

## Zemin İyileştirmesinde Kullanılan Jet Grout Yönteminde Çimento Yerine İkame Edilen Atık Malzemelerin Mekanik ve Reolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi: Literatür Araştırması

Muhammet ÇINAR<sup>1\*</sup>, Kübra ERBAŞI<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 46050, Kahramanmaraş

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5475-7787>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-1250-4508>

\*Sorumlu yazar: muhammetcinar@ksu.edu.tr

### Derleme

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 12.05.2022

Kabul tarihi: 02.01.2023

Online Yayınlanma: 05.07.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Atık Malzeme

Çimento İkamesi

Jet Grout

Zemin İyileştirme

### ÖZ

Enerji ve kaynak kullanımı sonucu artan endüstriyel ve fabrika atıkları, büyük miktarda ekolojik ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre çimento üretimi sırasında, açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunun, antropojenik sera gazı emisyonlarının %5'ini oluşturduğu raporlanmıştır. Yüksek CO<sub>2</sub> gazı, hava kirliliği, küresel ısınma, iklim değişikliği gibi sorunlara yol açmaktadır. İnşaat sektörünün büyümesi ve nüfusun artması, ekonomik göstergelerin yükselmesi ve kentleşmenin sonucunda, şehir içinde yapılaşma artmış, yüksek katlı binalar inşa edilmeye başlanmıştır. Aynı zamanda problemlili zeminlere de inşaat yapma zorunluluğu gündeme gelmiştir. Günümüzde en çok tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi olan Jet Grout uygulamasıdır. Bu derleme makalede Jet Grout'ta kullanılan çimentonun, çeşitli endüstriyel ve fabrika atıklarının çimento yerine farklı oranlarda ikamesi incelenmiştir. Çimento yerine endüstriyel ve fabrika atıkları belli oranlarda ikame edilerek yapılan deneysel çalışmaların reolojik ve mekanik sonuçları incelenmiştir. Yapılan çalışmalara göre çimento yerine endüstriyel ve fabrika atıklarının kullanılması sonucu, zemin iyileştirme uygulamaları için yeterli dayanımı sağladığı bildirilmiştir.

## Investigation of the Mechanical and Rheological Properties of the Effects of Waste Materials Replacement for Cement in the Jet Grout Method Used in Soil Improvement: Literature Review

### Reviews

#### Article History:

Received: 12.05.2022

Accepted: 02.01.2023

Published online: 05.07.2023

#### Keywords:

Waste Material

Cement Replacement

Jet Grout

Soil Improvement

### ABSTRACT

Increasing industrial and factory wastes as a result of energy and resource use cause a large amount of ecological and economic losses. According to the researches, it has been reported that the CO<sub>2</sub> emission during cement production constitutes 5% of anthropogenic greenhouse gas emissions. High CO<sub>2</sub> gas released during the production of clinker, the main raw material of cement causes problems such as air pollution, global warming, and climate change. As a result of the growth of the construction sector, the increase in the population, the increase in economic indicators and urbanization, the construction increased and high-rise buildings began to be built and the obligation to build on problematic soils has come to the fore. Jet Grout application, which is one of the most preferred soil improvement methods today, is the injection of a water-cement mixture into the ground with a drilling machine with constant pressure, drawing speed, and rotation speed. In this review article, the replacement of cement used in Jet Grout and

various industrial and factory wastes at different rates for cement was investigated. Rheological and mechanical results were investigated in the experimental study performed replacement by industrial and factory wastes in certain proportions instead of cement. According to the experimental study, it has been observed that the use of industrial and factory wastes instead of cement provides sufficient strength for soil improvement applications.

**To Cite:** Çınar M., Erbaşı K. Zemin İyileştirmesinde Kullanılan Jet Grout Yönteminde Çimento Yerine İkame Edilen Atık Malzemelerin Mekanik ve Reolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi: Literatür Araştırması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(2): 1742-1767.

## 1.Giriş

Artan sanayi sektörü sonucu endüstriyel ve fabrika atıkları, büyük miktarda ekolojik ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Ortaya çıkan çevresel sorunların yanı sıra birçok durumda atıkların depolanma zorunluluğu ve zorluğundan dolayı ilave maliyet çıkmaktadır. Atık malzemelerin geri dönüşüm ile yararlı değerlendirilmesi hem maliyet hem de çevre kirliliği açısından önem arz etmektedir. Çevresel olarak tehlikeli boyutlarda sorun oluşturan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, cam atığı ve mermer toz atığı gibi endüstriyel atık malzemelerin, inşaat sektöründe geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem ekolojik açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. İnşaat sektöründe kullanılan, bağlayıcı özellikte olan çimento üretimi esnasında yüksek miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu salgıladığı bilinmektedir.

Çimento üretimi sırasında, karbonat içerikli ham maddelerin yüksek ısı ile reaksiyona girmesi sonucu açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonu, antropojenik sera gazı emisyonlarının %5'ini oluşturduğu bilinmektedir (Kara ve ark., 2018). Çimento ana ham maddesi olan klinkerin üretimi aşamasında açığa çıkan yüksek CO<sub>2</sub> gazı hava kirliliği, küresel ısınma, iklim değişikliği gibi sorunlara yol açmaktadır.

Bir yapının dayanımı ve dayanıklılığı oturduğu zeminin dayanım özelliklerine bağlıdır. Zemin eğer üzerine inşa edilen yapıyı taşıyacak dayanım ve özelliklere sahip değilse, o zeminin iyileştirilmesi gerekir. Zemin iyileştirmesi, ortamdaki suyun uzaklaştırılması, mevcut zeminin boşluk oranının azaltılması ve zeminin üzerine inşa edilecek yapıyı taşıyabilecek kapasiteye getirilmesi işlemlerinden oluşur.

Jet Grout günümüzde en çok tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemle zeminin dayanım, oturma ve geçirimsizlik gibi özellikleri iyileştirilmektedir. Esasında su ve çimento karışımının sabit basınç, sabit çekme hızı ve sabit dönme hızı ile zemine delgi makinesi ile enjekte edilmesidir.

Bu çalışmada Jet Grout'ta kullanılan çimentonun, çeşitli endüstriyel ve fabrika atıklarının çimento yerine farklı oranlarda ikamesi konusunda 33 çalışma incelenmiş ve Literatür Taraması bölümünde özetlenmiştir. Hem çimento kullanımını azaltmak hem de endüstriyel atıkların geri dönüşümü ile kazan-kazan taktiği hedeflenmiştir. Çimento yerine uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kazan altı taban külü, pirinç kabuğu külü ve mermer tozu belli oranlarda ikame edilerek araştırmacılar

tarafından yapılan deneyler incelenmiştir. Reolojik özellikleri belirlemede Zhang ve ark., 1996; Battal ve Demiröz, 2018; Battal, 2019; Zhang ve ark., 2019; Çınar ve ark., 2019; Çalı, 2020; Akçuru, 2020; Çelik ve Akçuru., 2020; Olgun ve ark., 2021 ve diğer araştırmacılar marsh hunisi ve mini slump deneylerini incelemişler, bunun yanı sıra bazı araştırmacılar sedimantasyon deneyi, vicat iğnesi testi, plaka kohezyonu deneyi, permeabilite deneyi ve elektron tarama mikroskobu (SEM) gibi deney yöntemleri uygulayıp incelemişlerdir. Araştırmacılar, mekanik özellikleri belirlerken basınç dayanımı testinin yanında çekme dayanım testi, akma gerilimi deneyi, ultrasonik darbe hızı deneyi (UPV), eğilme dayanım deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak bu çalışmada, Jalal ve ark., 2015; Rana ve ark., 2015; Rodrigues ve ark., 2015; Asteris, 2017; Battal ve ark., 2018 ; Kanat, 2018; Battal ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2019; Çınar ve ark., 2020; Çalı, 2020; Akçuru, 2020; Çelik ve ark., 2020; Olgun ve ark., 2021 yaptıkları reolojik ve mekanik özellik deneylerinin sonuçları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Geoteknik uygulamalar için dayanım özelliklerinin sağlandığı, atık malzeme kullanımının ekonomik ve ekolojik fayda sağlayacağı görülmüştür.

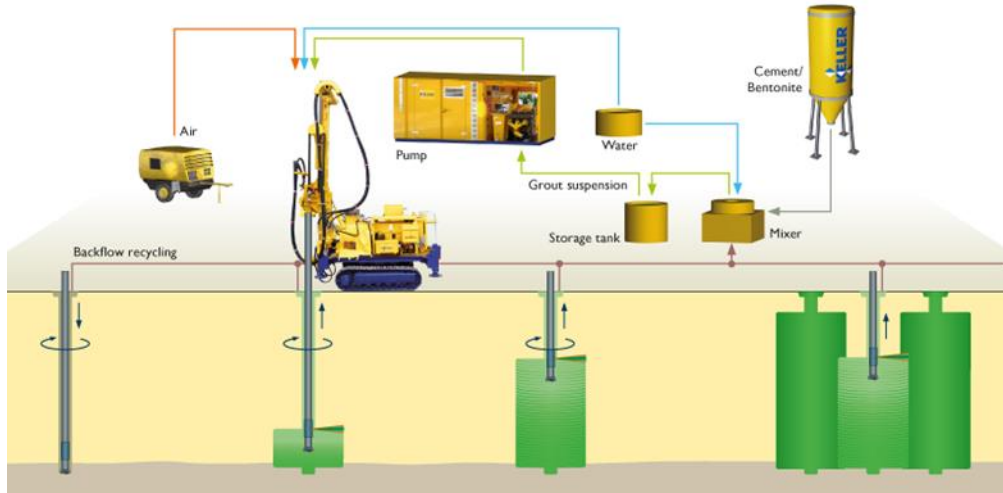
## 2. Jet Grout

Jet Grout genellikle su çimento karışımının (stabilize malzeme) küçük çaplı nozul ile çok yüksek basınç uygulanarak zemine enjekte edilmesidir. Enjekte edilen stabilize malzeme 300-600 bar gibi yüksek basınçla püskürtülüp doğal zemin ile karıştırılması sağlanır. Küçük çaplı nozuldan çok yüksek basınçla püskürtülen stabilize malzeme, zeminin doğal matrisini bozup, zeminle karışması sağlanmaktadır. Bu karışım sayesinde zemin homojen ve sürekli yapıya sahip olup taşıma gücü kapasitesi artırılmaktadır. Jet Grout uygulaması, zemin iyileştirilmesi, zemin stabilizasyonu, takviyesi ve yer altı suyu kontrolü için kullanılan çok yönlü bir tekniktir. Farklı zemin çeşitlerinde uygulanabilir. Jet Grout uygulamasında 2 aşama bulunmaktadır. Bunlar 'delgi' ve 'enjeksiyon' olarak belirtilmektedir. Uygulama için Türkiye'de "TS EN 12716 Özel Geoteknik Uygulamalar – Jet Enjeksiyon" yönetmeliği esas alınmaktadır. Jet Grout uygulamasında kullanılan ekipmanlar şu şekilde sıralanmaktadır. Delgi makinesi, istenilen ve hesaplanan derinliğe kadar delgi yapabilecek ve jet grout kolon oluşturabilecek kapasitedeki delgi makinesidir. Pompa ünitesi, enjeksiyon karışımını istenen çapta jet grout kolon oluşturabilecek basıncı verebilecek pompadan oluşan jet grout ünitesidir. Mikser ünitesi, enjeksiyon karışımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıştırarak mikser ve dinlendiriciden oluşan pompa ünitesini beslemeye yetecek kapasitede mikser ünitesidir. Çimento silosu, içerisinde çimento depolayabilen ve mikser ünitesine çimento aktarma silosu ve konveyördür. Su tankı, 15-25 ton kapasiteli sağlam su tankı-havuzu ve su pompası olmalıdır. Diğer ekipmanlar, 8-12 bar basınçlı kompresör, kaynak makinesi ve elektrik kesintilerinin olması halinde bir jeneratör bulundurulmalıdır (Şekil 1).

Jet Grout uygulamasında kullanılan değiştirilmiş delgi makinesinde, tijin devir ve geri çekme hızı, istenilen kolon çapı kontrol panelinden ayarlanmaktadır. Delgi ve enjeksiyon işleminde aynı tij kullanılır. Delgi makinesi zemini deler ve enjeksiyon malzemesi valfler aracılığıyla zemine enjekte

edilir. Delgi sırasında sert zemin, kaya veya temel ile karşılaşılırsa delmek için normal tip delgi kullanılır. Genelde işlem tek enjeksiyon safhasında yapılır. Yüksek enjeksiyon derinliği veya yükseklik sınırlamalarından dolayı tek işlem sorun olduğunda bu işlem birçok adımda yapılacak şekilde tasarlanır.

Enjeksiyon sistemi kullanılacak ekipmanı belirler. Tek fazlı enjeksiyon ekipmanı dibinde bir veya daha fazla enjeksiyon nozzle'ı olan içi oyuk gövdeli boruyu içermektedir. İki fazlı enjeksiyon sisteminde enjeksiyon malzemesi borunun içini ve basınçlı hava ise iç boru ile dış boru arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Enjeksiyon malzemesi ve onu çevreleyen hava ikili nozzle ile enjekte edilir. Üç fazlı enjeksiyon ise aynı merkezli üçlü boru sistemi kullanır. Bu sistem hava borusunun içinde su borusunu ve bunları çevreleyen enjeksiyon malzemesi borusunu içermektedir. Bu sistemde enjeksiyon malzemesi farklı bir nozzle'dan enjekte edilir. Jet nozullarının çapı çok farklılık göstermektedir. Ancak eğer çap çok küçük olursa sıvı basıncının artacağı göz önünde tutulmalıdır. Diğer taraftan eğer nozzle çapı çok büyük alınırsa, bu yüksek akış oranına, düşük sıvı basıncına ve küçük çaplı jet kolonlarına neden olur.

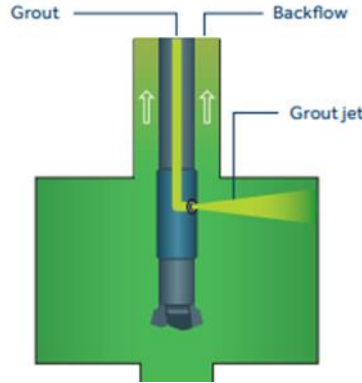


Şekil 1. Jet Grout İmalat Ekipmanı (Keller, 2019)

Jet grout uygulamalarında, zemin şartlarına, yük koşullarına, talep edilen kolon özelliklerine ve işin hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu amaçla geliştirilmiş farklı yöntemler sırasıyla tek akışkanlı yöntem (Jet 1), çift akışkanlı yöntem (Jet 2), üç akışkanlı yöntem (Jet 3) ve süper jet (Jet 4) şeklindedir.

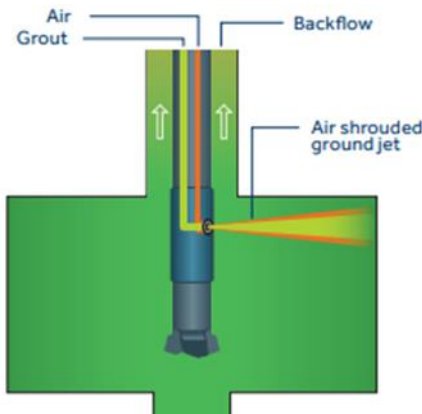
Tek akışkanlı sistem (Jet 1), zeminin parçalanması ve çimentolanmasının, genellikle çimento şerbeti ile sağlandığı ve tek bir akışkanın (su-çimento harcının) yüksek enerji jeti ile uygulandığı enjeksiyon işlemidir (TS EN 12716). En basit jet grout yöntemidir. Bir veya birden fazla 2-3 mm, 2-4 mm arasında değişen çaplardaki püskürtme ağızlığı (nozül) monitörün etrafında bulunur. Hazırlanmış olan su çimento harcı, 300-500 bar arasındaki yüksek basınçta nozullardan püskürtülür. Püskürtülen harç ile zeminde yırtıklar oluşur ve bunlar harç ile doldurulur. Monitörün kendi etrafında dönerek yukarı çekilmesiyle, püskürtülen harç ile zemin karışarak belirli çapta kolonlar oluşturur (Şekil 2). Jet 1

yönteminin uygulama alanları; geçirimsizlik perdesi uygulamaları, zeminde açılan tünellerde tavan blok bölgesinin güçlendirilmesi, yumuşak zeminde derin kazıların desteklenmesi ve ankrajlar şeklinde sıralanabileceği belirtilmiştir (Gürleyik, 2018).



Şekil 2. Tek Akışkanlı Sistem (Keller,2019)

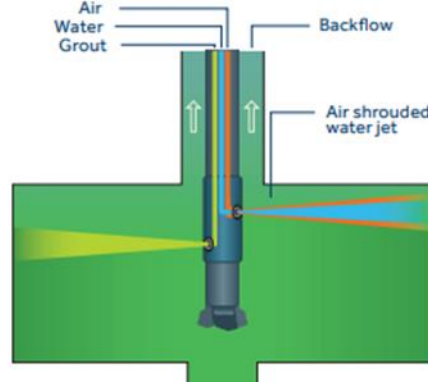
Çift akışkanlı sistem (Jet 2), zeminin parçalanması ve çimentolanmasının yüksek enerjili çimento şerbeti ile ikinci bir akışkan olarak hava jeti ile beraber gerçekleştiği enjeksiyon sistemidir (TS EN 12716). Su çimento harcının hava jetiyle beraber püskürtülmesiyle zemin parçalanır. Zeminde oluşan yırtıklar enjekte edilen harç ile doldurulmaktadır. Püskürtme gövdesi, birbiri içine geçmiş iki birimden oluşmaktadır (Şekil 3). İçteki birim harç püskürtürken, dıştaki birim ise hava püskürtmektedir. Çimento harcı enjeksiyon sırasında sürtünmeden dolayı büyük enerji kayıplarının olduğu, basınçlı hava ile beraber çimento harcının enjekte edilmesi ile büyük enerji kayıplarının önlendiği gözlemlenmiştir (Burke, 2000). Jet 2 yönteminin uygulama alanları, zemin iyileştirmesi, temellerin takviyesi, panel geçirimsizlik perdeleri, yumuşak zeminde derin kazıların desteklenmesi şeklinde sıralanmıştır (Gürleyik, 2018).



Şekil 3. Çift Akışkanlı Sistem (Keller, 2019)

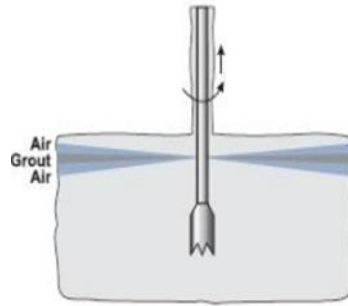
Üç akışkanlı sistem (Jet 3), zemin parçalanmasının hava jeti destekli yüksek basınçlı su jeti ile, çimentolanmasının ise eş zamanlı çimento karışımı enjekte edilerek uygulanan jet enjeksiyon işlemidir (TS EN 12716). Bu yöntemde birbiri içinde üç ünitesi bulunmaktadır. 8-12 bar basınçlı hava ara

borudan, 400-600 bar basınçlı su ortadaki borudaki nozzlelerden birlikte püskürtülmektedir. 30-80 bar basınçlı çimento harcı ise en dıştaki borudan ayrı bir nozzleden, su-hava karışımı içine enjekte edilmektedir (Şekil 4). Jet grout kolonları bu yöntemle 2 metreden fazla uzunluğa kadar ulaşabilmektedir. (Küsin, 2009) Jet 3 yönteminin uygulama alanları, temel takviyesi ve kazı desteği, yer altı suyu kontrolü, panel geçirimsizlik perdeleri, geçirimsizlik uygulamaları, çoğu ince daneli zeminlerin stabilizasyonu şeklinde sıralanmıştır (Gürleyik, 2018).



Şekil 4. Üç Akışkanlı Sistem (Keller,2019)

Süper Jet (Jet 4), diğer yöntemlerle elde edilemeyecek daha büyük çaptaki kolonlara duyulan ihtiyaç ve bu ihtiyacın daha az maliyetlerle sağlanmak istenmesi amacıyla ortaya çıkmış bir metottür (Çınar, 2014). Bu yöntemde büyük çaplı kolonlar elde edebilmek için tijlerin dönme ve çekme hızları diğer jet yöntemlerine göre çok yavaştır. Uygun dönme ve çekme parametreleri ile 5 metre çapa kadar jet kolonlarının oluştuğu kanıtlanmıştır (Küsin, 2009). Süper jet kolonları yapımında imalat parametreleri olarak 7 mm/dakika çekme hızı, 3-4 devir/dakika dönüş hızı, 40 MPa enjeksiyon basıncı ile 4 m çapa kadar ulaşılabilirdiği görülmektedir. Süper jet metoduyla (Şekil 5) yapılan kolonlarda, kolon kesit çaplarının büyüdüğü görülmektedir (Karahan, 2016).



Şekil 5. Süper Jet Sistem (Küsin, 2009)

### 3. Literatür Taraması

Olgun ve ark. (2021)'in yaptığı çalışmada, 3 farklı bağlayıcının Jet Grout kolonlardaki performansı incelenmiştir. Bu bağlayıcılar sıradan portland çimentosu, silis dumanı katkılı sıradan portland

çimentosu ve ince taneli çimentonun özellikleri incelenmiştir. %10 silis dumanı katkılı sıradan portland çimentosu ve ince taneli çimentonun değişen su/bağlayıcı (0,85~1,5) oranlarında mekanik ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Taze betonun s/b özelliklerini belirlemek için marsh hunisi testi, sedimentasyon testi ve vicat iğnesi testi yapılmıştır. Sertleşmiş betonda ise serbest basınç mukavemeti ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır (Tablo 1). Silis dumanı portland çimentosundan çok daha ince taneli bir malzemedir ve partiküller arasındaki boşlukları doldurur ve bağları kuvvetlendirir, bu sayede permeabilitenin de azaldığı görülmüştür. Çok ince taneli olduğu için su ihtiyacının artmasına sebep olurken aynı zamanda akıcılığı ve işlenebilirliği düşürmüştür. %10 silis dumanı katkılı portland çimentosu ile hazırlanan numunede optimum su içeriğinin 1,25 olması gerektiği gözlemlenmiştir (Tablo 1). Daha düşük s/b oranlarında su ihtiyacı arttığı için sertleşmiş betonun mekanik özelliklerinde düşüş görülmüştür. Silis dumanının priz alma süresini geciktirdiği gözlemlenmiştir. Fakat betonda önemli derecede mukavemet artışı görülmüştür. Silis dumanı katkısı basınç dayanımını katkısız harca göre oldukça artırmıştır. Ayrıca çekme dayanımı da katkısız harca göre %10 silis dumanı katkılı harçta oldukça yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, katkılı karışımda oluşan C-S-H jellerinin numuneye süneklik katmasıdır.

Çalı (2020)'nin yaptığı çalışmada, 3 farkı katkı malzemesini farklı oranlarda çimento ile ikame edilmesiyle oluşturulan betonların mekanik özelliklerini incelemiştir (Tablo 1). Bu çalışmada oluşturulan numunelerin serbest basınç ve çekme dayanımları incelendiğinde, literatür çalışmalarına uygun olarak katkı malzemelerin dayanımı ve sünekliği artırdığını gözlemlenmiştir. Maksimum basınç dayanımı yüksek fırın cürufu ilavesiz %20 silis dumanı, %20 uçucu kül ve %2 akışkanlaştırıcı katkılı betonda gözlenmiştir. Silis dumanı betonda erken dayanım sağlarken, uçucu kül katkısı uzun vadede dayanımı olumlu etkilemiştir. Su ihtiyacı arttığı için akışkanlaştırıcı katılmayan numunelerde dayanımlar düşük çıkmıştır. Yüksek fırın cürufu (YFC) ilave edilen karışımlarda işlenebilme artmıştır. Yüksek fırın cürufu katkısı ise tıpkı uçucu kül gibi uzun vadede olumlu sonuç sağlamaktadır. Yüksek fırın cürufu, su ile tepkimeye girdiği ve akışkanlaştırıcı kimliğine bürünerek şerbetin içinde bulunan suyun yüzeye çıkması yapılan deneylerde görülmüştür. Şerbetin içinde serbest kalan suyun yüzeye çıkması harcın tepkimeye girmeden ayrışmasına ve gerekli C-H bağlarının oluşturulamamasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu durumda YFC ile birlikte harcın su ihtiyacını azaltan akışkanlaştırıcı kullanılmamalıdır. Yani akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanıldığında dayanım düşmüştür. Yüksek fırın cürufu içeren karışımlardan uçucu kül ilavesi çıkarıldığında dayanımda iyileşme gözlemlenmiştir. Yüksek fırın cürufunun silis dumanı ile birlikte kullanılması da dayanımda artışı sağlamıştır, ayrıca süneklik özelliği katarak uzun sürede kırılıp deforme olmasını sağlamıştır. Ek olarak ikame oranının %30'u geçmesiyle işlenebilirlik oldukça zorlaşacağından homojen karıştırma işlemi yapılamayacağı belirtilmiştir. Bu sebeple ikame oranı %30'u geçmemesi gerektiği belirtilmiştir.

Akçuru (2020)'nin yaptığı araştırmada, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 kazan altı taban kül içeriğine ve dört farklı su/bağlayıcı (s/b) oranına sahip 28 farklı karışım hazırlamıştır. S/b içeriklerinin oranları 0,75-1,00-1,25 ve 1,50 şeklindedir. İşlenebilirlik özelliklerinin belirlenebilmesi için marsh

huni akış süresi, plaka kohezyonu ve mini slump deneyleri yapılmıştır (Tablo 1). Karışımlardaki kazan altı taban külü içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çapı yavaş yavaş azalmıştır. Harç karışımlarındaki s/b oranı değişikliğinin etkisi katkı içeriğinin sabit olduğu gözlemlendiğinde, karışımların mini slump yayılma çapı, s/b oranının artmasıyla artmıştır. Katkı maddesinin artışının Marsh hunisi akış süresi üzerinde etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. S/b oranı arttıkça bu süre kısalmıştır. Bununla birlikte, s/b oranının artması, tüm karışımlar için plaka kohezyon değerlerini düşürmüştür. Karışımlardaki su miktarının artması, harcın plakanın yüzeyine yapışmasında azalmaya neden olmuştur. Sonuç olarak, harç karışımlarında su miktarı arttıkça kohezyon azalmıştır. Yüzey alanları neredeyse aynı olduğu için taban külünün işlenebilirlik üzerinde pek de etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. S/b oranındaki artış, karışımların çökmesini artırmıştır. Serbest basınç dayanımları taban külü katkısı ve s/b oranı arttıkça azalmıştır. Fakat 28 günlük dayanım sonuçlarına göre tüm karışımların serbest basınç dayanımı 5 MPa'dan yüksek çıkmıştır. Bu da geoteknik uygulamalarda oldukça yeterli bir dayanımdır.

Battal (2019)'un araştırdığı çalışmada, 0,8-1,0-1,2-1,4-1,6-1,8-2,4-3,0 s/b oranlarında %15 uçucu kül katkılı sıradan Portland çimentosu ve %15 uçucu kül katkılı ince taneli portland çimento (DMFC-800) harcının reolojik ve mekanik özelliklerini incelemiştir (Tablo 1). Marsh hunisi deneyi ile Normal Portland çimentosuna %15 uçucu kül eklendiğinde akıcılığın azaldığı gözlemlenmiştir. Maksimum akıcılık için s/b oranı en az 0,8 olmalıdır. DMFC-800 s/b oranı 1,6 ve üzerine çıktığında suyun viskozitesine yakın akış gözlemlenmiştir. Sedimentasyon testi ile; CEM 1 42,5 R ile hazırlanan harçlarda sedimentasyon değeri %5'ten fazla ve stabil olmadığı görülmüştür. DMFC-800 ile hazırlanan harç s/b=1,2 iken stabile en yakın haldeyken s/b oranı arttıkça stabilitesi azalmıştır. Çimento içerisine uçucu kül eklendiğinde stabilite değerlerinde azalma görülmüştür. En stabil DMFC+%15 uçucu kül iken en az çökme yapan DMFC-800 olduğu görülmüştür. Vicat İğnesi testi ile (s/b=0,5) en uzun priz başlama ve bitiş süresi CEM 1 42,5 R ile hazırlanan karışımlarda görülmüştür. Uçucu kül katkısı priz alma süresini uzatmıştır. Sıradan Portland çimentosu karışımlarında s/b=0,8 iken kolon serbest dayanım değerleri diğer s/b oranlarına göre yüksek olduğu ancak gevrek kırılma yaptığı görülmüştür. S/b=1'den büyük harçlarda ise uçucu kül katkısı dayanımı artırmıştır. En yüksek serbest basınç dayanımı %15 uçucu kül katkılı DMFC-800 harcında görülmüştür ve sünek kırılma gerçekleşmiştir. Nedeni küçük tane boyutunun elastikliği artırmasıdır. Ayrıca sıradan Portland çimentosuna göre ince taneli Portland çimentosu uçucu kül ile daha fazla etkileşim sağlamıştır. Çekme testi sonuçlarına göre ise s/b=0,8 iken her iki katkılı karışımda da maksimum değere ulaşılmıştır. S/b oranı arttıkça dayanım düşmüştür, ancak uçucu kül katkısı artan s/b oranına rağmen karışımda iyileşme sağlamıştır. Sonuç olarak uçucu kül katkısı çekme dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Serbest dayanımlarda istenen artışı sağlayamasa da betonun reolojik özelliklerini artırdığı görülmüştür. Yüksek s/b oranının beton dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür. Zhang ve ark. (2019)'un yaptığı çalışmada, 1,00-1,2-1,5-2,0 s/b oranlarında mikro uçucu kül, nano silika ve akışkanlaştırıcı katkılarıyla hazırladıkları karışımların reolojik ve 28 günlük basınç ve eğilme



dayanımlarını incelemiştir (Tablo 1). Mekanik ve reolojik performansı etkileyen en önemli parametrelerden birinin de tane boyutu olduğu belirtilmiş ve tane boyutu ölçümü lazer parçacık boyutu analizi ile ölçülmüştür. S/b oranı arttıkça görünür viskozite değeri önemli ölçüde azalmıştır. İlk 120 dakika boyunca uçucu kül içeriğinin artışı ile görünür viskozite değeri azalmıştır. Uçucu kül taze harcın akışkanlığını artırmıştır. Nano silika katkısı görünür viskoziteyi artırmıştır. Bunun nedeni, nano silika yüzey alanının çimentoya kıyasla daha fazla olması ve bu sayede suyu tutması ve taze harçtaki serbest suyun azalması ve sonuç olarak görünür viskozite artmıştır. Ancak %0,5'e kadar nano silika katkısı akışkanlığı iyileştirmiştir. Uçucu kül katkısı (ağırlıkça %0-10-20-30-40) arttıkça akış süresi azalmış ve nano silika katkısı (ağırlıkça %0,5-1,0-1,5-2,0) arttıkça akış süresi artmıştır. Uçucu kül ilavesi priz sürelerini uzatmıştır, çünkü uçucu kül erken hidrasyon sürecine katılmaz ve puzolanik etkisi yavaştır. Sonuç olarak harçların hidrasyon oranı düşmüş ve priz süresi uzamıştır. Nano silika etkisi ise priz başlangıç ve final sürelerini kısaltmıştır. Yani nano silika katkısı arttıkça priz süreleri azalmıştır. Bu davranış, nano silikanın hidrasyon sürecinde çekirdeklenme etkisi ve yüksek puzolanik reaksiyonuna bağlanabilir. Nano silika ilavesi, C-S-H jeller gibi etkili hidrasyon ürünlerinin jelleşme sürecini destekler böylece çökeltinin priz zamanını azaltır. Uçucu kül katkısı priz süresini geciktirmesine rağmen, nano silika ilave edildiğinde bu zıt etkiyi büyük ölçüde elimine edebilir. Mekanik özellikler sabit s/b=1,2 oranında ve akışkanlaştırıcı katkısı %1 iken belirlenmiştir. Nano silikanın harca erken dayanım kazandırdığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni boşlukları doldurması, C-S-H jeli oluşmasını sağlaması ve puzolanik etkiler olarak sıralanabilir. Maksimum eğilme dayanımı %1 nano silika + %20 mikro uçucu kül katkılı karışımda görülmüştür. Uçucu külün tüm oranlarında nano silika %1 iken eğilme dayanımı maksimum seviyeye ulaşmıştır. Basınç dayanımında maksimum değer uçucu kül katkısız %2 silis dumana katkılı karışımda görülmüştür. Uçucu kül katkısı arttıkça basınç dayanımı düşmüştür. Aksine nano silika katkısı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Ancak daha kararlı basınç artışı için nano silika katkısının %1'den düşük olması gerektiği görülmüştür.

Çınar ve ark. (2019)'un yaptığı araştırmada, 0,75-1,00-1,25-1,50 s/b oranlarındaki sıradan Portland çimentosuna hacimce %5, 10, 15, 20, 25 oranlarında mermer tozu katılarak oluşturulan karışımların reolojik özellikleri incelenmiştir. İşlenebilirlik özelliklerini belirlemek için Marsh hunisi akış testi, mini Slump testi ve plaka testi yapılmış, reolojik özelliklerini belirlemek içinse viskometre ve rheometre deneyleri yapılmıştır ( Tablo 1). SEM analizi ile mermer tozu ve çimento yapısı incelenmiş ve mermer tozunun köşeli parçacıklara sahip olduğu görülmüştür. Bütün karışımlar, tüm s/b oranları ve tüm mermer tozu içeriklerinde akma kalınlaşması (dilatant) davranışını göstermiştir. Mermer katkısının yüzde artışı ile dilatant davranışın arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum mermer tozunun yüksek su tutma kapasitesi ile açıklanabilir. Bu deneysel çalışma, kayma oranındaki artışın, akma kalınlaşması davranışındaki grout harçların görünür viskozitesinin katlanarak arttığını göstermiştir. Kayma oranı artırıldıkça çimento ve mermer tozu arasındaki düzensizlik artmıştır ve bu düzensizlik harçların görünür viskozitesinde artmaya sebep olabileceği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda su miktarındaki artışın kısmi topaklanmaya neden olabileceği görülmüştür. Mermer tozu katkısı arttıkça

plastik viskoziteyi artırırken, sabit mermer tozu katkısında artan s/b oranı viskoziteyi azaltmıştır. S/b oranı 1'den büyük olan karışımların plastik viskozitesi mermer tozu katkısından çok az etkilenmiştir. Mermer tozu yüzdesinin %15'e kadar artışı akışkanlığı etkilememiştir, ancak %15 üzerindeki katkısı mermer tozunun köşeli yapısından dolayı akış çapını azaltmıştır. Mermer tozu katkısı tüm s/b oranlarında Marsh hunisi akış süresini etkilememiştir. Sabit mermer tozu katkısı içeriğinde s/b artışı akış süresini azaltmıştır. Böylece mermer tozu katkısının özellikle  $s/b < 1$  iken akışkanlığı ve işlenebilirliği azalttığı sonucuna varılmıştır. Karışımdaki katkı miktarının artışı, düşük s/b oranlarında grout karışımının işlenebilirlik ve deforme olabirliğini düşürmüştür. Yani mermer tozu katkısının yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Jalal ve ark. (2015)'in yaptığı çalışmada, sabit  $s/b=0,38$  oranında sıradan Portland çimento yerine ağırlıkça %10 silis dumanı, %2 nano silika, %10 silis dumanı + %2 nano silika ve %5, 10, 15 uçucu kül ikame ederek oluşan karışımların reolojik ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Slump testi, V hunisi deneyi ve 7-28-90 günlük basınç ve eğilme testleri yapılmıştır ( Tablo 1). Uçucu kül katkısı %0'dan %15'e kadar arttıkça işlenebilirliği artırmıştır. Silis dumanı + nano silika içeren karışımlarda daha az çökme ve segregasyon gözlemlenmiştir. Ayrıca işlenebilirliği biraz düşürmüş, ancak beton kıvamını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. %2 nano silika katkısı işlenebilirliği önemli ölçüde değiştirmemiştir. Ancak silis dumanı ile birlikte kullanımı betonun reolojik özelliklerini iyileştirmiştir. Maksimum basınç ve eğilme dayanımı %10 silis dumanı + %2 nano silika katkılı karışımlarda görülmüştür ve 28 günlük dayanımında kazanabileceği maksimum dayanıma neredeyse ulaşmıştır. Minimum basınç ve eğilme dayanımı ise uçucu kül katkılı karışımda gözlenmiştir. Ancak 90 günlük dayanıma bakıldığında 28 günlük dayanımdan %35-40 daha fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak silis dumanı karışıma erken dayanım sağlarken, uçucu kül karışımın ilerleyen dönemlerinde dayanıma katkı sağlamıştır. Sonuç olarak; nano parçacıklar gözenekleri doldurup mukavemeti artırmıştır.

Asteris (2019)'in yaptığı çalışmada, çimento içeriğinin ağırlıkça %10 ve %20 oranında Metakaolin katkısı ile yer değiştirmiştir. Tek ekseli basınç deneyine bakılmıştır (Tablo 1). Yapılan deney sonuçlarına göre metakaolin bulunan numunelerin, metakaolin içermeyen referans numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sergilediği bulunmuştur. Düşük su/bağlayıcı oranlarında daha iyi dayanım sergilediği gözlemlenmiştir. Ultrasonik darbe hızı, yüksek elastikiyet sergileyen düşük s/b oranında en yüksek değer çıkmıştır. Ultrasonik darbe hızı, metakaolin katkısı arttıkça, yüksek s/b oranına sahip numunelerde hız değeri azalmış, düşük s/b oranına sahip numunelerde hız değerinde değişiklik olmamıştır. Daha düşük hızın, deformeyi artırabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, metakaolin katkısı basınç dayanımını geliştirmiştir. Basınç dayanımındaki artış, yüksek bağlayıcı konsantrasyonu içeren düşük veya orta s/b oranlarında (0,4, 0,7) daha belirgin gözlemlenmiştir. Ultrasonik darbe hızı için yüksek değer ölçülen numunelerin, daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek ultrasonik darbe hızına sahip numunelerin, en düşük s/b (0,4) oranına sahip olduğu görülmüştür. Metakaolin katkısı dinamik modül değerlerini artırmıştır.

Yazıcı ve ark. (2010)'un yaptığı çalışmada, ağırlıkça çimento %5, 10, 15 ve 20 oranlarında metakaolin ile yer değiştirilmiştir. Basınç dayanımına ve eğilme dayanımına zamanın ve değişik sıcaklıklarda kür yöntemlerinin etkisi incelenmiştir (Tablo 1). Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin yaklaşık olarak 650–800 °C arasındaki sıcaklıklarda kalsine edilmesi sonucunda elde edilen beyaz renkli yapay puzolanik bir üründür (Siddique ve Klaus, 2009). Harç karışımlarında su /bağlayıcı madde oranı 0,5 olarak alınmıştır. Hazırlanan numunelerin 1, 3, 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük kür süresi sonucunda basınç ve eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Hazırlanan örnekler 35 °C ılık su kürü, 80 °C'de kaynar su kürü ve otojen kürü içerisinde bekletilerek hızlandırılmış dayanımları saptanmıştır. Çimento yerine metakaolin ikame edilen numunelerden en yüksek eğilme ve basınç dayanımı %15 oranında metakaolin kullanılan harçta gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda metakaolin katkısının eğilme ve basınç dayanımlarına erken yaşlarda da katkısının olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hızlandırılmış farklı sıcaklıklardaki kür işlemleri ile sadece portland çimentosu içeren kontrol numunesinin farklı oranlarda metakaolin içeren harçlardan daha hızlı olarak erken dayanım sağladığı da görülmüştür.

Metakaolin yüksek oranda SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren bir malzemedir. Metakaolinin yapısında bulunan silis ve alüminin çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek yeni kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapılar ve alümina içeren fazlar (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>) oluşturur. Bu oluşan ürünler sayesinde üretilen beton veya harçlarda mekanik özelliklerde ve dayanıklılıkta artışlar görülür. Ayrıca metakaolin tanecikleri çok ince yapıda olduğu için harçta oluşan boşlukları doldurarak kompasiteyi artırmaktadır. Yine metakaolinin çok ince taneli yapısı, çimento hamurunun boşluk yapısını tıkayarak dayanımda olumlu yönde iyileşme sağlamaktadır (Klovo ve ark., 2016; Zhu ve ark., 2019; Güllü ve Agha, 2021).

Kanat (2018)'in yaptığı bir tez çalışmasında, Jet Grout uygulamalarında farklı s/b oranları, farklı çimento enjeksiyon çeşitleri ve farklı enjeksiyon basınçları kullanılarak, ince taneli çimento (DMFC-800), standart portland çimento ve standart portland çimentoya %10 oranında silis dumanı (mikro silika) eklenerek etkisi incelenmiştir. Marsh hunisi deneyi, vicat iğnesi deneyi ve sedimantasyon deneyleri uygulanmıştır (Tablo 1). 28 gün sonunda numuneler üzerinde permeabilite ve serbest basınç deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, numunelere uygulanan Marsh hunisi deneylerinde en uygun akış süresinin 26 saniye olduğu gözlemlenmiştir. Standart portland çimentosuna %10 silis dumanının ilavesi çimentonun akışkanlığını azaltmaktadır. s/b oranı 0,75 olduğunda akışkanlık azalmakta, bu değerden daha küçük oranlarda enjeksiyonun akışkanlığı azalarak viskozite değeri artmaktadır. 26 saniye sınır değeri için en yüksek akışkanlığı elde edebilmek için s/b oranının 1,5 olması gerekmektedir. Silis dumanı çimentonun suyla olan reaksiyonunun ürünü olan kalsiyum hidroksitle Ca(OH)<sub>2</sub> tepkimeye girerek C-S-H jeli oluşturur. C-S-H jeli betonda dayanımı sağlayan ve oluşması istenen üründür. Silis dumanı küçük ve ince yapılı tanecik boyutu sayesinde artan su ihtiyacı, tanecikler arasındaki bağlantı ve jelleşme (C-S-H bağ yapısı) açısından önemli olmaktadır. Fakat su muhtevası düşük olduğu zaman jelleşme ve bağlantı daha düşük seviyede kalmaktadır. Silis dumanı,

suyun çimento ile reaksiyonunun ürünü olan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi diğer puzolanik malzemelere göre daha hızlı tepkimeye girerek erken dayanım kazandırır. Silis dumanı standart çimentonun stabilitesini arttırmış, çökelmeyi azaltmıştır. %10 silis dumanı karışımında 0,9 s/b oranı için karışım sabit iken, s/b oranı 1,0 olduğu zaman çimento şerbetinin stabilitesi bozulmakta ve çökelmeye başlamaktadır. Silis dumanı katkısı harçların geç priz almasına sebep olmaktadır. %10 silis dumanı katkısı ile oluşturulan harçların s/b oranı 1,25 olan numunenin dayanımı en büyük olduğu görülmektedir. 1,0 ve 1,5 s/b oranları için daha düşük dayanımlar gözlemlenmiştir. Ancak bu s/b oranlarında numune daha fazla deformasyon yapabilme özelliği kazanmıştır. Numuneler yaklaşık %2,5 birim deformasyon değerine kadar dayanım göstermişlerdir. Ancak s/b oranı 1,25 olan enjeksiyon şerbeti ile oluşturulan kolonlarda birim deformasyon seviyesi %1,2 seviyelerinde kalmıştır. Silis dumanının küçük tanecik boyutu ile malzemelerin elastikiyet özelliğini arttırdığını göstermektedir. İnce taneli çimento, normal portland çimentosu ve normal portland çimentosuna %10 silis dumanı eklenen enjeksiyon karışımı ile oluşturulan jet grout kazıklarının içinde maksimum dayanım %10 silis dumanı katkısı ile elde edilmiştir. En fazla kırılma davranış %10 silis dumanı ile hazırlanan numuneler için elde edilmiştir. %10 Silis dumanı enjeksiyonları ile hazırlanan kolonların deformasyon yapabilme özelliği artmıştır. Silis dumanının çok ince ve küçük boyutu ile tanecikler arasındaki boşlukları doldurarak su geçirimsizliğini azaltması beklenmektedir. %10 silis dumanı katkılı enjeksiyon karışımları ile hazırlanan kolonların su geçirimsizliğini azaltma oranları beklenildiği kadar iyi olmamıştır. En düşük geçirimsizlik katsayısı s/b oranının 1,50 olduğu durumda elde edilmiştir. Özellikle %10 silis dumanı katkılı enjeksiyonlarının daha yüksek s/b oranları için çalışmanın genişletilmesi uygun olacaktır.

Çınar (2019)'un araştırdığı bir tez çalışmasında, çimento yerine atık mermer tozu ve uçucu kül ikame edilmiş, çimento bazlı enjeksiyon karışımlarının yüksek su/bağlayıcı (s/b) oranlarında reolojik, işlenebilirlik, taze ve sertleştirilmiş özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Tablo 1). Çimento esaslı enjeksiyon harçlarının üretiminde dört seri karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan ilk seride çimentoya ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 oranında atık mermer tozu ilave edilmiştir. İkinci seride çimentoya ağırlıkça %25 (sabit) oranında uçucu kül, %10, 15, 20, 25, 30 oranlarında atık mermer tozu ilave edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü seri karışımında ise ilk iki serideki oranlar sabit kalmak koşulu ile tüm karışım oranına ağırlıkça %20 oranında kil eklenmiştir. Her seride suyun bağlayıcıya oranı 0,75-1,00-1,25 ve 1,5 olarak seçilmiştir. Plaka kohezyon, marsh hunisi akış zamanı, mini slump akış çapı ve silindirik dönen rheometre testi, 3, 7, 28 günlerde basınç deneyleri yapılmıştır (Tablo 1). Kontrol numunelerinin içine herhangi bir katkı maddesi ilave edilmemiştir. Yapılan deneylerin sonucunda atık mermer tozu miktarının artışı ile görünür viskozite de artmıştır. Bu durum, mermer tozunun yüksek su tutma kapasitesi ile açıklanabilir. İşlenebilirlik ve akışkanlık mermer tozu katkısıyla azalmıştır. Harçların reolojik özellikleri atık mermer tozu eklenmesiyle iyileşmiştir. Tüm mermer atık tozu oranları ve su/bağlayıcı oranlarında harçların güçlü kesme kalınlaşması davranışı elde edilmiştir. Atık mermer tozu, %15'e varan oranlarda ikame çimentoda kullanıma uygun olabilir.

Bu nedenle CO<sub>2</sub> emisyonları %15 oranında azalmış ve maliyet bu oranda azalmıştır. Atık mermer tozu+uçucu kül katkısı da güçlü kesme kalınlaşması göstermiştir. Mermer tozunun akışkanlığı azalttığı, uçucu külün akışkanlığı artırdığı gözlemlenmiştir. Taze özellikler test sonuçlarına göre; atık mermer tozu ve uçucu kül, ikame çimentoda %20 ve %25 oranlarına kadar kullanıma uygun olabilir. Bu nedenle CO<sub>2</sub> emisyonları %45 oranında azalmış ve maliyet bu oranda azalmıştır. Atık mermer tozu katkılı harçlarda, su/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüştür. Mermer tozu, düşük puzolanik reaksiyon davranışı sergilediği için erken dayanımda düşüş görülmüştür. Zemin betonlarında kür süresi arttıkça basınç dayanımında artış olmuştur. Bu çalışma için hazırlanan karışımların tek eksenli basınç dayanımı test sonuçları, 400 kPa ve 5,5 MPa aralığında çıkmıştır. 28 günlük kür süresi sonucunda yüksek su/bağlayıcı oranı (1,5) dışında neredeyse tüm s/b oranları ve tüm mermer tozu ve mermer tozu+uçucu kül numunelerin basınç dayanımı 1 MPa'dan büyük olduğu gözlemlenmiştir. Geoteknik uygulamalarda sorunlu zeminlerin stabilizasyonu için 1 MPa basınç dayanımı yüksek değer olarak kabul edildiğinden, atık mermer tozu ve atık mermer tozu+uçucu külün sorunlu killi zeminlerin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kullanılabileceği açıkça görülmektedir. Rana ve ark. (2015)'in yaptığı bir çalışmada, mermer bulamacı kullanarak ürettikleri betonu incelemişlerdir. Çimento yerine %5, 10, 15, 20, 25 mermer bulamacı ikame edilmiştir. Kontrol numunesinin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 36, 43 ve 51 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum basınç dayanımı %5 mermer tozu bulamacı ikame edilen numune görülmüş, 7, 28, 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 50, 42,5 ve 35,5 MPa olarak ölçülmüştür. Mermer bulamacının test günleri uzadıkça basınç dayanımını iyileştirme yüzdesi azalmıştır. Eğilme dayanımları incelendiğinde kontrol numunesi sırasıyla 6,8- 6,5 ve 5,4 MPa ölçülmüş, kontrol numunesine en yakın ikame %5 mermer bulamacı olduğu görülmüş ve eğilme dayanımı sırasıyla 6,5-6,4 ve 5,4 MPa ölçülmüştür.

Rodrigues ve ark. (2015)'in araştırdığı bir çalışmada, çimento yerine %5, 10, 20 mermer tozu ikame ederek ürettikleri beton numunenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik özellikler arasında, ultrasonik darbe hızı, ikame oranına en az duyarlıydı ve aşınma direncinde maksimum değişim %20 ikame oranına %4,4 azalması olarak ölçülmüştür. Mermer tozu miktarının değiştirilmesinin, azalan basınç dayanımını telafi ettiğini iddia etmişlerdir. %10'a varan mermer tozu ikame oranı, basınç dayanımında bir azalma yaratmamıştır. Ancak, %20 değiştirme oranında, basınç dayanımı %25 azalmıştır. Her grupta 7, 28 ve 56. günlerde tek eksenli basınç dayanımı ölçülmüş, mermer tozu ikamesinin değiştirme yüzdesinin basınç dayanımı azaltıcı bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır. Kaydedilen en büyük düşüş %33,9 olmuştur. Reddedilen basınç dayanımı ile birlikte, maksimum %30,9'a yükselen 28 günlük yarma çekme dayanımında bir düşüş ölçülmüştür. Bu oranlar, deneylerinde gösterilen grafıklere yakındır.

Çelik ve ark. (2015)'nin yaptığı bir araştırmada, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında pirinç kabuğu külü katkısı ve üç farklı su/bağlayıcı (0,75, 1,00 ve 1,25) oranlarında pirinç kabuğu külü katkılı çimento bazlı grout karışımların reolojik ve akışkanlık özellikleri incelenmiştir. Karışımların

akışkanlık özellikleri (marsh hunisi akma süresi, plaka kohezyon deneyi ve mini slump çapı deneyi), plastik viskozitesi, görünür vizkozitesi ve akma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır (Tablo 2). Pirinç kabuğu külü, fabrikada atık bir malzeme olarak üretilmekte ve paketlenerek satılmaktadır. Pirinç kabuğu külleri, pirinç kabuklarının 500-600 °C sıcaklıklarında yakılmasıyla elde edilmiştir. Pirinç kabuğu külü içeriğinde bulundurduğu yüksek orandaki SiO<sub>2</sub> miktarından dolayı puzolanik bir malzemedir. Pirinç kabuğu külü miktarındaki artış, su/bağlayıcı oranı düşük olan karışımlarda akışkanlığı azaltmakta, yüksek olan değerlerde ise fazla etkilememektedir. Pirinç kabuğu külü miktarındaki artış plastik viskozite değerini artırmıştır. Diğer taraftan su/bağlayıcı oranındaki artış plastik viskoziteyi azaltmıştır. Farklı su/bağlayıcı oranlarında pirinç kabuğu külü katkısının, groutlar'ın reolojik ve akışkanlık özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Pirinç kabuğu külü miktarındaki artış mini slump akma çapını düşürmüştür. Su/bağlayıcı oranındaki artış tüm karışımlarda akma gerilmesini düşürmüştür. Pirinç kabuğu külü katkılı grout karışımlarında su/bağlayıcı oranındaki artış grout karışımlarının akışkanlığını ve işlenebilirliğini önemli oranlarda etkilemiştir.

Zaki ve Sola (2020)'nin yaptığı bir araştırmada, çimento yerine ağırlıkça %0, 2, 4, 6, 8, 10 ve 15 oranlarda pirinç kabuğu külü kullanılarak 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımı deneyi ve 56 günlük kür süresi sonunda donma-çözülme ve ultrasonik hız tayini deneyleri de yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranı sabit 0,50 oranında kullanılmıştır. Harçlarda pirinç kabuğu külü oranı arttıkça ultrasonik hız dalgalarında düşüş görülmüştür. Harçlarda pirinç kabuğu külü miktarı arttıkça basınç dayanımı yükselmiştir. Araştırılan tüm numuneler için maksimum basınç dayanımı %8 pirinç kabuğu külü oranında gözlemlenmiştir (Tablo 2). %8 oranından sonra dayanımda azalma görülmüştür. 28 günlük kür süresi sonunda %8 oranında pirinç kabuğu külü ikamesi basınç dayanım sonucu 40 MPa'dan yüksek çıkmıştır. Kür süresi arttıkça dayanımında arttığı gözlemlenmiştir. Referans numunelerde donma-çözülme işlemlerinden sonra dayanımlarında %15 oranında düşüş, %8 ve üstü pirinç kabuğu külü içeren numunelerde donma-çözülme işleminden sonra dayanımlarında %25 oranında düşüş görülmüştür. Numunelerde pirinç kabuğu külü oranı yükseldikçe ses dalgasının hızında düşüş gözlemlenmiştir. Bir malzemenin yoğunluğu az ise boşluğu fazla olacaktır, fazla boşluklu malzemelerde ses dalgasının hızı daha uzun olmaktadır. Bu sebeple, deneylerde pirinç kabuğu külünün yoğunluğu çimentodan daha düşük olduğundan ve daha fazla boşluk üretmesinden ses dalga hızları daha düşük olmuştur.

Pirinç kabuğu külü içeriğindeki yüksek oranda silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) miktarından dolayı puzolanik bir malzemedir. Pirinç kabuğu külü, öğütülmüş pirinç kabuğunun ısıtılması sonucu elde edilir. Pirinç kabuğu külü bir tarımsal organik atıktır. Isıtıldığında, pişirme aşamasına ve sıcaklığına bağlı olarak yapısı kristalik ya da amorf yapıya sahip olabilir. Isıtma sıcaklığı 800°C'den fazla olduğunda kristalik yapıya sahip pirinç kabuğu külü oluşur. Oluşan kristalik pirinç kabuğu külü ise genellikle zayıf, düşük puzolanik özellik gösterir (Nagataki, 1994). Isıtma sıcaklığı 500-800°C aralığında olursa, pirinç kabuğu külü amorf yapıya sahip olur. Amorf yapıya sahip silika içeriği genellikle kristalik olmayan

pirinç kabuğu külünde gözlemlenir (Nagataki, 1994; Mehta ve Monteiro, 2014). Amorf pirinç kabuğu külü, yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içeriğinden dolayı genellikle yüksek puzolanik özellik gösterir. Bundan dolayı, yüksek dayanımlı, performanslı ve uygun işlenebilirliğe sahip beton üretimi için 500-800 °C aralığında ısıtılmış amorf pirinç kabuğu külü yaygın olarak katkı malzemesi olarak kullanılmıştır (Kalapathy, 2000; Bahri ve ark., 2019). Pirinç kabuğu yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen, maliyet düşüklüğü, ulaşım kolaylığı gibi sebeplerden geleneksel ürünlere iyi bir seçenek olarak görülmüştür.

**Tablo 1.** Geçmiş çalışmalarda kullanılan atık malzemelerin oranları ve yapılan deneyler

Kullanılan Katkı Malzemesi	Katkı Oranı	S/b oranı	Optimum s/b oranı	Yapılan Deneyler	Referans
<b>Silis Dumanı</b>	%10	(0,85~1,5)	1,25	Permeabilite, Elektron tarama mikroskobu (SEM), Marsh hunisi testi, sedimentasyon testi ve Vicat iğnesi testi, Serbest Basınç Mukavemeti ve Yarmada Çekme Dayanımı testi	Olgun ve ark., 2021
<b>Uçucu kül %5-%10 Silis Dumanı %10-20 Yüksek Fırın Cürufu %10-40 Akışkanlaştırıcı</b>	%20 %20 %2	0,8	0,8	Serbest Basınç Deneyi, Brezilya Deneyi, Marsh hunisi, Mini slump	Çalı, 2020
<b>Kazan Altı Taban Külü</b>	%5, 10, 15, 20, 25 ve %30	0,75, 1,00, 1,25, 1,50	1,00'den az	Marsh huni akış süresi, Plaka kohezyonu testi, Mini slump deneyi, Viskozite ölçüm testi, Serbest Basınç Dayanımı,	Akçuru, 2020; Çelik ve Akçuru, 2020
<b>CEM 1 42,5 R + %15 Uçucu Kül DMFC-800 + %15 Uçucu Kül</b>	%15 %15	0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,8, 2,4, 3,0	0,8	Marsh hunisi, Sedimentasyon, Vicat iğnesi, Serbest Basınç Dayanımı, Yarmada Çekme Dayanımı testi,	Battal ve Demiröz, 2018; Battal, 2019
<b>Mikro İnce Uçucu Kül Nano silika Süper Akışkanlaştırıcı</b>	%0-10-20-30-40 %0-10-20-30-40 %0-0,5-1,0-1,5-2,0	1,0, 1,2, 1,5, 2,0	1,2	Marsh hunisi, Sedimentasyon, Vicat iğnesi, Viskozite deneyi, Penetrometre (Erken dayanım gelişimi, 28 gün), Lazer parçacık boyutu analizör deneyi	Zhang ve Malhotra, 2019

<b>Mermer Tozu</b>	%5, 10, 15, 20, 25 (hacimce)	0,75, 1,00, 1,25, 1,50		Marsh hunisi, Mini slump deneyi, Plaka kohezyon deneyi, Viskozite testi, Akma gerilimi deneyi,	Çınar, 2019
<b>Silis Dumanı</b>	%10 SD	0,38	0,38	Slump akış deneyi,	Jalal ve
<b>Nano silika</b>	%2 NS			Marsh hunisi testi,	ark., 2015
<b>Silis Dumanı + Nano silika</b>	%10 SD+ %2 NS			Basınç deneyi (7-28-90 gün), Eğilme deneyi (7-28-90 gün),	
<b>Uçucu Kül</b>	%5-10-15 UK			Segregasyon deneyi	
<b>Metakaolin %5, 10, 15 ve 20 oranlarında çimento yerine ikame edilmiş %0,12, %0,22 süper akışkanlaştırıcı</b>	%15 metakaolin	0,5	0,5	Ortadan yüklemeli eğilme deneyi, tek eksenli basınç deneyleri, 3 farklı kür içinde (35°C ılık su, 80°C de kaynar su ve otojen küre ) tutulmuşlardır.	Yazıcı ve ark., 2010
<b>Metakaolin Süper Akışkanlaştırıcı</b>	%10-20 MK %2 SA	0,4, 0,7, 1,0	0,4	Tek eksenli basınç deneyi, Ultrasonik darbe hızı deneyi (UPV)	Asteris, 2017
<b>Mikro Silika (Silis Dumanı) ağırlıkça normal çimento yerine ikame edilmiştir.</b>	%10	0,75, 0,8 0,85, 0,9 1,0, 1,25 1,50, 2,0	0,9 (sedimentasyon) 1,25 (basınç dayanımı) 1,5 (akışkanlık, geçirimsizlik elastikiyet)	Marsh hunisi, Vicat iğnesi deneyi, Sedimentasyon deneyleri, Serbest basınç deneyi Permeabilite deneyleri	Kanat, 2018
<b>Atık Mermer tozu %5, 10, 15, 20, 25 Uçucu Kül %25 Kil %20</b>	%15'e kadar atık mermer tozu %20-25 uçucu kül	0,75 1,00, 1,25, 1,5	1,25	Plaka kohezyon, Marsh hunisi, Mini slump, Silindirik dönen rheometre, Basınç deneyleri	Çınar, 2019
<b>%5, 10, 20, 30 pirinç kabuğu külü ilavesi</b>		0,75 1 1,25	1,25	Plaka kohezyon, Marsh hunisi, Mini slump deneyi,	Rana ve ark., 2015



<b>%0, 2, 4, 6, 8, 10, 15 pirinç kabuğu külü ikamesi</b>	%8	0,5	0,5	Basınç dayanımı deneyi, donma-çözülme ve ultrasonik hız tayini deneyleri	Rodrigues ve ark., 2015
--	----	-----	-----	--	-------------------------------

#### **4. Çimento Yerine İkame Edilen Atık Malzemelerin Jet Grout Karışımlarının Özelliklerine Etkisi**

Yapılan literatür taramasının sonucunda, Jet Grout uygulamasında çimento yerine sanayi ve endüstriyel atıkları olan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kazan altı taban külü, pirinç kabuğu külü ve mermer tozu belli oranlarda ikame edilmesi araştırılmıştır. Reolojik özellikleri belirlerken marsh hunisi ve mini slump deneyinin yanı sıra bazı araştırmacılar sedimantasyon deneyi, vicat iğnesi testi, plaka kohezyonu deneyi, permeabilite deneyi ve elektron tarama mikroskobu (SEM) gibi deney yöntemleri uygulamıştır. Mekanik özellikleri belirlemede basınç dayanımı testinin yanında çekme dayanım testi, akma gerilimi deneyi, ultrasonik darbe hızı deneyi (UPV), eğilme dayanım deneyleri araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Sonuç olarak bu derleme makalede, atıkların reolojik ve mekanik özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Geoteknik uygulamalarda zemin iyileştirmesi için dayanım özelliklerinin yeterli olduğu, atık malzeme kullanımının ekonomik ve ekolojik fayda sağlayacağı görülmüştür.

##### **4.1 Kullanılan Atık Malzemelerin Grout Karışımlarının Reolojik Özelliklerine Etkisi**

Silis dumanının yapısı çok ince taneli olduğu gözlemlenmiş, böylece boşlukları doldurması sayesinde harcın akıcılığını azaltmış, viskozitesini artırmıştır. Priz alma süresini artırmıştır. İşlenebilirlik azalmıştır. Yüksek oranlarda su/bağlayıcı ihtiyacı doğmuş, su/bağlayıcı oranı 0,9 iken çökelme azalmış, stabilite artmıştır. Sedimantasyon için s/b oranının 0,9, akıcılık ve işlenebilirlik için s/b oranının 1,25-1,50 olması gerektiği gözlemlenmiştir (Jalal ve ark., 2015; Kanat, 2018; Çalı, 2020; Olgun ve ark., 2021). Silis dumanı katkısı, akıcılığı azaltmış ve priz alma süresini geciktirmiş, bunun için süper akışkanlaştırıcı kullanılarak önlem alınabileceği gözlemlenmiştir. %10 Silis dumanının, çimentonun yerine ikame edilmesinin uygun olduğu görülmüştür (Tablo 2).

Uçucu kül erken hidratasyon sürecine katılmadığı ve puzolanik etkisinin az olduğu için priz alma süresini artırmıştır. Taze harcın (120. dakika) akışkanlığını artırmıştır. Uçucu külün %15 oranına kadar ikame edilmesi işlenebilirliği iyileştirdiği görülmüştür (Tablo 2). Daha sonrasında harcın akıcılığını azaltmış, su ihtiyacını artırmıştır. Su/bağlayıcı oranının en az 0,8 olması gerektiği saptanmıştır. Su/bağlayıcı oranı arttıkça da stabilite azalmış, çökelme artmıştır. Uçucu külün geç priz alma süresi sorununu, nano silika ilave ederek bu etkiyi büyük ölçüde elimine edilebileceği

görülmüştür (Jalal ve ark., 2015; Battal, 2018; Battal ve Demiröz, 2019; Zhang ve ark., 2019; Çalı, 2020).

Kazan altı taban külünün yüzey alanı ile çimentonun yüzey alanı neredeyse aynı olduğu için işlenebilirlik üzerinde pek etkisi olmadığı görülmüştür. Taban külü katkısı, işlenebilirliği ve akıcılığı azaltmıştır. Su/bağlayıcı oranı arttıkça akıcılık artmıştır. Su/bağlayıcı oranı arttıkça, plaka kohezyon değeri azalmıştır. Su muhtevası arttıkça çökeltme miktarı artmıştır (Tablo 2) (Akçuru 2020, Çelik ve Akçuru, 2020).

Nano silikanın yüzey alanının çimentoya kıyasla daha fazla olmasından suyu tutması ve taze harçtaki serbest suyun azalması sonucu viskozite artmıştır. Nano silika ilavesi, hidrasyon sürecinde çekirdeklenme etkisi ve yüksek puzolanik reaksiyonu göstermiş C-S-H jeller gibi etkili hidrasyon ürünlerinin jelleşme sürecini destekler, böylece çökeltinin priz zamanını azaltmıştır. %0,5'e kadar nano silika katkısı akışkanlığı iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Silis dumanı ile birlikte kullanımı betonun reolojik özelliklerini iyileştirmiştir (Tablo 2) (Jalal ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2019).

Yüksek fırın cürufu ilave edilen karışımlarda işlenebilirlik artmıştır (Tablo 2). Yüksek fırın cürufu su ile tepkimeye girdiğinde, akışkanlaştırıcı kimliğine bürünerek şerbeti n içinde serbest kalan suyun yüzeye çıkması harcın tepkimeye girmeden ayrışmasına ve gerekli C-H bağlarının oluşturulamamasına neden olduğu görülmüştür (Çalı, 2020).

Atık mermer tozu miktarının artışı ile görünür viskozite artmıştır (Tablo 2). İşlenebilirlik ve akışkanlık mermer tozu katkısıyla azalmıştır. Atık mermer tozuyla birlikte kullanılan uçucu külün akışkanlığı artırdığı gözlemlenmiştir (Rana ve ark., 2015; Rodriguiues ve ark., 2015; Çınar, 2019).

Pirinç kabuğu külü yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içerdiğinden dolayı, uygun ısıtılma derecesi sonucu amorf yapıda olan pirinç kabuğu külü genellikle yüksek puzolanik reaksiyon gösterir. Pirinç kabuğu külü katkısı düşük su/bağlayıcı oranlı harçlarda akışkanlığı azaltmış, plastik viskozite değerini artırmıştır. Ayrıca yüksek su/bağlayıcı oranı, plastik viskoziteyi azaltmış, işlenebilirliği artırmıştır. Pirinç kabuğu külü miktarındaki artış mini slump akma çapını düşürmüştür. Artan su/bağlayıcı oranı tüm karışımlarda akma gerilmesini düşürmüştür. Pirinç kabuğu külü çimentodan daha düşük yoğunluğa sahip olması sebebiyle harçlarda daha fazla boşluk oluşturmuş ve bu sebepten ses dalga hızları daha düşük çıkmıştır (Tablo 2). Pirinç kabuğu yenilenebilirliği, biyolojik olarak parçalanabildiği, maliyet düşüklüğü, ulaşım kolaylığı gibi sebeplerden geleneksel ürünlere iyi bir seçenek olarak görülmüştür (Zhang ve ark., 1996; Çelik, 2015; Zaki ve Sola, 2020).

#### 4.2 Kullanılan Atık Malzemelerin Grout Karışımlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

Silis dumanının yapısının çok ince taneli olduğu gözlemlenmiş, küçük tanecik yapısı sayesinde boşlukları doldurup, betonda erken dayanım sağlamıştır. Basınç dayanımını 2 kat artırmıştır. Çekme dayanımına da ufak katkısı olmuştur. Yüksek oranlarda su/bağlayıcı ihtiyacı doğmuş, su muhtevası arttıkça da betonun mekanik özelliklerinde düşüş gözlemlenmiştir (Tablo 2) (Jalal ve ark., 2015; Kanat, 2018; Olgun ve ark., 2021; Çalı, 2020). Silis dumanı katkısının, dayanım artırma özelliği

sayesinde önemli bir katkı malzemesi olduğu görülmüş, %10 silis dumanının, çimentonun yerine ikame edilmesinin uygun olduğu görülmüştür.

Uçucu külün uzun vadede basınç dayanımını artırdığı, çekme dayanımına da faydası olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu kül katkısının ikame oranının önemli bir parametre olduğu, optimum orandan (%20) fazla uçucu kül katkısı katılması basınç dayanımını düşürdüğü söylenebilir. Yüksek s/b oranında uçucu kül kullanımının beton dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür (Tablo 2) (Jalal, 2015; Battal, 2018; Battal, 2019; Zhang ve ark., 2019; Çalı, 2020).

Kazan altı taban külü katkısı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır (Tablo 2). Taban külü katkısı su ihtiyacını artırmış, s/b oranı arttıkça da serbest basınç dayanımı düşmektedir. Fakat 28 günlük dayanım sonuçlarına göre tüm karışımların serbest basınç dayanımı 5 MPa'dan yüksek çıkmıştır. Bu da geoteknik uygulamalarda oldukça yeterli bir dayanımdır (Akçuru, 2020; Çelik ve Akçuru, 2020).

Nano silika katkısının harca erken dayanım kazandırdığı gözlemlenmiştir (Tablo 2). Bunun nedeni boşlukları doldurması, C-S-H jeli oluşmasını sağlaması ve puzolanik etkiler olarak sıralanmıştır. Nano silika katkısı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Ancak daha kararlı basınç artışı için nano silika katkısının %1'den düşük olması gerektiği görülmüştür. Nano silikanın silis dumanıyla karışımında, harç erken dayanım sağlarken, uçucu kül karışımında ilerleyen dönemlerinde dayanıma katkı sağlamıştır. Sonuç olarak; nano parçacıklar gözenekleri doldurup mukavemeti artırmıştır (Jalal ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2019).

Metakaolin katkısı eklenecek numunelerin daha yüksek basınç dayanımı sergilediği bulunmuştur. Düşük su/bağlayıcı oranlarında daha iyi dayanım sergilediği gözlemlenmiştir. Metakaolin katkısı arttıkça, ultra sonik darbe hızı azalmıştır. Daha düşük hızın, deformeyi artırabileceği belirtilmiştir. Metakaolin katkısı yüksek bağlayıcı konsantrasyonu içeren düşük veya orta s/b oranlarında (0,4, 0,7) basınç dayanımında artış göstermiştir. Çimento yerine metakaolin kullanılan karışımlarda en yüksek eğilme ve basınç dayanımları %15 oranında metakaolin kullanılan numunelerde gözlemlenmiştir. Metakaolin yüksek oranda silis ve alüminin içerdiği için çimentonun su ile tepkimesi sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$  ile tepkimeye girerek yeni kalsiyum silikat hidrat (C-S-H jel) yapılar ve alümina içeren fazlar oluşturur. Bu oluşan ürünler sayesinde üretilen beton veya harçlarda dayanım, dayanıklılık ve mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiştir. Metakaolinin çok ince taneli yapısı, harç içerisindeki boşlukları doldurarak dayanımda olumlu yönde iyileşme sağlamaktadır (Tablo 2) (Yazıcı ve ark., 2010; Jalal ve ark., 2015; Klovos ve ark., 2016; Asteris, 2019; Zhu ve ark., 2019; Güllü ve Agha, 2021)

Yüksek fırın cürufu katkısı, uzun vadede dayanımı artırmıştır (Tablo 2). Yüksek fırın cürufu ile akışkanlaştırıcı birlikte kullanıldığında dayanım düşmüştür. Yüksek fırın cürufunun silis dumanı ile birlikte kullanılması dayanımda artışı sağlamıştır, ayrıca süneklik özelliği katarak uzun sürede kırılıp deforme olmasını sağlamıştır (Çalı, 2020).

Tüm mermer atık tozu oranları ve su/bağlayıcı oranlarında harçların güçlü kesme kalınlaşması davranışı elde edilmiştir. Atık mermer tozu katkılı harçlarda, su/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüştür (Tablo 2). Zemin betonlarında kür süresi arttıkça basınç

dayanımında artış olmuştur. Atık mermer bulamacanın %5 oranında çimento yerine ikame edilmesi maksimum basınç dayanımı sergilemiş (Tablo 1), eğilme dayanımında ise referans numuneye en yakın değeri yine %5 mermer bulamacalı numune göstermiştir. 28 günlük basınç dayanımında neredeyse tüm karışımların basınç değeri 1 Mpa'dan büyük çıkmış, geoteknik uygulamalarda zemin iyileştirme için bu dayanımın yeterli olduğu görülmüştür (Rana ve ark., 2015; Rodrigues ve ark., 2015; Çınar, 2019). Pirinç kabuğu külü miktarı arttıkça basınç dayanımında yükselme gözlemlenmiştir, maksimum basınç dayanımı %8 oranında pirinç kabuğu külü seviyesinde bulunmuştur (Tablo 2), %8 oranından sonra dayanımda azalma görülmüştür. Pirinç kabuğu külü içeren numunelerde donma-çözülme işleminden sonra dayanımlarında düşüş görülmüştür. 28 günlük kürlenme süresi sonunda %8 oranında pirinç kabuğu külü ikamesi basınç dayanım sonucu 40 MPa dan yüksek çıkmıştır. Kür süresi arttıkça dayanımın da arttığı gözlemlenmiştir (Çelik ve ark., 2015; Zaki ve Sola, 2020). Zemin iyileştirme için pirinç kabuğu külünün kullanılmasının yeterli basınç dayanımını sağladığı, kullanılabilir olduğu görülmüştür.

**Tablo 2.** Geçmiş çalışmalarda kullanılan atık malzemelerin jet groutun mekanik ve reolojik özelliğine etkisi

Kullanılan Katkı Malzemesi	Mekanik Özellikler	Reolojik Özellikler	Referans
<b>Silis Dumanı</b>	+Silis dumanı katkısı basınç dayanımını katkısız harca göre yaklaşık 2 kat artırmıştır. +Ayrıca çekme dayanımı da katkısız harca göre %10 silis dumanı katkılı harçta oldukça yüksek çıkmıştır. +Daha düşük s/b oranlarında su ihtiyacı arttığı için sertleşmiş betonun mekanik özelliklerinde düşüş görülmüştür.	+Silis dumanının priz alma süresini geciktirdiği gözlemlenmiştir.	Olgun ve ark., 2021
<b>Uçucu kül %5-%10 Silis Dumanı %10-20 Yüksek Fırın Cürufu %10-40 Akışkanlaştırıcı</b>	+Silis dumanı betonda erken dayanım sağlarken, uçucu kül katkısı uzun vadede dayanımı olumlu etkilemiştir. +Yüksek fırın cürufu katkısı ise tıpkı uçucu kül gibi uzun vadede olumlu sonuç sağlamaktadır. +İkame katkı oranı (YFC+SD+UK) %30'u geçmesi dayanıma olumsuz yansımaktadır. +YFC'nin tek başına kullanımı kısa vadede dayanıma fayda etmemektedir.	+Yüksek fırın cürufu ilave edilen karışımlarda işlenebilme artmıştır. +Silis dumanı katkısında su ihtiyacı arttığı için akışkanlaştırıcı katılmayan numunelerde dayanımlar düşük çıkmıştır.	Çalı, 2020
<b>Kazan Altı Taban Külü %5, 10, 15, 20, 25 ve</b>	+28 günlük kür süresinin tamamı için, tüm çökeltilerin Serbest basınç dayanımı değerleri 5 MPa'dan fazladır. Zeminler	+KATK katkısının işlenebilirliğe etkisi olmadığı gözlenmiştir. + s/b oranı arttıkça, akışkanlığın artması	Akçuru, 2020; Çelik ve

<b>%30</b>	<p> için 5 MPa basınç dayanımı değeri geoteknik uygulamalarda oldukça yüksek bir değer olduğu kabul edilebildiği için (Hausmann, 1990), KATK'nün sorunlu kumlu zeminlerin iyileştirilmesi için bir katkı maddesi olarak kullanılabilir.</p> <p>+s/b oranı arttıkça serbest basınç dayanımı düşmektedir.</p> <p>+Bağlayıcıya KATK eklenmesi, tüm kür sürelerinde numunelerinin hesaplanan ortalama basınç dayanımı için referans numunelere kıyasla daha düşük değerlerle sonuçlanmıştır.</p>	<p>nedeniyle enjeksiyon basıncı önemli ölçüde azalmıştır.</p>	<p>Akçuru, 2020</p>
<b>CEM 1 42,5 R + %15 Uçucu Kül DMFC-800 + %15 Uçucu Kül</b>	<p>+s/b=0,8 iken kolon dayanım değerleri yüksektir. Ayrıca s/b=0,8 iken maksimum kırılma yükü ve maksimum gerilme değerine sahiptir.</p> <p>+s/b=1'den büyük harçlarda UK dayanımı artırmıştır.</p> <p>+UK katkısı çekme dayanımını önemli ölçüde artırmıştır.</p> <p>+Uçucu kül katkısı serbest dayanımlarda istenen artışı sağlayamamıştır.</p> <p>+Yüksek s/b oranının beton dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür.</p>	<p>+Normal Portland çimentosuna %15 UK eklendiğinde akıcılığın azaldığı gözlemlenmiştir.</p> <p>+UK priz alma süresini uzatmıştır.</p> <p>+s/b oranı arttıkça stabilitesi azalmış, çökeltme artmaya başlamıştır.</p>	<p>Battal ve Demiröz, 2018; Battal, 2019</p>
<b>Mikro İnce Uçucu Kül %0-10-20-30-40 Nano silika %0-10-20-3-40 Süper Akışkanlaştırıcı %0-0,5-1,0-1,5-2,0</b>	<p>+NS katkısı kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerlerini iyileştirmiştir.</p>	<p>+s/b oranı arttıkça viskozite değeri önemli ölçüde azalmıştır.</p> <p>+MUK ilavesi priz sürelerini uzatmıştır.</p> <p>+NS yüzey alanının çimentoya kıyasla daha fazla olması ve bu sayede suyu tutması ve taze harçtaki serbest suyun azalması sonucu viskozite artmıştır.</p> <p>+NS ilavesi, C-S-H jeller gibi etkili hidrasyon ürünlerinin jelleşme sürecini desteklemiş böylece priz zamanını azaltmıştır.</p>	<p>Zhang ve ark., 2019</p>
<b>Mermer Tozu %5, 10, 15, 20, 25 (hacimce)</b>		<p>+%15 üzerindeki mermer katkısı mermer tozunun köşeli yapısından dolayı akışkanlığı azaltmıştır.</p> <p>+Mermer tozu yüksek su emme kapasitesine sahiptir.</p> <p>+Mermer tozu plastik viskoziteyi artırdığı gözlemlenmiştir.</p> <p>+Mermer katkısının yüzdece artışı ile dilatant davranışın arttığı gözlemlenmiştir. Bu mermer tozunun yüksek su tutma kapasitesi ile açıklanabilir.</p>	<p>Çınar, 2019</p>

<p><b>%10 Silis Dumanı</b>  <b>%2 Nano silika</b>  <b>%10 Silis Dumanı +</b>  <b>%2 Nano silika</b>  <b>%5-10-15 Uçucu Kül</b></p>	<p>+Maksimum basınç ve eğilme dayanımı  +10 silis dumanı + %2 nano silika katkılı karışımlarda görülmüştür.  +28 günlük kür süresinde minimum basınç ve eğilme dayanımı uçucu kül katkılı karışımda gözlenmiştir. Ancak 90 gün kür süresi sonunda dayanımda %35-40 artış görülmüştür.  +Silis dumanı karışıma erken dayanım sağlarken, uçucu kül karışımın ilerleyen dönemlerinde dayanıma katkı sağlamıştır.</p>	<p>+SF + NS içeren karışımlarda işlenebilirlik biraz düşmüştür.  +Uçucu kül katkısı %15'e kadar arttıkça işlenebilirliği artırmıştır.  +SD + NS içeren karışımlarda beton kıvamını iyileştirdiği gözlemlenmiştir.  +%2 NS katkısı işlenebilirliği önemli ölçüde değiştirmemiştir. Ancak SD ile birlikte kullanımı betonun reolojik özelliklerini iyileştirmiştir.</p>	<p>Jalal ve ark., 2015</p>
<p><b>Metakaolin %5, 10, 15 ve 20 oranlarında çimento yerine ikame edilmiş %0.12, %0.22 süper akışkanlaştırıcı</b></p>	<p>+%15 metakaolin kullanılan harçlarda en yüksek eğilme ve basınç dayanımları elde edilmiştir.  +İleri yaşlardaki (28 gün ve 180 gün) dayanımlarında tüm MK katkılı numuneler, katkısız numuneye göre yüksek dayanım değerleri göstermiştir.  +MK'nın, erken yaşlarda (3 ve 7 gün ) eğilme ve basınç dayanımlarına faydasının da olduğu görülmüştür.  +1 günlük kürlenme sonucu metakaolin katkısının eğilme dayanımına faydası olmamıştır.</p>		<p>Yazıcı ark., 2010</p>
<p><b>Metakaolin %10, %20 oranında ağırlıkça çimento yerine ikame edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı %2 eklenmiştir.</b></p>	<p>+Metakaolin katkısı, basınç dayanımı geliştirmiştir.  +En düşük s/b oranına sahip numuneler, en yüksek basınç dayanımı ve en yüksek ultrasonik darbe hızına sahiptir.  +Yüksek ve orta s/b oranlarında dayanımın düşük çıktığı gözlemlenmiştir.</p>	<p>+Metakaolin katkısı dinamik modül değerlerini artırmıştır.</p>	<p>Asteris, 2019</p>
<p><b>%10 Mikro Silika (Silis Dumanı) ağırlıkça normal çimento yerine ikame edilmiştir.</b></p>	<p>+Silis dumanı katkısı, ince tanecik boyutuna sahip olduğu için çimento ile hızlı tepkimeye girerek erken dayanım sağladığı ve küçük tanecik boyutu ile elastikiyeti artırdığı gözlemlenmiştir.  +Basınç dayanımını artırmış, s/b oranı 1,25 iken en yüksek değeri göstermektedir.  +Kırılabilirliği artırmıştır.</p>	<p>+Silis dumanı katkısı, akışkanlığı azaltmıştır, viskoziteyi artırmıştır. Bu durumda maksimum akışkanlık için en uygun s/b oranı 1,5 bulunmuştur.  +Silis dumanı, s/b oranı 0,9 iken çökelmeyi azaltmıştır. Stabilitesini artırmıştır.  +Silis dumanı ilavesi priz alma süresini artırmaktadır.  +Su geçirimsizliği azaltma oranları beklenildiği kadar iyi olmamıştır. En düşük geçirimsizlik s/b 1,5 oranında iken gözlemlenmiştir.</p>	<p>Kanat, 2018</p>
<p><b>Atık Mermer Tozu %5, 10, 15, 20, 25 Uçucu Kül %25</b></p>	<p>+Mermer tozu katkısı, güçlü kesme kalınlaşması davranışı sergilemiştir.  +Kür süresi arttıkça basınç dayanımında</p>	<p>+Mermer tozu miktarının artışı ile görünür viskozite artmıştır. İşlenebilirlik, akıcılık azalmıştır.</p>	<p>Çınar, 2019</p>

<b>Kil %20</b>	artış olmuştur. +Erken dayanımda mermer tozu basınç dayanımını düşürmüştür. +28 günlük basınç dayanımında neredeyse tüm karışımların basınç değeri 1 MPa'dan büyük çıkmış, geoteknik uygulamalarda zemin iyileştirilme için bu dayanımın yeterli olduğu görülmüştür. +Atık mermer tozu katkılı harçlarda, su/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüştür.	+Uçucu kül katkısı akışkanlığı artırmıştır. +Reolojik özellikleri atık mermer tozu eklenmesiyle iyileşmiştir.	
<b>%5, 10, 20 ve 30 pirinç kabuğu külü ilavesi</b>		+Pirinç kabuğu külü yüksek oranda SiO <sub>2</sub> içerdiğinden dolayı amorf yapıda pirinç kabuğu külü genellikle yüksek puzolanik reaksiyon gösterir. +Düşük su/bağlayıcı oranı, karışımlarda akışkanlığı azaltmış, plastik viskoziteyi artırmıştır. +Yüksek su/bağlayıcı oranı, plastik viskoziteyi azaltmıştır. +Mini slump akma çapını düşürmüştür. +Yüksek su/bağlayıcı oranı tüm karışımlarda akma gerilmesini düşürmüştür. +Ses dalga hızları düşük çıkmıştır.	Çelik ve ark., 2015
<b>%0, 2, 4, 6, 8, 10, ve 15 pirinç kabuğu külü ikamesi</b>	+Karışımlarda pirinç kabuğu külü miktarı yükselince ses dalgasının hızında düşüş görülmüştür.	+Pirinç kabuğu külü oranı arttıkça basınç dayanımında yükselme görülmüştür. +%8 oranından sonra dayanımda azalma görülmüştür. +Donma-çözülme işlemlerinden sonra dayanımlarda düşüş görülmüştür. +Kür süresi arttıkça dayanımın da arttığı gözlemlenmiştir.	Zaki ve Sola, 2020

## 5.Sonuçlar

Bu literatür araştırmasında zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan Jet Grout uygulamasında çimento yerine endüstriyel ve sanayi atıklarının kısmen ikame edilmesi ve/veya ilave edilmesi hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan karışımların reolojik ve mekanik özelliklerini belirlemek için araştırmacılar tarafından slump akış deneyi, marsh hunisi testi, basınç dayanım deneyi, eğilme dayanımı deneyi, çekme dayanımı deneyi, segregasyon deneyi, ultrasonik darbe hızı deneyi, vicat iğnesi deneyi gibi deneyler yapılmıştır.

Çalışmalarda mekanik özellik için yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımına fayda sağlayan katkılar şöyle sıralanabilir.

- Silis dumanı küçük tanecik yapısı sayesinde boşlukları doldurup, betonda erken dayanım sağlamıştır. Basınç dayanımını 2 kat artırmıştır. Çekme dayanımına da ufak katkısı olmuştur. %10 Silis dumanının, çimentonun yerine ikame edilmesinin uygun olduğu görülmüştür.
- Uçucu külün uzun vadede basınç dayanımını artırdığı, çekme dayanımına da faydası olduğu gözlemlenmiştir. %20 oranına kadar kullanılabilceği görülmüştür.
- Nano silika katkısı harçlarda erken dayanım sağlamıştır. Nano silika katkısı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Ancak daha kararlı basınç artışı için NS katkısının %1'den düşük olması gerektiği görülmüştür.
- Metakaolin katkısı daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Metakaolinin çok ince tanecikli yapısı, karışımlarda oluşan boşlukları doldurarak kompasiteyi artırmıştır.
- Pirinç kabuğu külü miktarı artıkça basınç dayanımında artış görülmüştür, maksimum basınç dayanımı %8 oranında pirinç kabuğu külü içeren numunelerde gözlemlenmiştir.

Reolojik özellikleri belirlemek için yapılan deneyler sonucunda akışkanlığı, işlenebilirliği iyileştiren katkıları şöyle sıralanabilir.

- Uçucu kül priz alma süresini artırmıştır. Taze harcın (120. dakika) akışkanlığını artırmıştır. Uçucu külün %15 oranına kadar ikame edilmesinin işlenebilirliği iyileştirdiği görülmüştür.
- Nano silika ilavesi, çökeltinin priz zamanını azaltmıştır. %0,5'e kadar nano silika katkısı akışkanlığı iyileştirdiği gözlemlenmiştir.
- Yüksek fırın cürufu ilave edilen karışımlarda işlenebilme artmıştır. %20'e kadar yüksek fırın cürufu katkısı betonun reolojik özelliklerini iyileştirmiştir.

Sonuç olarak, bu araştırmada incelenen katkı malzemelerinin çimento yerine ikame edilmesinin, zeminler için 5 MPa basınç dayanımı değeri geoteknik uygulamalarda oldukça yüksek bir değer olduğu kabul edilebildiğinden, zemin iyileştirme yöntemi olan Jet Grout uygulamasında kullanılabilir olduğu görülmüştür.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.



## Kaynakça

- Akçuru O. Jet-grout enjeksiyon uygulamalarında kazan altı taban külü katkılı çimento bazlı harçların reolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 134, Niğde, Türkiye, 2020
- Asteris PG. Investigation of the mechanical behaviour of metakaolin-based sandcrete mixtures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2017; 23(3): 300-324
- Bahri S., Mahmud HB., Shafiq P., Majuar E. Mechanical and durability properties of high strength high performance concrete incorporating rice husk ash. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 2019; 536(1): 012028
- Battal H. Mikro taneli çimento ve uçucu kül karışımlarının jet grout kolonlarında enjekte edilebilirliğinin araştırılması. Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 132, Konya, Türkiye, 2019
- Battal H., Demiröz A. Uçucu kül ve mikro daneli çimento karışımlarının jet grout kolonlarının dayanımına etkisinin incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Selçuk-Teknik Dergisi* 2018; 17(3): 112-125
- Burke GK., Peterson JH., Smith ML. Superjet grouting and the quality of its product. *Advances in grouting and ground modification*. Colorado, United States: American Society of Civil Engineers; 2000; 104: 111-125.
- Çalı Y. Mineral katkı malzemeleri ile çimento karışımların jet grout kolonlarında mekanik özelliklerinin araştırılması. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 110, Konya, Türkiye, 2020
- Çelik F., Çanakcı H., Çınar M. Çimento katkılı grout'un reolojik ve akışkanlık özelliklerine piriç kabuğu külünün etkisi. Çukurova Üniversitesi 6. Geoteknik Sempozyumu, 26-27 Kasım 2015, sayfa no 10, Adana, Türkiye
- Çelik F., Akçuru O. Rheological and workability effects of bottom ash usage as a mineral additive on the cement based permeation grouting method. *Construction And Building Materials* 2020; 263: 120186
- Çınar H. Zemin iyileştirilmesinde jet grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 154, Kayseri, Türkiye, 2014
- Çınar M., Karpuzcu M., Çanakcı, H. The measurement of fresh properties of cement-based grout containing waste marble powder, *Measurement* 2020; 150: 106833
- Çınar M. An investigation of fresh and hardened properties of cementitious grout made with combined use of waste marble powder and fly ash. Hasan Kalyoncu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no 171, Gaziantep, Türkiye, 2019
- Güllü H., Agha AA. The rheological, fresh and strength effects of cold-bonded geopolymer made with metakaolin and slag for grouting. *Construction And Building Materials* 2021; 274: 122091

- Gürleyik AN. İnce daneli zeminlerde tekil jet grout kolon tasarımı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 115, Niğde, Türkiye, 2018
- Hausmann MR. Engineering principles of ground modification. McGraw-Hill, New York; 1990.
- Kalapathy U., Proctor A., Shultz J. A simple method for production of pure silica from rice hull ash. *Bioresource Technology* 2000; 73(3): 257-262.
- Kanat A. Jet grout kolonlarının oluşumu ve davranışı üzerinde çok ince taneli çimento ve mikro silika kullanımının araştırılması. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 97, Konya, Türkiye, 2018
- Karahan GN. Kumlu zeminlerde tekil jet grout kolon tasarımı. Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 185, Niğde, Türkiye, 2016
- Kara G., İbiç A., Yağcıoğlu E. Çimento sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi* 2018; 1(2): 87-90.
- Keller, An efficient and versatile method for soil treatment. Soilcrete (Jet grouting). Keller Central Asia LLP 2019. [https://www.keller.com.kz/brochure/K\\_Brochure\\_Technique\\_Soilcrete.pdf](https://www.keller.com.kz/brochure/K_Brochure_Technique_Soilcrete.pdf), sayfa no 11
- Klovos KG., Panagiotis GA., Tsivilis S. Properties of sandcrete mixtures modified with metakaolin. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2016; 20(S1): 18-37.
- Küsin CC. Jet grout yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 171, Adana, Türkiye, 2009
- Jalal M., Pouladkhan A., Harandi OF., Jafari D. Comparative study on effects of class f fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction And Building Materials* 2015; 94: 90-104.
- Mehta PK., Monteiro P. Concrete, microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York, McGraw-Hill Education 2014; sayfa no: 3-19.
- Nagataki S. Mineral admixtures in concrete: state of the art and trends. *Concrete Technology: Past, Present, and Future* 1994; 144: 447-482, USA
- Olgun M., Kanat A., Senkaya A., Erkan IH. Investigating the properties of jet grouting columns with fine-grained cement and silica fume. *Construction and Building Materials* 2021; 267: 120637
- Rana A., Kalla P., Csetenyi LJ. Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production* 2015; 94: 304-311
- Rodrigues R., Brito JD., Sardinha M. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials* 2015; 77: 349-356
- Siddique R., Kalus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science* 2009; 43( 3–4): 392-400
- Türk Standardları Enstitüsü - TS EN 12716. Özel Geoteknik Uygulamalar – Jet Enjeksiyon, 2002

- Yazıcı Ş., Anuk D., Arel HŞ. Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 2010; 25(2): 13-24
- Zhang S., Qiao W., Li Y., Xi K., Chen P. Effect of additives on the rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grout. Advances in Materials Science and Engineering 2019; 2019: 1-10.
- Zhu H., Liang G., Zhang Z., Wu Q., Du J. Partial replacement of metakaolin with thermally treated rice husk ash in metakaolin-based geopolymer. Construction and Building Materials 2019; 221: 527-538
- Zhang MH, Malhotra VM. High performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. ACI Materials Journal 1996; 93(6):629-636
- Zaki A., Sola Ö. Pirinç kabuğu külü katkılı harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerin araştırılması. ALKU Fen Bilimleri Dergisi 2020; 2(2): 54-61