te büyük miktarda çimento, uçucu kül (UK / Ç = 1.2) ile değiştirilirken, malzeme sürdürülebilirliği önemli ölçüde artmakta ve kompozitin istenen şekil değiştirme davranışı da hala korumaktadır. ECC R0 ve tipik ECC M45'in malzeme sürdürülebilirliği, malzeme sürdürülebilirlik göstergeleri (MSG) ile nicel olarak karşılaştırılabilir (Li ve ark., 2004). MSG değerini hesaplamak için kullanılan bileşenlerin yaşam döngüsü envanter verileri de Çizelge 2.2'de sunulmaktadır (Yang ve ark., 2008; Huang ve ark., 2012). Çizelge 2.2'de sunulan yaşam döngüsü envanter verilerinin türetilmesinde iki varsayım olduğuna dikkat edilmelidir. İlk olarak, uçucu külle ilişkili olan gömülü enerji ve CO_2 emisyonları sıfırdır, çünkü uçucu kül çoğu çöp sahalarına atılan kömür santralinin bir yan ürünüdür. İkincisi, suyla ilişkili olan gömülü enerji ve CO_2 emisyonları diğer bileşenlere göre önemsizdir.

Çizelge 2.2. ECC M45 ve ECC R0 karışımlarının içerikleri ve MSG hesaplamak için bileşen değerleri

Malzemeler	ECC M45 (kg/m^3)	ECC R0 (kg/m^3)	Gömülü Enerji (MJ/kg)	CO_2 Emisyonu (kg/kg)
Çimento	583	838	5,06	0,898
Uçucu Kül	700	-	-	-
Mikro-silika kum	467	838	0,175	0,026
Su	298	366	-	-
Süper Akışkanlaştırıcı	19	17	36,76	1,48
PVA Lif	26	26	106,54	3,6

Çizelge 2.3. ECC R0 ve tipik ECC M45'in tek eksenli çekme özellikleri

Karışım Kodu	İlk çatlak gerilmesi (MPa)	Nihai çekme mukavemeti (MPa)	Çekme şekil değiştirme kapasitesi (MPa)
ECC R0	2,92 ± 0,06	4,41 ± 0,15	4,88 ± 0,59
ECC M45	4,11 ± 0,66	4,86 ± 0,47	2,49 ± 0,57

Bölüm 2.3.1'de belirtildiği gibi ve Çizelge 2.1 ve 2.2'de görülebildiği gibi, uygun işlenebilirliği ve reolojiyi sağlamak için ECC karışımların az miktarda süper plastikleştiriciler (SP'ler) ve viskozite değiştirici ajanlar düzgün lif dağılımını kontrol etmek üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. SP'lerin PÇ hamuru, harç ve beton ile kullanılmak üzere tasarlandığına dikkat edilmelidir. SP'ler jeopolimer karışımlarında kullanılmaya uygun değildir, çünkü SP'ler alkali çözeltiler tarafından saldırıya uğrar ve hızla bozunur. Bununla birlikte, bazı SP'ler sınırlı etkinliği olacak şekilde jeopolimer ile kullanılabilir. Bu nedenle, jeopolimer karışımlarında SP'lerin kullanılmasının bir ön koşulu, farklı SP'lerin çeşitli jeopolimer karışımları üzerindeki etkilerini araştırmak, jeopolimerlerin özellikleri üzerindeki etkinliğini ve olası zararlı etkilerini anlamaktır.

2.3. Jeopolimer Terminolojisi

Jeopolimer terimi ilk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından, alüminosilikat tozu ve alkali solüsyonunun reaksiyonu sonucunda oluşan malzeme tipini tanımlamak için kullanılmıştır (Davidovits 1982a). Bu tip malzemeler ilk etapta Avrupa'da yaşanan bir dizi yangın felaketinin ardından organik ısı ile sertleşen polimerlere karışı yangına dayanıklı bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda karbon fiber kompozitler için koruyucu bir reçine tabaka, ahşap yapılara termal koruma sağlama gibi çok farklı türde alanlarda termal koruyucu malzeme olarak kullanılmıştır. İlerleyen zamanlarda uçucu külün alkali aktivasyonu sonucu üretilen jeopolimerlerin güvenilir, yüksek performans özellikleri neticesinde bu malzemelerin yapı malzemeleri olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalara yoğunlaşılmıştır (Wastiels ve ark., 1993).

Çimentodan farklı malzemelerin alkali aktivasyonu ile yapı malzemelerinin üretilmesi adına ilk çalışma 1940 yılında Purdon tarafından gerçekleştirilmiş ve çalışmalarında yüksek kalsiyum içerikli metalurjik cüruf tiplerini aktifleştirme yoluna gitmiştir. İlerleyen zamanlarda cürufların alkali aktivasyonuna dair gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen jeopolimer ürünlere dair yapılacak temel ayrım, söz konusu sistemlerde tek boyutlu ve Al-Si ile Mg-Ca değişimlerinin gerçekleşebildiği kalsiyum silika hidrat bazlı jel yapının oluşmasıdır (Duxson ve ark. 2007b).

Jeopolimer terimi literatürde mineral polimerler, inorganik polimerler, inorganik polimer camlar, alkali bağlı seramikler, alkali kül malzemeler, toprak çimentoları, hidroseramikler gibi oldukça farklı biçimlerde tanımlanmaktadır. Shi gerçekleştirdiği çalışmalarda jeopolimerleri, alkali aktive bağlayıcılar sınıfının, metalürjik cürufların alkali, silikat, karbonat veya sülfat aktivasyonu ile oluşturulan ve ağırlıklı olarak kalsiyum silikat hidrat olarak tanımlanabilecek bir ürün veren malzemeleri kapsayan bir alt kümesi olarak tanımlamıştır (Shi ve ark., 2006). Jeopolimerin bağlanma fazının, suda çözünmeye nispeten dirençli olan üç boyutlu bir tetrahedral jel çerçevesinde alüminyum ve silikon ile bağlanmış bir alkali alüminosilikat jel içermesi, jeopolimerlerin belirleyici bir özelliği olarak gösterilebilir (MacKenzie, 2003; Rees ve ark., 2007). Davidovits alüminosilikat yapıları tanımlamak için 'sialat' terminolojisini

tanıtmış ve bu terminoloji kapsamında, bağ tiplerine göre Si-O-Al bir sialat bağı ve Si-O-Si bir silokso bağı olarak adlandırılmıştır (Davidovits, 1982a). Bu terminoloji sayesinde jeopolimer kompozisyonlarını Si/Al oranlarına göre tanımlamak mümkün bir hale gelmiş, söz konusu oranlar için oran 1.0 iken bağ polisiliat, 2.0 iken polisiliat-silokso, 3.0 iken polisiliat-disilokso olarak tanımlanmıştır. Her ne kadar bu isimlendirme sistemi belirli bir sınıflandırmayı mümkün kılsa da sadece tam sayı olarak Si/Al oranlarını ifade etmesi ve üç boyutlu bir ağ yapısını tek boyutlu olarak tanımlaması sebebi ile yetersiz kalmaktadır.

Jeopolimerler karmaşık bir malzeme sınıfıdır. Jeopolimerleri sentezlemenin temel yolu, bir alkali çözeltisini reaktif bir alüminosilikat tozu (özellikle metakaolin-kalsine kaolinit kili veya uçucu kül) ile birleştirmektir. Bu birleşim, jeopolimer jel bağlayıcı fazı olarak bilinen düzensiz bir alkali alüminosilikat jel fazının oluşumuyla sonuçlanır. Bu faz aynı zamanda matrise gömülmüş reaksiyona girmemiş katı öncül malzemeler ve alkali aktivatör çözeltinin hazırlanması için kullanılan suyu içeren boşluk yapısını muhteva etmektedir. Kalsiyum silika hidrat jelinden farklı olarak, su jeopolimer bağlayıcının kimyasal yapısının ayrılmaz bir parçasını oluşturmaz; pratik açıdan bu hem avantajlar hem de dezavantajlar sunar. Jeopolimer jelin temel yapısal iskeleti, her bir alüminat tetrahedrondaki köprüleme oksijenlerinin bir veya daha fazlasında lokalize dört katlı koordinasyonda Al^{3+} iyonlarından kaynaklanan negatif yük ile aktivatör solüsyonundan gelen alkali metal katyonlarının oluşturduğu yüksek derecede bağlı üç boyutlu alüminat ve silikat tetrahedral ağından oluşmaktadır. Ayrıca, jeopolimerik jel bağlayıcı malzemenin atomdan, nanometre uzunluk ölçeğine kadar zeolitik malzemelerle yapısal benzerlikler göstermektedir. Bu benzerlik bazı durumlarda, özellikle yüksek su içeriği, yüksek sentez sıcaklığı ve düşük Si/Al oranı varlığında, jeopolimer jel içinde nanokristalitlerin oluşumunun görüleceği seviyelere kadar ulaşmaktadır (Provis ve ark., 2005). Bununla birlikte, bu faktörlerin hiçbirinin mevcut olmadığı ve jeopolimerin 1 nm'yi aşan bir uzunluk ölçeğinde yapısal bir düzen göstermediği durumlarda bile, bir atomik uzunluk ölçeğinde zeolitlerde gözlemlenenlerle iyi bir korelasyon gösteren güçlü yapısal motifler saptanabilmektedir (Bell ve ark., 2008).

2.3.1. Jeopolimer Aktivatörleri

2.3.1.1. Alkali Hidroksitler

Alkali aktivatörler olarak en yaygın olarak kullanılanlar alkali hidroksitler sodyum ve/veya potasyum olarak kabul edilebilir. Lityum, rubidyum ve sezyum hidroksitler, maliyetleri ve kıtlıkları ve LiOH'un suda nispeten düşük çözünürlüğü nedeniyle kullanım yaygınlığı sınırlı seviyelerde kalmıştır (Monnin ve Dubois, 2005). Karşılaştırıldığında hem sodyum hem de potasyum hidroksit 25 °C'de 20 mol/kg H_2O'yu aşan konsantrasyonlara kadar suda çözünebilirler (Kurt ve Bittner, 2006). Alkali aktivasyon ile ilgili çalışmalarda 5 mol/kg H_2O'yu aşan konsantrasyonlar yaygın olarak kullanılan konsantrasyonlardır. Sodyum hidroksit ağırlıklı olarak klor alkali işlemi ile üretilir. Bu durumun hem sera emisyonları (elektrik tüketimi yoluyla) hem de bu üretim sürecinde zaman zaman kullanılan cıva gibi diğer bileşenlerin emisyonları açısından alkali aktivasyonunda kullanımı için önemli çevresel etkileri vardır ve bu üretim prosesinde modern membran hücrelerinin kullanımı daha verimli bir yol olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde, potasyum hidroksit, KCI çözeltilerinin elektrolizi ile üretilmektedir. Üretim süreci açısından, konsantre hidroksit çözeltilerinin bariz derecede aşındırıcı niteliklerinin yanı sıra, dikkate alınması gereken en önemli özellikleri çözeltilerin hazırlanması sırasında katı alkali hidroksit bileşiklerinin çözünmesiyle açığa çıkan ısı ve viskoziteleridir. Yüksek konsantrasyonlara sahip olsa bile alkali hidroksit çözeltilerinin viskozitesi aynı amaçla kullanılan alkali silikat çözeltilerine göre oldukça düşük seviyelerde kalmakta ve bu durum alkali hidroksit çözeltileri için avantaj oluşturabilmektedir.

Alkali hidroksit çözeltilerinde fazlaca karşılaşılan bir sorun olan çiçeklenme (özellikle beyaz karbonat veya bikarbonat kristallerinin oluşumu nedeniyle), fazla alkalinin atmosferik CO_2 ile reaksiyona girdiği çok yüksek bir hidroksit çözeltisi konsantrasyonu ile aktive edilen bağlayıcılarda da bilinen bir sorundur. Bu sorun görsel olarak estetik problemlere yol açmaktadır, ancak malzemenin yapısal bütünlüğüne her zaman zararlı değildir. Çiçeklenme genellikle hidroksitle aktifleştirilmiş bağlayıcılarda Na'dan K mevcudiyetinde daha da belirgindir.

2.3.1.2. Alkali Silikatlar

Alkali hidroksitler gibi sodyum ve potasyum silikatlar da alkali aktivasyonda en çok kullanılan aktivatörler olarak bilinmektedir. Lityum silikat, alkali ile aktive edilen bağlayıcı sistemlerde kullanım için yeterince çözünür değildir. Yüksek maliyetler ve rubidyum ve sezyum silikat üretim hacimlerinin sınırlı olması bu tip silikatların kullanımı konusunda engel teşkil etmektedir.

Alkali silikatlar genellikle karbonat tuzları ve silikanın kalsinasyonu yoluyla üretilir, daha sonra suda istenen oranlarda çözülür ve bu üretim prosesi enerji tüketimi ve CO_2 emisyonlarını beraberinde getirir. Bununla birlikte, çoğu alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıda kütlece nispeten düşük aktivatör içeriği bulunması nedeniyle, alkali silikatların üretimi prosesinde olan karbonatların kalsinasyonundan kaynaklı CO_2 emisyon oranı, Portland çimento üretiminden kaynaklı CO_2 emisyonuna kıyasla çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Vail, Na_2O-SiO_2-H_2O üçlü sisteminin farklı bölgelerinde oluşan ürünler olan ve alkali aktifleştirilmiş bağlayıcı üretiminde kullanılan silikat bileşimlerinin çoğunu, kısmen kristalimsi karışımlar, yüksek viskoziteli çözeltiler ve/veya hidratlı sodyum metasilikatlar olarak kristalleşmeye yatkın malzemeler olarak sınıflandırmıştır (Vail, 1952). Bu, bu tür çözeltilerin taşınmasında ve depolanmasında özen gerektirmekte ve kullanımdan önce uzun süreler boyunca silikat çözeltilerinin stoklanması (laboratuvar deneylerinde veya daha büyük ölçekli üretim çalışmalarında) beklenmedik ve/veya olumsuz sonuçlara yol açabilir. Hidratlı potasyum silikat fazlarının çökelmesi sodyumlulara kıyasla daha az ve homojen sulu çözelti stabilitesini daha geniş bir aralıkta koruyabildiğinden, potasyum silikat çözeltilerde söz konusu sorunlarla genellikle karşılaşılmaz.

Alkali aktivasyon için kullanılan silikat türlerinin çoğu aktivasyon işlemi esnasında bir veya iki kez deprotonasyon sürecinden geçmektedir (White ve ark., 2011). Mevcut türlerin dağılımı ve bu türlerin göreceli pKa değerleri göz önünde bulundurulduğunda, silikat bazlı aktivatör çözeltilerin çoğu, silikat deprotonasyon dengesi (Phair ve van Deventer, 2002; Nordström ve ark., 2011) tarafından yaklaşık pH 11-13,5 seviyesinde

tamponlanır ve tamponlama etkisi nedeniyle aynı pH seviyesindeki hidroksit çözeltilerine kıyasla çok daha yüksek bir efektif alkalinite seviyesi sağlamaktadır. Hidroksit aktive edici çözeltiler katı alüminosilikatlar ile karıştırılmadan önce bundan daha yüksek bir pH seviyesine sahiptir, ancak optimum miktarda silikanın bağlayıcı hammaddeden çözünerek sisteme dahil olması, reaksiyonlar gerçekleşirken pH seviyesini hızla bu bölgeye getirecektir (Provis ve van Deventer, 2013).

Potasyum silikat çözeltileri benzer bileşime sahip sodyum silikatlardan çok daha düşük bir viskozite gösterir, sodyum silikatlar potasyum silikatlara kıyasla oldukça yapışkan bir yapıdadır (Weldes ve Lange, 1969). Bu özellik henüz taze haldeyken sodyum silikatla aktive edilen alkali aktive edilmiş betonların istenilen şekilde düzeltilmesi konusunda sorun teşkil edebilmektedir. Silikatlar üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda aynı zamanda sodyum silikat çözeltilerinin viskozitelerinin artan sıcaklıkla birlikte önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır (Yang ve ark., 2008). Fakat, bazı sodyum metasilikat fazlarının çözünürlüğünün yüksek sıcaklıkta azalmaya başlaması sebebi ile ısıl uygulamanın katı metasilikatlar kullanılarak hazırlanan aktivatör çözeltilerin efektifliğini arttırmak için kesin bir çözüm olmadığı söylenebilir (Vail, 1952). Katı fazda sodyum metasilikat kullanılarak hazırlanan yüksek konsantrasyondaki aktivatör çözeltisinin entalpisi, çözünmüş türlerin çok yüksek konsantrasyonlarda tam hidratasyona ulaşamaması nedeniyle azalış göstermektedir.

2.3.2. Jeopolimer Bağlayıcılar

2.3.2.1. Metakaolin

Jeopolimerleri oluşturan sistemler arasında en basit ve anlaşılabilir kimyaya sahip olanı metakaolinin alkali hidroksit/silikat ile aktivasyonu sonucunda elde edilen jeopolimerlerdir. Jeopolimer terimi başlangıçta bu malzemeler için kullanılmıştır fakat bu terim kısa süre sonra daha uçucu kül ve diğer alüminosilikat kaynaklı malzemeler için kullanılmaya başlanmış ve kullanım alanı giderek genişlemiştir (Davidovits, 1982, 1991, 2008). Kesin reaksiyon koşullarına bağlı olarak çeşitli zeolitlerden bir veya daha fazlasını oluşturmak için hafif yükseltilmiş sıcaklıklarda alkaliler ve metakaolin

arasındaki reaksiyon, jeopolimerizasyon teriminin belirlenmesinden daha önceleri de bilinen bir reaksiyon tipidir. (Barrer ve Mainwaring, 1972a, 1972b). Metakaolin ayrıca Portland çimentolu betonlarda puzolanik bir katkı maddesi olarak kullanılmakta veya kireç ile karıştırılarak doğrudan aktive edilmektedir. (Sabir ve ark., 2001). Metakaolinin alkali aktivasyonuna dair ilk detaylı bilimsel çalışma 1992'de yayınlanmıştır (Palomo ve Glasser 1992). Araştırmalar o zamandan beri giderek yoğunlaşmış, karmaşık (özellikle uçucu kül bazlı) jeopolimerizasyon sistemlerinin bazı kimyasal yönleri için bir model teşkil eden bu sistemin önemi söz konusu yeni sistemleri belirleme hususunda daha belirgin bir hale gelmiştir.

Metakaolin, öncül olarak kullanılan kilin saflığına ve kristalliğine bağlı olarak 500-800 °C arasında değişen sıcaklıklarda kaolinit kilinin kalsinasyonu ile üretilen nispeten karmaşık bir malzemedir (MacKenzie ve ark. 1985; Granizo ve Blanco 1998; Badogiannis ve ark., 2005; Granizo ve ark., 2007). Metakaolin yapısı X-ışını analizine göre düzensiz görünmektedir, bununla birlikte, hidroksil gruplarının tabakalı kaolinit yapısından çıkarılmasıyla türetilmiş olması, bir dereceye kadar bir mertebeye kadar düzenli olduğu anlamına gelir. Bu yapı aynı zamanda elektron kırınımı (Lee ve ark., 2003) ve dehidroksilasyon işleminin kısmen tersinir olması ile gözlenir (Rocha ve ark., 1990).

Jeopolimerizasyonda kullanılan metakaolin kaynakları, boyut, saflık ve elde edildiği kaolinitin kristalliliğine göre önemli oranda değişkenlik göstermektedir. Bu unsurların her biri, jeopolimer üretiminde metakaolin kullanımı için önemlidir ve geniş yelpazede farklı kaynaklardan elde edilen optimum özellikteki jeopolimerler için spesifik bir reçete hazırlanmasının pek mümkün olmadığı anlamına gelmektedir.

Metakaolin jeopolimerizasyonu geçtiğimiz 20 yıl içerisinde çeşitli deneysel teknikler ve modelleme teknikleriyle incelenmiştir. Jeopolimerizasyonun doğrudan yerinde gözlemlenmesi farklı unsurların etkisi sebebi ile oldukça zordur. Ancak, süreç bu şekilde özetlenebilir:

- Metakaolin yapısına alkalin saldırısı, silikat ve alüminat türlerinin çözülerek çözeltiye salınmasına sebep olur. Bu çözünme esnasında 5- ve 6-

koordinatlı Al 4- koordinatlı faza geçiş yapar (Duxson ve ark., 2005). Metakaolin yapısında Si katmanlarına kıyasla Al katmanlarının ek bir çapraz birleşim oluşturmaları sebebi ile Al'nin ilk salınımının Si'ye kıyasla daha hızlı gerçekleşmektedir.

- Küçük çözünmüş türler arasındaki etkileşimler ve başlangıçta aktive edici çözelti tarafından sağlanan herhangi bir silikat kaynağı alüminosilikat oligomerlerin oluşumuna yol açabilir.
- Çözünme, çözünmüş alüminat konsantrasyonunun silikat çözeltisini stabilize etmek için yeterince yüksek olduğu ve çözünmüş türlerin jel oluşturmak için çökelmesinin başladığı noktaya kadar ilerler. Bu adım ayrıca mekanik bozulma (kesme veya ultrasonikasyon) ve ayrıca çekirdeklenmeye sebep olabilecek ilave parçacık yüzeylerinin (agregalar ve/veya diğer ilave oksitler) varlığı gibi faktörlerden de etkilenecektir. Ayrıca jelleşme meydana gelirken çözünmenin devam ettiğine dikkat edilmeli, parçacık yüzeylerindeki jel kaplamanın, kütle transferini engelleyerek çözünme sürecini etkileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu, basit sızma testlerinin metakaolinin çözünme kinetiklerini tam olarak test edememesinin birincil nedenidir ve çözünmüş türlerin yeniden çökelmesi bu tür deneyleri ciddi şekilde karmaşıklaştırmaktadır (Feng ve ark., 2004).
- Jeopolimer jel, reaksiyona giren bulamacın katılaştığı noktaya kadar büyür. Bunun için harcanan zaman, karışım dizaynına ve kürleme sıcaklığına ve ayrıca herhangi bir yabancı maddenin varlığına bağlıdır. Karışım dizaynına ve kürlendiği ortama bağlı olarak, priz alması neredeyse anlık da olabilir birkaç gün de sürebilir. Reaksiyon süreçleri, bazı kuvvetlerde X-ışını ile gözlemlenebilir zeolitik kristalitlerin büyümesinden ve bazı numunelerde büyümesinden de anlaşılacağı gibi, priz aldığı noktadan sonra oldukça uzun bir süre devam eder (Duxson ve ark., 2007b).

Jeopolimerlerin mikro yapısal detaylarının ana önemi iki yönlüdür. İlk olarak, bağlayıcının mekanik mukavemeti, bileşimi ile açık bir şekilde ilişkilidir ve bu, bağlayıcının mikro-yapısının analizi ile reaksiyon işleminin ayrıntıları ile

ilişkilendirilebilir (Duxson ve ark., 2005b). İkinci olarak, jeopolimer bağlayıcının gözenek ağı, dayanıklılığının belirlenmesinde oldukça önemli bir rol oynayacaktır. Jeopolimerlerin ana bozunma mekanizmaları agresif ajanların saldırısını içerir ve eğer bu ajanlar kıvrımlı veya bağlantısız gözenek ağı nedeniyle malzemeye giremezlerse, kimyasal yapıya zarar veremez veya gömülü takviyenin korozyonuna neden olamazlar (Lloyd, 2008).

Duxson ve ark., (2005b) yüksek silika içeriğinde optimum bir silika değerinin olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca düşük silika içeriğine sahip numunelerin pürüzlü ve bağlantısız bağlayıcı yapısının, daha fazla silika eklendiğinde daha pürüzsüz ve nispeten daha homojen bağlayıcı yapısının oluştuğu belirtilmiştir. Düşük silika numunelerinin pürüzlülüğünün büyük kısmının, parlatma sırasında kırılmaya neden olan, bu numunelerin düşük dayanımıyla ilişkilendirilebileceği de tartışılmıştır (Lloyd, 2008). Bu numuneler üzerinde elde edilen pürüzsüzlük derecesi kesinlikle, dayanımı daha yüksek olan ve daha yüksek silika içeren numunelerinkinden daha azdır. Ancak bu durumun, dokuda dramatik bir fark yaratması olası değildir.

2.3.2.2. Yüksek Fırın Cürufu

Ortaya konulan bir dizi çalışma (örneğin, Fernández-Jiménez, 2000; Shi ve ark., 2006; Bakharev ve ark., 1999; Duran Atiş ve ark., 2009), farklı kökenlere ve doğaya sahip cürufun alkali aktive edilmiş adhezif ve çimentomsu hidratasyon ürünleri verdiğini göstermektedir. Cüruf; fosfor, çelik ve yüksek fırın cürufu olmak üzere farklı çeşitlerde oluşur. Granüllü yüksek fırın cürufu (YCF olarak da bilinir), tercihen alkali aktivasyonunda hammadde olarak kullanılan tiptir. Demir cevheri ve kok kükürt külü içindeki 'killi' asit gangı, kireç ve magnezyum ile birleştiğinde yüksek fırın veya çelik cürufu oluşur (Fernandez-Jimenez, 2000; Shi ve ark., 2006).

Asit (SiO_2 ve AI_20_3) ve bazik (CaO ve MgO) oksitlerin yanı sıra cüruf bileşenleri, yüksek sıcaklık füzyonu (1600 °C) ve akabinde sıvı magmanın 1400 °C' den ortam sıcaklığına soğutulmasıyla oluşur. Sıvı cüruf 800 °C' nin altındaki sıcaklıklara aniden soğutulduğunda, kristallerin oluşması için zaman yoktur ve katılaşmış malzeme camsı

yapı kazanır ve bu özellikleri ile alkali aktivasyonda oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir (Fernández-Jiménez, 2000; Shi ve diğerleri, 2006; Provis ve van Deventer, 2009).

Cürufun kimyasal bileşimi esas olarak uygulanan çelik üretim sürecine ve üretilen çeliğin türüne bağlıdır. Mineralojik olarak incelendiğinde, depolimerize kalsiyum silikat ağından oluşan camsı fazın yanı sıra, yüksek fırın cürufu normalde gehlenitten ($2CaO.Al_2O_3.SiO_2$) akermanite ($2CaO.\ MgO.2SiO_2$) değişen bir aralıkta zayıf kristal yapıda bulunan bir karışım olarak tanımlanır. Sonrasında, cürufun hidrolik olarak aktif bileşenini içerirken, kristal faz pratik olarak eylemsiz olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar (örneğin Smolcyk, 1980), kristalleşmenin erken dönemlerinde oluşan düzensiz yapı göz önüne alındığında, az miktarda kristallerin varlığının cüruf reaktivitesini artırabileceğini iddia etmektedir.

Yüksek fırın cürufu potansiyel hidrolik karakteristik özellikler gösterebilmektedir. Başka bir deyişle, ince öğütüldüğünde ve suyla karıştırıldığında, oldukça uzun reaksiyon sürelerinde de olsa, Portland çimento hamurlarına bulunan ürünlere benzer hidratasyon ürünleri oluşturarak priz alabilir. Cürufun hidrolik bağlayıcılık özelliği, çimentomsu ürünleriyle ve Portland çimentosuna nazaran çok daha geç ortaya çıkan mekanik mukavemeti ile oldukça uzun zaman alarak yavaşça gelişir. Bununla birlikte, çeşitli yöntemlerden ve aktive edici ajanlardan herhangi biri ile aktive edildiğinde, cüruf hızlı bir şekilde hidrate olur, toplanır ve adhezif çimentomsu ürünler oluşturur. Ayrıca alkali bileşikler cüruf hidrolikliğini en etkili şekilde artıran aktive edici ajanlar olarak görülmektedir (Wang ve Scrivener, 1995; Wang ve ark., 1995).

Cüruf reaktivitesinin tane boyutuna bağlı olduğu da ayrıca bilinen bir husustur. 20 mikronun üzerindeki tane boyutuna sahip cüruflar çok yavaş, 2 mikronun altında tane boyutuna sahip cüruflar da alkali aktivatörlerle 24 saat karıştırıldığında tamamen reaksiyona girmektedir (Wang ve ark., 2005).

Cürufun çimento gibi kullanılır olabilmesi için gereken esas gereksinimler şu şekilde sıralanmıştır (Fernandez-Jimenez, 2000; Sih ve ark., 2006; Provis ve van Deventer, 2009):

- Granüle edilmiş veya topaklanmış olmalı ve %85-95 camsı fazda olmalı.
- Oldukça dağınık bir yapıya sahip olması gerekir, çünkü cam polimerizasyon derecesi ne kadar yüksekse, hidrolikliği o kadar düşük olur.
- Bazik olmalıdır, yani $CaO+MgO/SiO_2$ >1 oranına sahip olmalıdır. Bazik cüruf daha yüksek bir hidrolik potansiyele sahiptir, çünkü kireç içeriği aktivasyon derecesini kontrol eder. Buna rağmen asit cürufu alkali ile aktive edilebilir.
- 400-600 m^2/kg'lık bir yüzey alanı olacak şekilde öğütülmelidir. Spesifik yüzey, aktivasyon reaksiyonunun hızı ve yoğunluğunda önemli bir rol oynar.

Yüksek fırın cürufu aktivasyonunda üretilen ana ürün, normal Portland çimento hidratasyonunda (C-(A)-S-H jel) üretilen jele benzer, ancak daha düşük C/S oranlarına (normalde 0,9 ila 1,2 arasında) sahip bir C-A-S-H jelidir. (Wang ve Scrivener, 1995; Wang ve ark., 1995; Puertas ve ark., 2011; Myers ve ark., 2013). Üretilen ikincil reaksiyon ürünü, genellikle C_4AH_{13}, C_4AcH_{11}- ve $C_8A_2cH_{24}$ tipi fazlarla çökelebilen hidrotalsittir ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16}\cdot 4HO$).

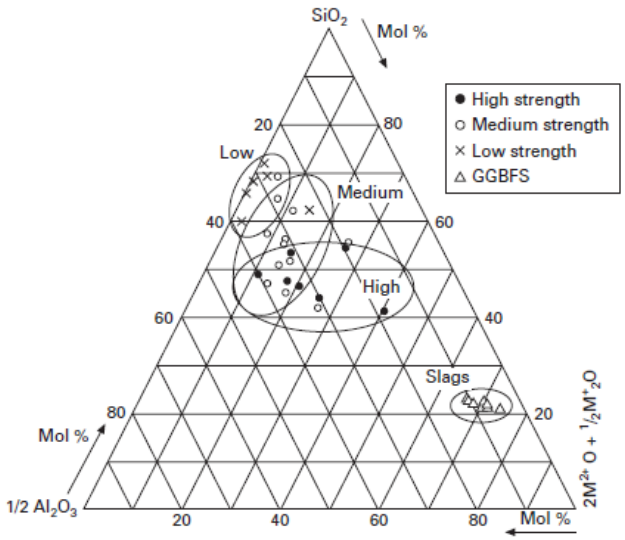
Alkalilerin C-A-S-H tipi jele dahil edilmesi, bir alkali silikatla aktive edilen yüksek fırın cürufu bağlayıcısında reaksiyonun çok erken aşamalarından başlayacaktır. Yani, efektif Ca/Si oranının sıvı fazda düşük dereceden dolayı çok düşük olduğunda, katı öncünün çözünmesi ve bu nedenle Na/Ca oranı yüksek olduğu durumdan başlayacaktır. Başlangıçta oluşturulmuş olan bu jellerde alkalilerin alımının geleneksel Portland çimento sistemlerinde oluşturulan C-S-H jellerinden çok daha yüksek olması beklenir. Bununla birlikte, Hong ve Glasser (1999) ayrıca C-S-H jellerinde artan Ca/Si oranı ile alkali bağlanmasının azaldığını gözlemlemiştir. Bu da devam eden kalsiyum tedarikinin yavaş reaksiyona girmesini gösterebilir.

2.3.2.3. Uçucu Kül

Uçucu kül, yanma sırasında fırının bacasından çıkan kömür, kum ve organik madde kalıntılarından oluşur. Bu bileşikler fırında eriyebilir, ancak daha sonra küçük, genellikle küresel cam parçacıkları üretmek için havada hızla söndürülür. Bununla

birlikte, kristal fazlar da mevcuttur ve hem parçacıklar içi hem de parçacıklar arası seviyelerde heterojenlik gözlenmektedir (Hemmings ve Berry 1988; Nugteren 2007). Bu nedenle uçucu kül, sadece yanmadan önce kömürde bulunan safsızlıklara değil, aynı zamanda yanma ve söndürme işleminin özelliklerine de bağlı olan oldukça değişken bir malzemedir. Jeopolimer sentezinde en yaygın olarak kullanılan uçucu küller düşük kalsiyum oranına sahiptir. Örnek olarak ASTM C618 standardına göre F sınıfı uçucu kül verilebilir. Yüksek Ca (C Sınıfı) külleri üzerinde yayınlanan çalışmalar, muhtemelen 'standart' jeopolimer tasarım sistemlerinde yüksek priz alma hızından dolayı daha azdır.

Uçucu küllerin reaktiviteleri ve bunlardan üretilen jeopolimerik ürünlerin doğası önemli oranda değişmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi kül bileşimi ve jeopolimer dayanım verilerinin karşılaştırılmasıyla tanımlanabilecek ilave eğilimler vardır. Bu grafik, bu küllerin aktivasyonu ile elde edilebilen gücün bir göstergesinin yanı sıra, bir dizi külün toplam oksit bileşimlerini göstermektedir. Verilerin literatürdeki farklı araştırma grupları tarafından oluşturulan çeşitli kaynaklardan elde edildiği göz önüne alındığında, numuneler çok farklı formüle edilmiş ve kürlenmiş olduğu için kesin kuvvet verileri doğrudan karşılaştırılamaz. Yine de, ‘yüksek’, ‘orta’ veya ‘düşük’ dayanımlı olarak kategorilere ayırmak bazı faydalı bilgiler sağlamaktadır. Çok bileşenli bileşim verileri, alkali toprak (M^{2+}+O) ve alkali metal (M+2O) oksitleri birleştirilerek ve bu bileşenleri tüm ağ modifiye edici katyonlardaki yüklerin toplamı ile temsil ederek sahte üçlü verilere dönüştürülür. Böylece bir alkali metal katyon bir yük birimi ve alkalin toprak katyonu iki yük birimi olarak sayılır.



Şekil 2.7. Uçucu küller için temsili üçlü kompozisyon diyagramı (Provis ve van Deventer, 2009)

Şekil 2.7'de açıkça görülmektedir ki ağ modifiye edici içeriği düşük olan küller, düşük dayanımlı jeopolimer üretmeye eğilimlidir. Kuvvet F sınıfı küller için genellikle ağ modifiye edici içeriğin bir fonksiyonu olarak artar. F sınıfı olmayan tek kül, gösterilen siyah noktaların en sağda olanıdır; bu C Sınıfı bir kültür ve alkali aktivasyonu yüksek mukavemetli ürünler verir (Keyte ve ark. 2005). Şekil 2.7 ayrıca, uçucu küllere kıyasla çok yüksek kalsiyum ve daha az alüminyum içeren bazı temsili yüksek fırın cüruflarının bileşimini göstermektedir. Şekil 2.7'de 'orta' ve 'yüksek' kategorileri arasında önemli bir çakışma vardır. Bu da beklendiği gibi gücü etkileyen Şekil 2.7'de açıklanmayan önemli ek faktörlerin, özellikle parçacık boyutu, kristallik ve demir veya karbon gibi diğer elementlerin olduğunu gösterir. Bununla birlikte, yüksek mukavemetli jeopolimerlerin genel olarak bu iki kategori ile paylaşılan bileşim bölgesinin yüksek alümina içerikli kısmındaki küllerden türetildiği gözlenmektedir. Bir diğer ilgili nokta, önemli bir ağ değiştirici içeriğine sahip olan tek 'düşük mukavemetli külün (Kaynağı Avustralya'daki Piper Dağı'dır) de tasvir edilen tüm küllerin Al_2O_3'ünün en düşük seviyesine yakın olmasıdır.

Ağ değiştirici içeriğinin, belirli bir uçucu külün jeopolimerizasyondaki potansiyel faydasının bir göstergesi olduğu kanısı, C Sınıfı (yüksek kalsiyum) uçucu küllerin kullanımına dikkat çekmektedir. Bu kül sınıfı bugüne kadar hakkında sadece birkaç yayınla, akademik literatürde Sınıf F ile aynı analiz düzeyine tabi tutulmamıştır (Roy ve ark., 1996; Perera ve ark., 2004; Xu ve ark., 2004). Roy ve ark., (1996) ve Lukey ve ark., (2006), sadece C Sınıfı uçucu külün jeopolimerlerde kullanılmasının mümkün olduğuna ek olarak, aynı zamanda karışımın reolojisinin yeterince kontrol edilebildiğinde büyük ölçüde tercih edilebileceğini göstermiştir. C Sınıfı uçucu kül (makul seviyede) bileşim açısından F Sınıfı uçucu kül ile yüksek fırın cürufu arasında görülebilir. Yüksek fırın cürufu–F sınıfı kül karışımlarının jeopolimerlerin üretiminde sıklıkla tercih edilmesi (Puertas ve ark., 2000; Goretta ve ark., 2004 ve patent literatüründeki sayısız örnek) de C sınıfı küllerin sahip olduğu potansiyelin bir göstergesidir.

Jeopolimerizasyon işleminin kesin detaylarının seçilen kül kaynağına bağlı olduğu ve hiçbir külün tam olarak aynı mekanizmayı takip etmeyeceği açıktır. Bu nedenle analiz, uçucu küllerde gözlenen her fazın jeopolimerizasyon koşulları altında nasıl reaksiyona girdiğinin anlaşılmasına dayanmalıdır. Hangi fazların mevcut olduğu ve daha önemlisi hangilerinin jeopolimerizasyon sırasında erişilebilir olduğu bilgileri daha sonra her kül kaynağına doğru mekanik analizin uygulanmasını sağlayacaktır.

2.3.3. Jeopolimerlerde Bağ Yapısı ve Matris Özellikleri

2.3.3.1. Yüksek Kalsiyum İçerikli Jeopolimerler

Yüksek kalsiyum içeriğine sahip yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimerlerin yapısal gelişimi, esas olarak dört mekanizma tarafından yönetilen oldukça heterojen bir reaksiyon sürecidir ve bu reaksiyon süreci aşağıda belirtilen adımlar doğrultusunda ilerlemektedir.

- Camsı öncül parçacıkların çözünmesi
- Başlangıç katı fazların çekirdeklenmesi ve büyümesi

- Oluşan farklı fazların etkileşimleri ve mekanik bağ kurmaları
- Dinamik kimyasal denge yoluyla devam eden reaksiyonlar neticesinde reaksiyon ürünlerinin oluşması (Fernandez-Jimenez ve ark., 1998; Bernal ve ark., 2011)

Kalsiyum içeriği yüksek malzemelerin alkali aktivasyonu neticesinde elde edilen reaksiyon ürünlerinin değerlendirilmesine dair gerçekleştirilen çalışmalarda varılan ortak kanılardan biri jeopolimerizasyon reaksiyonları neticende ana reaksiyon ürününün C-S-H(I) tipi düzensiz yapıda tobermorite jele çok benzeyen ve ek olarak bağlarında alüminyum muhteva eden C-A-S-H tipi jel olduğudur (Zhou ve ark., 1993; Wang ve ark., 1995; Myers ve ark., 2013).

Puertas ve ark., alkali silikatla aktifleştirilen yüksek fırın cürufun gösterdiği reaksiyonlar sonucu oluşan C-A-S-H tipi jellerin, bir arada bulunan 11 Å ve 14 Å tobermorit benzeri bir yapıya sahip olduğunu tespit etmiştir (Puertas ve ark., 2011). Myers ve ark., bu jel yapısını tanımlamak adına yapısal bir model geliştirmiştir. Tanımladıkları yapısal model doğası gereği kısıtlanmış çapraz ve çapraz olmayan yapıda farklı tobermorite benzeri jeller üzerine oluşturulmuştur. Bu yapısal model jel yapıların bağ zincir uzunluğu, Al/Si oranı ve çapraz bağlanma oranını tanımlamaya imkân dağlamaktadır (Myers ve ark., 2013).

Ben Haha ve ark., yüksek fırın cürufunun alkali aktifleştirilmesine dair gerçekleştirdikleri çalışmalarda hem sodyum hidroksitle hem de silikatla aktifleştirilmiş malzemelerde C-A-S-H jelinin yapısına dahil olan Ca^{+2} iyonlarının bir kısmının Na^{+} iyonları ile yer değiştirebildiğini ve bunun sonucunda C-(N)-A-S-H tipi bir jel oluşabildiğini bildirmiştir (Ben Haha ve ark., 2011). C-(N)-A-S-H tipi jel yapı söz konusu bağlayıcılarla aktifleştirilmiş ürünlerin matrisinde hem silisli agrega ve C-A-S-H jel yapısı arasındaki arayüz bölgesinde görülmekte hem de düşük bir Ca/Si içeriğine sahip bir halde bağlayıcı jel yığınlarının arasında yer almaktadır.

Alkali aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufunun yapısını analiz ederken, alkali aktivatörlerin yokluğunda yüksek fırın cürufunun su ile reaksiyonu yoluyla oluşan yapının kimyasının analiz edilmesi önemli bir husustur. Yüksek fırın cürufunun

oldukça kaba tanecikli yapıya sahip olsa bile hidratasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesinin üstünden 20 yıl geçse bile yeterli reaktif bileşen ortamda bulunduğu takdirde %22 reaksiyon gösterebilmektedir. Yeterli zaman sağlandığında sertleşme özelliğini sürdüren bu yapı aynı zamanda Mg-Al tabakalı çift hidroksit ve düzensiz tabakalı Al hidroksit fazları ile karıştırılmış oldukça yüksek oranda alümin-ikameli bir C-S-H fazı oluşturur (Taylor ve ark., 2010).

Farklı kompozisyonların bağlayıcılarında hidrotalsit, AFm ve zeolitik tip fazların tanımlanmasının ötesinde, alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cüruflu sistemlerinde ikincil fazların oluşumunu kontrol eden reaksiyon kinetikleri ve reaksiyon dengesi henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bazı belirli yüksek fırın cürufu tiplerinin aktifleştirilmesi sonucu elde edilen reaksiyon ürünlerinin X-ışını kırınımı (XRD) ve/veya nükleer manyetik rezonans (NMR) analizi ile bahsedilen türde ikincil faz tiplerinden bir veya daha fazlasının tanımlandığı çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş, ancak daha geniş bir yüksek fırın cürufu yelpazesinde yapılan sistematik çalışmalar oldukça nadirdir. Bu tür çalışmalar literatürde endüstriyel cüruflara dayalı olarak ortaya çıkmış (Ben Haha ve ark., 2011; Shi ve ark., 2006), ancak demir cevheri mineralojisi ve yüksek fırın operasyonlarındaki benzerlikler nedeniyle belirli bir coğrafi bölgeden gelen cüruflar oldukça sınırlı bir bileşim aralığına girme eğilimindedir. Bu nedenle analiz daha geniş bir bileşim aralığında tasarlanabilen sentetik cürufların alkalin aktivasyon ürünlerinin yüksek fırın cürufu kimyasının bağlayıcının oluşumu üzerindeki etkisinin sistematik analizi için daha büyük fırsatlar sağladığı görülmektedir (Ben Haha ve ark., 2011).

2.3.3.2. Yüksek Kalsiyum İçerikli Jeopolimerler İçin Kullanılan Aktivatörler

Yüksek fırın cürufunun su ile reaksiyonu uzun bir sürecin ardından sertleşmiş bağlayıcı oluşumuna imkân sağlayacaktır. Bu nedenle alkali aktivatörün en kritik görevi makul bir zaman dilimi içerisinde söz konusu reaksiyonların yüksek bir pH ortamı sağlanarak gerçekleşmesini hızlandırmaktır. Alkali silikatlar ve hidroksitler alkali aktivasyon için kullanılan aktivatörler arasında en yaygın olanlarıdır ve ortam pH'ını diğer aktivatör tiplerine göre daha yüksek seviyelere ulaştırır, aynı zamanda

yüksek fırın cürufundan kalsiyum içeren reaksiyonlar yoluyla aktivasyon işlemi için serbest hidroksit üretirler. Karbonatlar ve sülfatlar ise diğer aktivatörlere göre orta derecede alkalin koşullar sağlarlar.

Reaksiyonların gerçekleştiği ilk 24-48 saatlik bölümde alkali silikat, karbonat veya hidroksitle aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu bazlı bağlayıcılarının reaksiyon kinetiği, yapısal gelişimin beş aşamada meydana geldiğini kabul edilerek değerlendirildiğinde izotermal kalorimetrik deneyler ısı akış eğrilerinin Portland çimentosu ile oldukça benzer olduğu tespit edilmiştir (Fernandez-Jimenez ve ark., 1997, 1998; Bernal ve ark., 2011).

Aktivatör tipinin etkisini ele alan daha geniş bir çalışmada, Shi ve Day alkali aktive malzemeler için üç reaksiyon modeli önermiştir (Shi, 2003; Shi ve Day, 1996). İlk modelde reaksiyonlar henüz ilk dakikalarda bir pik değere ulaşmaktadır. İkinci model bir indüksiyon öncesi tepe noktası, ardından bir indüksiyon dönemi ve reaksiyon ürünlerinin hızlanarak çökelmesi ile ilişkili bir ikinci tepe noktası sunmaktadır. Bu davranış tipik olarak NaOH ile aktifleştirilen yüksek fırın cürufunda gözlemlenir ve Portland çimentosunun hidratasyonu ile bazı mekanik karşılaştırmalar yapılması gerekmektedir. Bu modelde başlangıç ve son priz süreleri ısı evriminin hızlanma periyodundan ve bunun sonucu olarak reaksiyon ürünlerinin oluşumundan doğrudan etkilenebilir (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 2003). Üçüncü model bir ilk çift pik, ardından indüksiyon periyodu, daha sonra reaksiyonun hızlanma periyoduna atanan üçüncü bir pikten meydana gelmektedir. Bu davranış, yüksek fırın cürufunun silikatlar, karbonatlar, fosfatlar ve florürleri içeren zayıf tuzlar kullanılarak aktive edildiği durumlarda gözlemlenir (Shi, 2003). Yüksek fırın cürufunun NaOH veya Na_2CO_3 ile aktivasyonu genellikle reaksiyonun ilk 24 saatte daha yavaş ilerleyen bir reaksiyon prosesi sebebi ile silikatla aktifleştirilmiş bağlayıcılara kıyasla daha düşük bir toplam ısı salınımına yol açar (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 1997).

Aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılarının reaksiyon ürünleri ve ürünlerin mekanik ve dayanıklılık performansı, kullanılan aktivatörün doğası ve konsantrasyonu ile büyük ölçüde bağlantılıdır (Wang ve ark., 1994). Olası aktivatör çözeltiler alkali hidroksitler (ROH, $Ca(OH)_2$), zayıf tuzlar (R_2CO_3, R_2S, RF), güçlü asit tuzları

(Na_2SO_4, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ve alkali silikat tuzları olan $R_2O \cdot rSiO_2$ olarak kabul edilebilir (Burada R: Na^+, K^+ veya daha az yaygın olarak Li^+, Cs^+, Rb^+ iyonlarını temsil etmektedir). Bunlar arasında, yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesi için en yaygın olarak kullanılan aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikatlar ($Na_2O \cdot rSiO_2$), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum sülfattır (Na_2SO_4). Shi ve Day gerçekleştirdikleri çalışmalar neticesinde, tüm kostik alkalilerin ve anyonları $Ca(OH)_2$'den daha az çözünür olan Ca açısından zengin bileşikler üretmek için Ca^{2+} ile reaksiyona girebilen alkali bileşiklerinin yüksek fırın cürufu için aktivatör görevi görebileceğini belirtmiştir (Shi ve Day, 1996).

Aktivatörün etkinliği ortam pH seviyesine doğrudan bağlı olmakla beraber, pH seviyesi alkali aktivasyon için kullanılan öncüllerin reaksiyonların başlangıcındaki çözünme oranı ve bunun sonucunda oluşan kondenzasyon reaksiyonlarının efektifliğini kontrol eder (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 2003; Shi, 2003; Shi ve Day, 1996). Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu üzerinde pH'ın etkisi aktivatörün tipi ile de doğrudan ilişkilidir, yüksek pH seviyelerinde silika ve alümina çözünürlüğü artarken kalsiyum çözünürlüğü azalmaktadır. NaOH çözeltileri, benzer alkali konsantrasyona sahip sodyum silikat çözeltilerinden çok daha yüksek bir pH'a sahip olmasına rağmen, aktivatör tiplerinin her birinin kullanımında kıyaslanabilir miktarlarda yüksek fırın cürufu reaksiyona girer ve silikatla aktifleştirilmiş bağlayıcılar genellikle NaOH ile aktifleştirilmiş bağlayıcılara kıyasla daha yüksek mekanik performanslar sergilerler (Ben Haha ve ark., 2011; Wang ve ark., 1994; Duran Atiş ve ark., 2009). Bu durum, çözünmüş yüksek fırın cürufundan elde edilen Ca^{2+} katyonları ile reaksiyon gerçekleştirmesi amacı ile sisteme silikat türlerinin ilavesinin bir sonucu olmakla beraber, ayrıca yoğun C-A-S-H reaksiyon ürünleri oluşmasını ve çözelti fazından çıkararak daha fazla Ca çözünmesini sağlamaktadır (Fernandez-Jimenez ve ark., 2003). Bu sebeple en uygun alkali aktivatörün seçimi esnasında, taze hamurda kalsiyum türlerinin boşluk suyu çözeltisi pH'ında çözünürlüğü ve spesifik reaksiyon ürünlerinin oluşumunu teşvik edebilen aktivatörler tarafından sağlanan katyonları içeren etkileşimlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Silikatla aktive edilen yüksek fırın cürufunun mekanik özelliklerinin gelişimi, aktivatör çözeltisinin modülüne (Ms = molar oran, SiO_2/ Na_2O) ve kullanılan yüksek

fırın cürufunun doğasına bağlıdır. NaOH ile aktive edilen ve Na_2CO_3 ile aktive edilen yüksek fırın cüruflu bağlayıcılarda, aktivatör dozu ve su/bağlayıcı oranının, reaksiyon kinetiği üzerinde silikatla aktifleştirilmiş yüksek fırın cüruflu bağlayıcılara kıyasla daha az etkisi olduğu görülmektedir (Shi ve Day, 1996).

Palacios ve Puertas, gerçekleştirdikleri çalışmalar neticesinde, karıştırma süresinin silikatla aktive edilen yüksek fırın cüruflu bağlayıcılarının mekanik özelliklerinin gelişimi üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu belirlediler. Uzun karıştırma süreleri sistemin geçirimliliğinin ve küçük boşlukların hacimlerinin azalmasına neden olduğu için basınç dayanımlarında %11'lik bir artışa neden olmuştur (Palacios ve Puertas, 2011).

Alkali aktivasyon neticesinde elde edilen bağlayıcılar için öncül malzemelerin seçimi, aktivatör kimyası ve optimizasyonu literatür açısından önemli bir husus olmakla beraber bugüne kadar bu alanda gerçekleştirilen çoğu çalışma öncüllerin tekli olarak değerlendirilmesi sebebi ile elde edilen sonuçların diğer öncül kaynaklara uygulanabilirliği açısından kısıtlı kalmaktadır. Öncül kaynaklar arasında yüksek fırın cürufunun kimyasındaki değişkenliğin etkisi bile henüz tam olarak anlaşılan bir konu değildir. Kalsiyum açısından zengin alkali aktif sistemleri dayanıklılık ile ilgili özelliklerin arttırılması hususunda kalsiyumun rolünün giderek daha iyi anlaşılması sebebi ile dünyanın birçok yerinde ticari olarak en çok uygulanan alkali aktif malzeme sistemleridir fakat yukarıda bahsedildiği gibi bu sistemlerin öncül kaynaklı özellik değişimleri hala araştırmaya açık bir konu olma özelliği taşımaktadır. Bu malzemeler başlangıçta organik polimerik malzemeler için yangına dayanıklı bir ikame malzemesi olarak tasarlanmalarına rağmen ve potansiyel uygulamalar, nispeten kısa bir süre sonra beton üretimi için olası bir bağlayıcı olarak tanımlamalarını sağlamıştır.

2.3.3.3. Düşük Kalsiyum İçerikli Jeopolimerler

Düşük kalsiyum veya kalsiyum içermeyen alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıların geliştirilmesindeki hususundaki ilk çalışmalar Davidovits'in gerçekleştirdiği çalışmalar olarak literatürde yer almaktadır (Davidovits, 2008). Fakat, beton üretimi

alanındaki gelişmeler kısa sürede kalsiyum açısından zengin sistemlere yönelimi arttırsa da zamanla yerini ağırlıklı olarak yüksek sıcaklık uygulamalarına ve kilden türetilmiş alkali ile aktive edilen macunların seramik benzeri doğasının faydalı olduğu diğer senaryolara yönelik düşük kalsiyum sistemlerinin kullanımına dayalı çalışma bırakmıştır. Bir bağlayıcı malzeme oluşturmak için metakaolinin alkali aktivasyonu üzerine yapılan akademik araştırmalar 1990'ların başında başlamış (Palomo ve ark., 1992; Palomo ve Glasser, 1992) ve uçucu külün alkali aktivasyonu ile güçlü ve dayanıklı bir bağlayıcı oluşumunun ilk örnekleri Wastiels tarafından yayınlanmıştır (Wastiels ve ark., 1993, 1994). Kil bazlı bağlayıcılarda gözlenenden daha uygun reoloji sunan uçucu kül aktivasyonunda devam eden gelişmelerle, düşük kalsiyum içerikli alkali aktive edilmiş beton üretimine ilgi yeniden artmaya başlamış ve o zamandan beri sanayi ve akademik alanda bir dizi gelişme yaşanmıştır. Düşük kalsiyum alkali ile aktive edilen sistemlerde temel bağlayıcı yapının, oldukça düzensiz, yüksek oranda çapraz bağlı bir alüminosilikat jel olduğu bilinmektedir. Hem Si hem de Al tetrahedral koordinasyonda bulunur, tetrahedral Al yapıları ile ilişkili yükler alkali katyonların jel çerçevesi ile birleşmesiyle dengelenir. Bu jel yapısı ile zeolitlerin yapısı arasındaki benzerlikler, alkali aktif bağlayıcılar ve antik Roma betonları arasında bir benzetme yapmak için zeolitik yapılar kullanan Glukhovsky, erken çalışmaları dahil olmak üzere birçok yayında bildirilmiştir (Glukhovsky, 1994). İlerleyen süreçte daha ayrıntılı olarak, hidrotermal zeolit sentezi ile alkali alüminosilikat bağlayıcıların sentezi arasındaki benzerliğin, alkali aktive jel boyunca nano hale getirilmiş zeolit benzeri yapısal birimlerin üretilmesine yol açtığı daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Provis ve ark., 2005). Bu bilgi takip eden çalışmalarda bu malzemelerin kimyasının (termodinamik gibi diğer özelliklerin) tıpkı Portland çimentolu sistemlerde olduğu gibi hidratasyon ile oluşan kalsiyum silikat hidrat jellerinin anlaşılması için model yapıları olarak tobermorit ve jennit kullanımı prosedürüne benzer bir şekilde kullanılması açısından faydalı bir yapısal model olduğu anlaşılmaktadır.

2.3.3.4. Düşük Kalsiyum İçerikli Jeopolimerler İçin Kullanılan Aktivatörler

Alkali hidroksitler, genellikle katı alkali hidroksitlerin suda çözünmesi sonucu yüksek ısı yayılımı nedeniyle, genellikle sulu bir çözelti formunda hazırlanarak alüminosilikat kaynağı ile birleştirilir; yüksek seviyede ısı salınımı, oluşma safhasındaki jel içinde termal gerilimlerin oluşması nedeniyle reaksiyonların devam ettiği bağlayıcı içinde meydana gelirse önemli problemlere yol açabilmektedir (Provis, 2009). Alkali aktive malzemelerin üretiminde sadece su ekleme metodu bağlayıcı sentezi için bir öncü oluşturmak üzere katı alüminosilikatların alkali hidroksitler ile birlikte kalsine edilmesi ile mümkün olmakta, fakat bu süreç henüz iki parçalı (aktive edici çözelti artı katı öncü) sistemler seviyesinde büyük ölçekte geliştirilememiştir. Düşük kalsiyum öncüllerinin (uçucu küller, metakaolinler ve diğer malzemeler) alkali-hidroksit aktivasyonu ile oluşturulan bağlayıcı yapılarda matrise bir alkali alüminosilikat jel yapı hakimdir. Bu jel yapı tetrahedral alüminyum ve yüksek oranda çapraz bağlanmış bir yapı oluşturan silikon atomları ve tetrahedral Al (III) bölgelerini dengeleyen alkali metal katyonları ile alüminosilikat yapıyı oluşturmaktadır (Myers ve ark., 2013).

Bu tip sistemlerde kristalimsi faz oluşumu temel olarak Na'nın alkali kaynağı olarak kullanılmasına dayanmaktadır. KOH ile aktifleştirilmiş alüminosilikat bağlayıcılar hakkında çalışmalar sınırlı kalmakta, ek olarak Na içeren hidroksit aktivatörlere göre kristalleşme eğilimi daha düşük seviyelerdedir (Duxson ve ark., 2007). NaOH ile aktive edilen metakaolinlerde (toplam Si/Al oranlarının 1.0'a yakın olduğu durumlarda) oluşan kristalitler, çoğunlukla hidrosodalit-hidroksisidalit familyasındaki feldspatoidlerdir (genellikle zeolit NaA ve/veya düşük silika faujasitler). Fakat, bazı zeolitik fazlar (genellikle zeolit NaA ve/veya düşük silika faujasitler) metakaolinin aynı çözeltilerle ve daha yüksek sıvı/katı oranları için hidrotermal olarak reaksiyona girmesi durumunda geçici veya daha sonra gelişen reaksiyon ürünleri olarak gözlemlenmektedir (Provis ve ark., 2009; Rowles ve ark., 2003; Zhang ve ark. 2009). NaOH ile aktive edilen uçucu küllerin genellikle bağlayıcı jel fazının Si/Al oranı daha yüksek bir olmakla beraber chabazite-Na ve/veya faujasitin yanı sıra daha alümin-zengin sodalit grubu ve kansrinit grubu fazları oluşturma eğilimindedirler (Criado ve ark., 2007; Rees ve ark., 2007).

Fernandez-Jimenez ve ark., uçucu külün alkali hidroksit aktivasyonu için kavramsal ve mikro yapısal bir model sunmuştur (Fernandez-Jimenez ve ark., 2006). Hidroksit aktivatörü tarafından kısmen içi boş küresel bir uçucu kül parçacığının camsı kabuğuna gerçekleştirilen ilerleme işlemi, partikülün hem içinde hem de dışında reaksiyon ürünlerinin oluşumuna yol açar ve değişen reaksiyon derecelerine sahip gömülü uçucu kül parçacıkları içeren nihai bir mikro yapı oluşmaktadır.

Uçucu kül içeren alkali aktif bağlayıcıların oldukça heterojen doğası ve demir içeren materyallerin NMR karakterizasyonu ile ilgili zorluklar göz önüne alındığında, bağlayıcı yapısı ve alkali hidroksitle aktifleşen uçucu kül sistemlerinin kimyası hakkında, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yöntemi ile sağlanan büyük faydalar neticesinde, daha kapsamlı bir anlayış geliştirildi. Lee ve van Deventer, hidroksit veya düşük modüllü silikat çözeltileri ve uçucu kül partikülleri arasındaki etkileşimleri incelemiş, uçucu kül partiküllerinin yüzeylerinde oluşan jel ürünlerinin yapısal gelişimi hakkında faydalı bilgiler sağlamıştır (Lee ve van Deventer, 2003). Fernández-Jiménez ve Palomo NaOH ile aktifleştirilmiş bağlayıcı sistemleri karakterize etmek için FTIR'ı kullanmış ve jel evrimini iki aşamada tanımlamıştır (Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2005). İlk aşama Si-O-Al bağı açısından daha zengin olan 'Jel 1', ikinci aşama ise daha uzun reaksiyon sürelerinde artış gösterebilen Si çapraz bağlarından oluşan bir yapı olan 'Jel 2' olarak tanımlanmıştır.

Düşük Ca içerikli alüminosilikat hammaddesinin, silikat aktivatörü ile aktive edilmesiyle oluşan bağlayıcı jel yapısının (NMR, FTIR ve diğer spektroskopik tekniklerin uygulanmasıyla), yine aynı hammaddenin hidroksit aktivasyonuyla oluşan bağlayıcı jel yapısı ile oldukça benzer olduğu görülmektedir. Jel ürünlerinin atomik uzunluk ölçeğinde gözlenen temel farklar, ürünlerin Si/Al oranlarından kaynaklanmakta, buna ek olarak yüksek Si içeriğinde zeolit/feldspathoid kristalleşmesine karşı genel olarak daha düşük eğilimden dolayı oluşmaktadır. Mikro yapısal olarak silikat ile aktive edilen bağlayıcı sistemler, atomik düzeyde mikron veya daha fazla bir uzunluk ölçeğinde daha homojen olma eğilimindedir (Duxson ve ark., 2005). Bu durum, düşük silika jellerinin zamanla, sızan jel ağı olmak yerine, farklı partiküllere yoğunlaşması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Birçok akademik literatür çalışmalarına bakıldığında, uçucu kül ve metakaolinin silikat aktivasyonu ile

hidroksit aktivasyonuna kıyasla daha geniş bir karışım tasarımı ve kürlenme koşulları ile kabul edilebilir dayanım gelişimi gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Düşük kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcıların silikat aktivasyonu, öncül maddeye çözünmüş alkali silikatların eklenmesiyle daha efektif olmuştur. Katı silikat kaynakları literatürde uçucu kül bazlı bağlayıcılarda denenmiş, ancak oldukça yavaş bir basınç dayanım gelişimi gözlemlenmiştir (Yang ve ark., 2008). Silika modülüsünün bağlayıcı hammaddeye bağlı olarak 1,0 ila 2,0 arasındaki değişimi durumunda, hidroksit çözeltisinden silikat çözeltisine geçiş, basınç dayanımlarında artışa ve daha az gözenekli yapı oluşturmaya neden olmaktadır (Lloyd ve ark., 2009). Bağlayıcı hamurda Si/Al oranına da bağlı olmak kaydıyla, Na/Al oranının 1,0 civarı olduğu durumlarda optimum basınç dayanım sonuçları gözlemlenmiştir (Rowles ve ark., 2003). Alkali iyonunun etkisi, yukarıda bahsedildiği üzere hidroksit aktivasyonuna benzer, ancak kompozisyona bağlı olarak farklı uçucu küller ile birlikte kullanıldığında en iyi performansı veren alkalilerin Na ve K karışımları olduğu, ancak bu duruma uçucu külün yapısı ve partikül büyüklüğünün de etkisi olduğu sonucuna varılmıştır (van Jaarsveld ve ark., 1999).

2.3.4 Jeopolimer Üretiminde İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kullanılması

İnşaat sektörü, doğal kaynakları her geçen gün tüketme ve önemli miktarlarda inşaat yıkıntı atığı oluşturmaktadır. İnşaat yıkıntı atıkları, tüm katı atıklar içerisinde miktarca en fazla hacmi oluşturmaktadır. Amerika'da inşaat sektöründen kaynaklı her yıl 100 milyon tondan fazla inşaat yıkıntı atığı oluşmakta ve toplam katı atık maddelerin yaklaşık %29'unu kaplamaktadır (Mills ve ark., 1999). İngiltere'de ise inşaat yıkıntı atıkları, atık depolama hacminin %50'sinden fazlasın oluşturmakta ve her yıl buna 70 milyon ton daha eklenmektedir (Sealey ve ark., 2001). 1993 ve 2004 yılları arasında Hong Kong'da yıllık inşaat yıkıntı atığı üretimi 2 katına çıkmıştır ve yaklaşık 20 milyon tonu bulduğu rapor edilmiştir (Poon, 2007). Dünyanın dört bir yanında gün geçtikçe artan inşaat yıkıntı atığı, çevresel ve ekonomik olarak ciddi boyutlara ulaşmış ve bu atıkları yönetmek, geri dönüştürmek ve yeniden kullanmak için yerel eylemlerin önemini ortaya koymuştur.

İnşaat yıkıntı atığı miktarındaki artış hem küresel hem de yerel olarak ciddi sorunlara neden olmuştur. Bu bağlamda inşaat yıkıntı atığı yönetimi inşaat sektöründeki en önemli çevre sorunlarından biri haline gelmiştir. İnşaat yıkıntı atığı yönetiminin amacı, olumsuz çevre etkilerini azaltmak ve atıkları minimize etmektir. İnşaat yıkıntı atığı birçok ülkede önemli bir çevresel sorun olarak görülmektedir ve bu konularla ilgili birçok düzenleme getirilmiştir. İnşaat atık yönetimi devlet politikalarının bir parçası olarak benimsenmiş ve bu konularda spesifikasyonlar hazırlanmıştır. Ayrıca Avrupa Birliği üyesi ülkeler için inşaat yıkıntı atığı yönetimi ve geri kazanımı için hedeflerin belirlenmesi konusunda çeşitli çalışmalar ve belgeler bulunmaktadır.

Türkiye'deki inşaat sektörü, ekonomik faaliyetler göz önüne alındığında çok önemli bir konumdadır. Son yıllarda, ülke genelinde yeni konut ve altyapı yatırımları ile inşaat sektörünün rolü önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca yüksek deprem riskleri nedeniyle, ciddi risk altında olan yapılar için yıkım, bakım, onarım, güçlendirme faaliyetleri yoğun bir biçimde devam etmiştir. Türkiye'nin mevcut yapı stoku düşünüldüğünde, konut stokunun büyük bir kısmının yüksek deprem riski nedeniyle kısa vadede uygulanması gereken yıkım, güçlendirme ve donatılama faaliyetleri ile dönüştürülmesi gerektiği açıktır (Türkiye İnşaat Malzemeleri Sektör Görünüm Raporu, 2011). Bu nedenle, tüm bu faaliyetler inşaat yıkıntı atıklarını artıracak ve verimli atık akışı yönetimine duyulan ihtiyaç, sürdürülebilir konuk stokuna dönüşüm sürecinde daha önemli olacaktır.

Alternatif bağlayıcılar arasında, alkali ile aktive edilen veya jeopolimer bağlayıcılar, henüz yaygın olarak ticarileşmemiş olmalarına rağmen hem araştırmada hem de pratikte ilgi görmektedir. Sivil altyapı projelerinde ve diğer alanlarda alkali aktivasyon ile bir bağlayıcının ticarileştirilmesine ilişkin tek rapor E-crete markasıyla Avustralya'dan gelmektedir (van Deventer ve ark., 2010). Şimdiye kadar alkali aktivasyonu veya jeopolimer bağlayıcıların geliştirilmesi ve üretiminde çeşitli endüstriyel yan ürünler ve atıklar ile bir dizi alüminosilikat hammaddesi kullanılmıştır. Ancak, alkali aktivasyonu veya jeopolimer bağlayıcıların geliştirilmesi ve üretiminde alternatif bir kaynak olan inşaat yıkıntı atıklarının kullanılması için oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Son zamanlarda, uçucu kül, taban külü ve zemin yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünler ve atıklar ile başarılı bir şekilde kullanılan jeopolimerizasyon teknolojisi, inşaat yıkıntı atıklarında bulunan inorganik malzemenin yeniden kullanımı için önemli bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Puertas ve arkadaşları (2006), 6 M'lik bir konsantrasyonda NaOH ve Na_2SiO_3 içeren bir karışımda, alkali ile aktifleştirilmiş seramik atık numuneleri üzerinde çalışmış ve 8 günlük kürlenme sırasında 13 MPa'lık bir basınç dayanımı rapor etmişlerdir; yazarlar bu düşük sonucu, bu tür malzemelerin yarı kristalin doğasına bağlamaktadır. Allahverdi ve Kani (2009), inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen tuğla atığı ile kürlenme sonunda 28 günde 40 MPa'lık bir basınç dayanımı elde etmiş ve çalışmasında %8 Na_2O içeren sodyum hidroksit alkali solüsyonu kullanmıştır. Diğer bir çalışmada Allahverdi ve Hani (2013), %60 beton atığı ile %40 tuğla atığının karışımını, bağlayıcı miktarının %8'i oranında Na_2O ve silika modülü 1.4 olacak şekilde Na_2SiO_3 kullanarak aktive etmiş ve çalışmanın sonunda 50 MPa'lık basınç dayanımlarına ulaşmışlardır. Sun ve arkadaşları (2013), KOH ve NaOH karışımı ile aktive edilen seramik kentsel atık ile 28 gün boyunca 60 °C'de kürleme işleminin sonucunda 71.1 MPa'lık bir basınç dayanımı elde etmiştir. Benzer şekilde, Reig ve arkadaşları (2013), kil tuğla atıklarını 7 M NaOH ile aktive etmiş ve 7 günlük 65 °C kürleme sonucunda 30 MPa'lık bir basınç dayanımı bildirmişlerdir. Lampris ve arkadaşları (2009), geri dönüşüm tesislerinde ezilmiş yapı atıklarından alkali-aktif ince atıklar kullanmışlar ve oda sıcaklığında 7 günlük kürlenme sonucunda 18.7 MPa basınç dayanımları elde etmişler; 105 °C'de 24 saatlik bir kürleme işlemi ve çözünür bir alümina kaynağı olarak %20 metakaolin ilavesi ile, jeopolimer basınç dayanımlarının sırasıyla %112 ve %63 arttığını gözlemlemişlerdir. Komnitsas ve ark. (2015), farklı yapı atıkları olarak tuğla, fayans ve beton atıklarının jeopolimerizasyon potansiyelini incelemiş ve sırasıyla tuğla ve kiremit atıkları ile 49.5 ve 57.8 MPa'ya kadar basınç dayanımları rapor etmişlerdir; bununla birlikte, 14 mol NaOH kullanımında ve 7 gün boyunca 90 °C'de bir kürleme işlemi sonucunda beton atıklarının basınç dayanımlarının 13 MPa'da kaldığını belirtmiş, buna rağmen Pathak ve Kumar (2012) tarafından bildirilenden değerlerden %43 daha yüksek bir sonuca ulaşmışlardır. Khater (2013), beton atığı ve metakaolin karışımlarına silis dumanının eklenmesinin etkisini incelemiş ve malzeme oda sıcaklığı koşullarında (25 °C ve %100 bağıl nem) kürlendiği sürece 90 günün üzerindeki yaşlarda önemli artışlar olduğunu belirtmiştir. Ahmari ve arkadaşları (2012), %50 beton atığı ve %50 uçucu kül karışımı

yapmış, karışıma alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit (10M NaOH, SS/N = 2) ilave etmiş ve maksimum 35 MPa dayanım sonuçları elde etmiştir. Yang ve arkadaşları (2009), ikili beton atığı karışımına dayalı jeopolimer beton ve %40 geri dönüştürülmüş agrega ile metakaolin (%5-25) üretmiş ve benzer şekilde karışıma silika dumanının eklenmesini değerlendirmiştir. Yazarlar, metakaolin ve silis dumanı içeriğindeki artışların yanı sıra daha yüksek alkalinitenin jeopolimerin nihai gücünü önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmışlardır. Salazar ve arkadaşları (2017), %100 oranında kırmızı kil tuğlasını sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak aktif etmiş ve oda koşullarında kürün ardından 54.38 MPa basınç dayanımlarına ulaşmışlardır. Ayrıca bağlayıcı olarak %100 beton atığı kullandıklarında, 25.57 MPa basınç dayanımları elde etmişlerdir. Komnitsas ve Zaharaki (2015), uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur gibi endüstriyel ve inşaat yıkıntı atıklarının jeopolimerizasyon için uygun olduğu ve uygun alkali kullanımıyla 76 MPa'ya kadar basınç dayanımları elde etmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yaptıkları çalışmada %50 yüksek fırın cürufu, %20 kiremit, %10 beton karışımı, %90 kiremit ve %10 uçucu kül karışımı, %90 kiremit ve %10 kırmızı çamur karışımı yapmış, sırayla 76, 54 ve 51 MPa dayanım sonuçları elde etmiştir. Bu sonuçlarla, jeopolimer sentezinde inşaat yıkıntı atıklarının kullanımının, özellikle bu tür atıkların yönetiminde eksiklikleri olan ülkelerde şu anda büyük bir ilgi konusu olduğu açıktır. Özellikle bu teknoloji sayesinde atıkların değerlendirilmesi ile, bu kalıntıların yarattığı çevresel etki azaltılabilir. Ayrıca jeopolimerler, CO_2 emisyonlarını ve enerji tüketimini azaltma potansiyeli ile Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı maddelerdir.

Doğru oranlarda kullanılmış alkali aktivatör ile inşaat yıkıntı atığının (atık tuğla ve beton karışımlarının) alkali aktivasyonu, bu malzemelerden jeopolimer bağlayıcılar üretme olasılığını kanıtlayabilir. Farklı oranlarda atık tuğla, beton ve aktivatörlere sahip inşaat yıkıntı atığı bazlı hazırlanan jeopolimer numunelerinin mekanik özellikleri, endüstriyel ölçekte kabul edilebilir olmak için uygun özellikler gösterir, ancak hem kuru karışım oranlarında hem de kullanılan aktivatörün bileşiminde bazı optimizasyonlara ihtiyaç duyar. Çiçeklenme, inşaat yıkıntı atığının jeopolimer bağlayıcı olarak kullanıldığı zaman dikkate alınması gereken bir başka konudur. Önceki araştırmalar, çiçeklenme görünümünün, ikincil bir reaksiyonda, reaksiyona girmemiş sodyum hidroksitin yüzeye sızarak atmosferde bulunan karbondioksit ile

tepkimeye girmesi sonucu sodyum karbonat oluşturmasından dolayı olduğu kanıtlanmıştır (Allahverdi ve ark., 2009; Najafi ve ark., 2012). Çiçeklenme bazen inşaat yıkıntı atığı bazlı alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcılarda bir sorundur, ancak yazarların deneyimlerine göre (Najafi vd., 2012), ya alüminyum açısından zengin katkıların eklenmesiyle ya da hidrotermal kürleme ile etkili bir şekilde azaltılabilir. 45 °C'den yüksek sıcaklıklarda hidrotermal kürlenme, çiçeklenmede önemli bir azalma ve ayrıca hafif dayanımsal iyileştirmeler sağlamaktadır.

2.3.5. İnşaat Yıkıntı Atığı Bazlı Geri Dönüşüm Agregası

Son yıllarda, inşaat sektöründeki büyük yatırım, ekonomideki büyüme ve nüfusun yüksek büyüme oranı nedeniyle kentsel alanlarda yaşam alanlarının artan gereksinimi, geleneksel yapı malzemelerine büyük bir talep yaratmıştır. Kaliteli agregaların azalması ve agrega gereksinimindeki artış, hammaddelerin bulunabilirliğini daha nadir hale getirmiştir. Buna ek olarak, bazı bölgelerde artan nakliye ile birlikte nakliye maliyetlerindeki artış nedeniyle malzemeler daha pahalı olma eğilimindedir. Sonuç olarak, inşaat malzemelerinin maliyetinde bir artış vardır. Ayrıca, hızlı modernizasyon ve sanayileşme oranı, inşaat ve yıkım (İYA) atıklarından büyük miktarlarda atık depolarının oluşmasına yol açmıştır. Bu İYA atıkları, dünyanın birçok ülkesinde en büyük katı atık depolarını oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak, her yıl uçucu kül, cüruf ve kireçtaşı tozu gibi büyük miktarlarda sanayi ve madencilik yan ürünleri üretilmektedir. Endüstrinin bu büyük miktardaki atık veya yan ürün malzemeleri, düşük dereceli geri dönüşüm olarak dolgu malzemesi veya boş alanlar için yasadışı olarak boşaltma malzemesi olarak kullanılır ve miktarları zamanla artmaktadır. Bütün bunlar, düzenli depolama alanlarının artmasına açmıştır; yararlı araziler depolama sahası haline gelmektedir. Dolayısıyla, bu tür enkazların ele alınması gelişmiş ülkelerdeki önemli konulardan biri haline gelmiştir ve sürdürülebilir çözüm gerektiren küresel bir endişe haline gelmiştir. Ayrıca, CO_2 emisyonunun azaltılmasına ilişkin küresel endişe de geri dönüşüm agregasının işlenmemiş agregadan çok daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü, işlenmemiş agreganın çıkarılması ve ezilmesi, önemli miktarda enerji kullanımına ve daha fazla CO_2 emisyonuna neden olur (Limbachiya M ve ark., 2012). Yukarıda bahsedilen bu büyük sorunların yanı sıra,

inşaat atıklarının geri dönüşümünü teşvik eden başka sorunlar da vardır (Kasai Y, 1988). Bu nedenle, inşaat işlerinde yapısal betonda geri dönüşüm agregası (GDA) kullanımı, atık maddelerin toplu olarak azaltılması ile birlikte ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamaktadır. Yakın geçmişte, GDA kullanılarak betonun farklı özelliklerini değerlendirmek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Önceki çalışmalar GDA'nın beton üretmek için doğal agregaların yerine başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ve normal yapısal betonun gerekli performansını karşıladığını göstermiştir (Abbas A ve ark., 2006). Günümüzde hem yapısal hem de yapısal olmayan uygulamalar için geri dönüşüm agregalı beton (GDAB) kullanılmaktadır. Kullanımının ticari ve teknik olarak uygun olduğu tespit edilmiştir. GDA betonarme yapılarda, beton yapıların yıkılması, ömrünü tamamlamış prefabrik beton elemanları, duvar elemanları, beton yol yatakları, asfalt kaplama, hazır beton artığı ve gibi diğer inşaat döküntülerinden kaynaklanan atıkların işlenmesi yoluyla çıkarılır. Tipik olarak yıkılmış atık beton gibi eski betonun ezilmesiyle oluşan agrega, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDA) olarak kabul edilir. Genel olarak GDA'lar tuğla, fayans, metal ve cam, ahşap, kâğıt, plastik ve diğer atıklar gibi çeşitli maddelerle karıştırılır (Hansen TC, 1992). Yıkılmış beton yapılardan GDA kullanımı kavramı, Avrupa'da II. Dünya Savaşı zamanından önce uygulamaya konuldu. Daha önce kaldırım için dolgu malzemesi olarak kullanılan GDA günümüzde inşaat amaçlı da kullanılmaktadır.

2.3.5.1 Geri Dönüşüm Süreci

Geri dönüşüm, daha önce kullanılmış malzemelerin yeni katma değerli ürünlerin geliştirilmesinde işlenmesi olarak tanımlanabilir. Geri dönüşüm sürecinin arkasındaki entegre sistem, geri dönüştürülmesi istenen malzeme içindeki zararlı maddeleri (donatı, ahşap, plastik vb.) farklı eleme aşamaları ve ayıklama gibi bir dizi işleme tabi tutarak daha küçük boyutlu parçalar üretmek için yıkılmış beton atıkların kırılması işlemlerini içerir. Yüksek kaliteli agregalar, kirlenme seviyesine ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak, istifleme, kırma, presleme, eleme (ezmeden önce ve sonra) prosedürlerle adım adım da işlenebilir.

Yıkım döküntüleri, çeneli kırıcı, çekiçli değirmen, darbeli kırıcı ve konik kırıcı gibi çeşitli kırıcılar tarafından veya elle çekiçle kırılabilir (Li X. 2008). Farklı kırıcıların, kırma işlemlerinin etkinliğine bağlı olarak GDA'ların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde farklı sonuçları vardır (Matias D ve ark., 2013) ve dolayısıyla beton performansını da etkiler. Çeneli kırıcılar esas olarak birincil kırma için kullanılır, çünkü büyük boyutlu beton parçalarını ikincil kırma için gerekli olan boyuta indirebilme kabiliyetine sahiptir. Darbeli kırıcılar, daha az harç yapışmış ve iyi kalitede bir agrega ürettikleri için ikincil kırma için tercih edilir (Etxeberria M. ve ark., 2007). GDA' için istenen gradasyon, başarılı bir şekilde yapılmış birincil ve ikincil kırıcılar yoluyla art arda ezilerek elde edilebilir. Çeşitli aşamalardaki kırıcıların seçimi, maksimum besleme boyutu, çıktı kalitesi, istenen parçacık boyutu ve çeşitli fraksiyonların şekli ve üretilen ince taneciklerin miktarı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Günümüzde mobil kırma tesisleri ve bazı taşınabilir ekipmanların yardımıyla, ürünün hemen kullanımı için sahada geri dönüşüm tesisi kurulabilir ve ayrıca nakliye mesafesi azaltılabilir. Yukarıda belirtilen kuru işlemlerle birlikte, GDA için ıslak işleme tekniği daha kaliteli ve daha az organik ve inorganik safsızlığa sahip agrega sağlar. Bununla birlikte, Japonya, Çin, ABD ve Hollanda gibi bazı gelişmiş ülkelerde, araştırmacılar GDA'nın olumsuz etkisini en aza indirmek için bazı gelişmiş işleme teknikleri geliştirdiler. Bu yöntemleri benimseyerek, yapışan harcın orijinal kaba agrega bütünlüğünü kaybetmeden çıkarılmasıyla yüksek kaliteli agregalar üretilebilir. Bu tekniklerden bazıları nitrik asit çözünme yöntemi (Movassahgi R, 2006), ön ıslatma işlemi (Tam VWY ve ark., 2007), donma-çözülme yöntemi (Abbas A. ve ark. 2008), termal genleşme yöntemi (Juan MS ve Gutierrez PA, 2009), mikrodalga ısıtma yöntemi (Akbarnezhad A ve ark., 2011), ısıtma ve sürtünme yöntemi (Kuroda Y ve Hashida H, 2005) , mekanik taşlama yöntemi (Yanagibashi K. ve ark., 2005) ve ultrasonik işleme yöntemidir (Katz A, 2003).

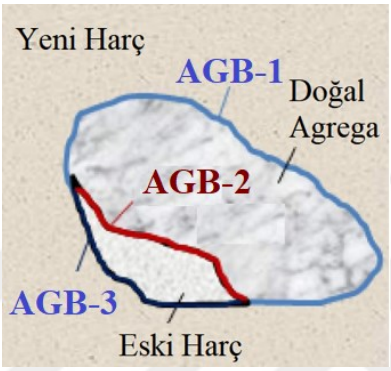
2.3.5.2. Geri Dönüşüm Agregasının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

İnşaat yıkıntı atıklarından (İYA) türetilen GDA genellikle doğal kaba agrega ve yapışık harçtan oluşur. Eski çimento harcı çoğunlukla ince agrega, sulu ve susuz çimento parçacıkları içerir. GDA kalitesi çoğunlukla uygulanacak geri dönüşüm

yöntemlerine bağlıdır, ancak GDA'nın özellikleri esas olarak elde edildiği orijinal betonun su/çimento oranına bağlıdır (Hansen TC ve Narud H, 1983). GDA'nın en ayırt edici özelliği, yüksek harç içeriğidir. GDA'nın homojenitesini bozan ve daha az yoğun olması nedeniyle gözenekli olmasına neden olan şey üzerinde bulunan eski yapışmış harcıdır (Poon CS ve ark., 2004). GDA'da kalan harcın hacmi agrega boyutuna göre %25 ila %60 arasında değişmektedir (Hansen TC ve Narud H, 1983). Bazı araştırmacılar çalışmalarında çimento hamurunun yaklaşık %20'sinin parçacık büyüklüğü 20 ila 30 mm arasında GDA yüzeyine bağlı olduğunu bildirmişlerdir (Nassar R ve Soroushian P, 2012). Oysa Poon ve ark., atık betonun ezilmesinden elde edilen GDA'nın hacimce %65-70 doğal kaba ile ince agrega ve %35-30'luk çimento macunu içerdiğini bildirmişlerdir. Yapışık harç miktarı, orijinal betonun mukavemet özelliklerini, kırma prosedürünün etkinliğini, kırma yöntemi ve GDA partikül boyutunu gösterir. Bu yapışık harç ile GDA kalitesi arasında her zaman karşılıklı bir ilişki vardır. Yüksek porozite oranı, anormal derecede yüksek su emme kapasitesinden büyük ölçüde sorumludur. GDA'nın gözenekli yapısı, GDA'nın daha yüksek su emme kapasitesiyle ilişkilidir, çünkü bu gözenekler daha fazla suyu emilmesine izin verir (Rao A, 2005). GDA'nın su emme kapasitesi doğal agregadan 2-3 kat daha yüksektir (Tavakoli M ve Soroushian P, 1996). GDA'nın su emme kapasitesi daha küçük parçacık boyutu için daha fazladır; çünkü özgül yüzey alanı ne kadar büyükse harç içeriği o kadar büyüktür (Hansen TC ve Narud H, 1983). GDA'nın su emme kapasitesi, agrega parçacıklarının yüzeyinde var olan çimento hamuru miktarına bağlı olarak değişir. Bazı uluslararası komitelerin tavsiyelerine göre, su emme kapasitesi kaba agregalar için %7'den fazla ve ince agregalar için %13'ten fazla olmaması arzu edilmektedir (Li JB, 2004). GDA'nın su emme kapasitesi GDAB'ın su emme kapasitesini de yansıtır. Yapışık harcın yoğunluğu ve özgül ağırlığı oldukça azdır ve GDA'nın düşük özgül ağırlığı, kütle yoğunluğu ve SSD yoğunluğunu açıklamaktadır. Limbachiya ve ark., deneysel araştırmadan, GDA'nın ve doygun kuru yüzey yoğunluğunun doğal agregadan yaklaşık %7-9 daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. GDA'nın gözenekliliği ayrıca özgül ağırlığını ve dolayısıyla yoğunluğunu da belirler (Khalaf FM ve Devanny AS, 2004).

GDA, zayıf partikül boyutu dağılımı nedeniyle genel olarak zayıf derecelendirilir. Çeşitli kırıcı türlerinin kullanılmasıyla ezilmesinin bir sonucu olarak

çok kaba veya çok ince olabilir. GDA'daki ince fraksiyonların miktarı daha fazladır. Eski yapışık harç veya onu çevreleyen çimento macununun varlığı nedeniyle eski bir arayüzey geçiş bölgesine (AGB) sahiptir. Yapışık harç içinde küçük gözenekler, kırma işlemi sonucunda agrega içinde sürekli çatlaklara sahip olur ve bu nedenle yapı zayıflar (Olorunsogo FT ve Padayachee N, 2002). GDA'nın AGB özellikleri Şekil 2.8'de verilmiştir.

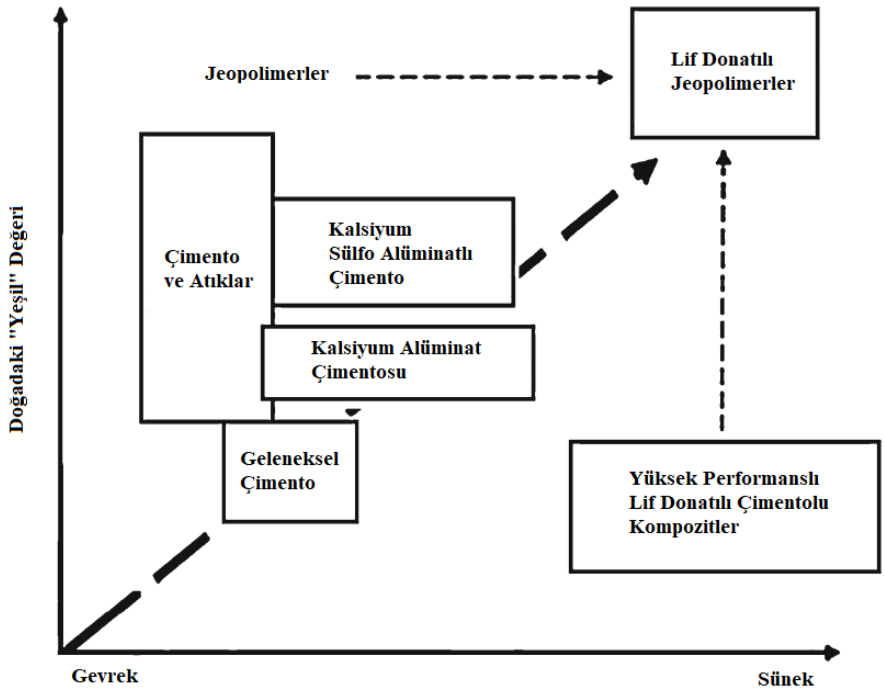


Şekil 2.8. Geri dönüşüm agregasında AGB oluşumu

Yapışık harç nedeniyle GDA çoğunlukla doğası yuvarlatılmış pürüzlü yüzey dokusu ve düzensiz şekle sahiptir. GDA, doğal agregadan daha düşük kırılma mukavemeti, düşük darbe dayanımı ve düşük aşınma direnci gibi düşük mekanik özelliklere sahiptir (Sagoe-Crentsil KK ve ark., 2001). GDA kullanım potansiyeli kabul edilmiş olmasına rağmen, betonun işlenebilirlik, mukavemet ve dayanıklılık açısından performansını önemli ölçüde etkilediğinden, GDA'nın betonda geniş kullanımını engelleyen bazı faktörler vardır. Bu nedenle, GDA'nın parçacık boyutu dağılımı, agrega şekli ve boyutu, gözeneklilik, emilim, tokluk, sertlik, mukavemet ve safsızlık seviyesi gibi bazı belirgin özellikleri, betonda kullanılmadan önce mutlaka değerlendirilmelidir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen daha düşük nitelikler ve Şekil 2.8'de gösterilen GDA'da mevcut olan zayıflıklar, betonda GDA kullanımını kısıtlar ve uygun spesifikasyonun olmaması da geri dönüşüm tekniği için olumsuzluklara yol açar.

2.4. Tasarlanmış Jeopolimer Bağlayıcılı Kompozitler (EGC)

Sürdürülebilir kalkınma için çevre dostu malzemeler üzerine duyulan ihtiyaç, şu anda inşaat sektöründe önemli bir çevresel konudur. Beton endüstrisi küresel ısınmaya neden olan faktörlerin başında gelmektedir. Bu gerçek, beton ve diğer çimento esaslı yapı malzemelerinin üretiminde ana bileşen olarak Portland çimentosunun kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Çimento endüstrisi, dünyadaki CO_2 emisyonunun yaklaşık %6'sından sorumludur. Bununla birlikte, beton ve çimento esaslı kompozitlerin, en yaygın kullanılan konstrüksiyon malzemeleri olarak, öngörülebilir bir gelecekte hala kaçınılmazdır. Bu bağlamda, Portland çimentosu için puzolanik malzeme kullanma veya bulma alternatifleri gereklidir. Son yıllarda, "jeopolimerik bağlayıcı" adı verilen yeni inorganik çimentolu bağlayıcı türünde büyük bir gelişme görülmüştür. Bununla birlikte, beton terminolojisinde uygulanması sağlandı, bu da normal betonun "yeşilliğini" arttırdı ve aynı zamanda karşılaştırılabilir ve daha iyi özelliklere sahip yeni yapı malzemelerinin üretilmesinin önünü açtı (Rangan, 2007).



Şekil 2.9. Çeşitli bağlayıcı ve ürünlerin süneklilik ve "yeşil" malzeme ilişkisi

Jeopolimer betonları üzerinde kayda değer araştırmalar yapılmış olmakla birlikte, mevcut LDÇK'deki çimento esaslı bağlayıcının, lif donatılı jeopolimer kompozitlerin (EGC) üretilmesi kapsamında "jeopolimer bağlayıcı" ile değiştirilmesi için kısıtlı sayıda çalışmalar olmuştur. Lif donatılı jeopolimer kompozitlerde önemli araştırmalar yapılmasına rağmen, bu alan hala nispeten gençtir. Jeopolimer malzemelerin geniş kullanımı için en önemli kısıtlamalardan biri, nispeten düşük kırılma davranışları, düşük basınç ve eğilme mukavemetleridir (Korniejenko ve ark., 2016). Bundan dolayı bu konuyla ilgili günümüzdeki en önemli araştırma konuları, lif takviyesi ile bu mekanik özellikleri geliştirmektir. Mekanik açıdan lif takviyesi, kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri geliştirmek için etkili bir yöntemdir. Liflerin varlığı çatlağın genel etkilerini azaltmakta, ortaya çıkan çatlakların genişliğini sınırlamakta (örneğin mikro çatlakların yayılmasının azaltılması), tüm kırılgan davranışları bastırmakta ve sünekliği arttırmaktadır. Ayrıca takviye lifler, kompozitlerin eğilme mukavemetini, enerji emilimleri ve deformasyona karşı dirençleri ile bağlantılı olan jeopolimerlerin özelliklerini de geliştirebilmektedir (Furtos ve ark., 2019).

Jeopolimer sistemler için uygulanan kür prosedürü lif takviyeli çimentolu sistemlerle kıyaslandığında, polimerizasyon işlemi neticesinde dayanımdan sorumlu yapının oluşabilmesi ve polimerizasyon reaksiyonlarının devam etmesi için ortam sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklık gerekmektedir. Literatürde söz konusu kür kondisyonları için oda sıcaklığından 120 °C sıcaklıklara kadar ısıl kür işlemi için geniş bir sıcaklık skalası seçilmiştir. Söz konusu sıcaklıklar ve kür süreleri alüminosilikat kaynağı malzememin kimyasal içeriğine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin metakaolin bazlı jeopolimerler oda sıcaklığında kısa bir süre için kürlenebilirler (Davidovits, 1989). Bununla birlikte, kür sıcaklığı ve süresi, uçucu kül gibi endüstriyel atıklardan üretilen jeopolimer malzemelerin özelliklerinde önemli roller oynamıştır ve genel olarak, uçucu kül bazlı jeopolimer kompozitlerde, en az 60 °C'lik kürleme sıcaklığı önerilmektedir (Shaikh ve ark., 2013).

Bernal ve ark. (2010), çelik lif takviyeli cüruf bazlı jeopolimer kompozitler üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda basınç dayanımlarında azalmalar olduğunu bildirmiştir. Çelik lif takviyeli kompozitlerde (40 kg/m^3) lif takviye edilmemiş numunelere kıyasla 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında yaklaşık %25 ve %23 düşüş

gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, çelik lif kullanım oranının 40 kg/m^3'ten 120 kg/m^3'e yükseltilmesi yoluna gidilse de basınç dayanımı sonuçlarında artış elde edilememiştir. Lif oranının 120 kg/m^3'e yükseltildiği karışımlarda lif içermeyen karışımlara kıyasla 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında yaklaşık %20 ve %15 düşüş gözlemlenmiştir. Her ne kadar lif oranındaki artış basınç dayanımlarında görülen düşüşü bir noktaya kadar engellese de söz konusu dayanım düşüşleri oldukça yüksek seviyelerdedir. Ek olarak Bernal ve ark. gerçekleştirdikleri çalışmalarda ürettikleri çelik lif takviyeli cüruf bazlı jeopolimer kompozitlerin eğilme dayanımları üzerine birtakım testler gerçekleştirmiştir. Çimento esaslı lif donatılı sistemlerde olduğu gibi jeopolimer sistemlerde de lif takviyesine bağlı olarak gerilme ve eğilme dayanım performanslarında artışlar görülmektedir. Jeopolimer kompozitler üzerinde gerçekleştirdikleri testler neticesinde 7, 14 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında kayda değer artışlar tespit edilmiştir. Ayrıca kür süresinin eğilme dayanımına olumlu yönde katkılarının olduğunu ve 28 gün sonunda eğilme dayanımının %70'e kadar artış gösterdiğini bildirmişlerdir. Söz konusu kompozitlerin yarmada gerilme dayanımlarının da eğilme dayanımı sonuçları ile benzer bir trende sahip oldukları da gözlemledikleri bir başka husustur. Gerçekleştirdikleri çalışmalardan elde edilen sonuçlar neticesinde çelik lif takviyesi neticesinde jeopolimer matrisin çatlak sonrası performansının iyileştiği açıkça görülmektedir.

Lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozitler üzerine gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise Puertas ve ark. (2003), polipropilen lifleri kullanarak uçucu kül ve cüruf bazlı kompozitler üretmiştir. Söz konusu çalışmada alüminosilikat kaynağı olarak uçucu kül, cüruf ve uçucu kül ile cüruf birlikte kullanıldığı üç farklı kombinasyon seçilmiştir. Polipropilen lif kullanım oranları ise hacimce %0,5 ve %1 olarak belirlenmiştir. Cüruf bazlı kompozitlerde farklı oranlarda kullanılan polipropilen lifin 2 ve 28 günlük basınç dayanımlarına herhangi bir etki yapmadığı görülmüştür. Sadece uçucu kül içeren karışımlarda ise lif oranındaki artış 2 günlük basınç dayanımlarında artışa sebep olmuş fakat 28 günlük basınç dayanımlarında azalmalar saptanmıştır. Uçucu kül ve cüruf kombinasyonunun bağlayıcı olarak kullanıldığı karışımlarda ise lif oranının %0,5'ten %1'e arttığı durumlarda basınç dayanım sonuçlarında ufak da bir artış olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar ürettikleri jeopolimer bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerinin yanı sıra durabilite özellikleri hakkında çalışmalar

gerçekleştirmiş, bu bağlamda kompozitlerin rötre davranışı ve donma/çözünme, ıslanma/kuruma döngüleri neticesinde gösterdikleri mekanik performansları da incelemiştir. 40 gününün sonunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde uçucu kül bazlı kompozitlerin en iyi performansı sergilediği, cüruf ve uçucu kül-cüruf kombinasyonunun bağlayıcı olarak kullanıldığı kompozitlerin ise çimentolu sistemlere yakın rötre davranışı gösterdikleri belirtilmiştir. Islanma/kuruma döngüsüne maruz bırakılan kompozitlerde de uçucu kül içeren karışımlar en yüksek performansı göstermiş ve cüruf içeren kompozitler normal çimentolu sistemlere kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir. Donma/çözünme döngüsüne tabi tutulan kompozitlerde ise 50 donma/çözünme döngüsü neticesinde cüruf bazlı kompozitlerin eğilme ve basınç dayanımlarında sırasıyla %28 ve %17 artış gözlemlenmiş, uçucu kül bazlı kompozitlerde ise bu durum tersinir davranarak eğilme ve basınç dayanımlarında sırasıyla %41 ve %20 oranında kayıp yaşamıştır.

Zhang ve ark. (2009), polipropilen lif kullandıkları jeopolimer kompozitlerin erken yaş basınç dayanımı üzerinde çalışma gerçekleştirmiş ve bağlayıcı olarak uçucu kül ve kalsine kaolin kullanmıştır. Uçucu kül ve kalsine kaolin kullanım oranları ise 1:2 olarak belirlenmiştir. Kütlece %0,5 polipropilen lif içeren karışımlarda basınç dayanımı artışları 1 ve 3 gün için sırası ile %68 ve %20 olarak saptanmıştır. Fakat lif oranının arttırıldığı karışımlarda basınç dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Ek olarak polipropilen lif takviyesinin erken yaş eğilme dayanımı üzerine etkilerini incelenmiş, 1 ve 3 günlük numunelere uygulanan testler sonucunda eğilme dayanımının kayda değer bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. İki yaş grubundaki numuneler için de %0,75 oranında polipropilen lif takviyesi eğilme dayanımlarını iki katına çıkarmıştır. Tüm bu olumlu performans sonuçlarına rağmen lif takviyesinin jeopolimer kompozitlerin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir. Araştırmacıların jeopolimer bazlı kompozitlerin donma/çözünme döngüsü neticesindeki davranışlarını saptamak adına gerçekleştirdiği testlerde ise uçucu kül içeren kompozitlerin 20 donma/çözünme döngüsü sonunda performanslarının stabil kaldığı bildirilmiştir. Araştırmacılar ayrıca jeopolimer bazlı kompozitlerin asit direncinin tespiti üzerine çalışmalar gerçekleştirmiş ve ekstrüze edilerek üretilen kompozit panelleri 30 gün boyunca sülfirik aside maruz bırakmışlardır. Sonuçlar incelendiğin uçucu kül içermeyen kompozitlerde darbe dayanımı ve rijitlik değerleri

sırasıyla %4,5 ve %11,8 oranlarında azalmış fakat darbe tokluğu değeri %35,3 oranında artış göstermiştir. Uçucu kül içeren jeopolimer kompozitlerde asit saldırısından sonra darbe dayanımında herhangi bir kayıp görülmemiş, ek olarak uçucu kül oranındaki artışın darbe dayanımını kayda değer seviyede arttırdığı bildirilmiştir.
Jeopolimer esaslı kompozitler üzerine gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise Natali ve ark. (2011), metakaolin ve cüruf bazlı kompozitlerin eğilme dayanımlarını incelemiştir. Metakaolin ve cüruf kombinasyonunun bağlayıcı olarak kullanıldığı numunelerde karbon, e-cam elyaf, polivinilalkol ve polivinilklorür lifler kullanılmıştır. Tüm lif tipleri için eğilme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Söz konusu lifler içerisinde en yüksek performansı sırasıyla eğilme dayanımında %50 ve %62'lık artış sağlayan karbon lif ve polivinilalkol lifleri göstermiş, ayrıca çatlak sonrası süneklik perfomansında da yüksek oranda artış sağlamıştır. Ek olarak karbon lif kullanılarak üretilen numuneler tüm numuneler arasında en yüksek tokluk performansını sergilemiştir.

Ekstrüzyon tekniği ile üretilen polivinilalkol katkılı jeopolimerler üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalar kapsamında Li ve ark. (2005), metakaolin, uçucu kül ve metakaolin uçucu kül kombinasyonlarının bağlayıcı olarak kullanıldığı farklı oranlarda polivinilalkol içeren kompozitlerin eğilme dayanımları üzerine çeşitli testler gerçekleştirmiştir. Tek vidalı ekstruder kullanılarak üretilen kompozitlere %1, %2 ve lif takviyesiz olmak üzere 3 farklı biçimde gruplandırılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında kür edilmiş ve 28 gün sonunda eğilme dayanımları test edilmiştir. Gerçekleştirilen testler neticesinde metakaolin bazlı jeopolimer kompozitlerde orta nokta sehimi ve çoklu çatlak oluşumunun lif takviye oranındaki artış ile doğru orantılı olarak arttığı bildirilmiştir. Fakat metakaolin bazlı kompozitlerde lif takviyesinin nihai eğilme dayanımına herhangi bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Uçucu kül ve metakaolinin birlikte kullanıldığı karışımlarda ise eğilme dayanımlarının, metakaolin bazlı numunelere göre %30 daha yüksek olduğu %10 uçucu kül içeren karışımlar hariç, uçucu kül miktarındaki artışın eğilme dayanımlarını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımlarındaki azalma trendinin uçucu külün metakaoline göre reaktivitesinin düşük olması ve dayanım kazanma safhasında metakaolinin etkisini azaltması ile ilişkilendirilmiştir. Bu durum numunelerin yenilme mekanizmasına dair yapılan incelemelerde de gözlemlenmekte, jeopolimer

oluşumunun sekteye uğraması sebebi ile lif-matris bağlarının zayıflamasının önemli bir etken olduğu belirtilmektedir.

Jeopolimer kompozitlerin kırılma toklukları üzerine çalışmalar gerçekleştiren Dias ve Thaumaturgo (2005), metakaolin bazlı bazalt lif takviyeli jeopolimer kompozitler üretmiş ve hacimce %0,5 ve %1 bazalt lif kullanmıştır. Çimento bazlı kontrol numunelerine kıyasla %0,5 ve %1 lif içeren metakaolin bazlı kompozitlerin kırılma tokluklarında sırası ile %14 ve %111 oranında iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca bazalt liflerin jeopolimer kompozitlerin sertleşme ve pekleşme özelliklerini normal betonlara kıyasla daha efektif hale getirdiği belirtilmiştir. Silva ve Thaumaturgo (2003) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada da lif takviyeli jeopolimer kompozitlerin çimento bazlı eşleniklerine oranla yüksek kırılma tokluğuna sahip oldukları bildirilmiştir. Söz konusu çalışmada vollastonit bazlı mikrolif takviyeli jeopolimer kompozitler üretilmiş, jeopolimer matriste oluşan lif-matris bağının uyumluluğuna atıfta bulunmuşlardır.

Shaikh (2013), lif takviyeli jeopolimer bazlı kompozitlerin mekanik performanslarının yanı sıra şekil değiştirme sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşumu üzerine gerçekleştirdiği çalışmalarda alüminosilikat kaynağı bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullanmıştır. Çelik lif ve iki farklı tipte PVA lif (PVA-1; 8 mm uzunluğunda, 0,04 mm çapında, PVA-2; 12 mm uzunluğunda, 0,10 mm çapında) kullanarak gerçekleştirdiği çalışmada lif takviye oranlarını %1 ve %2 olarak belirlemiştir. Aynı oranda lif içeren numunelerde çelik lif içeren numunelerin PVA lif içerenlere göre daha yüksek eğilme dayanımı sergilediklerini fakat PVA liflere göre sehim kapasitesinin daha düşük olduğunu belirtmiştir. Bu durumu çelik lifin elastisite modülünün PVA liflere kıyasla daha yüksek olması ile ilişkilendirmiştir. Düşük elastiklik modülüne sahip PVA lifler düşük eğilme dayanımı gösterseler de sehim miktarları çelik life kıyasla oldukça yüksektir. Jeopolimer kompozitlerin uzun PVA lif içeren numuneler hariç tamamında çimentolu sistemlerle kıyaslanabilecek seviyelerde şekil değiştirme sertleşmesi özelliği gösterdiğini belirtmiştir. Kompozitin içerdiği lifin kritik lif boyundan daha uzun olması durumunda lif kompozitten sıyrılmak yerine kopmaktadır. Bu durum PVA-2 lifinin PVA-1 lifine göre daha uzun ve daha az dayanıma sahip olmasından

ileri gelmektedir. Yüksek sehim kapasitesi nedeni ile PVA lifler jeopolimer bazlı kompozitlerde çoklu çatlak oluşumunu da mümkün kılmaktadır.

Lee ve ark. (2012), bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullandıkları kompozitlerde PVA lif takviye oranını %2 olarak belirlemiş ve kompozitlerin basınç dayanımı, gerilme ve eğilme dayanımını tespit etmek için bir dizi test gerçekleştirmiştir. 28 günlük basınç dayanım sonuçları incelendiğinde su/bağlayıcı oranının basınç dayanımını doğrudan etkilediğini ve tüm numunelerin lif-köprüleme davranışı sebebi ile farklı kırılma davranışları sergilediğini belirtilmiştir. Uygulanan eksenel çekme testi neticesinde tüm kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesi gösterdiği, düzgün bir süneklikle çoklu çatlak oluşumuna müsaade ettikleri bildirilmiştir. Düşük su/bağlayıcı oranına sahip kompozitin ilk çatlak oluşum dayanımı ve gerilme dayanımının diğer karışımlara kıyasla kayda değer derecede yüksek olması kompozitin yüzey özelikleri, kimyasal bağ enerjisi gibi özelliklerinden kaynaklandığı belirtilmiştir. En yüksek gerilme kapasitesi basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi su/bağlayıcı oranı düşük kompozitten elde edilmiş ve bu performansın PVA ile üretilmiş ECC karışımları ile benzer seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.

Ohno ve Li (2014), uçucu kül ve PVA lif kullanarak ürettikleri jeopolimer kompozitler ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiş, çalışmada iki farklı uçucu külü 0,8:0,2 oranında bağlayıcı olarak kullanmış ve numuneleri 28 günlük kür süresi sonucunda çeşitli deneylere tabi tutmuşlardır. Dayanım testleri sonucunda numunelerin basınç dayanım sonuçlarını 17,4 ve 27,6 MPa, çekme dayanımı sonuçlarını 2,9 ve 3,4 MPa ve gerilme kapasitelerinin ise 2,7 ve 4,3 MPa olarak elde etmişlerdir. Sonuçlara göre ürettikleri jeopolimer bağlayıcılı kompozit malzemenin çekme dayanımı sonuçlarının geleneksel çimentolu kompozitlere göre yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmada deneye tabi tutulan numunelerde çoklu çatlak oluşumu gözlemlendiği ve genel olarak bu çatlaklarının en fazla 116 μm genişlikte olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte numunelerin ECC'ye benzer şekilde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterdiğini raporlamışlardır.

Nematollahi ve ark. (2014), jeopolimer bağlayıcılı kompozitleri çeşitli alkali aktivatörler ile üretmiş, bu numunelerin şekil değiştirme sertleşmesi ve çatlak oluşumu

gibi özellikleri üzerinde birtakım araştırmalar yapmıştır. Çalışma kapsamında jeopolimer bağlayıcı olarak düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül ve lif takviyesi olarak %2 oranında PVA lif kullanılmıştır. Numunelerin reolojik özellikleri incelendiğinde sodyum oranı düşük aktivatörlerin işlenebilirlik açısından en düşük sonuçlar gösterdiğini, kalsiyum oranı yüksek aktivatörlerin ise en iyi işlenebilirlik performansına sahip olduğunu belirtmiştir. Çimento içeren kontrol numunelerin ise jeopolimer bağlayıcılı kompozitlere göre düşük işlenebilirlik özelliğine sahip olduğu raporlanmıştır. Numuneler basınç dayanım testlerine tabi tutulduğunda ise, PVA lif kullanımı ile numunelerin mukavemet değerlerinde yükseliş gözlemlenmiş, maksimim yükleme durumunda liflerin köprüleme özelliği sayesinde başlangıç özelliklerini koruduğuna ulaşılmıştır. İşlenebilirlik sonuçlarının aksine, sodyum bazlı aktivatörler, kalsiyum bazlı aktivatörlere göre daha yüksek basınç dayanım sonuçlarına neden olmuştur. Çimento içeren kontrol numunesi ise basınç mukavemeti açısından sodyum bazlı aktivatörler ile üretilen numunelere benzer özellikler göstermiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, malzemenin kırılma tokluğunun, hamurun mikro yapısal özelliği, agrega özelliği gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, uçucu kül ile üretilen numunelerde jeopolimerizasyon sonucu oluşan ürünlerin genel olarak düzenli kristal formda alüminosilikat jel olduğu bildirilmiştir. Tepkime sonucunda oluşan bu ürünlerin farklılığı, genel olarak kırılma tokluğu parametresinde gözlenen farklılığın en önemli sebebi olmuştur. Eğilme dayanımı deneyleri sonucunda ise jeopolimer bağlayıcılı kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşturma davranışı gösterdiği raporlanmıştır.

Nematollahi ve Sanjayan (2016), gerçekleştirdikleri çalışmada, jeopolimer bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ile uçucu kül karışımına hacimce %2 PVA lif ekleyerek jeopolimer bağlayıcılı kompozit üretimi gerçekleştirmiştir. Bağlayıcı fazın lif ilavesinden önce istenilen seviyede işlenebilirlik ve tiksotropik parametrelerine sahip olduğunu ve uygun karıştırma ve vibrate etme işlemlerinin ardından lif topaklanmasının önlenerek matrise homojen bir şekilde dağılmasının mümkün olabileceği bildirilmiştir. Üretilen kompozit numunelerinin 28 günlük kür süresinin ardından basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, ACI Committee standartında belirtildiği üzere en düşük 17 MPa dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Ancak

araştırmacılar, daha önce gerçekleştirdikleri ısıl kür uygulamasının aksine, bu kez ortam şartlarında kürledikleri numunelerin basınç dayanımlarında bir nebze düşüşler gözlemlemiş, yine de ortam şartlarında kompozit üretiminin arzu edilen bir durum olması sebebiyle daha istenilen bir sonuç olduğu vurgulanmıştır. Kompozitlere uygulanan çekme deneyleri sonucunda ise numunelerin şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ile çoklu çatlak oluşumu sergilediği gözlemlenmiştir. Numuneler yaklaşık 4,6 MPa'lık bir çekme dayanımına sahipken, %4,2 oranında bir şekil değiştirme kapasitesi göstermiştir. Böylelikle jeopolimer bağlayıcılı lif donatılı kompozitlerin tipik ECC malzemelere göre yakın özellikler sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Nematollahi ve ark. (2017), yürüttükleri başka bir çalışmada ise alçısız cüruf ve standart cüruf içeren iki farklı karışımı uçucu kül ile birleştirerek jeopolimer bağlayıcılı kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numunelerin kür etkisini incelemek üzere numuneleri 24 saatlik 60 °C de ısıl kürlemenin ardından bir kısmını ortam kürüne, diğer kısmını ise su kürüne tabi tutmuşlardır. Isıl kür sonucunda numunelerin basınç dayanımlarının, çimento içeren kompozitler ile benzer seviyelerde olduğunu görmüşler, kür süresinin uzatılması basınç dayanımında ile herhangi bir gelişim sonucuna ulaşamamışlardır. Kompozitlerin reolojik özellikleri irdelendiğinde ise numunelerin tiksotropik özelliklerine sahip olduğunu, ayrıca standart cüruf içeren numunelerin daha yüksek seviyede tiksotropik özellik gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Karışımların uygun işlenebilirlik parametresine sahip olmasından dolayı lif dağılımında herhangi bir problem olmadığını belirtmişlerdir. Kompozit numunelerine basınç dayanımı testleri uygulandığında ise 43,3 ila 52,2 MPa arasında değişen sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek basınç dayanımı sonucu, ortam kürü sonucunda alçı içermeyen cüruflu karışımlar tarafından sergilendiği bildirilmiştir. Genel olarak çalışmada kür koşullarının matris ve arayüzey özelliklerine önemli ölçüde etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ortam koşullarında kürün kompozit malzemelerde cüruf kullanıldığında kimyasal bağ dayanımını artırırken, alçısız cüruf kullanıldığında ise ters bir etki görülmüştür. Numunelerin birbirinden farklı kimyasal bağ dayanımlarına sahip olması bağlayıcıların kimyasal kompozisyonlarındaki farklılıklarının bir sonucu olarak mikro yapısal özellikleri farklı ölçüde değiştirmesi ile ilişkilendirilmiştir.

Nematollahi ve ark. (2017), jeopolimer bağlayıcılı kompozit malzemelerin sünekliliğini arttırmak için yürüttükleri başka bir çalışmada ise PVA life ek olarak Polietilen lif içeren kompozit malzemeler üretmiş ve bu malzemelerin kür koşulları sonucundaki özellikleri incelenmiştir. Birtakım testlerin sonucunda jeopolimerlerin tiksotropik özellikler gösterdiği ve liflerin homojen dağılmasını sağlayabilecek yeterli işlenebilirlik özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kür koşullarının yoğunluk parametresi üzerinde ihmal edilebilecek bir etkisi olduğu ve bu yoğunluk değerlerinin lifsiz kompozitlere kıyasla daha düşük olduğu bildirilmiştir. Bu sonuç, lif kullanımı sonucunda matriste oluşan hava boşluklarının yüksek gözeneklilik özelliğine sahip oluşu ile ilişkilendirilmiştir. Basınç dayanımı testlerinin ardından numuneler 33,9 ila 48,7 MPa arasında değişen sonuçlara sahip olmuştur. Çalışma sonucunda gözlemlenen en önemli durum ise, PVA lif eklentisi ile ortam koşullarında kür edilen jeopolimer bağlayıcı kompozitlerin, ECC ile kıyaslanabilecek seviyede özelliklere sahip olması olmuştur. Bu durum, çimento içeren ECC malzemeye alternatif olarak "yeşil" bağlayıcıların kullanılmasıyla çevreye karşı daha duyarlı malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Çatlak oluşum dayanımları incelendiğinde ise, ortam kürünün ısıl kür uygulamasına göre daha olumlu sonuçlar doğurduğu görülmüştür.

3. MATERYALLER VE METODOLOJİ

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan tüm malzemelerin elde edilişi, boyut ve içerik özellikleri, çeşitli analizleri detaylı olarak anlatılmış. Ayrıca karışım yöntemleri, üretim prosedürleri ve test parametreleri tüm detayları ile sunulmuştur.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. İYA Bazlı Bağlayıcı Malzemeler

Çalışma kapsamında kullanılan delikli tuğla, harman tuğlası, çatı kiremiti, cam atığı, beton atığı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), ince geri dönüşüm agregası tüm detayları ile aşağıda verilmiştir.

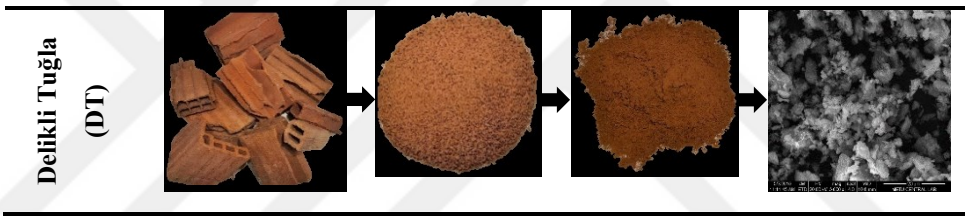
3.1.1.1 Tuğla Atıkları

Tuğla ve kiremit ürünleri, çeşitli killerin toplanıp depolanmasının ardından, öğütülerek şekillendirilmeye hazır hale getirilmektedir. Ardından istenilen şekle getirilen tuğla ve kiremit ürünleri, suni ve doğal kurutma sistemleri ile bünyesindeki rutubeti dışarı atmaktadır. Kurutmanın ardından fırında 800-1000 °C arasında pişirilerek kullanıma hazır hale getirilmektedir. Çatı ve duvar elemanlarında yapı malzemesi olarak kullanılan tuğla ve kiremit ürünleri, kullanıldığı yapının ömrü dolduğunda atık malzeme sınıfına girmektedir.

Çalışma kapsamında üretimlerde inşaat yıkıntı atığı tabanlı malzemeler bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler; harman tuğlası (HT), çatı kiremiti (ÇK), delikli tuğla (DT), beton atığı (BA) ve cam atığı (CA) olmak üzere 5 farklı gruba ayrılmıştır. Bu malzemelere ek olarak bazı karışımlarda, endüstriyel atık olarak açığa çıkan ve geleneksel beton içerisinde ikame edilerek kullanılan yüksek fırın cürufu (YFC) ve

uçucu külün (UK) karışımlarda kullanılmasına karar verilmiştir. 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. Daha sonra yine laboratuvar tipi olan bilyeli değirmende 1,5 saat öğütülmüştür. Optimum öğütme süresi olarak belirlenen 1,5 saat sonunda bütün malzemeler yaklaşık çimento inceliğine getirilmiştir. Toz malzemelerin partikül büyüklükleri lazer dağılımı yöntemi ile belirlenmiştir. Kimyasal içerikleri ise XRD ile belirlenmiş olup malzemelerin her birinin özellikleri aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

3.1.1.1.1 Delikli Tuğla (DT)



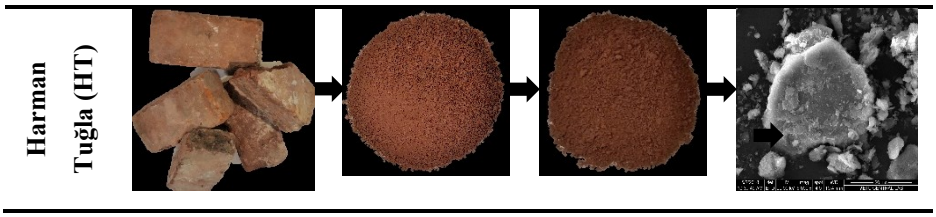
Şekil 3.1. Delikli tuğla görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü)

Çizelge 3.1. Delikli tuğla kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	KK	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
Delikli Tuğla (%)	4,91	53,5	19,3	7,45	4,21	2,61	1,46	1,50	3,58	0,92

KK: Kızdırma Kaybı

3.1.1.1.2. Harman Tuğlası (HT)



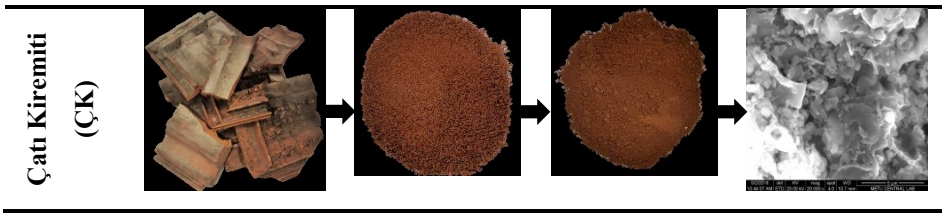
Şekil 3.2. Harman tuğla görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü)

Çizelge 3.2. Harman tuğlası kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	KK	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
Harman Tuğla (%)	4,68	52,4	19,9	7,92	4,18	2,84	0,95	1,58	3,72	1,06

KK: Kızdırma Kaybı

3.1.1.1.3. Çatı Kiremiti (ÇK)



Şekil 3.3. Çatı kiremiti görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü)

Çizelge 3.3. Çatı kiremiti kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	KK	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
Çatı Kiremiti (%)	6,64	49,3	20,0	8,16	5,16	3,29	0,79	1,23	3,67	1,08

KK: Kızdırma Kaybı

3.1.1.2. Cam Atığı (CA)

Cam atığının düşük Al_2O_3 içeriği dolayısıyla tek başına hammadde olarak kullanımı durumunda yeterli performans sağlayamayacağı düşünülmekle birlikte SiO_2 içeriğinin büyük ölçüde amorf oluşu, SiO_2 açısından iyi bir kaynak olduğunu göstermektedir. Cam atığının Na_2O_3 içeriğinin %13 civarında oluşu jeopolimer bağlayıcılı beton üretiminde kullanımı durumunda reaktif silis içermeyen agrega kullanımını gerektirmektedir.



Şekil 3.4. Cam tozu görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü)

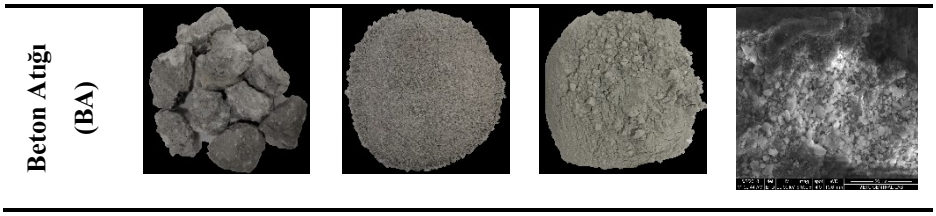
Çizelge 3.4. Cam atığı kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	KK	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
Cam Atığı (%)	4,15	66,5	0,93	0,25	10,00	3,93	0,24	13,60	0,20	0,06

KK: Kızdırma Kaybı

3.1.1.3. Beton Atığı (BA)

Kimyasal kompozisyonu incelendiğinde CaO içeriği açısından beklendiği gibi beton atığı yüksek değer vermiştir. Beton atığının %19,7 civarındaki kızdırma kaybının betondaki karbonatlaşmış kısımlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 3.5. Beton atığı görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham, kırılmış, öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü).

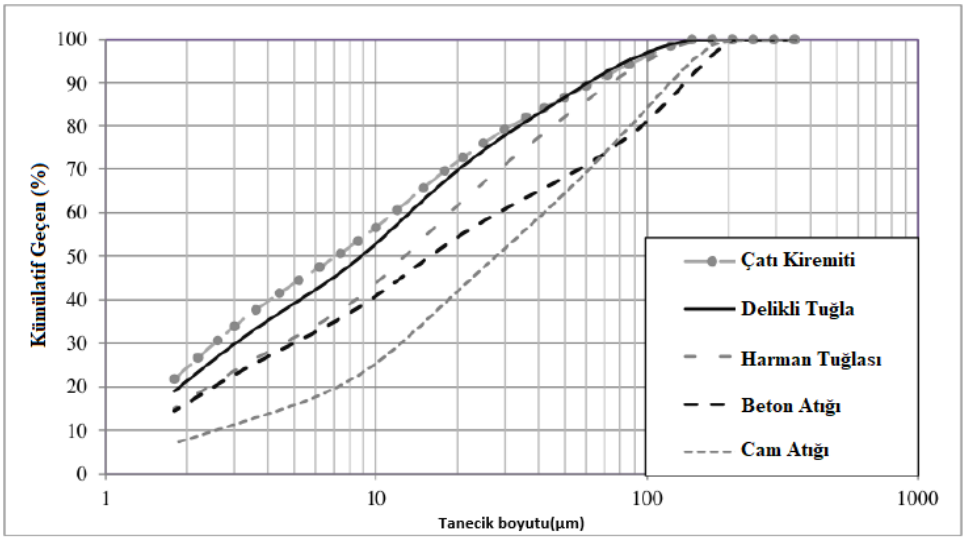
Çizelge 3.5. Beton atığı kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	**KK**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**Na_2O**	**K_2O**	**TiO_2**
Beton Atığı (%)	19,7	37,4	10,7	3,82	21,2	1,29	0,54	1,96	2,22	0,67

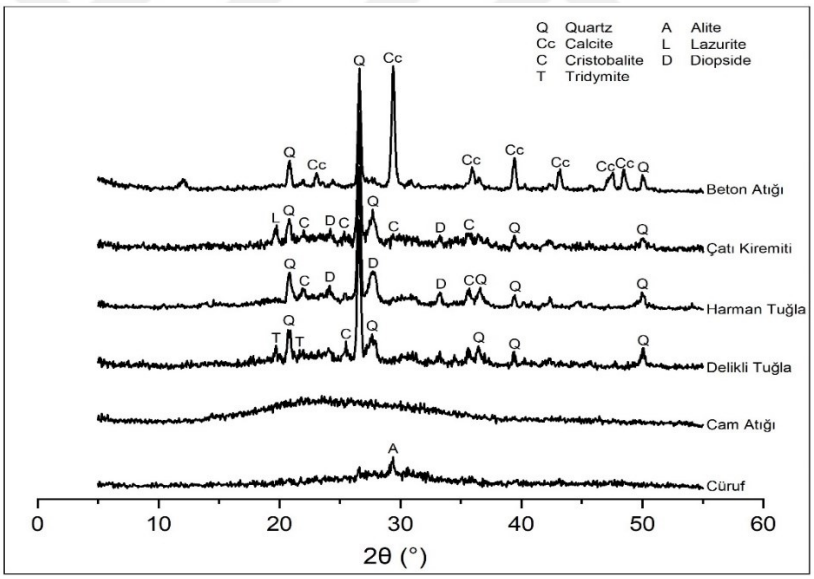
KK: Kızdırma Kaybı

3.1.1.4. Malzemelerin Boyut Özellikleri ve Kristal Yapısı

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin elek analizleri sonucu tane boyutu dağılımı Şekil 3.6'da, X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizinden sonra kristal yapısı ise Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.6. İYA bazlı bağlayıcı malzemelerin tanecik boyut dağılımı



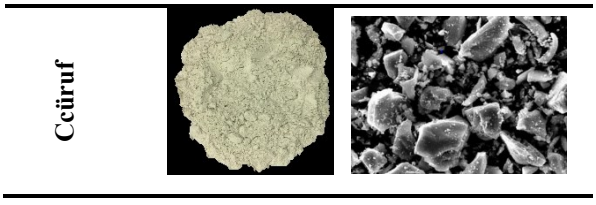
Şekil 3.7. İYA bazlı bağlayıcı malzemelerin ve cürufun XRD analizi

Çizelge 3.6. XRD analizi neticesinde hammaddelerde saptanan kristal fazlar

Kristal Faz	PDF Numarası	Kimyasal Formül
Quartz	96-901-1494	SiO_2
Cristobalite	96-900-1581	SiO_2
Tridymite	96-901-3394	SiO_2
Calcite	96-900-0968	$CaCO_3$
Alite	96-154-0705	Ca_3O_5Si
Diopside	96-900-1333	$Al_{0.06}\,Ca_{0.91}\,Fe_{0.1}\,Mg_{0.91}\,Na_{0.05}\,O_6\,Si_{1.97}$
Lazurite	96-901-1357	$Al_{2.91}\,Ca_{0.6}\,Na_{3.48}\,O_{11.52}\,Si_{3.09}$

3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Karışımlarda kullanılan Yüksek fırın cürufu (YFC) Hatay-İskenderun'dan temin edilmiştir. İnşaat yıkıntı atıklarının jeopolimerizasyon sürecinde ortaya çıkan dezavantajlarını bertaraf etmek amacıyla yüksek fırın cürufu ilave edilmesine karar verilmiştir. İnşaat yıkıntı atığı esaslı jeopolimerler zengin kalsiyum içerikli yüksek fırın cürufu ile beraber üretildiklerinde jeopolimerlerin basınç dayanımının ortam şartlarında geliştirilebilir olduğu düşünülmüştür. İnşaat yıkıntı atığı ve cüruf karışımlarında NASH ve CASH olmak üzere iki farklı jel oluşur. Bu durumda matriste daha güçlü ve stabil yapılar oluşarak daha yoğun bir mikro yapı elde edilmektedir.

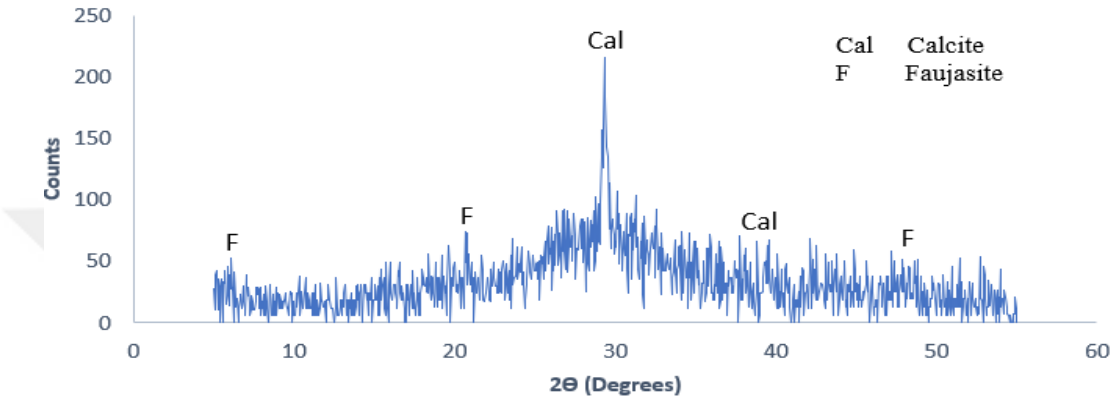


Şekil 3.8. Yüksek fırın cürufu ham görüntüsü

Çizelge 3.7. Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	KK	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
Cüruf (%)	9,09	32,10	11,20	0,62	36,10	5,64	1,21	0,31	0,83	1,07

KK: Kızdırma Kaybı



Şekil 3.9. Yüksek fırın cürufunun XRD analizi sonuçları

3.1.3. Uçucu Kül (UK)

Karışımlarda kullanılan uçucu kül (UK) Hatay-İskenderun'dan temin edilmiştir. Kullanılan uçucu kül ASTM C618'e göre tip F sınıfı uçucu küldür. Literatürde jeopolimer üretiminde en yoğun şekilde kullanılan kaynak malzemelerinden birisi olan uçucu külün karışımlarda kullanılmasının nedeni taze betonun işlenebilmesindeki olumlu etkisidir. Bu olumlu etki fiziksel ve fizikokimyasal olarak iki gruba ayrılabilir. Birinci grupta 3 etkinin birlikte yararlı olduğu söylenebilir; (1) toz tanelerin arasına girerek topaklaşmasını önler. (2) serbest suyun kılcal boşluklardaki hareketini sınırlayarak plastik betondaki terlemeyi azaltır. (3) küresel uçucu kül taneciklerinin yol açtığı kayganlaştırıcı etkiyle işlenebilirliği arttırır. İkinci gruptaki etki ise uçucu kül taneciklerinin hidrofilik karakteri dolayısıyla yüzeylerinde bir ince su filmi adsorbe olması sonucunda suyun betonda daha homojen ve yaygın dağılmasını sağlamasıdır.

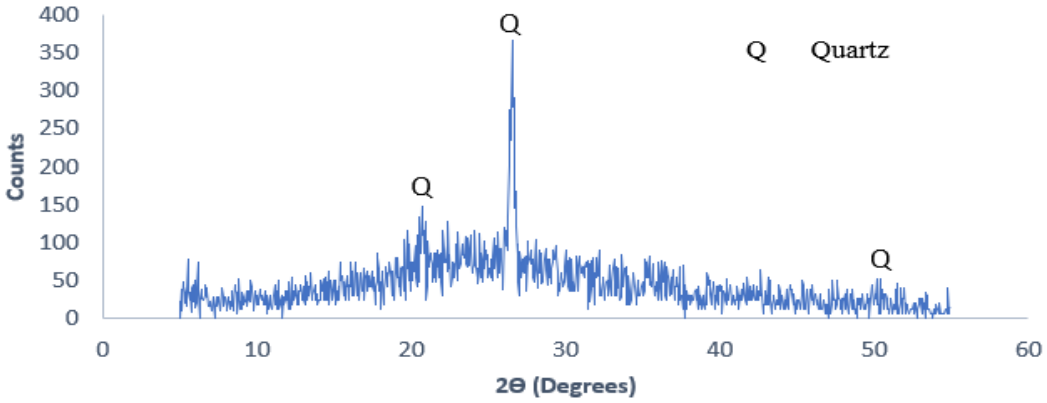


Şekil 3.10. Uçucu kül görüntüleri (soldan sağa doğru sırasıyla; ham ve taramalı elektron mikroskop (SEM) altındaki görüntüsü).

Çizelge 3.8. Uçucu kül kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	KK	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
Uçucu Kül (%)	2,61	60,07	21,35	7,41	0,99	1,82	0,22	0,99	2,91	0,94

KK: Kızdırma Kaybı



Şekil 3.11. Uçucu külün XRD analizi sonuçları

3.1.4. Alkali Aktivatörler

Çalışma kapsamında, yapılan kapsamlı literatür taraması ve ön çalışmalar sonucunda pul formda sodyum hidroksit (NaOH), sıvı formda sodyum silikat (Na_2SiO_3/$Na_2O_7Si_3$)

ve toz halde kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) aktivatör olarak tercih edilmiştir. Kullanılan farklı aktivatörlerin özellikleri aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

3.1.4.1. Kalsiyum Hidroksit ($Ca(OH)_2$)

Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), sönmemiş kirece su ilave edilmesiyle elde edilen kimyasal bileşiktir. Kristal beyaz renkli toz halde bulunur. Suda çözündüğünde hamurumsu görüntü veren bir alkalidir. Geleneksel adı söndürülmüş kireç veya hidratik kireçtir. Çalışmalarda kullanılan kalsiyum hidroksit Tekkim Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından 5 kg'lık kovalarda toz formda temin edilmiştir.



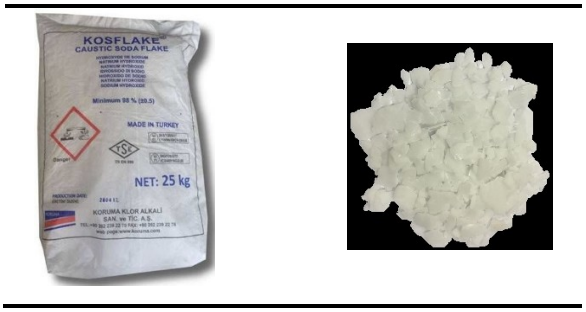
Şekil 3.12. Toz kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$)

Çizelge 3.9. Toz kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) özellikleri

Parametre	**Değer**
M	74,09 g/mol
Erime	550 °C
Safiyet (%)	min. 87
MgO (%)	maks. 1
Asitte çözünmeyen (%)	maks.1
Kızdırma kaybı (%)	maks. 3
Partikül boyutu (<90 (mm) (%)	min. 90

3.1.4.2. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit kimya ve birçok endüstride kullanılan temel bir bileşiktir. Sodyum hidroksit, diğer adıyla kostik, beyaz renkli nem çekici bir maddedir. Suda kolaylıkla çözülür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Herhangi bir kokusu yoktur. Sıvı veya katı halde bulunur. Katı olarak pul/payet/flakes boncuk/prills-pearls gibi şekillerde olur. Sıvı formda ise genelde sulu çözelti şeklinde bulunur. Kostik soda olarak da bilinen sodyum hidroksit, bir membran veya diyaframlı elektrolitik hücrede sodyum klorür suyunun elektrolizi ile üretilmektedir. En büyük kostik soda kullanıcıları kâğıt endüstrisi ve alkalin esaslı bir malzemeye ihtiyaç duyan üreticilerdir. Katı formları su ile tepkimeye girdiğinde yaklaşık 5 dakika içerisinde sıcaklık 100ºC'ye çıkar ve çözelti hacmine ve molarite değerine bağlı olarak belirli bir süre sıcaklığını korur. Bu çalışmada NaOH 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.



Şekil 3.13. Payet sodyum hidroksitin paketli ve açık haldeki görüntüleri

Çizelge 3.10. Payet sodyum hidroksitin analiz sonuçları

Analiz	Özellik	Birim	Sonuç
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

3.1.4.3. Sodyum Silikat (Na2SiO3)

Sodyum silikat, genel formülü $Na_2(SiO_2)nO$ ile gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. "Cam suyu" olarak da adlandırılan sodyum silikat çözeltileri, alkali silikat peletlerinin sıcak suda çözdürülmesiyle ya da silis kumu gibi reaktif bir silis kaynağının ilgili alkali hidroksit çözeltisinde hidrotermal olarak çözülmesiyle üretilebilmektedir. Saf bileşimler renksiz ya da beyaz renktedir ancak ticari örnekleri demir-ihtiva eden yabancı maddelerin varlığı nedeniyle, genellikle yeşilimsi veya mavidir. Sodyum silikat deterjan, sabun, seramik, tekstil, kereste, kâğıt ve otomotiv gibi sektörlerde hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Belirtilen kullanım alanları dışında jeopolimerik bağlayıcıların geliştirilmesi amacıyla alkali aktivatör olarak kullanımları da oldukça yaygındır. Jeopolimerik bağlayıcıların üretiminde farklı modül (SiO_2/Na_2O oranı) değerlerine sahip sodyum silikatlar kullanılabilmektedir. Sodyum silikat, alüminosilikat esaslı malzemelerin alkali aktive edilmesinde sodyum hidroksitten sonra en çok kullanılan ikinci maddedir. Çözülebilir silisin varlığı karışımın işlenebilirliğini, priz süresini ve mekanik özeliklerinin gelişimini etkilemektedir. Ayrıca, oluşan inorganik ürünün mikro yapısını ve kompozisyonunu değiştirmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan cam suyu (sıvı sodyum silikat) Emir Kimya firmasınca üretilen ticari ürün olup 5lt'lik bidonlarla temin edilmiştir. Kimyasal kompozisyonu üretici firma kataloğundan temin edilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Sıvı sodyum silikat.

Çizelge 3.11. Sıvı sodyum silikat kimyasal kompozisyonu

Parametre	Değer
SiO_2 (%)	23
Na_2O (%)	11
Modül (SiO_2/Na_2O)	1,9
Bome (20^oC, Be^1)	40
Yoğunluk (20^oC, gr/cm^3)	1,39
H_2O (%)	66

3.1.5. Geri Dönüşüm Agregası (GDA)

İnşaat ve yıkım atıklarının beton imalatında bir agrega olarak kullanılması, araştırmacıları uzun zamandır ilgilendiren konulardan biridir. İYA'nın agrega olarak etkin kullanımı, doğal agrega kullanımını azaltma, doğal agreganın işlenmesi için harcanan enerji kullanımını azaltma, oluşturulan madenlerle doğaya verilen tahribatı en aza indirgeme potansiyeline sahiptir. İYA geri dönüşümü, yapı malzemelerinin genel yaşam döngüsünü artırarak sürdürülebilir bina yapılarına yol açabilecek en önemli faktörlerden biridir.

İYA'nın agrega olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yeni olmamakla birlikte, geri dönüşüm tesisleri şu anda birçok ülkede İYA'yı yeniden işlemek için çalışmaktadır. İYA'yı bir agrega olarak işlevsel hale getirmek için gereken prosedür, atık betonun

elemanlarını küçük parçalara ayırmak ve farklı boyutlardaki agregaları eleklerden belirli boyutlara ayırmak gibi adımlar içerir. Geri dönüştürülmüş agregaların işlenmesinde, laboratuvar koşullarında üretilen beton da kullanılabilir ve bu betonların kullanılması, üretilecek yeni betonun özelliklerinin tanımlanmasında önemli bir rol oynar. Orijinal betonun yapısı ve bileşimi, geri dönüşüm agregalarının üretiminde elde edilen agreganın özelliklerinde önde gelen faktörlerden biridir.



Şekil 3.15. İnce Geri Dönüşüm Agregaları (Soldan sağa; 0,100-0,85mm; 0,85,2,00 mm; 2,00-4,75 mm)

Tez çalışmasının temeli, tamamen atık malzemeler kullanılarak jeopolimer bazlı harç karışımlarının tasarımı ve bu karışımları kullanarak mikro-mekanik malzeme tasarımı yoluyla şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ve çoklu mikro çatlak davranışı sergileyen EGC'nin geliştirilmesidir. Mikro-mekanik malzeme tasarımı ile, şekil değiştirme sertleştirme özelliğini ve çoklu mikro çatlak hasarı oluşturma kabiliyetini elde etmek için kompozit malzeme bileşenlerinden bağlayıcı, kum ve lif arasındaki arayüz özellikleri kontrol edilerek yeni tasarımlar yapılmaktadır. Arayüz özelliklerine ve tasarımlarına ek olarak, kompozit malzeme matrisini oluşturan bileşenlerin kendi özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Örneğin, ilk geliştirilen standart ECC karışımının malzeme tasarımında, maksimum tane büyüklüğü 200 mikron olan ince kuvars kumu kullanılmıştır. Ancak Şahmaran ve ark. (2009), ECC üretiminde çoklu mikro çatlak oluşturma ve şekil değiştirme sertleştirmesi özelliğinden ödün vermeden maksimum tane büyüklüğü 2,38 mm olan daha kaba kırılmış kum kullanılarak başarılı

karışımlar geliştirilmiştir. ECC üretiminde, tek tek lif takviyelerinin birbirine ortalama mesafesinden daha büyük agregalar kullanılırsa, lifler homojen dağılmaz ve topaklanma sorunları ortaya çıkabilir (De Koker ve Van Zijl, 2004). Ayrıca, agrega boyutu ve miktarı arttıkça matris kırılma tokluğu önemli ölçüde artar ve bu da yüksek süneklik ve çoklu mikro çatlak oluşmasına neden olur. İnce tanecik boyutlarına sahip agregaların seçimi, liflerin kompozit malzemelerde daha homojen bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olmasına rağmen, bu, daha büyük agregalara sahip sistemlere kıyasla yüksek miktarda bağlayıcı malzeme ve boyutsal kararsızlık gereksinimini beraberinde getirir. Bu nedenle, kompozit malzeme karışımlarında performanstan ödün vermeden mümkün olan en yüksek miktarda ve büyüklükte agregaların kullanılması arzu edilir.

Bilindiği gibi İYA agregaları, normal agregalara kıyasla daha zayıf mekanik özellikler sergiler. Bunun en önemli nedeni agrega üzerine yapışık halde bulunan çimento harcıdır. EGC üretiminde yüksek gözeneklilik ve su emme oranlarına sahip İYA agregalarının kullanılmasının, performans ve uygulama açısından zorlukları olsa bile sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkısı olacağı düşünülmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan ince geri dönüşüm agregalarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. İnce Geri Dönüşüm Agregasının Fiziksel Özellikleri

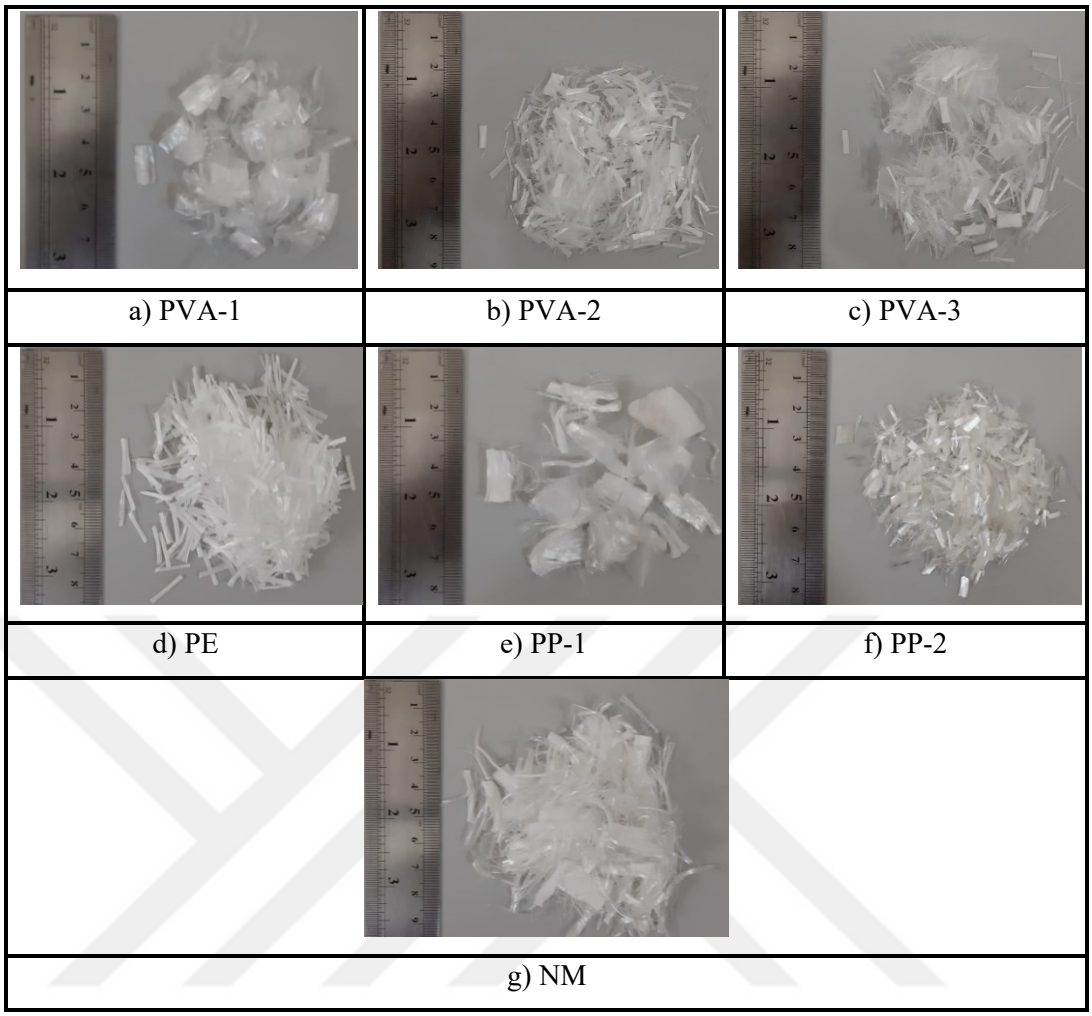
Fiziksel Özellikler	**Birim**	**Sonuçlar**
Agrega Boyutu	mm	< 2.00
Sıkışık Birim Ağırlık	kg/dm³	1.34
Gevşek Birim Ağırlık	kg/dm³	1.22
Kuru Özgül Ağırlık	kg/dm³	1.92
DKY Özgül Ağırlık	kg/dm³	2.11
Görünen Özgül Ağırlık	kg/dm³	2.41
Su Emme Kapasitesi	%	10.35
Gözeneklilik	%	20.59

Deneysel çalışmalarda %100 ince inşaat yıkıntı atığı agregaları kullanılmıştır. Çeşitli kentsel dönüşüm alanlarından mukavemeti ve yaşları bilinmeyen atık betonlar toplanarak laboratuvara getirilmiştir. İlk olarak, bir çekiç matkap yardımıyla küçük parçalara ayrılan atık beton, daha sonra çeneli kırıcıda ezilmiş ve istenilen boyuta getirilmiştir. Elde edilen farklı boyutlardaki agregalar, 2 mm'lik bir açıklığa sahip eleklerden elenmiş ve karışımda kullanım için uygun hale getirilmiştir.

3.1.6. Lifler

Her ne kadar jeopolimerler yüksek mekanik ve dayanıklılık özellikleri, yangına dayanıklılık ve düşük CO_2 emisyonu gibi üstün özelliklere sahip olsa da beton gibi kırılgan bir malzemedir. Yüksek süneklik performansı ve şekil değiştirme sertleştirmesi davranışı olan EGC'leri elde etmek için bu sorunun üstesinden gelmek gerekir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, çalışma kapsamında EGC üretiminde farklı özellikte lifler incelenmiştir.

ECC üretiminde lif olarak poli-vinil alkol (PVA) lifi kullanılmaktadır. Yüzeyinde %1,2 hidrofobik yağ ile kaplanan PVA, ECC'nin davranışında önemli bir rol oynar. ECC'deki mükemmel performansı nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Jeopolimer kompozitlerde denenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiş PVA lifi, ön çalışmalar sonucunda yoğun alkali ortamda iyi performans gösterememiş ve bu nedenle tez araştırması kapsamında farklı lifler araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda, hibrid olarak polietilen (PE), naylomono (NM) ve polipropilen (PP) liflerinin kullanılabileceği belirlenmiştir. ECC üretiminde olduğu gibi hacimce %2 lif kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan liflerin resimleri ve özellikleri sırasıyla Şekil 3.16'da ve Çizelge 3.13'te sunulmuştur.



Şekil 3.16. Çalışma kapsamında kullanılan farklı tip lifler

Çizelge 3.13. Kompozit üretiminde kullanılan farklı lif çeşitleri ve özellikleri

No	LİF	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık
1	PVA-1	12	0,12	1200	1,4
2	PVA-2	12	0,10	1000	1,3
3	PVA-3	8	0,04	1600	1,3
4	PE	12	0,38	2000	0,8
5	PP-1	18	0,08	896	0,91
6	PP-2	6	0,55	970	1,14
7	NM	18	0,05	966	1,14

3.2. Metodoloji

Bu bölümde, karışımların dizaynları, agrega sağlamlık testi, numunelerin dökümü ve kalıplara yerleştirilmesi, karışımların kıvam ve priz testleri, basınç ve eğilme testleri gibi malzemelerin toz halinden basınç dayanımı elde edilene kadar geçen süreçteki tüm yöntem detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2.1. Karışımların Hazırlanması

Karışımlarda kullanılan katı malzemeler 0.1 gr hassasiyete sahip tartıda tartılarak Hobart mikser kazanına boşaltılmıştır. Karışımda kullanılacak sodyum hidroksit, belirlenen molaritede olacak şekilde şehir şebeke suyu ile karıştırılıp 1 gün boyunca oda koşullarında bekletilerek soğuması sağlanmıştır. Sıvı çözelti halinde oda sıcaklığında bulunan sodyum silikat ise gereken karışımlarda kullanılmak üzere karışımdan hemen önce bulunduğu kaptan çıkarılarak tartılmıştır. Aynı şekilde gereken karışımlarda kullanılmak üzere kalsiyum hidroksit toz halde karışıma eklenmiştir.

3.2.2. Döküm ve Kalıplara Yerleştirme

Çalışma kapsamında üretilen numuneler, Hobart mikser ile karıştırılarak hazırlanılmıştır. Karıştırma işlemleri ilk olarak katı partiküller homojen olarak karışacak şekilde 1 dakika boyunca yapılmıştır. Ardından, soğuması için 1 gün boyunca oda koşullarında bekletilen sodyum hidroksit solüsyonu karışımlara ilave edilmiştir. Sodyum hidroksit ilavesiyle birlikte mikser 1 dakika boyunca düşük devirde karıştırılmış, ardından sodyum silikat içeren karışımlarda sodyum silikat ilavesi yapılmıştır. Alkali aktivatör ilavesi işlemlerinin bitmesiyle karışım yüksek devirde 2 dakika boyunca karıştırılarak karışım işlemi sonlandırılmıştır. Karışımın ardından elde edilen malzeme, hamur ve harç numuneleri için 50x50x50 mm boyutlarında küp kalıplara, kupon numuneler için 80x240x15 boyutlarındaki kalıplara ve silindir numuneler için ise daha sonra 50 mm yüksekliğinde ve 100 mm çapta kesilmek üzere

150 mm yüksekliğinde ve 100 mm çapta kalıplara yerleştirilmiştir. Döküm iki aşamada gerçekleştirilmiş, her bir aşamada dökülen malzemeye 25 şiş darbesi yapılmış ve ardından sarsma tablasında 1 dakika boyunca yerleşmesi için vibrasyon uygulaması yapılmıştır. Kalıplara döküm işleminin bitmesiyle numuneler, öncesinde belirlenen kür koşullarına bırakılmak üzere hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.17. Çalışma kapsamında kullanılan kalıplar

3.2.3. Kür Koşulları

Çalışma kapsamında üretilen numunelere fırın kürü, nem kürü, su kürü gibi çeşitli kür uygulamaları yapılmıştır. Fırın kürü için, 200 °C sıcaklıklara çıkabilen dört adet fırın kullanılmıştır. Nem kürü için numuneler, düzenli olarak su takviyesi yapılarak ıslak bir beze sarılmış ve nem kaybını önlemek için her tarafı poşet ile kapatılmıştır. Su kürü için ise numuneler, su dolu havuzlara bırakılmış, havuzda bulunan su belirli aralıklarda değiştirilerek temizlenmiştir. Kuru ortam küründe ise numuneler, laboratuvarda ısı ve nem değişimi olmayacak şekilde 25°C oda koşullarında geniş bir alanda kürlemeye bırakılmıştır.



Şekil 3.18. Çalışma kapsamında üretilen numuneler

3.2.4. Kıvam ve Priz Testleri

Kıvam, üretilen malzemelerinin akışkanlığının ölçüsüdür. Artan su miktarı, akışkanlığı artırmakta, bu da karışımın işlenebilirliğine olumlu etki etmektedir. Ancak aşırı miktarda artan su içeriği, nihai ürünün mekanik özelliklerinde düşüşlere neden olmaktadır.

Bağlayıcı malzeme ile alkali aktivatörün birleşiminin ardından üretilen hamur numuneleri plastik (şekil verilebilir) haldedir. Bu birleşimin ardından jeopolimer reaksiyonların başlaması ile hamur numunesi plastik özelliğini zamanla kaybetmekte ve sertleşmektedir. Bağlayıcı malzemenin alkali aktivatör ile birleşip, reaksiyonların ardından katılaşıp plastik özelliğini kaybetmesi boyunca geçen süreye priz alma süresi denilmektedir. Priz alma süresi, priz başlama süresi ve priz sona erme süresi olarak ayrı ayrı ifade edilmektedir. Priz başlama süresi, bağlayıcı malzeme ile alkali aktivatörün birleştiği andan, hamur numunesinin katılaşmaya başladığı an arasında geçen süredir. Priz sona erme süresi ise, bağlayıcı malzeme ile alkali aktivatörün birleştiği andan, hamur numunesinin katılaştığı an arasında geçen süredir.

Çalışma kapsamında, karışımların kıvam ve priz sürelerini etkileyen en önemli unsur, karışımlarda sodyum silikat kullanımı ile ilgili olmuştur. Kıvam ve dayanımın ilişki açısından en uygun olarak seçilen 0,35 su/bağlayıcı oranı, tüm çalışmalarda sabit olarak kullanılmıştır. Ancak karışımlara sodyum silikat eklendiğinde, karışımların kıvamı olumlu etkilenmesine rağmen, priz sürelerinde önemli düşüşler görülmüştür. Sodyum silikatın aşırı reaktif silis içeriğinden dolayı hızlı tepkimeler sonucu, eklenildiği karışımların priz sürelerini bir hayli düşürdüğü diğer birtakım çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Goberis ve Antonovich, 2004). Bu sebeplerden dolayı, hamur karışımlarının kıvam ve priz sürelerini tayin etmek için 2 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlardan ilkinde sodyum silikat kullanılırken, ikinci karışımda sodyum silikat kullanılmamıştır. Sodyum silikat kullanılan karışımda, sodyum silikat içeriğinden gelen bir miktar su olduğundan, karışım suyu, karışımın genel su /bağlayıcı oranı 0,35 olacak şekilde hazırlanmıştır.

3.2.4.1. Vicat kıvam tayini deneyi

Jeopolimerin hamurun kıvamı, vicat aletinin sondasının serbest bırakıldığı andan itibaren, 30 saniye içinde jeopolimer hamuru içinden, cam levhaya 5-7 mm uzaklık kalıncaya kadar batmasını sağlayan kıvamdır. Toz bağlayıcı numunesi 1 gram hassasiyetli terazide tartılarak 500 gram alındı. Karışımlarda s/b olarak 0,35 kullanıldığı için 175 gr karışım suyu hazırlandı ve çözeltiler bu su ile hazırlandı. Sodyum silikat içeren karışımda sodyum silikattan gelen su karışım suyundan çıkarıldı.

Vicat halkası ve taban camı kalıp yağı ile hafifçe yağlandı. Sonda, cam levha üzerine indirildi ve göstergesi sıfıra ayarlanarak kalibrasyonu yapıldı. Deney aletinin ayarı ve son kontrolü yapıldı. Karıştırma kabına 500 gram toz bağlayıcı katıldı ve bunu takiben hazırlanan 175 gram karışım suyu çözeltisi toz bağlayıcı içerisine 5-10 saniye arasında boşaltıldı. Boşaltma işleminin bitim süresi kaydedildi. Karıştırma mikseri düşük hızda 90 saniye süre ile çalıştırıldı. Bu süre sonunda numune 15 saniye dinlendirildi. Dinlenme esnasında karıştırma kabının iç yüzeyine yapışan jeopolimer hamurları spatula ile toplandı. Dinlendirme sonrasında karıştırma mikseri düşük hızda tekrar 90

saniye karıştırıldı ve harç hazırlanmış oldu. Jeopolimer hamur daha önce hazırlanan cam levha üzerindeki vicat halkasına 30-40 saniye de dolduruldu. Doldurma esnasında jeopolimer hamurun fazla sıkıştırılmamasına ve sarsılmamasına dikkat edildi. Jeopolimer hamur ile doldurulan halka spatula ile tesviye edildi. Sonda, teğet olacak şekilde jeopolimer hamurunun üst yüzeyine yaklaştırıldı. Sonda serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile jeopolimer hamurunun içine inmesi beklendi. Sondanın 30 saniye içindeki batma deriliği okundu ve kaydedildi. Her iki karışım için sonuçlar çizelgede verildi. Karışımların içeriği Çizelge 3.14'te, kıvam sonuçları Çizelge 3.15'te sunulmuştur.

Çizelge 3.14. Kıvam ve priz tayini ölçmek için üretilen hamur karışımının içeriği

Kod	DT	HT	ÇK	CA	BA	Cüruf	UK	$Ca(OH)_2$	Na_2SiO_3	NaOH	Su
CS- 1	75	100	125	50	50	75	25	25	111,87	56	101,06
CS- 2	75	100	125	50	50	75	25	25	0	84	175

Not: Kullanılan tüm malzemelerin birimi gram olarak verilmiştir.

Çizelge 3.15. Kıvam deneyi sonuçları

	CS-1	**CS-2**
Cam levhaya uzaklık (mm)	0	7

Çizelge 3.15'te verilen kıvam deneyi sonuçlarına göre CS-1 kodlu sodyum silikat içeren karışımın oldukça akışkan olduğu gözlemlenmiştir. Bu şekilde tasarlanmasının nedeni, sodyum silikat içeren karışımların çok hızlı priz alması ve yerleştirme ve bitirme işlemleri sona ermeden donması sonucu üretim zorluklarının çıkması nedeniyle, akışkan bir karışım hazırlanarak bu problem ortadan kaldırılmıştır. CS-2 kodlu karışımın kıvam deneyi sonucu ise geleneksel Portland çimentolu sistemin kıvam sonucuna oldukça benzer çıkmış ve herhangi bir erken priz olmadığı için

karışımın kıvamı CS-1 kodlu karışıma göre daha az akışkan olacak şekilde tasarlanmıştır.

3.2.4.2. Priz başlangıcı ve sonu deneyi

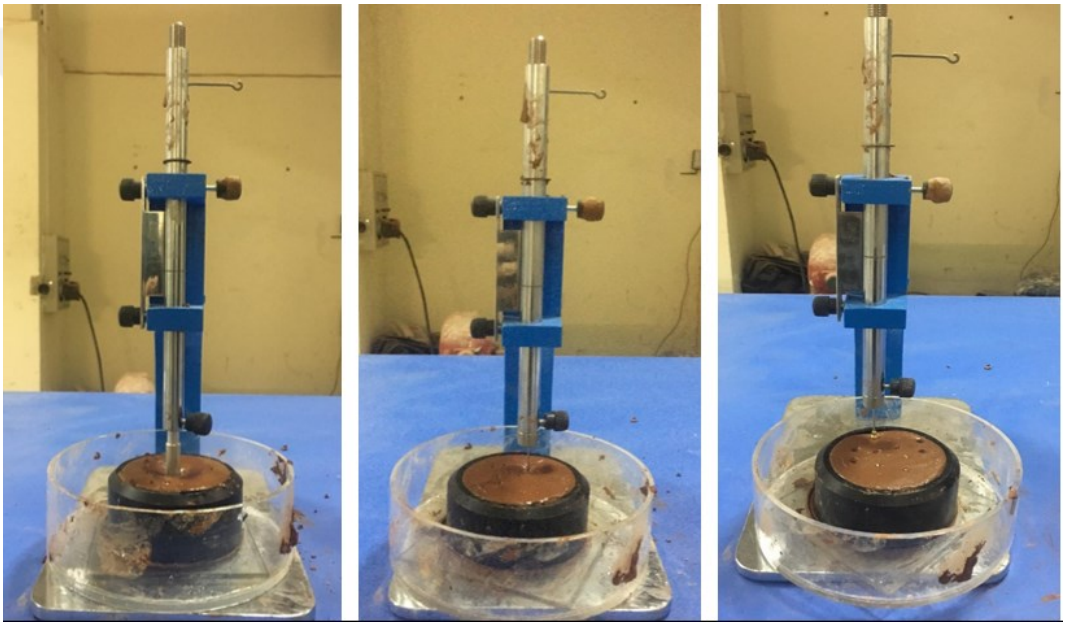
Toz bağlayıcı numunesi 1 gram hassasiyetli terazide tartılarak 500 gram alındı. Karışımlarda s/b olarak 0,35 kullanıldığı için 175 gr karışım suyu hazırlandı ve çözeltiler bu su ile hazırlandı. Sodyum silikat içeren karışımda sodyum silikattan gelen su karışım suyundan çıkarıldı.

Vicat aletine iğne takıldı. Vicat halkası ve taban camı kalıp yağı ile hafifçe yağlandı. İğne, cam levha üzerine indirildi ve göstergesi sıfıra ayarlanarak kalibrasyonu yapıldı. Deney aletinin ayarı ve son kontrolü yapıldıktan sonra karıştırma kabına 500 gram toz bağlayıcı katıldı ve bunu takiben hazırlanan karışım suyu toz bağlayıcı içerisine 5-10 saniye arasında boşaltıldı. Boşaltma işleminin bitim süresi kaydedildi. Karıştırma mikseri düşük hızda 90 saniye süre ile çalıştırıldı. Bu süre sonunda numune 15 saniye dinlendirildi. Dinlenme esnasında karıştırma kabının iç yüzeyine yapışan jeopolimer hamurları spatula ile toplandı. Dinlendirme sonrasında karıştırma mikseri düşük hızda tekrar 90 saniye karıştırıldı ve harç hazırlanmış oldu. Jeopolimer hamur daha önce hazırlanan cam levha üzerindeki vicat halkasına 30-40 saniye de doldurudu. Doldurma esnasında çimentonun fazla sıkıştırılmamasına ve sarsılmamasına dikkat edildi. Jeopolimer hamur ile doldurulan halka spatula ile tesviye edildi. İğne, teğet olacak şekilde jeopolimer hamurunun üst yüzeyine yaklaştırıldı. İğne serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile jeopolimer hamurunun içine inmesi beklendi. İğnenin pastaya batması tamamlandıktan sonra okumalar yapıldı. İğnenin ucu ile cam levha arasındaki mesafeyi veren bu değer, sıfır anından itibaren geçen süre ile birlikte kaydedildi. İğnenin aynı numuneye batırılma işlemi, iğnenin pastaya batırıldığı noktalar arasındaki veya kalıp kenarından en az 10 mm mesafe olacak şekilde ve 1 dakikalık uygun zaman aralıklarıyla tekrarlandı. İğne her seferinde hamurun değişik alanlarına batırıldı. Her batırılma işleminden sonra vicat iğnesi temizlendi. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban plakası arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen priz başlangıç süresi olarak tayin edildi. Sıfır olarak

kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğnenin ilk 0,05 mm kadar battığı zaman priz sonu süresi olarak tayin edildi.

Çizelge 3.16. Priz başlangıç ve bitiş süresi sonuçları

Kod	Priz başlangıcı	Priz sonu
CS - 1	7 dk	15 dk
CS - 2	15 dk	75 dk



Şekil 3.19. Vicat aleti ölçümleri

3.2.5. Agrega Sağlamlık Testi

Sağlamlık testi, bir agreganın ayrışma ve özellikle donma-çözülme döngüleri yoluyla parçalanmaya karşı direncini belirler. Dayanıklı (hava koşullarına dayanıklı) agregaların sahada bozulma olasılığı daha düşüktür.

Sağlamlık testi tekrar tekrar agrega örneğini sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltisine daldırır. Bu işlem, agreganın su geçirgen gözeneklerinde tuz kristallerinin oluşmasına neden olur. Bu kristallerin oluşumu, agrega gözenekleri üzerine baskı uygulayan ve agregayı kırma eğilimi gösteren iç kuvvetler oluşturur. Belirli bir batırma ve kurutma tekrarından sonra, malzeme kaybının yüzdesini belirlemek için agrega elenir.

Çalışma kapsamında, ASTM-C88 standartlarına göre Na_2SO_4 çözeltisinde ince agregalar için %19 oranında ağırlık kaybı sınır olarak belirtilmiştir. Bu bağlamda çalışmalarda kullanılan geri dönüşüm agregalarına ASTM-C88 standartlarında belirtilen yöntemlerce sağlamlık testi yapılmıştır. Yapılan test sonuçları Çizelge 3.17'de sunulmuştur.

Çizelge 3.17. Agrega sağlamlık testi sonuçları

	Agrega Boyutu (mm)	**Başlangıç Ağırlığı (gr)**	**Son Ağırlığı (gr)**	**Ağırlık Kaybı (%)**	**Ağırlık Kaybı Ortalama (%)**	**ASTM-C88 e göre Ağırlık Kaybı Sınırı (%)**
İnce Geri	0.10-0.85	100	84.7	15.30		
Dönüşüm	0-85-2.00	100	86	14.00	13.4	19%
Agregası	2.00-4.75	100	89.1	10.90		

Çizelge 3.17'de sunulan sonuçlara göre, proje kapsamında kullanılan ince geri dönüşüm agregaları, uygulanan sağlamlık testi sonucunda ortalama %13,4 ağırlık kaybı yaşamıştır. Böylelikle ASTM-C88 standartlarına göre maksimum %19 olarak kabul edilen ağırlık kaybı değerine göre kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3.2.6. Lif Deneyleri

Çalışma kapsamında PVA lif kullanılarak üretilen kompozitlerin beklenenin aksine gevrek davranış göstermesi, farklı tipte liflerin kullanılması gerekliliğini doğurmuş ve bu bağlamda ilk etapta farklı tip liflerin alkali aktivatör solüsyonuna mazur kaldığında nasıl davrandığı ve kür koşullarının lif yapısını nasıl etkilediğinin tespit edilebilmesi için birtakım testler gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda optimum aktivatör solüsyonun tespiti adına gerçekleştirilen çalışmalarda genel olarak %8-%12 arasında değişen sodyum konsantrasyonlarına sahip aktivatörler kullanmış ve liflerin alkali aktivatöre direncinin tespit edilmesi adına en düşük konsantrasyon olan %8 (0,35 su/bağlayıcı oranı için 10M) sodyum konsantrasyonunda solüsyonlar hazırlanmış, farklı tip lifler (farklı özelliklere sahip PVA lifler, polietilen lif (PE), nylomono lif ve farklı özelliklere sahip polipropilen lifler hazırlanan solüsyonlar içinde 72 saat bekletilmiştir. 72 saat sonunda jeopolimer üretiminde optimum kür sıcaklıklarından biri olarak kabul edilen 105 °C sıcaklıkta ilk etapta 2 saat ardından 24 saat bekletilerek liflerin sıcaklığa karşı tepkisi incelenmiştir. Liflerin alkali aktivatör solüsyonu ve farklı sürelerde sıcaklık kürüne karşı gösterdikleri tepkiye dair görseller Şekil 3.20'de belirtilmiştir. İncelemenin ilk etabında 72 saat alkali aktivatör solüsyonunda bekletilen lifler görsel olarak incelenmiş ve PVA-2 ve PVA-3 liflerinde renk değişimleri gözlemlenmiştir. Normal şartlarda beyaz renkte olan ve parlak bir yapıya sahip olan PVA liflerin sodyum solüsyonunda bekletildikten sonra renk değişimine uğradığı ve yüzey özelliklerinin görsel olarak değiştiği saptanmıştır. PE ve PP-2 liflerinde de renk değişimi gözlemlenmiş fakat bu değişim PVA liflerinde görülen seviyelerde değildir. NM, PP-1 ve PVA-1 liflerinde ise görsel olarak herhangi bir değişime rastlanmamıştır (Şekil 3.20). Sıcaklık uygulamasının ardından PVA-2 ve PVA-3 liflerinin şiddetli seviyede değişime uğradığı, dahası liflerin yanarak tamamen fiziksel stabilitesini kaybettiği ve toz haline geldiği saptanmıştır. PE lifinde de sıcaklık kürünün süresi arttıkça 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.



a) 3 gün alkali aktivatörde bekletilmiş lifler

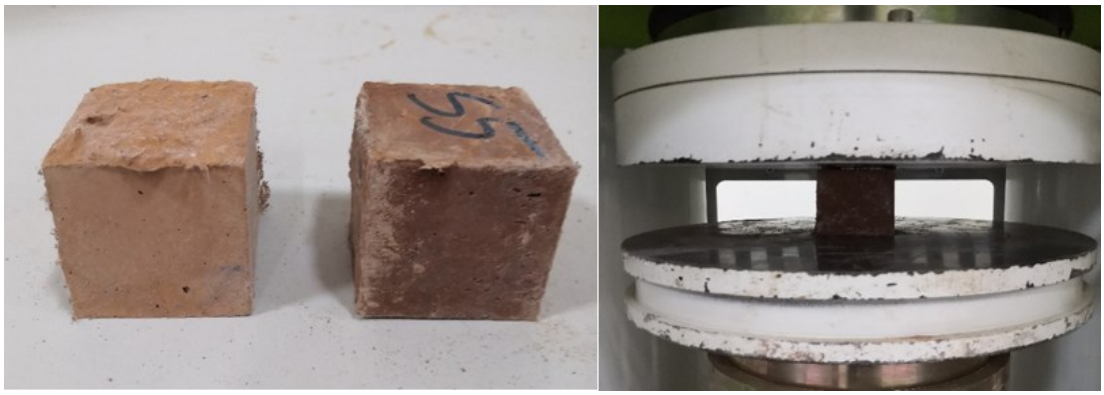
b) 2 saat 105 °C sıcaklıkta bekletilmiş

c) 24 saat 105 °C sıcaklıkta bekletilmiş

Şekil 3.20. Alkali aktivatör solüsyonunda bekletilmiş ve ısıl küre maruz bırakılmış liflerin davranışı

3.2.7. Basınç ve Eğilme Testleri

Basınç ve eğilme dayanımı testleri, standartta belirtilen parametreler baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Test süresi boyunca yükleme hızı sabit 0.9 kN / s olarak uygulanmıştır. Şekil değiştirme sertleştirmesi davranışı sergileyen malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için tek eksenli çekme testi en uygun yöntem olmasına rağmen, laboratuvar tesislerinin sınırları dahilindeki EGC numunelerine dört noktalı bir eğilme testi uygulanmıştır. Stang ve Li (2004), dört noktalı eğilme testinin tek eksenli testler yerine şantiyelerde uygulanabileceğini belirtmiştir. Sonuç olarak, EGC numunelerinin şekil değiştirme sertleştirmesi davranışını belirlemek için deneysel çalışmalarda 240x80x15 mm büyüklüğünde kupon örnekleri kullanılmıştır. Numuneler, BESMAK markalı deformasyon kontrollü elektro-mekanik test cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca deneyler sırasında deformasyonları tam olarak ölçmek için bir deflektometre kullanıldı. Literatürdeki önceki çalışmalarda olduğu gibi yükleme hızı 0.005 mm / s olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.21. Çalışma kapsamında üretilen küp numuneler ve basınç dayanım testleri



Şekil 3.22. Çalışma kapsamında üretilen silindir numuneler ve yarmada çekme dayanımı testleri



Şekil 3.23. Çalışma kapsamında üretilen kupon numuneler ve eğilme dayanımı testleri

3.2.8. Mikro-mekanik Analizler

Çalışma kapsamında üretilen numunelere SEM (taramalı elektron mikroskopu) ve XRD (X-Işını Difraktometresi) analizleri yapılmıştır. SEM, numunelerden geçen elektron ışını taranması sonucu numune ve elektron ışını arasındaki etkileşimden gelen sinyalleri ölçer. Kırık yüzey analizi ile yüzey görünümü, parçacık boyutu, parçacık şekli gibi parametrelerin faz dağılımını ve kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılır. X-Işını analizi elemental haritalama ve noktasal kimyasal analizi sağlar. SEM analizi, yapı malzemelerini araştırmak için yüksek performanslı bir yöntemdir. SEM analizi, numunelerin kolay hazırlanması, erişilebilir bilgi çeşitliliği, yüksek alan derinliği hakkında iyi çözünürlük ve sürekli genişleme ile karakterize edilir. XRD yöntemi, numunelerin kristal yapısını, kantitatif ve kalitatif faz analizini belirlemek, faz dönüşümünü araştırmak, kristalografik konfigürasyonu incelemek ve kristallerin boyutunu incelemek için kullanılabilir.

4. SONUÇ VE BULGULAR

Çalışma boyunca, İYA bazlı hamur, harç ve kupon numuneleri için kompozit karışımlarının geliştirilmesi kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuç ve bulgular bu bölümde detaylı olarak incelenmiştir. İlk olarak atık malzemelerin çeşitli alkali aktivatörler kullanılarak jeopolimerizasyon mekanizması sonucu bağlayıcı özellik kazanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda inşaat ve yıkıntı atığından elde edilen atık malzemeler, tekli olarak aktive edilmiş ve fırın kürüne tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre atık malzemelerin jeopolimerizasyon mekanizması kapsamındaki performansları belirlenmiş, daha sonra birbirleri ile kombine edilerek nihai olarak jeopolimer hamurların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşılmıştır. İstenilen mekanik özelliklere sahip bu karışımlara, yine inşaat ve yıkıntı atığı bazlı beton atıklarının kırılmasıyla elde edilen ince geri dönüşüm agregalarının eklenmesiyle harç karışımları tasarlanmıştır. Geri dönüşüm agregaları üzerine gerçekleştirilen kapsamlı literatür araştırması da dikkate alınarak gerçekleştirilen çalışmalarda İYA agregasının özgül ağırlık, su emme kapasitesi, porozite gibi karakteristikleri belirlenmiş olup literatürde daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen verilerle örtüştürülerek İYA geri dönüşüm agregasının jeopolimerik harç karışımlarında kullanımının önünde herhangi bir engel olmadığı belirlenmiştir. Söz konusu geri dönüşüm agregalarının normal agregaya göre boşluklu yapısı her ne kadar su emme kapasitesini arttırsa da karışım esnasında solüsyonun karışıma belirli aşamalarla eklenmesi, karışım hızının arttırılması ve karışım süresinin uzatılması gibi yöntemlerle harç üretiminin gerçekleştirilebileceği gözlemlenmiştir. Karışım içeriklerinin, alkali aktivatör tipi ve molaritelerinin ve kür uygulamalarının çeşitli şekillerde optimize edilmesiyle, nihai olarak üretilecek şekil değiştirme sertleşmesi özelliğine ve çoklu mikro çatlak oluşturmaya elverişli kompozit üretimine uygun tasarımlar yapılmıştır. Geliştirilen jeopolimer harç karışımlarına çeşitli özelliklere sahip birtakım liflerin tekli veya kombine şekilde eklenmesiyle kupon numuneler üretilmiş ve tez kapsamının ana hedefi olan EGC karışımları geliştirilmiştir.

4.1. Jeopolimer Hamur Karışımlarının Geliştirilmesi

Tez kapsamında yapılan çalışmalar, İYA'nın çok yüksek bir miktarını ve kullanılmayan kısmını oluşturan beton, duvar elemanları, çatı elemanları ve cam tozunun tamamen geri dönüşümünü oluşturmaktadır. Bu amaca ulaşmak için ilk adım, geleneksel Portland çimentosuna benzer bir bağlayıcı görevi gören bir jeopolimer hamur fazının geliştirilmesidir. Literatürde en yaygın olarak alkali aktivatörü olarak kullanılan sodyum hidroksit, jeopolimer hamurları üretmek için kullanılmıştır. Farklı sodyum (Na) konsantrasyonlarına sahip sodyum hidroksit çözeltileri, yüksek mukavemet elde etmek için çeşitli şekilde denenmiştir. Dolayısıyla, İYA bazlı jeopolimer hamurlar için optimum Na konsantrasyonunun belirlenmesi planlanmaktadır. NaOH solüsyonları hesaplanırken, karışımdaki bağlayıcı için gereken Na miktarı yüzdeler halinde bulunur, daha sonra belirlenen Na miktarı için gerekli NaOH miktarı hesaplanır ve sonuç olarak çözelti hazırlanır. Ön çalışmalar kapsamında numunelere farklı Na konsantrasyonlarının yanı sıra farklı ısıl kür koşulları uygulanmıştır. Yüksek kürlenme sıcaklıklarının jeopolimerler üzerinde çok olumlu etkilere sahip olduğu ve literatürde bu teoriyi desteklemek için çok sayıda araştırma yapıldığı iyi bilinen bir gerçektir. Tez kapsamında bağlayıcı olarak kullanılan İYA esaslı öncül malzeme olarak belirtilen tuğla/kiremit, beton ve cam atıklarının basınç dayanımlarının sonuçları aşağıda verilmiştir. Ön çalışmalar sırasında jeopolimer hamurlar için optimum koşulları belirlemek üzere farklı parametreler uygulanmıştır. Bu bağlamda atık malzemelere kıvam konusunda optimum değere ulaşan 0,33 su/bağlayıcı oranı ile, ısıl kür süresi olarak en iyi performansı sağlayan 72 saatlik ısıl kürlenme uygulanmasına karar vermilmiştir. Delikli tuğla esaslı jeopolimer hamurların basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Delikli tuğla bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları

Bağlayıcı	S/B	Kür Süresi (saat)	Molarite	Na%	Kür Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)
Delikli Tuğla	0,33	72	10	8	105	42,5
					115	43,9
					125	41,9
			15	12	105	57,6
					115	60,7
					125	52,8
			19	15	105	52,5
					115	53,1
					125	46,5

S/B: Su/Bağlayıcı, %Na: Sodyum konsantrasyonu

Delikli tuğla bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanımlarına bakıldığında, en yüksek değerin 15 mol NaOH ile aktive edilen ve 115 °C de kürlenen numenelerden 60,7 MPa'lık bir sonuç ile elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, delikli tuğla bazlı jeopolimer hamurların, uygulanan tüm sıcaklık ve sodyum hidroksit molaritelerinde 40 MPa basınç dayanımın üzerinde seyretmesi de önemli bir sonuç olmuştur. Bu durum, delikli tuğla gibi inşaat ve yıkıntı atığı bazlı bir malzemenin, kısa süreli ısıl kürleme sürecinde dahi yapısal sayılabilecek bir mukavemet değeri gösterebileceğini kanıtlamıştır. Çizelge 4.1'de verilen basınç dayanım sonuçlarına göre, 10 mol NaOH kullanılarak üretilen karışımlar en düşük dayanımları vermiştir. Alkali konsantrasyonları 15 mol ve 19 mol'e yükseltildiğinde ise basınç dayanımlarında artış 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 ark., 2012). Öte yandan, 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 bir şekilde oluşan reaksiyon ürünleri matriste düzensiz homojen olmayan bir yapıya neden olmakta ve bu durum da nihai ürünün performansına zarar vermektedir (Alonso ve Palomo, 2001).

Bir diğer inşaat ve yıkıntı atığı esaslı atık malzeme olan çatı kiremitinin, çeşitli sodyum hidroksit molaritesi ve kür sıcaklığı denemelerinin ardından basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Çatı kiremiti bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları

Bağlayıcı	**S/B**	**Kür Süresi (saat)**	**Molarite**	**Na%**	**Kür Sıcaklığı (°C)**	**Basınç Dayanımı (MPa)**
Çatı Kiremiti	0,33	72	10	8	105	42,4
					115	40,9
					125	39,5
			15	12	105	64,7
					115	68,1
					125	65,9
			19	15	105	46,6
					115	55,6
					125	53,9

S/B: Su/Bağlayıcı, %Na: Sodyum konsantrasyonu

Çizelge 4.2'de sunulan basınç dayanımları sonuçlarına göre çatı kiremiti bazlı jeopolimer hamur numuneler içerisinde en yüksek basınç dayanımı sonucu 68,1 MPa ile 115 °C de kürlenen 15 mol NaOH içeren numuneler olmuştur. Bu parametrelerin

delikli tuğla sonuçları ile benzer olması, jeopolimer hamur üretiminde sıcaklık ve alkali konsantrasyonu bakımından bir takım optimum değerlerin var olduğunu, bu değerlerin altında veya üstünde kalındığında elde edilen ürünün performansının negatif etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Alkali aktivatör konsantrasyonun basınç dayanımlarına etkisinin yanı sıra, numunelere uygulanan kür sıcaklıklarının da nihai ürünün basınç dayanımları üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4.2'deki sonuçlara bakıldığında, sıcaklık artışının genel olarak numunelerin basınç dayanımlarını artırdığı gözlemlenmektedir. Kür sıcaklıklarındaki artış polimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak, jeopolimer hamurun kısa sürede yüksek basınç dayanımlarına ulaşmasını sağlamaktadır. Ancak belli bir noktadan sonra uygulanan yüksek sıcaklıklar, numunelerde ani nem kaybına yol açarak yüksek boşluk oranına sahip homojen olmayan bir matrise neden olmakta, bu da basınç dayanımlarının düşmesine yol açmaktadır. Ayrıca aşırı yüksek sıcaklık, numunelerde hacim kaybından kaynaklı rötreye neden olmakta, bu da numunelerde rötre çatlakları oluşturarak nihai ürünlerin düşük performanslara sahip olmasına yol açmaktadır.

Bir diğer inşaat ve yıkıntı atığı bazlı harman tuğlasının sodyum hidroksit ile aktive edilip 72 saat çeşitli kür sıcaklıklarında kür edilmesiyle elde edilen numunelerin basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Harman tuğlası bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları

Bağlayıcı	S/B	Kür Süresi (saat)	Molarite	Na%	Kür Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)
Harman Tuğlası	0,33	72	10	8	105	42,3
					115	38,4
					125	37,5
			15	12	105	48,7
					115	50,3
					125	49,6
			19	15	105	54,2
					115	54,4
					125	55,1

S/B: Su/Bağlayıcı, %Na: Sodyum konsantrasyonu

Çizelge 4.3'te sunulan basınç dayanımları sonuçlarına göre harman tuğlası bazlı jeopolimer hamur numuneleri içerisinde 19 mol NaOH solüsyonu içeren ve 125 °C de kürlenen numunelerin basınç dayanımı, 55,1 MPa değeri ile en yüksek sonuca ulaşmıştır. Ayrıca sonuçlara göre harman tuğlasının, diğer çatı ve duvar elemanlarına göre daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu duruma sebep olan ana etmenler, malzemelerin benzer kırma ve öğütme işlemlerinden geçmesinin ardından farklı tanecik şekil ve boyutuna sahip olması, farklı kristalografik yapıya sahip olması ve kimyasal kompozisyon bakımından özellikle SiO_2 ve Al_2O_3 oranları bakımından farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bağlamda bu özellikler bakımından diğerlerine kıyasla daha zayıf özellikler sahip harman tuğlasının jeopolimerizasyon sonucu gösterdiği düşük sonuçlar bu durumu kanıtlar niteliktedir. Bununla birlikte, İYA esaslı tuğla elemanlarının NaOH molaritesi ve kür sıcaklığından bağımsız olarak en az 40 MPa basınç dayanımına ulaşabileceği önemli bir sonuçtur. Bu çıkarım tuğla atıklarının jeopolimerizasyon için ne kadar uygun olduğunu kanıtlamaktadır.

İnşaat ve yıkıntı atığının büyük bir bölümünü oluşturan atık betonun jeopolimerizasyon sonucu elde edilen basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Beton atığı bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları

Bağlayıcı	S/B	Kür Süresi (saat)	Molarite	Na%	Kür Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)
Beton Atığı	0,33	72	10	8	105	14,1
					115	15,7
					125	14,7
			15	12	105	15,9
					115	24,0
					125	28,0
			19	15	105	19,1
					115	26,8
					125	29,2

S/B: Su/Bağlayıcı, %Na: Sodyum konsantrasyonu

Çizelge 4.4'te sunulan basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında en yüksek basınç dayanımı 29,2 MPa ile 19 mol NaOH içeren ve 125 °C de kürlenen beton atığı içeren numunelerde gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre beton atığının, tuğla atıklarına göre oldukça düşük basınç dayanımı performansı sergilendiği gözlemlenmiştir. Bu durumun en önemli nedeninin SiO_2 / Al_2O_3 oranlarından ve toplam SiO_2 ve Al_2O_3 miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek sıcaklıkta ısıl kürleme kapsamında kalsiyum ikamesinin, SiO_2 ve Al_2O_3 ikamesine göre oldukça negatif bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Alüminosilikat yapısı, jeopolimerizasyonu ve nihai ürünü etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu bağlamda bu yapının, beton atığı

jeopolimerizasyonu sonucu düzgün ve dengeli oluşması için ileride sodyum hidroksit yerine ek olarak farklı alkali aktivötlerin kullanılması gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılacak bir diğer inşaat ve yıkıntı atığı bazlı malzeme cam atığıdır. Yüksek SiO_2 içeriğine sahip olmasıyla önemli bir kaynak olabilecek cam atığının jeopolimerizasyon sonucu basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Cam atığı bazlı jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları

Bağlayıcı	S/B	Kür Süresi (saat)	Molarite	Na%	Kür Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)
Cam Atığı	0,33	72	10	8	105	28,5
					115	20,7
					125	15
			15	12	105	28
					115	24,7
					125	18,1
			19	15	105	24,7
					115	25,2
					125	21,0

S/B: Su/Bağlayıcı, %Na: Sodyum konsantrasyonu

Çizelge 4.5'te sunulan sonuçlara göre, cam atığı, diğer atık malzemelere göre oldukça düşük mekanik performans sergilemiş, bu kapsamda en yüksek 28,5 MPa'lık bir basınç dayanım sonucuna sahip olmuştur. Bu durum, yukarıda beton atığının jeopolimerizasyonunda bahsedildiği üzere, cam atığında da dengesiz bir şekilde SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği bulunması ile ilişkilidir. Ayrıca cam atığının diğer atık malzemeler kıyasla oldukça kaba parçacık dağılımına sahip olması, bu durumun en önemli nedenlerinden birisi olmuştur. Ancak ileride yapılacak kombinasyonlar ile,

jeopolimerizasyon performansının ana etmenlerinden biri olan SiO_2/Al_2O_3 oranının, cam atığının uygun oranda ilavesi ile sağlanabilecek olması, cam atığının da değerlendirilebilecek bir öncü malzeme olduğunu göstermektedir.

İYA'nın tekrar kullanılamayan kısmı sadece briket içeren beton atıkları, tuğla ve duvar elemanlarından oluşmaz. Bu atıklara ek olarak, bir binanın yıkılması ve işlenmesiyle yüksek miktarda kırık cam parçaları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, üretilecek jeopolimer kompozitlerin sürdürülebilirliğe katkısını artırmak için kentsel dönüşüm alanlarındaki tüm bu atıkları içermesi gerekmektedir. Bu düşünceye dayanarak, yukarıda verilen ön çalışmalardan elde edilen basınç dayanımı sonuçları göz önüne alındığında, bu beş temel İYA atığı dahil olmak üzere farklı oranlarda karıştırılan jeopolimer hamur karışımlarının içeriği ve basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. İYA bazlı atıkların kombinasyonu ile üretilen jeopolimer hamurların basınç dayanım sonuçları

Kod	ÇK	HT	DT	CA	BA	Basınç Dayanımı (MPa)
CDW1	120	120	120	120	120	40,3
CDW2	80	160	120	120	120	37,3
CDW3	160	80	120	120	120	43,5
CDW4	186,7	93,3	140	90	90	47,6
CDW5	213,3	106,7	160	60	60	54,5
CDW6	213,3	106,7	160	40	80	56,8
CDW7	213,3	106,7	160	80	40	52,2

Değerler gram cinsindendir. Kür süresi ve sıcaklığı sırasıyla 72 saat ve 115 °C 'dir. Na% = 12

Çizelge 4.6 değerlendirildiğinde, en yüksek basınç mukavemetinin sırasıyla CDW6 ve CDW5 karışımlarından elde edildiği görülmektedir. Bu iki karışımda dikkat edilmesi

gereken nokta, toplam tuğla atık miktarının diğer karışımlardan daha yüksek olmasıdır (CDW7 hariç). Ön çalışmalar sonucunda tuğla atıklarına spesifik katsayılar verilmiş ve bu karışımlarda belirli oranlarda kullanılmasına karar verilmiştir. Çatı kiremitine daha yüksek katsayı, en yüksek basınç dayanımlarına ulaşılması nedeniyle verilmiş ve daha düşük basınç dayanımları nedeniyle harman tuğlasına küçük bir katsayı verilmiştir. Bu şekilde, bu oranlardaki karışımlara tuğla atıkları dahil edilmiştir. Beton ve cam atıkları değerlendirilirken, CDW6 karışımında beton atığının cam atığından daha fazla kullanılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Genel olarak jeopolimer bağlayıcıların geliştirilmesi çalışmasına bakıldığında, ilk olarak inşaat ve yıkıntı atığı bazlı atık malzemeler, tekli olarak çeşitli alkali aktivatör konsantrasyonlarında ve kür koşullarında üretilip test edilmiş, ısıl kür sonuçlarında önemli basınç dayanımları sergilemiştir. Nihai olarak karışımların birlikte kombine edilmesiyle birtakım numuneler üretilmiş ve ısıl kür uygulanması sonucunda 50 MPa basınç dayanım değerlerini aşan, %100 İYA bazlı jeopolimer hamur karışımları geliştirilmiştir. 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. Mekanik özelliklerin yanı sıra, üretilen bu jeopolimer hamurlara SEM, XRD gibi çeşitli mikro yapısal analizler yapılarak, matris içerisinde oluşan jel yapısı, dağılımı, boşluk oranı, kristalize ürünlerin tipi ve pikleri gözlemlenmiştir.

4.2. Jeopolimer Harç Karışımlarının Geliştirilmesi

4.2.1. İYA Esaslı Malzemelerin İkili Kombinasyonu ile GDA Parametrelerinin Fırın Küründe İncelenmesi

İYA esaslı jeopolimer hamur fazlarının geliştirilmesinden sonra, sisteme ince geri dönüşüm agregası ilave edilerek İYA esaslı jeopolimer harçların elde edilmesi planlanmaktadır. Önceki aşamalarda belirtildiği gibi, genel ECC karışımında maksimum tane büyüklüğü yaklaşık 200 um olan silis kumu kullanılmaktadır. Bununla

birlikte, tez çalışmasının temel noktası, yeni nesil çevre dostu jeopolimer kompozitlerin geliştirilmesi ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunulması amacıdır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda silis kumu yerine ince İYA agregası kullanılmıştır. Araştırma ve geliştirme çalışmaları boyunca, dikkate alınan hususlardan biri, EGC'nin gelecekteki uygulamalar için kolayca uygulanabilir ve pratik olmasıydı. Yıkım alanlarından toplanan İYA agregalarının çok küçük boyutlarda eleme süreci hem zaman alıcı hem de pratik değildir. Ayrıca, yüksek su emilimi nedeniyle sistemin kıvamını ve lif dağılımını da etkilemektedir. Bu nedenle tez kapsamında silis kumundan nispeten daha büyük ince İYA agregalarının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu düşünceye dayanarak, ince İYA agregası, jeopolimer harç geliştirilmesinin ön çalışmalarında 4,75-2,00, 2,00-0,85 ve 0,85-0,10 mm gibi üç boyuta ayrılmıştır. Jeopolimer harç üretimi prosesinde ana amaç agreganın mekanik özellikler ve tutarlılık üzerindeki etkisini incelemek olduğundan, karışıklığı önlemek için bağlayıcı olarak sadece tuğla atıkları içeren karışımlar tercih edilmiştir. Bu bağlamda, genel olarak ince geri dönüşüm agregası davranışını incelemek ve inşaat yıkıntı atığı bazlı bağlayıcı malzemeler ile çalışma mekaniğini gözlemlemek üzere, jeopolimer harç geliştirilmesi kapsamında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda İYA bazlı malzemeler ikili olarak %25, %50 ve %75 oranında değişecek şekilde üç farklı şekilde, 15 mol NaOH molaritesinde, 0,35 sabit su/bağlayıcı oranında 105 °C ve 115 °C ‘de 24,48 ve 72 saatlik ısıl kür periyotlarında, geri dönüşüm agregaları ise kum/bağlayıcı oranı 0,36, 0,45 ve 0,55 olmak üzere üç farklı boyutta kullanılarak çeşitli karışımlar yapılmıştır.

Kum/bağlayıcı oranının 0,36 seçildiği delikli tuğla-çatı kiremiti bağlayıcı kombinasyonlarına dair basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.7’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.7. 0,36 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75DT25ÇK	NaOH	12	0,35	0,36	24	18,5	39,0	21,2	43,9	22,7	16,5
75DT25ÇK					48	32,1	49,5	44,1	45,8	30,6	34,9
75DT25ÇK					72	46,4	52,8	48,0	51,0	33,7	36,0
50DT50ÇK					24	15,2	36,0	20,3	40,2	33,8	22,6
50DT50ÇK					48	29,4	49,0	35,3	44,2	30,6	33,4
50DT50ÇK					72	40,5	51,3	30,5	40,1	37,2	37,6
25DT75ÇK					24	11,8	34,7	24,8	31,2	32,9	36,4
25DT75ÇK					48	23,5	49,9	29,6	29,3	42,4	36,4
25DT75ÇK					72	35,7	48,0	27,5	33,3	41,0	36,8

Elde edilen sonuçlara göre, kür süresinin artırılmasıyla genel olarak jeopolimer harç karışımlarının basınç dayanımları artış göstermiştir. Ayrıca 0,85-0,100 mm boyut aralığında bulunan geri dönüşüm agregası ile hazırlanan numunelerinde çatı kiremiti kullanım oranı arttıkça basınç dayanımını sonuçlarında genel olarak artış gözlenilmesine karşın, 2-0,85 mm ile 4,75-2 mm boyut aralığında bulunan geri dönüşüm agregası ile hazırlanan numunelerin çatı kiremiti kullanım oranı arttıkça basınç dayanım sonuçlarında genel olarak düşüş gözlemlenmiştir. Genel olarak beton yapımında ince agrega kullanımı, dayanım, su ihtiyacı, dayanıklılık gibi parametrelere olumlu bir etki yapmaktadır. Ancak geri dönüşüm agregalarında, agrega inceliği arttığında toplam agrega yüzey alanı artmakta, böylelikle agrega çevresine yapışık halde bulunan çimento hamuru miktarı da daha fazla olmaktadır. Bu hamurun fazlalığı, karışımda bulunan suyun bir kısmını emmekte ve böylece beton basınç dayanımına olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle elde edilme prosedüründe kırım ve eleme yöntemi ile tasnifleme dışında herhangi bir işleme tabi tutulmamış geri dönüşüm agregalarında incelik artışının olumlu veya olumsuz etkileri olabilmektedir. Bu durum Çizelge 4.7'te sunulan deney sonuçlarına göre de tasdiklenmiş olup, her iki kür

sıcaklığı için farklı bağlayıcı malzeme oranlarına sahip karışımlarda tüm kür süreleri ele alınarak ortalama basınç dayanımı sonuçları açısından optimum sonuçlar 115 °C sıcaklığında kürlenen ve 4,75-2,00 mm boyutlarında agregalar ile hazırlanmış numunelerde gözlemlenmiştir. Genel trend çalışmanın önceki aşamasında elde edilen sonuçlara benzer bir şekilde sıcaklık artışı ile basınç dayanım sonuçlarının artışı yönündedir. Kür süresinin basınç dayanımına etkisi değerlendirildiğinde ise istinai durumlar hariç kür süresindeki artış basınç dayanımlarında da artış ile sonuçlanmıştır. Bağlayıcı tipi, miktarı ve kullanım oranları sabit tutularak gerçekleştirilen dökümlerde aktivatör olarak 0,35 su/bağlayıcı oranı için %12 sodyum konsantrasyonunda hazırlanan NaOH alkali aktivatör solüsyonları hazırlanmış, kür sıcaklığı ve süresi değiştirilmemiştir. 4,75-2,00 mm, 2,00-0,85 mm, 0,85-0,100 mm aralıklarında seçilen geri dönüşüm agregaları için kum/bağlayıcı oranının 0,45 seçilmiştir. Söz konusu karışımlara dair basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. 0,45 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75DT25ÇK	NaOH	12	0,35	0,45	24	22,3	47,8	18,6	24,1	20,4	30,0
75DT25ÇK					48	52,0	54,1	33,9	33,9	27,0	30,9
75DT25ÇK					72	54,0	37,8	33,9	30,0	29,6	30,3
50DT50ÇK					24	24,5	48,0	20,1	26,2	25,2	32,8
50DT50ÇK					48	54,9	47,3	30,4	30,8	31,2	31,4
50DT50ÇK					72	51,3	40,8	30,9	32,0	35,1	30,1
25DT75ÇK					24	17,3	31,1	19,3	30,0	27,3	35,0
25DT75ÇK					48	57,2	45,0	34,7	32,7	32,5	36,5
25DT75ÇK					72	53,4	48,8	31,2	28,1	33,3	34,6

Basınç dayanım sonuçları incelendiğinde 24, 48 ve 72 saatlik kür sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi, kür süresindeki artışın basınç dayanımını arttırması eğilimine de genel kapsamda uyum göstermiştir. Isıl kürün basınç dayanıma etkileri irdelendiğinde ise 48 ve 72 kür saatlik kür süreleri için ısıl kür sıcaklığındaki ve basınç dayanımı arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlenmiş fakat 24 saatlik kür süresi için bu ilişki olumlu bir orantı göstermiştir. Geri dönüşüm agregası tane boyutunun basınç dayanımına etkileri incelendiğinde ise delikli tuğlanın %25 oranlarında kullanıldığı karışım dışında 24 saatlik kür süresi için basınç dayanım sonuçları ufak farklılıklar göstererek benzer davranışlar sergilese de 48 ve 72 saatlik basınç dayanım sonuçları incelendiğinde geri dönüşüm agregası boyutundaki azalmanın basınç dayanımlarını bariz bir biçimde azalttığı açıkça görülmektedir. Bu durum malzemenin artan su ihtiyacının karşılanamaması ve kıvamdan kaynaklı yerleşme problemi ile ilişkilendirilebilineceği gibi yetersiz su varlığın polimerizasyon reaksiyonlarının matriste homojen bir biçimde yayılamaması durumu ile de ilişkilendirilebilir. Bu iki koşulun oluşturduğu problemlerin aşılabilmesi için optimum değerlerin belirlenmesi yoluna gidilebilir.

Delikli tuğla ve çatı kiremitin belirli oranlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı karışımlarda kum/bağlayıcı oranının basınç dayanım sonuçlarına etkisinin incelenebilmesi için gerçekleştirilen seri dökümlerin son aşamasında kum/bağlayıcı oranı 0,55 seçilerek 0,36 ve 0,45 kum/bağlayıcı oranları için gerçekleştirilen dökümler aynı alkali aktifleştirici ve konsantrasyonu için aynı kum boyutu aralıklarında ve aynı kür sıcaklık, süreleri için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. 0,55 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75DT25ÇK	NaOH	12	0,35	0,55	24	21,4	35,9	19,0	38,2	22,5	34,5
75DT25ÇK					48	52,6	50,7	40,2	36,5	28,4	32,1
75DT25ÇK					72	52,0	52,2	17,4	36,9	29,4	33,1
50DT50ÇK					24	22,7	38,3	19,0	38,1	26,8	34,6
50DT50ÇK					48	50,9	49,9	35,4	37,5	28,9	34,2
50DT50ÇK					72	50,1	49,3	37,1	24,8	33,3	37,0
25DT75ÇK					24	18,0	37,5	19,2	28,0	28,5	34,5
25DT75ÇK					48	53,4	52,0	28,2	26,7	36,1	39,6
25DT75ÇK					72	53,4	41,3	36,6	25,7	37,8	39,1

Delikli tuğla oranının %75 ve %50 olduğu karışımlar için 24 saatlik basınç dayanım sonuçları 105 °C kür sıcaklığında hemen hemen benzer davranışlar göstermiş ve yakın değerlere ulaşmıştır. %25 delikli tuğla içeren karışımlar için ise basınç dayanım sonuçları kum boyutu azaldıkça artış göstermiştir. 48 saatlik kür sonucunda basınç dayanımları delikli tuğlanın %25 olduğu karışımlar hariç genel olarak azalış göstermiştir. 72 saatlik sonuçlarda da durum 48 saatlik kür süresi sonucunda elde edilen sonuçlarla paraleldir. 115 °C kür sıcaklığında ise delikli tuğla içeriği %25 olan karışımlar hariç tüm kum boyut aralıkları için 24 saatlik kür süresinin sonunda benzer basınç dayanım sonuçları göstermiştir. 48 saatlik kür süresi için %25 delikli tuğla içeren karışımlarda dayanım kum boyutu küçüldükçe bir noktaya kadar azalmış fakat en küçük kum boyutu için artış göstermiştir. Diğer bağlayıcı kombinasyonlarında ise kum boyutundaki azalma basınç dayanımlarında da azalmaya neden olmuştur. 72 saatlik sonuçlar incelendiğinde ise sadece %75 delikli tuğla içeren karışımlarda kum boyutunun azalması basınç dayanımında lineer bir azalmaya neden olmuş diğer bağlayıcı kombinasyonları için bu durum basınç dayanımında önce azalış ardından artış göstermiştir.

Delikli tuğla ve çatı kiremiti ikilisinin üç farklı kum/bağlayıcı oranları ile test edilmiş beton numunelerinin basınç dayanımı sonuçları, Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da (kum/bağlayıcı oranları sırasıyla 0,36, 0,45, 0,55) sunulmuş, tüm bu veriler ışığında, 4,75-2,00 mm boyutlarında agrega kullanımının diğer boyutlara kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanında kum/bağlayıcı oranının 0.,36 olduğu karışımlar ile hazırlanmış numuneler, diğerlerine kıyasla daha fazla dayanım vermiştir. Ayrıca delikli tuğla ve çatı kiremitinin farklı oranlarda kullanımı ile elde edilen sonuçlar, kür süresi ve sıcaklığı, agrega boyutu ve miktarı gibi parametrelerden oldukça etkilenmiş olup, 0,36 kum/bağlayıcı oranı ile hazırlanmış numunelerde delikli tuğla kullanımının artması ile dayanım artmış, ancak 0,45 ve 0,55 kum/bağlayıcı oranı ile hazırlanmış numunelerde ise delikli tuğla ve çatı kiremiti kullanımının birbirine kıyasla benzer sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Jeopolimerik harç karışımlarına dair devam edilen çalışmalarda bu kez delikli tuğla ile harman tuğlanın farklı kombinasyonları oluşturularak aynı aktivatör tipi ve molaritesi, su/bağlayıcı oranı, ısıl kür sıcaklığı ve süresi uygulanarak 0,36 , 0,45 ve 0,55 kum/bağlayıcı oranları ile hazırlanmış numunelerin basınç dayanımları test edilmiştir. İlk olarak 0,36 kum/bağlayıcı oranı ile hazırlanmış karışımın basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. 0,36 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve harman tuğla kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75DT25HT	NaOH	12	0,35	0,36	24	17,4	43,9	19,1	39,8	33,9	41,1
75DT25HT					48	41,8	55,1	43,4	50,4	38,5	37,0
75DT25HT					72	41,0	50,7	55,9	47,5	38,3	39,1
50DT50HT					24	15,4	43,8	18,7	38,1	33,0	42,0
50DT50HT					48	40,2	50,1	40,1	47,3	43,0	42,4
50DT50HT					72	41,2	49,8	51,3	44,0	41,1	44,3
25DT75HT					24	14,4	42,4	27,0	43,1	22,5	40,0
25DT75HT					48	34,6	44,1	36,9	43,9	52,7	46,2
25DT75HT					72	45,5	47,6	46,7	41,9	47,8	48,6

Kür süresinin dayanım sonuçlarına etkisi incelendiğinde, iki farklı kür sıcaklığında da tüm kum/bağlayıcı oranları için basınç dayanımları kür süresinin artması sonucu artış göstermektedir. Bu durum hamur fazında görülen yönelimle oldukça benzerdir. 24 saatlik kür süresinde ve 105°C kür sıcaklığında, %25 delikli tuğla içeren karışımlar için basınç dayanım değerleri kum oranı azaldıkça önce artan ardından azalan bir yönelim göstermiştir. 48 ve 72 saatlik kür sürelerinde ise bu durum yerini kum oranı azaldıkça artan basınç dayanımı değerlerine bırakmıştır. 115°C sıcaklık için %75 harman tuğla içeren karışımlarda görülen birkaç istisnai durum dışında basınç dayanım sonuçları genel anlamda azalma eğilimindedir. Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde delikli tuğla oranın fazla olduğu karışımlarda agrega boyutundaki artışının dayanıma olumsuz etki ettiği gözlemlenmiştir. Ancak harman tuğla oranının fazla olduğu karışımlarda ise agrega boyutundaki artışın dayanıma olumlu bir etkisi olmuştur. Bunu yanında yine ısıl kür sıcaklığı ve süresinin dayanıma oldukça fazla bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tüm parametrelere göre delikli tuğla ve harman tuğlanın birbirine kıyasla dayanıma etkisine bakıldığında ise, her iki malzemenin dayanıma hemen hemen aynı etkisi olduğu saptanmıştır.

Benzer şekilde delikli tuğla ve çatı kiremiti karışımlarında olduğu gibi delikli tuğla ve harman tuğla karışımlarında kum/bağlayıcı oranları 0,36'dan 0,45'e yükseltilmiş, elde edilen sonuçlar ise Çizelge 4.11'de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. 0,45 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve harman tuğla kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75DT25HT	NaOH	12	0,35	0,45	24	14,9	38,2	27,7	39,2	22,7	30,5
75DT25HT					48	31,8	37,0	37,7	41,0	27,5	30,9
75DT25HT					72	27,3	29,2	35,0	36,6	27,5	31,7
50DT50HT					24	20,3	45,6	30,7	20,2	25,2	30,8
50DT50HT					48	44,9	45,0	37,3	42,2	30,1	37,0
50DT50HT					72	44,2	35,1	37,3	34,8	30,8	32,8
25DT75HT					24	24,0	53,7	26,1	35,8	29,9	36,9
25DT75HT					48	47,8	46,3	43,9	41,2	36,3	37,1
25DT75HT					72	46,8	34,6	44,7	35,9	36,6	36,6

Delikli tuğla içeriği fazla olan karışımlarda her iki kür sıcaklığı için, 24, 48 ve 72 saatlik küre tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 4,75-2,00 mm aralığındaki kum boyutundan 2-0.85 mm aralığındaki kum boyutuna geçişte basınç dayanımında artış, 2-0.85 mm aralığından 0.85-0.100 mm aralığına geçişte ise basınç dayanımlarında belirgin bir azalma görülmektedir.

Delikli tuğla ve harman tuğlanın eşit oranda kullanıldığı karışımlarda kür süresinin uzatılması sonucunda basınç dayanımlarında 48 saate kadar olumlu bir gelişim gözlense de 48 saatten sonra bu etki tersine dönmektedir. Bu durum istisnai durumlar hariç iki kür sıcaklığı için de geçerlidir. Daha ufak agrega kullanımında ise agrega tane

boyutu azaldıkça 48 ve 72 saatlik kür süreleri için basınç dayanımlarında azalmalar gözlemlenmektedir.

Harman tuğla içeriğinin fazla olduğu karışımlarda ise 24 saatlik kür süresi için 105°C sıcaklıkta basınç dayanımı kum boyutu ile ters orantılı bir biçimde davranarak boyut küçüldükçe artma eğilimindedir. Bu durum 48 ve 72 saatte basınç dayanımlarının azalması ile sonuçlanmıştır. 115°C sıcaklıkta ise genel olarak kum boyutu azalığı durum için basınç dayanımları artma eğilimindedir. Yalnızca 72 saatlik kür süresinde kum boyutundaki azalma sonucunda basınç dayanım sonuçları olumlu etkilenmiştir.

0,45 kum/bağlayıcı oranı ile hazırlanmış numunelerin dayanım sonuçlarına bakıldığında, 0,36 oranında kum/bağlayıcı ile hazırlanmış numunelerden farklı olarak karışımda harman tuğla miktarındaki artışın genel olarak dayanımı da artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında, genel olarak agrega boyutundaki artışın diğer deney sonuçlarına benzer şekilde dayanıma olumlu bir katkısı olmuştur.

Delikli tuğla ve harman tuğla kombinasyonuna dair bir önceki dökümün devamı niteliğinde 0,55 kum/bağlayıcı oranında geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilmesi neticesinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. 0,55 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda delikli tuğla ve harman tuğla kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75DT25HT	NaOH	12	0,35	0,55	24	19,7	34,7	17,2	34,2	23,4	32,4
75DT25HT					48	44,4	54,4	40,9	36,6	29,1	34,9
75DT25HT					72	51,0	48,0	31,0	36,6	30,0	33,8
50DT50HT					24	20,1	38,0	16,9	35,9	25,6	35,9
50DT50HT					48	46,2	49,3	40,0	35,1	33,0	38,1
50DT50HT					72	49,8	49,0	33,3	34,8	34,4	37,3
25DT75HT					24	19,5	37,7	16,6	38,1	27,5	37,7
25DT75HT					48	53,0	46,8	42,6	41,3	34,5	40,6
25DT75HT					72	52,2	44,2	39,2	39,2	35,6	39,8

Harman tuğla oranının daha fazla olduğu karışımların sonuçları değerlendirildiğinde genel olarak kum oranının artması basınç dayanımlarının artmasına neden olmaktadır. Bu durum her iki kür sıcaklığı içinde benzerdir. Kür süresinin dayanıma etkisinin incelendiğinde ise 105°C kür sıcaklığında en büyük kum boyutunda dayanım kür süresi ile orantılı olarak bariz bir biçimde artış göstermiştir. Orta büyüklükteki geri dönüşüm agregası için dayanım 48 saate kadar artmakta ardından azalmakta, en küçük geri dönüşüm agregası içinse 48 saate kadar artan dayanım 48 saatten sonra büyük bir artış göstermemektedir. Bu stabil davranış 115°C sıcaklıkta da tekrarlanmıştır.

Harman tuğla ve delikli tuğlanın eşit oranda kullanıldığı karışımlarda istisnai durumlar hariç genel eğilim kür süresindeki artışın basınç dayanımını da arttırması yönündedir. Bu durum her iki kür sıcaklığı için geçerli olmakla beraber yalnızca 2-0.85 mm kum boyutunda 105 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerde dayanım 48 saatten sonra azalmıştır.

Harman tuğlanın yüzdece daha fazla kullanıldığı kombinasyonda da basınç dayanımları uzatılan kür süresinden olumlu etkilenmiş yalnızca orta büyüklükteki geri dönüşüm agregası için bu durum tersinir bir davranış sergilemiştir. Kum boyutunun dayanıma etkisi incelendiğinde ise 105°C için 24 saat kür edilen numuneler hariç diğer numunelerde kum boyutunun azalması basınç değerlerinin düşmesine neden olmuştur. 115 °C kür sıcaklığında 24 saat kürlenen numunelerin basınç dayanımında büyük değişiklikler gözlenmemiş, 48 ve 72 saat için ise basınç dayanımı kum oranının azalması ile azalmıştır. Genel anlamda agrega boyutunun 4,75-2,00 olduğu karışımların dayanım sonuçları, diğer agrega boyutu ile hazırlanmış karışımların dayanım sonuçlarına göre ortalama %20 civarında yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra delikli tuğla ile harman tuğlanın karışımda kullanım oranı baz alındığında, her iki malzemenin dayanım sonuçlarına etkisi arasında büyük farklar bulunmadığı tespit edilmiştir.

Delikli tuğla ve harman tuğla çiftinin farklı oranlarda karışımlarının yine farklı oranlarda kum/bağlayıcı (sırasıyla 0,36, 0,45, 0,55) kullanılarak hazırlanmış numunelerin test sonuçlarına genel olarak bakıldığında, delikli tuğla ve çatı kiremiti çiftine benzer şekilde en iyi sonuçların 0,36 kum/bağlayıcı oranı ile hazırlanmış numuneler olduğu kanısına varılmıştır. Agrega boyutundaki artışın ise dayanıma genel olarak olumlu yönde katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca harman tuğlanın dayanıma katkısının, delikli tuğlanın dayanıma katkısından bir nebze fazla olduğu görülmüştür.

Jeopolimerik harç karışımlarının geliştirilmesi adına yapılan bir diğer çalışmada ise harman tuğla ile çatı kiremitinin belirli oranlarda karışımı yapılarak 0,36 , 0,45 ve 0,55 oranlarında kum/bağlayıcı ile dayanım sonuçları test edilmiştir. Bu çalışmada da delikli tuğla-çatı kiremiti ve delikli tuğla-harman tuğla ikililerinde olduğu gibi aktivatör tipi ve miktarı, ısıl kür süresi ve sıcaklığı, agrega miktarı ve tipi gibi parametreler değiştirilmeden uygulama tekrarlanmıştır. İlk olarak kum/bağlayıcı oranı 0,36 olan karışım, bağlayıcıların çeşitli kompozisyonuna, ısıl kür süresi ve sıcaklığına, agrega boyutu ve miktarına göre teste tabi tutulup sonuçlar Çizelge 4.13'de sunulmuştur.

Çizelge 4.13. 0,36 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda harman tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75HT25ÇK	NaOH	12	0,35	0,36	24	25,0	38,1	16,4	25,5	15,0	24,6
75HT25ÇK					48	36,0	49,7	39,9	34,8	27,7	43,5
75HT25ÇK					72	44,2	42,6	38,9	36,5	48,4	51,8
50HT50ÇK					24	26,9	42,3	17,8	28,7	17,9	25,9
50HT50ÇK					48	37,0	47,0	38,7	30,9	42,3	43,0
50HT50ÇK					72	43,5	49,6	35,9	33,1	52,9	49,5
25HT75ÇK					24	32,7	46,2	18,6	31,7	21,5	27,7
25HT75ÇK					48	38,2	45,5	36,8	26,9	55,8	41,8
25HT75ÇK					72	45,6	50,7	33,2	34,3	59,2	46,2

Her iki kür sıcaklığında tüm kum boyutları için genel olarak ısıl kür süresinin uzatılmasının basınç dayanımı üstünde benzer bir biçimde olumlu etkilere sahip olduğu görülmektedir. Fakat bu doğrusal davranış kum büyüklüğündeki değişimde görülememektedir. 105 °C sıcaklık için basınç dayanımı %75 harman tuğla içeren karışımlarda 24 saat için kum boyutu küçüldükçe azalma, 48 saat için kum oranı küçüldükçe önce artma sonra azalma, 72 saat için ise önce azalma sonra artma eğilimindedir. Söz konusu tutarsızlıklar İYA'nın kaynağı ile ilişkilendirilebilir. Farklı kaynaklardan elde edilen İYA'larla üretilen jeopolimer harç karışımlarına dair optimum koşulların belirlenmesi İYA kaynağının kalitesi, bulunduğu bölgede İYA'ya zararlı etkileyebilecek çevresel koşulların varlığı, İYA'nın kimyasal kompozisyonu gibi sayısı parametre sebebi ile zorlu bir süreç haline gelmektedir.

Genel olarak elde edilen sonuçlara göre agrega boyutunun artışı veya azalışının dayanıma lineer bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Genel olarak 2-0.85 mm boyutlarında agrega içeren numuneler en düşük dayanımı vermiş, 4,75-2,00 mm boyutlarında agrega içeren numuneler ise 0.85-0.100 mm boyutlarında agrega içeren

numunelere göre biraz fazla olmak üzere en yüksek dayanımı vermiştir. Bununla birlikte karışımda çatı kiremiti oranı arttıkça dayanımda az da olsa bir artış gözlemlenmiştir.

Harman tuğla ve çatı kiremiti ikilisinin çeşitli kompozisyonları 0,45 kum/bağlayıcı oranı ile test edilmiş, yapılan çalışmaların sonucu ise Çizelge 4.14'de sunulmuştur.

Çizelge 4.14. 0,45 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda harman tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
					(saat)	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75HT25ÇK	NaOH	12	0,35	0,45	24	20,6	27,3	17,7	37,0	18,8	32,6
75HT25ÇK					48	44,8	43,1	51,0	37,8	29,8	50,2
75HT25ÇK					72	42,1	42,6	39,1	38,5	50,2	61,2
50HT50ÇK					24	20,0	27,8	20,2	35,2	20,3	39,1
50HT50ÇK					48	42,0	42,0	45,2	33,9	30,9	49,9
50HT50ÇK					72	40,3	37,8	35,9	35,8	53,1	53,3
25HT75ÇK					24	17,0	37,2	23,8	30,0	23,0	45,8
25HT75ÇK					48	39,4	35,9	38,0	31,1	34,7	47,5
25HT75ÇK					72	37,8	30,4	33,7	32,1	55,0	52,2

Harman tuğlanın %75 oranında olduğu karışımlar için 4,75-2,00 mm ve 2-0.85 mm agrega boyutlarında kür süresinin dayanıma etkisi 48 saate kadar dayanımda artış 48 saatten sonra ise dayanım kaybı olarak gözlemlenmiştir. 0.85-0.100 mm agrega boyutunda ise dayanım kür süresinin uzatılması ile artma eğilimindedir. Diğer iki bağlayıcı kompozisyonu için de söz konusu eğilim tekrarlanmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre genel eğilim, diğer birçok bağlayıcı çifti ve kum/bağlayıcı oranları ile hazırlanmış karışımların aksine, 0,45 kum/bağlayıcı oranına sahip harman

tuğla ve çatı kiremiti ikilisinde agrega boyutundaki artışın basınç dayanımına olumsuz yönde etki ettiği yönündedir. 0.85-0.100 mm boyutlarında agrega içeren numunelerin, diğer boyutlarda agrega içeren numunelere oranla %10 ile %20 arasında daha fazla dayanım kazandığı tespit edilmiştir. Bunun yanında 4,75-2,00 mm ve 2.00-0.85 mm boyutlarında agrega içeren numunelerin ısıl kür sıcaklığı 105 °C ‘ den 115 °C ‘ ye yükseldiğinde dayanımlarında yaklaşık olarak ortalama %1 oranında bir artış gözlemlenmesinin yanında, 0.85-0.100 mm boyutlarında agrega içeren numunelerin ise ısıl kür sıcaklığı 105 °C’ den 115 °C’ ye yükseldiğinde dayanımlarında yaklaşık olarak ortalama %30’lara varan bir artış gözlemlenmiştir.

Harman tuğla ve çatı kiremiti çiftinde son olarak 0,55 kum/bağlayıcı oranı içeren bir diğer karışım hazırlanmış, basınç dayanım testlerinin ardından sonuçlar Çizelge 4.15’ de sunulmuştur.

Çizelge 4.15. 0,55 K/B oranında farklı boyutlarda geri dönüşüm agregası ve farklı oranlarda harman tuğla ve çatı kiremiti kullanılarak üretilen jeopolimerik harç numunelerinin basınç dayanımları

Numune	Aktivatör tipi	Na (%)	S/B	K/B	Kür süresi (saat)	Basınç dayanımı (MPa)					
						4,75-2,00 mm		2-0.85 mm		0.85-0.100 mm	
						105 °C	115 °C	105 °C	115 °C	105 °C	115 °C
75HT25ÇK	NaOH	12	0,35	0,55	24	21,8	43,3	13,3	38,3	23,8	36,6
75HT25ÇK					48	42,0	46,8	39,2	34,2	27,2	36,1
75HT25ÇK					72	69,1	44,8	42,0	25,6	47,2	43,7
50HT50ÇK					24	20,3	43,1	20,3	28,9	25,9	39,3
50HT50ÇK					48	44,9	44,3	30,1	22,8	32,0	42,1
50HT50ÇK					72	58,0	39,5	31,6	23,0	47,0	42,0
25HT75ÇK					24	15,1	48,0	23,9	24,4	33,6	45,1
25HT75ÇK					48	56,9	39,8	24,4	23,9	49,3	47,6
25HT75ÇK					72	41,1	38,9	24,4	21,3	49,3	44,5

105 °C kür sıcaklığı için kullanılan İYA agregasının boyutunun küçülmesi, %75 harman tuğla içeren karışımlarda 24 ve 72 saat kür süresi için basınç dayanımında önce dayanım kaybına ardından ise dayanımda artışa neden olmuştur. 48 saatlik numunelerde ise agrega boyutu küçüldükçe dayanım kaybı gözlemlenmiştir. 115 °C sıcaklıkta bu durum değişkenlik göstermekte 24 saat için basınç dayanımları agrega boyutu ile orantılı bir biçimde azalmakta 48 ve 72 saat için ise bu orantı 2-0.85 mm agrega boyutuna doğru artma 0.85-0.100 mm agrega boyutuna doğru azalma eğilimindedir.

İki bağlayıcı tipinin eşit oranda kullanıldığı karışımlarda, genel anlamda agrega boyutunun azalması basınç dayanımlarını orta büyüklükteki agregaya kadar olumsuz etkilese de daha küçük boyuttaki agrega için dayanım olumlu yönde devam etmekte fakat büyük boyutta agrega kullanımında elde edilen dayanımlara ulaşılamamaktadır. Çatı kiremitinin karışım kompozisyonundaki artışı sonucu 105 °C sıcaklıkta 24 saat kür edilen numunelerin basınç dayanımı kum büyüklüğü ile ters orantılı bir biçimde olumlu sonuçlar göstermiştir. Fakat 48 ve 72 saat için kum büyüklüğü azaldıkça önce dayanım kaybı sonra da dayanımda artış gözlemlenmiştir. Söz konusu birbirini izleyen dayanım kaybı ve ardından dayanımda gözlemlenen artış 115 °C sıcaklıkta kür edilen numuneler için tüm kür sürelerinde etkisini göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, en yüksek dayanım sonuçları 4,75-2,00 mm boyutlarında agrega içeren numunelerden alınmıştır. Ayrıca 2.00-0.85 mm boyutlarında agrega kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanım sonuçlarında büyük oranda düşüş gözlemlenmiştir.

Harman tuğla ve çatı kiremiti ikilisinin birlikte kullanıldığı 0,36, 0,45 ve 0,55 kum/bağlayıcı içeren numunelerin basınç dayanımları sonuçları sırası ile Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'de sunulduğu gibidir. Elde edilen sonuçlara göre 3 farklı kum/bağlayıcı karışımlarının genel olarak ortalama basınç dayanım sonuçları oldukça benzer çıkmıştır. Bunun yanı sıra harman tuğla ve çatı kiremiti çifti kullanılarak üretilen betonların, delikli tuğla ve harman tuğla çifti kullanılarak üretilen betonlara göre numune dayanımlarında çok küçük miktarda kayıp gözlemlenmiş, delikli tuğla ve çatı kiremiti çifti ile üretilen betonların ise bu 3 farklı çift arasında az bir farkla en yüksek dayanım gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu 3 farklı bağlayıcı çiftinin farklı

kum/bağlayıcı oranlarına göre üretilip, basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında ise, en yüksek dayanım veren kum/bağlayıcı oranının 0,36 olduğu tespit edilmiştir.

4.2.2. Jeopolimer Harç Karışımlarında Çeşitli Parametrelerin Değişiminin Etkisinin İncelenmesi

Jeopolimer matrisin geleneksel jeopolimer üretim yöntemleri kapsamında ısıl kür uygulanarak elde edilmesinin dışında ortam koşullarında kür edilerek yüksek mekanik performans özellikleri göstermesi nihai hedeflerden biridir. Bu yolla çalışma kapsamında kompozit üretiminde kullanılması planlanan lifler üzerinde gerçekleştirilen incelemelerde alkali aktivatör içerisinde fiziksel özelliklerinde değişimler gözlemlenen liflerin ısıl kür uygulamalarında yaşayabileceği performans kayıplarının ortam kürü uygulaması ile aşılması hedeflenmektedir. Üretilen numuneler laboratuvar koşullarında ortam kürüne ve su kürüne tabi tutularak mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında daha önce gerçekleştirilen harç karışımlarının üretilmesine dair çalışmalara ve devamında kompozit üretimine dair gerçekleştirilen deneme çalışmalarına dayanarak, üç farklı tuğla atığı, beton ve cam atığı gibi bağlayıcı fazın temelini oluşturan alüminosilikat esaslı malzemelerin belirlenen optimum oranda tüm karışımlarda kullanılması yoluna gidilmiştir. Bununla birlikte yine önceki çalışmalarda denenmemiş olan sodyum silikatın ortam kürüne etkisinin incelenmesi ve kalsiyum hidroksitin alkali aktivatör olarak kullanıldığı bir dizi üretim gerçekleştirilmiş ve numunelerin su kürü ve ortam kürü sonrası basınç dayanımları incelenmiştir.

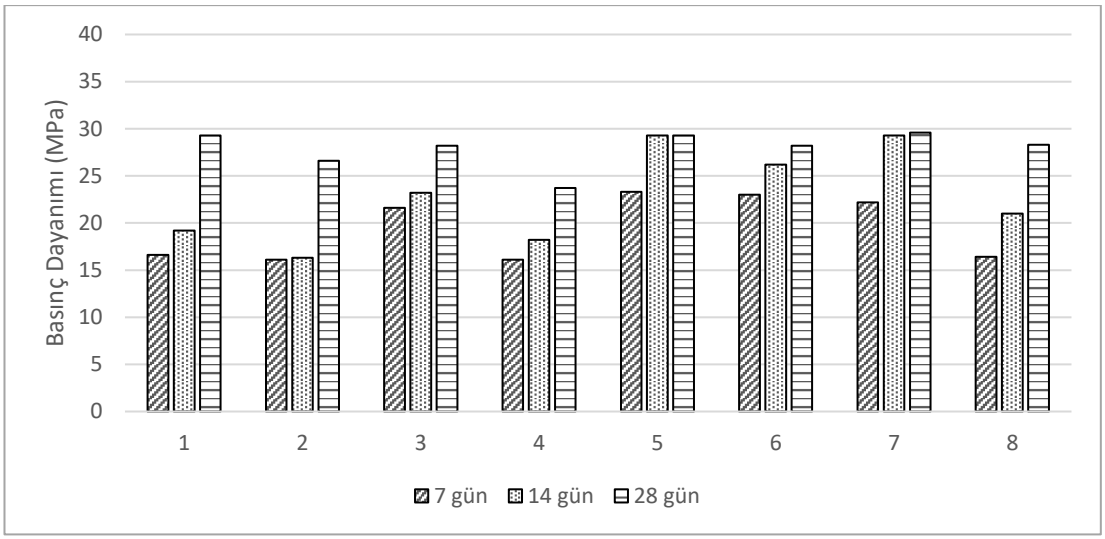
%100 İYA içeren harç karışımlarının geliştirilmesi kapsamında üretilen çeşitli numunelerin içerikleri Çizelge 4.16'da sunulmuştur. Karışım reçetesi hazırlanırken kapsamlı literatür araştırmalarının ve önceden yapılan çalışmaların ardından karışımın bağlayıcı fazı olarak tuğlalar ile beton ve cam tozlarının içerik ve basınç dayanımlarına göre kullanım oranının optimize edilmesi yoluna gidilmiştir. Aktivatör fazında ise önceki karışımlarda kullanılan sodyum hidroksite ek olarak sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit gibi çeşitli aktivatörler eklenerek harç karışımlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Alkali aktivatör seçiminde çalışma kapsamında gerçekleştirilen

çalışmalarda yoğun olarak kullanılan sodyum hidroksit tek başına kullanıldığı ve sodyum hidroksitin sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit ile ayrı ayrı kullanıldığı karışımlar hazırlanmış, ek olarak 3 aktivatörün de bir arada kullanıldığı bir karışım da seriye dahil edilmiştir. Agrega olarak ise ECC karışımlarında kullanılan agrega boyutlarına yakın, mikro çatlak oluşumunu destekleyip yoğun matris oluşumunu sağlayan, süneklilik ve mekanik özelliklere uygun davranış sergileyerek kendi kendine iyileşmenin temelini oluşturmaya yarayan 0.100-0.850 mm boyutları arasında geri dönüşüm agregası kullanılmıştır. Bununla birlikte numunelerin su/bağlayıcı oranları ile agrega/bağlayıcı oranları 0,35 olarak seçilmiştir. Karışımlara eklenen su miktarı, sodyum silikatın içeriğinde bulunan su miktarı çıkartılarak toplam sistemin su/bağlayıcısı 0,35'i sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. Üretilen bu numuneler, ortam kürü ve su kürüne tabi tutulmuştur ve 7,14 ve 28 gün uygulanarak dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretilen jeopolimer harç karışımlarının içerikleri Çizelge 4.16'da, basınç dayanım sonuçları ise ortam küründe Şekil 4.1'de, su küründe ise Şekil 4.2'de sunulmuştur.

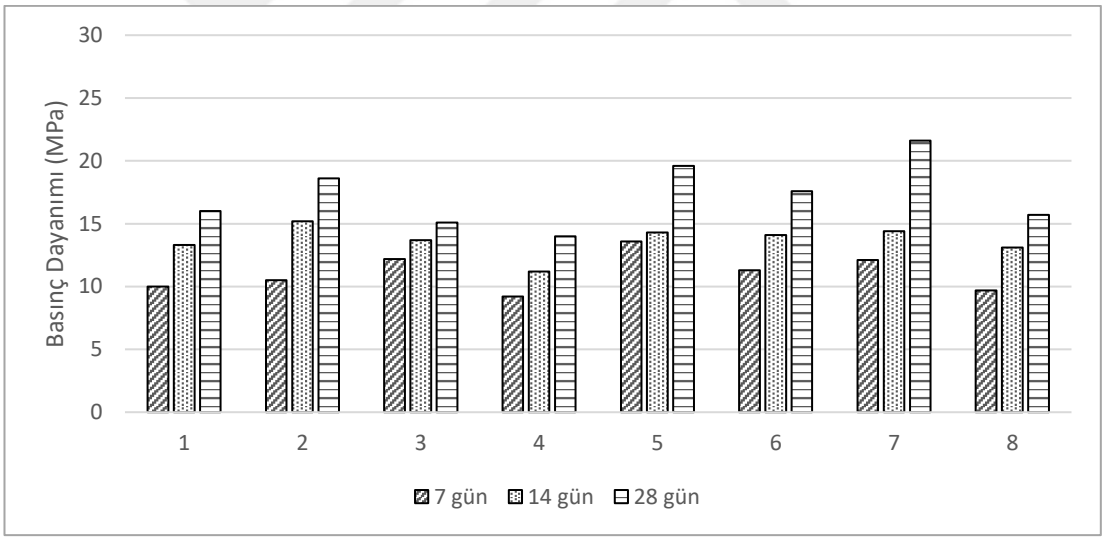
Çizelge 4.16. Çeşitli parametrelerin etkisini incelemek üzere üretilen %100 İYA içeren jeopolimer harç karışımları

No	DT	HT	ÇK	CA	BA	NaOH	Na_2SiO_3	$Ca(OH)_2$	Su	Agrega
1	700	525	875	350	1050	608.65	0	388.5	1202	1225
2	700	525	875	350	1050	608,65	0	518	1157	1225
3	700	525	875	350	1050	487	0	388,5	1225	1225
4	700	525	875	350	1050	736,5	0	0	1225	1225
5	700	525	875	350	1050	365,2	730	0	751	1225
6	700	525	875	350	1050	487	487	0	908	1225
7	700	525	875	350	1050	243,5	487	388,5	908	1225
8	466,66	350	583	350	1750	608,65	0	388,5	1225	1225

Not: Kullanılan tüm malzemelerin birimi gram olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. %100 İYA içeren jeopolimer harç karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları



Şekil 4.2. %100 İYA içeren jeopolimer harç karışımlarının su kürü sonrası basınç dayanım sonuçları

Çeşitli parametrelerin değiştirilmesiyle üretilen jeopolimer harç karışımlarının, 7,14 ve 28 günlük ortam koşullarında kür edilmesinin ardından elde edilen basınç dayanım sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Üretilen numunelerin basınç dayanım sonuçları 1,

2, 3, 4 ve 8 numaralı karışımlar için kür süresinin artması ile kayda değer artışlar göstermiş 5, 6 ve 7 numaralı karışımlarda ise 14 gün ve 28 günlük dayanım sonuçları arasında neredeyse fark gözlemlenmemiştir. Bu durumun sodyum silikatın diğer alkali aktivatörlere göre daha reaktif olması, SiO_2'in hızlı reaksiyon vermesi ve SiO_2 kaynaklı polimerik yapının matriste daha hızlı çökelmesinden ileri gelmektedir. Söz konusu numuneler için 14 ve 28 günlük dayanım sonuçlarının oldukça yakın seviyelerde olması ise bu yargıyı destekler niteliktedir. Sodyum silikatın aktivatör olarak kullanılması ile jeopolimer matris nihai dayanımına daha hızlı bir biçimde ulaşmakta ve dayanım performansını korumaktadır. Bununla birlikte sodyum silikatın aktivatör olarak kullanıldığı karışımların basınç dayanımları ortam koşullarında fırın kürünün tersine daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum ise sodyum silikatın daha önce bahsedildiği gibi sodyum silikatın su içeriğinin ısıl kür sonucu matris içerisinde oluşturabileceği basınç kuvvetlerinden kaynaklandığı, ek olarak halihazırda hızlı bir biçimde reaksiyon gösteren sodyum silikatın ısıl kür uygulaması sonucu heterojen bir matris oluşumuna sebep olabileceğine işaret etmektedir. Kalsiyum hidroksit kullanılan karışımların basınç dayanımları kısmen yüksek çıkmasına rağmen, kalsiyum hidroksit kullanılarak elde edilmesi beklenilen stabil ve çözünmeyen matrisin olumlu özelliğinin su küründe daha belirgin bir biçimde kendini göstereceği düşünülmektedir.

Çeşitli parametrelerin değiştirilmesiyle üretilen jeopolimer harç karışımlarının, 7,14 ve 28 günlük suda kür edilmesinin ardından elde edilen basınç dayanım sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen basınç dayanımları sonuçlarına göre kalsiyum hidroksit içeren karışımların su kürü neticesinde dikkate alınacak düzeyde dayanıma katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte üç farklı aktivatörün yüksek oranlarda birlikte kullanıldığı karışımın basınç dayanım sonucu en yüksek sonucu vermiştir. Genel olarak jeopolimer numunelerinde, geleneksel betonda gerçekleşen ve suyun gerekli olduğu reaksiyonların aksine ilerleyen yaşlarda polimerizasyon reaksiyonlarının gerçekleşme yüzdesinin düşük olmasından kaynaklı olarak alkali ortamın oluştuğu su içeriğine duyulan ihtiyacın azalmasından dolayı ve alkalilerin çözünme davranışına sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda, beklenildiği gibi su küründe ortam kürüne göre dayanım düşüşü görülmüştür. Jeopolimer matriste polimerizasyon reaksiyonlarının %100'e yakın performansla gerçekleşmemesi

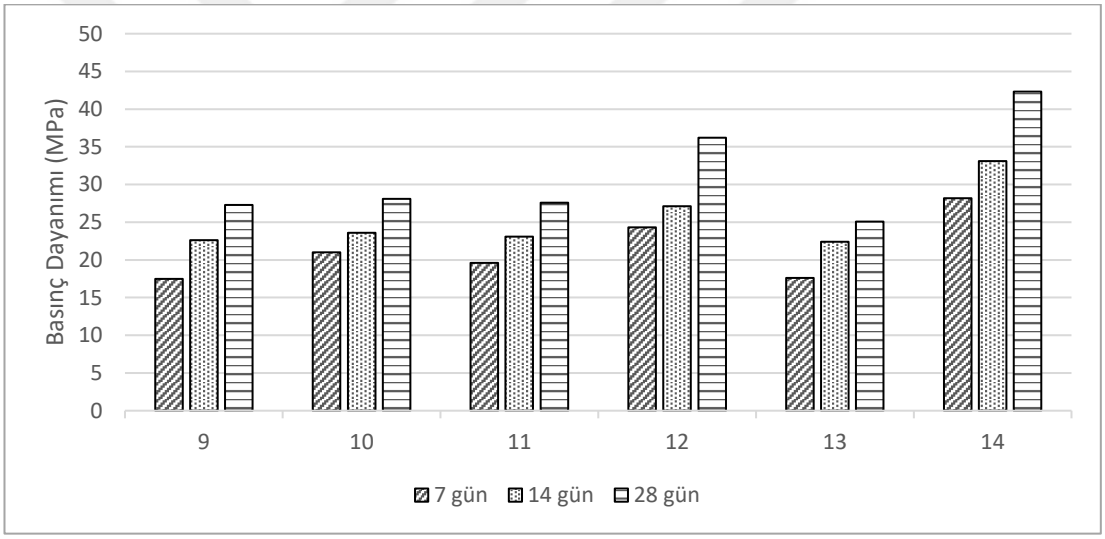
durumunda solüsyon kaynaklı alkali iyonların serbest su içinde numune dışına sızarak reaksiyonların devamlılığını engeller. Bu yüzden nihai amaç söz konusu polimerizasyon reaksiyonlarının olabildiğince hızlı bir biçimde gerçekleşmesini sağlayabilmektir. Bu gibi davranışların sonucunda giriş bölümünde belirtildiği üzere karışımlara, su ile birlikte kısmen tepkimeye girerek hidrate ürünler oluşturabilen ve su küründe daha yüksek dayanım sonuçları gösteren çeşitli puzolanik malzemeler ilave edilmiştir.

Bu bölümde %100 İYA içeren harç karışımlarının geliştirilmesi çalışmalarının ardından, karışımların ortam küründe mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek adına cüruf ve uçucu kül gibi jeopolimer üretiminde literatürde önemli bir yer kaplayan ve sayısız çalışmada alüminosilikat kaynağı bağlayıcı malzeme olarak kullanılan puzolanik özelliklere sahip malzemeler ilave edilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarının bir önceki başlığı altında üretilen %100 İYA içeren karışımların ısıl kür neticesinde oldukça yüksek mekanik özellikler sergilemesi sebebi ile, puzolanik malzemelerin ilave edildiği karışımların basınç dayanım sonuçları ortam ve su küründe tabi tutularak incelenmiştir. Karışımlarda yine agrega/bağlayıcı oranı ve su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak belirlenmiş, farklı aktivatörler önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar neticesinde tekli, ikili veya üçlü kombinasyonlar halinde kullanılmış, puzolanik malzemeler ise gerek jeopolimer matrisin taze özellikleri göz önünde bulundurularak gerekse mineral katkının polimerizasyon performansları dikkate alınarak farklı oranlarda ikame edilmiş optimum özelliklere sahip karışımların elde edilmesi adına çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Karışımların detaylı içerikleri Çizelge 4.17'de, ortam küründe basınç dayanım sonuçları Şekil 4.3'te ve su küründe basınç dayanım sonuçları ise Şekil 4.4'te sunulmuştur.

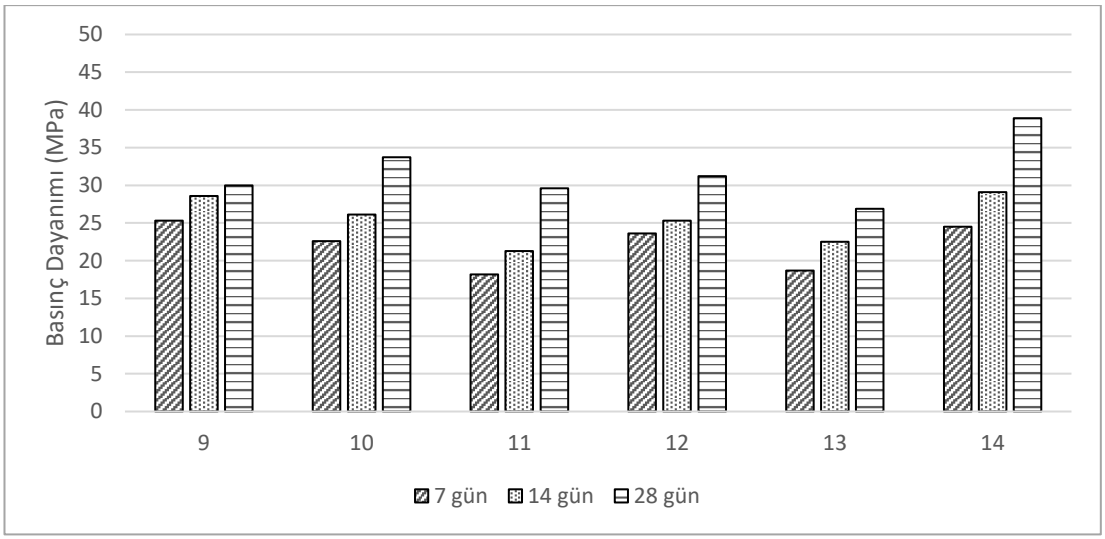
Çizelge 4.17. Çeşitli parametrelerin etkisini incelemek üzere üretilen İYA ve cüruf içeren jeopolimer harç karışımları

No	DT	HT	ÇK	CA	BA	Cüruf	NaOH	Na_2SiO_3	$Ca(OH)_2$	Su	Agrega
9	700	525	875	175	525	700	365,17	0	388,5	1225	1225
10	583	437	730	0	700	1050	365,17	0	388,5	1225	1225
11	700	525	875	175	525	700	487	0	518	1225	1225
12	700	525	875	175	525	700	365,17	730	388,5	786,3	1225
13	700	525	875	350	350	700	608,72	0	388,5	1225	1225
14	700	525	875	175	525	700	243,5	487	388,5	908	1225

Not: Kullanılan tüm malzemelerin birimi gram olarak verilmiştir.



Şekil 4.3. İYA ve cüruf içeren jeopolimer harç karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları



Şekil 4.4. İYA ve cüruf içeren jeopolimer harç karışımlarının su kürü sonrası basınç dayanım sonuçları

İYA karışımlarına çeşitli oranlarda cüruf eklenerek üretilen numuneler 7, 14 ve 28 gün süreyle ortam kürüne bırakılarak basınç dayanım testlerine tabi tutulmuş ve sonuçlar Şekil 4.3'te sunulmuştur. Sonuçlara incelendiğinde kür süresindeki artışın tüm karışımlar için basınç dayanımlarında olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Jeopolimer karışımlarında 12 ve 14 numaralı karışımlar dışında kür süresindeki artış belirli bir trend oluşturmuş ve basınç dayanımlarında orantılı bir artış tespit edilmiştir. 12 ve 14 numaralı karışımlarda ise basınç dayanımları 14 günden 28 güne geçerken, 7 günden 14 güne gösterdiği dayanım artışından daha yüksek bir dayanım artışı sergilemiştir. Söz konusu bu davranışın alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit karışımına ek olarak sodyum silikatın da dahil edildiği numunelerde görülmesi önceki bölümde anlatıldığı gibi üç aktivatör arasında sodyum silikatın daha efektif çalışması ile ilişkilendirilebilir. Alüminosilikat kaynağı olarak %100 İYA'nın kullanıldığı ve ortam koşullarında kür edilen karışımlardan elde edilen sonuçlar da göz önünde bulundurulduğunda cüruf ilavesinin ortam kürüne katkısının ihmal edilemeyecek biçimde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca üç farklı aktivatörün de birlikte kullanıldığı karışımların (12 ve 14 numaralı karışımlar) 28 günlük basınç dayanımları sodyum silikat içermeyen karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. 28 günlük kür süresinin ardından birçok numunenin basınç dayanımı 30

MPa seviyelerine yaklaşırken sodyum silikat kullanılan 3 aktivatörün kombinasyonu ile aktifleştirilmiş karışımlarda 35 MPa seviyelerini geçen dayanım sonuçları görülmüştür.

İYA ve cüruf içeren numuneler aynı şekilde 7, 14 ve 28 gün boyunca su kürüne bırakılarak basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur ve test sonuçları Şekil 4.4'te sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde kür süresindeki artışın tüm karışımlar için basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilediği açıkça görülmektedir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımlara dair sonuçlar incelendiğinde, aktivatör miktarındaki değişimin basınç dayanımı üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı sonuçların hemen hemen aynı seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Söz konusu karışımlarda cüruf miktarındaki artış sonucu 28 günlük dayanımda diğer karışımlara göre yüksek bir değer elde edilse de kayda değer bir fark görülmemiştir. Cüruf miktarı sabit tutulduğunda sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksitin kullanıldığı karışımlarda aktivatör miktarı arttırıldığında, erken dayanımın düştüğü, ileri yaş dayanımlarında ise büyük bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Sodyum hidroksitin arttırıldığı ve kalsiyum hidroksitin sabit tutulduğu karışımlarda ise dayanımlarda genel olarak düşüş gözlemlenmiştir. Karışımlara sodyum silikat ilave edildiğinde ise basınç dayanımlarında genel olarak bir artış gözlemlenmiştir. Buna ek olarak üç farklı aktivatörün birlikte kullanıldığı karışımlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat miktarı düşürüldüğünde dayanımlarda gözle görülür bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum sodyum silikat ve sodyum hidroksitin birlikte kullanıldığı durumlarda karışım oranları için optimum bir değerin varlığına işaret etmektedir. Söz konusu optimum karışım oranlarının tespiti adına çalışmalara devam edilmektedir. Bununla birlikte cüruf kullanımının numunelerin su kürü dayanımlarına olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür.

İYA esaslı jeopolimer harç karışımları geliştirilmesi kapsamında bu bölüme kadar bağlayıcı oranları, alkali aktivatör türü ve oranları, puzolanik malzeme ilavesi gibi birçok parametrenin jeopolimer numunelerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Birbirleri arasında optimum karışım oranlarının ve bu karışımlara uygulanan kür koşullarının etkisi üzerine önemli bir bilgi birikimi ve tecrübe kazanılmıştır. Elde edilen bu veriler ışığında tez kapsamında üretilecek EGC karışımlarının en iyi

performanslarını sergilemesi için jeopolimer harç karışımlarının yanı sıra, çeşitli lif ilavesinin etkisini incelemek de oldukça önemli bir husustur. Bu bağlamda çalışma kapsamında elde edilen en iyi karışımlara bir takım lif ilave edilerek kompozit üretimi gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

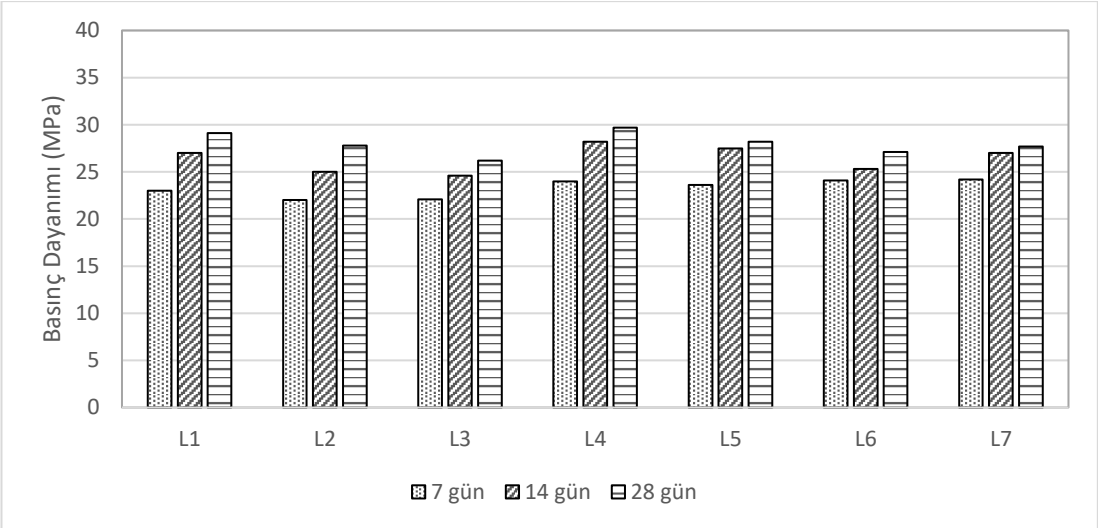
4.3. Jeopolimer Kompozit Karışımlarının Geliştirilmesi

Farklı tipte liflerin alkali aktivatör solüsyonuna direnci akabinde ısıl küre karşı davranışının incelendiği testlerde liflerin bazılarının fiziksel değişiklikler göstermesi, bazılarının değişiklik göstermesine rağmen stabilitesini koruması ya da tamamen yok olması neticesinde her ne kadar liflerin bir kısmının çalışmalara dahil edilmemesi planlansa da jeopolimer matris içinde hamur tarafından korunan liflerin farklı davranışlar sergileyebilme ihtimali göz önünde bulundurularak daha önce gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde optimum performans sergileyen karışımlar baz alınarak farklı tipte liflerin hacimce %2 oranında takviyesi ile jeopolimer kompozitler üretilmiştir. Bu bağlamda öncelikli olarak %100 İYA içeren jeopolimer kompozit karışımların içerikleri Çizelge 4.18'de, karışımların ortam küründe basınç dayanım sonuçları Şekil 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.18. %100 İYA içeren jeopolimer kompozit karışımlarının içeriği

No	DT	HT	ÇK	CA	BA	NaOH	$Ca(OH)_2$	Su	Agrega	Lif	Lif
L1	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	PVA-1
L2	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	PVA-2
L3	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	PVA-3
L4	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	PE
L5	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	PP-1
L6	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	PP-2
L7	700	525	875	350	1050	608,65	388,5	1225	1225	54	NM

Not: Kullanılan tüm malzemelerin birimi gram olarak verilmiştir

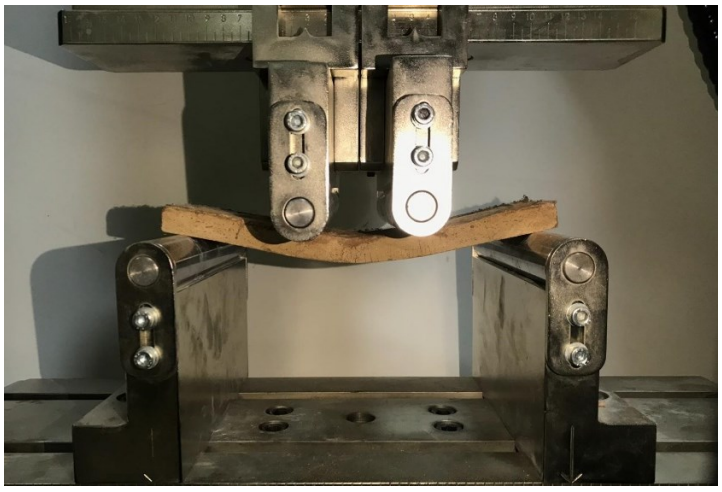


Şekil 4.5. %100 İYA içeren jeopolimer kompozit karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları

Ortam kürü sonrasında elde edilen basınç dayanımları incelendiğinde kompozitlerin 7 gün sonunda 22-24 MPa, 14 gün sonunda 25-28 MPa ve 28 gün sonunda ise 26-29 MPa arasında basınç dayanım sonuçlarına sahip olduğu ve nihai dayanımlarına 7 gün sonunda ulaşarak bu dayanımlarını ufak artışlarla koruduğu açıkça görülmektedir. Ek olarak PP-2 lifinin kullanıldığı kompozitte 14 günden 28 güne geçişte dayanım kaybı gözlemlenmiştir. NM lifinin kullanıldığı kompozitte 7 günlük basınç dayanımı 14 günlüğe kıyasla yüksek çıksa da 28 günlük basınç dayanımı 33 MPa'ya ulaşarak 28 gün sonunda en iyi sonuç veren 3 karışım olarak yer almaktadır. PE lif takviyeli jeopolimer kompozitlerin basınç dayanımı ise tüm karışımlar arasında en yüksek sonuçları vermiştir. Lif katkısının basınç dayanımlarına az da olsa olumlu etkisi olduğu bilinse de PVA-2 ve PVA-3 liflerinin alkali solüsyon içindeki davranışı göz önünde bulundurulduğunda dayanıma herhangi bir katkı yapmadığı kabul edilebilir.

Ortam koşullarında kür edilen jeopolimer kompozitler üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanım testleri sonucunda dayanım sonuçları Şekil 4.8'de sunulmuştur. Liflerin alkali aktivatör çözeltide davranışı ve akabinde ısıl kür neticesinde gösterdiği fiziksel değişikliklerle ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda PVA-2 ve PVA-3'ün fiziksel stabilitesini koruyamayarak şiddetli seviyede bozunmaya uğradığı belirtilmiştir. Bu

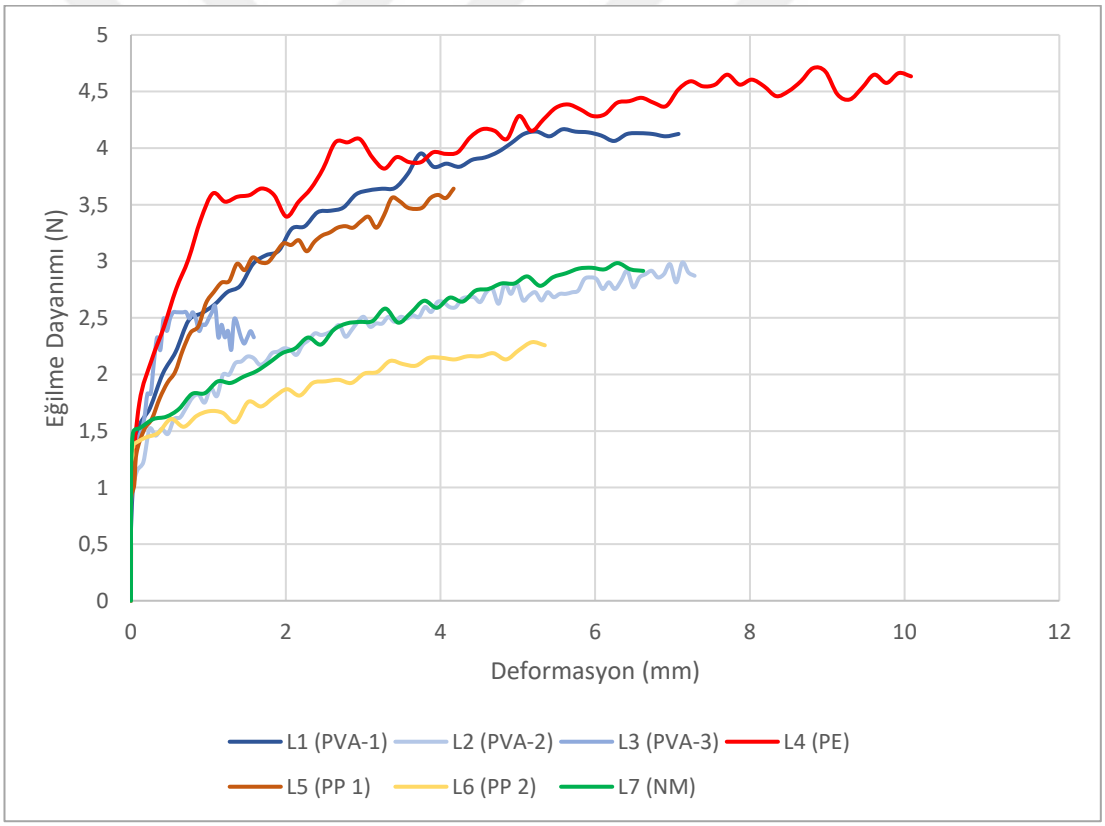
durumun PVA-3 lifinin kullanıldığı kompozitin davranışının temel nedeni olduğu ve lifin zarar görerek eğilme dayanımına sağlayacağı katkının azaldığı Şekil 4.8'de açıkça görülmektedir. L3 karışımı dikkate alınmayacak seviyede bir sünek davranış sergilemiş ve çoklu çatlak oluşumuna müsaade etmeden kırılmıştır. PVA-2 lifinin kullanıldığı karışım ise en az Nylomono lifin kullanıldığı karışım kadar eğilme performansı sergilemiştir. PVA-2 lifinin bu performansı göstermesi, jeopolimer matris tarafından sarılan lifin matrise homojen bir biçimde dağılması neticesinde alkali aktivatör ve sıcaklığın lif üzerindeki olumsuz etkilerini telafi edebilmesi ile ilişkilendirilebilir. En iyi eğilme dayanımını sergileyen karışımlar ise sırasıyla PE, PVA-1 ve PP-1 kullanıldığı karışımlardır. Bu üç karışım arasında Polietilen kullanılarak üretilen kompozitin ECC'nin karakteristik özellikleri olan yüksek matris tokluğu ve çoklu çatlak oluşturma kabiliyetini yansıtabildiği açıkça görülmektedir. PE üzerinde gerçekleştirilen eğilme testi ve numunenin fiziksel kondisyonu Şekil 4.6'da gösterilmiştir. PE kullanılarak üretilen kompozitler lif ve jeopolimer matrisin uyumlu çalışması ve oluşan matris yapının yüksek bir tokluğa sahip olması sebebi ile çoklu ve düzenli bir desende mikro çatlaklar oluşturarak yüksek seviyede eğilme deformasyonu sergilemiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6. PE numunesinin eğilme testi altında davranışı



Şekil 4.7. PE takviyeli jeopolimer kompozitin çoklu çatlak oluşturma davranışı



Şekil 4.8. %100 İYA kullanılarak farklı lif takviyeleri ile üretilen jeopolimer kompozitlerin eğilme dayanım sonuçları

Çalışma kapsamında EGC üretimi amacıyla bir önceki bölümde %100 İYA kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda 7 farklı lif kullanılarak jeopolimer kompozitler üretilmiş ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında çalışmanın bu bölümünde iyi performans gösterdiği düşünülen liflerin tek başına ya da kombine edilerek kullanıldığı kompozit üretimleri gerçekleştirilmiştir. Farklı kür koşullarının dayanıma etkilerinin incelendiği önceki bölümlerde mineral katkı olarak cürufun kullanıldığı numunelerin ortam ve su kürü neticesinde iyi performans göstermesi ve bu çalışmalara ek olarak ortam kürünü desteklemek adına yapılan çalışmalarda sodyum hidroksit ve sodyum silikatın aktivatör olarak birlikte kullanıldığı durumlarda iyi sonuçların elde edilmesi sebebi ile çalışmanın bu bölümünde aktivatör olarak $NaOH$-Na_2SiO_3 birlikte kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerde alüminosilikat kaynağı bağlayıcı malzemeler daha önce belirlenen optimum kullanım oranlarına göre kullanılmış, su/bağlayıcı oranı sodyum silikat çözeltisinin su muhtevası da göz önünde bulundurularak 0,35 olarak belirlenmiştir. Agrega olarak ise 0,85-0,100 mm boyut aralığında agrega 0,35 agrega/bağlayıcı malzeme oranında karışımlara katılmıştır. Söz konusu jeopolimer kompozit karışımlarında %100 İYA kullanılarak üretilen kompozitlerde diğer liflere göre daha iyi performans gösteren PVA-1, PE ve NM liflerinin kullanımına odaklanılmış bu liflerin tek başına kullanıldığı 3 karışıma (K1, K2, K3) ek olarak liflerin iki kombinasyonlarla hibrit edildiği karışımlar (K4, K5, K6) da hazırlanarak çeşitli mekanik performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda üretilen karışımların içerikleri Çizelge 4.19'da sunulmuştur.

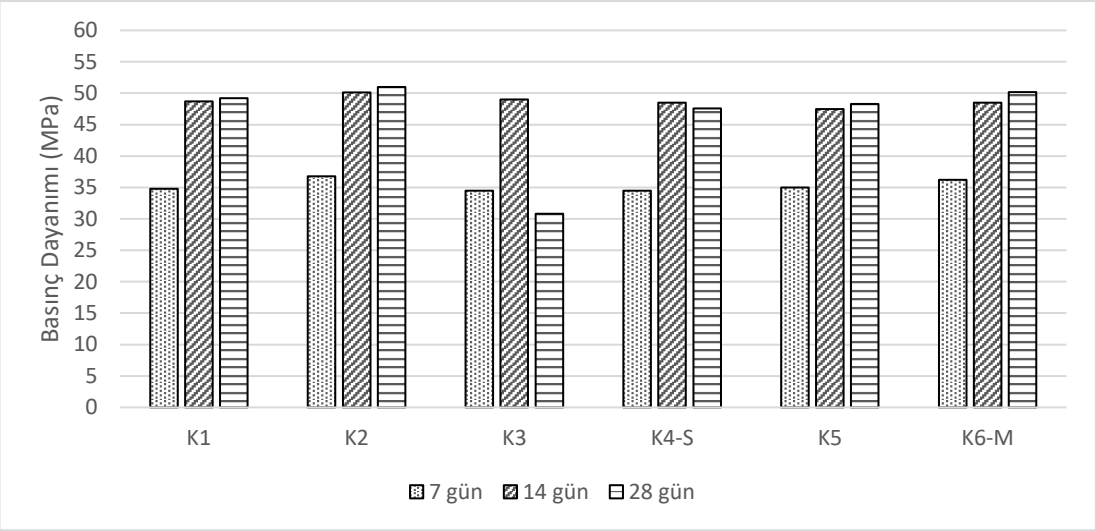
Çizelge 4.19. İYA ve cüruf içeren kompozit karışımlarının içeriği

No	DT	HT	ÇK	CA	BA	Cüruf	NaOH	Na_2SiO_3	Agrega	Lif	Lif
K1	700	525	875	175	525	700	365,2	730	1225	54	PVA-1
K2	700	525	875	175	525	700	365,2	730	1225	54	PE
K3	700	525	875	175	525	700	365,2	730	1225	54	NM
K4	700	525	875	175	525	700	365,2	730	1225	54	PVA-1 NM
K5	700	525	875	175	525	700	365,2	730	1225	54	PE+NM
K6	700	525	875	175	525	700	365,2	730	1225	54	PVA1-PE

Not: Kullanılan tüm malzemelerin birimi gram olarak verilmiştir. Su/bağlayıcı oranı sodyum silikat solüsyonunun muhteva ettiği su miktarı göz önünde bulundurularak 0,35 olarak belirlenmiştir.

Ortam koşullarında kür edilen kompozitlerin basınç dayanım sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.9) %100 İYA kullanılarak üretilen kompozitlere kıyasla oldukça yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Bu durum cürufun gerek jeopolimerizasyon için gerekse kısmen kendiliğinden dayanım kazanma özelliği sebebi ile oldukça efektif bir bağlayıcı olması ile ilişkilendirilebilir. Ek olarak yüksek oranlarda sodyum silikat kullanımının jeopolimer matriste siliko birimlerinin (-Si-O-Si-O-) oluşumunu doğrudan tetiklemesi de bu durumun sebeplerinden biridir. Her ne kadar alüminosilikat kaynağı malzeme jeopolimer matriste silisyum için en önemli kaynak olarak yer alsa da mevcut alkali aktivatörün bağlayıcı malzemeyi tam olarak çözememesi durumunda söz konusu silisyum içeriği reaksiyonlarda efektif bir rol üstlenememektedir. Sodyum silikat doğal bir silisyum kaynağı olarak sodyum hidroksit ile birlikte kullanıldığında jeopolimer matris oluşumuna yüksek performanslı ve hızlı bir katkı sağlamaktadır. 7 günlük ortam kürü neticesinde elde edilen basınç dayanım sonuçları incelendiğinde basınç dayanımlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir (Şekil 4.9). 14 günlük basınç dayanımları 7 günlüklere kıyasla kayda değer artışlar göstermiştir. En düşük dayanım artışı %34 ile K6 karışımında en yüksek artış ise %42 ile K3 karışımdan elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanım sonuçları incelendiğinde ise K3 ve K4 karışımda düşük seviyelerde basınç dayanım kaybı görülmüş diğer karışımlarda ise ufak dayanım artışları tespit edilmiştir. Söz konusu

dayanım farkları lif özelliklerine, liflerin matris içinde homojen dağılma derecesine ve lif jeopolimer matris arasında oluşan kimyasal bağ dayanımına atfedilebilir.



Şekil 4.9. İYA ve cüruf içeren kompozit karışımlarının ortam kürü sonrası basınç dayanım sonuçları

İYA ve cürufun birlikte kullanıldığı kompozitler üzerinde gerçekleştirilen 28 günlük ortam kürünün ardından eğilme testlerine dair sonuçlar Şekil 4.12'de verilmiştir. Bir önceki bölümde %100 İYA ile üretilen kompozitlerin eğilme dayanım sonuçları da göz önünde bulundurulduğunda PE kullanılarak üretilen K2 karışımı en yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Bu sonuç PE lifinin jeopolimer matrisle ile oldukça uyumlu bir biçimde çalıştığını bu uyumun jeopolimer matris tokluğunu arttırarak yüksek deformasyon kapasitesi ve çoklu çatlak oluşturma kabiliyetini desteklediği açık bir biçimde görülmektedir. Düşük maliyeti ve eğilme dayanımına ortalama seviyede katkı sağlaması sebebi ile seçilen Nylomono lifin tek başına kullanıldığı kompozitler ise düşük eğilme dayanımı performansı sergilese matrisin tokluk seviyesi göz önüne alındığında söz konusu lifin çalışmalarda kullanılabilir seviyede performanslar gösterdiği söylenebilir. Sadece PVA-1 lifinin kullanıldığı kompozitler ise PE lifine göre düşük NM lifine göre ise yüksek performans göstermiş çoklu çatlak oluşumuna müsaade eden bir matris yapısının oluşmasında önemli seviyede katkı sağlamıştır.

Söz konusu bu üç lifin bağlayıcı olarak %100 İYA kullanılan kompozitlerde gösterdiği performans ve İYA ile cüruf kombinasyonunun bağlayıcı olarak seçildiği kompozitlerde gösterdiği performans kıyaslandığında %100 İYA'lı karışımlarda PE, PVA-1 ve NM sırasıyla 4,7, 4,17 ve 2,98 MPa eğilme dayanımına sahipken İYA ve cürufun birlikte kullanıldığı karışımlarda eğilme dayanımları yine aynı sıra ile 8,36, 5,83 ve 4,66 MPa eğilme dayanım performansı göstermiştir. Söz konusu dayanım artışları jeopolimer matrisin cüruf kullanılarak desteklenmesi neticesinde daha sık ve yoğun bir yapıya ulaşması ile ilişkilendirilebilir. Ortam koşullarında kür edilen bağlayıcı fazında hibrit bu kompozitlerin bu denli yüksek performanslar göstermesi aktivatör tipi ile de doğrudan ilgidir. Bu durum sodyum silikatın sodyum hidroksit ile uyumlu bir biçimde çalışması ve yüksek oranlarda sodyum silikat kullanımının jeopolimer matriste siliko birimlerinin (-Si-O-Si-O-) oluşumunu desteklemesinden ileri gelmektedir.

Liflerin ikili kombinasyonlarla hibrit bir biçimde kullanıldığı kompozitlerde ise PVA-1 ve PE lifinin birlikte kullanıldığı kompozit şaşırtıcı bir biçimde daha düşük eğilme dayanımı performansı sergilemiştir. Bu durum lif özelliklerinden kaynakları farklılıkların hibritleme sonrası birbirini kompanse etmemesi ve uyumlu bir biçimde çalışmamasından kaynaklı olabilir. Söz konusu durum PVA-1-NM hibritinde de gözlemlenmiştir. PVA-1 ve NM liflerinin kullanıldığı kompozitte eğilme dayanımı bakımından yeterli seviyelere ulaşılsa da kompozit şekil değiştirme sertleşmesi göstermeden kırılmıştır. Her ne kadar liflerin hibritleme sonrası uyumsuz çalışabilme ihtimali göz önünde bulundurulsa da kompozitin diğer kompozitler gibi şekil değiştirme sertleşmesi göstermeden düşük bir tokluk seviyesinde kırılması test cihazında veya karışım safhasında yaşanacak deneysel bir hatanın varlığına da işaret edebilmektedir.

Tipik ECC karışımları yoğun ve sık matris yapısından ötürü yüksek matris tokluğuna sahiptir. Lif ile matris arasında kurulan bağ dayanımının yüksek olması kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesi gösterip çoklu mikro çatlak oluşturma kabiliyetine sahiptirler. ECC kompozitlerin bu davranışına uygun davranan ve şekil değiştirme sertleşmesi göstererek sınırlı genişlikte düzenli dağılmış çoklu çatlaklar oluşturan PE-NM hibrit lifli kompozit tüm kompozitler arasında en yüksek ikinci eğilme dayanımına

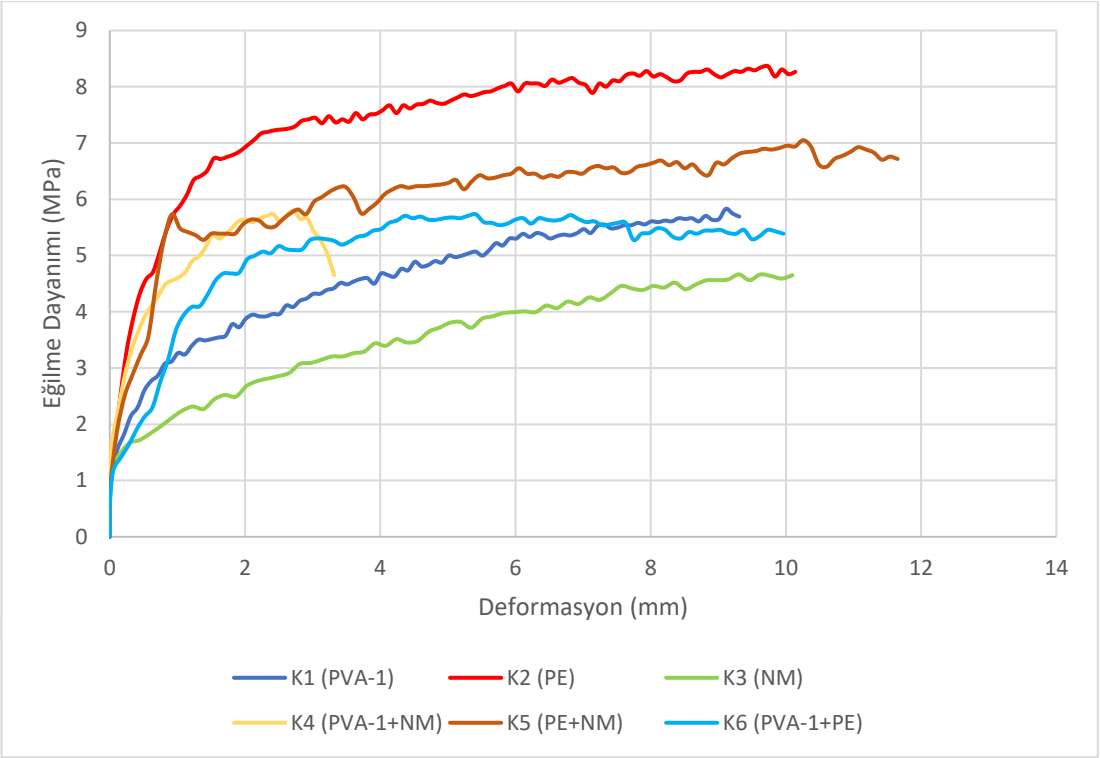
sahiptir. Polietilen lifinin tek başına kullanıldığı kompozite kıyasla daha düşük performans sergilese de Nylomono lifinin gerek maliyet gerekse temin edilme kolaylığı gibi avantajlarından ötürü Polietilen lifle birlikte kullanılması jeopolimer bazlı kompozit üretiminde daha efektif bir seçenek olma özelliği taşımaktadır. PE-NM hibrit lifli K5 kompozitlerine dair 28 günlük kürün ardından eğilme testi davranışı ve çatlak paterni Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.10. PE-NM hibrit lifli K5 kompozitin eğilme testi altında davranışı

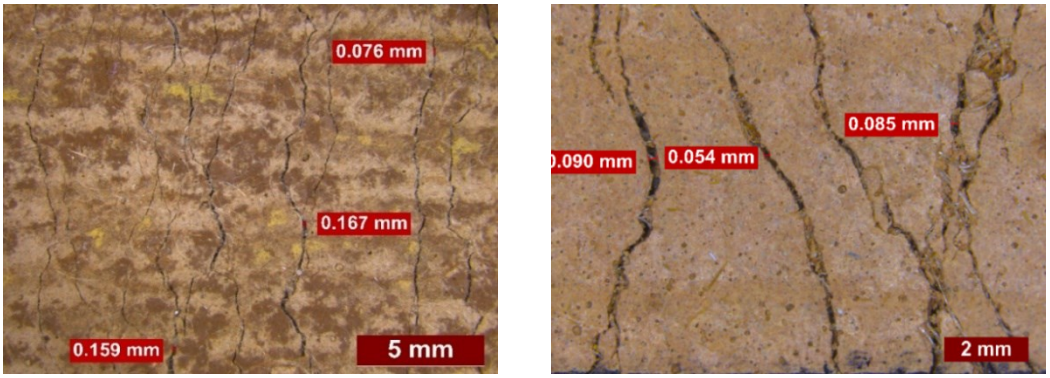


Şekil 4.11. PE-NM hibrit lifli K5 kompozitin çoklu çatlak oluşturma davranışı



Şekil 4.12. İYA ve cüruf kullanılarak farklı lif takviyeleri ile üretilen jeopolimer kompozitlerin eğilme dayanım sonuçları

Çalışma kapsamında üretilmesi hedeflenen jeopolimer bağlayıcılı lif donatılı kompozitlerin (EGC) ECC kompozitlerle benzer özellik ve performans gösterebilmesi hususunda ECC'nin sahip olduğu yüksek matris tokluğu sayesinde şekil değiştirme sertleşmesi gösterme ve akabinde çoklu mikro çatlak oluşturabilme özelliğinin elde edilmesi adına gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında önceki bölümlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Jeopolimer harç karışımların uygulanan mekanik testler sonucunda oluşan çatlak genişlikleri genel olarak 350 µm'u geçmemekle beraber düzenli bir dağılım sergilemektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Jeopolimer harç karışımlarından elde edilen mikro çatlaklara dair görseller

4.4. Nihai EGC Tasarımlarının Geliştirilmesi

Çalışma kapsamında bu bölüme kadar olan süreçte İYA bazlı atık malzemelerin bağlayıcı ve agrega olarak kullanılmasıyla çimento ve beton sistemlerine alternatif yeni nesil "yeşil" yapı malzemeleri olabilme kapasitesi üzerine yapılan çalışmalardan önemli sonuçlar elde edilmiştir. Hem hamur bazında hem de ince agrega ilavesiyle üretilen harç bazında önemli mekanik özellikler sergileyen bu malzemeler ile, daha sonra çeşitli liflerin eklenmesiyle kompozit karışımları tasarlanmış, tasarlanan bu karışımların eğilme dayanımlarına, şekil değiştirme ve çatlak oluşturma davranışlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre geliştirilen bu kompozitlerin geleneksel ECC malzemelerine benzer şekilde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterebildiği, yükleme altında çoklu mikro çatlaklar oluşturabildiği gözlemlenmiştir. Tüm bu verilerden elde edilen tecrübe ve çıktılar sonucunda, tez kapsamında geliştirilecek EGC malzeme için bu bölümde nihai olarak 6 adet kompozit karışımı tasarlanmıştır. Tasarlanan 3 karışım %100 İYA içerecek şekilde, diğer 3 karışım ise İYA ve cüruf içerecek şekilde dizayn edilmiştir. Bu 3'er karışımda ise kendi aralarında sodyum hidroksit ve sodyum silikat ikili kombinasyonu, sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit ikili kombinasyonu ve sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit üçlü kombinasyonu olmak üzere tasarlanmıştır. Karışımdaki bağlayıcı-su-agrega-aktivatör miktarları önceden yapılan çalışmalardan edinilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Bu şekilde 6 karışımın yapılmasının ana nedeni, hem İYA atıklarının

herhangi bir çimento veya puzolanik malzeme ilavesi olmadan nihai performanslarını ve puzolanik malzeme ilavesiyle sergilediği nihai performansını ölçmek, hem de geliştirilecek EGC karışımlarının maliyet bakımından en önemli parametre olan alkali aktivatörlerin tipi ve miktarı üzerine performans farklılıklarını gözlemlemektir. Ayrıca kompozit malzemeler yukarıdaki bölümlerde elde edilen sonuçlara göre PE+NM hibrit lif ile üretilmiştir. Tasarlanan bu karışımların 7,28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda çeşitli mekanik özellikleri incelenmiştir. Karışımların içerikleri Çizelge 4.20'da sunulmuştur. Karışım tasarımları incelendiğinde, su/bağlayıcı oranı ve agrega/bağlayıcı oranı 0,35 olmak üzere sabit tutulmuştur. Bu oranı sağlamak için içerisinde yaklaşık %65 oranında su ihtiva eden sodyum silikat içeren karışımların su hesabı 0,35 su/bağlayıcı oranının sağlayacak şekilde yapılmıştır.

Çizelge 4.20. Nihai EGC karışımlarının içeriği

Malzemeler	**Karışım Dizaynı, kg/m^3**					
	S1	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S6**
DT	209,6	244,3	205,9	240,1	193,8	226
HT	157,2	183,2	154,5	180,1	145,4	169,5
ÇK	262	305,4	257,4	300,1	242,3	282,5
CA	104,8	104,7	103	102,9	96,9	96,8
BA	104,8	209,4	103	205,8	96,9	193,7
Cüruf	209,6	-	205,9	-	193,8	-
NaOH	109,4	109,3	107,4	107,4	168,6	168,4
Na_2SiO_3	218,8	218,6	214,8	214,8	-	-
$Ca(OH)_2$	-	-	38,1	38,1	107,6	107,5
Su	224,6	224,4	220,7	220,6	339,2	339
Agrega	366,8	366,5	360,4	360,1	339,2	339
PE	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
NM	10	10	10	10	10	10

Nihai olarak geliştirilen 6 farklı EGC karışımının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla akış konisi ile yapılan deneylerin sonucu Çizelge 4.21'de sunulmuştur.

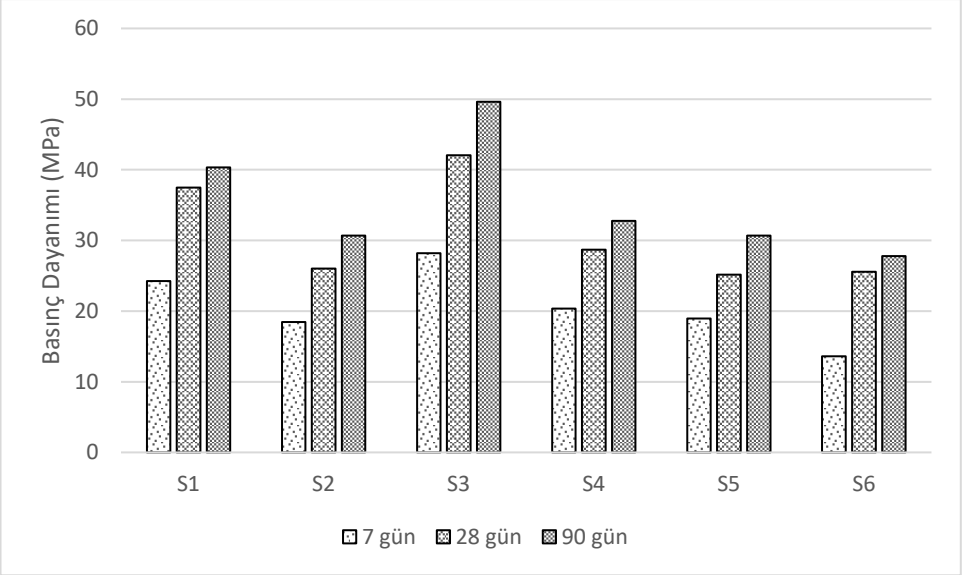
Çizelge 4.21. EGC karışımlarının reolojik özellikleri

Kod	EGC (Lifsiz)		EGC
	Akış süresi (sn)	Yayılma çapı (mm)	Yayılma çapı (mm)
S1	316.2	23.7	12.1
S2	264	25.5	12.3
S3	368.4	24.7	11.9
S4	288	25.8	12.4
S5	-	14.5	10.2
S6	-	12.1	10.5

Çizelge 4.21'de sunulan sonuçlara göre, lifsiz olarak üretilen EGC hamur karışımların akış sürelerine bakıldığında S5 ve S6 kodlu karışımların kıvamları çok koyu olduğundan bir sonuç alınamamıştır. Bununla birlikte sonuç alınan diğer dört karışıma bakıldığında, cüruf içeren S1 ve S3 kodlu karışımların da akış süresi cüruf içermeyen ve düşük miktarda $Ca(OH)_2$ içeren S2 ve S4 kodlu karışıma göre yüksek çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre karışımların akış süresini etkileyen en önemli parametrenin, karışımda kullanılan malzemelerin kalsiyum içeriği olduğu açıkça görülmektedir. Literatürde yapılan araştırmalarda da kalsiyum içeriği fazla olan karışımların jeopolimerizasyon sürecinde hızlı tepkime vererek işlenebilirliğinde ani düşüşler ve hızlı priz alma gibi davranışlar görülmektedir. Cheng ve Sarkar (1994), yaptıkları bir çalışmada sisteme %1 $Ca(OH)_2$ ilavesiyle dahi kısa sürelerde yayılma çapı değerlerinde önemli düşüşler olduğunu raporlamışlardır. EGC karışımlarının akış sürelerine benzer şekilde yayılma çapı da karışımların kalsiyum içeriğinden oldukça etkilenmiştir. Karışımların reolojisini ölçmek adına yapılan bu çalışmada, EGC hamur karışımlarına lif eklenerek üretilen jeopolimer kompozitlerin de yayılma çapı değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre lif içeren ilk 4 EGC karışımının (S1,S2,S3,S4) yayılma çapı, lif içermeyen karışımlara göre yaklaşık yarı yarıya bir düşüş sergilemiştir. Bu durum bilindiği üzere lif donatılı kompozit malzemelerin

düşük işlenebilirliğe sahip olmasıyla ilişkilidir. S5 ve S6 kodlu karışımların lifsiz üretiminde ise hali hazırda düşük olan yayılma çapı, lif kullanılarak üretilmesiyle bir nebze daha düşmüştür.

Nihai olarak geliştirilen 6 farklı EGC karışımlarının, 50x50 mm boyutlarında küp numuneler üretilmesi sonucu 7,28 ve 90 günlük ortam kürü sonrasında elde edilen basınç dayanım sonuçları Şekil 4.14'de sunulmuştur.



Şekil 4.14. EGC karışımlarının basınç dayanım sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde, çalışma kapsamında yapılan ön çalışmalardan edinilen bilgi ve tecrübeler ışığında beklenildiği gibi hem üç alkali aktivatörün birlikte kullanıldığı, hem de kalsiyum bazlı takviye malzeme olarak cüruf içeriğine sahip S3 kodlu karışım 7,28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre tüm numunelerden yüksek performans sergilemiştir. Bu durum bilindiği üzere kalsiyum türlerinin yüksek fırın cürufundan çözülmesi ile, jeopolimerizasyon reaksiyonlarının başlangıcından itibaren C-S-H tipi jellerin oluşumu ile desteklenir, alüminosilikat malzemenin de daha sonra yüksek bir Al jeli oluşturmak üzere reaksiyona girerek matriste bir arada bulunan N-A-S-H ve C-S-H jelleri oluşmuş olur (Yip ve ark., 2005). Oluşan bu iki tip reaksiyon

ürünleri, matriste oldukça güçlü, homojen ve az boşluklu bir yapı oluşturarak, bu çalışmada olduğu gibi yüksek basınç dayanımı veren numuneler üretilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca bu seride rastlanılan bir diğer önemli sonuç ise kür süresinin 28 güne çıkmasıyla numunelerin basınç dayanımları, 7 günlük kür süresine göre önemli artışlar göstermiştir. Bu sonuç ise yüksek fırın cürufunun, ileriki yaşlarda karışımda serbest halde bulunan ve buharlaşmayan suyun varlığında sürekli devam eden hidratasyon süreci sonucu oluşturduğu ürünler ile basınç dayanımına uzun vadelerde dahi katkı sağlayabilmesini göstermektedir.

28 günlük ortam kürünün ardından 42 MPa'lık bir basınç dayanımına sahip olan S3 kodlu bu karışım, yapısal kabul edilebilecek sınırlar içerisinde kalarak çimentoya alternatif yeni nesil "yeşil" yapı malzemeleri geliştirme hususunda çalışma kapsamında önemli bir sonuç olmuştur. Aynı zamanda 90 günlük ortam kürünün ardından, tüm bu seri içerisinde 49,6 MPa ile en yüksek basınç dayanım performansı sergilemiştir.

Cüruf içermeyen diğer karışımlara bakıldığında, tamamı İYA bazlı malzemelere sodyum hidroksit ve sodyum silikatın alkali aktivatör olarak birlikte kullanılması ile üretilmiş S2,S4 ve S6 kodlu karışımlar, tüm seri içerisinde en düşük dayanım sonuçları göstermiştir. Bu seride gözlemlenen önemli sonuç, karışımlara ne cüruf ne de $Ca(OH)_2$ gibi yüksek oranda kalsiyum içeriğine sahip malzemeler eklenmediği için, nihai ürünün matrisinde yüksek oranda bir C- kaynaklı yapıya rastlanılmamış, bu da ortam kürüne bırakılan yüksek alüminosilikat içerikli %100 İYA malzemelerinden üretilmiş karışımların basınç dayanımlarında istenilen seviyelere ulaşılamamasına neden olmuştur. Çalışmanın nihai hedeflerinden olan yeterli mekanik performansa sahip İYA bazlı EGC malzemenin geliştirilmesi kapsamında, kompozit malzemenin temelini oluşturacak harç karışımlarında yüksek dayanımlar elde etmek üzere karışımlara yüksek kalsiyum kaynağı olan yüksek fırın cürufu ve $Ca(OH)_2$ gibi malzemeler eklenmiştir. Jeopolimerizasyon ürünlerine ek olarak, kalsiyum kaynağı varlığında, ikincil bir hidratasyon ürünü olarak C-S-H gibi matriste güçlü yapılar oluşturularak hedeflenen yüksek basınç dayanımlarına ulaşmak amaçlanmıştır. Ancak burada dikkate alınması gereken bir nokta, S2 ve S4 kodlu, tamamı İYA bazlı malzeme ile üretilen numuneler 90 günde 30 MPa basınç dayanım sınırını geçerek, herhangi bir

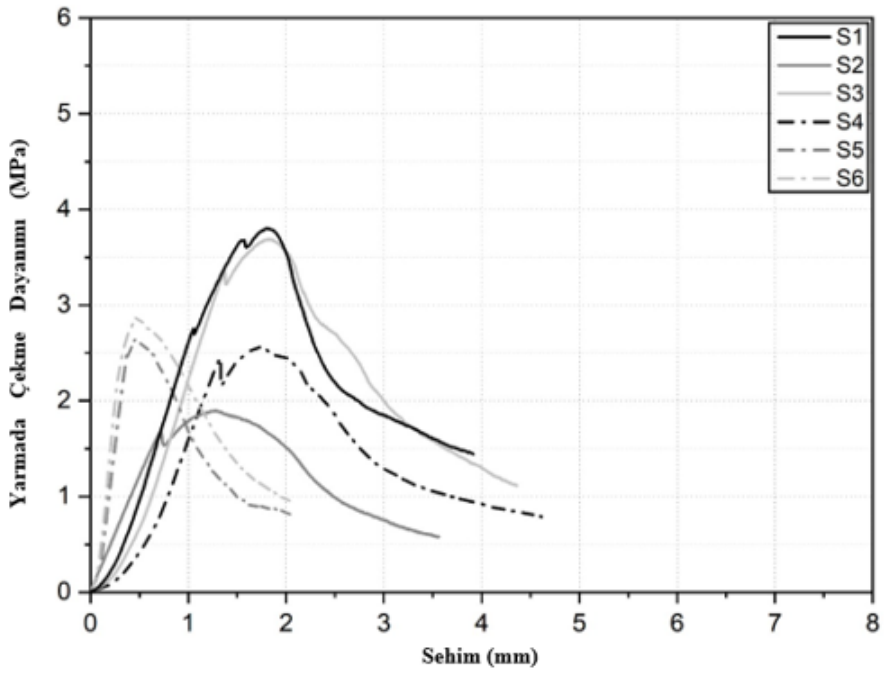
ek malzemeye ihtiyaç duymadan da İYA bazlı malzemelerin yapı malzemesi olabilme potansiyelini göstermiştir. Ancak sonuçlarda görüldüğü üzere, endüstriyel bir atık malzeme olan cüruf da ilave edildiği karışımların mekanik özelliklerini bir hayli geliştirmiş, bu da çalışma kapsamında çimento kullanılmadan yeşil bağlayıcı malzeme geliştirme amacının dışına çıkılmadığını göstermiştir.

Bununla birlikte genel olarak $Ca(OH)_2$ ilavesi olan karışımların dayanım olarak diğer karışımlara göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle cüruf içeren karışımlarda Ca(OH)2'nin de kullanılması bu performans artışını daha belirgin kılmıştır. Bilindiği üzere, çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan iki üründen birisi olan $Ca(OH)_2$, çeşitli puzolanik davranışa sahip malzemelerin (yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, metakaolin vs.) sisteme dahil edilmesiyle, bu malzemeler ile ileriki yaşlarda tepkimeye girerek daha fazla C-S-H ürünü 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-A-S-H ve C-S-H gibi güçlü ürünler oluşturmaya neden olmasından dolayı eklenen $Ca(OH)_2$ 'un karışımın mekanik özelliklerine katkı yapacağı, literatürdeki bazı çalışmalarda da kanıtlanmıştır (Cheng ve ark., 1992).

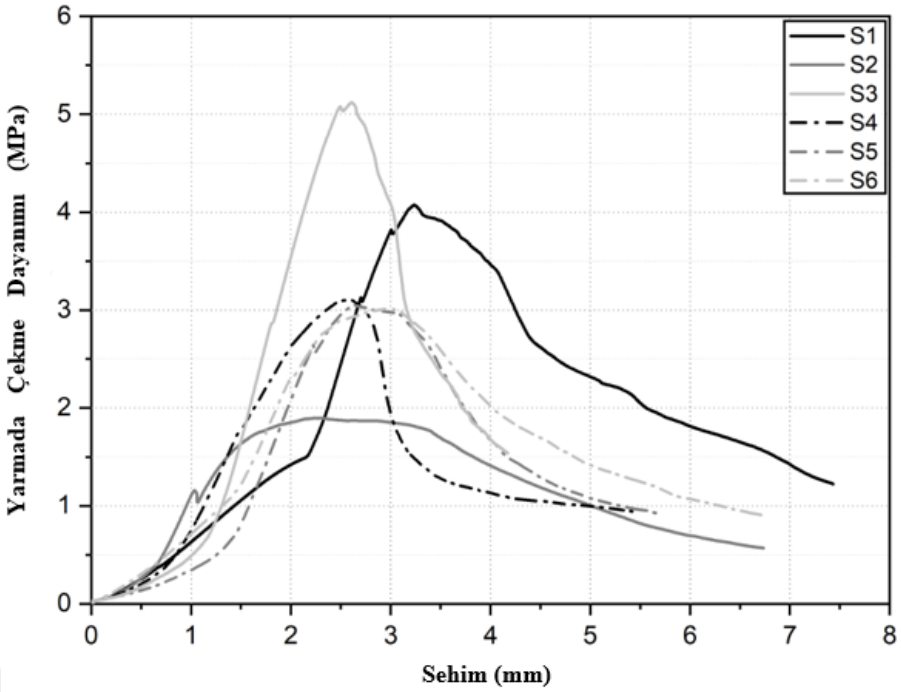
Seri kapsamında gözlemlenen kalsiyum bazlı malzemelerin yarattığı performans farklılıklarının yanı sıra, alkali aktivatör bazında da önemli değişimler gözlemlenmiştir. Bu bağlamda sodyum silikat kullanılan karışımlar, aynı cüruf kullanılan karışımlar gibi basınç dayanımlarını bir hayli geliştirmiştir. Literatürde raporlanan jeopolimer bağlayıcılar ve jeopolimerizasyon mekanizması çalışmalarına bakıldığında, genel olarak reaktivitesi düşük bağlayıcı malzemeler kullanıldığından, bu malzemelerin alkali aktivasyonu sonucu elde edilen jeopolimer ürüne ısıl kür uygulanarak, jeopolimerizasyon süreci hızlandırılmakta ve düşük reaktiviteye sahip malzemelerin reaksiyon hızları artırılmaktadır. Ancak çalışma kapsamında ortam koşullarında istenilen mekanik özelliklere sahip İYA bazlı jeopolimer kompozitler geliştirilmesi hedeflendiğinden, karışımlara aşırı reaktif silis içeriği ve sodyum içeriği sağlamak amacıyla sodyum silikat ilavesi yapılmış ve oldukça olumlu bir etki gözlemlenmiştir. Böylelikle, istenilen özelliklere sahip nihai ürünlerin geliştirilmesi kapsamında, su/bağlayıcı/agrega dizaynının yanı sıra, alkali aktivatör tipi ve

miktarının da optimize edilerek kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Basınç dayanım sonuçlarının ardından istenilen performansa sahip bu numunelerin, tez kapsamında asıl gözlemlenmek istenilen şekil değiştirme ve çoklu çatlak oluşturma davranışlarını incelemek üzere, 6 farklı EGC karışımına aşağıdaki bölümlerde sunulduğu üzere yarmada çekme ve dört noktalı eğilme testleri uygulanmıştır.

Nihai olarak geliştirilen 6 farklı EGC karışımlarının, 50 mm yüksekliğinde ve 100 mm çapta silindir numuneler üretilmesi sonucu 28 ve 90 günlük ortam kürü sonrasında elde edilen yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'de sunulmuştur.



Şekil 4.15. EGC karışımlarının 28 günlük yarmada çekme dayanım sonucu

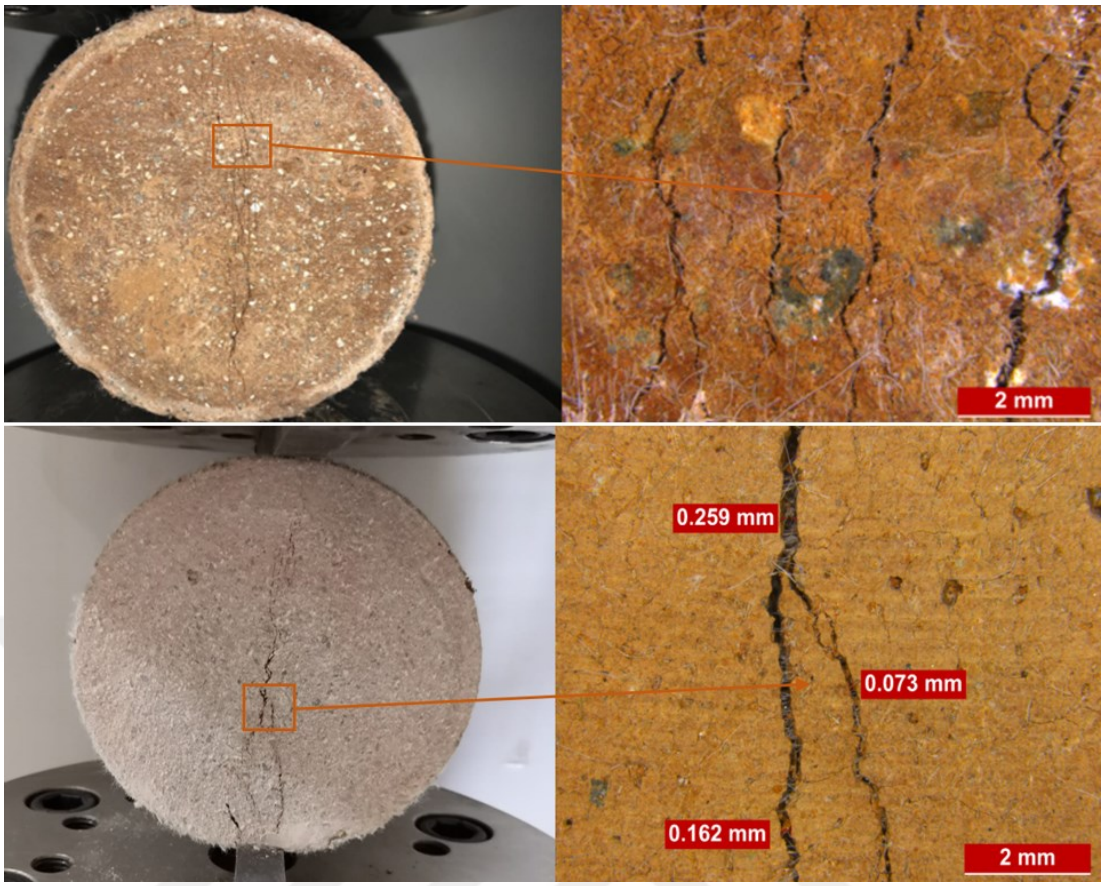


Şekil 4.16. EGC karışımlarının 90 günlük yarmada çekme dayanım sonucu

Genel olarak ECC ve EGC tasarımlarında üretilen sünek kompozitlerin gerilme davranışını karakterize etmek için, yarmada çekme testi yerine doğrudan çekme testi uygulanmaktadır. ASTM C496'da standartlaştırılan yarmada çekme testi, beton gibi doğası gereği kırılgan malzemelerin çekme gerilmesi dayanımlarını belirlemek için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, normal betondan farklı olarak, ECC ve EGC, bölünmüş silindirlerin kopma modunda neredeyse saf gerilme çatlamasından çoklu gerilme çatlaması ve basınç kırılması kombinasyonuna kadar bir değişikliğe neden olan son derece sünek bir davranış gösterir. Ancak sünek bir EGC tasarımının şekil değiştirme davranışını ve çoklu çatlak oluşturma özelliğini belirlemek amacıyla çalışma kapsamında üretilen 6 farklı karışımın bu özelliklerini incelemek adına, numunelere 28 ve 90 günlük ortam kürü sonunda yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.15'te sunulan sonuçlar incelendiğinde, 28 günlük ortam kürünün ardından en yüksek yarmada çekme dayanımı sonucunu S1 ve S3 kodlu karışımlar sergilemiştir. Bu iki karışımın basınç dayanım sonuçları da diğer karışımlara göre yüksek olduğundan bu durumun, geliştirilen ürünün matris yapısı ve mekanik özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu görülmüştür. Ayrıca numunelerin sehim

değerlerine bakıldığında oldukça önemli değerler gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen S4 numunesi, yarmada çekme deneyini sonucunda 4,6 mm'lik bir sehim değeri göstermiştir. Bu önemli değeri sırasıyla S3,S1,S2 karışımları da takip etmiştir. Ancak S5 ve S6 karışımların sonuçlarına bakıldığında, basınç dayanımlarında olduğu gibi, burada da hem yarmada çekme dayanımı hem de sehim konusunu en kötü özellikleri sergileyen karışımlar olmuştur. Genel olarak lif tipi fark etmeksizin lif ilavesinin kompozitin gerilme kapasitesinde artışa neden olduğu bilinmektedir. Bu durum, kompozitin toplam gerilme kapasitesini arttıran lif-matris arayüz bölgesinin yüksek sürtünme bağı mukavemetine atfedilebilir. Bundan dolayı elde edilen 28 günlük yarmada çekme sonuçları, doğası gereği gevrek davranış sergileyen geleneksel betonlara ve lifsiz alkali aktif malzemelere oranla hem dayanım hem de sehim bazında oldukça yüksek sonuçlar göstermiştir. Ancak V.Li (1998), tarafından tanımlanan modellemeye göre, karışımların yarmada çekme grafiğine göre sergilediği davranışlar, sözde-gevrek (Quasi-brittle) olarak gözlemlenmiştir. Bu durum, geliştirilen kompozit malzemelerin, eğilme ve şekil değiştirme davranışlarının yarmada çekme testiyle tam olarak tanımlanamayacağını, bununla birlikte dört noktalı eğilme testlerinin de gerekli olduğu sonucunu doğrulamaktadır. Ancak yine de çekme gerilmesi hakkında karışım parametrelerinin çeşitli varyasyonlarının bir fikir vermesi ve silindirik numunelerde rahatlıkla çoklu çatlak oluşturabilme özelliği sayesinde tez kapsamında geliştirilen EGC karışımlarına yarmada çekme testleri uygulanmıştır. Bununla birlikte, EGC malzemelerinin Şekil 4.16'da sunulan 90 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında, sonuçların 28 günlük yarmada çekme sonuçlarına göre bir nebze farklılaştığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanım performansı bakımından en iyi özelliklere sahip S3 kodlu karışım, burada belirgin bir şekilde yüksek bir yarmada çekme dayanım sonucu sergilemiştir. S3 kodlu karışıma göre daha düşük dayanım sergileyen S1 kodlu karışım ise, sehim değeri olarak en yüksek değerlere ulaşmıştır. Aynı şekilde S2 ve S6 kodlu karışımlar da oldukça yüksek sehim değeri göstermiştir. Bu durum, genel olarak kompozitlerin basınç ve yarmada çekme dayanımlarının, gösterebileceği maksimum sehim değerleri ile doğru orantılı bir ilişki olmadığını gösterir niteliktedir. Her ne kadar bu durum tüm karışımlar için genel bir trend olmasa da basınç dayanımındaki artış sehim değerinin düşmesine neden olmuştur. Bu durum kompozit malzemenin çoklu mikro çatlaklar oluşturmak suretiyle şekil değiştirme sertleşmesi ve sünek davranış sergileyebilmesi için matris kırılma tokluğunun lif

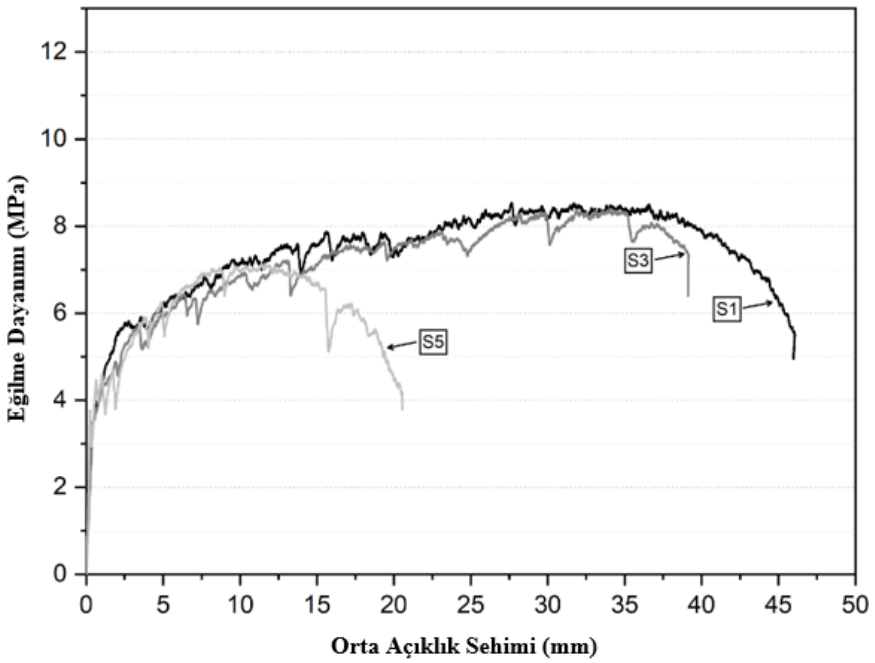
dayanımına göre düşük seviyelerde olması gerektiğinden kaynaklanmaktadır. Yüksek dayanım sonuçları sergileyen karışımlarda matris ile lif arasındaki kimyasal bağ derecesinin yüksek olması ve kırılma tokluğunun yüksek olması, daha düşük sehim yapması ile ilişkili olduğu literatürde birçok çalışmada da dile getirilen bir husustur (Wang ve Li, 2007). Ancak literatürde bu şekilde davranan malzemeler çimento bağlayıcı olduğu için ve söz konusu davranışın, çalışma kapsamında geliştirilen tüm EGC karışımlarında gözlemlenemediği için, bu farklılığın nedeni ilerleyen günlerde karışım dizaynına bağlı olarak farklı olarak gelişen jeopolimerizasyon tepkimeleridir. Yukarıdaki bölümlerde vurgulandığı üzere, sodyum silikat içeren karışımların daha erken dayanım sonuçlarına ulaşabildiği, kalsiyum bazlı malzemeler ve cüruf içeren karışımların ilerleyen dönemlerde dahi dayanım kazanabilme potansiyeline sahip oluşu gibi özellikler, yarmada çekme dayanımı ve sehim değerlerini etkileyen önemli parametreler olmuştur. Yarmada çekme dayanımı ve sehim değerlerinin yanı sıra, tüm numunelerde yükleme altında ince boyutlarda çoklu çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Nihai olarak geliştirilmek istenilen EGC malzemelerinin, silindirik numunelerde yarmada çekme gerilmesi altında çoklu çatlak oluşturabilmesi, çalışma kapsamında önemli seviyeye gelindiğini ve bu durumun ileriki bölümlerde sunulacak eğilme davranışları için önemli bir gelişme olduğunu kanıtlamaktadır. Bu bağlamda, silindir numunelerin yarmada çekme deneyleri sonucunda oluşturduğu çatlaklar aşağıda görsellerde sunulmuştur.



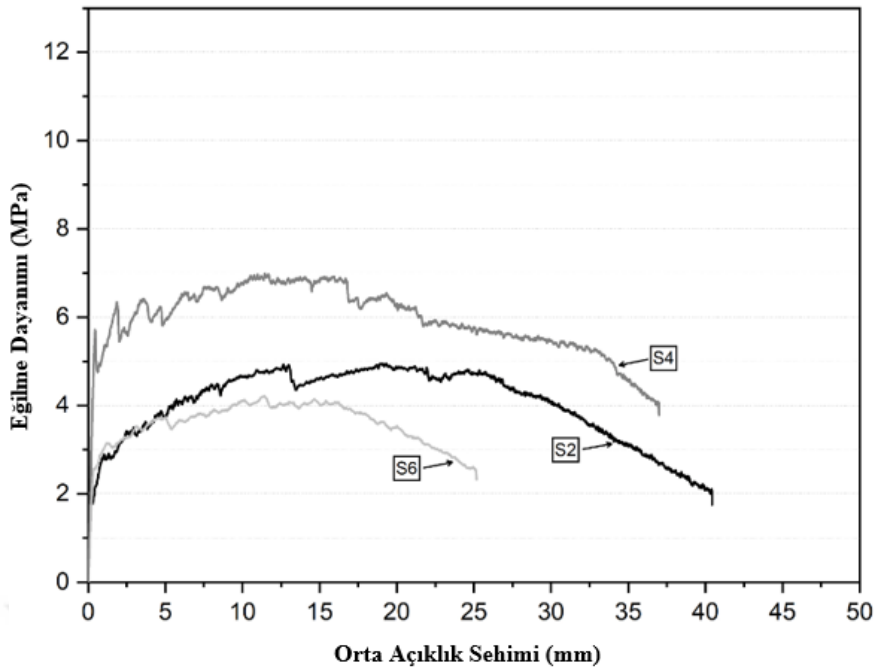
Şekil 4.17. EGC silindir numunelerinin yarmada çekme altında gösterdiği çatlak oluşumu

Yarmada çekme altında numunelerin gösterdiği çatlak kalınlıkları genel olarak klasik ECC çalışmalarında raporlanan 50 ila 300 µm arasında kalmıştır. Bu değerler ışığında elde edilen davranış, geleneksel gevrek betonlarda oluşacak geniş ve kontrol edilemez çatlakların aksine, oldukça dar kalınlıklarda, mikro boyutlarda çok sayıda ve kontrol edilebilir düzeyde olmuştur. Literatürde de son zamanlarda ciddi anlamda çalışılan bir konu olarak dar boyutlarda oluşan bu çatlakların, devam eden jeopolimerizasyon tepkimeleri ve oluşabilecek muhtemel kalsiyum karbonat ve sodyum karbonat gibi yapıların dolgu işlevi görmesi sonucunda kapanarak hem performans kayıplarının telafi edilmesi hem de içerden veya dışarıdan sızabilecek kimyasalların engellenmesine olanak sağlamaktadır (Ohno, 2020).

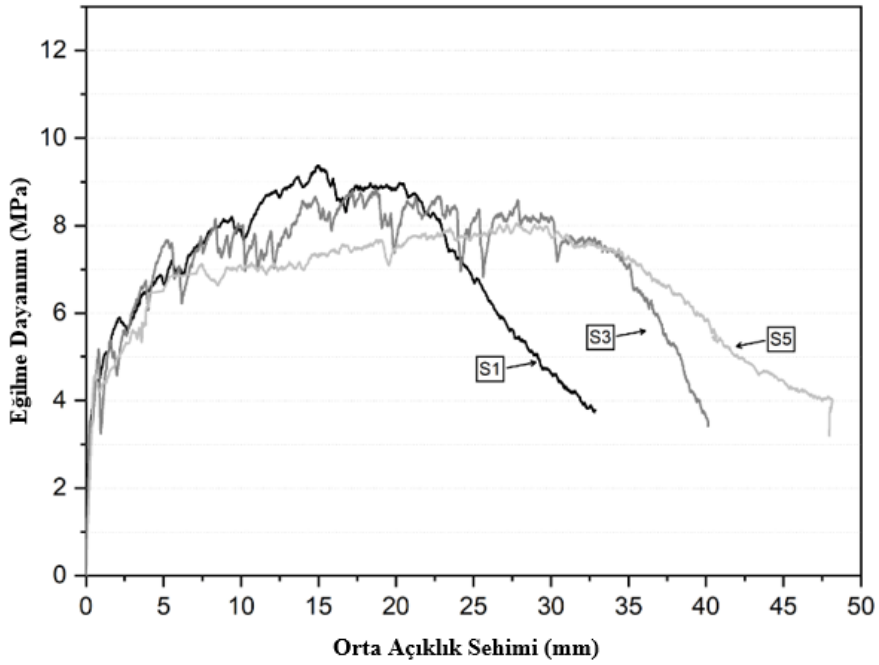
Yarmada çekme deneylerinin ardından, çalışma kapsamında geliştirilmesi planlanan, şekil değiştirme sertleşmesi davranışı ve çoklu çatlak oluşturma kabiliyetine sahip sünek EGC malzemeler için dört noktalı eğilme deneyine tabi tutmak üzere kupon üretimlerine geçilmiştir. Nihai olarak geliştirilen 6 farklı EGC karışımlarının, 80x240x15 mm boyutlarında kupon numuneler üretilmesi sonucu 7,28 ve 90 günlük ortam kürü sonrasında elde edilen eğilme dayanımı ve deformasyon sonuçları Şekil 4.18 ve Şekil 4.23 arasında sunulmuştur.



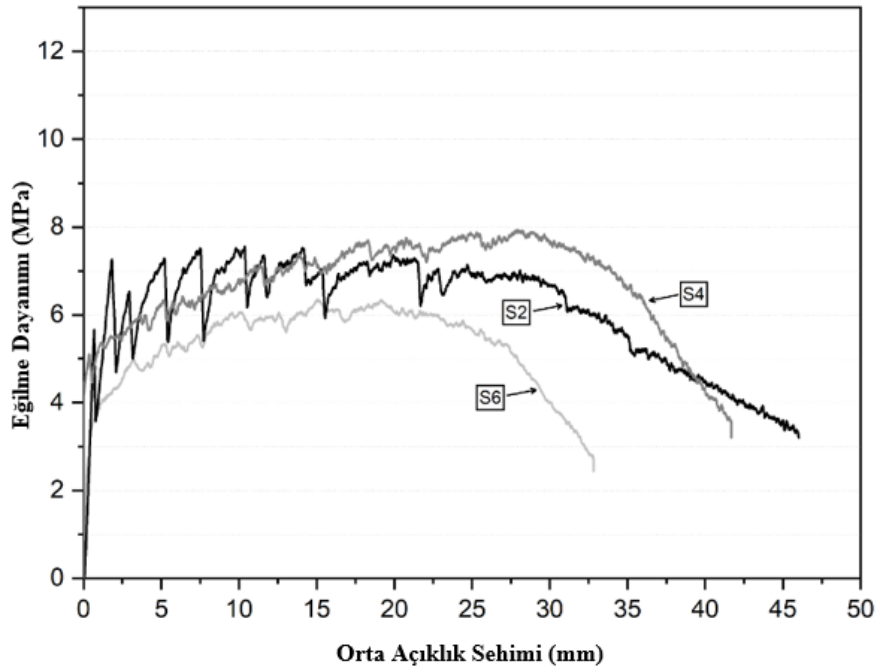
Şekil 4.18. İYA ve cüruf içeren EGC karışımlarının (S1,S3,S5) 7 günlük eğilme deformasyon sonucu



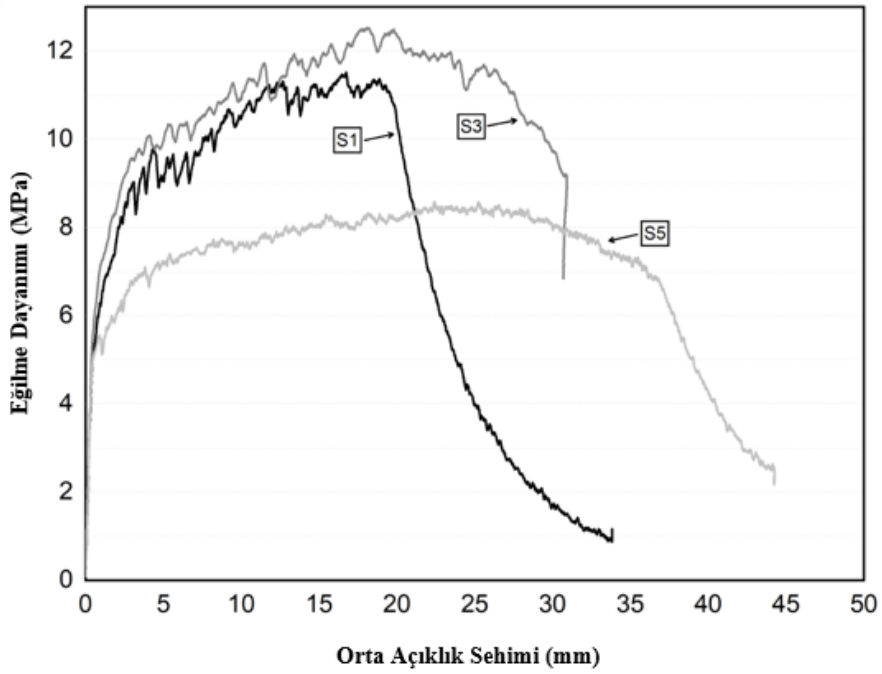
Şekil 4.19. %100 İYA içeren EGC karışımlarının (S2,S4,S6) 7 günlük eğilme deformasyon sonucu



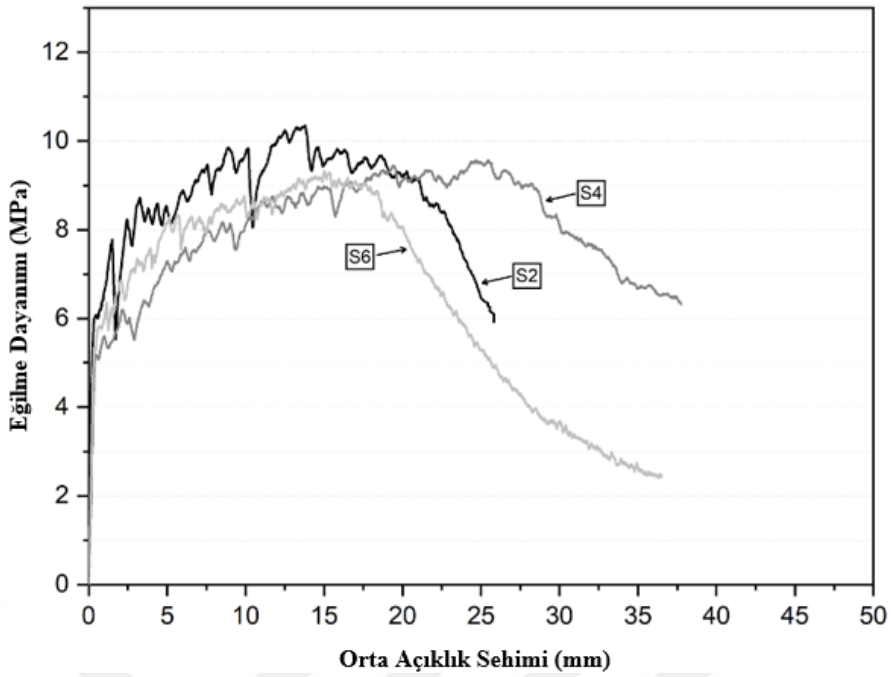
Şekil 4.20. İYA ve cüruf içeren EGC karışımlarının (S1,S3,S5) 28 günlük eğilme deformasyon sonucu



Şekil 4.21. %100 İYA içeren EGC karışımlarının (S2,S4,S6) 28 günlük eğilme deformasyon sonucu



Şekil 4.22. İYA ve cüruf içeren EGC karışımlarının (S1,S3,S5) 90 günlük eğilme deformasyon sonucu



Şekil 4.23. %100 İYA içeren EGC karışımlarının (S2,S4,S6) 90 günlük eğilme deformasyon sonucu

Dört noktalı eğilme testi altında kupon numunelerin gösterdiği eğilme dayanımı ve orta açıklık sehimi değerlerine bakıldığında, 7 günlük ortam kürünün ardından numunelerin ilk çatlak oluşumunun daha düşük yüklemede oluştuğu açıkça görülmektedir. Bu durum matris kırılma tokluğunun, erken yaştaki düşük dayanımdan dolayı daha düşük olmasıyla doğrudan ilişkilidir (Li ve ark, 2001). Kupon numunelere uygulanan yük arttıkça kompozit içindeki çekme gerilmesi, elastik limite ulaşana kadar lineer elastik olarak artmaktadır. Elastik limit, ilk çatlak oluşum dayanımından biraz daha azdır. Elastik limit ve ilk çatlak oluşumu dayanımı arasında, ilk çatlak benzeri bir iç kusur ve matristeki zayıflık, bu bölgedeki gerilme yoğunluğunun matris kırılma tokluğuna eşit olmasıyla mikro çatlak gelişimi başlamaktadır. Bu ilk mikro çatlak gelişimi, lif köprüleme özelliği sayesinde stabil olarak kalmaktadır ve oluşumunun devam etmesi için artan bir yükleme gerekmektedir. Çekme gerilmesi, ilk çatlak oluşumu dayanımına ulaştığında, düz bir matris mikro çatlağı neredeyse anında kesit boyunca yayılmaktadır. Kararlı olarak düz çatlak yayılımı, çoklu çatlama için bir enerji kriterinin karşılanmasının doğrudan bir sonucudur. Kompozitin bu bölgesinde

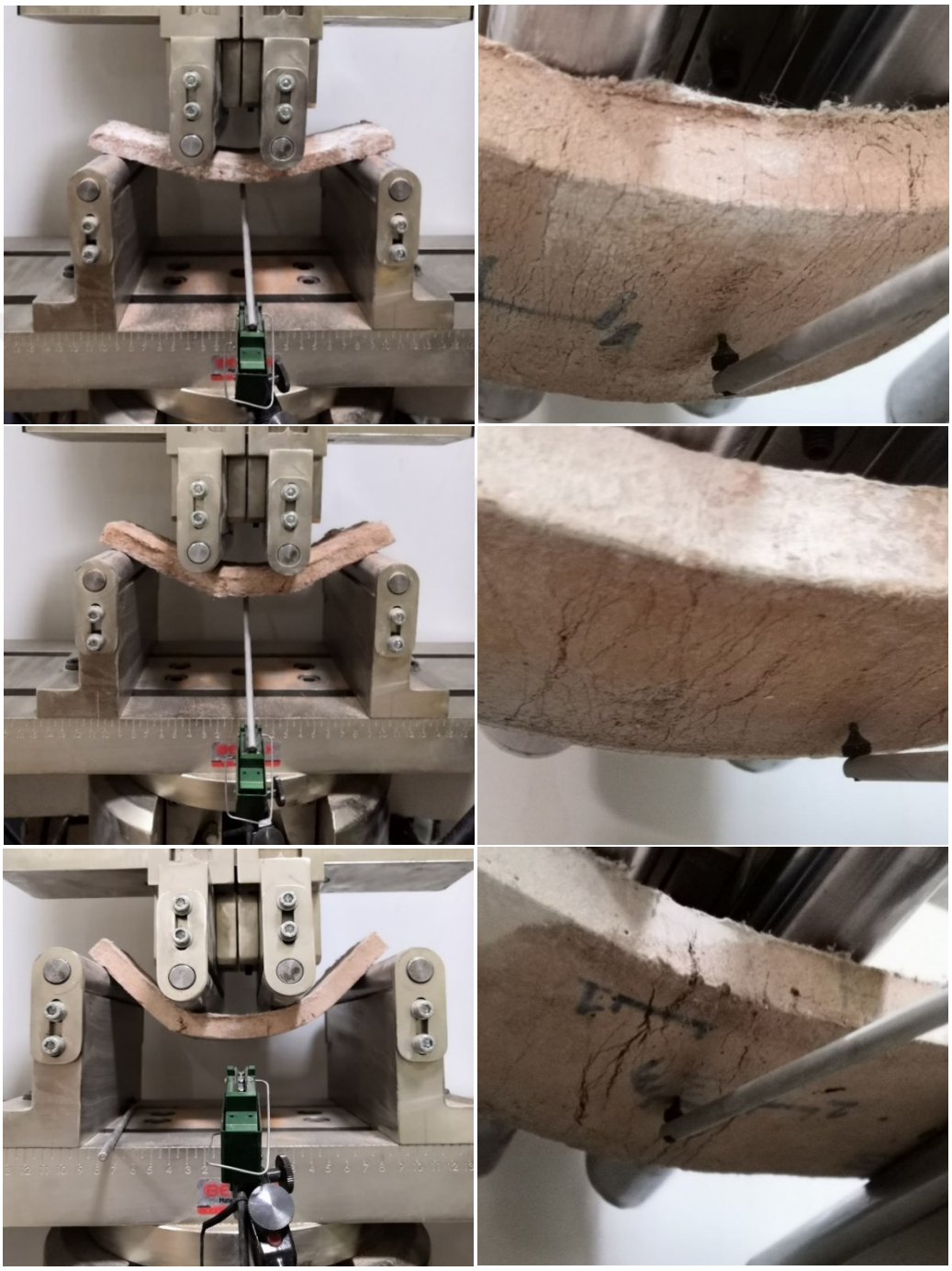
matris yük aktarımı aniden kaybolduğunda, gerilmede hafif bir düşüş meydana gelmektedir. Ancak matris çatlama gerilmesinde lif köprüleme kapasitesi aşılmadığından, artan gerilmede ilk çatlak oluşum dayanımı aşılmaktadır. Gerilme bir sonraki en büyük kusurda başka bir mikro çatlak tetiklenene kadar artmaktadır. Böylelikle yeni bir düz çatlak oluşur ve bu işlem numunenin tüm çatlak kısımları arasında en zayıf köprülenmiş kısımdaki uygulanan gerilme ile lif köprüleme kapasitesi aşılana kadar tekrarlanır. Sonuç olarak, hasar en zayıf köprülü bölümde lokalize olur ve gerilme stresi o bölümün köprüleme çatlağı açma ilişkisini takiben monoton olarak azalır. Bu noktada oluşan gerilme, numunenin nihai gerilme dayanımı olarak adlandırılır. Böylece kompozitin mikromekanik tabanlı tasarımı, gerilim altında lif köprüleme yoluyla kompozit bütünlüğünü korurken, matrisin çoklu mikro çatlamasını kolaylaştırır. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'daki sonuçlara göre S5 ve S6 kodlu karışımın yük alma kapasitesi diğer numunelere göre oldukça düşük çıkmış, buna paralel olarak orta açıklık sehim değerleri de daha zayıf kalmıştır. S1 ve S3 kodlu karışımda ise ECC malzemeye benzer bir eğri gözlemlenmiş, yükleme devam ettikçe oluşan yüksek sehim davranışına çoklu çatlak oluşumu eşlik etmiştir. Basınç dayanımları kapsamında daha yüksek performans sergileyen bu iki karışım, eğilme dayanımı testinde de yüksek matris kırılma tokluğu göstermiş ve ilk çatlak oluşumunun ardından, matris-lif arayüzü sayesinde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermiştir. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sayesinde, S1 numunesinde yaklaşık 46 mm, S3 numunesinde ise yaklaşık 40 mm bir sehim davranışı görülmüştür. S2 ve S4 kodlu karışımlar ise ilk çatlak oluşumunun ardından çok fazla şekil değiştirme sertleşmesi gösterememiş, yaklaşık 20 mm'lik sehimin ardından şekil değiştirme yumuşaması özelliği göstermiştir. Bu durum, karışımların sahip olduğu matris dayanımı, matris-lif arayüzü arasındaki kimyasal bağın özelliği, lif dağılımı gibi parametrelerin önemli ölçüde farklılığından kaynaklanmaktadır.

Çalışma kapsamında üretilen 6 farklı EGC karışımının kupon numunelerinin, 28 günlük eğilme dayanımı-orta açıklık sehimi grafiklerine bakıldığında, genel olarak ilk çatlak oluşumu dayanımının bir nebze arttığı gözlemlenmektedir. Matris kırılma tokluğu olarak da bilinen bu durum, numunelerin ilerleyen kürlenme süresi ile daha stabil ve güçlü bir matris yapısına sahip olmasıyla ilişkilidir. Karışımların basınç dayanım sonuçlarında da açıkça görüldüğü üzere, numunelerin kür süresinin 7 günden

28 güne çıkarılmasıyla oldukça önemli dayanım artışları gözlemlenmiş, bu da matris kırılma tokluğunu artırarak ilk çatlak oluşumunu bir nebze geciktirmiştir. Ancak basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasında olan bu doğru orantılı ilişki, artan dayanım ile sehim değerini arasındaki ilişkili ile her numunede aynı davranışı göstermemiştir. Bu durum, önceden de bahsedildiği üzere malzemenin matris kırılma tokluğu ve matris-lif arayüzü özelliklerinin gelişmesiyle, artan yük değerinin bu özellikleri sayesinde taşınması ve böylelikle lif dayanımına ulaşma süresinin kısalmasıyla numunenin sünek davranış göstermesinin bir nebze önüne geçilmesine neden olmaktadır. Söz konusu durum, basınç dayanımı olarak en yüksek değere ulaşan S1 ve S3 kodlu numunelerde daha belirgin gözlemlenmiştir. Her ne kadar bu numunelerde yine şekil değiştirme sertleşme davranışı ve çoklu çatlak oluşumu gözlemlense de belli bir dayanım-sehim değerinin ardından şekil değiştirme yumuşaması davranışı daha fazla ölçüde vuku bulmuştur.

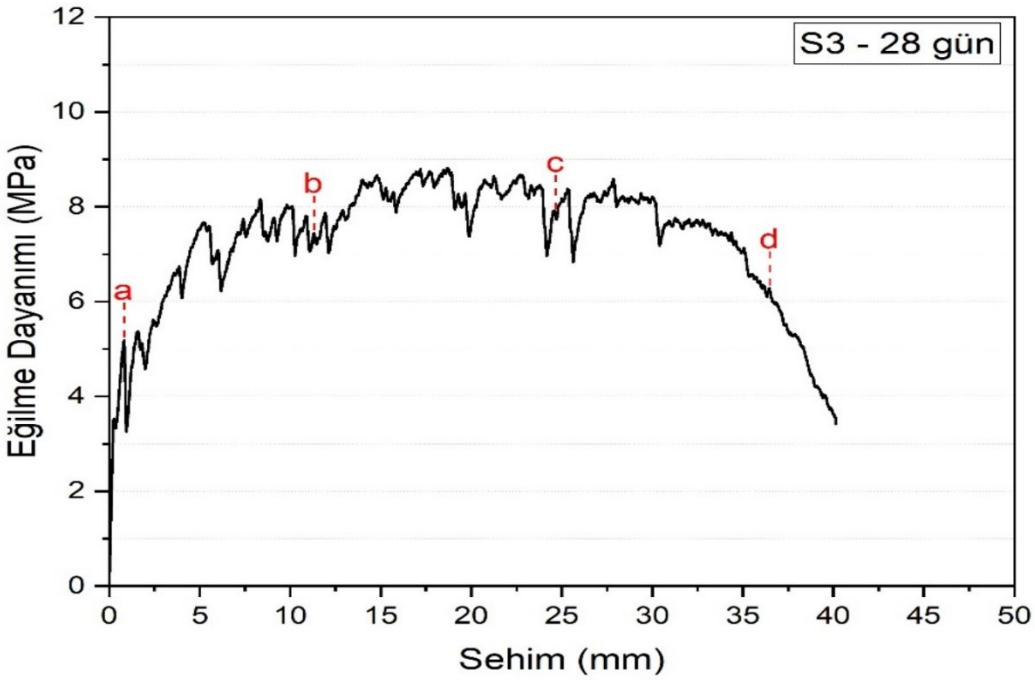
EGC numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımı-orta açıklık sehimi grafiklerine bakıldığında, karışımların eğilme dayanım değerlerinin bir hayli arttığı gözlemlenmiştir. Numuneler genel olarak 20-30 mm sehim değeri aralığında en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmuş ve bu değere kadar şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermiş, devam eden yükleme koşullarında şekil değiştirme yumuşaması davranışına geçmiştir. Bu durum, matris kırılma tokluğunun ve matris-lif arayüz özelliklerinin, kullanılan lif dayanım kapasitelerine oldukça yaklaşmasıyla açıklanmaktadır. Genel olarak bilindiği üzere, ilk çatlak oluşum dayanımı ile numunenin kopma dayanımı arasında geçen süreç, kullanılan lifin dayanım kapasitesine ulaşana kadarki geçen sürece denk gelmektedir. Sonuçlardan yola çıkıldığında, genel olarak bu sürenin kısalması, kullanılan lifin değişmediği bilindiğinden, matris-lif özellikleri ile ilişkilidir. İlerleyen yaş sayesinde jeopolimerizasyon tepkimelerinin sürekli devam ederek dayanıma katkı sağlaması, malzemenin sehim değerinde çok fazla farklılık yaratmasa da dayanım değerinde ve şekil değiştirme davranışında oldukça önemli farklılıklar yaratmıştır. 28 günlük davranışta olduğu gibi S1 ve S3 kodlu karışımlarda bu davranış, 90 günde de en belirgin şekilde olmuştur.

EGC kupon malzemelerinin dört noktalı eğilme deneyi sırasındaki eğilme-deformasyon durumu ve bu durumlarda oluşan çoklu çatlak görselleri Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.24. EGC kuponların eğilme ve çatlak oluşturma davranışı görselleri

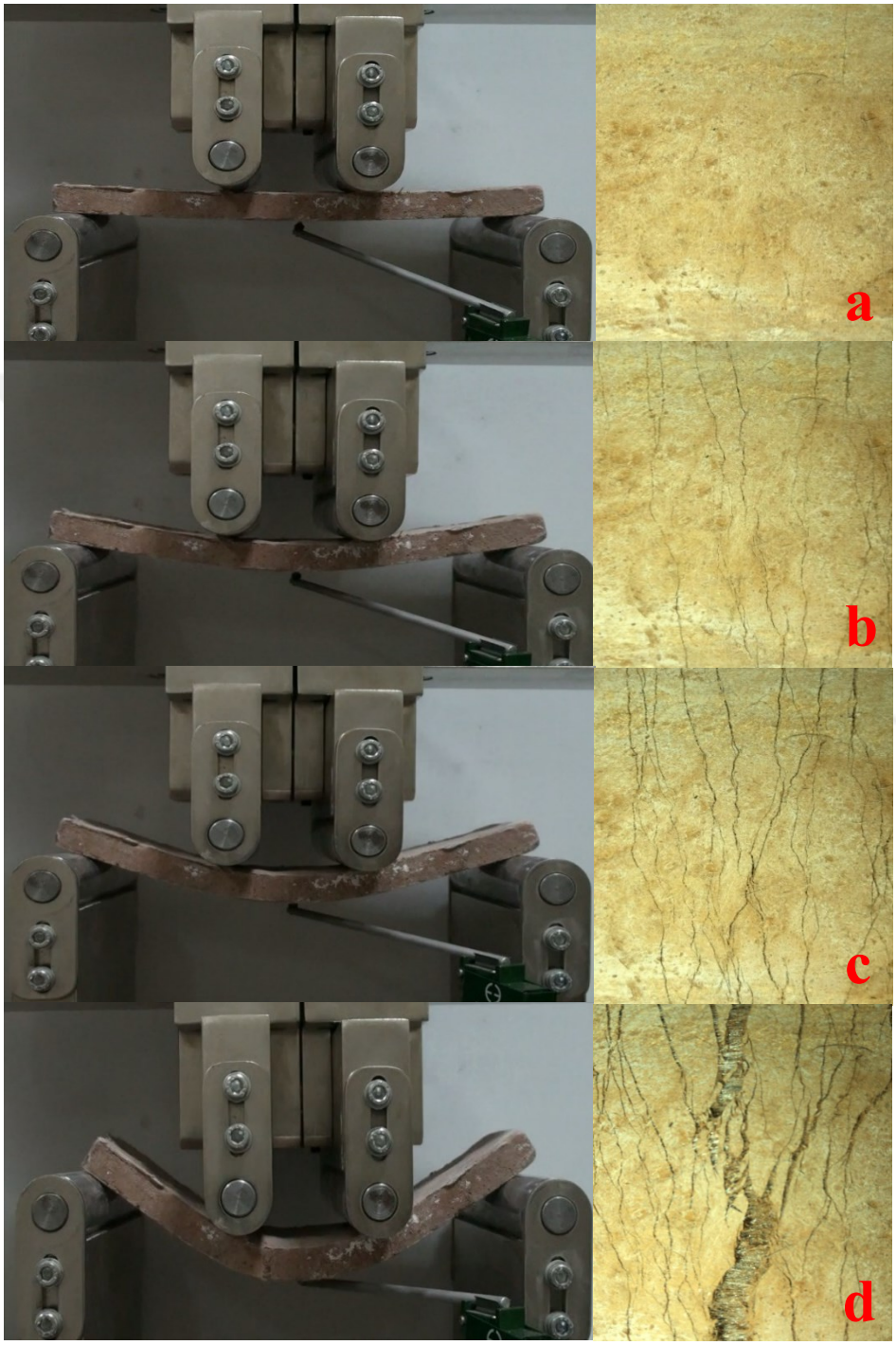
EGC geliştirilmesi kapsamında üretilen, en yüksek basınç dayanımı değerinin yanı sıra, şekil değiştirme ve çoklu mikro çatlak oluşturabilme davranışına sahip S3 kodlu karışımın 28 günlük eğilme dayanımı-sehim grafiği ve çeşitli aşamalarda oluşan görselleri sırayla Şekil 4.25'te ve Şekil 4.26'te sunulmuştur.



Şekil 4.25. S3 karışımının şekil değiştirme-deformasyon grafiği

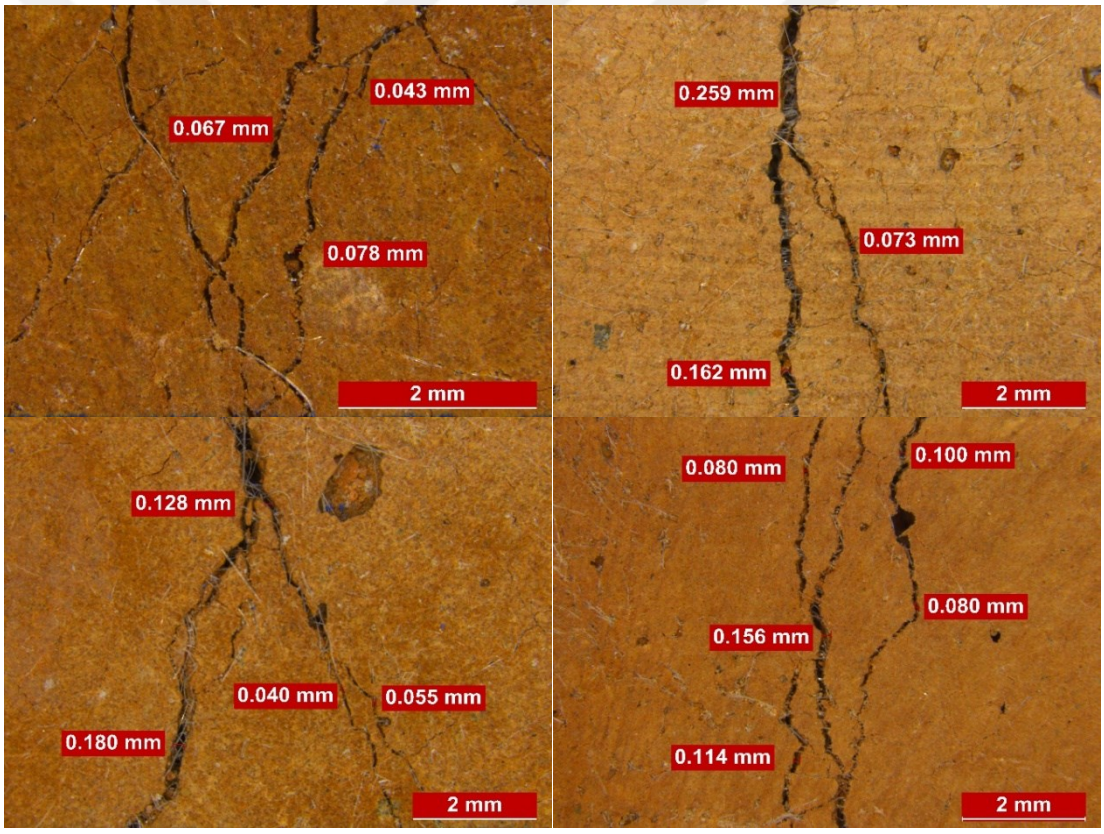
S3 numunesinin eğilme dayanımı-orta açıklık sehimi grafiğine bakıldığında "a" olarak işaretlenen nokta ilk çatlak oluşum dayanımı değerini göstermektedir. "b" ve "c" olarak işaretlenen nokta, yük altında ilerleyen dönemlerde elde edilen sehim ve çoklu çatlak oluşum değişimini göstermektedir. "d" olarak işaretlenen nokta ise, kupon numunenin, yük taşıma kapasitesini kaybederek şekil değiştirme yumuşaması davranışına geçtiği yani özetle kopma değerine ulaştığı durumu göstermektedir. Bu noktalara tekabül eden numune eğilme-deformasyon durumu ve çatlak oluşumu görselleri de Şekil 4.25'te sunulmuştur. S3 kodlu karışım ile üretilen kupon numunesi, 28 günün sonunda dört noktalı eğilme deneyi sonrasında, yaklaşık maksimum 8,9 MPa'lık bir eğilme dayanımına ve 40 mm'lik bir sehim değerine ulaşarak ve şekil

değiştirme sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşumu göstererek çalışma kapsamında en yüksek basınç dayanımı ile nihai olarak geliştirilen EGC malzeme olmuştur.



Şekil 4.26. EGC kupon numunelerin yükleme sonrası oluşan çoklu mikro çatlak görselleri

Çalışma kapsamında dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulan EGC kupon numunelerin, çeşitli çatlak oluşum görselleri ve çatlak kalınlık değerleri Şekil 4.27'de sunulmuştur. Görseller incelendiğinde klasik gevrek betonunda gözlemlenen tek çatlak oluşumu ve artan yüklemeyle bu çatlağın genişlemesi davranışının aksine, yükleme esnasında mikro seviyede ince çoklu çatlakların oluştuğu açıkça görülmektedir. Numunelerin çatlak gelişimine bakıldığında, belli bir yük değerinden sonra oluşan çatlaklar bu yük değerinin artmasıyla genişlememiş, bunun yerine lif köprüleme özelliği sayesinde diğer çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir. Bu da geleneksel ECC malzemeye benzer şekilde, çalışma kapsamında geliştirilen EGC malzemenin çoklu mikro çatlak oluşturabilme kabiliyetini kanıtlamaktadır.



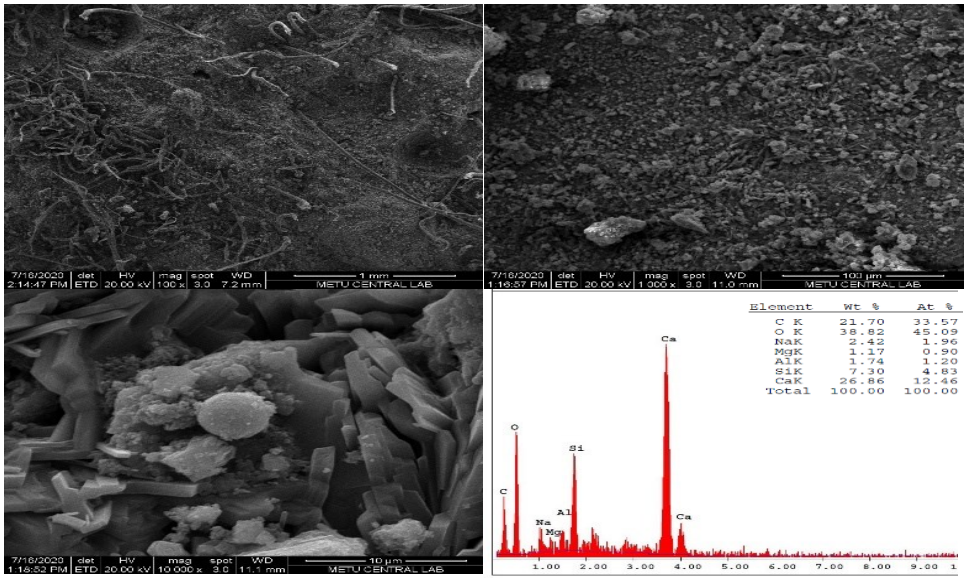
Şekil 4.27. S3 karışımının dört noktalı eğilme altında deformasyon-çatlak oluşumu görselleri

4.4.1. Nihai EGC Karışımlarının Mikro-Mekanik Analizleri

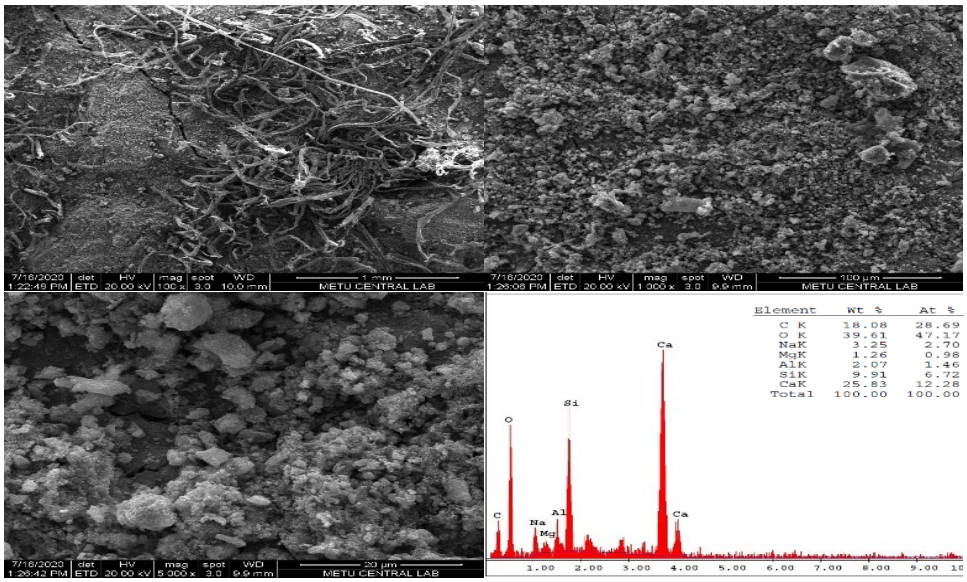
Arzu edilen özelliklere sahip jeopolimer kompozitler elde etmek için bağlayıcı tipi, alkalin aktivatör ve sertleşme sıcaklığı gibi faktörleri ve konuları dikkate almak gerekir. Bu faktörlerin X-Işını Difraktometresi (XRD), Fourier-Transform Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve Enerji yayılımlı X-Işını Analizi (EDX) teknikleri ile başarılı bir şekilde ilişkilendirilerek karakterize edilebildiği bildirilmiştir. Dolayısıyla metodoloji, hazırlama ve test etme süreci başarılı bir deneysel karakterizasyon için dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Bu bağlamda nihai olarak üretilen 6 adet EGC karışımlarının karakterizasyonu, XRD ve FTIR kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numuneler, SEM ve EDX altında taranarak mekanik mukavemetleri ve mikro yapısal değişiklikleri değerlendirilmiştir.

4.4.1.1. SEM/EDX Analizi

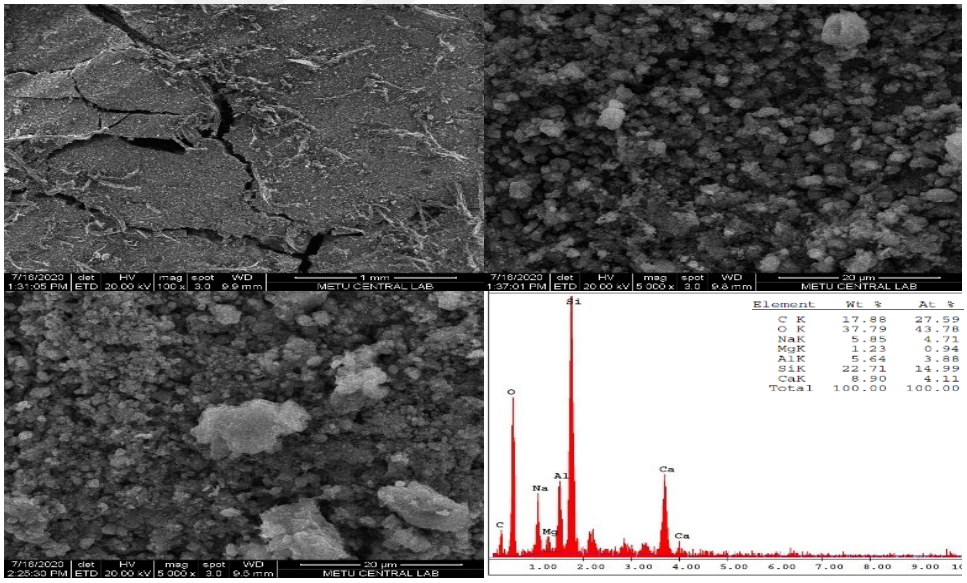
Nihai olarak üretilen 6 adet EGC karışımının 28 günlük ortam kürü sonrasında uygulanan SEM/EDX analizi sonuçları Şekil 4.28 ve Şekil 4.33 arasında sunulmuştur.



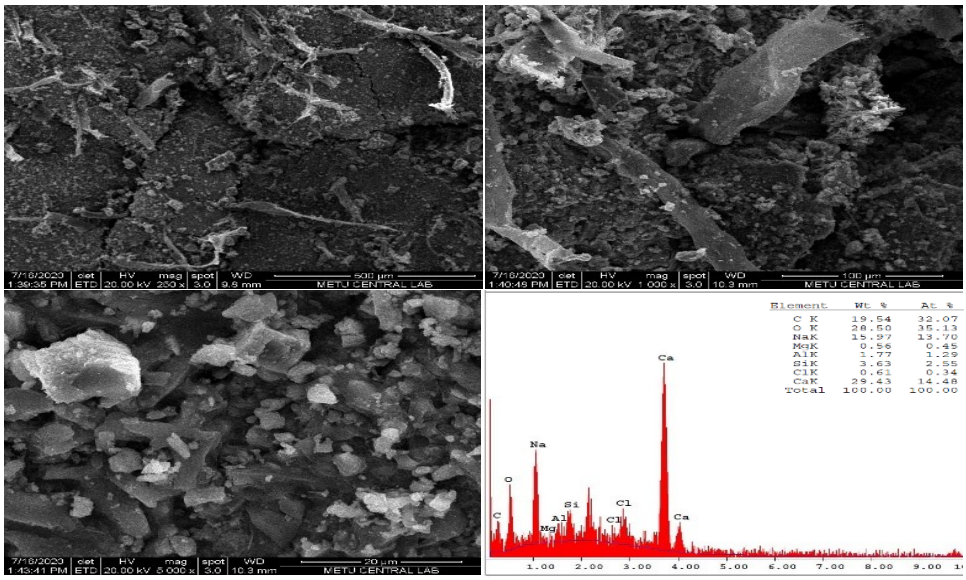
Şekil 4.28. S1 numunesinin SEM/EDX analizi



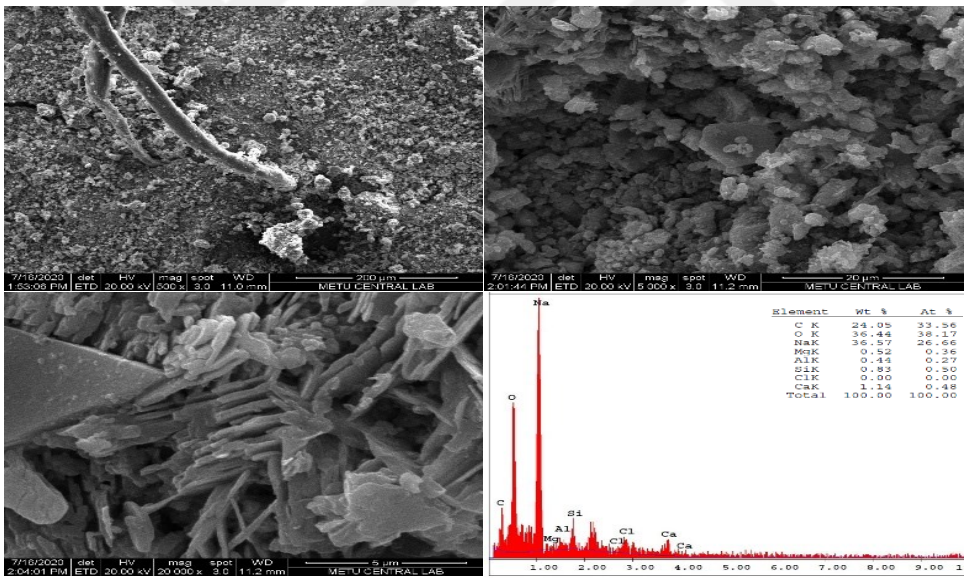
Şekil 4.29. S2 numunesinin SEM/EDX analizi



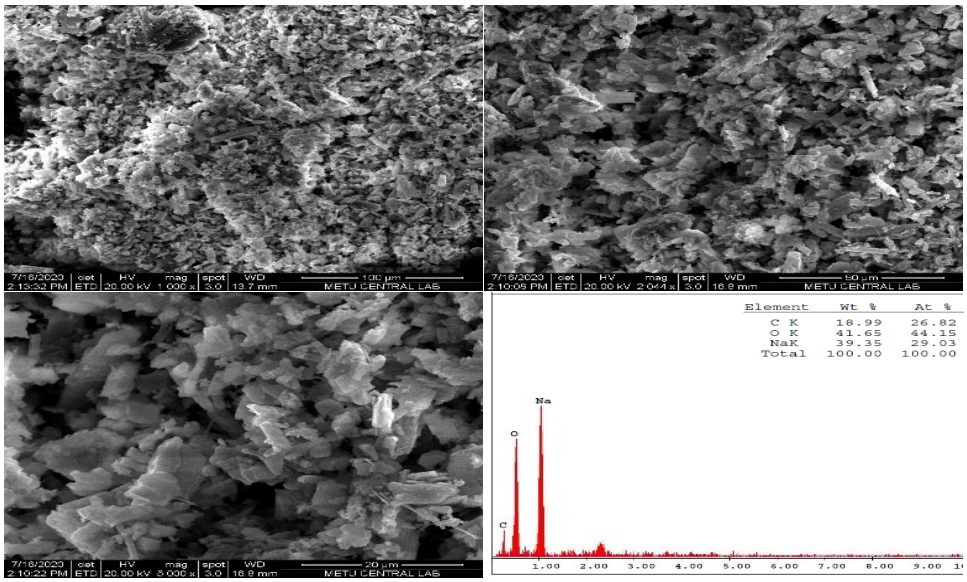
Şekil 4.30. S3 numunesinin SEM/EDX analizi



Şekil 4.31. S4 numunesinin SEM/EDX analizi



Şekil 4.32. S5 numunesinin SEM/EDX analizi



Şekil 4.33. S6 numunesinin SEM/EDX analizi

Çalışma kapsamında nihai olarak üretilen 6 adet EGC karışımına, 28 günlük ortam kürünün ardından SEM/EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 4.28'de sunulan sonuçlara göre S1 karışımının 100x mikroskop yaklaşımında oldukça stabil ve düzenli bir yüzey görüntüsü elde edilmiştir. Benzer şekilde karışıma kullanılan liflerin de matris içerisinde homojen olarak dağıldığı gözlemlenmektedir. Liflerin homojen dağılması geleneksel ECC tasarımlarında olduğu gibi şekil değiştirme sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşumu davranışlarını matriste düzgün ve homojen olarak gösterebilen numuneler için en önemli hususlardan biridir. Bununla birlikte analizde 1000x ve 10000x yaklaşım uygulandığında jeopolimer ürünlerin matris içerisindeki dağılımın daha belirgin olduğu gözlemlenmektedir. Bu dağılımın kimi yerlerde homojen, kimi yerlerde Si, Al ve Na türlerinin düzensiz olduğu görülmektedir. Matriste oluşan ürünlerin dağılımı ise, matristeki boşluklu yapıların varlığı ve mikro çatlaklar ile birlikte numunenin mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. S1 kodlu karışımın EDX analizine bakıldığında ise taranmış olan bölgede Si, Ca ve Al oksitlerinin dengeli dağıldığı ve jel formunda ürün oluşturduğu gözlemlenmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen S2 kodlu karışımın SEM/EDX analizi görüntüleri Şekil 4.29'da sunulmuştur. Sonuçlara göre S2 karışımının mikroskop altındaki görüntülerde

S1 de olduğu gibi yine düzenli ve homojen yapılar gözlemlenmektedir. Ancak burada birtakım mikro çatlakların görülmesi, S2 karışımının diğer serideki karışımlara göre nispeten düşük dayanım sonucu vermesi ile ilişkilendirilmektedir. Bununla beraber SEM analizi altında 100x yaklaşma ile alınan görseldeki matriste liflerin dağılımının bir tarafa doğru topaklandığı ve tam olarak homojen olmadığı görülmektedir. Liflerin homojen dağılmaması, basınç dayanım sonuçlarını çok etkilememekle beraber, numunelerin eğilme dayanımını ve süneklilik özelliklerini daha çok etkilemektedir. Bu durum da S2 numunesinin nispeten daha düşük mekanik özelliklerinin mikroskop altında daha anlaşılır olmasına neden olmaktadır. SEM analizinin yanında S2 numunesinin EDX analizinde ise taranan bölgede Ca bazlı yapıların daha yoğunlaştığı, bunu Si ve Al türlerinin takip ettiği gözlemlenmektedir.

S3 kodlu karışımın SEM/EDX analiz görselleri Şekil 4.30'da sunulmuştur. S3 kodlu karışımın SEM analizi altında 100x yaklaşmada elde edilen görseline bakıldığında, uygulanan basınç ve çekme dayanımı testlerinin neden olduğu mikro çatlaklar görünmesine rağmen, diğer yüzeyinin oldukça sert ve pürüzsüz olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında S3 kodlu karışımın basınç ve çekme dayanımı bakımından en yüksek performans gösteren nihai ürün olduğu, SEM analizi sonucunda edinilen görüntülerden de açıkça görülmektedir. Bu bağlamda numuneye 5000x yaklaşımda matriste oldukça düzenli ve homojen ürün dağılımı olduğu görülmüştür. Karışımın EDX analizine bakıldığında ise Si, Al, Na ve Ca türlerinin oldukça dengeli dağıldığı ve matriste N-A-S-H ve C-A-S-H jellerinin birlikte ve homojen oluştuğu saptanmıştır.

Çalışma kapsamında nihai seride üretilen diğer bir karışım olan S4 kodlu karışımın SEM ve EDX analizi sonucu Şekil 4.31'de sunulmuştur. Görseller incelendiğinde numunenin matrisinde oldukça boşluklu ve homojen olmayan dağılımlar gözlemlenmiştir ve böylelikle jeopolimerizasyon reaksiyonlarının optimum verimlilikle gerçekleşmediği anlaşılmıştır. Bu durum S4 karışımının diğerlerine göre kısmen düşük olmasının olası nedenlerinden biri olmuştur. EDX analizi sonucuna bakıldığında ise karışım her ne kadar cüruf gibi yüksek kalsiyum içeren malzeme içermeyip, aynı zamanda düşük kalsiyum hidroksit içerse de Ca türlerinin matriste yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Ca bazlı jel oluşumu yerine kalsiyum türlerinin bir bölgede yoğunlaşması ile daha çok ilişkili olabilmektedir.

S5 kodlu karışımın SEM ve EDX sonuçları ise Şekil 4.32'de sunulmuştur. SEM görselleri incelendiğinde numune matrisinin oldukça pürüzsüz ve homojen olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca 20000x yaklaşımda iğnemsi jeopolimer ürünlerinin oldukça sıkı ve dengeli dağıldığı gözlemlenmektedir. Ancak EDX analizine bakıldığında, diğer karışımların aksine atomik yapıların dengesiz dağıldığı, Na türlerinin oldukça yoğun bir değer sergilediği görülmüştür. Bu durum alkali aktivatörden gelen Na türlerinin jeldeki bağ yapısına katılmak yerine serbest bir şekilde matris içinde topaklanması ile açıklanmaktadır. Na türlerinin bu şekilde davranması, numunenin ileriki dönemlerde su ile temas etmesi halinde Na türlerinin su içerisinde çözünerek yüzeye taşınması ve yüzeyde Na bazlı tuzların oluşarak çiçeklenme problemlerinin oluşmasına neden olabilmektedir.

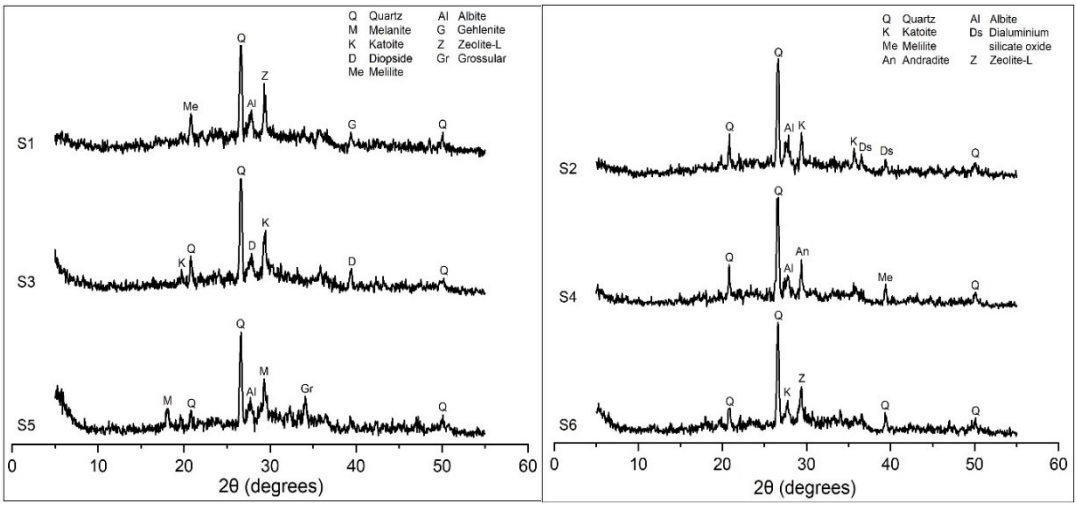
Çalışma kapsamında üretilen nihai EGC serisinde son olarak S6 kodlu karışım tasarlanmış ve bu karışımın SEM/EDX analizi sonuçları Şekil 4.33'te sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre 1000x ve 2000x yaklaşımlarda jeopolimer ürünlerin matriste homojen olarak dağıldığı gözlemlense de 5000x yaklaşımda boşluklu yapıların oluştuğu görülmüştür. S6 kodlu karışımın nispeten düşük dayanım vermesi, SEM ve EDX analizlerindeki görece düzensiz ve zayıf sonuçlar ile doğrudan ilişkili olmaktadır.

4.4.1.2. XRD Analizi

Nihai olarak üretilen 6 adet EGC karışımının 28 günlük ortam kürü sonrasında uygulanan XRD analizi sonucu Şekil 4.34'te sunulmuştur.

X-Işını Difraktometresi deneyi temel olarak polikristalin malzemenin kristal yapısında belirli katmanlar arası boşlukların sergilediği ışın kırınım açısı farklılıkları sayesinde, malzemenin muhteva ettiği kristal yapının tespitine dayanmaktadır. Benzer katmanlar arası boşuklar benzer kristal yapılara sahip olmakta ve dolayısıyla benzer kırınım modelleri sergilemektedir. Farklı yoğunluk ve sayıdaki kristal piklerin yoğunluğunun azalması, geniş, özelliksiz tepe noktalarının, tümseklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple malzemelerin amorf ve kristal yapılarına dair kesin

sınırlandırmalar yapmak zor bir hal almaktadır. Jeopolimerik bağlayıcı fazın, genellikle herhangi bir potansiyel kristalizasyon yolunun tanımı veya analizi olmaksızın, basit bir şekilde şekilsiz bir alüminosilikat jelin sertleştirilmesiyle oluşturulduğu varsayılmaktadır (Palomo ve Glasser, 1992; Lee ve van Deventer, 2002, 2003). Jeopolimer sistemler alüminosilikat kaynağı hammadde içeriğine bağlı olarak N-A-S-H ve C-A-S-H jellerinin nano boyutta kristal fazlarla içiçe bulunduğu bir matris düzenine sahiptir. Alümino silikat amorf gel yapı ((N,C)-A-S-H) jeopolimer matrisin öncü bağlayıcı fazını oluşturmakta ve X-Işını altında genellikler 27-29° 2θ açıları arasında merkezlenen özelliksiz bir tepe olarak gözlemlenmektedir. Bu özelliksiz tepe hammaddenin muhteva ettiği kristal piklerin jeopolimerleşme sonucunda daha düşük yoğunluklu hallerini ve nano boyutta zeolit tipi kristal pikleri içermektedir. Bu sebeple söz konusu sistemlerde analizlerin XRD difraktogramlarında tespit edilen piklerin yalnızca kristal yapılarla ilişkilendirilmesi yoluyla yapılmasından ziyade bu yapıların alüminosilikat jel ve nanokristal yapılara bağlı pikler olarak ele alınması daha isabetli bir yol olmaktadır. Nanokristalin yapıların alüminosilikat jel ile çevrelendiği bu faz, yüksek seviyede nanokristalin içeren fakat düşük seviyede kristal faz sergileyen jeopolimer sistemler arasında görülen analiz farklılıkları için açıklama getirebilmeyi mümkün kılmaktadır. Özellikle, kristalleşme seviyesinin yüksek seviyede silika içeren jeopolimerik sistemlerde daha az yaygın olduğu gözlenmiş (Rahier ve ark., 1997), ancak XRD analizilerinin orta ve yüksek seviyede silika içeren jeopolimerler arasında sadece çok küçük farklılıklar göstermektedir (Duxson ve ark., 2004). Nihai olarak üretilen 6 adet EGC karışımının 28 günlük ortam kürü sonrasında uygulanan XRD analizi sonuçları Şekil 4.34'te ve mevcut kristalin pikleri Çizelge 4.22'te sunulmuştur.



Şekil 4.34. EGC karışımlarının XRD analiz sonuçları

Çizelge 4.22. XRD analizi neticesinde saptanan kristal fazlar

Kristal Faz	PDF Numarası	Kimyasal Formül	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Quartz	96-152-6861	SiO_2	+	+	+	+	+	+
Albite	96-900-2204	$Al\ Na\ O_8\ Si_3$	+			+	+	
Andradite	96-900-5372	$Al_{0.224}\ Ca_{2.895}\ Fe_{1.288}\ Mg_{0.104}\ Mn_{0.024}\ Na_{0.018}\ O_{12}\ Si_{2.744}\ Ti_{0.703}$		+		+		
Diopside	96-900-4026	$Al_{0.19}\ Ca_{0.8}\ K_{0.12}\ Mg_{0.83}\ O_6\ Si_{1.98}$			+			
Dialuminium Silicate Oxide	96-101-0330	$Al_2\ O_5\ Si$		+				
Gehlenite	96-900-6113	$Al_{2.06}\ Ca_2\ O_7\ Si_{0.95}$	+					
Grossular	96-900-0441	$Al_2\ Ca_3\ O_{12}\ Si_3$					+	
Melanite	96-900-7075	$Al_{0.196}\ Ca_{2.892}\ Fe_{1.391}\ Mg_{0.129}\ Mn_{0.024}\ Na_{0.04}\ O_{12}\ Si_{2.465}\ Ti_{0.826}\ V_{0.006}\ Zr_{0.028}$					+	
Melilite	96-900-8196	$Al\ Ca\ Na\ O_7\ Si_2$	+			+		
Katoite	96-900-2704	$Al_2\ Ca_3\ H_{12}\ O_{12}\ Si_3$		+	+			+
Zeolite-L	96-900-5061	$Al_{10.62}\ H_{72}\ K_{4.63}\ Na_6\ O_{91.32}\ Si_{25.38}$	+					+

Nihai EGC karışımlarının tümünde literatürde daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalarda görüldüğü gibi 27-29° 2θ açıları arasına merkezlenmiş alüminosilikat jel yapıyı temsil eden tepe yapısının oluştuğu gözlemlenmektedir. Tüm karışımlar için söz konusu tepe yapısı 26,58° 2θ açısında konumlanmış ana Quartz piki tespit edilmiştir. Hammaddelerde aynı 2θ açısında saptanan Quartz pikinin yoğunluk seviyesinin tüm karışımlar için jeopolimerizasyon neticesinde azaldığı belirlenmiştir (Oh ve ark., 2010; Provis ve ark., 2014). Quartz pik yoğunluğunun polimerizasyon sonucu gösterdiği azalış tüm EGC karışımları için aynı seviyede olmamakla beraber %100 İYA bazlı EGC karışımlarında (S2, S4, S6) pikin yoğunluk seviyesi 520-575 arasında değişkenlik göstermekte iken cüruf ikameli EGC karışımlarında (S1, S3, S5) şse 375-475 arasında değişmektedir. Quartz piklerinin yoğunlukları için değişim (varyasyon) katsayısı cüruf ikameli EGC karışımları için %11,76 iken, %100 İYA bazlı EGC karışımları için ise %5,02'dir. Söz konusu varyasyon katsayısı farkının %100 İYA bazlı EGC karışımları için düşük olması ve bu karışımların basınç basınç dayanımı sonuçlarının benzer sınırlar içerisinde ufak farklılıklar göstermesi Quartz fazı yoğunluk değişimi ile jeopolimerizasyon arasında kurulabilecek ilişki için her ne kadar gerçekçi bir yaklaşım olanağı sunsa da, varyasyon katsayısının daha yüksek olduğu cüruf ikameli EGC karışımları için Quartz fazı yoğunluğu ve basınç dayanımı arasında net bir ilişkinin olmaması ve jeopolimer matrisin nanokristalin yapıların alüminosilikat jel ile çevrelendiği bir faz olması, Quartz fazının azalış oranının jeopolimerizasyon seviyesi üzerinde doğrudan bir çıkarım yapma konusunda yetersiz kalacağını göstermektedir.

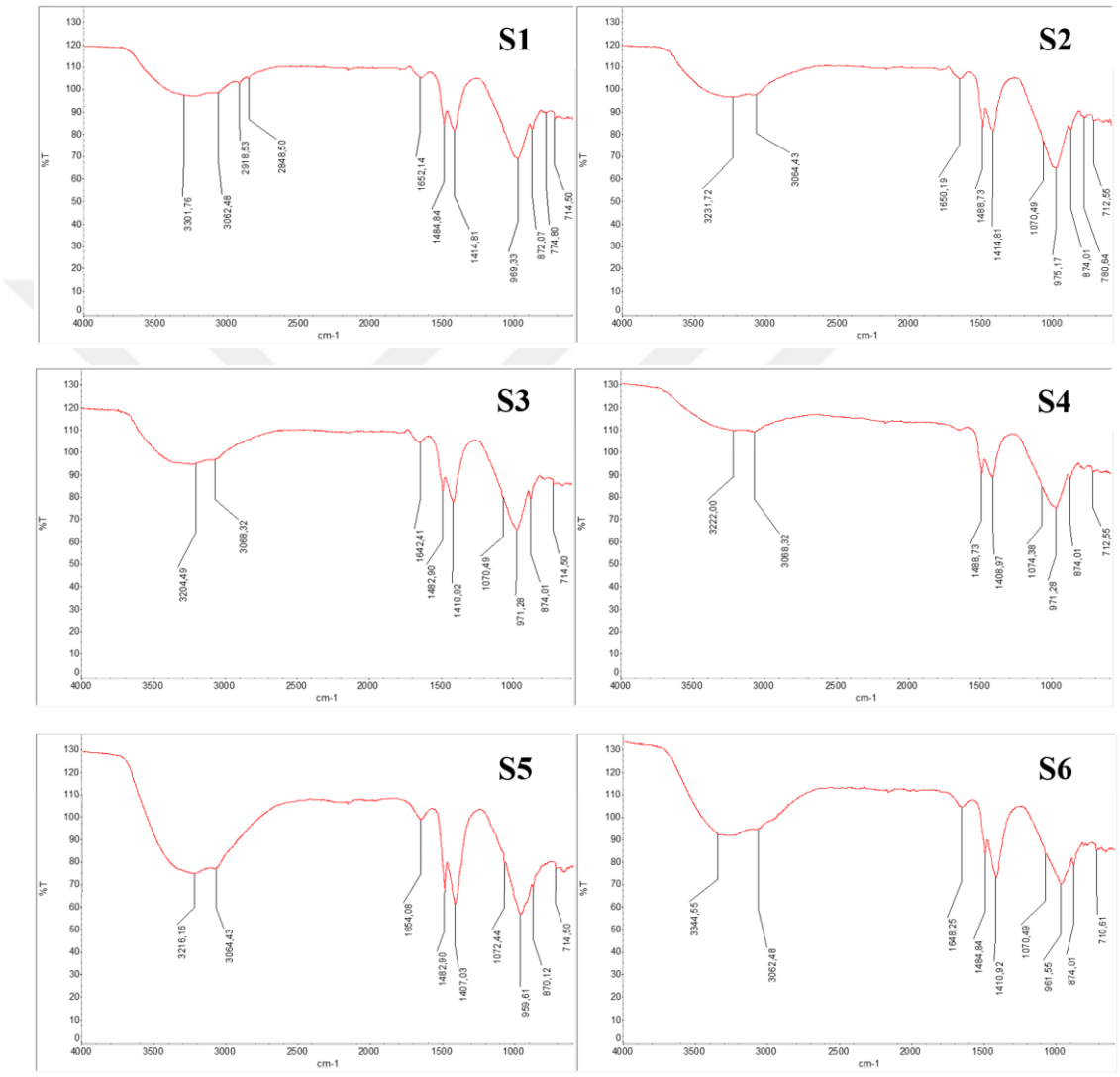
S1 karışımında jeopolimerizasyon sonucu Albite, Carnegieite, Gehlenite ve Zeolite-L gibi bağlayıcı hammaddede bulunmayan yeni kristal fazların oluşumu gözlemlenmiştir. Jeopolimerizasyon sonucu oluşan Albite fazı N-A-S-H jelinin, Gehlenite fazı ise C-A-S-H jelinin varlığına kanıt olabilecek kristal yapılardır. C-A-S-H jel yapısı, orta ve yüksek kalsiyum muhtevasına göre değişkenlik gösterebilen ve yüksek kalsiyum muhtevasında kristalin içeren amorf bir yapı olma özelliği taşımaktadır. Düşük kalsiyum muhtevasında ise CaO-Al_2O_3-SiO_2 düzlemi belirli bir Na_2O içeriği ile birleşerek kalsiyum ikameli ve N-A-S-H jel yapısı ile morfolojik olarak ufak farklılıklar gösteren (N,C)-A-S-H jel yapısını oluşturmaktadır (Garcia-Lodeiro, 2011). Melilite fazı söz konusu kalsiyum ikameli N-A-S-H jel yapısı temsil

ederken, Zeolite-L fazı ise jeopolimerizasyon sonucu oluşan zeolite tipi kristaller muhteva eden N-A-S-H jel yapısı için önemli bir kanıt oluşturmaktadır (Provis ve ark., 2005). Katoite ve Diopside kristal fazlarının izlerine rastlanan S3 karışımında C-A-S-H jel yapısının temsili açıkça görülmektedir. Alüminosilikat hammaddenin kalsiyum varlığında alkali solüsyonlarla aktifleştirilmesi jeopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırması ve jel yapısının oluşması için ekstra çekirdeklenme bölgelerinin oluşmasına imkân sağlaması, $Ca(OH)_2$ takviye edilmiş S3 karışımlarının ortam koşullarında yüksek seviyede jeopolimerizasyon gerçekleştirmesine ve yüksek mekanik performanslar sergilemesine sebep olmuştur (Van Deventer ve ark., 2007). N-A-S-H jel yapısını temsil eden Albite kristallerinin saptandığı S5 numunesinde alüminosilikat minerallerden biri olan Grossular ve Melanite oluşumu gözlemlenmiştir.

%100 İYA bazlı EGC karışımları üzerinde gerçekleştirilen analizlerde Quartz majör piklerinin yanı sıra Albite, Katoite, Andradite, Melilite, Zeolite-L gibi minör piklere rastlanmıştır. S2 numunesinde görülen Albite fazı N-A-S-H jel yapılarının oluşumuna işaret ederken, Katoite bağlayıcı hammaddede bulun CDW bazlı beton atığının CaO içeriğinin jeopolimerizasyon ile alüminosilikat jel yapıya bağlanması sonucu oluşan C-A-S-H yapıya işaret etmektedir. Düşük yoğunlukta izlerine rastlanan Dialuminium silicate oxide ise polimerleşmenin tam performans ile ilerleyemediğine ve nihai ürün olan alkali alümino silikat yapının matrisin bazı bölgelerinde oluşmadığına işaret etmektedir. S4 numunelerinde Ca-Fe silikat fazı olan Andradite oluşumu ve (N,C)-A-S-H jel yapısnın oluşumunun tetiklediği Melilite fazına rastlanmıştır. S6 numunelerinde ise zeolite tipi kristaller muhteva eden N-A-S-H jel yapısının tetiklediği Zeolite-L ve C-A-S-H jel yapısına işaret eden Katoite kristal fazına rastlanmıştır.

4.4.1.3. FTIR Analizi

Nihai olarak üretilen 6 adet EGC karışımının 28 günlük ortam kürü sonrasında uygulanan FTIR analizi sonucu Şekil 4.35'te sunulmuştur.



Şekil 4.35. EGC karışımlarının FTIR analiz sonuçları

FTIR analizi sonucunda elde edilen sonuçlara bakıldığında, genel olarak tüm karışımlarda 950-1000 cm^{-1} spektrum aralığında asimetrik titreşim bandına karşılık gelen bir ana tepe varlığı görülmektedir. Bu da literatürde genel olarak Si(Al)-O

bağları ile ilişkilendirilmiştir (Davidovits, 2015; Vafaei ve Allahverdi, 2017). Bununla birlikte S3 kodlu karışımda söz konusu spektrum aralığında daha büyük bir yoğunluk oluşması, N-A-S-H jel ve alüminosilikat ürünün daha fazla oranda oluştuğunu göstermekte, bu da bu karışımların basınç dayanım sonuçları ile paralel sonuçlara sahip olmasıyla ilişkili olmaktadır. Aynı şekilde basınç dayanım sonucu kısmen düşük olan S5 ve S6 kodlu karışımların da FTIR analizi sonucunda söz konusu spektrum aralığında daha düşük yoğunlukta seyrettiği açıkça görülmektedir. Bununla birlikte karışımlarda genel olarak 1650 cm^{-1} dolaylarındaki tepe noktaları ve 3000 ila 3500 cm^{-1} aralığındaki kambur bölgeler, sırasıyla fiziksel olarak bağlı sudaki (HOH) hidroksil birimlerinin bükülme titreşimi ve hidroksil (OH) bağlarının gerilme titreşimleri ile ilişkilidir, bu da Si-OH (silanol) gruplarındaki hidroksil birimlerinin varlığını ortaya koymaktadır (Redden ve Neithalath, 2013). Bu bağlamda, S5 ve S6 kodlu karışımların diğer karışımlara göre, 950-1000 cm^{-1} aralığındaki spektrumun aksine, 3000 ila 3500 cm^{-1} aralığındaki kambur bölgelerin daha yoğun olduğu, böylelikle bu iki karışımda O-H bazlı bağların daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, jeopolimer ürünün Si-O-(Si/Al) bazlı, ürüne mekanik olarak dayanım veren en önemli parametrenin yerine O-H bazlı yapılar içerdiğini ve bu yüzden diğer karışımlara göre nispeten zayıf özellikler gösterdiğini kanıtlar niteliktedir. Bununla birlikte, literatürde genel olarak Si-O-Si quartz fazları ile ilişkilendirilen 700 cm^{-1} civarında spektrum bölgelerinin, 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.

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında delikli tuğla (DT), harman tuğlası (HT), çatı kiremiti (ÇK), cam atığı (CA) ve beton atığı (BA) gibi inşaat ve yıkım atıklarından (İYA) elde edilen malzemeler kullanılarak jeopolimerizasyon teknolojisi ile hamur, harç ve kompozit karışımlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yukarıda belirtilen materyallerin elde edilmesinden, istenen özelliklere sahip nihai ürünün geliştirilmesine kadar, çalışmadaki deneysel araştırma raporu temelinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- İnşaat ve yıkıntı atığından elde edilen malzemeler, aynı koşullar altında kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulmuş ve sonuç olarak cam atığı en kaba tane boyutuna sahip olurken, çatı kiremiti ve delikli tuğla en ince tane boyutuna sahip olmuştur. Kırma ve öğütme işlemlerinden sonra, çeşitli molarite değerlerine sahip sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonları kullanılarak ve çeşitli termal kürleme işlemleri uygulanarak tamamen inşaat ve yıkıntı atığından elde edilen malzemelerin tekli olarak kullanılmasıyla jeopolimer hamur numuneleri üretilmiş ve bu numunelerin bağlayıcılık kapasiteleri ve mekanik performansları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, İYA bazlı tuğla atıklarının tekli olarak kullanımında ve 115°C'de 72 saatlik fırın kürü sonrasında 60 MPa'yı aşan, oldukça yüksek dayanım sonuçları elde edilmiştir. Cam ve beton atıklarında ise 28 MPa dolaylarında mukavemet sonuçları elde edilmiştir. Böylelikle inşaat yıkıntı atığından elde edilen ve alüminosilikat içeriğine sahip olan bu malzemelerin, jeopolimerizasyon ile geri dönüşümü sağlanarak yapı malzemesi olabilecek bağlayıcılık kapasitesine sahip olduğu kanıtlanmış olmaktadır.

- İYA bazlı malzemelerin bağlayıcılık kapasitesinin belirlenmesinin ardından, harç karışımları geliştirme kapsamında kullanılacak ince geri dönüşüm agregalarının boyutsal ve hacimsel etkilerini incelemek üzere çeşitli harç karışımları tasarlanmıştır. Bağlayıcı olarak İYA bazlı malzemelerin birbirleri arasında değişen oranlarında ikili olarak kullanıldığı karışımlara 4,75-2,00, 2-0,85mm ve 0,85-0,100 mm boyutlarında ve kum/bağlayıcı oranı 0,36, 0,45 ve

0,55 olacak şekilde ince geri dönüşüm agregaları eklenmiştir. Üretilen jeopolimer harç numunelerine fırın kürü uygulanmasını ardından, 70 MPa değerlerine çıkabilen İYA bazlı jeopolimer harç karışımları geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre nihai EGC karışımlarının temeli olacak İYA bazlı jeopolimer harç karışımlarının tasarım parametreleri üzerinde önemli bir bilgi ve tecrübeye sahip olunmuştur.

- Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, istenilen özelliklere sahip jeopolimer ürünlerin fırın kürü yerine ortam koşullarında geliştirilmesi kapsamında çeşitli karışımlar tasarlanmıştır. Bu kapsamda yapılan ön çalışmalar neticesinde, öncelikli olarak tamamı İYA bazlı malzemelere alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit eklenerek bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %100 İYA bazlı malzemelerin jeopolimerizasyon tekniği ile ortam koşullarında 28 gün kür edilmesi sonucunda 30 MPa değerinde bir basınç mukavemetine sahip harç karışımları elde edilmiştir. Harç numuneler ortam kürünün yanında su küründe de bekletilmiş ve su ortamının ortalama olarak %30'luk dayanım düşüşüne neden olduğu gözlemlenmiştir. Devamında karışımlara cüruf ilave edilmiş ve ortam küründe yüksek oranda kalsiyum içeriği sayesinde matriste kalsiyum bazlı yapılar oluşturularak daha iyi mekanik özelliklere sahip harç karışımları geliştirilmesi hedeflenmiştir. Üretilen numunelere yapılan basınç dayanımı testlerinin ardından %20 cüruf ilavesi sayesinde dayanımlar 42,30 MPa değerine ulaşmıştır. Su kürü sonrasında ise en yüksek 38,90 MPa dayanımı elde edilmiş ve böylelikle cüruf ilavesi sayesinde hem ortam koşullarında hem de su küründe oldukça yüksek dayanımlar elde edilmiştir.

- Ortam küründe yüksek mekanik özelliklere sahip jeopolimer harç karışımlarının geliştirilmesinin ardından, nihai EGC malzemeleri üretilmeden önce, çalışma kapsamında kullanılacak çeşitli lifleri denemek üzere bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada ilk olarak %100 İYA bazlı malzemelere çeşitli PVA, PE, PP ve NM lifleri eklenerek küp ve kupon numuneler üretilmiş ve bu numuneler basınç ve eğilme testlerine tabi tutulmuşlardır. Basınç dayanımlarında önceden yapılan çalışmaya benzer şekilde 30 MPa değerlerine

ulaşan karışımlar, eğilme altında önemli ölçüde şekil değiştirme sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşturma davranışı göstermiştir. Sonuçlar incelendiğinde PE lifinin kullanıldığı karışım 10 mm değerinde bir deformasyon yapabilme kapasitesi sergilerken, 4,60 MPa dolaylarında bir eğilme dayanımı performansı sergilemiştir. Önceki çalışmalara benzer şekilde bir diğer seri olarak bu kez karışımlara yine cüruf eklenmiş ve anı şekilde hem basınç hem de eğilme dayanımlarında oldukça önemli bir artış gözlemlenmiştir. Bu bağlamda PE lifinin kullanıldığı karışım bu kez nihai olarak 8.2 MPa'lık bir eğilme dayanımı göstermiştir. Her ne kadar deformasyon değerleri cüruf ilavesinden fazla etkilenmemiş olsa da PE+NM içeren karışımlar yaklaşık 12 mm'ye kadar bir sehim davranışı göstererek bu seride en önemli sehim değerine sahip olmuştur.

- Tez kapsamında, çalışmanın bu kısmına kadar geliştirilen tasarım parametrelerinin her birinin incelenmesi ve optimize edilmesiyle son olarak 6 adet EGC karışım tasarımı yapılmıştır. Karışımlar öncelikle %100 İYA ve İYA + cüruf olarak iki grupta dizayn edilmiş ve her bir grup ise sodyum hidroksit + sodyum silikat, sodyum hidroksit + kalsiyum hidroksit ve sodyum hidroksit + sodyum silikat + kalsiyum hidroksit olacak şekilde alkali koşullarının değiştirilmesiyle üç şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca karışımlara önceki çalışmalardan elde edinilen tecrübeler ve birtakım araştırmalar sonucunda PE ve NM lif kombinasyonunun eklenmesine karar verilmiştir. Tasarlanan karışımların reolojik özellikleri, basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları test edilmiş, elde edilen sonuçlar sayısal ve görsel olarak sunulmuştur. Ayrıca karışımlar ile üretilen numunelere SEM/EDX, XRD, FTIR olmak üzere çeşitli mikro-mekanik analizler uygulanmıştır. SEM analizi sonucu alınan mikroskop görüntülerine göre karışım matrislerindeki ürünlerin dağılımın düzenli ve homojen olması basınç dayanımlarına paralel şekilde gerçekleşmiştir. Bu bağlamda daha yüksek basınç dayanımı sergileyen karışımların matrisinde oluşan jeopolimer ürünler daha düzgün ve homojen dağılmış, genel boşluksuz ve çatlaksız yapılar gözlemlenmiştir. Basınç dayanımları genel olarak düşük olan karışımlarda ise çeşitli mikro çatlaklar ve boşluklu yapılar gözlemlenmiştir. EDX analizi sonuçları incelendiğinde ise yüksek basınç dayanımlı karışımların Si, Al, Ca ve Na türleri olarak dengeli dağıldığı ve

matriste C-A-S-H ve N-A-S-H türü jellerin homojen ve düzgün oluştuğu görülürken, düşük mekanik özelliklere sahip karışımlarda yer yer dengesiz atomik dağılımlar gözlemlenmiştir. Karışımların XRD analiz sonuçlarına bakıldığında 27-29° 2θ açıları arasına merkezlenmiş alüminosilikat jel yapıyı temsil eden tepe yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Söz konusu açılarda tüm karışımlar için Quartz kristali oluşumu görülürken, karışım tasarımlarına göre Gehlenite, Albite, Katoite gibi kristallerin de sıklıkla oluştuğu görülmüştür. Mikro mekanik analizlerinde son olarak karışımlara FTIR analizi yapılmış ve elde edilen verilere göre karışım matrislerinde genel olarak jeopolimer ürünlere rastlanılmıştır. Karışımların benzer piklerinde Si/Al-O türü bağlar oluşurken, çeşitli bölgelerde Quartz ve O-H türü yapıların da oluşumu saptanmıştır.

- Karışımların reolojik özellikleri incelendiğinde ise sodyum silikat içermeyen numunelerin daha koyu bir kıvama sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte lif ilavesinin karışımların kıvamını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Karışımların basınç dayanımlarına bakıldığında genel olarak sodyum silikat ve cüruf içeren karışımların daha yüksek dayanım sonuçları gösterdiği gözlemlenmiştir. %100 İYA malzemelerle üretilmiş numuneler 90 günlük kür sonunda 30 MPa değerlerine ulaşırken, %20 cüruf ilaveli numuneler sodyum silikat kullanımıyla birlikte 90 günün sonunda 50 MPa değerlerine yaklaşmıştır. Silindir olarak üretilen numunelerin yarmada çekme performansına bakıldığında, dayanım bakımından basınç dayanımı ile paralel sonuçlar alındığı gözlemlenmiş, deformasyon olarak 28 günde 4-5 mm değerlerine, 90 günde ise yaklaşık 7,5 mm değerine ulaşabilen karışımlar olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte silindir numunelerde, yarmada çekme yüklemesi altında çeşitli boyutlarda çoklu mikro çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Son olarak üretilen kupon numuneleri ise dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuş ve şekil değiştirme davranışı ile çatlak oluşum mekanizması incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, erken yaştaki numunelerde düşük matris kırılma tokluğu neticesinde ilk çatlak oluşumu daha erken olmuş, devam eden yüklemede ise lif köprüleme özelliği sayesinde numunelerde şekil değiştirme sertleşmesi ve bunu takiben çoklu çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. İlerleyen yaşlarda ise numunelerde matris kırılma

tokluğunun artmasıyla ilk çatlak oluşumunun daha geç olduğunu ancak şekil değiştirme sertleşmesi davranışının ve sehim oluşumunun bir nebze azaldığı gözlemlenmektedir. Sonuçlara göre yaklaşık 50 mm sehim kapasitesine ulaşabilen numuneler ve 12 MPa eğilme dayanımının üzerine çıkabilen numuneler geliştirilerek çok yüksek sünek özellik gösteren, şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterebilen ve çoklu mikro çatlak oluşturma kapasitesine sahip EGC malzeme tasarımı sonuçlanmıştır.

- Bu tez çalışması ile ilgili olarak gelecekte yapılabilecek devam niteliğindeki en önemli çalışma, geliştirilen lif donatılı jeopolimer bağlayıcılı kompozitlerin yük altında gösterdiği çoklu mikro çatlakların uzun vadedeki durumlarını incelemek olacaktır. Bu kapsamda, devam eden jeopolimerizasyon mekanizması sonucu oluşan ürünler ile ve matristeki serbest $Ca(OH)_2$ ve NaOH gibi alkali kaynaklarının ortamdaki CO_2 ile tepkimeye girmesi sonucu oluşan $CaCO_3$ ve Na_2CO_3 gibi bileşikler ile mikro çatlakların kapanabilmesi mümkün olabilmektedir. Önerilen çalışmalar, numunelerin mekanik ve taşınım özelliklerinin kendiliğinden iyileşmeye bağlı olarak değişiminin incelenmesi ile yapıların servis ömrünün ne denli uzayabileceğini rahatlıkla gösterecektir.

KAYNAKLAR

Abbas A, Fathifazl G, Isgor OB, Razaqpur AG, Fouriner B, Foo S., Environmental benefits of green concrete. EIC Clim Change Technol 2006 IEEE;:1–8, 10–12 May 2006.

Abbas A, Fathifazl G, Isgor OB, Razaqpur AG, Fournier B, Foo S., Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. J ASTM Int, 5(1):1–12, 2008.

Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L., Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. Construction and Building Materials, 35, 718-729, 2012.

Ahmed, S. F. U., Maalej, M. & Paramasivam, P., Flexural responses of hybrid steel–polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash. Construction and Building Materials, 21, 1088-1097, 2007.

Akbarnezhad A, Ong KCG, Zhang MH, Tam CT, Foo TWJ., Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. Constr Build Mater 25(8):3469–79, 2011.

Allahverdi, A., & Kani, E. N., Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. International Journal of Civil Engineering, 7(3), 154-160, 2009.

Allahverdi, A., & Kani, E. N., Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer cements. In Handbook of recycled concrete and demolition waste (pp. 439-475). Woodhead Publishing, 2013.

Alonso, S., & Palomo, A., Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. Materials Letters, 47(1-2), 55-62, 2001.

Aveston, J. & Kelly, A., Theory of multiple fracture of fibrous composites. Journal of Materials Science, 8, 352-362, 1973.

Badogiannis, E., Kakali, G. and Tsivilis, S., Metakaolin as supplementary cementitious material. Optimization of kaolin to metakaolin conversion. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 81, 457–462. doi: 10.1007/s10973-005-0806-3, 2005.

Bakharev T., Sanjayan J.G. and Cheng, Y.-B., 'Alkali activation of Australian slag cements', Cem. Concr. Res. 29(1), 113–120, 1999.

Barrer, R. M. and Mainwaring, D. E., Chemistry of soil minerals. Part XI . Hydrothermal transformations of metakaolinite in potassium hydroxide. Journal of the Chemical Society – Dalton Transactions, 1254–1265. doi: 10.1039/DT9720001254, 1972a.

Barrer, R. M. and Mainwaring, D. E., Chemistry of soil minerals. Part XIII . Reactions of metakaolinite with single and mixed bases. Journal of the Chemical Society – Dalton Transactions, 2534–2546. doi: 10.1039/DT9720002534, 1972b.

Bell, J. L., Sarin, P., Provis, J. L., Haggerty, R. P., Driemeyer, P. E., Chupas, P. J., van Deventer, J. S. J. and Kriven, W. M., Atomic structure of a cesium aluminosilicate geopolymer: A pair distribution function study, Chemistry of Materials, 20, 4768–4776, 2008.

Ben Haha, M., Lothenbach, B., Le Saout, G. and Winnefeld, F., Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag -- Part I: Effect of MgO. Cem. Concr. Res. 41(9), 955-963, 2011.

Bentur, A., & Mindess, S., Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press, 2006.

Bernal, S. A., Bejarano, J., Garzón, C., de Gutiérrez, R. M., Delvasto, S., & Rodríguez, E. D., Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites. Composites Part B: Engineering, 43(4), 1919-1928, 2012.

Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvasto, S., & Rodriguez, E., Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. Construction and Building Materials, 24(2), 208-214, 2010.

Bernal, S.A., Provis, J.L., Mejía de Gutierrez, R. and Rose, V., Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. Cem. Concr. Compos. 33(1), 46-54, 2011.

Berndt, M. L., Sanjayan, J., Foster, S. & Castel, A., Pathways for overcoming barriers to implementation of low CO2 concrete. Research Project: RP1004. Crc For Low Carbon Living Ltd, 2013.

Cement Sustainability Initiative: Recycling Concrete., The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). DOI: 978-3- 940388-49-0, 2009.

Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. & Jullien, A., Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. Journal of Cleaner Production, 18, 478-485, 2010.

Cheng, Q. H., Tagnit-Hamou, A. ve Sarkar, S. L., Strength and microstructural properties of waterglass activated slag. Materials Research Society Symposium Proceedings, 245, 49–54, 1992.

Criado, M., Fernandez-Jimenez, A., de la Torre, A.G., Aranda, M.A.G., Palomo, A., An XRD study of the effect of the SiO2/Na2O ratio on the alkali activation of fly ash. Cem. Concr. Res. 37:671–79, 2007.

Damtoft, J., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. & Gartner, E., Sustainable development and climate change initiatives. Cement and concrete research, 38, 115-127, 2008.

Davidovits, J., The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information. Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information, EUR 7716. Luxembourg, Commission of the European Communities, 1982a.

Davidovits, J., Geopolymers – Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, 37, 1633–1656. doi:10.1007/BF01912193, 1991.

Davidovits, J., Geopolymer Chemistry and Applications, Saint-Quentin, France, Institut Géopolymère, 2008.

De Koker, D., & Van Zijl, G. P. A. G., Extrusion of engineered cement-based composite material. In Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC) (pp. 20-22), 2004.

Dias, D. P., & Thaumaturgo, C., Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. Cement and Concrete Composites, 27(1), 49-54, 2005.

Duran Atiş C., Bilim C., Çelik Ö. and Karahan, O., 'Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar', Constr. Build. Mater. 23(1), 548–555, 2009.

Duxson, P., Lukey, G. C., Van De Venter, J. S., Mallicoat, S. W., & Kriven, W. M., Microstructural characterisation of metakaolin-based geopolymers. Ceramic Transactions, 165, 71-85, 2005.

Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M. and van Deventer, J. S. J., The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. Colloids and Surfaces A – Physicochemical and Engineering Aspects, 292, 8–20. doi:10.1016/j.colsurfa.2006.05.044, 2007b.

Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M. and van Deventer, J.S.J., The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. Colloids Surf. A 292(1), 8-20, 2007.

Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. & Van Deventer, J. S., The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. Cement and Concrete Research, 37, 1590-1597, 2007.

Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M. and van Deventer, J.S.J., Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids Surfaces A 269(1-3), 47-58, 2005.

Etxeberria M, Vazquez E, Mari A, Barra M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cem Concr Res 37(5):735–42, 2007.

Feng, D., Tan, H. and van Deventer, J. S. J., Ultrasound enhanced geopolymerisation. Journal of Materials Science, 39, 571–580. doi: 10.1023/ B:JMSC.0000011513.87316.5c, 2004.

Fernández-Jiménez A., 'Cementos de escorias activadas alcalinamante: influencia de las variables y modelización del proceso', PhD Thesis, Universidad Autónoma de Madrid, Spain, 2000.

Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. Microporous Mesoporous Mater. 86:207, 2005.

G. Furtos, L. Silaghi-Dumitrescu, P., Pascuta, C. Sarosi and K. Korniejenko K., "Mechanical properties of wood fiber reinforced geopolymer composites with sand addition," Journal of Natural Fibers, Vol., pp. 1-12, 2019.

Garcia-Lodeiro I, Palomo A, Fernández-Jiménez A, MacPhee DE., Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na2O-CaO-Al2O3-SiO 2-H2O. Cem Concr Res 41:923–31. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006, 2011.

Glukhovsky, V.D., Ancient, modern and future concretes. In: Krivenko, P.V., (ed.) Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine. Vol. 1, pp. 1-9. VIPOL Stock Company, 1994.

Goberis, S., & Antonovich, V., 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, 2004.

Goretta, K. C., Chen, N., Gutierrez-Mora, F., Routbort, J. L., Lukey, G. C. and van Deventer, J. S. J., Solid-particle erosion of a geopolymer containing fly ash and blast-furnace slag. Wear, 256, 714–719. doi:10.1016/S0043-1648(03)00463 0, 2004.

Granizo, M. L. and Blanco, M. T., Alkaline activation of metakaolin – An isothermal conduction calorimetry study Journal of Thermal Analysis, 52, 957–965. doi:10.1023/A:1010176321136, 1998.

Granizo, M. L., Blanco Varela, M. T. and Martínez-Ramírez, S., Alkali activation of metakaolins: Parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. Journal of Materials Science, 42, 2934–2943. doi: 10.1007/s10853-006-0565-y., 2007.

Hansen TC, editor., Recycling of Demolished Concrete and Masonry. Oxfordshire, UK: Taylor and Francis, 1992.

Hansen TC, Narud H., Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concr Int – Des Constr 5(1):79–83, 1983.

Hasanbeigi, A., Price, L. & Lin, E., Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 6220-6238, 2012.

Hemmings, R. T. and Berry, E. E., On the glass in coal fly ashes: Recent advances. Fly Ash and Coal Conversion By-Products: Characterization, Utilization, and Disposal IV, Warrendale, PA, Mccarthy, G. J. (Ed.), 3–38, 1988.

Hong, S. Y., & Glasser, F. P., Alkali binding in cement pastes: Part I. The CSH phase. Cement and Concrete Research, 29(12), 1893-1903, 1999.

Huang, X., Ranade, R. & Li, V. C., Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement. Journal of Materials in Civil Engineering, 25, 923-931, 2012.

Huntzinger, D. N. & Eatmon, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. Journal of Cleaner Production, 17, 668-675, 2009.

J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, 4th ed., Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2015.

J. Davidovits, Geopolymers and geopolymeric new material, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 35 (2) 429-441, 1989.

Juan MS, Gutierrez PA., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Constr Build Mater 23:872–7, 2009.

K. Korniejenko, E. Frączek, E. Pytlak and M. Adamski, "Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers," Procedia Engineering, Vol. 151, pp. 388–393, 2016.

Kabele, P., Li, V. C., Horii, H., Kanda, T. & Takeuchi, S., Use of BMC for ductile structural members. 5th International Symposium on Brittle Matrix Composites (BMC-5). Warsaw, Poland, 1997.

Kanda, T., Watanabe, S. & Li, V., Application of pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements. AEDIFICATIO Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures, 3, 1477-1490, 1998.

Kasai Y., Reuse of demolition waste. In: Proceedings of the second international RILEM symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. Chapman and Hall, Tokyo, 7–11 November, 1988.

Katz A., Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cem Concr Res 33(5):703–11, 2003.

Keyte, L. M., Lukey, G. C. and van Deventer, J. S. J., The effect of coal ash glass chemistry on the tailored design of waste-based geopolymeric products. WasteEng 2005, Albi, France, Nzihou, A. (Ed.), CD-ROM proceedings, 2005.

Khalaf FM, DeVenny AS. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. J Mater Civ Eng 16(4):331–40, 2004.

Khater, H. M., Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. International Journal of Advanced Structural Engineering, 5(1), 12, 2013.

Kim, J.-K., Kim, J.-S., Ha, G. J. & Kim, Y. Y., Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag. Cement and Concrete Research, 37, 1096-1105, 2007.

Kim, Y. Y., Fischer, G. & LI, V. C., Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite. ACI structural Journal, 101, 792-801, 2004.

Komnitsas, K., & Zaharaki, D., Co-utilization of construction and demolition with industrial wastes for the production of geopolymer. In Inter. Conference on

Industrial Waste & Wastewater Treatment & Valorization, President Hotel, Athens (pp. 21-23), 2015.

Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M., Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. Advanced Powder Technology, 26(2), 368-376, 2015.

Kong, H.-J., Bike, S. G. & Li, V. C., Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. Cement and Concrete Composites, 25, 301-309, 2003.

Kuroda Y, Hashida H., A closed – loop concrete system on a construction site. In: Proc CANMET/ACI/JCI, three-day international symposium on sustainable development of cement, concrete and concrete structures. Toronto, Canada; p. 371–88, 2005.

Kurt, C. and Bittner, J., Sodium hydroxide. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag, 2006.

Lampris, C., Lupo, R., & Cheeseman, C. R., Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants. Waste Management, 29(1), 368-373, 2009.

Lee, B. Y., Cho, C. G., Lim, H. J., Song, J. K., Yang, K. H., & Li, V. C., Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar–a feasibility study. Construction and Building Materials, 37, 15-20, 2012.

Lee, S., Kim, Y. J. and Moon, H. S., Energy-filtering transmission electron microscopy (EF-TEM) study of a modulated structure in metakaolinite, represented by a 14

Å modulation. Journal of the American Ceramic Society, 86, 174–176. doi: 10.1111/j.1151-2916.2003.tb03297, 2003.

Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. J., Effects of anions on the formation of aluminosilicate gel in geopolymers. Industrial & engineering chemistry research, 41(18), 4550-4558, 2002.

Lee, W.K.W., van Deventer, J.S.J., Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. Langmuir 19:8726–3., 2003.

Li JB., Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete, Dissertation of Masteral Degree. Shanghai: Tongji University, 2004.

Li X., Recycling and reuse of waste concrete in China Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. Resour Conserv Recycle 53:36–44, 2008.

Li, V., Technology Advances: Bendable Concrete Minimizes Cracking and Fracture Problems. MRS Bulletin, 31, 862, 2006.

Li, V. C. & Kanda, T., Innovations Forum: Engineered cementitious composites for structural applications. Journal of Materials in Civil Engineering, 10, 66-69, 1998.

Li, V. C. & Leung, C. K., Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. Journal of Engineering Mechanics, 118, 2246-2264, 1992.

Li, V. C. & Wu, H.-C., Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. Applied Mechanics Reviews, 45, 390-398, 1992.

Li, V. C., Engineered cementitious composites (ECC)-tailored composites through micromechanical modeling, 1998.

Li, V. C., Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure. Springer, 2019.

Li, V. C., Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling. In: N. BANTHIA, A. BENTUR, A. & MUFTI, A. (eds.) Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 1998.

Li, V. C., On engineered cementitious composites (ECC). Journal of advanced concrete technology, 1, 215-230, 2003.

Li, V. C., Lepech, M., Wang, S., Weimann, M. & Keoleian, G., Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems. Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 181-191, 2004a.

Li, V. C., Mishra, D. K. & Wu, H.-C., Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. Materials and Structures, 28, 586-595, 1995.

Li, V. C., Wang S. & Wu, C., Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). ACI materials Journal, 98, 2001.

Li, Z., Zhang, Y., & Zhou, X., Short fiber reinforced geopolymer composites manufactured by extrusion. Journal of Materials in Civil Engineering, 17(6), 624-631, 2005.

Lim, Y. M. & Li, V. C., Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites. Cement and Concrete Composites, 19, 373-385, 1997.

Limbachiya M, Meddah MS, Ouchagour Y., Performance of Portland/silica fume cement concrete produced with recycled concrete aggregate. ACI Mater J 109(1):91–100, 2012.

Lloyd, R. R., PhD Thesis, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Melbourne, Australia, 2008.

Lloyd, R.R., Provis, J.L., Smeaton, K.J. and van Deventer, J.S.J., Spatial distribution of pores in fly ash-based inorganic polymer gels visualised by Wood's metal intrusion. Micropor. Mesopor. Mater. 126(1-2), 32-39, 2009.

Lukey, G. C., Mendis, P. A., van Deventer, J. S. J. and Sofi, M., Advances in inorganic polymer concrete technology. In Day, K. W. (Ed.) Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, 3rd Edition. London, Routledge, 2006.

M. Vafaei, A. Allahverdi, High strength geopolymer binder based on waste-glass powder, Adv. Powder Technol. 28 215–222. https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.09.034, 2017.

Maalej, M. & Li, V. C., Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members for improved durability. Structural Journal, 92, 167-176, 1995.

Mackenzie, K. J. D., What are these things called geopolymers? A physico-chemical perspective. Ceramic Transactions, 153, 175–186, 2003.

MacKenzie, K. J. D., Brown, I. W. M., Meinhold, R. H. and Bowden, M. E., Outstanding problems in the kaolinite-mullite reaction sequence investigated by 29Si and 27Al solid-state nuclear magnetic resonance: I. Metakaolinite. Journal of the American Ceramic Society, 68, 293–297. doi: 10.1111/j.1151-2916.1985.tb15228.x, 1985.

Marceau, M., Nisbet, M. A. & Van Geem, M. G., Life cycle inventory of portland cement manufacture. Portland Cement Association Skokie, IL, US, 2006.

Masanet, E., Price, L., De La Rue Du Can, S., Brown, R. & Worrell, E., Optimization of Product Life Cycles to Reduce Greenhouse Gas Emissions in California. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research, 2005.

Matias D, de Brito J, Rosa A, Pedro D., Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – influence of the use of superplasticizers. Constr Build Mater 44:101–9, 2013.

Matsumoto, T., & Mihashi, H., DFRCC terminology and application concepts. Journal of Advanced Concrete Technology, 1(3), 335-340, 2003.

Mccaffrey, R., Climate change and the cement industry. Global cement and lime magazine (environmental special issue), 15, 19, 2002.

Mills T.H, Showalter E, Jarman D., A Cost Effective Waste Management Plan. Cost Engineering 41 (3): 35–43, 1999.

Mishra, D., Design of pseudo strain-hardening cementitious composites for a ductile plastic hinge. PhD, University of Michigan, 1995.

Monnin, C. and Dubois, M., Thermodynamics of the LiOH+H2O system. J. Chem. Eng. Data 50(4), 1109-1113, 2005.

Movassaghi R., Durability of reinforced concrete incorporating recycled concrete as aggregate, MASc Thesis. Waterloo, Ontario, Canada; University of Waterloo, 2006.

Myers R.J., Bernal S.A., San Nicolas R. and Provis J.L., 'Generalized structural description of calcium−sodium aluminosilicate hydrate gels: the cross-linked substituted tobermorite model', Langmuir, 29, 5294−5306, 2013.

Naaman, A. E., High performance fiber reinforced cement composites. Naaman AE. High-performance construction materials: science and applications. Singapore: World Scientific Publishing, 91-153, 2008.

Najafi Kani E , Allahverdi A and Provis J L., ' Effl orescence control in geopolymer binder based on natural pozzolan ', Cement and Concrete Composites , 34 (1), 25 – 33, 2012.

Nassar R, Soroushian P., Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. Constr Build Mater 29:368–77, 2012.

Natali, A., Manzi, S., & Bignozzi, M. C., Novel fiber-reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix. Procedia Engineering, 21, 1124-1131, 2011.

Nematollahi, B., & Sanjayan, J., Ambient temperature cured one-part engineered geopolymer composite: a sustainable alternative to engineered cementitious

composite. In 9th Rilem International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 2016.

Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Ahmed Shaikh, F. U., Tensile strain hardening behavior of PVA fiber-reinforced engineered geopolymer composite. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(10), 04015001, 2015.

Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Shaikh, F. U. A., Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. Construction and building materials, 70, 54-64, 2014.

Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., & Yang, E. H., High ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced one-part geopolymer composite: A micromechanics-based investigation. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 17(3), 555-563, 2017.

Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., & Yang, E. H., Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite. Construction and Building Materials, 131, 552-563, 2017.

Nordström, J., Nilsson, E., Jarvol, P., Nayeri, M., Palmqvist, A., Bergenholtz, J. and Matic, A., Concentration- and pH-dependence of highly alkaline sodium silicate solutions. J. Colloid Interf. Sci. 356(1), 37-45, 2011.

Nugteren, H. W., Coal fly ash: From waste to industrial product. Particle and Particle Systems Characterisation, 24, 49–55. doi:10.1002/ppsc.200601074, 2007.

Oh, J.E., Monteiro, P.J., Jun, S.S., Choi, S., Clark, S.M., The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. Cem. Concr. Res. 40, 189-196, 2010.

Ohno, M., Self-healing Capacity of Strain-Hardening Fiber Reinforced Geopolymer Composites. In fib Symposium on Concrete Structures for Resilient Societies, 2020.

Ohno, M., & Li, V. C., A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. Construction and Building Materials, 57, 163-168, 2014.

Olorunsogo FT, Padayachee N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. Cem Concr Res 32:179–85, 2002.

Palomo, A. and Glasser, F. P., Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin. British Ceramic Transactions and Journal, 91, 107–112, 1992.

Palomo, A., Macias, A., Blanco, M.T. and Puertas, F., Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers. In: Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, India. Vol. 5, pp. 505-511. National Council for Cement and Building Materials, 1992.

Pathak, A., & Jha, V. K., Synthesis of geopolymer from inorganic construction waste. Journal of Nepal Chemical Society, 30, 45-51, 2012.

Perera, D. S., Nicholson, C. L., Blackford, M. G., Fletcher, R. A. and Trautman, R. A., Geopolymers made using New Zealand flyash. Journal of the Ceramic Society of Japan, 112, S108–S111, 2004.

Phair, J.W., van Deventer, J.S.J., Characterisation of fly-ash based geopolymeric binders activated with sodium aluminate. Ind Eng Chem Res 41:4242–4251, 2002.

Poon C.S, Reducing Construction Waste. Waste Management 27: 1715–1716, 2007.

Poon CS, Shui Z, Lam L, Fok H, Kou S., Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cem Concr Compos 34:31–6, 2004.

Poon CS, Shui ZH, Lam L., Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. Constr Build Mater 18:461–8, 2004.

Price, L., Worrell, E., Galitsky, C. & Price, L., Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Cement Industry. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US), 2008.

Provis J.L., Fernández-Jiménez A., Kamseu E., Leonelli C., Palomo A., Binder chemistry – Low-calcium alkali-activated materials,, Alkali Activated Materials. RILEM State-of-the-Art Reports, Springer, Dordrecht, 2014.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (Eds.)., Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM (Vol. 13). Springer Science & Business Media, 2013.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.)., Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier, 2009.

Provis, J. L., Lukey, G. C. and Van Deventer, J. S. J., Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? – A re-examination of existing results. Chemistry of Materials, 17, 3075–3085. doi:10.1021/cm050230i, 2005.

Provis, J.L.: Activating solution chemistry for geopolymers., In: Provis, J.L. and van Deventer, J.S.J. (eds.) Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications, pp. 50-71. Woodhead, Cambridge, UK, 2009.

Puertas F., Palacios M., Manzano H., Dolado J.S., Rico A. and Rodríguez J., 'A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements', J. Eur. Ceram. Soc. 31(12), 2043–2056, 2011.

Puertas, A. Barba, M. Gazulla, M. Gómez, M. Palacios, S. Martínez, Residuoscerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de Clinkerde cemento portland: caracterización y activación alcalina, Mater. Constr. 56 7–84, 2006.

Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T., Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. Cement and Concrete Research, 33(12), 2031-2036, 2003.

Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S. and Vázquez, E., Alkali-activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products. Cement and Concrete Research, 30, 1625–1632. doi:10.1016/S0008-8846(00)00298-2, 2000.

Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J.S., Rico, A. and Rodríguez, J., A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. J. Eur. Ceram. Soc. 31(12), 2043-2056, 2011.

Qing-Hua, C., & Sarkar, S. L., A study of rheological and mechanical properties of mixed alkali activated slag pastes. Advanced Cement Based Materials, 1(4), 178-184, 1994.

Qudah, S. & Maalej, M., Application of Engineered Cementitious Composites (ECC) in interior beam–column connections for enhanced seismic resistance. Engineering Structures, 69, 235-245, 2014.

R. Redden, N. Neithalath, Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders, Cem. Concr. Compos. 46–56. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011, 2014.

Rahier, H., Simons, W., Van Mele, B., & Biesemans, M., 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, 1997.

Rangan BV., Low calcium fly ash based geopolymer concrete. In: Nawy EG, editor. Concrete construction engineering handbook. New York: CRC Press, 2007.

Rao A., Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete, M Tech Thesis. Dept of Civil Eng, Indian Institute of Technology Kanpur, 2005.

Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C. and Van Deventer, J. S. J., Attenuated total reflectance Fourier transform infrared analysis of fly ash geopolymer gel ageing. Langmuir, 23, 8170–8179. doi:10.1021/la700713g, 2007.

Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R., & Payá, J., Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. Construction and Building Materials, 43, 98-106, 2013.

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

Rocha, J., Adams, J. M. and Klinowski, J., The rehydration of metakaolinite to kaolinite: Evidence from solid-state NMR and cognate techniques. Journal of Solid State Chemistry, 89, 260–274. doi:10.1016/0022-4596(90)90267-2, 1990.

Rowles, M. and O'Connor, B., Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. J. Mater. Chem. 13(5), 1161-1165, 2003.

Roy, A., Schilling, P. J. and Eaton, H. C., Alkali activated class C fly ash cement, U.S. Patent 5,565,028, 1996.

Sabir, B. B., Wild, S. and Bai, J., Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and Concrete Composites, 23, 441–454. doi:10.1016/ S0958-9465(00)00092-5, 2001.

Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH., Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. Cem Concr Res 31:707–12, 2001.

Sealey B.J, Phillips P.S, Hill G.J., Waste Management Issues for the UK Readymixed Concrete Industry. Resources, Conservation and Recycling 32 (3–4): 321– 331, 2001.

Shaikh F.U.A., Lu Y.Y., Maalej M., Development of ductile fibre reinforced geopolymer composites. In: Van Mier, et al., editors. Proceedings of eighth

international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, Spain, 2013.

Shaikh, F. U. A., Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. Construction and Building Materials, 43, 37-49, 2013.

Shi, C. and Day, R.L., Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements. Cem. Concr. Res. 26(3), 439-447, 1996.

Shi, C., Krivenko, P. V. and Roy, D. M., Alkali-Activated Cements and Concretes, Abingdon, UK, Taylor and Francis, 2006.

Shi, C., On the state and role of alkalis during the activation of alkali-activated slag cement. In: Grieve, G. and Owens, G., (eds.), Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, pp. 2097-2105, 2003.

Silva, F. J., & Thaumaturgo, C., Fibre reinforcement and fracture response in geopolymeric mortars. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 26(2), 167-172, 2003.

Smolcyk H.G, 'Structure et characterisation des laitiers', 7th International Congress of the Chemistry of Cement, Paris, vol. 1, 1–16, 1980.

Stang, H., & Li, V. C., Classification of fiber reinforced cementitious materials for structural applications, 2004.

Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J., & Li, Q., Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. Construction and Building Materials, 49, 281-287, 2013.

Şahmaran, M., & Li, V. C., De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites. Cement and Concrete Research, 37(7), 1035-1046, 2007.

Şahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M., Ranade, R. & Li, V. C., Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. ACI Materials Journal, 106, 308-316, 2009.

Tam VWY, Tam CM, Wang Y., Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. Constr Build Mater 21:1928–39, 2007.

Tavakoli M, Soroushian P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. Concre Int 18:58–61. Compendex, 1996.

Taylor, R., Richardson, I.G. and Brydson, R.M.D., Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blastfurnace slag blends containing 0 to 100% slag. Cem. Concr. Res. 40(7), 971-983, 2010.

Türkiye İnşaat Malzemeleri Sektör Görünüm Raporu Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği. (In English: Report of Turkey Construction Material Sector Outlook, The Union of Chambers and Commodity Exchanges of Turkey) Available:http://www.tobb.org.tr/Documents/yayinlar/Türkiye%20İnşaat%20 Malzemeleri%20Sek tör%20Görünüm%20Raporu.pdf. Accessed 2012 March 6, 2011.

Vail, J.G., Soluble Silicates: Their Properties and Uses. Reinhold, New York, 1952.

van Deventer, J. S., Provis, J. L., Duxson, P., & Brice, D. G., Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. Waste and Biomass Valorization, 1(1), 145-155, 2010.

Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxson, P., Lukey, G.C., Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. J. Hazard Mater. 139 (3), 506e513, 2007.

van Jaarsveld, J.G.S. and van Deventer, J.S.J., Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. Ind. Eng. Chem. Res. 38(10), 3932-3941,1999.

Wang F.S., Rui-Lian S. and Ying-Jing C., 'Study on modification of the high-strength slag cement material', Cement and Concrete Research 35, 1344–1348, 2005.

Wang S.D. and Scrivener K.L., 'Hydration products of alkali activated slag cement', Cem. Concr. Res. 25(3), 561–571, 1995.

Wang S.D., Pu X.C., Scrivener K.L. and Pratt P.L., 'Alkali-activated slag: a review of properties and problems', Cem. Concr. Res. l7(27), 93–102, 1995.

Wang, S. & Li, V. C., Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. ACI Materials Journal-American Concrete Institute, 104, 233-241, 2007.

Wang, S., Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites. Ph.D., University of Michigan, 2005.

Wang, S.-D., Pu, X.-C., Scrivener, K.L. and Pratt, P.L., Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. Adv. Cem. Res. 7(27), 93-102, 1995.

Wastiels, J., Wu, X., Faignet, S. and Patfoort, G., Mineral polymer based on fly ash. In: Proceedings of the 9th International Conference on Solid Waste Management, Philadelphia, PA. 8pp. Widener University, 1993.

Wastiels, J., Wu, X., Faignet, S. and Patfoort, G., Mineral polymer based on fly ash. J. Resourc. Manag. Technol. 22(3), 135-141, 1994.

Weldes, H.H. and Lange, K.R., Properties of soluble silicates. Ind. Eng. Chem. 61(4), 29-44, 1969.

White, C.E., Provis, J.L., Kearley, G.J., Riley, D.P. and van Deventer, J.S.J., Density functional modelling of silicate and aluminosilicate dimerisation solution chemistry. Dalton Trans. 40(6), 1348-1355, 2011.

Xu, H., Lukey, G. C. and van Deventer, J. S. J., The activation of Class C-, Class F-fly ash and blast furnace slag using geopolymerisation. Proceedings of 8th CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, NV, Malhotra, V. M. (Ed.), 797–819, 2004.

Yanagibashi K, Inoue K, Seko S, Tsuji D., A study on cyclic use of aggregate for structural concrete. SB05 Tokyo: Action for sustainability – The 2005 world sustainable building conference. Tokyo, Japan; 2585–2592, 2005.

Yang, E.-H. & Li, V. C., Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. Construction and building Materials, 24, 130-139, 2010.

Yang, E.-H., Wang, S., Yang, Y. & Li, V. C., Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites. Journal of advanced concrete technology, 6, 181-193, 2008.

Yang, K.-H., Song, J.-K., Ashour, A.F. and Lee, E.-T., Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. Constr. Build. Mater. 22(9), 1981-1989, 2008.

Yang, X., Zhu, W. and Yang, Q., The viscosity properties of sodium silicate solutions. J. Solution Chem. 37(1), 73-83, 2008.

Yip, C.K., Lukey, G.C., van Deventer, JSJ., The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. Cem Concr Res 35:1688–1697, 2005.

Zhang, B., MacKenzie, K.J.D. and Brown, I.W.M, Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate. J. Mater. Sci. 44(17), 4668-4676, 2009.

Zhang, Y. J., Li, S., & Wang, Y. C., Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature. Journal of Non-Crystalline Solids, 358(3), 620-624, 2012.

Zhang, Z. H., Yao, X., Zhu, H. J., Hua, S. D., & Chen, Y., Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. Journal of Central South University of Technology, 16(1), 49-52, 2009.

Zhou, H., Wu, X., Xu, Z. and Tang, M., Kinetic study on hydration of alkaliactivated slag. Cem. Concr. Res. 23(6), 1253-1258, 1993.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İsmail Raci BAYER
Doğum Tarihi : 22/12/1977
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu :
Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi - İnşaat Mühendisliği (2001)
Yüksek Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi - İnşaat Mühendisliği (2004)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:
Orta Doğu Teknik Üniversitesi (2001-2008)
Bayındırlık ve İskân Bakanlığı (2008-2011)
Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2011-Halen)

Yayınları (SCI) :

Yayınları (Diğer) :

İ. Raci BAYER, Hüseyin ULUGÖL, İlhami DEMİR, Gürkan YILDIRIM, Mustafa ŞAHMARAN "Tasnif Edilmiş İnşaat Yıkıntı Atıklarından Elde Edilen Harman Tuğlası, Delikli Tuğla ve Çatı Kiremitinden Oluşan İkili Karışımların Geopolimer Hamur Üretiminde Değerlendirilmesi" Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol.35(1), sayfa: 79-89, Mart 2020

İ. Raci BAYER, Lutfullah TURANLI, P. Kumar MEHTA "Mass Concrete Construction Using Self-Compacting Mortar" Turkish Journal of Engineering (TUJE), Vol.3(3), pp.110-119, July 2019.

İ. Raci BAYER, Ali ALBAYRAK, Gıyasettin GÜNEŞ "Yerel Yönetimlerce İşletilen Atıksu Arıtma Tesislerinde Örnek Çamur Yönetimi Uygulamaları" Yerel Siyaset kitabı (Editörler: Doç.Dr. Hakan REYHAN & Dr. Ayşen SATIR REYHAN) Palme Yayınevi, ISBN: 978-605-282-113-8, sayfa: 265-284, Ankara, 2019.

Mehrali ECER, İ. Raci BAYER, Ali ALBAYRAK, Gıyasettin GÜNEŞ "Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti Tarafınca Finanse Edilen Derin Deşarjı Uygulamaları" 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 1-3 Kasım 2018, Adana. (Bildiriler Kitabı, sayfa: 228-239)

Ali ALBAYRAK & İ. Raci BAYER "Kamu Sektörü Yatırımlarında Halkın Davranışlarının Karşılaştırılması" (Bildiri) "Türkiye'de Hidroelektrik Santralları Projelerinde Ekolojik Akış Debisi" (Bildiri) "Türkiye'de IPA Projelerinin ÇED Uygulamaları" (Poster) 38. Uluslararası ÇED Konferansı (IAIA18) , 16-19 Mayıs 2018, Durban, Güney Afrika Cumhuriyeti.

İ. Raci BAYER, Ali ALBAYRAK, Gıyasettin GÜNEŞ "Sludge Management Applications in IPA Projects" 4th International Water Congress, 2-4 November 2017, İzmir, Turkey.

Funda AŞUT & İ. Raci BAYER "Evaluation of sustainable urban preservation concept via Ankara Hamamönü example" Scientific Research and Essays, Vol.12(10), pp.88–102, May 2017.

Evgin APAYDIN, Yusuf Emre KÖROĞLU, Doç.Dr. Arzuhan Burcu GÜLTEKİN, Prof.Dr. Harun TANRIVERMİŞ, İsmail Raci BAYER "A new approach in sustainable urban transformation: Super Cities" 3rd International Sustainable Buildings Symposium, 15-17 March 2017, Dubai.

İ. Raci BAYER, Reyhan AKAT, Zeynep SOFUOĞLU "An Investigation into the Building-Sanitary Equipment in the Traditional Residential Architecture" Scientific Research and Essays, Vol.9(15), pp.668–686, August 2014.

Reyhan AKAT, İ. Raci BAYER, Zeynep SOFUOĞLU "Investigation of the Hygienic Situation of Kitchens, Bathrooms and Toilets in the Traditional Residential Architecture" Scientific Research and Essays, Vol.7(42), pp.3625–3638, October 2012.

Reyhan AKAT, Birgül ÇAKIROĞLU, İ. Raci BAYER "The Reflections of the Concept of Beauty in the Religious Architecture: The Example of the Ottoman Period between the 13th and 17th Centuries" Philosophical Papers and Reviews, Vol.3(1), pp.11–37, June 2012.

İ. Raci BAYER, Lutfullah TURANLI and P. Kumar MEHTA "Mass Concrete Construction Using a New Approach with Preplaced Aggregate" 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, May 31 - June 3, 2006, Montreal, Canada.

Araştırma Alanları: Yapı Malzemeleri, Jeopolimer, Tasarlanmış Jeopolimer Kompozitler, Mikro-Yapı Analizi