



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.04.2022
Kabul Tarihi : 05.10.2022

Received Date : 28.04.2022
Accepted Date : 05.10.2022

GEOTEKNİK UYGULAMALARDA GEOPOLİMERLERİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ: LİTERATÜR ÇALIŞMASI

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF GEOPOLYMERS IN GEOTECHNICAL APPLICATIONS: A REVIEW

Muhammet ÇINAR*¹ (ORCID: 0000-0001-5475-7787)
Büşra ERBAŞI¹ (ORCID: 0000-0003-2939-9548)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammet ÇINAR, muhammetcinar@ksu.edu.tr

ÖZET

Küresel ısınma ve iklim değişikliği Dünya'nın en önemli ve hızla çözülmesi gereken problemlerinden biridir. Çimento üretimi ile ortaya çıkan CO₂ gazı ve nitrik oksitler küresel ısınma ve asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Bu derleme makalede bu çevresel sorunları azaltabilmek için geleneksel yöntem olarak kullanılan çimentolu beton yerine geopolimerlerin zemin iyileştirme yöntemlerinde (jet grout, derin karıştırma, fore kazık, plastik kazık) kullanılması incelenmiştir. Geopolimerler, alüminasilikat oranı yüksek atık veya doğal malzemelerin alkalın aktivatörler ile bağlayıcılık kazanmaktadır. Farklı kür koşullarında elde edilebilen geopolimer beton, çimentolu betona göre daha az su kullanımı ve CO₂ emisyonunu artırmaması açısından çevresel anlamda sürdürülebilirdir. Geopolimer betonlarda çimento kullanılmayıp atıklar değerlendirildiğinden maliyet avantajı sağlanmış ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Alüminasilikat oranı yüksek atık veya doğal malzemelerin kullanımıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Alkalın aktivatörlerin derişimi ve Si/Al oranı jelleşme için gereken yeterli silikat ve alüminat çeşitliliğini sağlamaktadır. Doğru oranda toz ya da sıvı olarak karışıma katılan aktivatörlerle geopolimer beton çimentolu betona göre kısa zamanda yeterli dayanımı kazanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alkalın aktivatör, atık malzemeler, geopolimer, zemin iyileştirmesi

ABSTRACT

Global warming and climate change is one of the world's most important and rapidly resolved problems. CO₂ gas and nitric oxides produced by cement production cause global warming and acid rain. In this review article, the use of geopolymers instead of cement concrete as a traditional method in soil improvement methods (jet grout, deep mixing, piles) was examined in order to reduce these environmental problems. Geopolymers gain binding waste or natural materials with high aluminosilicate content with alkaline activators. Geopolymer concrete, which can be obtained in different curing conditions, is environmentally sustainable in terms of using less water and not increasing CO₂ emissions compared to cementitious concrete. Since cement is not used in geopolymer concretes and wastes are evaluated, it provides cost benefits and its use has become widespread. Studies are carried out on the use of waste or natural materials with a high aluminosilicate content. The concentration of alkaline activators and the Si/Al ratio provide sufficient silicate and aluminate diversity for gelation. With the activators added to the mixture as powder or liquid in the right ratio, geopolymer concrete gains sufficient strength in a short time compared to cement concrete.

Keywords: Alkaline activator, waste materials, geopolymer, soil improvement

GİRİŞ

Sanayi sektörünün gelişimi ile kontrolsüz artan gaz salınımı ve atık depolaması başlamıştır. Avrupa Çevre Ajansı'nın Aralık 2021'de yayınladığı rapora göre 2.5 mikrometrenin altında ince partiküllü maddeler sebebiyle Avrupa'da her yıl 307.000 kişinin hayatını kaybettiği ve bu kayıpların %58'inin engellenebileceği bildirilmiştir. (European Environment Agency, 2021). Çevre kirliliği, hava kirliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliğini engellemek ve sürdürülebilir çevre oluşturmak için her yıl onlarca çalışma yapılmaktadır. Hem sanayileşme hem de nüfus yoğunluğunun artışı ve dolayısıyla kentleşmenin artmasıyla kentlerde taşıma gücü yetersiz zeminlerde yapılaşma başlamıştır. Artan kentleşme ile birlikte çimento ihtiyacı da artmıştır. Çimento üretimi ile salınan CO₂ gazı iklim değişikliği, küresel ısınma gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri ile hemen her türlü zemin iyileştirilerek bina yapımına uygun hale getirilebilmektedir. Bu iyileştirme yöntemleri arasında derin karıştırma, enjeksiyon (çatlatma grout, permeasyon grout, kompaksiyon grout, jet grout), kompaksiyon, kazık sistemleri (taş kolon, fore kazık, plastik kazık), konsolidasyon işlemleri, drenaj sistemleri vs. sayılabilir. Zemin iyileştirmelerinde seçilen yönteme bağlı olarak çimento kullanımı çok yaygındır. Zeminin taşıma gücüne göre değişen hacimlerde çimentolu beton zemin içerisine enjekte edilerek güçlendirme sağlanmaktadır. Çimentoya alternatif olarak alümina silikat oranı yüksek olan atık (yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, taban külü vb.) ya da doğal (volkanik kül, kil vb.) mikro parçacıkların alkalın aktivatörler (NaOH, Na₂SiO₃ vb.) ile bağlayıcılık özelliği kazanan geopolimerler de son yıllarda yoğun araştırma konusu olmuştur. Geopolimer üretimi hem atık malzemenin değerlendirilmesi hem de çimentoya alternatif kaynak malzemenin elde edilmesi sırasında geleneksel betona göre 6 kat daha az CO₂ salınımına neden olmasıyla sera gazı etkisi açısından önemlidir (Davidovits, 1991). Geopolimer uygulamalarda daha çok sanayi atıkları değerlendirildiğinden maliyette %30 ve sera gazı emisyonlarının salınımında da %80'e varan azalma sağlanmaktadır ve bunun sonucunda daha iyi mekanik ve kimyasal mukavemet meydana gelmektedir (Zhang et al., 2013). Alhawat et al. (2022) hazırladığı derlemede geopolimerlerin çimentolu betonlara kıyasla CO₂ salınımını %44 ila %64 arasında azaltılabileceği, ancak malzeme temini için nakliye mesafesinin bu oranı düşürebileceği belirtmiştir. Bir başka çalışmada ise geopolimer kullanımı ile küresel ısınmanın olumsuz etkilerinin %73 oranla azaltılabileceği belirtilmiştir (Mahmoodi et al., 2021).

Bu makalede çimento yerine kullanılan geopolimerin fiziksel, mekanik ve reolojik yapısı üzerindeki iyileştirici etkileri hakkında yapılmış olan geçmiş çalışmalar araştırılarak derlenmiştir. Çalışma sonucunda literatürde yer almış ve çimento yerine kullanılan geopolimer karışımların geoteknik uygulamalarda ve zemin iyileştirilmesinde sağladığı olumlu etkiler konusunda araştırmacılara farklı bir bakış açısı oluşturulması hedeflenmiştir.

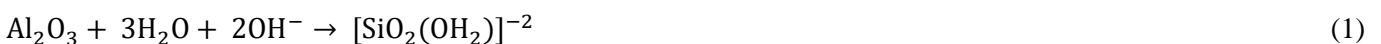
Geopolimerin Kimyasal Yapısı, Özellikleri ve Kullanım Amacı

Geopolimerizasyon, SiO₂ ve Al₂O₃ bakımından zengin inorganik malzemelerin yüksek alkali bir ortamda moleküllerin çözünmesi, taşınması, yönlendirilmesi ve polikondenzasyonunu içeren ve 3 boyutlu alüminosilikat ağlarının oluştuğu ekzotermik kimyasal bir işlemdir (De Silva, 2007). Geopolimerler, ilk olarak 1972'de J. Davidovits tarafından önerilen çimento kullanımına alternatif olarak alkali veya asidik ortam koşullarında çeşitli alüminosilikat kaynaklarından sentezlenebilen inorganik polimerik malzemelerdir (Davidovits et al., 1991). Geopolimerler; hızlı sertleşme, yüksek erken dayanım, kimyasal saldırı altında kararlılık, yüksek sıcaklık direnci ve düşük geçirgenlik gibi özelliklere sahiptir (Abed et al., 2022). Dahası zemin iyileştirmede etkin bir şekilde kullanılacakları, katı parçacıklara mükemmel yapışma ve düşük büzülme potansiyeli sergilerler (Çanakçı et al., 2019). Geopolimerlerin bu üstün özellikleri sayesinde yapı sektöründe sürdürülebilir çalışmalar yapılmakta olup bu derlemede geoteknik ve zemin iyileştirme uygulamalarında geopolimerlerin performansı irdelenecektir. Geopolimerler iki şekilde sınıflandırılabilir; ana malzemenin kökenine göre ya da polimerik zincirin temel birimlerine göre. Tablo 1'de polimerik zincirlerin üç tipik sınıfı görülmektedir.

Tablo 1. Tipik Geopolimer Yapıları

Geopolimer	Yapı
Poli(sialat) Si : Al = 1	(-Si -O- Al -O-)
Poli(sialat - siloxo) Si : Al = 2	(-Si -O- Al -O- Si -O-)
Poli(sialat - disiloxo) Si : Al = 3	(-Si -O- Al -O- Si -O- Si -O-)

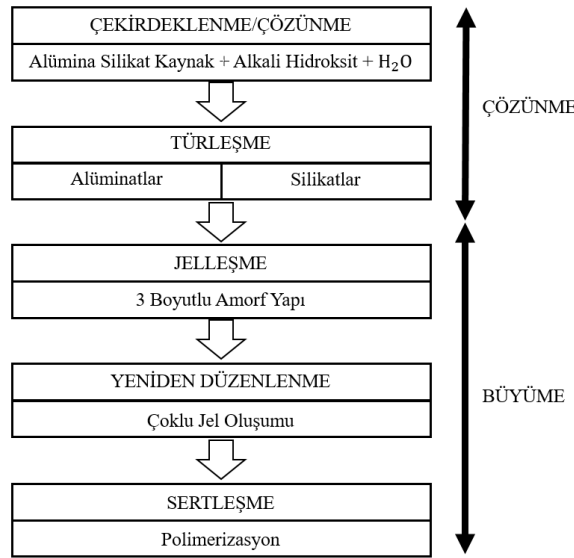
Bir geopolimerin oluşumunda gerçekleşen kimyasal mekanizma incelendiğinde bir alkali hidroksit (KOH, NaOH vb.) alümina silikat bileşiği ile bulunduğu alüminyum-silikon hidrolizi ve çözünme ile sonuçlandığı görülmektedir (Denklem 1 ve 2).





Geopolimerler, alümina silikat oranı yüksek maddelerin alkalin aktivatörlerle birleşimi sonucu bağlayıcı özellik kazanması ile oluşurlar. Literatürde metakaolin, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, taban külü gibi birçok puzolanik malzeme ile geopolimer üretimi yapılmaktadır. Üretilen geopolimerlerin basınç ve eğilme dayanımı başta olmak üzere Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X Işını Difraksiyonu (XRD), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri ile mikro yapısı incelenerek farklı kür koşullarında dayanıklılığı tespit edilebilmektedir.

Geopolimerin oluşum sırası incelendiğinde, kaynak malzemelerde bulunan alümina ilk önce alkalin aktivatörleri tarafından alüminosilikat olarak bilinen bir jel oluşturmak için indüklenir. Alkali alüminosilikat reaksiyonunun 3 boyutlu amorf yapısını, yeniden düzenlenen jelin oluşumu takip eder. Sertleşme sürecine girildiğinde ise alkali çözeltinin bileşimi, malzeme kombinasyonu gibi karışım etkenleri kadar kür sıcaklığının etkisi de en önemli faktörlerden birisidir. Kür sıcaklığı arttıkça betonun priz süresi kısalır (Abdulkareem et al., 2014). Kür sıcaklığının artışı ile polimerizasyonun hızlandığı ve betonun 3-4 saatlik kürlenme süresinde mukavemetinin %70'ini kazandığı görülmüştür (Duan et al., 2017a). Sertleşmeden önce çoğu durumda, partikül yüzeylerinde bulunan sadece küçük miktarlarda silika ve alüminanın, karışımın bütününe katılması için reaksiyona dahil olması gereklidir. Bu nedenle, tamamı çözünmemiş atık partikülün nihai geopolimerik yapıya bağlanmasından yüzey reaksiyonunun sorumlu olduğu düşünülmektedir (Görhan, 2020). Şekil 1'de geopolimerlerin oluşumu bir diyagram halinde verilmiştir.



Şekil 1. Geopolimer Oluşum Akış Diyagramı

GEOPOLİMER UYGULAMALARI

Bağlayıcı Malzemeler

Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler genellikle uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, taban külü, piriç kabuğu külü, metakaolin gibi alüminosilikat oranı yüksek malzemelerdir.

Metakaolin, yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren puzolanik etkisi yüksek bir malzemedir. Saflaştırılmış kaolin kilinin yaklaşık olarak 650–800 °C arasındaki sıcaklıklarda kalsine edilmesi sonucunda elde edilen beyaz renkli yapay puzolanik bir üründür. Bu kalsinasyon işlemi sonucunda, metakaolinin bünyesindeki alümin ve silisin kristal yapılarında bozulma olur. Metakaolin, yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf yapıya gelir (Yazıcı vd., 2010).

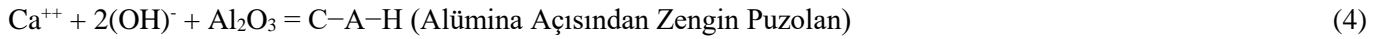
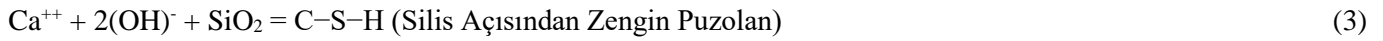
Yüksek fırın cürufuna bakıldığında hidrasyonun yavaş olduğu görülmektedir. Erken dayanımı düşük ancak ilerleyen dönemlerde iyi dayanım sağlayabilen bu bağlayıcı yavaş reaksiyonundan dolayı yoğun bir mikro yapı üreterek kimyasal etkilere karşı direnç sağlar. Reaksiyon sırasında C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jeller oluşur, bu da beton içerisindeki boşlukları doldurarak gözeneklerin azaltılmasını ve basınç dayanımının artmasını sağlar.

Nanosilika da geopolimer beton hazırlanmasında yaygın kullanılan malzemelerden biridir. İçeriğindeki silikon dioksit (SiO_2) ile beton karışımının yoğunlaşmasını sağlayarak mukavemet ve dayanıklılığı artırır (Nawaz et al., 2020).

Uçucu kül, içerdiği SiO_2 ve Al_2O_3 , NaOH ve Na_2SiO_3 ile etkili bir şekilde reaksiyona girebilen amorf fazda kaynak malzemedir. İçerdikleri $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranına göre ASTM C 618 standardında F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılırlar. CaO oranı %10'dan daha az olan F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahipken C sınıfı uçucu küller %10'dan daha fazla CaO içerirler ve puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Ariöz, 2015).

Silis dumanı silikon metal veya ferrosilikon alaşım endüstrisinin yan ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik ark fırınlarında kuartzın silikona indirgenmesi sırasında oluşan, ortalama tane boyutu $0.1 \mu\text{m}$ olan malzeme, torba filtreler aracılığıyla toplanır. Silis dumanı, reaktivitesi yüksek malzemenin suyla olan reaksiyonunun ürünü olan kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tepkimeye girerek C-S-H jeli oluşturur. C-S-H jeli betonda dayanımı sağlayan ve oluşması istenen üründür. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dayanıma katkısı olmayan, suda çözünen ve betonun boşluklu yapısından sorumlu fazdır. Silis dumanı, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi diğer puzolanik malzemelere göre daha hızlı tepkimeye girerek erken dayanım kazandırır (Kanat, 2018).

Aşağıdaki denklemlerde puzolanik reaktivite ile jel oluşumu gösterilmiştir (Denklem 3 ve 4). Alümina açısından zengin malzemenin oluşturduğu jel ile silis açısından zengin malzemenin oluşturduğu jeller farklı olup dayanıma etkileri de farklıdır. Örneğin C-A-H jeller yüksek sıcaklığa karşı direnci artırır.



Alkalin Aktivatör

Geopolimerlerin birçok araştırma ile kanıtlanan avantajlı ve tercih edilebilir özellikleri önemli ölçüde kür süresi ve sıcaklığına, seçilen katı ve sıvı bileşenlerin kimyasal bileşimine, alkalin aktivatörde bulunan katyon türüne ve pH'a bağlıdır. Jelleşme için gereken silikat ve alüminat çeşitliliği aktivatör çözeltisinin derişimi ve Si/Al oranına bağlıdır. Alkali hidroksit derişimi artırıldığında, küçük miktarda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline sahip amorf yapıda geopolimer baskın bir ürün olarak oluşur. Burada C-S-H jelinin geopolimer yapısındaki boşlukları ve gözenekleri doldurduğu düşünülmektedir. Böylece reaksiyona girmemiş parçacıklar ve farklı hidratlar ile boşluklar arasında bir köprü oluşturmakta ve basınç dayanımının artmasını sağlamaktadır. Çözelti içindeki yüksek sodyum oranı, jel oluşumunu desteklemekte, alüminosilikat jel içinde yapıyı belirlemede sodyum baskın bir rol oynamaktadır (Ariöz, 2015).

Aktivasyon çözeltisi içerisindeki Na-Al-Si bileşimleri ve oranları dayanım ve dayanıklılığı etkilemektedir. Sodyum kullanıldığında ana ürün olarak 3 boyutlu alkali-alüminosilikat-hidrat ($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) oluşmaktadır. Bu jel oluşumu, geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılığını artırmaktadır.

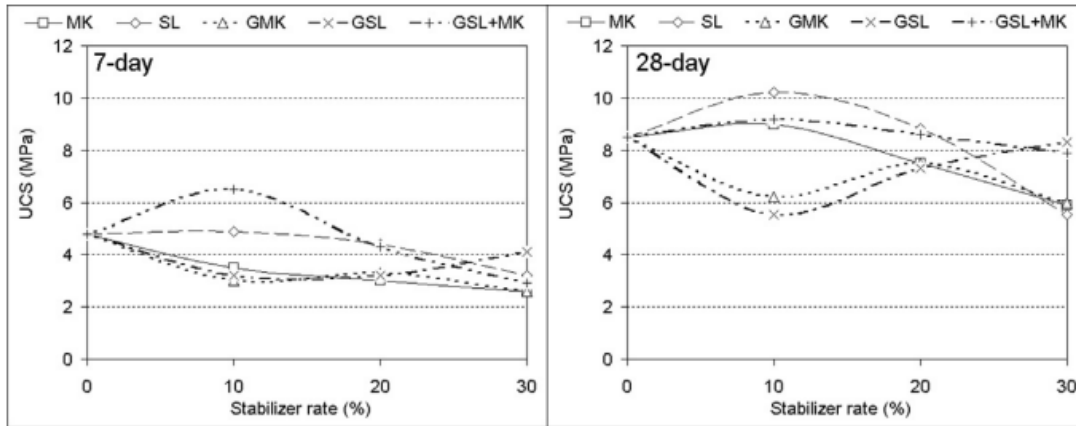
Geopolimer Uygulamaları

Tok (2021), hazırladığı çalışmada dere kumu ve kireç taşı tozu ile bağlayıcı madde olarak cüruf ve bentonit kullanarak geopolimer üretmiş ve ısıl kür uygulamıştır. Agrega tipinin numunenin özellikle yüksek sıcaklıktaki dayanımında önemli olduğu belirtilmiştir. Kireç taşı mukavemet özelliklerini %50 oranında iyileştirmiştir. Yapılan deney sonucu 600°C 'den sonra mukavemet özelliklerinde geopolimer matrisin serbest su buharlaşması ve dehidrasyonu nedeniyle dikkate değer bir azalma olmuştur. Gözenekli yapıların büyümesi ve çatlakların yayılması nedeniyle basınç dayanımına göre eğilme dayanımında önemli bir azalma olmuştur. Üretilen numuneler, çok kompakt geopolimerik matrisleri nedeniyle donma-çözülmenin etkilerine karşı yüksek bir direnç göstermiştir. Donma-çözülme testi etkisi eğilme mukavemeti üzerinde daha etkili olmuştur, çünkü mikro çatlakların yönü, eğilme mukavemetinin yüküne dik iken basınç yüküne paraleldir.

Alnuaimi (2019), deneysel çalışmasında jet grout ve derin karıştırma yöntemlerinde kullanılmak üzere ana materyal olarak kireç taşı tozu ve taban külü, alkalin aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmıştır. $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ oranı 2.5 olup alkali aktivatör/ham madde oranı kuru ağırlıkça 0.35 olarak belirlenmiştir. 0.75 ve 1.50 arasında değişen s/b oranı ve ağırlıkça %0-%100 arasında değişen çimento-katkı oranları ile killi zeminlerde

derin karıştırma yöntemi uygulanmıştır. Hazırlanan harçlar tüm s/b oranlarında dilatant özellik göstermiştir. Deney sonuçlarında kireç taşı tozunun akışkanlığı azalttığı, ince taneli malzemenin akma gerilmesi ve plastik viskoziteyi iyileştirildiği, s/b oranının artışının reolojik özellikleri olumsuz etkilediği görülmüştür. Kireç taşı tozuna göre geopolimerleştirilmiş kireç taşı tozu basınç dayanımında düşüşe sebep olurken, geopolimerleşmiş taban külü tüm harçlar arasında (%100 Portland Çimentosu dahil) en iyi basınç dayanımı sonucunu vermiştir. Bunun nedeni geopolimerize edilmiş taban külünün yapısındaki gözenekliliğin az olması ve çimento ile yüksek reaksiyon derecesi olarak açıklanmıştır. Normal taban külü katkısı (%40'a kadar) ise saf çimento harcından önemsiz sayılabilir derecede düşük basınç dayanımına ulaşmıştır. Kireç taşı tozu katkısı ise saf çimento harcına göre daha düşük basınç dayanımına sebep olmuştur; bu kireç taşı tozunun inceliği, sertleşmiş çimento ile yavaş dayanıma girmesi ve seyreltme etkisi ile açıklanmıştır. Ancak derin karıştırma için tüm katkılı harçların basınç dayanımları yeterlidir.

Güllü ve Agha (2020), çalışmalarında zemin enjeksiyon (grout) yöntemleri için metakaolin ve cüruf ile soğuk bağlanmış geopolimer harç elde etmiş ve taze ve sertleşmiş betonun reolojik özelliklerini incelemiştir. Portland çimentosu, metakaolin, cüruf, soğuk bağlanmış geopolimerize metakaolin, soğuk bağlanmış geopolimerize cüruf ve soğuk bağlanmış geopolimerize metakaolin + cüruf malzemelerin kuru ağırlıkça %0-100 oranlarında değişerek s/b oranı 1 olarak harçlar hazırlanmış, 7 ve 28 günlük dayanımları incelenmiştir. Soğuk bağlanmış geopolimerizasyon; geopolimerize agrega parçacıklarının mukavemetinin artırılması, agrega yapısının yoğunlaştırılması, su emiliminin azaltılması, suya dayanıklı bir malzeme oluşturulması ve puzolanik reaksiyonların hızlandırılması konusunda başarılı olmuştur. Geçmiş çalışmalarda, kompaksiyon işlemi için s/b oranı 0.5-1.5, jet grout için 0.6-2 ve enjeksiyon ve permeasyon enjeksiyon için 1-3 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Yüksek oranda yer değiştirmelerin reolojik testler sırasında akma yeteneğinin iyi olmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile elde edilen basınç dayanımları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Basınç Dayanımları

Al Qaysı (2021), zemin enjeksiyon yöntemleri için hazırladığı çalışmada ağırlıkça belirli oranlarda cüruf, uçucu küllü karıştırılıp (%0, 10, 20, 30, 40 ve 50) karışımların içerisine ağırlıkça %8 süper akışkanlaştırıcı katılarak hazırlanan geopolimer katkılı harçların reolojik özellikleri, basınç dayanımları ve priz alma süreleri incelenmiştir. İki farklı molariteye sahip alkali aktivatör ile (6 M ve 8 M) hazırlanan geopolimer harçların su çimento oranı s/b=1 olarak sabit tutulmuştur. Cüruf ile farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcılar kullanılmıştır. Cürufün viskozitesini azaltan en iyi yüzde olarak %8 elde edilmiş ve yedi günlük basınç dayanımı üzerinde çok az etkisi olmuştur. %10, 20 ve 30 oranlarda cüruf içeren harç karışımları %100 çimento ile en yakın reolojik özellikleri gösterirken uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımında azalmalar görülmüştür.

Aygörmez (2020) tarafından yapılan çalışmada, ana bağlayıcı malzeme olarak metakaolin kullanılarak üretilen geopolimer kolemanit atığı ve silis dumanı ikamesi ile üretilerek dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Geopolimerlerin basınç ve eğilme dayanımları, matrisin dehidrasyonu, yüksek sıcaklık nedeniyle liflerin erimesi ve serbest suyun buharlaşması nedeniyle 600-900 °C aralığında önemli ölçüde azalmıştır. Eğilme dayanımındaki azalma, yüksek sıcaklık etkisi ile basınç dayanımından daha yüksektir. Bunun nedeni, eğilme mukavemetinin, çatlakların yayılması ve yüksek sıcaklıklarda gözenekli yapıların büyümesi gibi iç mikro yapı kusurlarının gelişimine daha duyarlı olması olarak tanımlanmıştır. Silis dumanının %20'ye kadar ve kolemanit atığının %10'a kadar ikamesi

basınç ve eğilme dayanımlarını artırmıştır. Numunelerde 600-900 °C aralığında çatlak oluşumu, 900 °C'den sonra ise renk değişikliği görülmüştür.

Yalghuz (2020) tarafından yapılan çalışmada metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, genleştirilmiş perlit ve ham perlit malzemeleri kullanılarak sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum metasilikat alkali çözeltileriyle geopolimer üretilmiştir. Isıl kürlü ve ısıl kürsüz şekilde üretilen geopolimerlerin dayanımları incelenmiştir. Isıl kür ile üretilen geopolimerlerin dayanımının daha yüksek olduğu görülmüş olup 2'den fazla malzeme karışımlarında bağların zayıflamasıyla dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir. Metakaolinin ince yapısı sayesinde metakaolin ile üretilen geopolimerlerde gözenekliliğin çok düşük olduğu ve dayanımın yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Perlit esaslı geopolimerlerde ise boşluk oranı fazla olduğu için dayanımlar düşük çıkmıştır. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı katkılı geopolimerlerde ise jel oluşumu daha iyi olduğu için dayanımlar yüksektir.

Güllü vd. (2019), hazırladıkları çalışmada zemin enjeksiyon yöntemlerinde (kompaksiyon, çatlatma, permeasyon ve jet) geopolimerin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çimento esaslı grout harcı ile %0 ile %100 oranlarında uçucu kül ve soğuk bağlama yöntemi ile üretilmiş uçucu kül (yani geopolimer agregası) katkılı s/b oranı 0.75-1.00 arasında değişen geopolimer grout harcını kıyaslamıştır. Geopolimer grout harcının elde edilmesi için alkalın aktivatörler (sodyum hidroksit, sodyum silikat) ve öncü alüminosilikat kaynaklar (uçucu kül, silika dumanı) kullanılmıştır. Reometre sonuçlarına göre grout harçlarının çoğunda dilatant davranış görülürken, bir kısmında psödoplastik, bir kısmında da Bingham modeline uygun davranış gözlemlenmiştir. %30 uçucu kül ve %40 geopolimer agregası içeren çimento harcı ile %30 uçucu kül ve %60 silika dumanı içeren geopolimer grout harcı reolojik olarak en yakındır.

Yetim (2021), zemin iyileştirmelerinde nano-silikanın çimento ve geopolimer bazlı groutlar üzerinde etkisini araştırmak üzere deneysel çalışma yapmıştır. Çimento bazlı harçta çimento yerine nanosilika ikame edilmiş, geopolimer harçta ise uçucu kül ve nanosilika kullanılmıştır. Deneysel çalışmadaki grout karışımlarında, reolojik, taze ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Reolojik özellik olarak, kesme gerilimi, viskozite, akma gerilimi ve plastik viskozite değerleri incelenmiştir. Taze ve dayanım özellikleri üzerine yapılan çalışmada s/b oranı sadece 1 olarak alınmıştır. Taze özelliklerde; mini-çökme, Marsh huni viskozite, stabilite ve priz süresi deneyleri kullanılmıştır ve son olarak dayanım özelliklerinde basınç dayanım testi yapılmıştır. Ayrıca, tez çalışmasında, deneysel program olarak s/b oranı 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 ve nano-silika oranı %0, %0.5, %1.00, %1.50, %2.00 ve %2.50 olarak belirlenmiştir. Çimento bazlı grout için çimento ve nano-silika kullanılırken geopolimer bazlı grout için uçucu kül ve nano-silika kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde nano-silikanın çimento ve geopolimer grout karışımları üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, çimento bazlı grout kullanımı yerine alternatif olarak geopolimer bazlı grout kullanımı yapılabileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur.

Mutlu (2021), çalışmasında ısıl kürsüz metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer harçlar üretmiş ve 7-28 günlük dayanımını incelemiştir. Çalışmalar dayanım, dayanıklılık ve iç yapı araştırması olarak 3 aşamada gerçekleşmiş olup alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve potasyum hidroksit kullanılmıştır. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat asit çözeltileri içerisinde bekletilen harçların eğilme dayanımları incelenmiştir. Numunelerde metakaolin katkısı arttıkça ağırlık kaybının azaldığı, basınç ve eğilme dayanımının arttığı, yüksek fırın cürufu katkısı arttıkça dayanımda azalma görülmüştür. Artan yüksek fırın cürufu katkısının dayanımı düşürmesinin nedeni aktivasyon için gerekli kimyasal bileşim oranının yetersiz kalması olarak açıklanmaktadır. Çalışmalar sonucunda ısıl kür uygulanmadan da geopolimer harçların yeterli dayanıma ulaşabildiği görülmüştür.

Tuyan (2017) tarafından yapılan çalışmada, F ve C tipi uçucu küller alkali çözeltiler ile aktive edilerek geopolimer beton üretilmiştir. Karışımlarda alkali aktivatör çözeltileri olarak sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat kullanılmıştır. F tipi uçucu kül ile üretilen ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimer betonunun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre daha yüksek bulunmuştur. C tipi uçucu kül ile üretilen ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimer betonunun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre daha düşük bulunmuştur. Bağlayıcısının %50'si C tipi uçucu kül ve %50'si F tipi uçucu külden oluşan ve ortam sıcaklığında kürlenmiş betonunun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci, benzer dayanıma sahip çimento esaslı betonla karşılaştırıldığında ise daha düşük olduğu görülmüştür. Alkalilerle aktive edilmiş C tipi uçucu külden priz süresinin çok kısa olmasına karşın F tipi uçucu külden priz süresinin çok uzun olduğu görülmüş, pratikte farklı alümina silikat malzemeler ile priz sürelerinin ayarlanabileceği belirtilmiştir. Ek olarak Tuyan bu çalışmada alkalın aktivatörün kimyasal formülünün değişimiyle işlenebilirliğin ve çiçeklenme problemlerinin azaltılabileceğini göstermiştir. Isıl kür ile reaksiyon derecesinin artırılması sayesinde daha yoğun bir iç yapı elde edildiğini belirtmiştir (Tuyan, 2016).

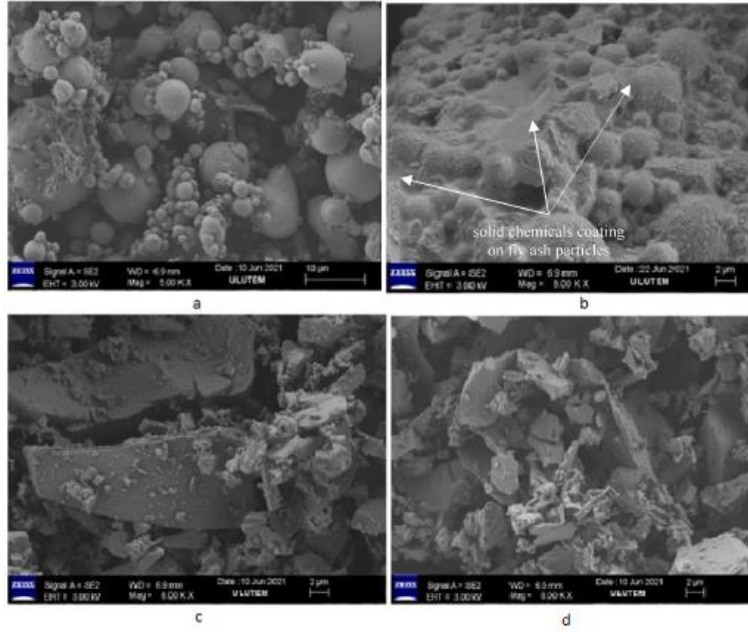
Li vd. (2019) tarafından yapılan araştırmada metakaolin bazlı geopolimerlerin kimyasal deformasyonu araştırılmıştır. Ortam sıcaklığında kürlenmiş geopolimerlerin Portland çimentosu gibi monotonik rötre yapmadığı görülmüştür. Üretilen geopolimerde oluşan kimyasal deformasyonlar sırası ile kimyasal büzülme, kimyasal genişleme ve tekrar kimyasal büzülme olarak üç aşamalı gerçekleşmiştir. İlk aşamada geopolimer harcı, monomerler veya küçük oligomerler oluşturmak için öncünün sürekli çözünmesinden dolayı kimyasal büzülme göstermiştir. İkinci aşamada belirli miktarda nanozeolit içeren Al ürünlerinin oluşumu sırasında kimyasal genişleme yapmıştır. Bu süre zarfında, harçta belirli bir miktar gözenek çözeltisi dışarı atılmıştır. Bu durum geleneksel çimento hidrasyonundan farklı gerçekleşmiştir. Son aşamada, Al ürünleri yeniden düzenlenerek ve silikat oligomerleri ile polimerize edilerek amorf silis jelleri oluşmuştur, bu sırada geopolimer harcı tekrar kimyasal büzülme göstermiştir.

Ekmen ve Mermerdaş (2018) hazırladıkları derlemede geopolimerlerin zamana bağlı deformasyonlarını incelemişlerdir. Araştırma sonucu sıvı/bağlayıcı, sodyum konsantrasyonu, silikat modülü ve camsuyu yüzdesi artışının rötre değerlerinde artışa sebep olurken, kum/bağlayıcı, buhar/otoklav kür, rötre azaltıcı katkı, bağıl nem ve sıcaklık gibi parametrelerin artışının rötreyi azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. Karışımdaki su-çimento oranı, ortamın ısısı, özellikle nemi arttıkça sünme deformasyonunun arttığı bilgisine ulaşılmıştır (Castel et al., 2016; Liu et al., 2015; Lee, 2007; Hardjito et al., 2004). Kalıcı yük uygulandığı anda betonda oluşan gerilmelerin beton basınç dayanımına oranının bir ölçü kabul edilebildiği ve bu oranın 0.4'ten az olması durumunda sünmenin gerilmeyle orantılı olduğu belirtilmiştir. Bu oranın daha fazla olması durumunda sünme deformasyonu gerilmeyle orantılı olmaksızın daha hızlı artmaktadır. Geopolimer malzemelerin şekil değiştirme oranları oldukça kısıtlı iken alkaliler ile aktive edilmiş malzemelerin şekil değiştirme sabitliği pek sağlanamamaktadır. Elde edilen rötre ve sünme değerlerini azaltmak amacıyla yapılan çalışmalarda belli oranlarda başarıya ulaşılmıştır.

Çanakçı vd. (2019), hazırladıkları çalışmada düşük plastisiteli killi zeminlerde F ve C tipi uçucu kül, taban külü, pirinç kabuğu külü, cam tozu, cüruf, silika dumanı, mermer tozu ve metakaolin tabanlı geopolimerler ile derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Hazırlanan bu numuneler Portland çimentosu ile hazırlanan numuneler ile kıyaslanmıştır. Her iki numunede de kür süresinin artışı dayanımda artış sağlamış, ancak geopolimerlerde bu artış Portland çimentosuna göre daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. Bunun sebebi geopolimerlerin dayanım kazanma etkisi karşısında Portland çimentosunun sınırlı dayanım artışı olarak belirtilmiştir. Alkalın aktivatör/ham madde oranı arttıkça ham maddelerin tekil kullanıldığı geopolimerlerde genellikle dayanımın arttığı görülmüştür. F tipi uçucu kül tabanlı geopolimerlerde düşük CaO içeriğinden dolayı yetersiz jel oluşumu görülmüştür. C tipi uçucu kül tabanlı geopolimerlerde ise yüksek CaO içeriğinin hidrasyon sürecini olumlu etkilediği ve dayanımın arttığı belirtilmiştir. Cüruf tabanlı numunelerde ise alkalın oranının artışı dayanımı olumlu etkilemiş, sebebi cürufun yüksek puzolanik aktivitesi ve CaO içeriği dolayısıyla kalsiyum silikat hidrat jeller (C-S-H) oluşturması olarak açıklanmıştır. Cam tozu içeriğindeki düşük alümina ve kalsiyum sebebiyle erken dönemde düşük dayanım gösterirken alkalın oranı ve silika açısından zengin dengeleyici maddenin artışıyla dayanımda artış göstermiştir. Metakaolin ise erken ve geç dayanımda iyi sonuçlar verse de işlenebilirliğin düşük olduğu ve dolayısıyla bazen dayanımın düştüğü bildirilmiştir. Bu bilgiler ile malzemelerin kombinasyonu belirlenmiş ve en yüksek dayanım cüruf ve silika dumanı+cüruf tabanlı geopolimerlerde görülmüştür. Cürufa eklenen pirinç kabuğu külü, taban külü, metakaolin ve silika dumanı dayanımı düşürmüştür. 10-14 M arası konsantrasyona sahip alkalın aktivatörler en iyi basınç dayanımı sonucunu vermiştir. Artan alkali konsantrasyonu (8M-14M) ile mukavemet artışı, daha fazla silika ve alümina atomunun daha fazla konsantrasyonda bir alkalın çözeltisi içinde çözüldüğü gerçeğine bağlanmıştır. 14 M'den fazla konsantrasyonlarda düşüşün sebebi ise viskozitenin artışı ve aşırı hidroksit konsantrasyonundan kaynaklı alüminasilikat çökeltisi olarak açıklanmıştır. Mikro yapı analizlerinde geopolimer harçta (28 günlük) silika yoğunluğu görülürken kalsiyum ve alümina yoğunluğu görülmemiştir. Bütün numunelerde aksel kırılma davranışı gözlemlenmiş, geopolimer ham madde ve alkalın konsantrasyonu ile bağlantılı olmadığı belirtilmiştir.

Abed vd. (2022) çalışmasında geopolimer üretiminde alkalın aktivatörlerin sebep olduğu bazı sorunları ele alarak mekanokimyasal aktive edilmiş geopolimer üretmiştir. Zemin iyileştirmelerinde çok yüksek miktarda beton dökümü gerçekleştiğinden ve bu dökümler sırasında pratikte işlenebilirliğin sağlanamamasından dolayı geopolimerlerin tercih edilmediği ve bunun önüne geçmek için mekanokimyasal aktivasyon önerilmiştir. Ortam kürlenmesi sırasında tek parçalı (one-part) bir geopolimerin reaktivitesini geliştirmek ve geleneksel iki parçalı geopolimerlerle ilişkili zorlukların üstesinden gelmek için bir ikame aktivasyon stratejisi olarak mekanokimyasal arıtma kullanılmıştır. Mekanokimyasal aktivasyon, moleküler yoğun, reaktif ve amorf kümelenmiş kompozit partikülleri gerçekleştirmek için küçük partiküllü katı maddeyi birlikte öğütme veya sarma işlemidir. Mekanik öğütmenin reaktiviteyi yükselttiği, kristalize yapıyı değiştirdiği ve polimerize birim yapısını değiştirdiği hatta ince ya da kalın olarak mekanik öğütülen

malzemelerin farklı birim yapısı sergilediği belirtilmiştir. Farklı cüruf/uçucu kül oranları ve farklı NaOH molariteleri ile 24 farklı mekanokimyasal geopolimer (MG) hazırlanarak geleneksel geopolimer ile karşılaştırılmıştır. SEM analizi sonuçlarına göre mekanokimyasal aktivasyonlu geopolimer tozunun partikül boyutunun küçüldüğünü ve öğütmeden sonra şeklin bir miktar değiştiğini göstermiştir; bu, partiküllerin yüzey alanında bir artış sağlayıp ilave alümina ve silika oluşumuna katkıda bulunarak reaktiviteyi daha da geliştirdiği görülmüştür. Aşağıdaki SEM görüntülerinde uçucu kül, MG uçucu kül, cüruf, MG cürufün mikro yapısı görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. SEM Görselleri (a) Saf Uçucu Kül (b) MG Uçucu Kül (c) Saf Cüruf (d) MG Cüruf

Görhan (2020) araştırmasında metakaolin kalsinasyon sıcaklığının geopolimer harçlarının özelliklerine etkisini incelemiştir. Kaolin kili farklı sıcaklıklarda metakaoline dönüştürülmüş ve ardından bu malzemeler kullanılarak metakaolin esaslı geopolimer harç örnekleri üretilmiştir. Elde edilen bulgulara göre farklı sıcaklıklarda kalsine edilen metakaolin malzemesinin numune özelliklerinde sebep olduğu değişimler incelenmiştir. Kalsinasyon sıcaklığının metakaolin iç yapısında görünür viskoziteyi etkilediği ancak geopolimer harçlarda gözenek yapısında kayda değer değişim yapmadığı görülmüştür. Diğer taraftan kalsinasyon sıcaklığı 700°C iken iç yapı maksimum düzensiz halini aldığı için basınç ve eğilme dayanımlarının maksimuma ulaştığı, 700°C'den fazla sıcaklıklarda düzensiz yapının bozulması ile basınç ve eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür (Elimbi et al., 2011).

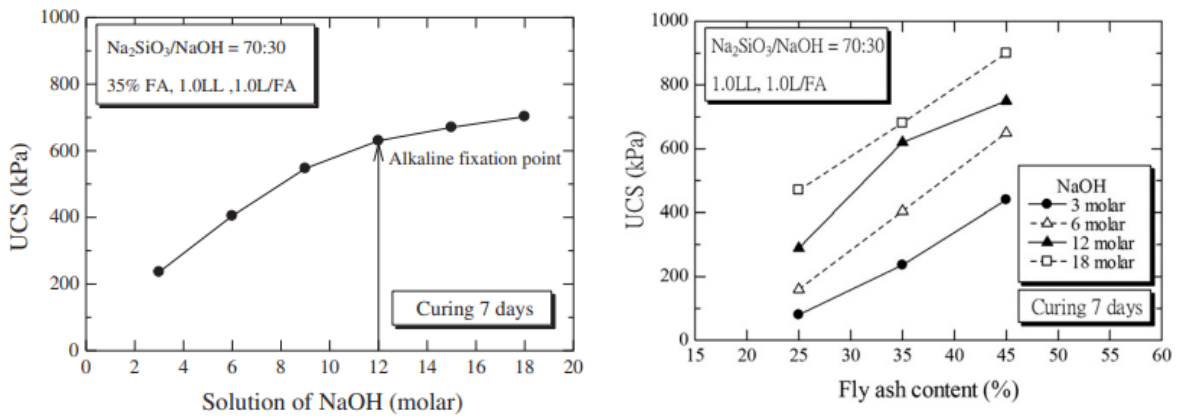
Abdullah ve Ahmad (2017), zeminlerin iyileştirilmesinde F tipi uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimerlerde alkalın aktivatör/uçucu kül oranının dayanıma etkisini araştırmışlardır. 7 günde en yüksek basınç dayanımı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$ ve uçucu kül/alkalın aktivatör oranı 2.5 olduğunda görülmüştür. 28 günlük dayanımda ise 7 günlük en yüksek basınç dayanımı %46 ve en düşük basınç dayanımı ise %48 artış göstermiştir. Kür süresinin artışı dayanımı güçlendirmiştir.

Tigue vd. (2018), uçucu kül ve volkanik külün belli oranlarda karışımı ve alkalın aktivatörün katı olarak kullanılmasıyla tek parçalı (one-part) geopolimer üretmişlerdir. Bu yöntem alkalın aktivatör çözelti olarak kuru halde diğer malzemeler ile karıştırılıp suyun eklenmesi ile geopolimerizasyonun başlaması esasına dayanmaktadır. Yöntemin amacı zemin iyileştirmelerinde ticari uygulanabilirliği artırmak olarak belirtilmiştir. Volkanik kül miktarına göre uçucu kül miktarındaki artışın, basınç dayanımında artış sağladığı, sebebinin uçucu kül parçacıklarının daha ince ve reaktif olabileceği belirtilmiştir. Alkalın aktivatörlerde sodyum hidroksit, sodyum alüminat ve sodyum silikat içeriklerinin değişimine göre dayanımda farklılıklar gözlenmiştir. Uçucu kül tabanlı geopolimerlerde yüksek oranda sodyum hidroksit içeren alkalın aktivatörler ile yüksek dayanım sağlanırken sodyum alüminat oranı yükseldiğinde basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi alümina kaynağının artıp silika oranının azalması olarak açıklanmıştır.

Jindal ve Sharma (2019) hazırladıkları derlemede nano partiküllerin geopolimerlere etkisini araştırmışlardır. Nanosilika, nanotitanyum, nanoalümina, nanokil ve karbon nanotüpler ile yapılan deneylerin derlendiği çalışmada mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin önemli ölçüde geliştiği görülmüştür. Ağırlıkça %2'ye kadar nano-silika ve nano kil içermesi, geopolimerizasyon reaksiyonunun hızını önemli ölçüde artırdığı, sertleşme sürelerini azalttığı ve sertleştirilmiş durum özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Karbon nanotüpler ve nano-TiO₂, ek çekirdeklenme bölgeleri sunarak geopolimerizasyonu geliştirmiştir. Nano-alümina gözenekliliği daha belirgin bir şekilde azaltmış, ancak geopolimerizasyonda daha az etkili olduğu görülmüştür.

Arıöz (2015), uçucu kül ve farklı konsantrasyonlara sahip alkalın aktivatörler (NaOH ve KOH) kullanarak hazırladığı geopolimer harçlara ısıtma işlemi (6-15-24 saat) uygulayarak mikro yapısını incelemiştir. Yüksek sıcaklıklarda uzun süreli kür işlemler sonucu basınç dayanımının azaldığı belirtilmiş, nedeninin yüksek sıcaklıktan ortam sıcaklığına çıkarılan numunelerin yapısında çatlaklar oluşması olarak açıklanmıştır. Alkalın aktivatör konsantrasyonunun artması basınç dayanımını artırmıştır. Konsantrasyonları ve ısıtma işlem sıcaklıkları farklı olan ve 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıtma işlemi gören numunelerin yapıları incelendiğinde, sürenin artması ile numunelerde oluşan jel fazının arttığı ancak yapıda gözeneklerin sayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Isıtma işlem sıcaklığının etkisi incelendiğinde sıcaklığın artması ile geopolimer jeli oluşumunun arttığı görülmüştür. Sıcaklığın artırılması ile yapıda oluşan gözeneklerin sayısı artmıştır. Gözenek oluşumu yüksek sıcaklıkta suyun daha fazla buharlaşmasından kaynaklanmaktadır (Arioz et al., 2020).

Phetchuay vd. (2016), kalsiyum karbür atığı ve uçucu kül kullanarak farklı alkalın aktivatör oranlarında geopolimer beton üretmiş ve stabilize edilmiş killi zeminin mukavemet özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Uçucu külün diğer çalışmalarda olduğu gibi C-S-H ve N-A-S-H jeller sayesinde geopolimerin mekanik özelliklerini geliştirdiği bildirilmiştir. Asetilen gaz fabrikasının bir atığı olan kalsiyum karbür atığı yüksek CaO ve Ca(OH)₂ içeriği sayesinde uçucu kül ile iyi etkileşim yapmaktadır. Uçucu kül içerisindeki SiO₂ ve Al₂O₃ amorf fazdadır ve NaOH ve Na₂SiO₃ ile etkili bir şekilde reaksiyona girebilir. Belirli bir NaOH konsantrasyonu için, daha yüksek uçucu kül içeriği, daha yüksek silika ve alümina oksitini kullanılmasıyla sonuçlanır. Na₂SiO₃/NaOH/uçucu kül oranı arttıkça uçucu külü geopolimerin özelliklerini başta geliştirmiş, ancak optimum değerden fazla olduğunda geopolimerde poliyöğünleşme işleminden önce çok erken aşamada çökme nedeniyle basınç dayanımı azalır. %7-12 arası kalsiyum karbür atığı içeriği basınç dayanımını en iyi artıran oran olmuştur, bu orandan daha yüksek katkı oranında Ca(OH)₂ konsantrasyonunun çözünmesi engellendiğinden basınç dayanımının gelişme hızı azalır. Şekil 4'te NaOH katkısının basınç dayanımına etkisi görülmektedir.



Şekil 4.a. Basınç Dayanımı Üzerinde NaOH Etkisi b. Farklı NaOH Derişimlerinde Uçucu Külün Basınç Dayanımına Etkisi

Rehman vd. (2020), uçucu kül ve %10-%20 cüruf kullanarak geopolimer ve çimentolanmış yapay hafif agrega üretmişlerdir. Yapay hafif agregalar işçilik, maliyet, ölü yük, nakliye sorunları gibi uygulama sorunlarına çözüm olmakla beraber dayanıklılığının artırılması için çimentolama ve geopolimerizasyon yöntemleri uygulanmıştır. 7 günlük kür sonunda geopolimer agreganın çimentolanmış agregaya göre daha hafif olduğu ancak cüruf oranı arttıkça ağırlığın arttığı görülmüştür. Çimentolanmış agregalara göre geopolimer agregaların su emiciliğinin daha yüksek olduğu ve kür süresi arttıkça (28 gün) emiciliğin azaldığı görülmüştür. Cüruf katkılı agregalarının darbe dayanımı daha yüksek olduğu belirtilmiştir, bunun sebebi cüruf katkısının C-S-H jeller üretmesi ve gözenekleri doldurması olarak açıklanmıştır.

Pourakbar vd. (2015), NaOH ve KOH dahil olmak üzere yüksek oranda alkali çözünen maddelerin eklenmesinin, işlenmiş zemin numunelerinin mukavemetini arttırdığını bildirmiştir. Aynı alkali aktivasyonda, KOH aktivatörü kullanılarak işlenen numunelerin, NaOH aktivatörü kullanılarak işlenen harca göre daha yüksek 90 ve 180 günlük basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmaya göre, kür süresi ve harcın su içeriğinin de işlenmiş zemin üzerinde önemli bir güçlendirme etkisi olduğu gösterilmiştir.

Pan vd. (2018) tarafından 300 ve 600°C sıcaklıkta farklı konsantrasyonlarda alkali aktive edilmiş uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun basınç dayanımı ve mikro yapısı incelenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra numunelerin mikro yapısı incelenmiş ve uçucu kül bazlı numunenin, 600°C'de mukavemette bir artış gösterdiği öte yandan, cüruf esaslı numunenin ise özellikle 300°C'lik bir sıcaklıkta en kötü yüksek sıcaklık performansını verdiği görülmüştür. Bağlayıcıların bu zıt davranışının, yüksek sıcaklıklarda çeşitli faz dönüşümlerine yol açan farklı bağlayıcı formülasyonlarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Toz (Na_2SiO_3) aktivatör kullanılarak %100 cürufulla oluşturulan numunenin basınç dayanımı %100 Portland Çimentosu ile benzer basınç dayanımı göstermiştir. Cürufa %50 oranın uçucu kül ikame edildiğinde basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir. Bunun, ortam sıcaklığında uçucu külün düşük çözünmesinin ve reaksiyonunun ve aktivatörün düşük konsantrasyonunun bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Aktivatör içerisindeki Na oranı artırıldıkça cüruf oranı az olmasına rağmen %90 uçucu kül ikame edilmiş numunenin basınç dayanımının iyileştiği gözlenmiştir. Daha yüksek konsantrasyon, uçucu kül parçacıklarının çözünmesinin hızlı olduğu aktivatörün daha yüksek pH değeri ile sonuçlanmıştır.

Sukprasert vd. (2019) temel altı zemin iyileştirme uygulamalarında problemlili siltli kilde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerin kullanımını deneysel olarak incelemişlerdir. Kaynak malzemelerin ikame oranı, NaOH konsantrasyonu ve kür sıcaklığı değiştirilerek üretilen numuneler kıyaslanmıştır. Tüm ikame oranlarında basınç dayanımı artan NaOH konsantrasyonları ile artmıştır. Optimum karışım oranı siltli kil:uçucu kül:yüksek fırın cürufu 70:20:10 olarak bulunmuştur. Yüksek NaOH konsantrasyonu N-A-S-H jeller üreterek geopolimer iç yapısını güçlendirmiş ve bu sayede basınç dayanımı olumlu yönde etkilenmiştir.

Abdila vd. (2021) killi zemin iyileştirmelerinde ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tabanlı geopolimer kullanımını ele almışlardır. Katı:sıvı oranı optimum olarak 1.5 olarak tespit edilmiştir. Katı:sıvı oranı arttıkça işlenebilirlik azalmıştır. İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül killi zemin partikülleri arasındaki boşlukları doldurarak daha kompakt ve stabil bir yapı sağlamış ve sonuç olarak basınç dayanımında artış gözlenmiştir.

Wang vd. (2022) amonyak-soda üretiminden kalan alkali kalıntıları, çelik üretiminden kalan cürufları ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanarak yumuşak deniz killi zeminin iyileştirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu üç kaynak malzemenin kombinasyonlu kullanımının yumuşak kilin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Kür süresinin artışı basınç dayanımını artırmıştır. Kullanılan kaynak malzemelerin geopolimerizasyonu ile C-S-H jelleri oluşmuş ve bu jeller beton iç yapısını iyileştirmiştir.

Literatürde üretilen geopolimerler için belirlenen bağlayıcı malzeme, alkalın aktivatör, malzeme oran ve içerikleri, kür şartları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Önceki Geopolimer Çalışmaları

Bağlayıcı Malzeme	Alkalın Aktivatör Oranı	Molarite (NaOH)	s/b Oranı	Kür	Kür Süresi	Referans
Cüruf, bentonit ve %8 süper akışkanlaştırıcı	NaOH ve Na ₂ SiO ₃	6-8 M	1	Isıl kürlü (60°C)	48 saat	Tok, 2021
Metakaolin ve cüruf	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 2.5	12 M	1	Isıl kürsüz	7-28 gün	Güllü and Agha, 2020
Kireç taşı tozu ve taban külü	Na(OH) ₂ /Na ₂ SiO ₃ =2.5	-	0,75-1,50	Isıl kürsüz	7-28 gün	Alnuaimi, 2019
Cüruf ve uçucu kül	NaOH ve Na ₂ SiO ₃	6-8 M	1	Isıl kürsüz	7 gün	Al Qaysı, 2021
Metakaolin, kolemanit atığı ve silis dumanı	NaOH ve Na ₂ SiO ₃	12 M	0,45	Isıl kürlü (40-60-80 °C)	2-24-72 saat	Aygörmez, 2018
Metakaolin	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 2	-	1	Isıl kürsüz	30-60-90 gün	Li et al. 2017
Metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, geliştirilmiş perlit, ham perlit	KOH, NaOH ve Na ₂ SiO ₃	8M	0,30-,050	Isıl kürlü (100°C)	12-24 saat	Yalghuz, 2020
Uçucu kül ve soğuk bağlanmış uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 2.5	10 M	0,75-1,00	Isıl kürsüz		Güllü et al. 2019
Uçucu kül ve nano silika	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 2.5	10 M	0,50-1,50	Isıl kürsüz	28 gün	Yetim, 2021
Yüksek fırın cürufu ve metakaolin	KOH ve Na ₂ SiO ₃	8 M	0,45	Isıl kürsüz	7-28 gün	Mutlu, 2021
Uçucu Kül	Özel karışımlar	-	0,46	Isıl kürlü (70°)	5 gün	Tuyan, 2017
Cüruf ve uçucu kül	NaOH	1.25-2.5-3.75 M	0,60	Isıl kürsüz	7-28 gün	Abd et al. 2022
F tipi uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ /NaOH =2~3	10 M	-	Isıl kürsüz	7-28 gün	Abdullah and Ahmad 2017
Uçucu kül ve volkanik kül	NaAlO ₂ , NaOH ve Na ₂ SiO ₃	-	0,8	Isıl kürsüz	28 gün	Tigue et al. 2018
F ve C tipi uçucu kül, pirinç kabuğu külü, cüruf, silika dumanı, mermer tozu, cam tozu, taban külü, metakaolin	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 2.5	8-16 M	0,85-1,25	Isıl kürsüz	7-365 gün	Canakci et al. 2019
Metakaolin	NaOH	9 M	-	Isıl kürlü	24 saat	Görhan, 2020
Uçucu kül	NaOH, KOH, Na ₂ SiO ₃	4-8-12 M	0,35-0,5	Isıl kürlü (40-80-120°C)	6-15-24 saat	Arıöz, 2015
Uçucu kül ve cüruf	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 1.5	-	0,3-0,5	Isıl kürlü (70°)	24 saat	Rehman et al. 2020
Kalsiyum karbür atığı ve uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 6/4 7/3 8/2 9/1	3~18 M	1-1,5-2,0	Isıl kürlü (40°)	3-7-14-28 gün	Phetchuay et al. 2016
F tipi uçucu kül ve yüksek fırın cürufu	NaOH/Na ₂ SiO ₃ =2.5	8 M	1:3	Isıl kürlü (60°)	1 gün	Pan et al. 2018
C tipi uçucu kül ve yüksek fırın cürufu	NaOH	5-10-15 M	-	Isıl kürlü (25-50-80°)	7 gün	Sukprasert et al. 2019
İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu	NaOH/Na ₂ SiO ₃ =2	10 M	-	Isıl kürsüz	1-7 gün	Abdila et al. 2021
Alkali kalıntısı, çelik cürufu, öğütülmüş yüksek fırın cürufu	Alkali kalıntısı	-	ASTM'ye uygun	Isıl kürsüz	1-3-5-7 gün	Wang et al. 2022

DEĞERLENDİRMELER

Bağlayıcı Malzemenin Fiziksel, Mekanik ve Reolojik Özelliklere Etkisi

Metakaolin katkısının geopolimer yapısını iyileştirdiği ve mikro yapıda daha kompakt olduğu gözlemlenmiştir (Zhang et al., 2013). Bununla birlikte alkali aktifleştirilmiş metakaolin esaslı geopolimerlerin Portland çimentolu betonlardan daha yüksek dayanımlı oldukları belirtilmektedir (Yetim, 2021). Ayrıca metakaolin katkılı numuneler ısı kütür uygulamadan da yüksek dayanımlara ulaştığı ve donma çözünme, yüksek sıcaklık ve sülfat ve asite karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür (Mutlu, 2021).

Uçucu kül tabanlı geopolimerlerin yüksek işlenebilirliğe, agresif ortamlara karşı iyi dayanıklılığa ve düşük büzülme özelliğine sahip olduğu ancak düşük reaktivite ve ortam sıcaklığında kürlendiğinde düşük mukavemet sağladığı bilinmektedir (Li et al., 2019; Duxson et al., 2007). Buna karşın cüruf tabanlı geopolimerlerin ise düşük işlenebilirlik, yüksek viskozite, hızlı priz alma ve yüksek büzülme özelliği gösterdiği bilinmektedir (Lu et al., 2021). Ancak cüruf ve uçucu kül karışımı geopolimerler daha iyi basınç dayanımı ve daha düşük büzülme özelliği göstermektedir (Al Qaysi, 2021; Alhashemy, 2019; Rios et al., 2017; Cristelo et al., 2013; Cristelo et al., 2011). Diğer yandan uçucu kül tabanlı geopolimerler yavaş ve uzun dönemli mukavemet artışı göstermektedir, bunun sebebinin uçucu külün küresel mikro yapısı nedeniyle reaksiyona girme süresinin uzun olması olarak düşünülmektedir (Çanakçı et al., 2019; Tuyan, 2016). Ancak araştırmacılar yüksek kalsiyumlu uçucu külün stabilize zeminde kısa vadeli mukavemet kazanımlarının daha hızlı gerçekleştiğini bulmuşlardır (Wong et al., 2019; Cristelo et al., 2013; Cristelo et al., 2011).

Alkalin Aktivatörün Fiziksel, Mekanik ve Reolojik Özelliklere Etkisi

Alkalin aktivatörler kullanıcıya bağlı olarak alümina silikat kaynakların çözülmesi geopolimer bağlayıcının mekanik özelliklerini yönetmek amacıyla kullanılır. Alkalin aktivatörler genelde viskoz yapıda olup aşındırıcı özelliğe sahiptir. Ek olarak, özellikle sodyumun alkali kaynağı olduğu geopolimer sistemlerinde, kalın bir macun ve yapışkan oluşumun bir sonucu olarak geopolimerin reolojisinin kontrol edilmesi zor ve karmaşık olabilmektedir. İşlem veya kürlenme sırasında alkalilerin ve suyun geopolimer yüzeyine hareketinin bir sonucu olarak, su ve alkali içeriği dikkatle kontrol edilmezse beton yüzeyinde çiçeklenme ve/veya yüksek geçirgenlik ve su emme eğilimi görülebilmektedir. Son olarak geopolimerler sistemi atık malzemelerin silika kaynağı olarak kullanıldığı durumlarda kontrol edilebilmesi zor olabilen alkali/mevcut silika oranında karşı duyarlı olduğu belirtilmektedir. Kombine edilmeden tek başına alkalin aktivatör kullanılan geopolimerlerde ısıl kürsüz dayanım sağlanmadığı görülmüştür (Abed et al., 2022).

Yapılan güncel çalışmalarda alkalin aktivatör konsantrasyonunun 8 M'den 14 M'e yükselmesi ile basınç dayanımında iyileşmeler gözlenmiştir. Bunun sebebi yüksek konsantrasyonlu alkalin aktivatör içerisinde yüksek oranda silika ve alümina bileşeninin çözünmesi olarak açıklanabilir. Çözünen silika ise polimerik zinciri dolayısıyla mukavemet özelliklerini güçlendirir (Duan et al., 2017b). Fakat 14 M'den yüksek alkalin aktivatör kullanımında yüksek molaritenin alümina ve silika partikül yüzeylerini aşındırmasıyla dayanımın düştüğü gözlenir (Sharma and Kumar, 2020). Ayrıca alkalin aktivatör/bağlayıcı madde oranının jel oluşumunda etkili olduğu, bağlayıcı maddenin içeriğine göre alkalin aktivatör oranının dayanımı olumlu ya da olumsuz etkileyebileceği görülmüştür.

Son olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde sodyum hidroksit çözeltisi sıvı halde kullanırken sodyum metasilikat toz halinde kuru malzemelerle karıştırılarak kullanıldığı görülmüştür. Özellikle cüruf gibi reaktivite özelliği yüksek olan malzemelerde sodyum hidroksitin prizi hızlandırdığı görülmüştür. Bu sebeple ani prizi engellemek için sodyum metasilikat toz halde kullanılmaktadır (Pan et al., 2018).

Sıcaklığın Fiziksel, Mekanik ve Reolojik Özelliklere Etkisi

Amran vd. (2022) hazırladığı derlemede daha önce geri dönüştürülmüş lif kullanılarak üretilmiş geopolimerlerin yangın dayanımı araştırılmıştır. Yüksek fırın cürufu ile hazırlanan geopolimerlerin %100 Portland çimentosuna göre daha iyi yangın dayanımına sahip olduğu, cüruf içerisindeki K₂O arttıkça dayanımın arttığı belirtilmiştir. 800 ila 1000°C arasında Portland çimentosu numunesinde parçalanma görülürken geri dönüştürülmüş lif katkılı geopolimerlerde parçalanma oluşmadığı gözlemlenmiştir.

Yapılan diğer çalışmalarda bakıldığında yüksek sıcaklık etkisinde metakaolin tabanlı geopolimerler gözeneksiz yapısı sayesinde kararlı davranış göstermektedirler (Aygörmez, 2018). Sıcaklık artışı gözenek yapısının büyümesine sebep olarak eğilme dayanımında düşüşe sebep olmaktadır, ek olarak yüksek sıcaklık mikro yapıda çatlaklar oluşturduğu için basınç dayanımı da azalır.

Kür sıcaklığının 60°C'lik ısı kürsüz uçucu külün çözünmesi ve reaksiyonunda en iyi sonuçları verdiği bildirilmiştir (Pan et al., 2018). Özellikle tek başına kullanılan alkalin aktivatörlerde ısıl kürün mukavemeti önemli ölçüde artırdığı, ısıl kürsüz hazırlanan numunelerde mukavemet artışı sağlanmadığı görülmüştür. Isıl kür ile reaksiyon derecesinin artırılması sayesinde daha yoğun ve sıkı bir iç yapı elde edildiği bildirilmiştir (Tuyan, 2017).

Geopolimerlerin geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha hızlı kürlendiği görülmüştür (Tok, 2021). Dayanımlarının %92-96'sını 3 ila 7 gün içerisinde kazandıkları ve bundan sonra mukavemet kazancının çok yavaş/ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir (Rehman et al., 2020; Joseph and Mathew, 2012).

SONUÇ

Bu derlemede çimento yerine kullanılabilir bir alternatif olan geopolimerler incelenmiştir. Zemin iyileştirmelerinde geopolimer uygulamaları henüz çok yeni bir tanım olduğundan bu derlemede yapı alanında hazırlanmış geopolimer çalışmalarına da yer verilmiştir. Bütün çalışmalarda karşılaştırmaların üç ana başlık etrafında yapıldığı görülmüştür; alüminasilikat içeriği yüksek bağlayıcı maddenin değiştirilmesi, alkalın aktivatör içeriği ya da oranının değiştirilmesi ve kür şartlarının değiştirilmesi. Tüm çalışmaların sonunda basınç dayanımları ve mikro yapı incelenmiş olup bazı araştırmacılar numunelerin yangın dayanımı, donma çözülme performansı, ultrases ve radyasyon geçirgenliği, sülfat ve asit dayanıklılığı, büzülme, su geçirimsizliği, işlenebilirlik performansı için reometre deneyleri ve eğilme dayanımı testleri uygulamışlardır. Geçmiş çalışmalarda, kompaksiyon işlemi için s/b oranı 0.5–1.5, jet grout için 0.6–2 ve enjeksiyon ve permeasyon enjeksiyon için 1-3 arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Güllü et al., 2019). Bu makalede ele alınan çalışmalardan da görüleceği üzere s/b oranının çimento ile elde edilen betona göre daha düşük olduğu bildirilmektedir. Böylece geopolimer betonların üretiminde su kaynaklarının da korunabileceği görülmüştür.

60-80°C ısı kütür uygulaması mekanik-kimyasal-reolojik özelliklerde en iyi sonuçları vermiştir. Kür süresinin artışı dayanımda artış sağlamaktadır. Cüruf tabanlı geopolimerler en iyi geç dayanımı sağlamıştır. s/b oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Uçucu küllü geopolimerler için optimum s/b oranı 0.4 civarı iken cüruf için optimum s/b oranının 0.5 civarı olduğu görülmüştür. Alkalın aktivatör molaritesi 14 M iken en iyi basınç dayanımları sağlanmıştır. Alkalın aktivatör/bağlayıcı malzeme oranı bağlayıcı malzemeye göre değişmekte olup uçucu kül tabanlı geopolimerlerde optimum oran 0.45 olduğu görülmüştür. En iyi asit ve sülfat dayanıklılığını metakaolin tabanlı geopolimerler göstermiştir. Silis dumanının %5'e kadar ikamesi, nanopartiküllerin %2'ye kadar ikamesi, cüruf ve uçucu küllün yarı yarıya ikamesi genelde en iyi basınç dayanımı sonuçlarını vermiştir. Zemin iyileştirme uygulamalarında derin karıştırma tekniğinde killi zeminler için minimum 0.2 MPa, kumlu zeminler için minimum 2 MPa ve jet grout tekniğinde killi zeminler için minimum 2 MPa, kumlu zeminler için minimum 5 MPa dayanım sağlanması gerektiği bilinmektedir. Tüm geoteknik uygulamalar göz önüne alındığında 1 Mpa dayanım yeterli olup geopolimerlerin sorunlu zeminlerin iyileştirmesinde ve geoteknik uygulamalarda kullanımı uygun bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- Abdila, S. R., Abdullah, M. M. A. B., Ahmad, R., Rahim, S. Z. A., Rychta, M., Wnuk, I., and Gucwa, M. (2021). Evaluation On The Mechanical Properties Of Ground Granulated Blast Slag (GGBS) And Fly Ash Stabilized Soil Via Geopolymer Process. *Materials*, 14(11), 2833. <https://doi.org/10.3390/ma14112833>
- Abdulkareem, O.A., Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Nizar, I.K. and Alaeddin, A.S. (2014) Effects Of Elevated Temperatures On The Thermal Behavior And Mechanical Performance Of Fly Ash Geopolymer Paste. *Mortar And Lightweight Concrete, Construction and Building Materials* 50, 377-387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.047>
- Abdullah, M.S., Ahmad, F. (2017) Effect Of Alkaline Activator To Fly Ash Ratio For Geopolymer Stabilized Soil. *MATEC Web of Conferences* 97. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701012>
- Abed, M.H., Abbas, I.S., Hamed, M. and Canakci, H. (2022) Rheological, Fresh And Mechanical Properties Of Mechanochemically Activated Geopolymer Grout: A Comparative Study With Conventionally Activated Geopolymer Grout. *Construction and Building Materials* 322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126338>
- Al Qaysı, S.Z.M. (2021) Investigation Of Workability And Hardened Properties Of Slag Geopolymer. M.Sc. in Civil Engineering Gaziantep University, Gaziantep 54 p.
- Alhashemy, A.A. (2019) Modification Of Clayey Soil With Geopolymer Obtained With Different Waste Material. Ph.D. Thesis In Civil Engineering Gaziantep University, Gaziantep 104 p.
- Alhawat, M., Ashour, A., Yıldırım, G., Aldemir A. and Sahmaran M. (2022) Properties Of Geopolymers Sourced From Construction And Demolition Waste: A Review. *Journal of Building Engineering* 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104104>
- Alnuaimi, M.D.A. (2019) Investigation Of Using Geopolymer Utilized Limestone Dust And Bottom Ash For Grouting And Deep Mixing. M.Sc. in Civil Engineering Gaziantep University, Gaziantep 69 p.

- Amran, M., Huang, S.S., Debarma, S. and Rashid, R. (2022) Fire Resistance Of Geopolymer Concrete : A Critical Review. *Construction And Building Materials* 324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126722>
- Arıöz, E. (2015) Geopolimer Elde Edilmesi Ve Katyon, Ph Ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi. Doktora Tezi Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir 236 s.
- Arioz, E., Arioz, O., and Kockar, O. M. (2020) Geopolymer Synthesis With Low Sodium Hydroxide Concentration. *Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(1), 525-533. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.399>
- Aygörmez, Y. (2018) Kolemanit Atığı Ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 195 s.
- Canakci, H. Güllü, H. and Alhashemy, A. (2019) Performances Of Using Geopolymers Made With Various Stabilizers For Deep Mixing. *Construction and Building Materials* 12. <https://doi.org/10.3390/ma12162542>
- Castel, A., Foster, S.J., Ng, T. (2016) Creep And Drying Shrinkage Of A Blended Slag And Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Materials And Structures* 49, 1619-1628. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0599-1>
- Cristelo N., Glendinning S., Fernandes L. and Pinto A.T. (2013) Effects Of Alkaline-Activated Fly Ash And Portland Cement On Soft Soil Stabilisation *Acta Geotechnica* 8, 395-405. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9>
- Cristelo, N., Glendinning, S. And Teixeira Pinto, A. (2011). Deep Soft Soil Improvement By Alkaline Activation. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(2), 73-82. <https://doi.org/10.1680/grim.900032>
- Davidovits J. (1991) Geopolymers-Inorganic Polymeric New Materials. *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry. Journal Of Thermal Analysis* 37, 1633–1656 <https://doi.org/10.1007/bf01912193>
- De Silva P., Sagoe-Crenstil K., Sirivivatnanon V. (2007) Kinetics Of Geopolymerization: Role Of Al₂O₃ And SiO₂. *Cement Concrete Research* 37, 512-518 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>
- Duan, P., Yan, C. and Zhou, W. (2017a) A Novel Water Permeable Geopolymer With High Strength And High Permeability Coefficient Derived From Fly Ash, Slag And Metakaolin. *Advanced Powder Technology* 28. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.03.009>
- Duan, P., Yan, C. and Zhou, W. (2017b) Compressive Strength And Microstructure Of Fly Ash Based Geopolymer Blended With Silica Fume Under Thermal Cycle, *Cement And Concrete Composites* 78, 108-119 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.009>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G.C., Palomo, A. and Van Deventer, J.S. (2007) Technology: The Current State Of The Art. *Journal Of Materials Science* 42. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Ekmen, Ş. ve Mermerdaş K. (2018) Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 93-101 <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/42425/505668>
- Elimbi, A., Tchakoute, H.K., Njopwouo, D. (2011) Effects Of Calcination Temperature Of Kaolinite Clays On The Properties Of Geopolymer Cements. *Construction And Building Materials* 25, 2805-2812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.055>
- European Environment Agency (2021) Health Impacts Of Air Pollution In Europe. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/health-impacts-of-air-pollution>
- Görhan, G. (2020) Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi, *Afyon Kocatepe University Journal Of Science And Engineering* 20. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.591117>
- Güllü, H. and Agha, A.A. (2020) The Rheological, Fresh And Strength Effects Of Cold-Bonded Geopolymer Made With Metakaolin And Slag For Grouting. *Construction And Building Materials* 274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122091>

- Güllü, H., Cevik, A., Al-Ezzi, K.M.A., Gülsan, E., (2019) On The Rheology Of Using Geopolymer For Grouting: A Comparative Study With Cement-Based Grout Included Fly Ash And Cold Bonded Fly Ash. *Construction And Building Materials* 196, 594-610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.140>
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On The Development Of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472
- Jindal, B. B., Sharma, R. (2020) The Effect Of Nanomaterials On Properties Of Geopolymers Derived From Industrial By Products: A State Of The Art Review. *Construction and Building Materials* 252 <https://doi.org/10.3390/polym14071421>
- Joseph, G., Mathew, G. (2012) Influence Of Aggregate Content On The Behaviour Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *Scientia Iranica* 19-5 <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.006>
- Kanat, A. (2018) Jet Grout Kolonlarının Oluşumu Ve Davranışı Üzerinde Çok İnce Taneli Çimento Ve Mikro Silika Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya 107 s.
- Lee, N.P. (2007) Creep And Shrinkage Of Inorganic Polymer Concrete. In BRANZ Study Report SR 175, BRANZ Ltd., Judgeford, New Zealand
- Li, X., Rao, F., Song, S. and Ma, Q. (2019) Deterioration In The Microstructure Of Metakaolin-Based Geopolymers In Marine Environment. *Journal of Materials Research and Technology* 8-3 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.03.010>
- Liu, H., Lu, Z. and Peng, Z. (2015) Test Research On Prestressed Beam Of Inorganic Polymer Concrete. *Materials And Structures* 48:1919-1930 <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0283-x>
- Lu, C., , Z., Shi, C., Li, N., Jiao, D., & Yuan, Q. (2021). Rheology of alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104061. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104061>
- Mahmoodi O., Siad H., Lachemi M., Dadsetan S., Sahmaran M., (2021) Development of normal and very high strength geopolymer binders based on concrete waste at ambient environment. *Journal of Cleaner Production*, Volume 279, 123436. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123436>.
- Mutlu, H. A. (2021) Metakaolin Ve Yüksek Fırın Cüruf Tabanlı Isıl Kürsüz Geopolimer Harç Üretimi Ve Dayanıklılığın Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir 58 s.
- Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction-recent developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472>
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhler, R. and Murphy, T. (2018). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.011>
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., & Udomchai, A. (2016). Strength Development İn Soft Marine Clay Stabilized By Fly Ash And Calcium Carbide Residue Based Geopolymer. *Applied Clay Science*, 127, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.005>
- Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B. B. and Fasihnikoutalab, M. H. (2015). Soil Stabilisation With Alkali-Activated Agro-Waste. *Environmental Geotechnics*, 2(6), 359-370. <https://doi.org/10.1680/envgeo.15.00009>
- Rehman, M. U., Rashid, K., Haq, E. U., Hussain, M. and Shehzad, N. (2020) Physico-Mechanical Performance And Durability Of Artificial Lightweight Aggregates Synthesized By Cementing And Geopolymerization, *Construction And Building Materials* 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117290>
- Rios S., Ramos C., Viana Da Fonseca A., Cruz N., Rodrigues C. (2017) Mechanical And Durability Properties Of A Soil Stabilised With An Alkali-Activated Cement. *European Journal Of Environmental And Civil Engineering* 1-23 <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1275987>
- Sharma, K. and Kumar, A. (2020) Utilization Of Industrial Waste Based Geopolymers As A Soil Stabilizer- A review, *Innovative Infrastructure Solutions* 5(3). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00350-7>

Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A.S.A., Nazir, R. (2019) Fly Ash Based Geopolymer Stabilisation Of Silty Clay/Blast Furnace Slag For Subgrade Applications. Road Materials and Pavement Design <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1621190>

Tigue, A.A.S., Dungca, J.R., Hinode, H., Kurniawan, W. and Promentilla, M.A.B. (2018) Synthesis Of A One-Part Geopolymer System For Soil Stabilizer Using Fly Ash And Volcanic Ash. MATEC Web of Conferences 156. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815605017>

Tok L.V. (2021) Yüksek Fırın Cürufu Ve Bentonit Tabanlı Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 59 s.

Tuyan, M. (2017) Doğal Ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç Ve Beton Geliştirilmesi. Doktora Tezi Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir 259 s.

Tuyan, M. (2016) Utilization Of Fly Ash And Bottom Ash In Geopolymer Composite In 2016 1st International Conference on Grand Challenges in Construction Materials

Wang, X., Zhang, Z., Song Z., Li J. (2022) Engineering Properties Of Marine Soft Clay Stabilized By Alkali Residue And Steel Slag: An Experimental Study And ANN Model, Acta Geotechnica. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01498-5>

Wong, B. Y. F., Wong, K. S. And Phang, I. R. K. (2019, April). A Review On Geopolymerisation In Soil Stabilization. In IOP Conference Series: Materials Science And Engineering (Vol. 495, No. 1, P. 012070). IOP Publishing.

Yalghuz, M.R. (2020) Farklı Tip Malzemeler Kullanılarak Geopolimer Harç Üretimi Ve Dayanıklılığın İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir 64 s.

Yazıcı, Ş., Didem, A. N. U. K., & Arel, H. Ş. (2010) Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 25(2), 13-24.

Yetim, M. E. (2021) Effect Of Nano-Silica On Cement And Geopolymer Mixtures For Grouting. M. Sc. Thesis Gaziantep University Graduate School Of Natural & Applied Sciences, Gaziantep 78 p.

Zhang M.O., Guo H., El-Korchi T., Zhang G. and Tao M. (2013) Experimental Feasibility Study Of Geopolymer As The Next-Generation Soil Stabilizer, Construction And Building Materials 47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>