



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AKTİVE EDİLMİŞ UÇUCU KÜL, ATIK CAM VE YANMIŞ
KÖMÜR ATIKLARININ BRİKET ÜRETİMİNDE
KULLANILMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU

**Danışman
Prof. Dr. İlker USTABAŞ**

**RİZE
2024**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Prof. Dr. İlker USTABAŞ danışmanlığında, Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU tarafından hazırlanan *Aktive Edilmiş Uçucu Kül, Atık Cam ve Yanmış Kömür Atıklarının Briket Üretilmesinde Kullanılması* adlı bu tez çalışması, 26.08.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan :	Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU	
Üye :	Prof. Dr. İlker USTABAŞ	
Üye :	Prof. Dr. Ayberk KAYA	

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Aktive Edilmiş Uçucu Kül, Atık Cam ve Yanmış Kömür Atıklarının Briket Üretilmesinde Kullanılması” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

26/08/2024

Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU

ÖNSÖZ

Bu tez, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin mekanik ve fiziksel performanslarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Tezin ana hedefi, bu malzemelerin briket üretiminde etkin bağlayıcılar olup olmadığını ve geleneksel briketlere kıyasla üstün performans özellikleri sağlayıp sağlamadığını belirlemektir. Çalışma kapsamında, farklı karışım oranlarında uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen briketlerin basınç dayanımı ve su emme oranları incelenmiş, elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Öncelikle, tez danışmanım Prof. Dr. İlker USTABAŞ'a, tezin her aşamasında göstermiş olduğu sabır, destek ve değerli katkılarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında ve veri analizlerinde bana yardımcı olan Araştırma Görevlisi Talip ÇAKMAK'a, sağladığı teknik destek ve sabrı için teşekkür ederim.

Son olarak, tez yazım sürecinde bana manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların destekleri olmasaydı bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmayabilirdi.

Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU

RİZE/2024

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
GİRİŞ	1
1.GENEL BİLGİLER	3
1.1. Geopolimer Betonlarda Bağlayıcı Olarak Kullanılan Malzemeler	3
1.2. Uçucu kül ve Atık Öğütülmüş Camın Geopolimerde Kullanımında Sağlanan Çevresel Faydalar.....	4
1.3. Yanmış Kömürün Agrega Olarak Kullanımı	5
1.4. Geopolimerler	6
1.5. Geopolimer Briketlerde Dayanım ve Durabilite Özellikleri.....	19
1.6. Dayanım Kazanma Teorileri	20
1.6.1. Puzolanik Reaksiyon Teorisi	20
1.6.2. Alkali Aktivasyon Teorisi	21
1.6.3. Dolgu Etki Teorisi	22
1.6.4. Parçacık Paketleme Teorisi	23
1.6.5. Reaktif Agregalar Modeli.....	23
1.6.6. Sürdürülebilirlik Modeli.....	24
1.7. Literatür Özeti	25
2. YAPILAN ÇALIŞMA VE KULLANILAN MALZEMELER	28
2.1. Çalışmanın Amacı.....	28
2.2. Malzemeler.....	28
2.2.1. Yanmış Kömür Atığı (YKA).....	28
2.2.2. Atık Cam (AC)	31
2.2.3. Uçucu Kül (UC)	32
2.2.4. Standart Kum.....	33
2.2.5. Sodyum Hidroksit (NaOH).....	33

2.3. Geopolimer Harçların Üretimi ve Malzeme Miktarları	35
2.4. Geopolimer Betonların Üretimi	37
2.5. Geopolimer Briket Üretimi	38
2.6. Deneyler	39
2.6.1. Eğilme Dayanımı Deneyi	39
2.6.2. Basınç Dayanımı Deneyi	40
2.6.3. Yarmada Çekme Deneyi.....	41
2.6.4. Su Emme Deneyi	42
2.6.5. Mikro Yapısal Analizler	42
2.7. Bulgular.....	42
2.7.1. Numunelerin Eğilme Dayanımları	42
2.7.2. Numunelerin Basınç Dayanımları	44
2.7.3. Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımları	45
2.7.4. Numunelerin Su Emmesi.....	46
2.7.5. Mikroyapı Analizleri	46
3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	50
3.1. Tartışma	50
3.2. Sonuçlar	58
KAYNAKÇA.....	60

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans

Danışman : Prof. Dr. İlker USTABAŞ

Hazırlayan : Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU

Yıl : 2024

Sayfa Sayısı : 63

ÖZET

AKTİVE EDİLMİŞ UÇUCU KÜL, ATIK CAM VE YANMIŞ KÖMÜR ATIKLARININ BRİKET ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

Bu tez çalışmasında, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanarak üretilen geopolimer briketlerin mekanik ve fiziksel performansları değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, bu malzemelerin briket üretiminde etkin bağlayıcılar olup olmadığını ve geleneksel briketlere kıyasla üstün performans özellikleri sağlayıp sağlamadığını belirlemektir.

Çalışma kapsamında, farklı karışım oranlarında uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanarak briketler üretilmiş ve bu briketlerin basınç dayanımı ve su emme oranları laboratuvar testleri ile incelenmiştir. Test sonuçlarına göre, uçucu kül içeren briketlerin basınç dayanımı en yüksek 22,24 MPa olarak bulunmuş ve su emme oranlarının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Atık cam içeren briketlerin basınç dayanımı en yüksek 32,42 MPa olarak tespit edilmiş ve su emme oranlarının düşük olduğu belirlenmiştir. Yanmış kömür içeren briketlerin basınç dayanımı ise en yüksek 31,8 MPa olarak bulunmuş, ancak su emme oranlarının biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Kombinasyon briketlerinin, en yüksek dayanım ve en düşük su emme oranı ile en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Bu bulgular, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıklarının geopolimer briket üretiminde etkin bağlayıcılar olarak kullanılabileceğini ve bu malzemelerin inşaat sektöründe çevresel sürdürülebilirliği artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: geopolimerler, uçucu kül, atık cam, yanmış kömür, basınç dayanımı, su emme

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Civil Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Prof. Dr. İlker USTABAŞ

Author : Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU

Year : 2024

Pages : 63

ABSTRACT

UTILISATION OF ACTIVATED FLY ASH, WASTE GLASS AND BURNT COAL WASTES IN BRIQUETTE PRODUCTION

In this thesis, the mechanical and physical performance of geopolymer bricks produced using fly ash, waste glass, and burnt coal residues were evaluated. The aim of the study is to determine whether these materials can be effective binders in brick production and whether they provide superior performance characteristics compared to traditional bricks.

Within the scope of the study, bricks were produced using different proportions of fly ash, waste glass, and burnt coal residues, and the compressive strength and water absorption rates of these bricks were examined through laboratory tests. According to the test results, the compressive strength of bricks containing fly ash was found to be up to 22.24 MPa, with low water absorption rates observed. The compressive strength of bricks containing waste glass was found to be up to 32.42 MPa, with low water absorption rates. The compressive strength of bricks containing burnt coal residues was found to be up to 31.8 MPa, but their water absorption rates were slightly higher. Combination bricks showed the best performance with the highest strength and lowest water absorption rates.

These findings indicate that fly ash, waste glass, and burnt coal residues can be used as effective binders in the production of geopolymer bricks and that these materials have the potential to enhance environmental sustainability in the construction industry.

Keywords: geopolymers, fly ash, waste glass, burnt coal, compressive strength, water absorption

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Geopolimerde kullanılan malzeme miktarları (gram)	35
Tablo 2. Harç numunelerin 3 günlük eğilme dayanımı değerleri	42
Tablo 3. Harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı değerleri	43
Tablo 4. Harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri	44
Tablo 5. Harç numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri	44
Tablo 6. Harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri	45
Tablo 7. Harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri	45
Tablo 8. Optimum briket numunesinin su emme değerleri.....	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Rize ili çaykur salarha çay fabrikası.....	28
Şekil 2. Yanmış kömür atıkları.....	29
Şekil 3. Yanmış kömür atığı XRD grafiği.....	29
Şekil 4. YKA'nın öğütülmüş hali	30
Şekil 5. Atık cam XRD grafiği	31
Şekil 6. Atık camın toz hali	31
Şekil 7. Uçucu kül	32
Şekil 8. Uçucu kül XRD grafiği	32
Şekil 9. Standart Kum.....	33
Şekil 10. Sodyum Hidroksit.....	34
Şekil 11. Sodyum Çözeltisi	34
Şekil 12. Harç numunesinin karıştırıcıda karılması.....	36
Şekil 13. Üretimi tamamlanmış harç numuneleri	36
Şekil 14. Numunelerin etüve yerleştirilip 90°C'de bekletilmesi.....	37
Şekil 15. Geopolimer beton	37
Şekil 16. Granülometre Eğrisi	38
Şekil 17. Tesisten alınan agrega	38
Şekil 18. Briket kalıbına yerleştirilen numune	39
Şekil 19. Eğilme dayanım deneyi yapılan harç numunesi.....	40
Şekil 20. Basınç dayanım deneyi yapılan harç numunesi	41
Şekil 21. 3 numunenin XRD grafiği	46
Şekil 22. x20 SEM.....	47
Şekil 23. x30 SEM.....	48
Şekil 24. x50 SEM.....	48
Şekil 25. EDS Spektroskopileri	49
Şekil 26. %100 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı	50
Şekil 27. %90 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı	51
Şekil 28. %80 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı	52
Şekil 29. %70 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı	52

Şekil 30. 3 günlük basınç dayanım değerleri.....	53
Şekil 31. 7 günlük basınç dayanım değerleri.....	54
Şekil 32. 28 günlük basınç dayanım değerleri.....	54



GİRİŞ

Fosil yakıtların yanması sonucunda oluşan yanmış kömür atıkları, küresel bir çevre sorunudur. Kömürün yanması sırasında, önemli miktarda sera gazı salınımı meydana gelmesi yanında önemli miktarda yanmış kömür atıkları oluşur ve bu atıkların uygun şekilde bertaraf edilmese çevrenin ve su kaynaklarının kirlenmesine yol açar (Kumar ve diğerleri, 2017). Dünya Kömür Birliği'nin (WCA) tahminlerine göre, 2023 yılında dünya genelinde üretilen kömür miktarı 7,6 milyar tonu aşmıştır ve bu atık miktarının ilerleyen yıllarda da artması beklenmektedir. Yanmış kömür atıklarının çimento ve beton sanayilerinde kullanılarak geri dönüştürülmesi ve değerlendirilmesi sıkça kullanılan yöntemlerdendir (Pattarawan ve diğerleri 2022; Mahdi ve diğerleri 2022). Yanmış kömür atıklarının baca filtrelerinde tutulan uçucu kül türü malzemeler Portland Çimentolarında bağlayıcı mineral katkı maddesi olarak kullanılması yanında bacalarda kalan kömür tozu ve kazan altı cürufları da yine çimentolarda katkı maddesi olarak kullanılabilir. Yanmış kömür cürufları hafif beton agregası olarak kullanımı da diğer bir atığın bertaraf yöntemidir. Alkalilerle amorf yapılara sahip malzemelerin aktivasyonu ile üretilen geopolimerler son yıllarda sıkça bilimsel alanda çalışılan malzemelerdir (Çakmak ve diğerleri 2024; Kurt ve diğerleri 2023). Uçucu kül ve atık cam geopolimer üretiminde kullanılan bağlayıcılar arasında yer almaktadır (Çakmak ve diğerleri 2024; Siddique ve diğerleri, 2016; Kumar ve diğerleri, 2018). Uçucu kül, kömür yakma işleminin bir yan ürünüdür ve silika, alümina ve demir oksit gibi mineraller açısından zengindir. Atık cam ise silika ve soda kireci içeren bir malzemedir (Singh ve diğerleri, 2005). Uçucu kül ve atık camlar yapılarında bulunduğu silis ve alüminli yapıları sayesinde geopolimer üretiminde alkalilerle aktive edilebilmektedir. Briketler yaygın kullanım alanı bulan malzemelerdir. Yanmış kömür atıkları briket üretiminde agrega ve bağlayıcı olarak kullanılabilir. Kömür atıklarının briket üretiminde kullanılması atık malzemelerin değerlendirilmesi yanında geopolimer olarak kullanılması ise, hava kirliliğini ve sera gazı emisyonlarının azalmasına katkı sağlayabilecektir (Pandey ve diğerleri, 2017).

Bu çalışmada, uçucu kül ve atık cam sodyum hidroksitle aktive edilerek yanmış kömür cürufu agrega ve baca tozu bağlayıcı olarak ilave edilmiş briketler üretilmiştir.

Böylelikle yanmış kömür atığının bir yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Uçucu kül ve öğütölmüş cam ile aktive edilmiş yanmış kömür atıklarının kullanılmasıyla üretilen briketlerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme dayanımları ölçölmüştür. Üretilen briketlerin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi sağlanacaktır.



1.GENEL BİLGİLER

1.1. Geopolimer Betonlarda Bağlayıcı Olarak Kullanılan Malzemeler

Uçucu kül, içeriğindeki amorf silika ve alümina gibi reaktif bileşenler sayesinde su ve kalsiyum hidroksit varlığında çimento benzeri bağlayıcı özellikler kazanan değerli bir endüstriyel yan üründür (Kaur & Siddique, 2016). Bu pozolanik reaksiyon, kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli oluşumunu tetikler, briketin sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlar. Uçucu kül, briket üretiminde iki ana yaklaşımla kullanılabilir: çimento ile birlikte veya çimentosuz olarak. Çimento ile birlikte kullanımda, uçucu kül belirli oranlarda çimento ile karıştırılarak briket harcına eklenir. Bu, briketin basınç dayanımını artırır (Siddique, 2011), su emme kapasitesini azaltarak durabilitesini iyileştirir (Habert & d'Espinose de Lacaillerie, 2001) ve kimyasal direncini artırır (Mehta, 1986). Ayrıca, uçucu külün bir atık malzeme olması, doğal kaynak tüketimini azaltarak ve çevresel etkiyi en aza indirerek sürdürülebilirlik sağlar (Kaur & Siddique, 2016). Çimentosuz briket üretiminde ise, uçucu kül alkali aktivatörler (sodyum silikat, sodyum hidroksit vb.) ile aktive edilerek çimento yerine kullanılır. Bu yöntem, daha düşük karbon ayak izi, daha iyi termal özellikler ve maliyet avantajı sunar. Uçucu külün briketlerde kullanım oranı, briketin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Oran arttıkça dayanım ve durabilite genellikle artar, ancak çok yüksek oranlar erken dayanımı azaltabilir ve priz süresini uzatabilir (Kaur & Siddique, 2016). Bu nedenle, optimum kullanım oranı, istenen briket özellikleri ve üretim koşulları göz önünde bulundurularak belirlenmelidir.

Atık cam, geopolimer betonlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilen önemli bir hammaddedir. Atık cam, genellikle silika açısından zengindir ve yüksek saflıkta silikat kaynağı olarak işlev görür. Atık camın geri dönüştürülmesi, atık yönetimi sorunlarını azaltır ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur. Atık cam, genellikle ince toz haline getirilir ve alkali aktivasyon işlemine tabi tutulur. Bu süreçte, camın içerisindeki silika, alkali çözeltilerle (örneğin, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit) reaksiyona girerek reaktif türler oluşturur ve bu türler polikondensasyon reaksiyonları ile üç boyutlu aluminosilikat ağ yapısı oluşturur (Provis & Bernal, 2014).

Yüksek fırın cürufu, demir üretiminde yan ürün olarak elde edilen bir malzemedir ve geopolimer betonlarda yaygın olarak kullanılır. Yüksek fırın cürufu,

yüksek kalsiyum, silika ve alümina içeriği ile bilinir ve bu bileşenler, alkali aktivasyon için ideal bir hammaddedir. Cüruf, genellikle granüle edilir ve ince toz haline getirilir. Alkali çözeltilerle (örneğin, sodyum silikat veya potasyum silikat) reaksiyona girdiğinde, cüruf içerisindeki kalsiyum ve silikat bileşenleri çözünerek reaktif türler oluşturur. Bu türler, polikondensasyon reaksiyonları ile üç boyutlu bir aluminosilikat ağ yapısı oluşturur ve bu yapı, geopolimer betonun yüksek dayanım ve kimyasal direnç gibi üstün özelliklerini sağlar (Habert ve diğerleri, 2020).

Metakaolin, yüksek saflıkta kaolinit kilinin kalsinasyonu ile elde edilen bir üründür ve geopolimer betonlarda yaygın olarak kullanılır. Metakaolin, yüksek aluminosilikat içeriği nedeniyle yüksek reaktiviteye sahiptir. Kalsinasyon işlemi, kaolinitin yapısındaki kristal suyun uzaklaştırılmasını sağlar ve metakaolinin reaktif hale gelmesini sağlar. Alkali çözeltilerle (örneğin, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit) reaksiyona girdiğinde, metakaolin içerisindeki alüminyum ve silikat bileşenleri çözünerek reaktif türler oluşturur. Bu türler, polikondensasyon reaksiyonları ile üç boyutlu bir aluminosilikat ağ yapısı oluşturur ve bu yapı, geopolimer betonun mekanik dayanım ve kimyasal direnç gibi üstün özelliklerini sağlar (Provis & van Deventer, 2009).

1.2. Uçucu kül ve Atık Öğütülmüş Camın Geopolimerde Kullanımında Sağlanan Çevresel Faydalar

Uçucu kül, kömür santrallerinde kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ince taneli bir yan üründür. Büyük miktarlarda üretilen bu atık malzeme, genellikle depolanır veya düzenli depolama sahalarına gönderilir. Ancak, uçucu külün briket üretiminde kullanılması, bu atık malzemenin değerlendirilmesini sağlayarak çevresel faydalar sunar (Habert & d'Espinose de Lacaillerie, 2001). Uçucu külün briketlerde kullanılması, depolama alanlarının dolmasını geciktirir ve yeni depolama alanları açma ihtiyacını azaltarak depolanması gereken atık miktarını önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, uçucu külün taşınması ve depolanması sırasında ortaya çıkan çevresel etkileri de en aza indirir. Briket üretiminde uçucu külün çimento yerine kısmen veya tamamen kullanılması, doğal kaynakların tüketimini azaltır ve çimento üretimi için gereken doğal kaynakların ve enerjinin korunmasına yardımcı olur (Kaur & Siddique, 2016). Çimento üretimi, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağıdır ve uçucu

külün çimento yerine kullanılması, çimento üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarını azaltarak iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlar (Marceau ve diğerleri, 2006). Ayrıca, uçucu külün briket üretiminde kullanılması, çimento üretimi için gereken enerji miktarını azaltarak enerji tasarrufu sağlar. Uçucu külün uygun şekilde kullanılması, düzenli depolama sahalarına gönderildiğinde yağmur suyu ile temas ederek ağır metaller ve diğer zararlı maddeleri suya sızdırabilme riskini ortadan kaldırarak su kirliliğini azaltmaya da yardımcı olabilir (Ahmaruzzaman, 2010). Bazı durumlarda, uçucu külün tarım arazilerinde toprak iyileştirici olarak kullanılması, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirerek bitki büyümesini destekleyebilir.

Atık camın geri dönüştürülmesi ve geopolimer üretiminde kullanılması, atık cam depolama alanlarına olan ihtiyacı azaltır ve cam atıklarının çevreye verdiği zararı minimize eder. Bu, atık yönetimi süreçlerinin daha sürdürülebilir hale gelmesine yardımcı olur (Provis & van Deventer, 2009). Atık camın geri dönüştürülmesi, yeni cam üretiminden daha az enerji gerektirir. Bu enerji tasarrufu, genel enerji tüketimini ve ilgili karbon emisyonlarını azaltır. Geopolimer üretiminde atık cam kullanımı, Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük karbon emisyonları üretir. Atık cam, yüksek silika içeriği sayesinde, alkali aktivasyon ile reaktif bir bileşen haline gelir ve düşük enerji gereksinimi ile geopolimer üretimini destekler. Atık camın kullanımı, yeni hammaddelerin (örneğin, silika kum) çıkarılmasına olan ihtiyacı azaltır. Bu, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin artırılmasına katkıda bulunur (Duxson ve diğerleri, 2007).

1.3. Yanmış Kömürün Agrega Olarak Kullanımı

Yanmış kömür atıkları (YKA), kömürün yanması sonucu oluşan ve genellikle yüksek miktarda karbon içeren bir atık türüdür. YKA'nın briketlerde agrega olarak kullanımı, atık değerlendirme ve maliyet düşürme açısından avantajlar sunar. YKA, genellikle düşük maliyetli veya hatta ücretsiz bir malzeme olduğu için briket üretiminde maliyetleri düşürebilir. Ayrıca, bazı durumlarda YKA'nın yüksek karbon içeriği, briketin yanma süresini ve ısı değerini artırarak daha verimli bir yakıt olmasını sağlayabilir.

Ancak, YKA'nın briketlerde kullanımı potansiyel çevresel etkileri nedeniyle dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir (Ahmaruzzaman, 2010). YKA, arsenik, kurşun, cıva gibi ağır metaller içerebilir. Bu metallerin briket üretimi ve kullanımı sırasında açığa çıkması, insan sağlığı ve çevre için risk oluşturabilir. Ayrıca, YKA içeren briketlerin depolanması veya kullanımı sırasında sızıntı suları oluşabilir. Bu sızıntı suları, ağır metaller ve diğer zararlı maddeler içerebilir ve toprağa ve suya karışarak çevre kirliliğine neden olabilir. YKA'nın yakılması sırasında, özellikle kükürt dioksit (SO₂) gibi zararlı gazlar açığa çıkabilir. Bu gazlar, hava kirliliğine ve asit yağmurlarına neden olabilir.

Bu nedenle, Ahmaruzzaman (2010), YKA'nın potansiyel çevresel etkileri nedeniyle briketlerde sınırlı miktarda kullanılmasını önermektedir. Yüksek miktarda YKA kullanımı, briketlerde ağır metal konsantrasyonunu artırabilir, sızıntı suyu oluşumunu artırabilir ve briketlerin yakılması sırasında zararlı gaz emisyonlarını artırabilir. Bu nedenle, YKA'nın briketlerdeki oranı sınırlandırılmalı ve çevresel etkileri en aza indirmek için uygun önlemler alınmalıdır.

1.4. Geopolimerler

Geopolimerler, geleneksel çimento bazlı malzemelere çevre dostu bir alternatif olarak dikkat çeken inorganik polimerlerdir. Bu malzemeler, doğal veya endüstriyel atık maddelerin alkali aktivasyonu yoluyla elde edilir ve genellikle aluminosilikat jel ağları şeklinde kimyasal bir yapıya sahiptir. Davidovits (1991), geopolimerlerin üretim sürecinde alüminyum ve silisyum gibi ana bileşenlerin, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit gibi alkalın aktivatörlerle reaksiyona girdiğini belirtmektedir. Provis ve van Deventer (2009), bu reaksiyon sonucunda üç boyutlu bir aluminosilikat ağ yapısının meydana geldiğini ifade etmektedir.

Geopolimerlerin üretim süreci, hammadde seçiminden alkali aktivasyona ve kürlleme işlemine kadar çeşitli aşamaları içerir. Hammadde olarak uçucu kül, metakaolin ve volkanik kül gibi endüstriyel atıklar kullanılabilir. Bu hammaddeler, alkalın çözeltilerle karıştırılır ve belirli koşullar altında kürlleme işlemi uygulanarak nihai geopolimer ürün elde edilir. Duxson ve diğerlerine (2007) göre, üretim sürecinin bu şekilde yapılandırılması, geopolimerlerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmasını sağlar.

Geopolimerlerin çevresel etkileri, düşük karbon ayak izi ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesi ile belirginleşir. Geleneksel Portland çimentosuna kıyasla, geopolimerler üretim sürecinde daha az karbon emisyonu üretir (Provis & van Deventer, 2009). Ayrıca, endüstriyel atıkların kullanımı, bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirliğini artırarak atık yönetimi sorunlarına da çözüm sunar. Bu özellikleri sayesinde, geopolimerler çevre dostu bir yapı malzemesi olarak öne çıkar (Davidovits, 1991).

Fiziksel ve mekanik özellikleri açısından, geopolimerler yüksek basınç dayanımı ve iyi kimyasal direnç sahiptir. Yangın ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık göstermeleri, bu malzemelerin inşaat ve yangın yalıtımı uygulamalarında tercih edilmesini sağlar. Ayrıca, geopolimerler hızlı kürlenir, bu da inşaat süreçlerinin daha kısa sürede tamamlanmasına olanak tanır (Duxson ve diğerleri, 2007). Bu avantajları ile geopolimerler, yapı malzemeleri alanında geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve gelecekte daha yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir (Provis & van Deventer, 2009).

Bu bilgiler, geopolimerlerin tanımı, üretim süreci, çevresel etkileri ve fiziksel-mekanik özellikleri hakkında genel bir bakış sunar. Geopolimerler üzerine yapılan bilimsel çalışmalar, bu malzemelerin potansiyelini ve uygulama alanlarını daha derinlemesine incelemekte, yapı malzemeleri endüstrisinde yenilikçi çözümler sunmaktadır (Davidovits, 1991; Duxson ve diğerleri, 2007; Provis & van Deventer, 2009).

Geopolimerler, 1970'lerin sonlarında Joseph Davidovits tarafından tanımlanmış ve geliştirilmiştir. Davidovits, geleneksel çimento üretiminin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla yeni, inorganik polimerler üzerinde çalışmalar yapmaya başlamıştır. Bu çalışmalar, geopolimerlerin temelini oluşturmuş ve bu malzemelerin kimyasal yapısı ile üretim süreçleri hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Davidovits, 1991).

Geopolimerlerin gelişimi, ilk olarak metakaolin gibi alüminosilikat hammaddelerin alkali aktivasyonu üzerine odaklanmıştır. Metakaolin, kil minerallerinin yüksek sıcaklıkta kalsinasyonu ile elde edilen bir malzemedir. Bu malzeme, sodyum veya potasyum hidroksit gibi alkalın çözeltilerle reaksiyona girerek, üç boyutlu bir alüminosilikat ağ yapısı oluşturur. Provis ve van Deventer (2009), bu

sürecin geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğini ve bu nedenle enerji tüketimini azalttığını belirtmektedir.

Geopolimerlerin üretiminde kullanılan hammaddeler zamanla çeşitlenmiştir. Endüstriyel atıklar, özellikle uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan hammaddeler haline gelmiştir. Bu atık malzemeler, alkalın aktivasyon ile yüksek dayanımlı ve dayanıklı yapı malzemelerine dönüştürülebilir. Duxson ve diğerleri (2007), bu yaklaşımın hem atık yönetimini iyileştirdiğini hem de çevresel sürdürülebilirliği artırdığını ifade etmektedir.

Geopolimer teknolojisinin gelişimi, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin anlaşılması ile de ilerlemiştir. Yüksek basınç dayanımı, kimyasal direnci ve yangına karşı dayanıklılığı ile geopolimerler, inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca, hızlı kürlenme özellikleri sayesinde, inşaat süreleri kısaltmakta ve bu da maliyetleri düşürmektedir. Provis ve van Deventer (2009), bu avantajların geopolimerlerin özellikle yangına dayanıklı yapı elemanları, boru hatları ve atık depolama tesislerinde kullanılmasını sağladığını belirtmektedir.

Geopolimerlerin gelişimi, sadece inşaat sektöründe değil, aynı zamanda diğer endüstrilerde de yenilikçi uygulamaları beraberinde getirmiştir. Örneğin, geopolimerler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı kompozit malzemeler ve kaplamalar olarak kullanılabilir. Bu malzemeler, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yüksek performanslı uygulamalar için ideal bir seçenek sunar. Ayrıca, geopolimerlerin radyoaktif atıkların immobilizasyonu için kullanımı, nükleer atık yönetiminde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir (Davidovits, 1991).

Geopolimer araştırmaları, günümüzde de hızla devam etmektedir. Araştırmacılar, bu malzemelerin mikro yapısını ve performans özelliklerini daha iyi anlamak için çeşitli deneysel ve teorik çalışmalar yürütmektedir. Duxson ve diğerleri (2007), bu çalışmaların, geopolimerlerin daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağladığını ve malzemenin sürdürülebilirlik potansiyelini artırdığını vurgulamaktadır.

Geopolimerlerin gelişimi, inşaat ve diğer endüstrilerde yenilikçi ve çevre dostu çözümler sunan bu malzemelerin gelecekte daha yaygın bir şekilde kullanılacağını göstermektedir. Provis ve van Deventer (2009), geopolimerlerin çevresel sürdürülebilirliği artırma ve atık yönetimini iyileştirme konusundaki potansiyeli ile

dikkat çektiğini ve bu alanda yapılan bilimsel çalışmaların, bu malzemelerin özelliklerini ve uygulama alanlarını sürekli olarak genişlettiğini belirtmektedir.

Geopolimerler, genellikle doğal veya endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile oluşan inorganik polimerlerdir. Bu malzemelerin oluşumu, hem kimyasal hem de fiziksel süreçleri içerir ve genel olarak üç ana aşamada incelenebilir: hammadde hazırlığı, alkali aktivasyon ve jel oluşumu, ve nihai kürlenme.

Geopolimerlerin oluşum sürecinin ilk aşaması, uygun hammaddelerin seçilmesi ve hazırlanmasını içerir. Bu hammaddeler genellikle alüminosilikat bileşikler içerir ve uçucu kül, metakaolin, volkanik kül veya granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemelerden elde edilir. Hammadde seçimi, nihai geopolimerin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Davidovits (1991), metakaolinin yüksek saflıkta kaolinit kilinin kalsinasyonu ile elde edildiğini ve yüksek reaktiviteye sahip olduğunu belirtir. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar ise maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlıdır.

İkinci aşama, seçilen hammaddelerin alkalın çözeltilerle aktivasyonunu içerir. Bu işlemde, sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) gibi güçlü alkalın çözeltiler kullanılır. Provis ve van Deventer'a (2009) göre, alkalın aktivasyon süreci, alüminyum ve silisyum atomlarının çözünmesi ve reaktif bir form almasını sağlar. Bu reaktif türler, alkalın ortamda çözüldükten sonra polikondensasyon reaksiyonlarına girerek üç boyutlu bir alüminosilikat ağ oluşturur. Bu ağ yapısı, geopolimerlerin kimyasal dayanıklılığı ve mekanik dayanımı gibi temel özelliklerini belirler.

Geopolimer oluşumunun son aşaması, jel oluşumu ve nihai kürlenme işlemidir. Alkalın aktivasyon sonucu oluşan reaktif türler, çözeltide polimerleşmeye başlayarak bir jel fazı oluşturur. Bu jel, zamanla katılaşıp ve güçlü, dayanıklı bir malzeme haline gelir. Duxson ve diğerlerine (2007) göre, kürlenme işlemi genellikle oda sıcaklığında veya hafif ısıtma ile gerçekleştirilir. Kürlenme süresi ve koşulları, geopolimerin nihai özelliklerini etkiler. Örneğin, daha yüksek sıcaklıklarda kürlenme, reaksiyon hızını artırarak daha hızlı sertleşme ve daha yüksek dayanım sağlar.

Geopolimerlerin oluşum sürecindeki kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel değişimler, bu malzemelerin üstün performans özelliklerini sağlar. Yüksek basınç dayanımı, kimyasal direnci ve yangına karşı dayanıklılığı, geopolimerlerin inşaat ve

endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Ayrıca, düşük karbon ayak izi ve atık malzemelerin değerlendirilmesi, geopolimerlerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunar (Davidovits, 1991; Provis & van Deventer, 2009).

Geopolimerlerin oluşum süreci, malzemenin mikro yapısını ve performans özelliklerini belirleyen karmaşık bir dizi reaksiyonu içerir. Bu süreçte kullanılan hammadde türü, alkalın aktivatör tipi ve kürleme koşulları, nihai ürünün özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Duxson ve diğerleri (2007), geopolimerlerin oluşum mekanizmasının daha iyi anlaşılmasının, bu malzemelerin performansını optimize etmek ve yeni uygulama alanları keşfetmek için kritik öneme sahip olduğunu belirtmektedir.

Geopolimerler, hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri bakımından dikkat çekici ve avantajlı malzemelerdir. Bu özellikler, onları çeşitli endüstriyel ve inşaat uygulamaları için ideal kılar. Fiziksel ve kimyasal özelliklerin detaylı bir şekilde incelenmesi, geopolimerlerin performansını anlamak ve uygun uygulama alanlarını belirlemek açısından önemlidir.

Fiziksel özellikler açısından, geopolimerler genellikle yüksek basınç dayanımı gösterirler. Bu dayanım, genellikle Portland çimentosuna kıyasla daha yüksektir ve geopolimerlerin yapı malzemesi olarak kullanılmasını sağlar. Davidovits'e (1991) göre, yüksek basınç dayanımı, özellikle inşaat sektöründe önemli bir avantajdır, çünkü yapıların uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, geopolimerlerin düşük gözeneklilikleri, su ve diğer sıvıların nüfuz etmesini zorlaştırır, bu da malzemenin dayanıklılığını artırır.

Geopolimerlerin ısı ve yangına karşı dayanıklılığı da önemli bir fiziksel özelliktir. Provis ve van Deventer'a (2009) göre, bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olup, yangına maruz kaldıklarında yapısal bütünlüklerini koruyabilirler. Bu özellik, geopolimerlerin yangına dayanıklı kaplamalar ve yapı elemanları olarak kullanılmasını sağlar. Özellikle yangın güvenliği gerektiren binalarda, geopolimerler ideal bir çözüm sunar.

Kimyasal özellikler açısından, geopolimerler oldukça stabil ve dayanıklıdır. Duxson ve diğerlerine (2007) göre, kimyasal dayanıklılık, özellikle asit ve diğer agresif kimyasal ortamlara karşı yüksek direnç gösterir. Bu özellik, geopolimerlerin kimyasal tesislerde, atık su arıtma tesislerinde ve deniz yapılarında kullanılmasını

sağlar. Geopolimerler, agresif kimyasal ortamlarda bile uzun süreli dayanıklılık gösterir, bu da bakım ve onarım maliyetlerini azaltır.

Geopolimerlerin düşük karbon ayak izi, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantajdır. Davidovits (1991), geleneksel Portland çimentosuna kıyasla, geopolimerlerin üretim sürecinin daha az enerji tükettiğini ve daha az karbon emisyonu ürettiğini belirtir. Bu, çevre dostu yapı malzemeleri arayışında önemli bir faktördür. Ayrıca, endüstriyel atıkların, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi maddelerin kullanımı, bu atıkların değerlendirilmesine ve çevresel etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunur.

Geopolimerlerin mikroyapısı, onların üstün özelliklerini belirleyen bir diğer önemli faktördür. Provis ve van Deventer (2009), üç boyutlu aluminosilikat ağ yapısının, geopolimerlerin mekanik ve kimyasal dayanıklılığını sağladığını ifade etmektedir. Bu ağ yapısı, malzemenin homojenliğini ve içsel bağlarının kuvvetini artırarak, uzun ömürlü ve dayanıklı bir malzeme elde edilmesini sağlar. Mikroyapı çalışmaları, geopolimerlerin performansını optimize etmek için önemli bilgiler sunar.

Geopolimerler, sahip oldukları üstün fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Bu malzemeler, çeşitli endüstrilerde yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunar. Geopolimerlerin kullanım alanlarını inşaat, çevre mühendisliği, enerji sektörü ve sanayi uygulamaları gibi başlıklar altında incelemek mümkündür.

İnşaat sektörü, geopolimerlerin en yaygın kullanıldığı alanlardan biridir. Yüksek basınç dayanımı, düşük gözeneklilik ve kimyasal direnci sayesinde geopolimerler, yapı malzemesi olarak büyük avantajlar sunar. Provis ve van Deventer (2009), geopolimer betonunun geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabileceğini ve özellikle dayanıklılık gerektiren altyapı projelerinde tercih edildiğini belirtmektedir. Köprüler, yollar, binalar ve barajlar gibi büyük ölçekli yapı projelerinde geopolimer betonunun kullanımı, uzun ömürlü ve sürdürülebilir yapılar oluşturmayı sağlar.

Geopolimerlerin yangına karşı dayanıklılığı, bu malzemelerin yangın güvenliği gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Davidovits (1991), yangına dayanıklı paneller, kaplamalar ve yapı elemanlarının, geopolimerlerin yangın sırasında yapısal bütünlüklerini koruyabilme yetenekleri nedeniyle inşaat sektöründe önem kazandığını

vurgulamaktadır. Bu özellik, özellikle yüksek binalar ve yangın riski taşıyan tesisler için büyük bir avantaj sunar.

Çevre mühendisliği alanında, geopolimerler, atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik konularında yenilikçi çözümler sunar. Duxson ve diğerleri (2007), endüstriyel atıkların, özellikle uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi maddelerin, geopolimer üretiminde kullanılmasının, bu atıkların değerlendirilmesini ve çevresel etkilerinin azaltılmasını sağladığını belirtmektedir. Ayrıca, geopolimerler, toksik ve radyoaktif atıkların immobilizasyonunda da kullanılabilir. Bu özellik, nükleer atık yönetimi ve tehlikeli atık depolama alanlarında önemli bir uygulama potansiyeli sunar.

Enerji sektörü, geopolimerlerin yüksek sıcaklıklara ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı nedeniyle önemli bir kullanım alanıdır. Provis ve van Deventer (2009), yüksek sıcaklıklara dayanıklı geopolimer malzemelerin, enerji santrallerinde ve endüstriyel fırınlarda kullanılabileceğini belirtmektedir. Ayrıca, jeotermal enerji projelerinde, geopolimerlerin kimyasal direnci ve dayanıklılığı, bu malzemelerin boru hatları ve kuyular gibi kritik bileşenlerde kullanılmasını sağlar.

Sanayi uygulamalarında, geopolimerler çeşitli yüksek performanslı ürünlerin üretiminde kullanılabilir. Örneğin, geopolimer kompozitler, hafif ve dayanıklı malzemeler olarak otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılabilir. Davidovits (1991), bu kompozitlerin yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve kimyasal direnç gibi özellikleri ile dikkat çektiğini ifade etmektedir. Ayrıca, geopolimer kaplamalar, kimyasal tesislerde ve deniz yapılarında korozyona karşı koruma sağlar.

Geopolimerlerin kullanım alanları sadece inşaat ve sanayi ile sınırlı değildir. Bu malzemeler, sanat ve tasarım projelerinde de kullanılmaktadır. Duxson ve diğerleri (2007), geopolimerlerin şekillendirilebilirliği ve estetik özelliklerinin, heykel ve mimari tasarımda yenilikçi uygulamalara olanak tanıdığını belirtmektedir. Ayrıca, geopolimerlerin düşük çevresel etkisi, sürdürülebilir sanat ve tasarım projelerinde tercih edilmesini sağlar.

Geopolimer beton, çevre dostu ve yüksek performanslı bir yapı malzemesi olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak geliştirilen geopolimer beton, alüminosilikat bazlı hammaddelerin alkali aktivasyonu ile üretilir ve birçok avantajlı özelliği ile dikkat çeker. Geopolimer

betonun güncel çalışmalara dayalı detaylı bir analizi, bu malzemenin inşaat endüstrisindeki potansiyelini ortaya koymaktadır.

Geopolimer betonun temel bileşenleri, uçucu kül, metakaolin ve granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklardır. Bu hammaddeler, sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) gibi alkalın çözeltilerle aktivasyona uğrar. Provis ve Bernal (2014), bu sürecin hammaddelerin çözünmesini ve yeniden polimerleşerek üç boyutlu bir aluminosilikat ağ oluşturmasını sağladığını belirtmektedir. Bu ağ yapısı, geopolimer betonun dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini belirler.

Geopolimer betonun en önemli özelliklerinden biri, yüksek basınç dayanımıdır. Buchwald'a (2018) göre, bu beton türü, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha yüksek basınç dayanımı gösterir. Bu özellik, özellikle büyük ölçekli altyapı projelerinde ve yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda geopolimer betonun tercih edilmesini sağlar. Ayrıca, geopolimer beton, düşük gözeneklilik özelliği sayesinde su ve diğer zararlı maddelerin nüfuz etmesini zorlaştırır, bu da malzemenin uzun ömürlü olmasını sağlar.

Yangına karşı dayanıklılık, geopolimer betonun bir diğer önemli avantajıdır. Hosseini ve diğerlerine (2016) göre, geopolimer beton, yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olup, yangına maruz kaldığında yapısal bütünlüğünü koruyabilir. Bu özellik, yangın güvenliği gerektiren binalarda ve tesislerde geopolimer betonun kullanımını teşvik eder. Örneğin, yangına dayanıklı duvar panelleri ve zemin kaplamaları, bu beton türü ile yapılabilir.

Geopolimer betonun kimyasal direnci de oldukça yüksektir. Van Deventer ve diğerleri (2020), bu betonun asitler, bazlar ve diğer agresif kimyasallar karşısında dayanıklı olduğunu belirtmektedir. Bu kimyasal dayanıklılık, geopolimer betonun kimyasal tesislerde, atık su arıtma tesislerinde ve deniz yapılarında kullanılmasını sağlar. Kimyasal ortamlarda uzun süre dayanıklılık göstermesi, bakım ve onarım maliyetlerini azaltır ve yapıların ömrünü uzatır.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından geopolimer beton, önemli avantajlar sunar. Habert ve diğerleri (2020), geleneksel Portland çimentosunun üretim sürecinin yüksek enerji tüketimi ve karbon emisyonlarına neden olduğunu, buna karşılık geopolimer betonun üretiminin daha düşük enerji gerektirdiğini ve daha az karbon emisyonu

ürettiğini belirtmektedir. Bu, geopolimer betonun çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmasını sağlar. Ayrıca, endüstriyel atıkların kullanımı, bu atıkların değerlendirilmesine ve çevresel etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunur.

Geopolimer betonun uygulama alanları oldukça geniştir. Provis ve Bernal (2014) ile Van Deventer ve diğerlerine (2020) göre, altyapı projelerinde, köprülerde, yollarda, barajlarda ve binalarda kullanılabilir. Ayrıca, yangın güvenliği gerektiren yapılar, kimyasal tesisler, atık su arıtma tesisleri ve deniz yapıları gibi özel uygulamalarda da tercih edilir. Geopolimer beton, bu geniş uygulama yelpazesi ile gelecekte daha da yaygınlaşacak ve sürdürülebilir inşaat çözümleri sunacaktır.

Geopolimerlerde kullanılan bağlayıcılar, bu malzemelerin kimyasal yapısını ve performans özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Geopolimer bağlayıcılar, alüminosilikat bazlı hammaddelerin alkali aktivasyon yoluyla oluşturulan üç boyutlu ağ yapılarıdır. Bu bağlayıcılar, çeşitli hammaddeler ve alkali aktivatörler kullanılarak elde edilir ve farklı uygulama alanları için optimize edilebilir.

Geopolimer bağlayıcıların ana bileşenleri, genellikle uçucu kül, metakaolin ve granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklardır. Bu hammaddeler, alüminyum ve silisyum içerir ve yüksek reaktiviteye sahiptirler. Provis ve Bernal'e (2014) göre, uçucu kül, kömürün yanması sonucu oluşan ince partiküllerdir ve yüksek silis ve alümina içeriği nedeniyle geopolimer bağlayıcılar için ideal bir hammadde sağlar. Metakaolin, kaolinit kilinin kalsinasyonu ile elde edilen bir üründür ve yüksek saflıkta alüminosilikat kaynağı olarak kullanılır. Granüle yüksek fırın cürufu, demir üretiminde yan ürün olarak elde edilir ve yüksek kalsiyum, silis ve alümina içeriği ile bağlayıcı özellikler gösterir.

Alkali aktivatörler, geopolimer bağlayıcıların oluşumunda kritik bir rol oynar. En yaygın kullanılan alkali aktivatörler, sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi güçlü bazlar ile sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi silikat çözeltileridir. Duxson ve diğerlerine (2007) göre, bu aktivatörler, alüminosilikat hammaddelerin çözünmesini sağlar ve reaktif türlerin oluşumunu teşvik eder. Alkali aktivatörler, hammaddelerle reaksiyona girerek polikondensasyon reaksiyonları başlatır ve üç boyutlu alüminosilikat ağ yapısını oluşturur.

Bağlayıcıların performansı, alkali aktivatörlerin türü ve konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Sodyum bazlı aktivatörler, genellikle yüksek dayanım ve

kimyasal direnç sağlar. Potasyum bazlı aktivatörler ise daha hızlı reaksiyon kinetiği ve yüksek sıcaklıklara karşı daha iyi dayanıklılık gösterir. Provis ve van Deventer'a (2009) göre, silikat çözeltilerinin kullanımı, bağlayıcıların mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını artırır. Ayrıca, aktivatörlerin molar oranları ve çözeltinin viskozitesi, nihai geopolimerin özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir.

Geopolimer bağlayıcıların mikroyapısı, onların performansını büyük ölçüde etkiler. Provis ve Bernal (2014), alkali aktivasyon sonucu oluşan reaktif türlerin, polikondensasyon reaksiyonları ile üç boyutlu bir aluminosilikat jel oluşturduğunu belirtmektedir. Bu jel, zamanla katılaşarak güçlü ve dayanıklı bir yapı malzemesi haline gelir. Mikroyapıdaki gözeneklilik, bağlayıcının su ve kimyasallara karşı direncini etkiler. Düşük gözeneklilik, bağlayıcının dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırır.

Geopolimer bağlayıcıların uygulama alanları, inşaat, çevre mühendisliği ve sanayi gibi çeşitli sektörlerde geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Duxson ve diğerleri (2007), inşaat sektöründe, yüksek basınç dayanımı ve kimyasal direnci sayesinde yapı malzemesi olarak kullanıldığını belirtmektedir. Çevre mühendisliği alanında, toksik ve radyoaktif atıkların immobilizasyonunda etkili çözümler sunar. Sanayi uygulamalarında ise yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara karşı dayanıklı kaplamalar ve kompozit malzemeler olarak kullanılır.

Geopolimerler, geleneksel çimento bazlı malzemelere kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan birçok avantaj sunar. Bu avantajlar, geopolimerlerin sürdürülebilir ve maliyet etkin yapı malzemeleri olarak öne çıkmasını sağlar.

Geopolimerlerin en belirgin çevresel avantajı, düşük karbon ayak izidir. Geleneksel Portland çimentosunun üretimi, büyük miktarda karbon dioksit (CO₂) emisyonuna neden olur. Çimento üretimi, dünya genelinde insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturur. Provis ve Bernal'a (2014) göre, geopolimerler ise, aluminosilikat bazlı hammaddelerin alkali aktivasyonu ile üretildiğinden, çok daha düşük karbon emisyonu üretirler. Bu, iklim değişikliğiyle mücadele çabalarında önemli bir katkı sağlar.

Geopolimerlerin üretiminde kullanılan hammaddeler, genellikle endüstriyel atıklardır. Habert ve diğerleri (2020), uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi malzemelerin, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanıldığını

belirtmektedir. Bu, atık malzemelerin geri dönüştürülmesi ve doğal kaynakların korunması anlamına gelir. Atık malzemelerin kullanımı, aynı zamanda atık yönetimi sorunlarını azaltır ve depolama alanlarına olan ihtiyacı düşürür.

Geopolimerler, kimyasal dayanıklılıkları sayesinde çevresel kirleticilere karşı yüksek direnç gösterir. Van Deventer ve diğerlerine (2020) göre, asitler, bazlar ve diğer kimyasal maddelere karşı dayanıklı olmaları, geopolimerlerin kimyasal tesislerde, atık su arıtma tesislerinde ve deniz yapılarında kullanılmasını sağlar. Bu özellik, çevresel kirleticilere maruz kalan yapıların ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır.

Geopolimerlerin ekonomik avantajları, hammaddelerin maliyet etkinliği ve üretim süreçlerinin verimliliği ile ilgilidir. Provis ve van Deventer (2009), geopolimerlerin üretiminde kullanılan hammaddelerin, genellikle endüstriyel yan ürünler veya atık malzemeler olduğunu belirtmektedir. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemeler, çimento klinkeri gibi geleneksel hammaddelere göre daha ucuzdur. Bu, geopolimer üretim maliyetlerini düşürür ve yapı projelerinde maliyet tasarrufu sağlar.

Geopolimerlerin üretimi, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha az enerji gerektirir. Buchwald (2018), çimento üretiminin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilirken, geopolimer üretiminin genellikle oda sıcaklığında veya hafif ısıtma ile yapıldığını belirtmektedir. Bu, enerji maliyetlerini azaltır ve üretim sürecinin çevresel etkilerini düşürür. Enerji verimliliği, geopolimerlerin ekonomik açıdan cazip olmasını sağlar.

Geopolimerlerin dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü, bakım ve onarım maliyetlerini azaltır. Hosseini ve diğerlerine (2016) göre, yüksek kimyasal ve mekanik dirençleri sayesinde, geopolimer yapılar daha az bakım gerektirir ve uzun süre dayanıklılık gösterir. Bu, yapıların ömrü boyunca maliyet tasarrufu sağlar ve toplam sahip olma maliyetini düşürür.

Geopolimerlerin çevresel ve ekonomik avantajları, bu malzemelerin sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlar. Düşük karbon ayak izi, atık malzemelerin değerlendirilmesi, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği gibi özellikler, geopolimerlerin gelecekte daha yaygın hale gelmesini destekler.

Geopolimerler, geleneksel çimento bazlı malzemelere kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan birçok avantaj sunar. Bu avantajlar, geopolimerlerin sürdürülebilir ve maliyet etkin yapı malzemeleri olarak öne çıkmasını sağlar.

Geopolimerlerin en belirgin çevresel avantajı, düşük karbon ayak izidir. Geleneksel Portland çimentosunun üretimi, büyük miktarda karbon dioksit (CO₂) emisyonuna neden olur. Çimento üretimi, dünya genelinde insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturur. Geopolimerler ise, alüminosilikat bazlı hammaddelerin alkali aktivasyonu ile üretildiğinden, çok daha düşük karbon emisyonu üretirler. Bu, iklim değişikliğiyle mücadele çabalarında önemli bir katkı sağlar (Provis & Bernal, 2014).

Geopolimerlerin üretiminde kullanılan hammaddeler, genellikle endüstriyel atıklardır. Uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi malzemeler, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bu, atık malzemelerin geri dönüştürülmesi ve doğal kaynakların korunması anlamına gelir. Atık malzemelerin kullanımı, aynı zamanda atık yönetimi sorunlarını azaltır ve depolama alanlarına olan ihtiyacı düşürür (Habert ve diğerleri, 2020).

Geopolimerler, kimyasal dayanıklılıkları sayesinde çevresel kirleticilere karşı yüksek direnç gösterir. Asitler, bazlar ve diğer kimyasal maddelere karşı dayanıklı olmaları, geopolimerlerin kimyasal tesislerde, atık su arıtma tesislerinde ve deniz yapılarında kullanılmasını sağlar. Bu özellik, çevresel kirleticilere maruz kalan yapıların ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır (Van Deventer ve diğerleri, 2020).

Geopolimerlerin ekonomik avantajları, hammaddelerin maliyet etkinliği ve üretim süreçlerinin verimliliği ile ilgilidir. Provis ve van Deventer'a (2009) göre, geopolimerlerin üretiminde kullanılan hammaddeler, genellikle endüstriyel yan ürünler veya atık malzemelerdir. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemeler, çimento klinkeri gibi geleneksel hammaddelere göre daha ucuzdur. Bu, geopolimer üretim maliyetlerini düşürür ve yapı projelerinde maliyet tasarrufu sağlar.

Geopolimerlerin üretimi, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha az enerji gerektirir. Çimento üretimi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilirken, geopolimer üretimi genellikle oda sıcaklığında veya hafif ısıtma ile yapılır. Buchwald'a (2018)

göre, bu durum enerji maliyetlerini azaltır ve üretim sürecinin çevresel etkilerini düşürür. Enerji verimliliği, geopolimerlerin ekonomik açıdan cazip olmasını sağlar.

Geopolimerlerin dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü, bakım ve onarım maliyetlerini azaltır. Hosseini ve diğerleri (2016), yüksek kimyasal ve mekanik dirençleri sayesinde, geopolimer yapıların daha az bakım gerektirdiğini ve uzun süre dayanıklılık gösterdiğini belirtmektedir. Bu, yapıların ömrü boyunca maliyet tasarrufu sağlar ve toplam sahip olma maliyetini düşürür.

Geopolimerlerin çevresel ve ekonomik avantajları, bu malzemelerin sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlar. Düşük karbon ayak izi, atık malzemelerin değerlendirilmesi, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği gibi özellikler, geopolimerlerin gelecekte daha yaygın hale gelmesini destekler.

Geopolimerlerin birçok avantajı olmasına rağmen, bu malzemelerin kullanımı ve geliştirilmesi sırasında bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Ayrıca, geopolimer teknolojisinin daha iyi anlaşılması ve uygulanabilirliğinin artırılması için çeşitli araştırma alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Geopolimerlerin en büyük zorluklarından biri, hammaddelerin değişkenliğidir. Provis ve Bernal'a (2014) göre, geopolimer üretiminde kullanılan uçucu kül, metakaolin ve granüle yüksek fırın cürufu gibi hammaddelerin bileşimi, kaynaklarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Bu değişkenlik, geopolimerlerin mekanik ve kimyasal özelliklerinin tutarlılığını sağlamakta zorluklara yol açabilir. Dolayısıyla, hammaddelerin standartlaştırılması ve kalite kontrolü, geopolimerlerin endüstriyel ölçekte kullanımı için kritik öneme sahiptir.

Alkali aktivatörlerin kullanımı, geopolimerlerin üretim sürecinde bir diğer önemli zorluktur. Duxson ve diğerlerine (2007) göre, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi alkalin çözeltiler, oldukça kostiktir ve işlenmesi dikkat gerektirir. Bu kimyasalların güvenli kullanımı, üretim süreçlerinde dikkatli bir yönetim gerektirir. Ayrıca, alkali aktivatörlerin maliyeti, geopolimerlerin ekonomik avantajlarını azaltabilir.

Geopolimerlerin uzun vadeli performansı ve dayanıklılığı hakkında sınırlı veri bulunmaktadır. Geleneksel Portland çimentosu yüzyıllardır kullanıldığından, bu malzemenin uzun vadeli performansı hakkında kapsamlı bilgi bulunmaktadır. Ancak,

geopolimerler nispeten yeni bir teknoloji olduğu için, bu malzemelerin uzun vadeli performansı ve çevresel koşullara dayanıklılığı hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Van Deventer ve diğeri, 2020).

Geopolimerlerin performansını ve uygulanabilirliğini artırmak için birçok araştırma alanı bulunmaktadır. Bunların başında, hammaddelerin karakterizasyonu ve standardizasyonu gelmektedir. Farklı kaynaklardan elde edilen hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin anlaşılması, geopolimerlerin tutarlı ve yüksek kaliteli üretimini sağlamak için önemlidir. Bu, hammaddelerin optimum karışımlarının belirlenmesi ve kalite kontrol süreçlerinin geliştirilmesiyle mümkün olabilir (Provis & Bernal, 2014).

Alkali aktivatörlerin alternatifleri ve optimize edilmesi, bir diğeri önemli araştırma alanıdır. Daha az kostik ve çevre dostu aktivatörlerin geliştirilmesi, geopolimerlerin üretim süreçlerini daha güvenli ve ekonomik hale getirebilir. Ayrıca, aktivatörlerin kullanım oranları ve karışım oranlarının optimize edilmesi, geopolimerlerin mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirebilir (Duxson ve diğeri, 2007).

Geopolimerlerin uzun vadeli performansı ve dayanıklılığı üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin inşaat ve endüstriyel uygulamalarda geniş çapta kabul görmesi için kritiktir. Farklı çevresel koşullara maruz kalan geopolimerlerin performansını inceleyen uzun vadeli çalışmalar, bu malzemelerin güvenilirliğini ve dayanıklılığını kanıtlamaya yardımcı olabilir. Ayrıca, geopolimerlerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin sürdürülebilirliğini artırabilir (Van Deventer ve diğeri, 2020).

Geopolimerlerin yeni uygulama alanlarının keşfi, bu malzemelerin potansiyelini artırabilir. Örneğin, geopolimerlerin 3D baskı teknolojileri ile kullanımı, karmaşık yapıların ve özel tasarımların üretimini kolaylaştırabilir. Ayrıca, geopolimerlerin nanoteknoloji ile birleştirilmesi, bu malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini daha da iyileştirebilir (Provis & van Deventer, 2009).

1.5. Geopolimer Briketlerde Dayanım ve Durabilite Özellikleri

Briketlerin dayanımı, genellikle basınç dayanımı ile ölçülür ve briketin yük taşıma kapasitesini belirler. Uçucu kül, pozolanik reaksiyonlar sayesinde briketin

basınç dayanımını artırabilir (Siddique, 2011). Özellikle uzun vadede, uçucu kül çimento ile reaksiyona girerek daha yoğun ve güçlü bir yapı oluşturur. Atık cam, agrega olarak kullanıldığında briketin basınç dayanımını artırabilir veya azaltabilir. Bu, camın partikül boyutuna ve alkali içeriğine bağlıdır (Taha ve Nounu, 2008). İnce öğütülmüş cam, daha yüksek dayanım sağlarken (Ling ve Poon, 2013), iri öğütülmüş cam dayanımı düşürebilir. Yanmış kömür atıkları, genellikle briketin dayanımını düşürür, ancak bazı durumlarda yanmamış karbon içeriği sayesinde dayanımı artırabilir (Kuenzel & Halliday, 2010)

Briketin durabilitesi, çevresel koşullara (donma-çözülme, kimyasal saldırılar, aşınma vb.) karşı direncini ifade eder. Uçucu kül, briketin gözenek yapısını iyileştirerek su emme kapasitesini azaltır ve böylece donma-çözülme direncini artırır (Habert ve d'Espinose de Lacaillerie, 2001). Ayrıca, uçucu kül, briketin sülfat ve asit gibi kimyasal saldırılara karşı direncini de artırır (Mehta, 1986). Atık cam, briketin su emme kapasitesini azaltarak durabilitesini artırabilir, ancak alkali-silika reaksiyonu (ASR) nedeniyle durabilite sorunlarına da yol açabilir (Shayan ve Xu, 2004). Yanmış kömür atıkları, genellikle briketin durabilitesini olumsuz etkiler, çünkü gözenekli yapısı nedeniyle su emilimini artırabilir ve kimyasal saldırılara karşı daha duyarlı hale getirebilir (Ahmaruzzaman, 2010).

1.6. Dayanım Kazanma Teorileri

1.6.1. Puzolanik Reaksiyon Teorisi

Puzolanik Reaksiyon Teorisi (Mehta, 1986), uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin briket üretiminde nasıl bağlayıcı özellik kazandığını açıklayan temel bir kavramdır. Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcı özellik göstermeyen, ancak kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile reaksiyona girerek çimentoya benzer bağlayıcı özellikler kazanan silikat ve alüminat içeren malzemelerdir. Uçucu kül, kömürün yanması sonucu oluşan ve yüksek oranda silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) içeren bir puzolandır. Briket üretiminde uçucu kül, çimento ile birlikte kullanıldığında, çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) gibi dayanıklı hidratasyon ürünleri oluşur (Taylor, 1997).

Bu hidratasyon ürünleri, briketin sertleşmesini, dayanım kazanmasını ve durabilitesinin artmasını sağlar. C-S-H ve C-A-H gibi hidratasyon ürünleri, briketin mikro yapısını güçlendirerek basınç ve eğilme dayanımını artırır (Siddique, 2011). Ayrıca, puzolanik reaksiyon sonucu oluşan hidratasyon ürünleri, briketin gözenekli yapısını doldurarak su emme kapasitesini azaltır. Bu da briketin donma-çözülme, sülfat saldırısı ve karbonatlaşma gibi kimyasal etkilere karşı direncini artırır (Mehta, 1986). Puzolanik reaksiyon, çimentonun hidratasyonunu yavaşlatarak priz süresini uzatır, bu da özellikle sıcak havalarda briketlerin daha kolay işlenmesini sağlar (Taylor, 1997). Ayrıca, çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan ısı miktarını azaltarak, özellikle büyük boyutlu briketlerin üretiminde aşırı ısı birikimi nedeniyle oluşabilecek çatlakları önler (Mehta, 1986).

Puzolanik reaksiyonun hızı ve etkinliği, uçucu külün kimyasal bileşimi, inceliği, su/çimento oranı ve kütleme koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, optimum puzolanik reaksiyonu sağlamak için briket karışımının tasarımı ve üretim süreci dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

1.6.2. Alkali Aktivasyon Teorisi

Alkali Aktivasyon Teorisi, uçucu kül gibi alüminosilikat malzemelerin, geleneksel çimento yerine alkali çözeltilerle aktive edilerek bağlayıcı özellik kazanmasını açıklayan bir teodir (Provis ve Van Deventer, 2009). Sürdürülebilir ve dayanıklı yapı malzemeleri geliştirme potansiyeli nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Alkali aktivasyon süreci, uçucu külün yüksek pH değerine sahip bir alkali çözelti (sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit vb.) ile karıştırılmasıyla başlar. Alkali ortam, uçucu küldeki silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) gibi reaktif bileşenlerin çözünmesini ve yeniden düzenlenmesini sağlar. Bu süreç sonucunda, çözünen silika ve alümina, alkali metal iyonları ile reaksiyona girerek üç boyutlu bir silikat ve alüminat ağı oluşturur. Bu ağ, geopolimer olarak adlandırılan ve briketin sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan bağlayıcı malzemeyi oluşturur (Provis ve Van Deventer, 2009).

Alkali aktive edilmiş uçucu külden üretilen briketler, yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olabilir (Hardjito ve Rangan, 2005). Bu, briketlerin daha ağır yüklere dayanabilmesini ve daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Ayrıca, alkali aktivasyon

süreci, geleneksel çimento hidratasyonuna göre daha hızlı priz ve sertleşme sağlar (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005). Bu, briket üretimini hızlandırır ve enerji tasarrufu sağlar. Alkali aktive edilmiş briketler, düşük su emme kapasitesi ve yüksek kimyasal dirence de sahiptir (Bakharev, 2005). Bu, briketlerin suya, aside ve diğer kimyasal maddelere karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Alkali aktivasyon, çimento üretimine göre daha az enerji gerektirir ve daha düşük karbondioksit emisyonuna neden olur (Habert ve d'Espinose de Lacaillerie, 2001). Bu nedenle, alkali aktive edilmiş briketler, daha çevre dostu bir alternatif olarak kabul edilir.

Ancak, alkali aktive edilmiş briketlerin bazı dezavantajları da vardır. Alkali aktivatörler, çimentoya göre daha pahalı olabilir. Bu, alkali aktive edilmiş briketlerin maliyetini artırabilir. Ayrıca, uygun kalitede uçucu külün temini, bazı bölgelerde zor olabilir. Alkali aktivasyon süreci, geleneksel briket üretim yöntemlerine göre daha karmaşık olabilir ve özel bilgi ve beceri gerektirebilir.

1.6.3. Dolgu Etki Teorisi

Dolgu Etkisi Teorisi, atık cam ve yanmış kömür atıkları gibi malzemelerin briket üretiminde dolgu malzemesi olarak nasıl kullanılabileceğini ve bu kullanımın briketin özelliklerine nasıl etki edebileceğini açıklar. Bu malzemeler, briket karışımının hacmini artırarak ve boşlukları doldurarak agrega olarak işlev görürler.

Atık camın dolgu malzemesi olarak kullanılması, briketin hacmini artırarak daha az ana bağlayıcı (çimento) kullanımına olanak tanır, böylece maliyetleri düşürür (Taha ve Nounu, 2008). Ayrıca, camın düşük ısı iletkenliği, briketin ısı yalıtım özelliklerini iyileştirerek enerji verimliliği açısından önemli bir avantaj sağlar (Ling ve Poon, 2013).

Yanmış kömür atıkları da briket karışımında dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Yüksek karbon içeriği nedeniyle, briketin yanma sürecini etkileyerek ısıl değerini artırabilirler (Kuenzel & Halliday, 2010). Bu, briketin daha uzun süre yanmasını ve daha fazla ısı enerjisi üretmesini sağlar.

Dolgu malzemeleri olarak atıkların kullanılması, atık miktarını azaltır ve çevresel etkileri en aza indirir (Ling ve Poon, 2013). Ancak, bazı dolgu malzemeleri, özellikle yüksek oranlarda kullanıldığında, briketin basınç dayanımını azaltabilir (Taha ve Nounu, 2008). Ayrıca, bazı dolgu malzemeleri, briketin su emme kapasitesini

artırarak donma-çözülme gibi çevresel etkilere karşı daha duyarlı hale getirebilir (Ahmaruzzaman, 2010). Yanmış kömür atıkları gibi bazı dolgu malzemeleri, ağır metaller ve diğer zararlı maddeler içerebilir. Bu nedenle, bu tür malzemelerin kullanımında dikkatli olunmalıdır (Ahmaruzzaman, 2010).

Dolgu Etkisi Teorisi, atık cam ve yanmış kömür atıklarının briket üretiminde kullanılmasının potansiyel faydalarını ve dezavantajlarını ortaya koyar. Bu malzemelerin briket karışımına eklenmesi, dikkatli bir şekilde planlanmalı ve kontrol edilmelidir. Malzemelerin oranı, partikül boyutu ve üretim yöntemi gibi faktörler optimize edilerek, istenen dayanım ve durabilite özelliklerine sahip briketler üretilir.

1.6.4. Parçacık Paketleme Teorisi

Parçacık Paketleme Teorisi, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları gibi farklı boyutlardaki malzemelerin briket üretiminde en verimli şekilde bir araya getirilerek briketin yoğunluğunu, mekanik dayanımını ve diğer özelliklerini optimize etmeyi amaçlar. Bu teori, briket karışımındaki parçacıkların boyut dağılımının, briketin performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgular (De Larrard ve Sedran, 1994). İdeal olarak, büyük parçacıklar arasındaki boşlukları doldurmak için daha küçük parçacıklar kullanılır ve bu da boşluk oranını azaltarak daha yoğun ve dayanıklı bir briket elde edilmesini sağlar (Wong ve Kwan, 2008). Parçacıkların şekli de briketin özelliklerini etkiler; yuvarlak parçacıklar daha düşük boşluk oranına sahip briketler oluştururken, köşeli parçacıklar daha yüksek boşluk oranına neden olabilir (Kwan ve Wong, 2009). Bu nedenle, briket karışımında kullanılacak malzemelerin partikül boyutu ve şekli, briketin istenen özelliklerine göre dikkatlice seçilmeli ve optimize edilmelidir.

1.6.5. Reaktif Agregalar Modeli

Reaktif Agregalar Modeli, bazı agregaların, özellikle atık camın, çimento ile kimyasal reaksiyona girerek briketin uzun vadeli dayanıklılığını olumsuz etkileyebileceğini açıklar. Modelin merkezinde, alkali-silika reaksiyonu (ASR) olarak bilinen ve beton ve briketlerde yaygın bir bozulma mekanizması olan bir olgu yer alır (Grattan-Bellew, 2003).

ASR, yüksek alkali içeriğine sahip çimentolu malzemeler ile reaktif agregalar arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Atık cam, yapısında bulunan silika nedeniyle potansiyel olarak reaktif bir agrega olarak kabul edilir. Yüksek alkali ortamda, camdaki silika, çimentodaki alkali hidroksitlerle reaksiyona girerek alkali silika jeli oluşturur (Helmuth ve Stark, 1992). Bu jel, su emerek şişer ve briket içinde iç gerilmelerin oluşmasına neden olur. Zamanla, bu gerilmeler briketin çatlamasına, hacim genişlemesine ve nihayetinde yapısal bütünlüğünün bozulmasına yol açabilir (Thomas, G. 2011).

Reaktif Agregalar Modeli, ASR'nin briketler üzerindeki bu zararlı etkilerini vurgular ve bu sorunu önlemek veya en aza indirmek için stratejiler önerir (Diamond, 1989). Bu stratejiler, düşük alkali içerikli çimento kullanımı, puzolanik malzemelerin (uçucu kül gibi) eklenmesi veya ASR'yi engelleyen kimyasal katkıların kullanılmasını içerebilir. Ayrıca, atık camın briket karışımına eklenmeden önce uygun şekilde işlenmesi ve test edilmesi de ASR riskini azaltmada önemlidir (Rajabipour ve Radlinska, 2009).

Sonuç olarak, Reaktif Agregalar Modeli, atık cam gibi malzemelerin briket üretiminde kullanılmasının potansiyel risklerini ve bu risklerin nasıl yönetilebileceğini anlamamıza yardımcı olur. Bu modelin dikkate alınması, dayanıklı ve uzun ömürlü briketlerin üretilmesi için kritik öneme sahiptir.

1.6.6. Sürdürülebilirlik Modeli

Sürdürülebilirlik Modeli, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıklarının briket üretiminde kullanılmasının çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerini bütüncül bir şekilde değerlendiren bir yaklaşımdır (Habert ve d'Espinose de Lacaillerie, 2001). Bu model, atık malzemelerin geri dönüşümünü teşvik ederek doğal kaynakların korunmasına, enerji tüketiminin azaltılmasına ve atık depolama alanlarının ömrünün uzatılmasına katkıda bulunur.

Çevresel boyutta, Sürdürülebilirlik Modeli, büyük miktarlarda üretilen ve depolanması veya bertarafı sorunlu olan uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıklarının briket üretiminde kullanılmasını önerir (Ahmaruzzaman, 2010). Bu sayede atık miktarı azaltılır ve doğal kaynakların (kil, kum vb.) tüketimi düşürülerek doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunulur (Kaur ve Siddique, 2016). Ayrıca,

çimento yerine veya çimento ile birlikte kullanılan atık malzemeler, sera gazı emisyonlarını azaltır ve iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlar (Marceau ve diğerleri, 2006). Briket üretiminde atık malzemelerin kullanımı, daha düşük sıcaklıklarda fırınlama yapılmasını sağlayarak enerji tasarrufu da sağlar (Ling ve Poon, 2013).

Sosyal boyutta, Sürdürülebilirlik Modeli, atık malzemelerin briket üretiminde kullanılmasının yerel ekonomilere katkı sağlayabileceğini vurgular (Dias ve diğerleri, 2018). Atık toplama, işleme ve briket üretim tesislerinin kurulması, istihdam yaratır ve yerel kalkınmayı destekler. Ayrıca, sürdürülebilir briket üretimi, daha sağlıklı ve güvenli yaşam alanlarının oluşturulmasına katkıda bulunur (Ghaffar ve diğerleri, 2019). Atık malzemelerin geri dönüşümü, çevre kirliliğini azaltır ve insanların yaşam kalitesini artırır.

Ekonomik boyutta, Sürdürülebilirlik Modeli, atık malzemelerin briket üretiminde kullanımının maliyetleri düşürdüğünü belirtir (Kaur ve Siddique, 2016). Bu, daha uygun fiyatlı konut ve altyapı projelerinin gerçekleştirilmesini sağlayabilir. Ayrıca, çevre dostu ürünlere olan talep arttıkça, sürdürülebilir briketler firmalara rekabet avantajı sağlayabilir (Ghaffar ve diğerleri, 2019).

Sürdürülebilirlik Modeli uygulamaları, briket üretiminde kullanılan atık malzemelerin oranını, üretim süreçlerini ve ürünlerin performansını optimize etmek için yaşam döngüsü analizi (LCA), maliyet-fayda analizi ve çok kriterli karar verme yöntemleri gibi araçları kullanır (Tukker ve Tischner, 2006). Bu model, briket üretiminin çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerini değerlendirerek daha sürdürülebilir bir inşaat sektörüne ve daha yaşanabilir bir geleceğe katkıda bulunmayı amaçlar.

1.7. Literatür Özeti

Duxson ve diğerleri (2007), briket üretiminde kullanılan malzemelerin alkali çözeltilerle aktive edilmesi ve kürlenmesi sürecinin briketlerin mukavemetini ve dayanıklılığını artırdığını açıklamaktadır. Uçucu kül ve atık camın kombinasyonu, briketlerin çevresel ve ekonomik avantajlarını artırır. Çalışmada, uçucu kül ve atık camın alkali aktivasyon ile güçlü bağlayıcı özellikler kazandığı belirtilmiştir.

Provis ve van Deventer (2009), atık camın geopolimer üretiminde ince toz haline getirilmesi ve alkali aktivasyon ile kullanıldığında geri dönüştürülmesine ve

Çevresel etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunduğunu vurgulamaktadır. Atık cam, yüksek silika içeriği nedeniyle reaktif bir bileşen haline gelir ve briketlerin dayanıklılığını artırır. Atık camın geri dönüştürülmesi ve yüksek performanslı yapı malzemeleri üretiminde kullanılması üzerinde durulmuştur.

Provis ve Bernal (2014), uçucu külün geopolimer üretiminde yüksek silika ve alümina içeriği sayesinde reaktif bir bileşen haline geldiğini ve bu bileşenin briketlerin dayanıklılığını artırdığını belirtmektedir. Bu çalışmada, uçucu külün karbon emisyonlarını azaltarak çevresel faydalar sağladığı vurgulanmıştır. Uçucu külün çevresel sürdürülebilirliği artıran özellikleri incelenmiştir.

Hwang ve Huynh (2015), uçucu kül ve pirinç kabuğu külü içeren geopolimerlerin alkali aktivasyon ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar, uçucu külün yüksek basınç dayanımı sağladığını ve çevresel olarak sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermiştir. Uçucu külün ve pirinç kabuğu külünün dayanıklılık özellikleri değerlendirilmiştir.

Suksiripattanapong ve diğerleri (2015), su arıtma çamuru ile karıştırılan uçucu kül bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını değerlendirmiştir. Bu alışma, uçucu külün diğer endüstriyel atıklarla kombinasyonunun, geopolimerlerin dayanıklılığını artırdığını ve atık yönetimi sorunlarını azalttığını göstermektedir. Su arıtma çamuru ve uçucu kül kombinasyonu üzerinde durulmuştur.

Choo ve diğerleri (2016), kırmızı çamur kullanarak alkali ile aktive edilmiş uçucu kül bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını incelemiştir. Sonuçlar, uçucu külün alkali aktivatörler ile reaksiyona girerek güçlü ve dayanıklı yapı malzemeleri oluşturduğunu göstermiştir. Kırmızı amur ve uçucu kül kombinasyonunun yapı malzemeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Duan ve diğerleri (2017), uçucu kül ve atık cam kullanarak yapılan geopolimerlerin mikro yapısını ve basınç dayanımını incelemiştir. Araştırma, atık camın silika kaynağı olarak kullanılmasının geopolimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Uçucu kül ve atık cam kombinasyonunun mikro yapı ve dayanıklılık üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Buchwald (2018), uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen briketlerin çevresel ve ekonomik açıdan faydalı olduğunu belirtmektedir. Bu malzemeler, briket üretim maliyetlerini düşürür ve karbon emisyonlarını azaltır.

Uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıklarının ekonomik ve çevresel faydaları incelenmiştir.

Mabroum ve diğerleri (2020), uçucu külün geopolimer üretiminde kullanımı üzerine yaptığı çalışmada, bu malzemenin yüksek silis ve alümina içeriği nedeniyle güçlü bir bağlayıcı özellik sunduğunu ve karbon emisyonlarını azaltarak çevresel faydalar sağladığını belirtmiştir. Uçucu külün bağlayıcı özellikleri ve çevresel etkileri incelenmiştir.

Habert ve diğerleri (2020), yanmış kömür atıklarının uçucu kül ve atık cam ile birlikte kullanıldığında yüksek mukavemetli ve dayanıklı briketler üretilebileceğini ifade etmektedir. Atık malzemelerin bu şekilde değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirliği artırır ve atık yönetimi sorunlarını hafifletir. Yanmış kömür atıkları, uçucu kül ve atık cam kombinasyonunun dayanıklılık ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMA VE KULLANILAN MALZEMELER

2.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıklarının briket üretiminde kullanılmasının briketlerin fiziksel ve mekanik etkilerini deneysel olarak incelemek ve bu atık malzemelerin optimum karışım oranlarını belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, farklı oranlarda uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atığı içeren briketler üretilmiş ve bu briketlerin yoğunluk, basınç dayanımı, su emme gibi özellikleri belirlenecektir.

2.2. Malzemeler

Bu çalışmada, yanmış kömür atığı, inşaat atıklarından elde edilen cam, uçucu kül ve bu üç malzemenin karışımları bağlayıcı olarak kullanılmıştır. CEN standart kumu ince agrega olarak, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ise alkali aktivatör olarak kullanılmıştır.

2.2.1. Yanmış Kömür Atığı (YKA)

Yanmış kömür atığı, kömürün enerji üretimi veya endüstriyel proseslerde yakılması sonucunda ortaya çıkan katı atıklardır. Bu atıklar, kömürün organik bileşenlerinin yanması ve inorganik bileşenlerinin geride kalmasıyla oluşur. Çalışmada kullanılan yanmış kömür artıkları Şekil 1’de görülen Rize ili Çaykur Camiönü Çay Fabrikası’ndan tedarik edilmiştir.

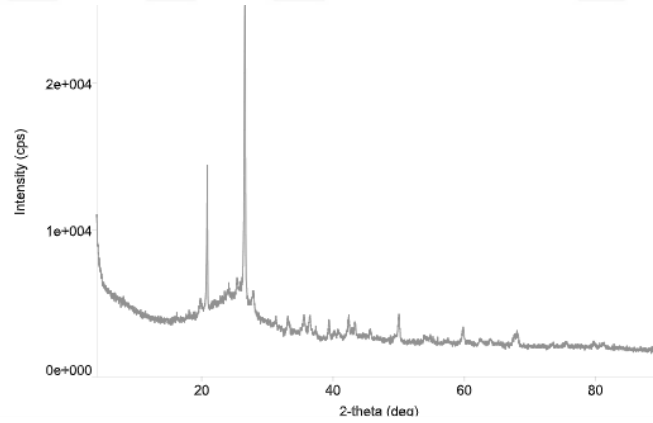


Şekil 1. Rize ili çaykur camiönü çay fabrikası

Şekil 2’de görülen yanmış kömür atıkları, Şekil 3’de bu malzemenin XRD grafiği verilmiştir. Şekil 4’te gösterilen geopolimerde bağlayıcı inceliğine getirilmek üzere işlenmiştir. İlk olarak, çeneli kırıcıda yanmış kömür atıkları kırılarak tane boyutu küçültülmüştür. Daha sonra, küçültülen taneler bilyeli değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir.



Şekil 2. Yanmış kömür atıkları



Şekil 3. Yanmış kömür atığı XRD grafiği



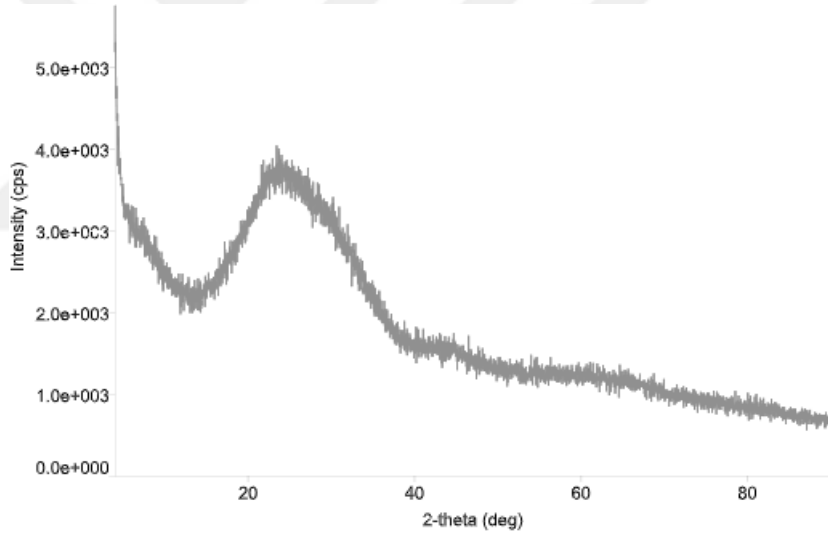
Şekil 4. YKA'nın öğütülmüş hali

Yanmış kömür atığının ana bileşenleri merkezi araştırma laboratuvarında incelendiğinde, yaklaşık olarak %45 silika (SiO_2), %22.5 alüminyum oksit (Al_2O_3), %10 demir oksit (Fe_2O_3) ve %5 kalsiyum oksit (CaO) içerdiği görülmektedir.

2.2.2. Atık Cam (AC)

Atık cam, çeşitli endüstrilerden ve tüketim ürünlerinden elde edilen, yeniden kullanılamayan cam malzemelerdir. Cam şişeler, kavanozlar, pencere camları, otomobil camları ve diğer cam ürünler atık cam kategorisine girer. Bu atıklar, geri dönüşüm süreçlerine dahil edilerek yeniden kullanılabilir cam ürünlerine dönüştürülür.

Çalışmada, Şekil 5’de XRD grafiği gösterilen inşaat atığı cam kullanılmıştır. Bu atık camlar, önce çeneli kırıcıda işlenmiş, ardından bilyeli değirmende öğütülerek Şekil 6’da görülen toz boyutuna getirilmiştir.



Şekil 5. Atık cam XRD grafiği



Şekil 6. Atık camın toz hali

Atık camın kimyasal bileşimi merkezi araştırma laboratuvarında incelendiğinde, yaklaşık olarak %72 silika (SiO_2), %14 sodyum oksit (Na_2O), %10 kalsiyum oksit (CaO), %2 alüminyum oksit (Al_2O_3), %1 magnezyum oksit (MgO), %0.5 potasyum oksit (K_2O) ve %0.3 demir oksit (Fe_2O_3) içerdiği görülmektedir.

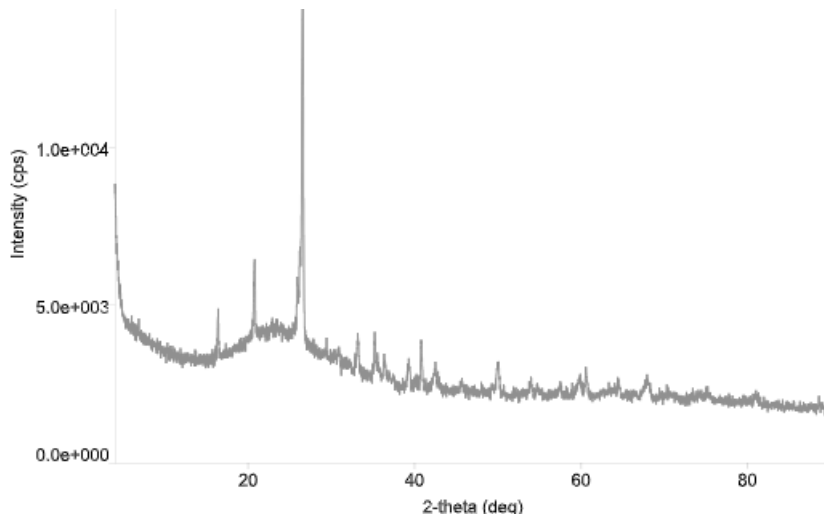
2.2.3. Uçucu Kül (UC)

Uçucu kül, kömür veya diğer fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan ince, toz halinde inorganik partiküllerdir. Bu kül, baca gazlarıyla birlikte baca sisteminden dışarı atılır ve elektrostatik çökticiler veya torba filtreler gibi sistemlerle toplanır.

Çalışmada kullanılan fabrikadan alınmış Şekil 7’deki uçucu kül TS EN 450’e göre ise V sınıfı silissi bir uçucu küldür. XRD grafiği aşağıda verilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Uçucu kül



Şekil 8. Uçucu kül XRD grafiği

Uçucu külün kimyasal bileşimi incelendiğinde, yaklaşık olarak %50 silika (SiO_2), %25 alüminyum oksit (Al_2O_3), %10 demir oksit (Fe_2O_3), %5 kalsiyum oksit (CaO), %2 magnezyum oksit (MgO), %1 potasyum oksit (K_2O) ve %0.5 titanyum oksit (TiO_2) içerdiği görülmektedir.

2.2.4. Standart Kum

Standart kum, belirli kriterlere ve standartlara uygun olarak üretilmiş veya seçilmiş kumdur. Bu kum, özellikle beton ve harç karışımlarının performansını test etmek amacıyla kullanılır. Standart kumun fiziksel ve kimyasal özellikleri, Avrupa Standartlar Komitesi tarafından belirlenir.

Deneyler de Standart CEN kumu kullanılmıştır. Standart kumlar Şekil 9’da görülen 1350 gram olarak hazırlanmış kumlardan oluşmaktadır.



Şekil 9. Standart Kum

2.2.5. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit, sodyum iyonları (Na^+) ve hidroksit iyonları (OH^-) içeren güçlü bir bazdır. Kimyasal formülü NaOH olan bu bileşik, genellikle beyaz, katı ve

higroskopik bir madde olarak bulunur. Sulu çözeltileri, yüksek pH değerlerine sahip güçlü alkalilerdir.

Geopolimer alkali aktivatörü olarak toz halde temin edilen sodyum hidroksit (NaOH), Şekil 10'da gösterildiği gibi 12 molar konsantrasyonda olacak şekildedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi su ile çözülerek hazırlanmıştır. Bu hazırlanan çözeltiler geopolimerlerde kullanılmıştır. Harçlarda alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olarak seçilmiştir. Bu değer, literatürdeki çalışmalar incelenerek en uygun değer olduğuna kanaat getirilerek belirlenmiştir.



Şekil 10. Sodyum Hidroksit



Şekil 11. Sodyum Çözeltisi

Sodyum hidroksit (NaOH) kimyasal bileşimi incelendiğinde, yaklaşık olarak %57.48 sodyum (Na), %40.00 oksijen (O) ve %2.52 hidrojen (H) içerdiği görülmektedir.

2.3. Geopolimer Harçların Üretimi ve Malzeme Miktarları

Çalışmada geopolimerlerde sekiz farklı bağlayıcı kombinasyonu belirlenmiştir. Bu sekiz kombinasyon, yanmış kömür atığı, uçucu kül ve atık camla üretilcek harçların eğilme ve basınç değerlerinin iyileştirilmesi hedeflenerek rastgele seçim yoluyla belirlenmiştir. Her kombinasyon, 3, 7 ve 28 gün olarak üç farklı yaşta ve 90°C olarak kür sıcaklığında test edilmiştir. Her test grubu için üç numune üretilmiş ve 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri hazırlanmıştır.

Deneyler, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Harç numunelerinin üretiminde su ve sodyum hidroksit miktarları sabit tutulmuş, yanmış kömür atığı, atık cam ve uçucu kül ise Tablo 1'de görüldüğü gibi farklı miktarlarda kullanılmıştır.

Tablo 1. Geopolimerde kullanılan malzeme miktarları (gram)

Numune Kodu	Yanmış Kömür Atığı	Atık Cam	Uçucu Kül	Aktivatör	Standart Kum	Su	NaOH
YKA30AC70UC0	135	315	0	450	1350	125,55	76,65
YKA30AC0UC70	135	0	315	450	1350	125,55	76,65
YKA20AC80UC0	90	360	0	450	1350	125,55	76,65
YKA20AC0UC80	90	0	360	450	1350	125,55	76,65
YKA10AC90UC0	45	405	0	450	1350	125,55	76,65
YKA10AC0UC90	45	0	405	450	1350	125,55	76,65
YKA0AC100UC0	0	450	0	450	1350	125,55	76,65
YKA0AC0UC100	0	0	450	450	1350	125,55	76,65

Geopolimerlerin üretiminden önce, 76,65 gram sodyum hidroksit (NaOH) 125,55 gram su ile karıştırılarak hazırlanan çözeltiler, kapalı kaplarda 24 saat bekletildikten sonra harç numunelerinde kullanılmıştır. Harçlar hazırlanırken, mikser düşük devirde çalıştırılarak ilk olarak bağlayıcılar eklenmiş ve 30 saniye boyunca karıştırılmıştır. Ardından, bağlayıcılara kum ilave edilerek düşük hızda 30 saniye daha karıştırılmış ve son olarak alkali aktivatör çözeltisi eklenerek karışımın homojen olması sağlanmıştır (Şekil 12). Alkali aktivatörün tamamı karışıma döküldükten sonra,

karışım 60 saniye daha karıştırılarak harç numunesi kalıplarına yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir.

Elde edilen harç, 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numune kalıplarına, her bir seferde 60 vuruş olacak şekilde iki tabaka halinde yerleştirilmiştir. Şekil 13'te görülen kalıplanmış numuneler, dört farklı gruba ayrılarak her bir grup numune, 24 saat süre ile iklimlendirme dolabında bekletildikten sonra, 72 saat boyunca sırasıyla 90°C etüvde bekletilmiştir (Şekil 14). Etüvden çıkarılan numuneler, basınç ve eğilme dayanımı testlerinin uygulanacağı 3, 7. ve 28. güne kadar çevresel etkilerden korunmak amacıyla hava almayan şeffaf poşetlerde saklanmıştır.



Şekil 12. Harç numunesinin karıştırıcıda karılması



Şekil 13. Üretimi tamamlanmış harç numuneleri



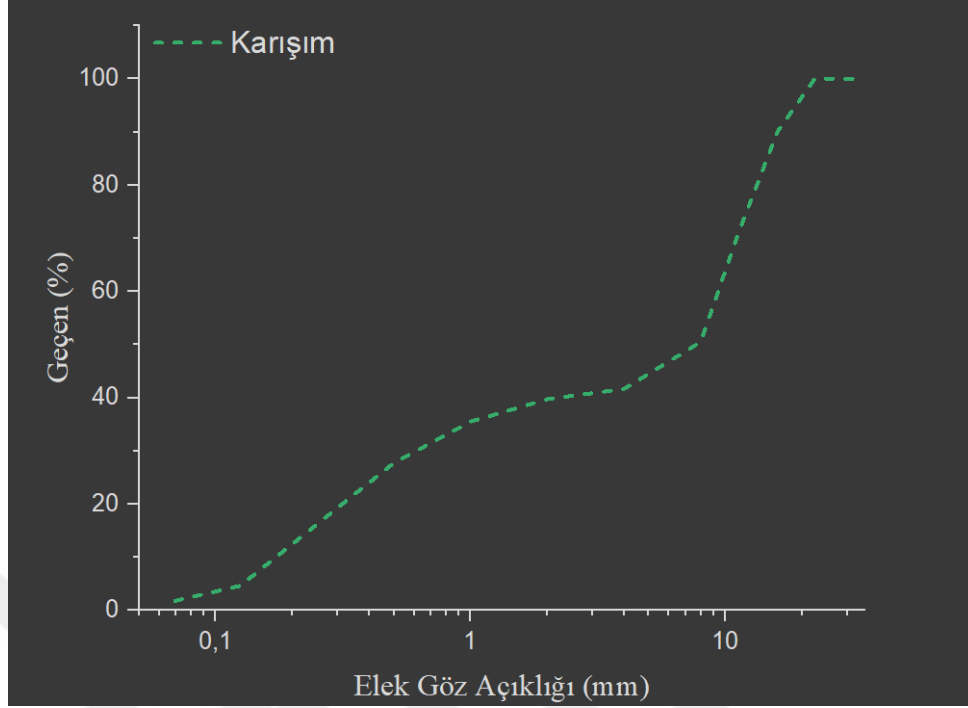
Şekil 14. Numunelerin etüve yerleştirilip 90°C’de bekletilmesi

2.4. Geopolimer Betonların Üretimi

Çalışmada sekiz farklı bağlayıcı kombinasyonu belirlenmiştir. Şekil 15’de üretimi tamamlanmış bir örnek verilmiştir. Bu dokuz kombinasyon, yanmış kömür atığı, uçucu kül ve atık camla üretilcek betonların basınç değerlerinin iyileştirilmesi hedeflenerek rastgele seçim yoluyla belirlenmiştir. Her kombinasyon, 48 saat yaş ve 90°C olarak kür sıcaklığında test edilmiştir. Her test grubu için üç numune üretilmiş ve 40x40 mm boyutlarında küp beton numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 16’da granülometre eğrisi verilen en uygun numuneye göre de briket için kullanılan kombinasyon belirlenmiştir.



Şekil 15. Geopolimer beton



Şekil 16. Granülometre Eğrisi

2.5. Geopolimer Briket Üretimi

Briket üretiminde kullanılacak malzemeler Merkez Rize’de bulunan bir beton agrega kırma eleme tesisinden sipariş verilmiştir. Bunlar Şekil 17’de görülen ince agrega, kalın agrega ve kumdur. Briket kalıbı için marangoz yardımıyla tahtalar hazırlanmış, birleştirilmesi tamamlanmış ve yağlanarak uygun hale getirilip dökümü yapılmıştır (Şekil 18).



Şekil 17. Tesisten alınan agrega



Şekil 18. Briket kalıbına yerleştirilen numune

2.6. Deneyler

2.6.1. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme deneylerinde, önceden dökümü yapılmış ve kür uygulanmış 40x40x160 mm boyutlarında üretilen numunelere, TS EN 196-1'deki standart çimento numunelerine uygulanan eğilme ve basınç yükleme hızlarında deneyler uygulanmıştır. Şekil 19'da görülen eğme deney cihazıyla numunelerin eğilme dayanımları ölçülmüştür. Eğilme dayanımları, "eğilme dayanımı (N/mm²) = 1,5 x kuvvet (N) x destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık (mm) / kare kesit kenar uzunluğu (mm)³" formülüne göre hesaplanmıştır. Bu formülde, eğilme dayanımı (N/mm²) hesaplanırken prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu 40 mm, prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet N cinsinden ve destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık 100 mm olarak alınmıştır.



Şekil 19. Eğilme dayanım deneyi yapılan harç numunesi

2.6.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımını ölçmek amacıyla test edilen numunelerden ikiye bölünen parçaların uç kısımlarına basınç deneyi uygulanmıştır. Şekil 20'de görülen basınç deneyi uygulanan numunenin kuvvet uygulandığı alanı 40x40 mm'dir. Basınç dayanımları, "basınç dayanımı (N/mm²) = kırılmadaki en büyük kuvvet (N) / basınç plakasının kenar uzunluğunun karesi (mm²)" formülüne göre ölçülerek, altı numunenin ortalaması alınarak çalışmada sunulmuştur.

Bu formülde, basınç dayanımı (N/mm²) hesaplanırken, basınç plakasının kenar uzunluğu 40 mm ve kırılmadaki en büyük kuvvet N cinsinden alınmıştır.



Şekil 20. Basınç dayanım deneyi yapılan harç numunesi

2.6.3. Yarmada Çekme Deneyi

Yarma çekme deneyi, beton gibi kırılğan malzemelerin çekme dayanımını belirlemek amacıyla TSE standartlarına göre yapılan bir deneydir. Bu deney, doğrudan çekme testine alternatif olarak kullanılır ve genellikle daha pratik ve uygulanabilir bir yöntem olarak tercih edilir. Yarma çekme deneyi, betonun çekme dayanımını belirlemek için yapılır. Çekme dayanımı, betonun çatlama direncini ve genel dayanıklılığını anlamak için önemli bir parametredir. Çekme dayanımının bilinmesi, yapısal tasarım ve analiz süreçlerinde önemli bir rol oynar.

Yarma çekme deneyi için silindirik beton numunesi kullanılmıştır. Bu numune 150 mm çapında ve 300 mm uzunluğundadır. Hazırlanan silindirik numune, yatay olarak ve basınç presine yerleştirilmiştir. Numunenin ortasına, uzun eksenine dik olacak şekilde basınç uygulanır. Numunenin ortasına uygulanan basınç, numuneyi ikiye yaracak şekilde artırılır. Bu süreçte numuneye uygulanan yük ve oluşan deformasyon sürekli olarak kaydedilmiştir.

2.6.4. Su Emme Deneyi

Su emme deneyi, TS EN 1097-6 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlığı için öncelikle deney için kullanılacak briket numunesinin boyutları ölçülmüştür. Kısa kenarı 15x18 (cm) olan yüzeyine uygulanmıştır. Numune, deneyden önce 24 saat boyunca 105°C'de kurutulup ardından soğuması için bekletilmiştir. Kurutulmuş ve soğutulmuş numunenin ağırlığı hassas bir terazi ile ölçülüp kaydedilmiştir. Bu değer 17234 gramdır. Kurutulmuş numune oda sıcaklığında su dolu bir kaba daldırılıp 24 saat suyun içinde bekletilmiştir.

2.6.5. Mikro Yapısal Analizler

Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri X-ışını floresans (XRF) analizi ile belirlenmiştir. XRF ile belirlenen kimyasal bileşimler dikkate alınarak, numunelerin mineralojik yapıları X-ışını difraksiyonu (XRD) ile de tespit edilmiştir. Ayrıca, belirli harç numunesi gruplarından kesilen parçalar üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Bu analizler, geopolimer matrisinin iç yapısını, bileşenlerin dağılımını ve mikro yapısal özelliklerini daha detaylı bir şekilde incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

2.7. Bulgular

2.7.1. Numunelerin Eğilme Dayanımları

Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te harç numunelerde sırasıyla 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. Tablo 2'de en yüksek eğilme dayanımı 5,65 MPa ile %90 atık cam %10 yanmış kömür atığı içeren numunelerde, en düşük eğilme dayanımı 2,13 MPa ile %80 atık cam %20 yanmış kömür atığı içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 2. Harç numunelerin 3 günlük eğilme dayanımı değerleri

Numune Kodu	MPa
YKA30AC70UC0	5,24
YKA30AC0UC70	2,20
YKA20AC80UC0	2,13
YKA20AC0UC80	2,76
YKA10AC90UC0	5,65
YKA10AC0UC90	3,54
YKA0AC100UC0	4,08
YKA0AC0UC100	2,9

Tablo 3'te en yüksek eğilme dayanımına 5,93 MPa ile %90 atık cam %10 yanmış kömür atığı, en düşük eğilme dayanımına 3,5 MPa ile %70 uçucu kül %30 yanmış kömür atığı içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 3. Harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı değerleri

Numune Kodu	MPa
YKA30AC70UC0	5,71
YKA30AC0UC70	3,5
YKA20AC80UC0	4,06
YKA20AC0UC80	3,57
YKA10AC90UC0	5,93
YKA10AC0UC90	3,82
YKA0AC100UC0	4,22
YKA0AC0UC100	3,55

Tablo 4'te en yüksek eğilme dayanımına 6,15 MPa ile %90 atık cam %10 yanmış kömür atığı, en düşük eğilme dayanımına 3,62 MPa ile %80 uçucu kül %20 yanmış kömür atığı içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 4. Harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri

Numune Kodu	MPa
YKA30AC70UC0	5,81
YKA30AC0UC70	3,8
YKA20AC80UC0	5,15
YKA20AC0UC80	3,62
YKA10AC90UC0	6,15
YKA10AC0UC90	3,97
YKA0AC100UC0	4,45
YKA0AC0UC100	4,16

2.7.2. Numunelerin Basınç Dayanımları

Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7’de harç numunelerde sırasıyla 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Tablo 5’te en yüksek basınç dayanımı 25,43 MPa ile %90 atık cam %10 yanmış kömür atığı, en düşük basınç dayanımı 8,75 MPa ile %100 uçucu kül içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 5. Harç numunelerin 3 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	MPa
YKA30AC70UC0	25,37
YKA30AC0UC70	15,07
YKA20AC80UC0	19,21
YKA20AC0UC80	12,76
YKA10AC90UC0	25,43
YKA10AC0UC90	13,8
YKA0AC100UC0	14,53
YKA0AC0UC100	8,75

Tablo 6’da en yüksek basınç dayanımı 27,58 MPa ile %70 atık cam %30 yanmış kömür atığı, en düşük basınç dayanımı 15,32 MPa ile %100 atık cam içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 6. Harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	MPa
YKA30AC70UC0	27,58
YKA30AC0UC70	16,32
YKA20AC80UC0	21,74
YKA20AC0UC80	18,56
YKA10AC90UC0	26,46
YKA10AC0UC90	15,97
YKA0AC100UC0	15,32
YKA0AC0UC100	20,46

Tablo 7’de en yüksek basınç dayanımı 32,42 MPa ile %90 atık cam %10 yanmış kömür atığı, en düşük basınç dayanımı 16,19 MPa ile %90 uçucu kül %10 yanmış kömür atığı içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 7. Harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	MPa
YKA30AC70UC0	31,8
YKA30AC0UC70	17,72
YKA20AC80UC0	25,99
YKA20AC0UC80	23,35
YKA10AC90UC0	32,42
YKA10AC0UC90	16,19
YKA0AC100UC0	17,53
YKA0AC0UC100	22,24

2.7.3. Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımları

Numunenin yarılması sırasında uygulanan yükler kaydedilmiştir. Bu yüklerin ortalaması 23700 N’dur. Çekme dayanımı, bu formül kullanılarak hesaplanır: $(2 * P) / (\pi * L * D)$. P: Maksimum yük (N), L: Numunenin uzunluğu (mm), ve D: Numunenin çapı (mm) ifade eder. Bu formüle göre yarmada çekme dayanımı ortalama 7,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

2.7.4. Numunelerin Su Emmesi

Deney başlangıcından sonra 1, 2, 4, 8 ve 24 saat aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Tablo 7’de ölçüm sonuçları verilmiştir.

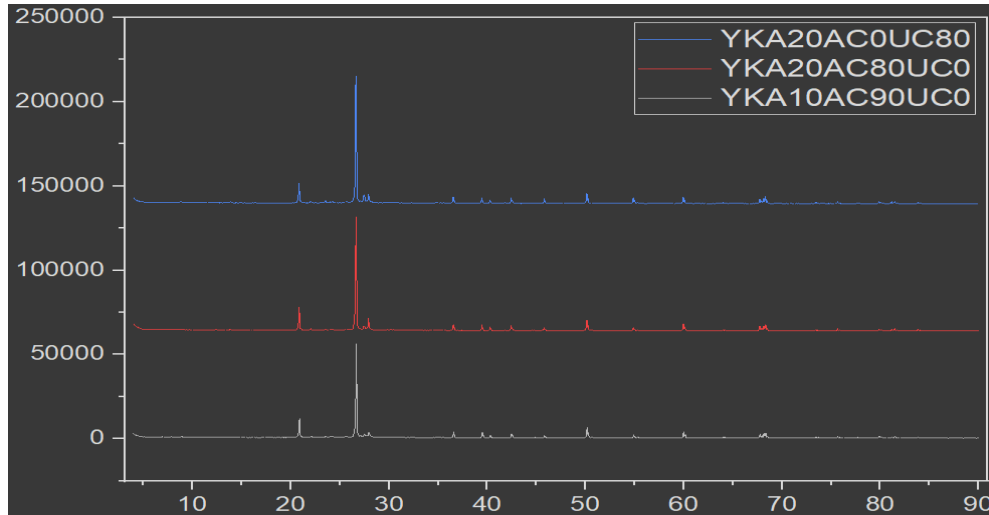
Tablo 8. Optimum briket numunesinin su emme değerleri

Saat	Gram
1	17360
2	17370
4	17380
8	17390
24	17420

Su emme oranı, bu formül kullanılarak hesaplanır: Su emme oranı (%) = $[(W_{dk} - W_k) / W_k] * 100$. Burada, W_{dk} : Doymuş yüzey kuru ağırlık, W_k : Kuru ağırlık olarak ifade edilir. Formül yardımıyla sonuç % 0.554 olarak bulunmuştur.

2.7.5. Mikroyapı Analizleri

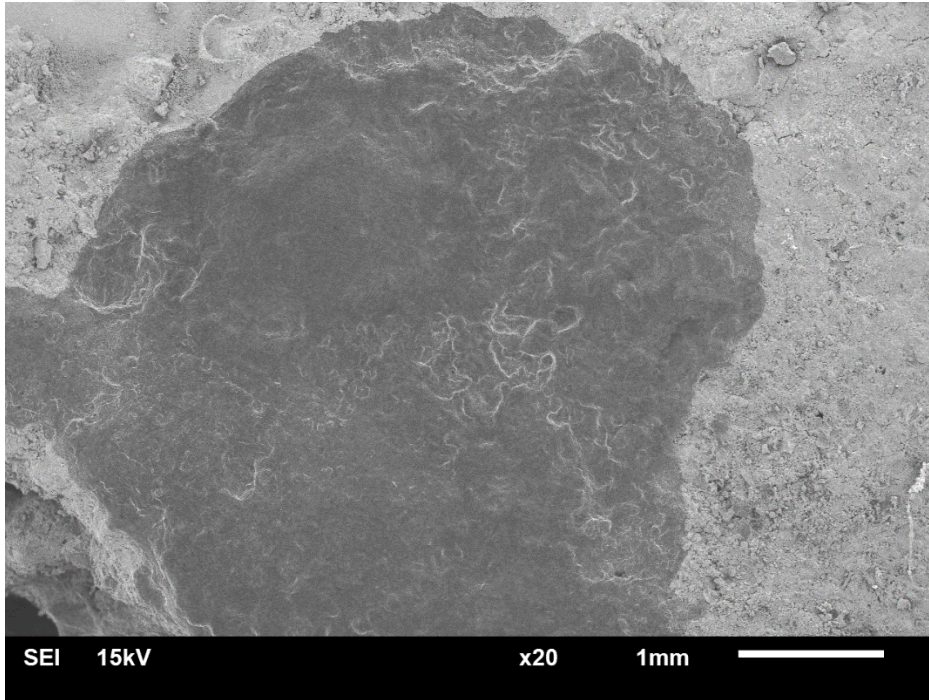
Şekil 21’deki analiz numunelerden alınan örneğin toz haline getirilmesiyle elde edilmiştir.



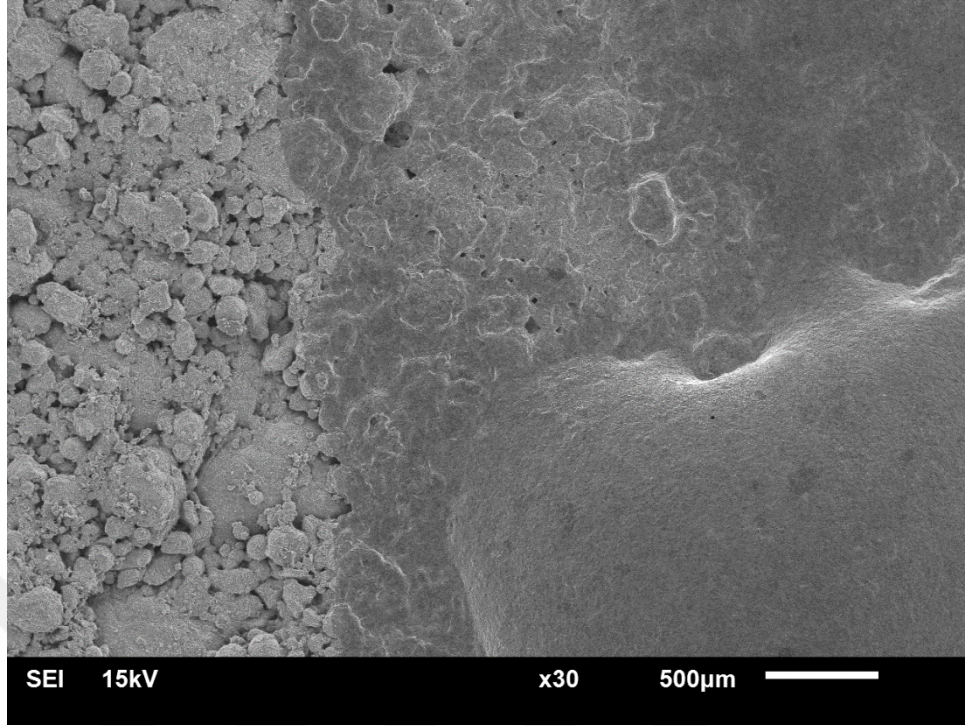
Şekil 21. 3 numunenin XRD grafiği

Harç numunelerinde ağırlıkça farklı oranlarda kullanılan bağlayıcı malzemeler arasındaki potansiyel ilişkiyi karakterize etmek ve elde edilen dayanımlar ile geopolimer matrisler arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında, %100 saf bağlayıcıların kullanıldığı karışımlar ile ağırlıkça farklı oranlarda beraber kullanılan bağlayıcıların karışımları seçilerek analiz edilmiştir.

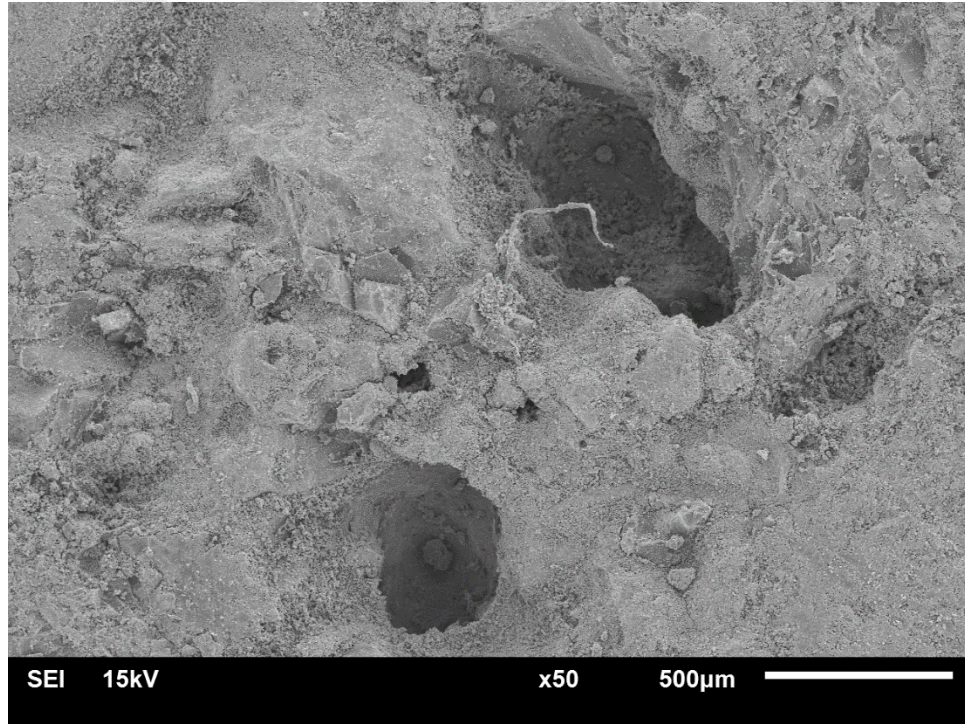
Bu analizler, harç numunelerinin iç yapısındaki boşlukları, tanecikleri, malzemelerin yapısını, çatlakları ve parçacıkları belirgin bir şekilde ortaya koymuştur. SEM ve EDS analizleri sayesinde, numunelerin iç yapısında görülen bu özellikler, bağlayıcı malzemelerin yapısı ve aralarındaki etkileşimler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu sonuçlar, farklı bağlayıcı kombinasyonlarının ve oranlarının, geopolimer harçların mikroyapısal özelliklerini ve dolayısıyla mekanik dayanımlarını nasıl etkilediğini açıklamaktadır. Şekil 22’de 20 kez, Şekil 23’de 30 kez ve Şekil 24’de 50 kez, yakınlaştırılarak elde edilen görüntüler verilmiştir.



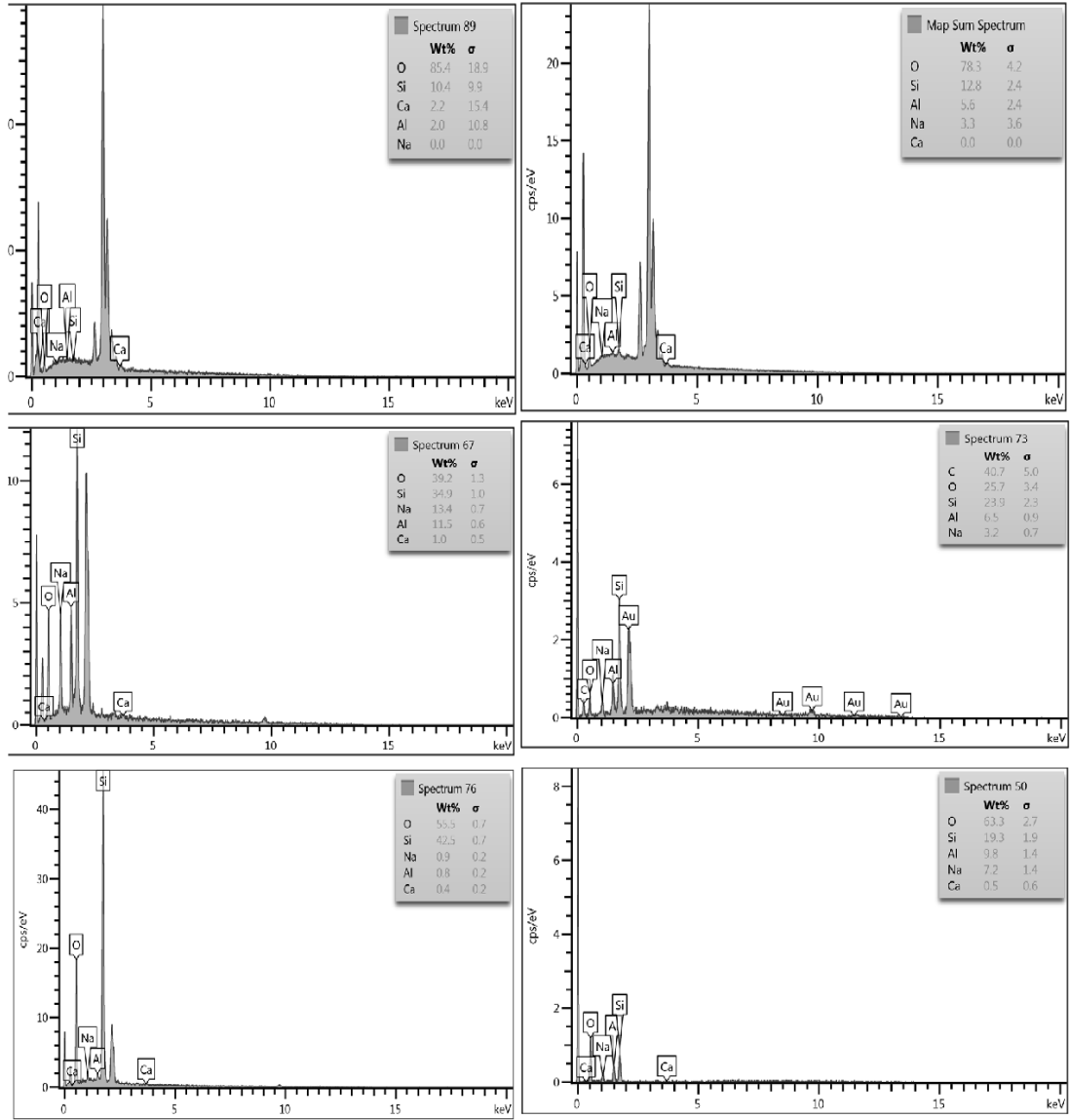
Şekil 22. x20 SEM



Şekil 23. x30 SEM



Şekil 24. x50 SEM



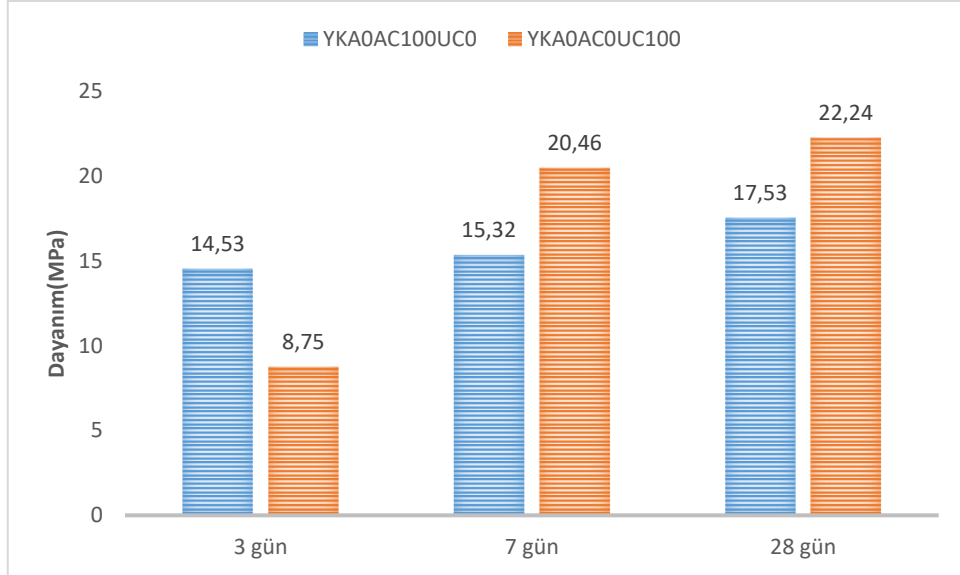
Şekil 25. EDS Spektroskopileri

Şekil 25’de SEM analizleri gerçekleştirilen numunelere ait EDS analizleri verilmektedir. Yapılan EDS analizleri sonucunda numune yüzeylerinde bulunan element içerikleri oranları görüntülerde verilmektedir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

3.1. Tartışma

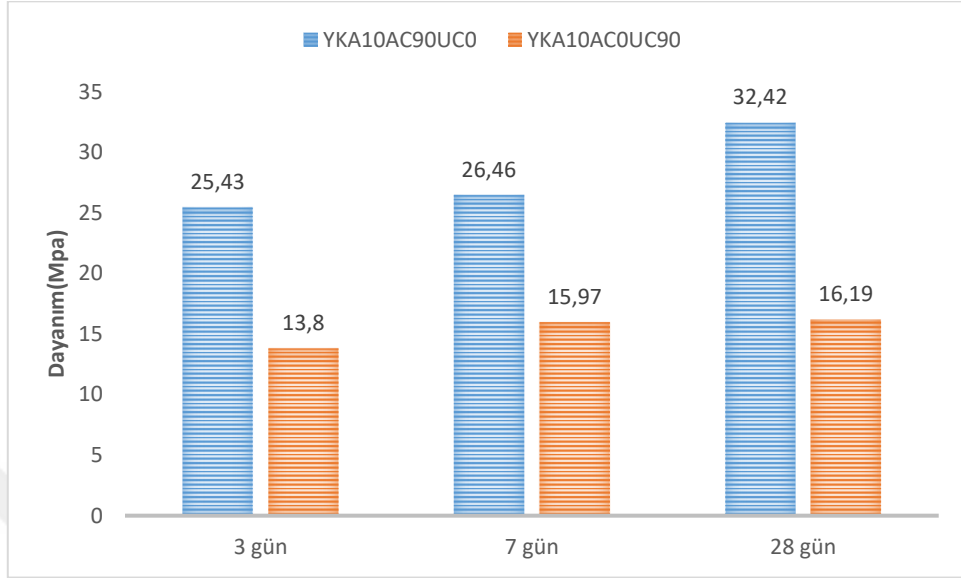
Şekil 26’da %100 atık cam ve %100 uçucu kül içeren harç numunelerden elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. En yüksek basınç dayanım değeri YKA0AC0UC100 serisi %100 uçucu kül içeren 28 günlük harç numunelerinde 22,24 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri YKA0AC0UC100 serisi %100 uçucu kül içeren 3 günlük harç numunelerinde 8,75 MPa olarak elde edilmiştir. Tek bağlayıcı içeren harç numunelerde en yüksek basınç dayanımları uçucu kül içeren karışımlardan elde edilmiştir. Atık cam kullanılan harç numunelerin diğer karışımlara nazaran daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 26. %100 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı

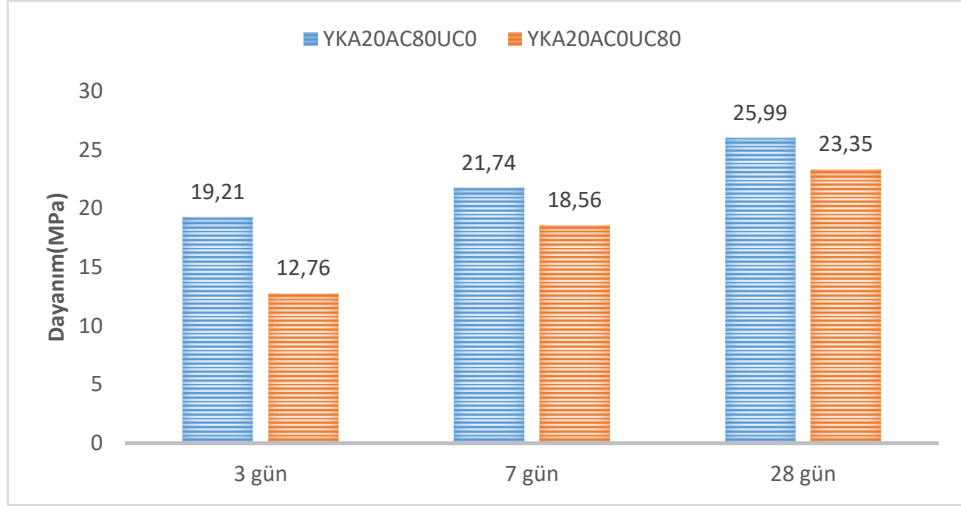
Şekil 27’de %90 atık cam ve %90 uçucu kül içeren harç numunelerinden elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. En yüksek basınç dayanım değeri YKA10AC90UC0 serisi %90 atık cam içeren 28 günlük harç numunelerinde 32,42 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri YKA10AC0UC90 serisi %90 uçucu kül içeren 3 günlük harç numunelerinde 13,8 MPa olarak elde edilmiştir. Minimum kür süresinde bile atık cam içeren numunelerden elde edilen dayanımın

maksimum kür süresindeki uçucu kül numunelerinden yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



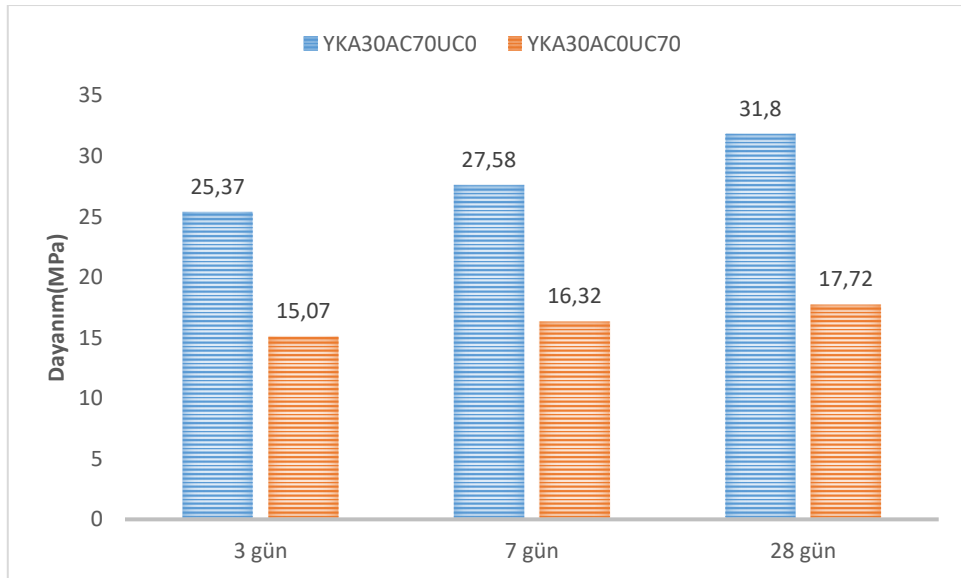
Şekil 27. %90 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı

Şekil 28’de %80 atık cam ve %80 uçucu kül içeren harç numunelerinden elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. En yüksek basınç dayanım değeri YKA20AC80UC0 serisi %80 atık cam içeren 28 günlük harç numunelerinde 25,99 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri YKA20AC0UC80 serisi %80 uçucu kül içeren 3 günlük harç numunelerinde 12,76 MPa olarak elde edilmiştir. Atık cam içeren numunelerin tüm kür sürelerinde daha fazla dayanım elde ettiği gözlemlenmiştir.



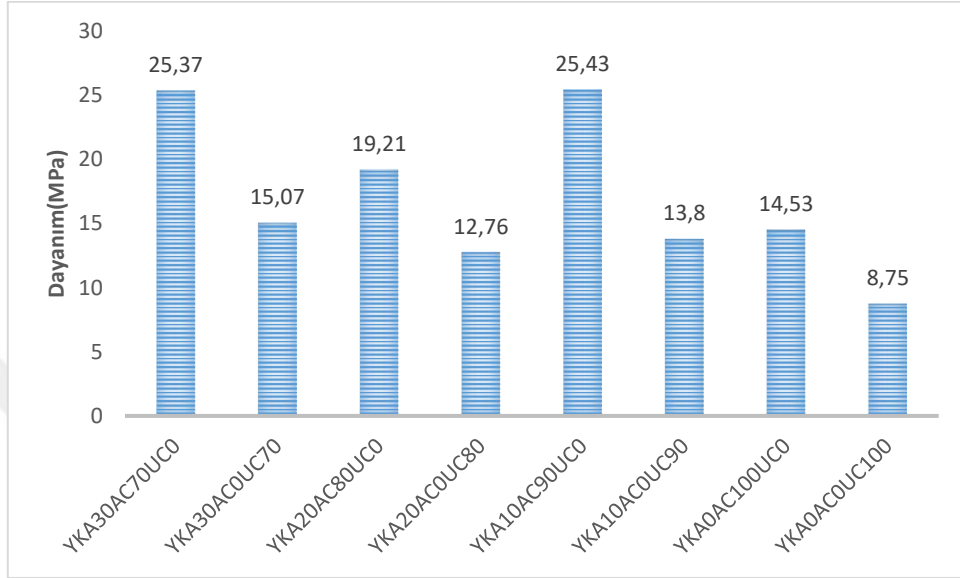
Şekil 28. %80 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı

Şekil 29’da %70 atık cam ve %70 uçucu kül içeren harç numunelerinden elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. En yüksek basınç dayanım değeri YKA30AC70UC0 serisi %70 atık cam içeren 28 günlük harç numunelerinde 31,8 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri YKA30AC0UC70 serisi %70 uçucu kül içeren 3 günlük harç numunelerinde 15,07 Mpa olarak elde edilmiştir. Atık cam içeren numunelerin tüm kür sürelerinde daha fazla dayanım elde ettiği gözlemlenmiştir.



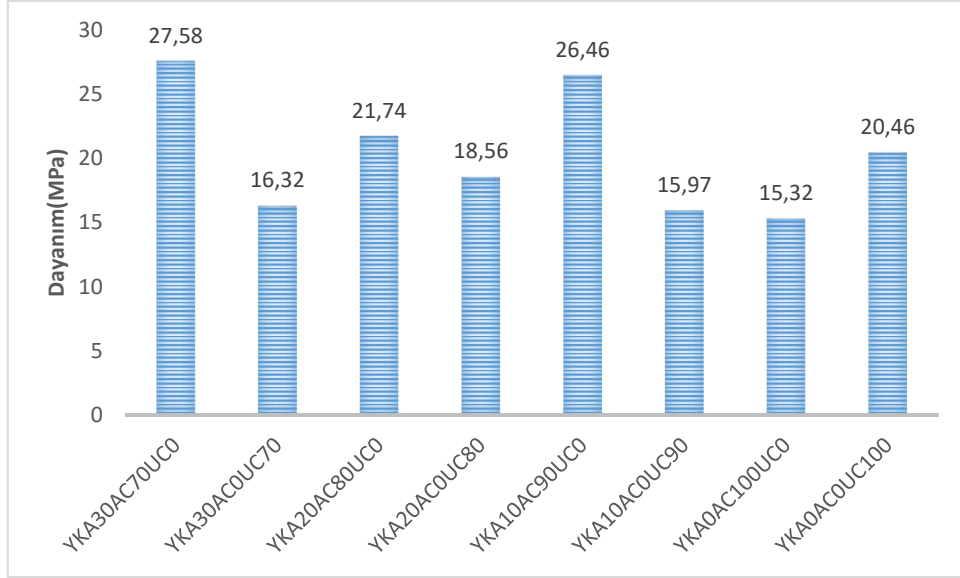
Şekil 29. %70 oranında atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımı

Şekil 26, 27, 28 ve 29 incelendiğinde 28 günlük dayanımların 3 ve 7 günlük dayanımlara göre tüm numunelerde daha yüksek değerlere sahip olduğu sonucuna varılabilmektedir. Ayrıca yüksek basınç dayanımı olan numuneler genel itibari ile atık cam içeren numunelerden elde edildiği görülmektedir.



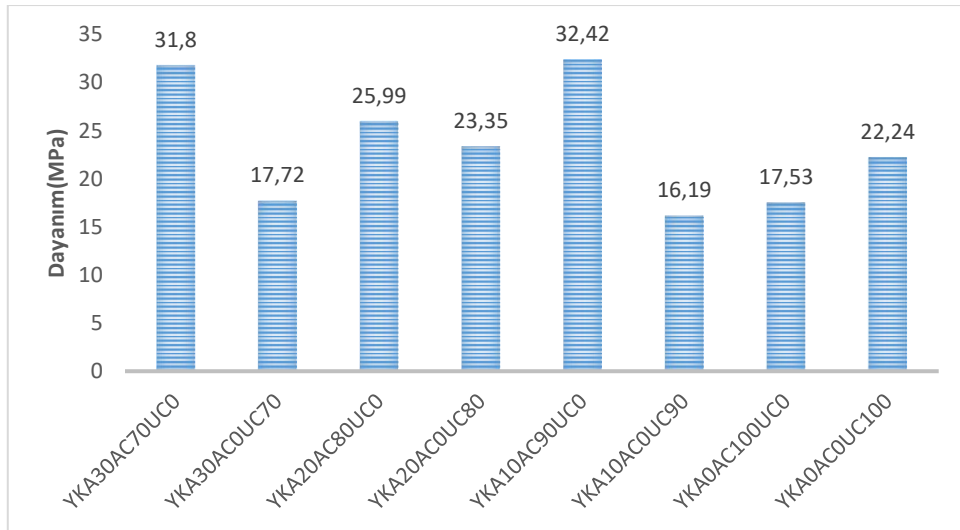
Şekil 30. 3 günlük basınç dayanım değerleri

Şekil 30’da oluşturulan 8 farklı karışıma ait numunelerin 3 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 30 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 25,43 MPa olarak YKA10AC90UC0 serisi numunelerde tespit edilmiştir. En düşük dayanım ise 8,75 MPa olarak YKA0AC0UC100 serisi numunelerde tespit edilmiştir. Numunelerin sahip oldukları basınç dayanımı değerleri sahip oldukları bağlayıcının içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 30’daki basınç dayanımı değerleri incelendiğinde ağırlıkça uçucu kül yerine atık cam içeriği yüksek olan numunelerden elde edilen basınç dayanımlarının daha fazla olduğu görülmüştür. Uçucu kül içeriği yüksek olan numunelerin ise basınç dayanımlarının genel olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 31. 7 günlük basınç dayanım değerleri

Şekil 31’de oluşturulan 8 farklı karışıma ait numunelerin 7 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 31 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 27,58 MPa olarak YKA30AC70UC0 serisi numunelerde tespit edilmiştir. En düşük dayanım ise 15,32 MPa olarak YKA0AC100UC0 serisi numunelerde tespit edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımları numunelerin içerdiği bağlayıcı çeşidine göre değişkenlik göstermektedir. 3 günlük dayanımlara paralel olarak atık cam içeriği fazla olan numunelerin uçucu kül içeriği fazla olan numunelere göre genel olarak daha yüksek dayanım değerleri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 32. 28 günlük basınç dayanım değerleri

Şekil 32’de oluşturulan 8 farklı karışıma ait numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri görülmektedir. Şekil 32 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 32,42 Mpa olarak YKA10AC90UC0 serisi numunelerde tespit edilmiştir. En düşük dayanım ise 16,19 MPa olarak YKA10AC0UC90 serisi numunelerde tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen 28 günlük değerlerin 3 günlük ve 7 günlük değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin geleneksel briketlere kıyasla üstün performans özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde, uçucu kül ve atık camın geopolimer üretiminde etkili bağlayıcı malzemeler olarak kullanılabileceği ve bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirliği artırdığı belirtilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında birçok yönden benzerlik ve tutarlılık göstermektedir.

Bu çalışmada %100 uçucu kül içeren briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 22,24 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise 8,75 MPa olarak bulunmuştur. Bu bulgular, uçucu külün pozolanik özelliklerinin briketlerin basınç dayanımını artırdığı ve su emme oranlarını azalttığı yönündeki literatürle uyumludur. Habert ve d'Espinose de Lacaille (2001), uçucu külün kimyasal direncini artırdığını ve suya karşı daha dayanıklı yapılar oluşturduğunu belirtmiştir. Kaur ve Siddique (2016), uçucu külün pozolanik özelliklerinin çimento hidratasyon sürecinde kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek daha dayanıklı yapıların oluşmasını sağladığını belirtmişlerdir.

Atık cam kullanılarak üretilen briketlerin performansı incelendiğinde, %90 atık cam içeren briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 32,42 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise 16,19 MPa olarak bulunmuştur. Bu bulgular, atık camın yüksek silika içeriği sayesinde briketlerin dayanımını artırdığı ve su emme oranını azalttığı yönündeki literatürle uyumludur. Provis ve Bernal (2014), atık camın alkali aktivasyon sürecinde reaktif bir bileşen haline gelerek briketlerin dayanıklılığını artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Provis ve van Deventer (2009), atık camın geri dönüştürülmesinin çevresel sürdürülebilirliği artırdığını ve yüksek performanslı yapı malzemeleri üretiminde kullanılabileceğini vurgulamaktadır.

Yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen briketlerin performansı incelendiğinde, %70 atık cam içeren briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 31,8 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise 15,07 MPa olarak bulunmuştur. Bu bulgular, yanmış kömür atıklarının briketlerin mekanik dayanımını artırdığı, ancak su emme kapasitesini biraz daha yüksek tuttuğu yönündeki literatürle uyumludur. Ahmaruzzaman (2010), yanmış kömür atıklarının briket üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini ve bu atıkların yüksek karbon içeriği nedeniyle briketlerin ısıl değerini artırabileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları bir araya getirilerek kombinasyon briketleri üretilmiştir. %90 atık cam içeren briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 32,42 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise 16,19 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuç, farklı malzemelerin sinerjik etkisinin, briketlerin performansını optimize edebileceğini göstermektedir. Literatürde, Duxson ve diğerleri (2007), farklı atık malzemelerin kombinasyonlarının geopolimer briketlerin dayanım ve durabilite özelliklerini artırabileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada araştırılan temel sorular ve hipotezler, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin mekanik ve fiziksel performanslarının değerlendirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Araştırmanın amacı, bu malzemelerin briket üretiminde etkili bağlayıcılar olup olmadığını ve geleneksel briketlere kıyasla üstün performans özellikleri sağlayıp sağlamadığını belirlemektir.

Çalışmanın ana hipotezi, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin, geleneksel briketlere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük su emme oranı göstereceğidir. Bu hipotez, literatürdeki bulgularla desteklenmektedir. Habert ve d'Espinose de Lacaillerie (2001) uçucu külün kimyasal direncini artırarak daha dayanıklı yapılar oluşturduğunu belirtirken, Provis ve Bernal (2014) ve Provis ve van Deventer (2009) atık camın reaktif bir bileşen olarak briketlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, Ahmaruzzaman (2010) yanmış kömür atıklarının mekanik dayanımı artırabileceğini ancak su emme kapasitesini de artırabileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, bu hipotezle uyumludur. Uçucu kül kullanılarak üretilen briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 22,24 MPa olarak elde edilmiş ve en düşük basınç dayanımı 8,75 MPa olarak bulunmuştur. Bu,

literatürdeki uçucu külün pozolanik reaksiyonlar sayesinde dayanımı artırdığı ve su emme kapasitesini azalttığı bulgularıyla uyumludur. Atık cam kullanılarak üretilen briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 32,42 MPa, en düşük basınç dayanımı ise 16,19 MPa olarak bulunmuştur. Bu, literatürdeki atık camın yüksek silika içeriği sayesinde mekanik dayanımı artırdığı ve su emme oranını azalttığı bulgularıyla uyumludur.

Yanmış kömür kullanılarak üretilen briketlerin performansı da hipotezi desteklemektedir. Bu malzemeler kullanılarak üretilen briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 31,8 MPa, en düşük basınç dayanımı ise 15,07 MPa olarak bulunmuştur. Bu bulgular, yanmış kömür atıklarının mekanik dayanımı artırabileceği ancak su emme kapasitesini de artırabileceği yönündeki literatürle uyumludur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin performansını ortaya koymaktadır. Ancak, çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır ve bu sınırlılıklar, bulguların genellenebilirliği ve uygulanabilirliği üzerinde etkili olabilir.

İlk olarak, kullanılan uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıklarının kimyasal bileşimi, bu çalışmada kullanılan spesifik örneklerle sınırlıdır. Farklı kaynaklardan elde edilen uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları, farklı kimyasal bileşimlere sahip olabilir ve bu da briketlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, bu çalışmanın bulguları, kullanılan malzemelerin spesifik özellikleriyle sınırlıdır ve farklı malzemeler kullanıldığında sonuçlar değişebilir.

İkinci olarak, çalışmanın laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olması, briketlerin gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceği konusunda bazı belirsizlikler yaratabilir. Laboratuvar ortamında kontrollü koşullar altında yapılan testler, briketlerin ideal koşullar altında nasıl performans göstereceğini ortaya koyar. Ancak, inşaat sahasında karşılaşılan değişken çevresel koşullar, nem, sıcaklık dalgalanmaları ve mekanik yüklemeler gibi faktörler, briketlerin performansını etkileyebilir.

Üçüncü olarak, bu çalışmada kullanılan briketlerin üretim süreci ve koşulları, endüstriyel üretim süreçleriyle birebir örtüşmeyebilir. Laboratuvar ortamında üretilen briketler, endüstriyel ölçekte üretildiğinde farklı özellikler gösterebilir. Üretim sürecindeki farklılıklar, briketlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyebilir.

Bu çalışmada yalnızca belirli oranlarda uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılmıştır. Farklı karışım oranları, briketlerin performansını farklı şekillerde etkileyebilir. Bu nedenle, bu çalışmanın bulguları, kullanılan spesifik karışım oranlarıyla sınırlıdır.

3.2. Sonuçlar

Bu araştırmada, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin mekanik ve fiziksel performans özellikleri değerlendirilmiştir. Araştırmanın ana bulguları ve sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Uçucu kül kullanılarak üretilen briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 22,24 MPa, en düşük basınç dayanımı ise 8,75 MPa olarak bulunmuştur. Bu, uçucu külün pozolanik özelliklerinin briketlerin mekanik dayanımını artırdığı ve su emme oranlarını azalttığı sonucunu göstermektedir.
2. Atık cam kullanılarak üretilen briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 32,42 MPa, en düşük basınç dayanımı ise 16,19 MPa olarak tespit edilmiştir. Atık camın yüksek silika içeriği, briketlerin dayanımını artırmakta ve suya karşı direnç sağlamaktadır.
3. Yanmış kömür kullanılarak üretilen briketlerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 31,8 MPa, en düşük basınç dayanımı ise 15,07 MPa olarak belirlenmiştir. Yanmış kömür atıkları, briketlerin mekanik dayanımını artırmakla birlikte, su emme oranlarını da artırmaktadır.
4. Kombinasyon briketlerinin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 32,42 MPa, en düşük basınç dayanımı ise 16,19 MPa olarak bulunmuştur. Kombinasyon briketleri, en yüksek dayanım ve en düşük su emme oranı ile en iyi performans göstermektedir. Bu, farklı atık malzemelerin sinerjik etkisinin, briketlerin performansını optimize edebileceğini göstermektedir.
5. Uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları kullanılarak üretilen geopolimer briketlerin, geleneksel briketlere kıyasla üstün performans özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Bu malzemelerin kullanımı, yüksek basınç dayanımı ve düşük su emme oranı gibi avantajlar sunarak, inşaat sektöründe sürdürülebilir ve çevre dostu yapı malzemeleri olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

6. Uçucu külün pozolanik özellikleri, briketlerin mekanik dayanımını artırırken, su emme oranlarını azaltmaktadır. Atık camın yüksek silika içeriği, briketlerin dayanımını artırmakta ve suya karşı direnç sağlamaktadır. Yanmış kömür atıkları ise mekanik dayanımı artırmakla birlikte, su emme oranlarını da artırmaktadır.
7. Kombinasyon briketleri, en iyi performans özelliklerini göstererek, yapı malzemesi olarak geniş bir uygulama alanı bulabileceğini göstermektedir. Bu malzemelerin kombinasyonu, briketlerin performansını optimize etmekte ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.
8. Bu çalışmanın bulguları, uçucu kül, atık cam ve yanmış kömür atıkları gibi atık malzemelerin inşaat sektöründe değerlendirilebileceğini ve bu sayede hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu malzemelerin kullanımı, doğal kaynakların korunmasına, atık yönetimi sorunlarının azaltılmasına ve inşaat sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunabilir.

KAYNAKÇA

- Ahmaruzzaman, M., 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), pp. 327-363.
- Bakharev, T., 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1224-1232.
- Buchwald, A., 2018. The effect of blast furnace slag and fly ash addition on the strength and microstructure of geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 187, pp. 218-225.
- Cakmak, T., Ustabas, I., Kurt, Z., & Yilmaz, E., 2024. Geopolymer mortars having glassy materials considering mechanical and microstructural features. *Journal of Building Engineering*, 91, p. 109738., <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109738>.
- Choo, H., Lim, S., Cho, H., & Choi, Y., 2016. Compressive strength of one-part alkali activated fly ash using red mud as alkali supplier. *Construction and Building Materials*, 125, pp. 21-28.
- Choeycharoen, P., Sornlar, W., & Wannagon, A., 2022. Sustainable bottom ash-based alkali-activated materials and geopolymers synthesized by using activator solutions from industrial wastes. *Journal of Building Engineering*, 54, p. 104659.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), pp. 1633-1656.
- De Larrard, F., & Sedran, T., 1994. Optimization of ultra-high-performance concrete by packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), pp. 997-1009.
- Diamond, S., 1989. ASR—Another look at mechanisms. *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, pp. 1-10.
- Dias, W. P. S., de Brito, J., & Kurda, R., 2018. Social and economic impacts of using construction and demolition waste in the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 1449-1458.
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., & Ren, D., 2017. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle. *Materials Science and Engineering: A*, 684, pp. 225-233.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), pp. 2917-2933.

- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A., 2005. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. *Microporous and Mesoporous Materials*, 86(1-3), pp. 207-214.
- Ghaffar, S. H., Karim, M. R., Munir, K. S., & Kharseh, M., 2019. A review on the properties and applications of geopolymer concrete in construction. *Construction and Building Materials*, 206, pp. 60-80.
- Grattan-Bellew, P. E., 2003. The alkali-silica reaction: An overview of the problem. *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, pp. 3-14.
- Habert, G., & d'Espinose de Lacaillerie, J. B., 2001. Durability of fly ash concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 144(1), pp. 31-39.
- Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., & Roussel, N., 2020. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), pp. 1229-1238.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V., 2005. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Research Report GC 1*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Helmuth, R., & Stark, D., 1992. Alkali-aggregate reactions in concrete. In P. K. Mehta & P. J. M. Monteiro (Eds.), *Concrete: microstructure, properties, and materials*, pp. 547-585. McGraw-Hill.
- Hosseini, P., Allahverdi, A., & Bahadori, A., 2016. Mechanical properties and durability of concrete incorporating recycled glass powder and waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 114, pp. 840-851.
- Hwang, C. L., & Huynh, T. P., 2015. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1-9.
- Kaur, A., & Siddique, R., 2016. Utilization of fly ash in brick manufacturing: A review. *Construction and Building Materials*, 111, pp. 542-551.
- Kuenzel, C., Nottenkämper, R., & Hasse, H., 2010. Coal bottom ash as secondary aggregate for concrete blocks: Influence of carbon content and particle size. *Fuel*, 89(12), pp. 3809-3816.
- Kumar, S., Siddique, R., & Kumar, A., 2017. Potential of bottom ash and fly ash geopolymer mortar for repair applications. *Construction and Building Materials*, 146, pp. 235-243.
- Kumar, S., & Siddique, R., 2018. A review on geopolymer concrete: Its properties, applications and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 182, pp. 801-824.

- Kurt, Z., Yilmaz, Y., Cakmak, T., & Ustabaş, I., 2023. A novel framework for strength prediction of geopolymer mortar: Renovative precursor effect. *Journal of Building Engineering*, 76, p. 107041. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107041>
- Kwan, A. K. H., & Wong, H. H. C., 2009. Effects of coarse aggregate shape on the strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), pp. 2528-2536.
- Ling, T. C., & Poon, C. S., 2013. Use of recycled glass as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 45, pp. 120-127.
- Mabroum, S. B., El Hassan, H., Fares, H., & Chikouche, M., 2020. The influence of fly ash properties on the performance of geopolymer binders: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(4), p. e13375.
- Mahdi Rafieizonooz, Elnaz Khankhaje, & Shahabaldin Rezaei, 2022. Assessment of environmental and chemical properties of coal ashes including fly ash and bottom ash, and coal ash concrete. *Journal of Building Engineering*, 49, p. 104040.
- Marceau, M. L., Nisbet, M., & Van Geem, M. G., 2006. Life cycle inventory of portland cement concrete in North America. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), pp. 118-131.
- Mehta, P. K., 1986. *Concrete: Structure, properties, and materials*. Prentice-Hall.
- Pandey, V., Singh, R. R., Singh, D., & Siddique, R., 2017. A review on the sustainable utilization of coal fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, pp. 61-78.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J., 2009. *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A., 2014. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, pp. 299-327.
- Rajabipour, F., Giannini, T., & Dunstan, M., 2009. The effect of recycled glass on alkali-silica reaction expansion of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), pp. 136-140.
- Shayan, A., & Xu, A., 2004. Value-added utilization of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), pp. 883-890.
- Siddique, R., 2011. Properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), pp. 1004-1010.
- Singh, M., Siddique, S., & Siddique, R., 2005. Waste glass as coarse aggregate in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(4), pp. 299-312.

- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Phoo-ngernkham, T., & Chindaprasirt, P., 2015. Strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 77, pp. 45-50.
- Taha, B., & Nounu, G., 2008. Use of waste glass as sand in concrete mixture. *Building and Environment*, 43(9), pp. 1486-1494.
- Taylor, H. F. W., 1997. *Cement chemistry*. 2nd ed. Thomas Telford.
- Thomas, M. D. A., Fournier, B., & Folliard, K. J., 2011. Alkali-silica reaction and the role of calcium hydroxide. *Cement and Concrete Research*, 41(12), pp. 1281-1289.
- Tukker, A., & Tischner, U., 2006. *New business for old Europe: Product-service development, competitiveness and sustainability*. Greenleaf Publishing.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Brice, D. G., 2020. Chemical research and climate change as drivers of geopolymer development. *Chemical Reviews*, 120(20), pp. 11333-11374.
- Wong, H. H. C., & Kwan, A. K. H., 2008. Packing density of cementitious composites containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 22(6), pp. 1049-1056.