



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



MİNERAL KATKI MALZEMELERİ İLE
ÇİMENTO KARIŞIMLARIN JET GROUT
KOLONLARINDA MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yasin ÇALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

KASIM-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yasin Çalı tarafından hazırlanan “**Mineral Katkı Malzemeleri ile Çimento Karışımların Jet Grout Kolonlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**” adlı tez çalışması 25/11/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS/olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

.....

Üye

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Lisansüstü Eğitim Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından **191004037** nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Yasin ÇALI

25-11-2020



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİNERAL KATKI MALZEMELERİ İLE ÇİMENTO KARIŞIMLARIN JET GROUT KOLONLARINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yasin ÇALI

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

2020, 110 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

İnşaat sektörü son yıllarda ortaya çıkan inşaat teknikleri ile birlikte büyük değişimler yaşamıştır. Teknolojideki ilerlemeler inşaat piyasasında kullanılan yapı malzemelerinin de çeşitlenmesinde önemli bir etkindir. Zemin iyileştirmesinin yapıldığı, depreme, sıvılaşmaya ve farklı oturmalara karşı çok daha dayanıklı yapılar inşa edilmeye başlanmıştır. Doğal kaynakların azalması, hava ve çevre kirliliği endüstriyel atıkların kullanılmasına yönlendirmiştir. Uçucu Kül (UK), Silis Dumanı (SD) ve Yüksek Fırın Cürufu (YFC) puzolanik özelliklerinden dolayı çimento veya betonda kullanılan atık malzemelerin en etkili olanlarıdır. Jet Grout (JG) yöntemiyle zeminin iyileştirilmesi çağımızda kullanımı oldukça yaygındır. Bu çalışmada Katkısız Portland Çimentosu (CEM-I 42,5R) ve çimento ağırlığının %10 ve %20'si oranında Silis Dumanı (SD), %10 ve %20'si oranında F tipi Uçucu Kül (UK), %1 ve %2'si oranında Hiper Akışkanlaştırıcı (HA) bağlayıcı malzeme kullanılmış olup, bunların karışımlarından su/bağlayıcı oranı 0.8 olan 81 farklı enjeksiyon numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 28 ve 56 gün nemi değişmeyecek şekilde bekletildikten sonra üzerinde serbest basınç ve yarmada çekme (brezilyan) dayanım deneyleri yapılmıştır. Ayrıca optimum sonuçlarda ve Jet groutta karışım yapılabilecek 16 tasarım belirlenmiş ve JG kolonu oluşturulmuştur. Oluşturulan 27 farklı numune ve 16 tasarım içerisinde 28 günde %10 SD, %1 HA içeren numunede en yüksek dayanım (Ort. 24,66 MPa) elde edilirken, 56 günde %20 SD, %10 UK, %2 HA içeren numunede en yüksek dayanım (Ort. 25,83 MPa), %10 SD, %10 UK, %1 HA içeren JG kolonda en yüksek dayanım (Ort. 26,72 MPa), kaydedilmiştir. Kısa vadede (28 gün) silis dumanı dayanımı hızlı artırırken, uzun vadede (56 gün) uçucu kül içeren numuneler ve JG kolonlar geç dayanım kazanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dayanım, Hiper Akışkanlaştırıcı, Jet Grout kolonu, Katkısız Portland Çimentosu, Silis Dumanı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT AND MINERAL ADDITIVES MIXTURES IN JET GROUT COLUMNS

Yasin ÇALI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

2020, 110 Pages

**Jury
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Assoc. Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI**

The construction industry has experienced great changes with the construction techniques that have emerged in recent years. Advances in technology are an important factor in the diversification of building materials used in the construction market. More durable structures have been started to be built against earthquake, liquefaction and different settlements, where soil improvement has been made. The decrease in natural resources, air and environmental pollution has led to the use of industrial wastes. Silica Fume (SF), Fly Ash (FA) and Blast Furnace Slag (BFS) are major effective waste materials used in cement or concrete due to their pozzolanic properties. Their usage is very common in our age of improving the soil with additives. In this study, additive-free Portland Cement (CEM-I 42,5R) and 0%, 10% and 20% of cement weight SF, 0%, 10% and 20% F type FA, 0%, 20% and 40% BFS and 0%, 1% and 2% Hyper plasticizer (HP) binder material with sand were used and 81 different mortar samples with a water / binder ratio of 0.8 were prepared from their mixtures. After the preparation of samples which were kept for 28 and 56 days without changing the humidity, unconfined compressive and splitting tensile (Brazilian) strength tests were carried out on them. In addition, 16 designs that can be mixed in optimum values and Jet Grout have been determined and Jet Grout column has been created. Within 27 different samples and 16 designs, while the highest unconfined compressive strength (mean 24,66 MPa, 28 days) was obtained in the sample containing 10% SD and 1% HP, the highest unconfined compressive strength (mean 25,83 MPa, 56 days) was obtained in the sample containing 20% SD, 10% FA and 2% HP, the highest unconfined compressive strength (mean 24,66 MPa, 28 days) was obtained in the sample containing 10% SD and 1% HP, the highest unconfined compressive strength (mean 26,72 MPa, JG columns) was obtained in the sample containing 10% SD, 10% FA and 1% HP in 81 different samples. While In the short term (28 days) silica fume was increased strength fast, in the long term (56 days) samples and columns containing fly ash was gained late strength.

Keywords: Blast-Furnace slag, Fly Ash, hyper plasticizer, Jet Grout column, Silica Fume, Portland Cement, Strength.

ÖNSÖZ

İnşaat mühendisliği tüm dünyada olduğu gibi, Türkiye’de de fayda, maliyet ve ekonomik kayıpların önlenmesi bakımından son derece önemli bir konudur. Ülke ekonomisinin güçlenmesi, firmalarımızın kâr marjının yükselmesi ve rekabet gücünün yükselmesi açısından bu kayıpların önlenmesi ya da azaltılması büyük önem arz etmektedir.

Böyle bir çalışmaya yönelmemi sağlayan ve bu proje uygulamasının hazırlanması sırasında büyük anlayış, yardım ve destek gördüğüm hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila Demiröz’e, fikir ve görüşlerini benimle paylaşan değerli Öğr. Gör. Alican Şenkaya’ya, Arş. Gör. Ekrem Burak Toka’ya ve İnş. Yük. Müh., Hurşit Battal’a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, beni bugünlere yetiştiren, her türlü zorluklara rağmen benden sevgilerini ve desteklerini asla esirgemeyen aileme şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Yasin ÇALI
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Kumun Özellikleri.....	14
3.2. Kullanılan Bağlayıcı Malzeme Özellikleri	16
3.2.1. Normal Portland Çimentosu (CEM-I- 42.5R).....	16
3.2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	16
3.2.3. Silis Dumanı (Silika Füme-Mikro Silika).....	19
3.2.4. Uçucu Kül (UK).....	24
3.2.5. Endüstriyel Kimyasal Katkılar.....	29
3.3. Jet Grout.....	31
3.3.1. Jet Grout Kolonu İmalat Yöntemi.....	32
3.3.2. Jet Grout Teknikleri	33
3.3.3. Jet Grout Parametrelerin Belirlenmesi	35
3.3.4. Jet Grout Ekipmanları	37
3.3.5. Jet Grout Yönteminin Uygulamaları.....	40
3.3.6. Jet Grout Özellikleri.....	45
3.3.7. Jet Grout Kalite Kontrolü.....	46
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	53

4.1. 28 ve 56 Günlük Numuneler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	54
4.1.1. Deney Programı	54
4.1.2. Deneylerin Yapılması	54
4.1.3. Numunelerin Kırılması	56
4.1.4. Numunelerin değerlendirilmesi.....	58
4.2. Jet Grout Kolonları Üzerinde Yapılan Çalışmalar	76
4.2.1 Jet Grout İmalat İçin Enjeksiyon Şerbetinin Hazırlanması.....	76
4.2.2. Jet Grout İmalat Parametreleri ve Deney Akışı	77
4.2.3. JG Makinesinin Kalibresi ve İmalat Öncesi Deneme Kolonları.....	78
4.2.4. Jet Grout Kolon İmalatı.....	78
4.2.5. Jet Grout Karot Alınması ve Yapılan Deneyler	79
4.2.6. Jet Grout Serbest Basınç Deneyleri	80
4.2.7. Jet Grout Yarmada Çekme (Brezilya) Deneyleri.....	81
4.2.8. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları.....	83
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
5.1. Sonuçlar	88
5.2. Öneriler	92
Teşekkür	94
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ.....	100

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_u	: Üniformluk katsayısı
C_c	: Derecelenme katsayısı
D	: Tij dönme hızı
D_{10}	: Efektif tane çapı
D_r	: Rölatif sıkılık
e	: Boşluk oranı
e_{maks}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
G_s	: Zeminin özgül ağırlığı
kgf	: kilogram force
kN	: kilo Newton
kPa	: Kilopascal
m	: metre
mm	: milimetre
M	: Kalıbın kütlesi
M_1	: Kalıp + Serbest halde yerleştirilen zemin kütlesi
M_2	: Kalıp + Sıkıştırılmış zemin kütlesi
M_{k1}	: Serbest halde yerleştirilen zemin kütlesi
M_{k2}	: Sıkıştırılmış zemin kütlesi
MPa	: Megapascal
P	: Enjeksiyon basıncı
s	: saniye
S	: Sedimentasyon yüzdesi
$S/Ç$	: su/çimento oranı
S/B	: su/bağlayıcı oranı
V	: Tij çekme hızı
V_1	: Deney başında süspansiyon hacmi
V_k	: Deneye tabi tutulan zeminin hacmi
V_w	: Su hacmi
ρ_{max}	: Maksimum yoğunluk
ρ_{min}	: Minimum yoğunluk

ρ_w	: Suyun özgül yoğunluğu
γ	: Birim hacim ağırlık
τ	: Kayma gerilmesi
τ_0	: Başlangıç kayma gerilesi
w	: Su muhtevası
μ	: Dinamik viskozite
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

ASCE	: Amerikan İnşaat Mühendisliği Birliği
BAP	: Bilimsel araştırma projeleri
C-S-H	: Kalsiyum-Silica-Hidrate Jeli
CPT	: Koni penetrasyon test
D	: Çap
JG	: Jet Grout
HA	: Hiper Akışkanlaştırıcı
İDY	: İnce Tane Yüzdesi
NPÇ	: Katkısız (Normal) Portland Çimentosu
PMT	: Presiyometre test
SBD	: Serbest Basınç Dayanımı
SD	: Silis Dumanı
SPT	: Standart penetrasyon test
SW	: İyi derecelenmiş kum
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflandırılması
YASS	: Yer altı su seviyesi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
Jet 1	: Tek akışkanlı sistem
Jet 2	: Çift akışkanlı sistem
Jet 3	: Üç akışkanlı sistem

1. GİRİŞ

Harç, beton ve enjeksiyon gibi çimento içeren yapısal imalatlar insanlık boyunca en fazla kullanılan ve gelecekte de kullanılacak inşa malzemesidir. Özellikleri ve içeriğinin bilinmesi, basit görünüşleri, doğadan temini kolay, üretilme tekniği ve ucuz olması nedeniyle uygulamada en çok kullanılan yapı malzemeleridir. Neticede çimento açık duman rengine benzeyen bir toz, beton ise kum, çakıl ve çimento gibi malzemelerden imal edilen kompoze bir üründür.

Çimentonun hem kimyasal özelliği hem de su ve mineral katkı malzemeleri ile reaksiyonları son derecede karmaşıktır. Çimentonun ve mineral katkı malzemelerinin birlikte gösterdiği reaksiyonların tanımlanmayıp sonuçlarının belirlenmemesi, ekonomik kayıptan ziyade çok sayıda insan hayatının kaybına sebep olabilecek istenmeyen olaylara yol açması göz önünde bulundurulmalıdır.

Bir bağlayıcı maddenin su ile karışımına “hamur” güncel adıyla “enjeksiyon sıvısı” denir. Bu karışıma kum katıldığında “harç”, kuma ilaveten çakıl da katıldığı zaman “beton” elde edilir. Bu tanımlarının önüne bağlayıcının ismi ek olarak gelirse kireç hamuru, çimento enjeksiyonu, alçı harcı gibi isimleri alır. En çok kullanılan bağlayıcı madde çimento olduğu için çimento hamuru (enjeksiyonu), çimento harcı ve çimento betonu yerine kısaca hamur (enjeksiyon), harç ve beton kelimeleri kullanılır.

Zemin, medeniyetlerin hem barınma, savunma, korunma, ulaştırma gibi amaçlarla inşa edilen yapıların temelleri altında, hem de yapı malzemesidir. Zeminin yapısal özellikleri, üzerinde hizmet vereceği yapılar için yapı malzemesi olarak kullanımında ve gerekli taşıma kapasitesinde yetersiz kaldığında iyileştirmeler yapılması gereklidir. Temele gerekli taşıma imkânı vermeyen zayıf zemin geçilerek temeli sağlam olan zemine yerleştirmek, yapı temelini ve yapıyı zayıf zeminin taşıyabileceği nitelik ve kapasitede yapmak, zayıf özellikteki zeminin özelliklerini yerinde uygulamalarla mekanik ve fiziksel özelliklerini daha iyi hale getirmek, dolgu olan ve endüstriyel atık katkı malzemelerle karıştırmaya uygun olan zeminleri iyileştirmek gibi teknik çözümler seçenek olarak kullanılır.

Bu yöntemlerin içinden zemin iyileştirme yöntemi hem ekonomik oluşu hem de uygulamaya yönelik pratik oluşu, günümüzde sık kullanımını ortaya çıkarmıştır. Başlıca zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Kompaksiyon, zeminlerin mekanik yükler altında sıkıştırılması sonucu zemindeki hava hacminin çıkışının beklenmesi, konsolidasyon ise sabit bir yük altında boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu zeminlerde meydana gelen hacimsel şekil değiştirmedir.

Enjeksiyon, zemine nozuldan geçecek büyüklükteki bağlayıcı maddelerden olan çimento ve karışıma ilave olarak çimento ile zemin arasında bağ oluşturma, var olan mevcut bağları kuvvetlendirmek için silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. katkı malzemeleri enjekte ederek zemindeki boşlukları ve çatlakları doldurma veya yeni yapı kütlelerinin oluşturulmasıdır.

Yeraltı ve yerüstü yapılarının inşasında karşılaşılan zemin ile ilgili sorunlar zemin iyileştirme yöntemlerini kullanmaya mecbur bırakmıştır ve bu sahadaki araştırmalara yön vermiştir. Geoteknik mühendisliği saha uygulamasında, zeminin sahip olduğu mühendislik özellikleri alt ve üst yapı tasarımları için büyük öneme sahiptir. Zeminin taşıma gücü, geçirimsizliği sağlayan katmanlar, her daim temeli tasarlayan mühendisin istediği özellikleri karşılayacak düzeyde değildir. Zemini iyileştirme teknikleri zeminde karşılaşılan problem ve istenilen iyileşme türü ve seviyesine bağlı olarak çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri vardır. Enjeksiyon da son yıllarda daha geniş kullanım alanı bulan ve sık başvurulmuş zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Enjeksiyon teknikleri günümüz teknolojisinin gelişmesiyle paralellik göstererek gelişimini sürdürmektedir. Bu gelişim süreciyle beraber enjeksiyon dünyası geoteknik mühendislerine çok geniş imkanlar sunmaktadır. Enjeksiyon malzemeleri keşfedilmekte, yeni enjeksiyon teknikleri ve ekipmanları geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en günceli jet grout uygulamasıdır. Yöntem 1970'li dönemlerde Japonya'da uygulanmış, 80'li yıllarda İtalya'da uygulanmaya başlanmıştır. Türkiye'deki ilk denemeler aynı dönemlerde Haliç Kolektörleri Projesi için Ayvan Saray tüneline zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılmıştır.

Jet grout zemini ıslah etmede en pratik ve ekonomik yollardan biridir. Bu teknik en az 300-400 bar basınçla püskürtülen bir grout (harç) karışımıyla (enjeksiyon) zemine çimento enjekte edilmesidir. Enjeksiyon, genellikle belirli oranlardaki su-bağlayıcı (genellikle çimento) karışımıdır. Yüksek basınç, boruya gönderilen enjeksiyon malzemesinin nozuldan (püskürtme ağzı) püskürürken çok yüksek kinetik enerjiye sahip olmasına imkân verir. 150-250 m/s arasında değişen hızla yapılan enjeksiyon, iyileştirilecek zemin tabakası içerisinde ilerleyerek taşıma gücü zayıf olan zemin ile

karışarak taşıma için ideal bir yapı oluşmasını sağlar. Bu imalat, sürekli ve dönerek oluştuğu için dairesel bir şekil oluşturur. Jet grout'un en büyük avantajı hemen hemen her türlü taşıma gücü zayıf zeminlerde uygulanabilmesidir. Diğer iyileştirme tekniklerinden imalatı kolay, fayda-maliyet oranı yüksek olduğundan tercih edilen bir yöntemdir.

Termik santralden elde edilen uçucu kül (UK), fabrika bacası filtresinde özel yöntemlerle tutularak elde edilen silis dumanı (SD) ve demir cürufu artığı olan yüksek fırın cürufu (YFC) birer endüstriyel atıktan ayrılan katkı malzemeleridir. Hiper akışkanlaştırıcı (HA) ise doğadan direk elde edilmeyen yapay bir kimyasal katkı malzemesidir.

Katkı malzemeleri genellikle enjeksiyon harcı üretiminde Portland çimentonun ağırlıkça yüzde oranında, bağlayıcı olan çimentonun bir miktarı yerine veya çimentonun üretimi sırasında karıştırılarak endüstriyel atık içeren katkılı çimento olarak kullanılmışlardır.

Enerji üretmek için kömür yakılan hidrotermik santrallerde, kömürün yanması sonucu artık malzeme olarak ortaya çıkan uçucu küllerin yaklaşık %70-%75'i diğer gazlarla birlikte dışarıya doğru çıkar. Çok ince taneli, toz halindeki maddeye uçucu kül denilir. Bacalarda elektromekanik veya ince tanelileri yakalamak için elektrostatik yollar ile tutulmakta ve endüstriyel atık olarak saklanmak zorundadır. Uçucu külün değerlendirilmesi, çok yüksek enerji gerektiren ve sonucunda üretim maliyeti yüksek olan çimentodan daha az kullanılarak tasarruf sağlanmasına yardımcı olurken, oluşturulmuş soilcrete'in (JG kolonunun) 28 ve 56 günlük uzun süre sonucundaki dayanımı da etkilemektedir. Uçucu kül ilavesi taze betonda hidrasyon ısını düşürmekte, işlenebilirliği ve enjekte edilebilirliğini arttırmakta, prizini almış betonda ise durabilite ve mekanik dayanıma olumlu katkı sağlamaktadır.

İnce taneli çimentodan yaklaşık 10 kat daha ince ($15000 \text{ m}^2/\text{kg}$) olan silis dumanı grout karışımındaki mikro boşlukları doldurarak harcın mekanik özelliklerini iyileştirerek harcın mukavemetini ve geçirimsizliğini artırır. İçeriğindeki silis tanecikleri sayesinde çimento ve suyla reaksiyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 bağlayarak betonun durabilitesini arttırabilmektedir. İnceliği nedeniyle suyun kılcal boşluklardan yukarı doğru yükselmesini ve geçirimliliği de bir miktar düşürebilir.

Demiri elde edebilmek için, demir çelik fabrikalarındaki yüksek ısı ocaklarda demir madeninin işlenmesi sonucunda demir cevherleri üretilmektedir. Yakıt olarak

yüksek ısı veren kömür kullanılan bu ocaklarda, çok yüksek sıcaklığın etkisiyle CO ve CO₂ gazları açığa çıkar ve fırını terk ederler. Geriye yarı erimiş halde demir ve yüksek fırın cürufu (YFC) denilen mineral katkı malzemesi kalmaktadır. YFC betonun hidrasyon ısını ciddi miktarda aşağıya çeker. Bundan dolayı istinat, baraj ve köprü gibi hidrasyon ısı istenmeyen büyük ölçekli beton yapımında önemli ölçüde kullanılmaktadır. Ek olarak, harçtaki poroziteyi azaltmakta, kimyasal dayanımını da arttırmaktadır.

Yapay katkı olan kimyasal akışkanlaştırıcı katkıları; normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcı (HA) olarak üç kısımda incelenir. Günümüzde harç ve betonun mekanik özelliklerinde sağladığı faydalardan dolayı yapı sektörünün özellikle beton için vazgeçilmez katkılarından biri haline gelen kimyasal akışkanlaştırıcılar, betonun yerleştirme aşamasındaki sorunlarda çok büyük öneme sahiptir. Çimento tanecikleri ile etkileşime girerek hem fiziksel hem de kimyasal reaksiyonlar sonucu harcın yapısında önemli değişikliklere sebep olurlar. En geniş manada harcın dolayısı ile dönüştüğü betonun özelliklerini değiştiren kimyasal yapay maddeler olarak bilinen akışkanlaştırıcılar, son dönemlerde ülkemizde yoğun kullanımı mevcuttur. Bu akışkanlaştırıcı katkıları, düşük su/bağlayıcı seviyelerinde normal su/bağlayıcı seviyelerindeki işlenebilme, yerleştirilebilme ve beton dökümü yapılabilir. Kimyasal katkı kullanılarak elde edilen işlenebilme özelliği, iki saate kadar etkisi sürmektedir. Ayrıca son dönemde geliştirilen HA ile birlikte sağladığı faydaların belli süreler sonundaki kaybı minimize edildiği gibi, jet-grout ertesi gün yüksek mukavemete dayanımlarına sahip olabilmektedir.

SD ve UK beton mukavemetine ve beton içerisinde gerçekleşen kimyasal tepkimelere miktarı ölçüsünde olumlu katkı sağlar. Ölçülü kullanılmadığı zaman reaksiyondaki su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği azaltmaktadır. Erken (3-7gün) nihai basınç dayanımının da azalma görülebilir. Büzülme, kılcal çatlak ve büyük rötreye çatlaklarına sebep olabilirler. UK'nin rötreyi azaltması ve SD'nin ise rötreyi artırması beklenir (Özdemir, 2006). Bu gibi nedenlerden dolayı silis dumanının maliyeti, diğer bağlayıcılar (YFC ve UK vb.) ile karşılaştırıldığında, SD'nin yaygın kullanılmamasına sebep olmaktadır. (Thomas ve diğ., 1999). YFC'nin ölçüsüz kullanımı harcın içindeki bulunan serbest suyun yüzeye çıkmasına ve akışkanlaştırıcı da olduğu gibi priz alamamasına neden olmaktadır. Tez çalışmasında endüstriyel atık olan SD, UK ve YFC gibi katkı malzemelerinin birlikte gerektiği miktarda kullanımı öncelikle ekonomik

olmak üzere dayanım, geçirimsizlik, işlenebilirlik, rötne gibi birçok mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu görülmektedir.

Literatür araştırmaları incelendiğinde serbest basınç ve yarmada çekme dayanım sonuçlarına göre tek katkı içeren karışımlarda %5-%25 seviyesinde UK, %10-%20 seviyesinde SD ve %10-%40 seviyesinde YFC, iki adet mineral katkı içeren karışımlarda %5-%10 SD ile %10-%20 UK, %10-%20 SD ile %10-%20 YFC, ikiden fazla katkı malzemesi içeren karışımlarda %5-%10 SD ile birlikte %5-%10 UK ve YFC kullanımından çimento katkı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Katkı malzemesi oranı ağırlıkça yüzde %40 ı geçmemesi önerilmektedir (Özdemir, 2006).

1.1.Tezin Amacı

Taşıma gücü düşük yapıyı taşımaya elverişli olmayan zeminlerde, fore ve mini kazık uygulamalarında yaşanan zorluklar ve kazık uygulamaları gerekli malzeme ve ekipman yönünden genellikle ekonomik olmayabilmektedir. Jet grout yöntemi (JG), uygulamasının pratik ve kolon yapım maliyetinin düşük olması nedeniyle ülkemizde de son zamanlarda bu tür taşıma gücü düşük yumuşak-gevşek zeminlerde kullanımında artış göstermektedir. Dünyada son zamanlarda yaygın şekilde kullanılmasına rağmen jet grout tekniğinin uygulanması için geliştirilmiş ve kabul görmüş bir standart, içerisinde hangi katkı malzemesinin ne kadar kullanılması gerektiğini belirten bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bu çalışmada; Portland çimentosunun (CEM-I 42.5R) ve katkı malzemeleriyle oluşacak karışımlarının, JG kolonlarının dayanımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, Portland çimentosu ve katkı malzemeleriyle oluşacak karışımlar ile JG kolonların modellenmesi ve saha imalatları için geliştirilecek standart, ortaya çıkarılacak yöntem vb. çalışmalara fayda sağlaması düşünülmüştür.

Bu tezin önemi, son yıllarda ülkemizde hızlı bir şekilde yaygınlaşmakta olan tünel, geçit ve zemin iyileştirme çalışmaları devam ederken, jet grout kullanımının yaygınlaşabilmesi için katkı malzemeleri ile karışım yapılan örneklere yer verilmiştir. Kısa ve uzun vadede mineral katkı malzemelerinin birbirleriyle olan ilişkisi ve basınç dayanımları hakkında bilgi verilmiştir. Katkıların jet grout imalatındaki önemi ve mineral katkı malzemesi ile çimento kullanımının uygulamada da kullanılabiliirliğin mümkün olup/olmadığı araştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yahiro vd., (1970), “Jet Grout” yönteminde günümüzdeki gibi yüksek hızlı bir su jetinden faydalanılarak zeminde yarık kesit açarak aşağıdan yukarıya doğru çimento harcı su jeti ile beton kıvamında sertleştirilerek zemin yapısı oluşturulduğunu belirtmişlerdir.

Nakanishi vd., (1980), tarafından zemin iyileştirme yöntemi “Soil Stabilization Management” geliştirilmiştir. Bu teknikte amaç büyük çaplı JG kolon imalatlarının gerçekleştirilmesidir. Açılan boşluk sonik dalgalar yöntemiyle ölçülür ve enjeksiyon şerbeti ile doldurularak kapatılır. 4 m çapa kadar beton zemin yapıları inşa edilmekte ve genellikle kohezyonsuz zeminlerde daha iyi verim elde edildiği belirtilmiştir.

Aitcin vd., (1984), yaptıkları çalışmada, çimento ve çimentonun ağırlıkça %5-20 aralığında silis dumanı ekleyerek elde edilen karışımların mukavemetleri, viskozite, tiksotropi gibi değerler araştırılmıştır. Deneyler sonucunda en büyük basınç değerinin %20 silis dumanı ilave edilmiş karışımda elde edildiği ve değer artışını ölçmek için sabit olarak alınan çimentolu karışımdan yaklaşık %10 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Baumann (1984), tarafından yapılan çalışmada farklı tür zeminlerde ve su/bağlayıcı seviyesine bağlı olarak basınç dayanımı etkisini incelemiştir. Yedi farklı zemin türünde imal edilen JG kolonlarından alınan karot örneklerinde iki farklı su/bağlayıcı seviyesine göre yapılmış olan tek eksenli basınç dayanımı Çizelge 2.1 ‘de gösterilmiştir. Çizelge 2.1’deki sonuç değerlerine göre iri boyuttaki (çakıl, kum) zeminlerin dayanımları ince boyutlu (silt, kil) zeminlerin dayanımlarından yüksek olduğu ve çakıllı kumlu, kumlu siltli, siltli killi zeminlerde çimento oranının artması ile basınç dayanımında artış görmüştür.

Çizelge 2.1. JG kolonların basınç dayanımları

JG Kolon Basınç Dayanımları (MPa)							
Zemin tipi	Kum	Çakıl	Silt, kil	Organik zemin	Çakıllı kumlu	Kumlu siltli	Siltli killi
Kolon no	1	2	3	4	5	6	7
Su/Çimento = 0.67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12 – 18	10 – 14	-10
Su/Çimento = 1	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6 -10	5 – 7	- 5

Karahanlıoğlu (2001), yaptığı araştırmada, farklı seviyelerdeki bentonit, uçucu kül ve silis dumanı ile birlikte hazırlanan çimento enjeksiyonu karışımları granüler zeminlere uygulanmış ve serbest basınç mukavemetleri araştırılmıştır. Enjeksiyon

şerbetlerinin hazırlanmasında, kullanılan toplam ağırlıkça %0-%3'ü arasında bentonit, %10-%40 arasında UK ve %0-%20 arasında SD kullanılmıştır. Su/katı oranı 1 olarak hazırlanan enjeksiyon karışımları; rölatif sıkılığı %70, tane çapı aralığı 2-10 mm olan, 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik flexiglas kalıplar içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte edilmiştir. Örneklerde 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenmiş ve çimento ile hazırlanan enjeksiyon karışımı numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Bentonit, UK ve SD'nin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmış, yapılan deneyler sonucunda; katkı maddeleri kullanılarak çimento enjeksiyonu uygulanmış zemin örneklerinin 7, 14 ve 28 günlük basınç değerlerinin, sadece çimento ile enjeksiyon uygulanmış numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Ayrıca enjeksiyon uygulanmış zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri üstünde en çok etkili parametrenin SD, en az etkili parametrenin ise bentonit olduğunu belirtmiştir.

Sağlamer vd., (2001), yaptıkları çalışmada Türkiye'de yakın zamanda uygulanan büyük jet grout uygulamalarından örnekler vermişlerdir. JG kolonların uygulamasında kullanılan tipleri, detayları, enjeksiyon basınçlarını nozul sayısı ve boyutunu, dönme ve çekme hızlarını da tebliğde sunmuşlardır. Uygulamalarda JG kolonlarının zeminde oturmayı ve sıvılaşma riskini azaltmak olduğunu belirtmişlerdir.

Zaimoğlu (2003), yaptığı çalışmada, farklı seviyelerdeki Bentonit, UK ve SD ile birlikte hazırlanan enjeksiyon şerbetlerinin serbest basınç mukavemeti, dinamik viskozite, çökeltme, priz süreleri ve akma özelliklerini araştırmıştır. Enjeksiyon şerbetleri ağırlıkça %0-%3'ü bentonit, %10-%40 UK ve %0-%20 SD kullanmıştır. %10 UK, %20 SD ve %3 bentonit, %10 UK, %20 SD kullanılarak hazırlanan enjeksiyon karışımlarının; rölatif sıkılığı 0.70, tane çapı aralığı 2-10 mm arasında kalıp içerisindeki çakıl örneklerine 1 atmosfer basınç altında enjekte etmiştir. Hazırlanan enjeksiyon şerbetleri için laboratuvar da serbest basınç (7, 14 ve 28 günlük), çökeltme, Marsh hunisi, Vicat iğnesi ve dönmeli viskozimetre deneyleri yapılmıştır. Deneyler üç farklı su/katı oranlarında (0.75, 1.00 ve 1.25) yapılmış olup, deney sonuçlarını Taguchi metoduna göre farklı farklı değerlendirmiştir. Yapılan inceleme ve bulgular sonucunda; enjeksiyon karışım örneklerinin serbest basınç mukavemeti değişimi üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül, en az etkili parametrenin ise bentonit olduğunu belirlemiştir. Priz başlama süresi üzerindeki en etkili parametreler SD ve UK olurken, priz bitiş süresi üzerinde ise bentonit

ve UK'nin etkili olduğunu görmüştür. Marsh süresi ve Slump miktarı için ise en etkili parametrenin SD olduğunu belirlemiştir. Çalışmada

Kavak ve diğerleri (2005), yazarlar çalışmalarında çimento enjeksiyonu ve grout üzerinde yapılan çalışmaları incelemişler ve yapılan deneyleri yorumlamışlardır. Bunlara örnek olarak çimento ve SD üzerinde yapılan çalışmada çimento kütlece %20 oranında SD eklendiğinde çimentolu numunelerin mukavemet değerlerinin %10 arttığını belirtmişlerdir.

Özdemir (2006), çalışmasında, Portland Çimentosu (PÇ) ile birlikte UK, SD ve YFC mineral katkı malzemelerinin ikili, üçlü ve dördü kombinasyonları, harç numunelerinin işlenebilirlik, basınç, eğilme, aşınma ve rötreye gibi fiziksel ve mekanik etkileri araştırılmıştır. Tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0.5 alınmıştır. Basınç, eğilme, aşınma dayanımı sonuçlarına göre tek atık içeren karışımlarda %10-%30 seviyesinde UK, %10-%20 seviyesinde SD ve %10-%50 seviyesinde YFC'nin çimentoya ve harca katkı olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. 360'ncı günde ikili karışımlardan SD ve UK içeren numuneler yaklaşık olarak %1 ile %12, SD+YFC içeren numuneler %1 ile %8 ve üçlü karışımlar içeren numuneler ise %2 ile %14 seviyede referans numuneden daha yüksek basınç değerleri elde edilmiştir. Tüm enjeksiyon karışımlarında özellikle UK'nin rötreyi azalttığı ve SD'nin ise rötreyi arttırdığı gözlemlenmiştir.

Gökdemir ve Yıldız (2008), yaptıkları çalışmada farklı katkı içeren çimento şerbetinin düşük geçirgen granüler zeminlerdeki serbest basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Enjeksiyon basınçları 2 ve 6 atm, enjeksiyon yapılacak zeminin kum/çakıl seviyesini 20/80, 30/70, 40/60 derecesine sahip üç tür zemin örneği hazırlamışlardır. Yapılan deneylerde bu zemin örneklerinin $D_r = \%35 - \%70$, Portland 32.5 çimentosu kullanılmıştır. Çimento içine ağırlıkça %2 ve %5 süper akışkanlaştırıcı, %3 Na_2SiO_4 ve %5 seviyesinde bentonit olmak üzere 4 farklı şerbet karışım hazırlanmıştır. Su/çimento oranı 0.6, 0.8 ve 1.0 belirlenmiştir. 7 ve 28'nci gün sonunda basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre aynı zemin koşullarında enjeksiyon basıncı arttırıldığında basınç dayanımında artış, kum/çakıl oranının artmasıyla enjeksiyon değerlerinde azalma, rölatif sıkılığın arttığında ise dayanımlarda azalmaların olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak enjeksiyon basıncının, zemini yırtma gücünün yetersiz olduğu gözlemlenmiştir.

Gündeşli (2008), çalışmasında literatür ve uygulamada, doğal puzolanların (UK, SD ve YFC) endüstriyel malzemelerin nerelerden temin edilebileceği ve inşaat piyasasında nasıl daha etkili biçimde faydalanılabileceğini hakkında araştırma yapmıştır. Ayrıca endüstriyel atık malzemelerin harç ve çimentoya katkı olarak kullanımının sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri ve hangi seviyelerde karıştırıldıklarında ne gibi sonuçlar ortaya çıktığı daha evvel yapılan araştırmaları da göz önüne alarak incelemiştir. Literatürdeki araştırma sonuçları değerlendirilerek endüstriyel malzemeler üzerindeki etkisinin araştırılmasının faydalı olacağını ve araştırılacak malzemelerin sayısının arttırılmasını belirtmiştir.

Avcı (2009), yaptığı çalışmada, ince taneli çimento enjeksiyon malzemelerinden biri olan Ultrafin12'nin, katkı malzemesi kullanılmadan, S/Ç oranı sabit tutularak farklı rölatif sıklıktaki ince ve orta karışımli kum numunelere ve S/Ç oranı değiştirilerek sabit rölatif sıklıktaki ince ve orta kum karışımli numunelere enjekte edilebilirlikleri, enjekte edilen numunelerin mukavemet ve permeabilite özellikleri belirlenmiştir.

Okucu (2010), tarafından yapılan çalışmada farklı endüstriyel katı atıkların, çimento harçlarının, çimento harçlarına etkisini araştırmıştır. Çalışmada Bigadiç (Balıkesir) Borat İşletmelerinde bor üretiminde atılan çamur, Soma (Balıkesir) termik santral atığı uçucu kül ve Antalya Eti Elektrometalürji A.Ş. baca tozu atığı silis dumanı katkılarının çimentonun dayanımına etkileri araştırılmıştır. CEM1 42.5 N çimentosuna %5, %10 ve %15 oranlarında atık çamur, uçucu kül ve silis dumanı katılarak 4×4×16 cm harç numuneleri 20±1°C'de kürde, 2, 28 ve 56. günlerde eğilme ve basınç dayanımı araştırılmıştır. Katkılı harç numunelerinin dayanım değerleri CEM1 42.5 N çimento harçlarının dayanım değerlerini karşılaştırmıştır. %5 ve %10 atık çamur katkıli harçların eğilme ve basınç dayanımları 56. günde şahit harca göre dayanım değerleri almıştır. %5 ve %10 uçucu kül katkıli harçların 56. günde basınç dayanım değerleri şahit harca göre yüksek dayanım değeri aldığı ve %15 katkı oranında şahit harçla yaklaşık aynı basınç dayanım değerini görmüştür. %5, %10 ve %15 silis dumanı katkıli harçların eğilme ve basınç dayanım değerleri 56. günde şahit harcının basınç dayanım değerinden yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Atık harçların erken dayanım değerlerini azalttığı zamanla dayanımları arttırdığını görmüştür. Atıkların içerisindeki SiO₂'ce zengin ve ince taneli olması dayanımın artmasında etkili olduğunu gözlemlemiştir.

Tekin ve Mollamahmutoğlu (2010), yaptıkları araştırmada, çok ince taneli malzeme olan RHEOCEM 900 özel çimento karışımları ile farklı derecelere sahip

kumların enjekte edilebilirliği laboratuvar deneyleriyle araştırılmıştır. İnce, orta ve iri kumlardan oluşan ve ince kum yüzdesi 10 ile 30 aralığında olan örneklerle, su/bağlayıcı oranı 0.8, 1.0, 1.2 olan karışımların enjeksiyon deneylerini yapmış, deney sonuçlarına göre literatürdeki enjekte edilebilirlik ilişkilerinin başarısını araştırmıştır. Sonuç olarak İKY'nin ve S/B oranının enjekte edilebilirliği etkileyen önemli parametrelerden olduğunu tespit etmişlerdir.

Özarslan (2012), tez çalışmasında enjeksiyon tekniklerini araştırmış ayrıca değişik dereceli kum örneklerle geçirimsizliği ve enjekte edilen örneklerin basınç değerleri ve geçirimsizlik seviyeleri temel mühendisliğinde ekonomik çözümler sunması sebebiyle yönelmiştir. Bu amaçla, sabit su/çimento oranlı katkısız, katkılı, silis dumanı, sodyum bentonit ve katkılı + silis dumanı katkılı ince taneli çimento (Ultrafin 12) süspansiyonlarının farklı rölatif sıkılıklardaki ve gradasyondaki kumlara enjekte edilebilirlikleri ile farklı su/çimento oranlarında katkısız ince taneli çimento süspansiyonları incelenerek numunelerin dayanım ve geçirimsizlik özellikleri ve kumlara enjektisi incelemiştir. Başarılı olan numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerini araştırmıştır. S/Ç oranı farklı olan karışımların reolojik özelliklerinin belirlemiştir. Reolojik özelliklerin belirlenmesinden sonra değişik gradasyonda hazırlanan ince ve orta kum karışımlarına farklı rölatif sıkılıklarda ve farklı S/Ç oranlarında sabit basınç altında enjeksiyon deneyleri yapmıştır. Özellikle ince kum içeren numunelere yapılan enjeksiyonlarda başarılı sonuçlar almıştır. Su/Çimento oranı 1.0'da %30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda İKY de %100 dahil olmak üzere tüm enjeksiyonlarda başarı sağlamıştır. Ultrafin 12 süspansiyonuna silis dumanı katılması enjekte edilebilirliği etkilememiştir. S/Ç oranı 1.0 ile yapılan sodyum bentonit katkılı Ultrafin 12 karışımlarda süspansiyonun yüksek viskozitesinde dolayı numunelere enjeksiyon yapılamamıştır. Addiment+silis dumanı katkılı Ultrafin 12 süspansiyonlarında karışımdaki addiment katkısının varlığından dolayı %30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda İKY %100'de dahil olmak üzere tüm enjeksiyonlarda başarı sağlamıştır. Numuneler kür ortamında, 3, 7, 14, 28 ve 56. Günlerde deneylere tabi tutulmuştur. Sıklık ve S/Ç oranlarındaki artış serbest basınç mukavemetlerini azaltmıştır.

Erkan (2013), tez çalışmasında, enjeksiyon basıncı, su/çimento oranı, tij çekme hızı ve tij dönme hızının JG kolonların basınç ve oluşumu üstündeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla laboratuvarında JG kolonu üretebilecek sistem tasarlanmıştır. Deneylerde enjeksiyon basıncı; 20, 30 ve 40 bar olarak, su/çimento oranı; 1.00, 1.25 ve

1,50 olarak, dönme hızı; 5, 10 ve 15 dev/dk., tij çekme hızı 15, 30 ve 45 cm/dk. olarak seçilmiştir. Parametrelerin JG kolon çapı ve serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek için S/N analizleri, çok değişkenli varyans analizleri yapılarak optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. JG kolon çapı üzerinde en etkili parametre %43 ile enjeksiyon basıncı olup, dönme hızı %36, S/Ç oranı %12 ve çekme hızı %10 oranında etkili olduğunu, dayanım üzerinde S/Ç oranının etkisi %27, çekme hızının etkisi %23 ve dönme hızının etkisi %14 olarak belirlemiştir. Laboratuvarında oluşturulan JG kolonlarda JG kolon çapının maksimum olması için enjeksiyon basıncı 40 bar, S/Ç oranı 1.5, çekme hızı 15cm/dk. ve dönme hızı 5 dev/dk. olarak belirlemiştir. Benzer şekilde yapılan çalışmalarla laboratuvarında oluşturulan JG kolonlarda basınç mukavemetinin maksimum olması için enjeksiyon basıncı 20 bar, S/Ç oranı %1 ve çekme hızı 15cm/dk. ve dönme hızı 10 dev/dk. olarak belirlemiştir.

Fidan (2014), çalışmasında, laboratuvarında yapılan deneylerle JG kolonlarının mukavemetini ve oluşumunu etkileyen etkenlerden çimento tane büyüklüğü ve su/bağlayıcı oranına uygun bir optimizasyon tekniği kullanarak araştırma yapmıştır. Deney çalışmalarında ultra ince taneli (Ultrafin 12) çimento kullanılarak değişik su/çimento oranlarında ve değişik basınç altında ayrı ayrı yapılmıştır. İnce taneli çimentonun JG kolonların performansına uygun parametrelerin seçilmesiyle katkıda bulunacağı öngörmüştür.

Idrees (2016), Mineral katkılardan olan UK, SD, YFC ile Portland çimentosunu (PÇ) farklı miktarlarda kullanılarak değişik su/bağlayıcı oranlarında enjeksiyon şerbetleri üretmiştir. Şerbetlerde eser miktarda hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanmıştır. Taze şerbetlerin reolojik değerleri malzemeleri karıştırma işleminden hemen 10 ve 20 dakika sonra iki adet ölçen ucu olan eBT2 reometresi kullanılarak yapmıştır. Kullanılan endüstriyel katkının miktarının şerbetlerin rölatif akma dayanımı ve rölatif viskozitesine olan etkileri belirlemiş ve endüstriyel katkı içermeyen kontrol karışımlarıyla karşılaştırmıştır. Literatür tarafından daha önce önerilen olan akma modellerinin doğruluğu bu çalışmada elde edilen deneysel çıktılar kullanılarak karşılaştırmış ve yeni bir model önermiştir. Önerilen modelin doğruluğu hem Portland çimentosu enjeksiyonları hem de endüstriyel katkı içeren harçlar için doğrulamış ve farklı modellerle kıyaslamıştır.

Kanat (2018), laboratuvarında farklı çimento enjeksiyon türleri, farklı Su/Bağlayıcı (S/B) oranları ve farklı enjeksiyon basınç değerleri kullanarak yaptığı deneylerle JG

kolonlarının basınç değerlerini etkileyen faktörleri incelemiştir. Çalışmasında ince taneli çimento, Portland çimento ve Portland çimentoya %10 seviyesinde SD ekleyerek farklı su/bağlayıcı seviyelerinde hazırlanan şerbetler ile muhtelif enjeksiyon basınç değerleri altında JG kolonları oluşturmuştur. Serbest basınç dayanımı açısından en büyük değeri DMFC-800 markası olan ince taneli çimento kullanılmasıyla yakalamıştır.

Battal (2019), çalışmasında Portland çimentosu (PÇ), mikro taneli çimento ve çimentonun ağırlıkça %15'i seviyesinde (F-UK) olup, bu malzemelerin birbirleriyle karışımlarından elde edilen 4 farklı enjekte edilecek şerbet oluşturmuştur. Portland çimentosu kullanılarak su/bağlayıcı oranları 0.8 ile 1.4 arası değişen enjekte edilebilecek özellikte şerbetlerle JG kolonları oluşturmuştur. Mikro taneli çimento kullanarak su/bağlayıcı oranı 0.8 ile 3.0 seviyeleri arası değişen JG kolonları oluşturmuştur. İmal edilen JG kolonlardan alınan numuneler üstünde basınç deneyi yapmıştır. Oluşturduğu 4 farklı tip JG kolonları içinde su/bağlayıcı oranı 0.8 olan JG kolonlarda en yüksek basınç değerini bulmuştur. Uçucu külün, düşük su/bağlayıcı karışımlarda etkisinin az olduğu, suyun arttığı yüksek su/bağlayıcı seviyeli karışımlarda daha etkili olduğu belirtmiştir.

Şenkaya (2019), tez çalışması kapsamında kumlu zeminlerin jet grout yöntemiyle iyileştirilmesinde farklı çimento tiplerinin performansları araştırılmıştır. Kullanılan çimentolar DMFC-800 ince taneli çimento, CEM I 42.5R normal Portland çimentosu, CEM II 42.5 Portland kompoze çimento ve CEM III/ A 42.5 N yüksek fırın cürufu (YFC) katkılı çimentolarıdır. Öncelikle çimentoların reolojik özellikleri belirlenerek enjeksiyonlarda kullanılacak su/çimento oranları belirlenmiştir. Küçük ölçekli silindir numuneler hazırlanmış, 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda numuneler üzerinde serbest basınç deneyi (UCS), yarmada çekme deneyi (STS) ve yalnızca 56 günlük kür süresinin sonunda geçirimsizlik testleri yapılmıştır. Küçük ölçekli deneylerin yanı sıra laboratuvar ortamında kurulmuş olan model JG teçhizatı kullanılarak büyük variller içerisinde model JG kolonlarını oluşturmuştur. Büyük ölçekli deneylerde küçük ölçekli deneylerle aynı S/Ç oranları kullanmıştır. Bu büyük ölçekli JG kolonlardan 90 günlük kür süresinin sonunda karot numuneleri alınarak UCS deneyi, STS deneyi, geçirimsizlik ve ultra ses dalga iletim hızı (UPV) testleri uygulamıştır. Ayrıca dayanım testlerinden seçilen numunelerden örnekler alınarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizleri yapmıştır. Yedi günlük kür süresi sonunda yapılan dayanım testlerinde en iyi sonuçlar DMFC-800 çimentosuyla hazırlanan numunelerden elde etmiştir. CEM II ve CEM III katkılı çimentoları klinkere ikame katkıları içerdiklerinden kısa dönemde düşük

performans göstermişlerdir. Katkılı çimentolar 28 günlük kür süresi sonunda CEM I çimentosundan daha iyi performans göstermişlerdir. CEM II ve CEM III çimentoları 56 günlük kür süresinin sonunda ince taneli çimentonun sonuçlarından daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Büyük ölçekli JG kolonlardan alınan karot numunelerinin performansında çimento enjeksiyonlarının reolojik özellikleri sonuçlar üzerinde etkili olmuştur. Enjeksiyonun reolojik özellikleri zemine nüfuz etme kabiliyetini etkilemiş ve küçük ölçekli numunelerin sonuçlarına göre farklılıklar ortaya çıkmıştır. UPV test sonuçları dayanım ve geçirimsizlik test sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumluluk göstermiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

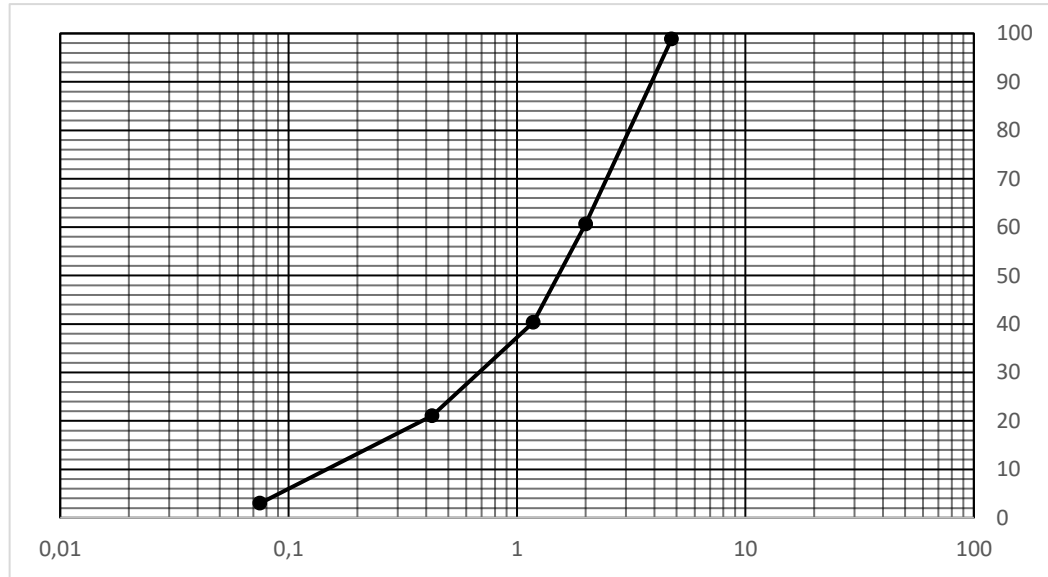
3.1. Kumun Özellikleri

Çalışmada, Konya İli, Selçuklu İlçesi, Eğribayat kum ocağından getirilen malzeme öncelikle yıkanmış ve zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Kum zeminde elek analizi ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılarak fiziksel özellikler belirlenmiş (ASTM D 6913-04, 2009, ASTM D 854-10, 2010), ayrıca TS1500-2000'e göre zemin sınıfı tespit edilmiştir (TS1500, 2000).

Kumun tane boyut dağılımı (Granülometri) eğrisi: Deney kumu için laboratuvarında ASTM standartlarına uygun olarak yapılan elek analizi sonucunda tane çapı dağılımı bulunmuştur. USCS zemin sınıfına göre kötü derecelenmiş kum (SW) zemin sınıfına girmektedir. Elek analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Zeminde %2 çakıl ve %97 kum %1' ince tane bulunmaktadır. Tane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.1. 'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kum fiziksel özellikleri

Zemin Sınıfı	SW
Efektif dane çapı D_{10} (mm)	0.17
D_{30} (mm)	0.7
D_{60} (mm)	2
Üniformluk katsayısı, C_u	11.77
Derecelenme katsayısı, C_c	1.44



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan kum zemine ait granülometri eğrisi

Kumun dane birim hacim ağırlığı: Deney kumunun dane birim hacim ağırlığını belirlemek için laboratuvarında piknometre deneyleri yapılmıştır. Yapılan piknometre deneyi sonucuna göre ortalama dane birim hacim ağırlığı $\gamma_s = 26.90 \text{ kN/m}^3$ bulunmuştur (Şekil 3.2.).

Kumun maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlığı: Deneylerde kullanılan kumun maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıklarını (boşluk oranlarını) belirlemek için standartlara uygun olarak proctor kalıpları ile deneyler yapılmıştır. Çizelge 3.2’de, deney ile belirlenen kuru birim hacim ağırlıklarına karşılık gelen kumun maksimum ve minimum boşluk oranları verilmiştir (ASTM D 4254, 2006, ASTM D 4253, 2002, Şekil 3.3.).

Çizelge 3.2. Kuru birim hacim ağırlığı ve boşluk oranı deney sonuçları

Sıkılık parametreleri	Değer
Tane birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	26.90
Gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_{k,\min}$ (kN/m^3)	14.20
Sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_{k,\max}$ (kN/m^3)	19.50
Minimum boşluk oranı $e_{\min}$ (%)	38
Maksimum boşluk oranı $e_{\max}$ (%)	89
Sıkılık derecesi D_r (%)	35



Şekil 3.2. Birim hacim ağırlık ve boşluk oranı tayini



Şekil 3.3. Minimum ve maksimum boşluk oranı tayini

3.2. Kullanılan Bağlayıcı Malzeme Özellikleri

3.2.1. Normal Portland Çimentosu (CEM-I- 42.5R)

Çimento, silisyum ve kalsiyum gibi maddelerin yoğunlukla bulunduğu kalker ve kil hammaddelerinin karışımının 1400°C kadar pişirilmesi ile ortaya çıkan yarı mamul madde olan iri taneli klinkerden oluşur. Çimentoya alçı taşı, tras, cüruf gibi katkı maddeleri katılarak daha ince boyutlardaki toz haline getirilir. Toz halindeki çimento, su ile tepki veren bağlayıcı özellik kazanır. Diğer bağlayıcı maddeler gibi çimentolar da CaO, MgO gibi alkalın maddeler ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi hidrolik maddelerden oluşur. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile kimyasal tepkimesi sonucunda sert bir cisim ortaya çıkar. Su içerisinde parçalanmayan, sertliğini ve mukavemetini koruyan veya daha da geliştiren özette suyla güçlenen bağlayıcı malzemelerdir.

Bu tez çalışmasında, ön deneylerde ve jet grout kolonlarının enjeksiyonunda Konya Çimento A.Ş. tarafından üretilen CEM I- 42.5R katkısız Portland Çimentosu kullanılmış olup kimyasal analiz sonuçları Konya Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. den alınmış ve piknometre analizi Konya Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği laboratuvarında yapılmıştır (Çizelge 3.3.)

Çizelge 3.3. Çimentonun kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri

Bileşen (%)	CEM-I 42.5R
Al ₂ O ₃	5.14
Fe ₂ O ₃	3.01
SiO ₂	20.83
CaO	63.87
MgO	2.47
SO ₃	2.50
Na ₂ O	0.15
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	31
Yüzey inceliği (cm ² /g)	3740

3.2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Cüruflar çeşitli endüstriyel tesislerinden atık madde olarak çıkan ve depo yapılan malzemelerdendir. Kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri elde edildiği fabrikaların imal ettiği ürün çeşidine ve imal etme metoduna göre birbirlerinden ayrılırlar. Yüksek fırın cüruflarının tek başına bağlayıcı madde olmasına rağmen nikel ve bakır gibi diğer cüruflarının sadece pozolanik özellikleri mevcuttur.

Cürufların inşaat ve yapı piyasasında çok çeşitli kullanımı ve beton içerisine ikame etme çalışmaları bulunmaktadır. Çeşitli çelik üretim yollarıyla elde edilen cüruflar

kristalimsi bir yapıya sahip madde olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmadan bertaraf edilirler veya ulaşımda karayolu alt malzemesi ve beton agregası gibi dolgu maddesi olarak tercih edilirler. Bu geleneksel yöntemle karşılık modern teknolojiyle çelik imal eden tesislerde camsı şekle benzer suyla tepki veren cüruflar atık olarak karşımıza çıkar. Bunları çimentoya ikame şeklinde ve enjeksiyon harcı olarak kullanımı görülmektedir. Bütün bu cüruflar arasında en çok kullanıma sahip olanı yüksek fırın cürufudur (YFC). Çok fazla miktarda silis ve alümin taneciklere sahip olan YFC, öğütülerek iri halinden ince taneli duruma getirildiği durumda, doğal puzolanların ve UK'nın puzolanik haline benzer nitelikte bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Ek olarak çok miktarda kalsiyum oksit ihtiva etmesi nedeniyle, YFC'nin kendi kendine de az da olsa bağlayıcı madde özelliği bulunmaktadır. YFC, tıpkı ince taneli istenen reaksiyona girebilecek doğal puzolanlar veya uçucu kül gibi bağlayıcı madde olarak kendine yer bulabilmektedir. Özetle kalsiyum hidroksit ve su ile birlikte hidrolik olan bağlayıcı malzeme olarak direkt olarak kullanılabilen, çimento klinkeri ve az miktarda alçı ile birlikte inceltirilerek cürufu çimento imalatında veya çimentoyla birlikte betona katkı maddesi olarak ekleme imkânı vardır (Özdemir, 2006).

YFC, ilave edilen karışımlarda işlenebilmeyi artırmaktadır. Harcın priz süresini uzatmaktadır. Oluşan JG kolonda suyun kılcal boşluklardan yukarı doğru yükselmesini azaltmakta ve hidrasyon ısını düşürmektedir. Prizini almış haldeki karışımın su geçirimsizliğini azaltmaktadır. Ayrıca sertleşmiş betonun sülfat dayanıklılığını artırmaktadır. Enjeksiyon şerbeti içindeki işlenebilirliğe katkı yapıp şerbetin akışını iyileştirmektedir. Deney yapılan numunelerde kısmi çökelmeler oluşmasının nedeni yerleşmeye olan katkısından kaynaklanmaktadır.

3.2.2.1 Üretim ve Hidratasyon

Demir ve çelik işlemlerinde artık malzeme olarak ortaya çıkan YFC yüksek dereceli fırınlarda ağırlıkça demirden hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde kalır. Demir filizi, kok ve kireçtaşının birlikte yanması akabinde artıkları YFC'yi ortaya çıkarırlar. YFC'nin oluşum ısı yaklaşık 1400-1500 °C'dir. Emil Largens YFC'nin suyla tepkimesi sonucunda ortaya çıkan maddenin kireçle harmanlanmasıyla bağlayıcı madde özelliğine sahip olduğu fikrini ortaya atmıştır (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

YFC'nin kendi başına su ile reaksiyonu, Portland Çimentosunun su ile verdiği tepkimeyle karşılaştırıldığında daha yavaş gelişim sağlar. YFC'nin suyla reaksiyonu, su

içerisinde kısmen erimesiyle C-S-H bağları, hidrate olmuş aluminatlar ve hidrate olmuş siliko aluminatların çökmesi olarak tanımlamak mümkündür. YFC'nin hidrate olmasındaki başlangıç aşamasında silikat iyonları su içerisinde erime haline dönüşür. İlk C-S-H yapısının çökmesinin ardından, erimiş haldeki kireç konsantrasyonu artarak yükselir. YFC hamurlarındaki hidrate aşamalarının belirlenmesine yönelik bir araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ takım halinde C-S-H, C_2ASH ve $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$ yapılarının olduğu belirlenmiştir. (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

YFC'nin hidratasyon işlemlerinin yavaş ilerlemesi birçok bilim adamını bu tepkimeye hız verecek katkıları araştırmaya yönlendirmiştir. Yapılan araştırmalar cürufları aktif hale getirmek için kullanılan maddeler Alkalın ve Sülfat içeren aktivatörler olmak üzere iki temel başlık altında toplamak mümkündür. Adana Çimento A.Ş. İskenderun Tesislerinden getirilen YFC'nin kimyasal analizi Oysa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. den temin edilmiştir. Çizelge 3.4'de YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. YFC'nin kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri

Bileşen (%)	Yüksek Fırın Cürufu
SiO_2	35
Al_2O_3	16
Fe_2O_3	1.40
CaO	37.5
MgO	5.25
MnO	1.75
S	1.50
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	28.50
Yüzey inceliği (cm^2/g)	4750



Şekil 3.4. Yüksek fırın cürufu (YFC)

3.2.3. Silis Dumanı (Silika Fume-Mikro Silika)

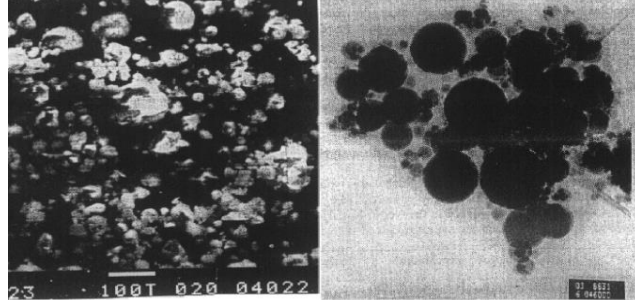
Silis elementinin veya ferrosilisyum bileşimlerinin imalatında artık ürün olarak ortaya çıkan, endüstriyel bir atık olan Silis Dumanının inşaat sektöründe değerlendirilmesi konusundaki ilk araştırmalar daha fazla doğayı kirletmeme hedefiyle 1955 senesinde Avrupa’da başlamıştır. Aşırı ince taneli ve yüksek miktarda silis içermesi sebebiyle etkin bir bağlayıcı malzeme olan bu maddenin çimento içine katılması veya bağlayıcı madde olarak beton işleminde kullanımı Norveç’te 1964’lü yıllarda deneme aşamasına geçilmiştir. İmalat ve uygulamada silis dumanının enjeksiyon içerisindeki davranışı ile ilgili araştırmalar özellikle Kuzey Avrupa ülkelerinde başta olmak üzere 1982’li yılların sonuna kadar devam etmiştir. Beton ve enjeksiyon için akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesinin sıklıkla uygulanması, SD’nin çoğu harç üzerindeki olumlu ve faydalı etkileri meydana getirmesi ve doğayı daha az kirletmesi, endüstriyel atıkların depolanma sorununun daha sıkı kontrolü gibi faktörler SD konusundaki araştırmaların özellikle uzun zamandır hızlı bir şekilde artmasına imkân sağlamıştır. (Yeğınobalı,1993).

Süper akışkanlaştırıcı katkılardaki olumlu ilerlemeler sonucu yüksek dayanımlı ve yüksek mukavemetli betonların ve enjeksiyonların vazgeçilmez bir parçası haline gelen SD, fabrika atığı olarak ortaya çıkan sorun oluşturan bir atık olarak değil ekonomik değeri olan ve talep gören bir malzeme haline dönüşmüştür. Son verilere göre dünyamızda ortaya çıkan senelik silis dumanı miktarı 10 milyon ton olup, Amerika ve Norveç ilk sıralardadır. (Yeğınobalı,2009)

Silis dumanının elde edilişi ve mekanik özellikleri: SD silikon metal alaşım endüstriyel üretiminin artık ürünü olarak ortaya çıkar. Elektrikli fırınlarında kuvarstın silikona dönüşmesi sırasında meydana gelen ortalama partikül boyutu 0.1 µm olan madde özel filtreler aracılığıyla bacalarda birikir. SD çağımızda yüksek mukavemetli çimento, harç ve beton imalatında sıklıkla tercih edilen puzolanik bir katkı türüdür. Türkiye’de diğer ülkelere göre daha az olmasına rağmen endüstride çoklukla kullanılmakta ve bilimsel araştırmalarda sıklıkla kendinden bahsettirmektedir.

Ülkemizde Elâzığ (Guleman) ve Antalya Ferrokrom endüstriyel fabrikalarında senede yaklaşık 1500-2000 ton civarında üretilmektedir. SD genellikle YFC gibi camsı, düzgün yüzeyli oval parçacıklardan oluşur (Şekil 3.5.). SD’nin tane incelik oranı diğer bağlayıcı maddelere göre fazla olduğu için tane inceliğinin belirlenmesinin, elek analizi ve blaine deneyi ile yapılması mümkün değildir. SD’nin tane boyutları azot absorpsiyonu

(BET) incelemesiyle belirlenir. BET kullanımıyla açığa çıkan özgül yüzey 150.000-200.000 cm²/gr olmaktadır (Çizelge 3.5.).



Şekil 3.5. SD'nin elektron mikroskoplarla çekilmiş görüntüleri (Yeğinobalı, 2009).

Çizelge 3.5. Bazı endüstriyel atık maddelerin özgül yüzeyi ve elde edilme şekli.

	Metot	Yüzey İnceliği (cm ² /g)
Portland Çimentosu	Blaine	3000- 4000
YFC	Blaine	3500- 6000
UK	Blaine	4000- 7000
SD	Azot (BET)	130 000- 200 000

Silis dumanı çok ince yüzeye sahip olduğu için uçucu hale geçerek havada asılı kalabilmektedir. Özgül ağırlığı çimento ve diğer katkı maddeleri olan bağlayıcı maddelere nazaran daha düşüktür. Bu sebepten dolayı beton ve harcın birim hacim ağırlığında azalmaya sebep olabilir. Fakat, silis dumanı beton ve harçlarda diğer bağlayıcı malzeme oranları da değişeceğinden genelde çok önemli bir kütle farkı olmaz. Silisyum elementi ile %80 ferrosilisyum alaşımları ve bunların karışımlarından ortaya çıkan SD'nin bileşimlerinde SiO₂ miktarı %85'e yaklaşmaktadır. SiO₂ renksiz bir bileşiktir ama rengini ve koyuluğunu karbon miktarına bağlı olarak alır.

Beton yaşı ilerledikçe bu ton farklılığının ortadan kalkabileceği literatür ve deneyimler belirtmektedir. Eti Elektrometalürji A.Ş. Antalya Tesislerinden getirilen SD'nin piknometre analizi Konya Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Kimyasal analiz ve sonuçlar Çizelge 3.6.'da verilmektedir.

Çizelge 3.6. SD'nin kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri

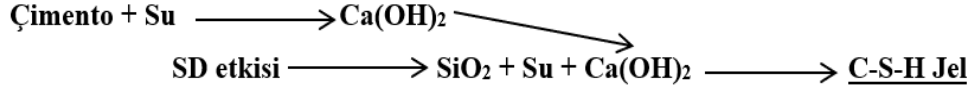
Bileşen (%)	Silis Dumanı
SiO ₂	94.94
Al ₂ O ₃	0.7
Fe ₂ O ₃	0.6
CaO	0.83
Birim hacim ağırlık (KN/m ³)	28.50

Silis dumanının su ihtiyacı ve kıvamı: Çok ince ve küresel silis dumanı tanecikleri ondan kat kat iri çimento taneciklerinin arasına girerek boşluklara hapsolan

suyu dışarı atarak ve taze harcın kıvamını değiştirirler. Bu faydaya zıt olarak SD taneciklerinin oluşturduğu büyük spesifik yüzey alanı, suya olan talebi artırarak hamur kıvamını ters yönde etkileyecektir. Sonuç olarak harçtaki çimento ve SD miktarı ile su/bağlayıcı malzeme (S/B) oranı gibi parametrelere bağlı etkilenecektir. Daha önceki bilimsel araştırmalara göre çimentonun miktarının ağırlıkça %5'i kadar silis dumanı su ihtiyacını hamurdaki su oranından karşılayabilmekte, daha fazla miktarda SD içerdiğinde ise su ihtiyacı yüzey alanı arttığı için artış göstermektedir. Aynı şekilde, çimentonun %7'sinden fazla SD katıldığında harcın akma değeri ve viskozitesinin arttığı, daha az seviyelerde ise azaldığı gözlemlenmiştir. (Yeğinobalı, 2009)

SD mineral katkısının beton ve harç dayanımı üzerindeki olumlu etkisini, özellikle agrega-çimento ara boşluğunu doldurarak yapışkanlığın artmasına ve sonuç olarak bağın kuvvetlendirmesiyle ilişkilendirilmektedir. Bazı araştırmalara göre çimentonun yaklaşık %15'i yerine ikame edildiğinde ortalama her çimento tanesine karşılık iki buçuk milyon SD taneciği gelerek boşluklara girmektedir. İnce SD tanecikleri ara yüzeydeki boşlukları doldurarak kılcal su çıkışını azaltır ve agrega taneleri yüzeyinde daha az suyu biriktirerek hamurun daha yapışkan hale getirir. Sonuç olarak harç ile agrega taneleri arasındaki fiziksel aderansı arttırmaktadır. Sellevold'a göre ince taneli mineral katkılar, çimentonun ilk evrelerindeki suyla olan tepkime hızını hızlandırmaktadır (Tokyay, 2013). Ayrıca bu tür ince tanecikler C-H kristalleri için de daha çok sayıda toplanma noktası sağladıklarından ara yüzeydeki iri C-H kristalleri yerine daha küçük tanecikleri oluşturmaktadır.

Puzolanik reaksiyonlar: Tanecik yapısının çok ince olması ve yüksek miktarda silis bileşeni içermesi nedeniyle SD çimento harcındaki C-H ile tepkimeye girerek puzolanik yapıdaki C-S-H jel yapısını meydana getirir. C-S-H jel yapısı beton ve enjeksiyon harcının dayanımında önemli rol oynar ve tüm kütle için istenen ideal bir ürün yapısıdır. Kalsiyum hidroksitin mukavemete katkısı olmayan, suda eriyen ve oluşan yapı elemanındaki boşluklu yapıdan sorumlu elemandır. Beton ve enjeksiyon harcının içerisinde en az miktarda olması istenilir. Bu konuda yapılan bir bilimsel çalışmada SD/CH oranı 2 olan bir çözeltide SD, bütün CaOH_2 'yi yapısında bulundurduğu silisle 7 gün içerisinde bağlayarak C-S-H jel yapısını meydana getirmiştir. SD/CH=1 olan çözeltide ise bu kimyasal tepkime yaklaşık 28 günde sona ermiştir. SD katkılı harçtaki puzolanik özellikteki jel normal olarak oluşmakta olan C-S-H jel yapısının ara boşluklarını doldurarak yoğun bir jel yapısı oluşmaktadır (Yeginobalı, 2009).



Huang ve Feldman'ın araştırmalarına göre de SD ilk 8 saat içinde suyla reaksiyona girmeyi hızlandırıp başlangıçta daha çok C-H yapısı ortaya çıkarmasına rağmen ilerleyen evrelerde C-H'nin daha etkili bir şekilde bağ yapmasını sağlamaktadır. SD'de düşük alkali ve yüksek miktarda silika miktarı puzolanik aktiviteyi daha da arttırmaktadır. SD katkısı ile C-S-H jelinin oluşumu aşağıda verilmiştir.

Silis dumanının mekanik özelliklere etkisi: Suyun çimento ile kimyasal tepkimesi sonucu ortaya çıkan silis dumanı, Ca(OH)_2 ile UK ve YFC gibi diğer puzolanik bağlayıcı maddelere göre daha hızlı reaksiyona girer. İnce taneli olması ve mineral yapısından dolayı çimentonun suyla olan tepkimesini aktivatör etkisine benzer şekilde hız kazandırarak betonun ve harcın sertleşerek mukavemet kazanma sürecini hızlandırır. Karışıma silis dumanı ilave edilirse karışımın su içeriğini düşürdüğü için su azaltıcı süper/hiper akışkanlaştırıcı eklenmesi gerekir. Aynı miktarda su içeren SD'li malzemelerin kıvamı daha yoğun olacağından SD ilavesiyle hazırlanmış olan beton ve harçların 50 mm'ye kadar ilk çökme değerinde hazırlanıp karıştırılarak hazırlanması tavsiye edilir. SD ilavesi karışımların hazırlanmasında tek farkın SD olması, kür durumlarının eşit olması halinde sürekli olarak betonun mekanik özelliklerini geliştirir.

Silis dumanı beton ve harç içinde katkı maddesi olarak kullanılmasının nedenlerinden biri, geçirimsizlik ve basınç dayanımında gösterdiği olumlu etkilerdir. SD'li karışımların basınç dayanımındaki artışı, çimento içindeki ikame SD miktarından daha çok düşük su/bağlayıcı oranına bağlıdır. Numunelerin gösterdiği mekanik mukavemet değerleri, %20 oranda SD ilavesine kadar artmakta, %10-%15 seviyelerinde en yüksek dayanımını kazanmaktadır.

Silis dumanın mikro taneli olmasıyla beton ve enjeksiyon harçları içindeki boşlukları doldurması hem de puzolanik özellik sağlayan reaksiyonların yüksek olması silis dumanı ikame edilen beton ve harç numunelerinde erken ve yüksek dayanımlar elde etmesine imkân sağlamaktadır. Fakat, SD katkılı betonlar, belli bir şerbet için yüksek miktarda suya gerek duymaktadırlar. Bu sebeple, SD katkılı beton üretiminde kesinlikle eser miktarda su indirgeyici türde ilave katkıların kullanılmaları gerekmektedir. Böylece, "su/(Çimento+SD)" oranı düşük tutulabilmektedir. (Erdoğan, 2003).

Permeabilite betonun mukavemet değeri üstünde etkili olan en önemli etkenlerden birisidir. Betonun yapısındaki boşlukların dolarak geçirgen yapısı azaldıkça dış etkenlere karşı dayanma gücü artar. Beton ve harçlarda bulunan kalsiyum hidroksit suda eriyebildiği için kılcal ve minik boru şeklimde boşluksu yapılar oluşturur. SD ise kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek boşluklarda kararlı C-S-H yapısı oluşturur ve geçirimsizliği önemli ölçüde azaltır. Çimentonun yerine belirli bir miktarda katılan puzolanik maddeler hamurdaki tepkimeler sonucu ortaya çıkan hidrasyon ısını düşürürler.

Mikro ve küremsi haldeki SD tanecikleri kat kat iri çimento taneleri arasına su ile yer değiştirerek total su miktarını arttırmalar. Bu olumsuz etkilenmeye karşı SD taneciklerinin doyması gereken epey miktarda yüzey alanı nedeniyle su ihtiyacı oluşur. Çimentonun %5 ve daha az miktarlarda ilave edilen SD çimento hamurunun kıvamını ve dolayısıyla taze betonun ve harcın işlenebilme kapasitesini önemli ölçüde etkilememektedir. Yüksek dozajda SD kullanıldığı zaman bağ oluşumundan artan yapışkanlık işlenebilirliği azaltır. Bu beton için istenmeyen durumdur. SD kullanımı halinde taze betonda işlenebilirlik düşmekte, işlenebilirliği belirli bir seviyede tutmak üzere akışkanlaştırıcı katkı kullanma zorunluluğu oluşmaktadır. Grout içerisine hiper akışkanlaştırıcı madde ilavesi veya ekstra su ilavesi gerekecektir. Böylece SD mineral katkısı artırılrsa bile su miktarını arttırmadan aynı işlenebilme kapasitesi sağlamak mümkündür (Özdemir, 2006).

SD'li beton ve harçlarda kullanılan akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları değişik ölçülerde çökme kaybına neden olduğu görülür. Burada mineral katkı ve çimento türlerinin rolü fazlaca olduğundan kullanılacak katkı malzeme ile önceden deneme karışımı yapılması ve çökme kaybının ve slump değerinin belirlenmesi son tasarımın buna göre belirlenmesi tavsiye edilmektedir (Yeğınobalı, 2009).

Diğer mineral ve kimyasal katkıları ile ilişkisi: SD'nin UK ve YFC gibi diğer mineral katkıları ile ilişkisi araştırıldığında, SD diğer puzolanik malzemelerin sebep olduğu düşük erken dayanımlarını yükseltmekte ön plandadır. Çimentonun suyla reaksiyonu esnasında başlangıçta oluşan C-H yapısı, SD tarafından bağlanmakta, diğer puzolaniklerde geriye kalan C-H ile tepkimeye girmektedir. Bu şekilde uygun seviyelerde kullanıldığını zaman SD'nin, mineral katkı malzemeleri ile hem erken hem de ileri dönemlerdeki dayanımlara olumlu etkisi olabilmektedir. UK içeren harçlarda geciken

priz süreleri %8 oranında katılan SD ile az miktarda da olsa kısaltılabildiği görülmüştür. (Yeğınobalı, 2009).

SD genelde süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılarla beraber kullanılır. Bu katkı malzemelerinin içerdđi polimer molekül zincirleri sayesinde çimento tanelerinin yüzeyinde belirli sürelerde hapsolur. Çimento taneciklerinin birbirlerini iterek hamur içerisinde kolayca dağılarak akmasını sağlarlar ve aynı kıvam için ihtiyaç olan karışım suyunu belirli ölçüde düşürür. Ortamda SD taneleri bulunması durumunda bu etkinin başlıca nitelikleri değışmemektedir (Yeğınobalı, 2009). Ortalama bir klinkerde %55-60 C_3S bulunmalıdır. Silis dumanı katkısı özellikle kalsiyum silikat (C_3S) hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Bu tepkime sonucu meydana gelen C-H yapısını da bağlayarak C-S-H jeline dönüştüreceğinden SD'nin C_3S miktarı fazlaca içeren çimentolarda daha etkili olacağı kesin bir dille söylenmesi uygundur.

Avrupa EN 13263-1, Amerika ASTM C 1240 ülkemizde ise TS EN 13263-1 standartları SD'nin beton ve enjeksiyon harçlarında kullanımı için uygunluk dereceleri ve belgeleri içermektedir. SD'nin çimentoda kullanımı için Avrupa'da kabul gören uygunluk standardı EN 197-1, ülkemizde TS EN 197-1, Amerika'da ise ASTM C 1240 olmuştur. TS EN 197-1 'e göre Amorf SiO_2 oranı $\geq$ %85 ve serbest CaO oranı %1'i geçmemiş olmalıdır.



Şekil 3.6. Silis dumanı

3.2.4. Uçucu Kül (UK)

UK kömür ile çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir yan üründür. UK en yaygın kullanılan ve ülkemizdeki termik santral sayısından dolayı en çok bulunan puzolandır. Termik santrallerde çok ince öğütölerek yakılan kömürden UK'nin elde edilmesi mümkündür. UK, çok ince taneli olup baca gazları ile taşınarak filtrelerde toplanılır. Termik santralin 1 kWh'lik enerji üretiminde yaklaşık olarak 100 g kül atık

madde olarak ortaya çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden senede yaklaşık 700.000 ton UK açığa çıkar. Açığa çıkan bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin ve doğayı kirletmenin yanı sıra enerji üretim kaybı gibi konularda ekonomik ve teknik problemlere neden olabilmektedir (Taşdemir, 2002)

Dünyadaki UK üretimi senede yaklaşık 500 milyon tondur fakat toplam UK miktarının yalnızca %8'i çimento ve beton imalatlarında puzolan olarak kullanıldığı düşünülmektedir. Ülkemizde kömürle çalışan 12 enerji santralinde senelik UK üretimi yaklaşık 18 milyon ton mertebelerindedir. Yine aynı şekilde bu malzemenin çok az bir kısmı çimento, beton ve diğer yapı malzemeleri üretiminde bir bileşen madde olarak uygulama sahası bulabilmektedir (Tokyay ve diğ., 2009).

UK'dan ekonomik ve çevresel olarak faydalanılması, kullanılabilir miktardaki nakliye bedeline ve istenilen tasarıma bağlıdır. UK hidrasyon ısını düşürür ve taneciklerinin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini, işlenebilirliği ve kolayca sıkışmasını sağlar. UK'nin kimyasal yapısı, tane boyut dağılımı, inceliği, puzolanik aktivitesi ve betonun kür bakımı koşulları, UK içeren betonun mekanik özelliklerine etki eden önemli faktörlerdendir.

Doğayı ve havayı kirleterek yaşama zarar vermesinden dolayı, UK'nin fabrika bacasından yukarı çıkması ve havaya karışmasının önlenmesinin gerekir. Burada UK mekanik ve elektrostatik yöntemlerle bacalarda toplanarak fabrika civarında veya başka uygun depolama sahalarında biriktirilir. Toplanarak biriken UK geniş alanları kaplamaya başlar ve tesisler için büyük sorunlar oluşturmaya başlar.

UK terimi 1920'li yılların sonlarına doğru elektrikten enerji üretimi endüstrisinin yaygınlaşmasıyla ortaya çıkmış ve UK çimentonun içerisinde kullanımı yine bu tarihlere yakın başlamıştır. 1940'da R.E Davis, Californiya Üniversitesinde UK içeren betonla ilgili çalışmalarını yayınlamış ve bu araştırmada UK kullanımının temellerini atmıştır. (Yeğinobalı ,2009). Yapı sektöründe kullanılan UK miktarı, senede ortaya çıkan atığın %5'i ne dahi yaklaşmamıştır. Son zamanlarda özellikle hazır beton sektörünün ilerlemesi ve Avrupa'dan ülkemize getirilen yeni çimento ve beton uygulama ve yöntemleri çimento ve beton endüstrilerinde UK'ye olan talebe artış olacağını söylemek mümkündür.

Beton ve harç imalatında çimentoya %10 UK ikamesi, su ihtiyacını %4 oranında azalttığı yapılan araştırmalarla belirtilmektedir. Azalan su ihtiyacından dolayı boşluk oranının önemli ölçüde azaldığı bilinmektedir. Çimentoya %30 oranına kadar ilave edilen

UK prizi geciktirirken, yine %10 oranına kadar UK yerine SD ile deney yapılması durumunda ise priz süresinde 30 dk. kadar azalmalar gözlemlenmektedir (Temiz ve Yeğinoğlu, 1995).

UK ihtiva eden ve düşük su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlar yüksek su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlara göre daha yüksek dayanım sonuçları göstermektedir. Ayrıca beton ve harç karışımlarda UK'nin dayanıma olan etkisi harç karışımlarda daha iyi sonuçlar vermektedir. UK içeren betonun erken dönemlerde düşük dayanımlar verdiği fakat uzun vadede SD içeren beton ve harcın dayanım ve mukavemet değerlerine yaklaştığı deneylerde görülmüştür. Mineral katkı malzemesi olarak UK kullanılmasının beton mukavemetine etkisi, ince taneli doğal puzolan etkisine benzerdir. Erken yaşlarda UK içeren sertleşmiş betonun dayanımı katkı içermeyen beton dayanımına oranla az daha düşüktür fakat uzun vadeli dayanımı SD katkılı dayanıma yakındır. Erken yaşlardaki dayanım artışı, UK'nin incelik ve türüne göre farklılık gösterebilir (Erdoğan, 2003).



Şekil 3.7. Uçucu kül

Uçucu külün özellikleri ve sınıflandırılması: UK'nin özellikleri yakılan kömürün niteliklerine ve kömürün yakılma sistemine bağlı olarak değişiklik gösterir. Genelde silisi ve alüminli olan içerikleri dolayısıyla puzolanik bağlayıcı özellik taşıyarak beton ve çimentoda katkı malzemesi olarak faydalı olur. İnce ve küresel tanecikleri dolayısıyla taze beton ve harçta işlenebilirliği artırır; ayrıca tepkimelerden kaynaklanan hidrasyon ısını düşürür. Çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kireçle tepkimeye girerek ilave bağlayıcı özellik kazandırır, çimento hamuru arasındaki boşlukları kapatır ve beton mukavemetini artırır. Linyit kömürünün yanması ile ortaya çıkan UK'de kireç yüzdesi genelde fazla olup bu tip UK'ler aynı zamanda hidrolik bağlayıcılık fonksiyonu da vardır. Bütün bu olumlu gelişmelere rağmen, betonda kullanımı konusunda faydalanılan UK miktarı fabrikalarda ortaya çıkan miktarların yüzde 5'ini geçmemektedir. Dünyada ortalama kullanımı %18-20 oranlarında seyretmektedir.

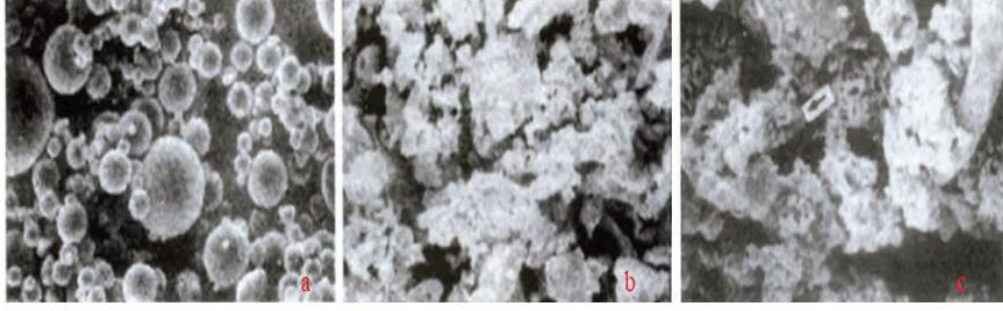
Kömürün termik santrallerde yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu ortaya çıkan ürün soğutulularak, gaz çıkışıyla küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. UK'de bulunan başlıca bileşenler yaklaşık CaO (%1-30), Al_2O_3 (%15-30), SiO_2 (%30-60) ve Fe_2O_3 (%1-10) civarlarında olup, bu farklı bölgelerdeki oranlar UK'nin cinsini tayin etmektedir. UK'nin sınıflandırılmasında, kimyasal içerik yüzdesine göre ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları göz önüne alınır. Uçucu kül ASTM C 618 standardına göre F ve C sınıfı olmak üzere 2 ana gruba ayrılırlar.

F sınıfı: bitüm içeren kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ve toplam $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den daha fazla olan UK'ler bu sınıfta bulunmaktadır. Bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için aynı zamanda düşük kireçli sınıfta bulunurlar. F sınıfı UK betonda istenilen puzolanik bağlayıcı özelliği taşır.

C sınıfı: linyit kömürden yakılması sonucu çıkan ve toplam $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'den daha fazla olan UK'dir. Aynı zamanda, C sınıfı UK'de CaO yüzdesi %10'dan fazla olduğu için bu tip UK'ler yüksek kireç içeren UK olarak da bilinirler. C sınıfı UK hem puzolanik özelliği hem de kendi başına bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Birim hacim ağırlıkları $20\text{-}23 \text{ kN/m}^3$ aralığında değişen UK'nin gevşek durumdaki birim hacim ağırlığı 8 kN/m^3 civarındadır. UK'de büyüklükleri $0.5\text{-}150 \mu\text{m}$ aralığında değişen hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin büyüklük ve şekil açısından farkları, UK'nin türünden yani düşük kireç içermesi ya da yüksek kireçli olmasından kaynaklanmaktadır. Rengi açık duman grisinden açık griye doğru uzanır. Fazla miktarda karbon içeren UK koyu gri renkte, demir içeren UK'ler ise daha açık tonlardadır. Tanelerin büyüklük ve şekli taze beton ve harcın su ihtiyacı ve işlenebilme kapasitesi gibi reolojik ve akma özelliklerine etki ettiği literatürlerde bulunmaktadır.

UK'nin tane büyüklüğünün değişken olması durumunda da hamurun su ihtiyacını artmaktadır. UK'nin $40 \mu\text{m}$ 'nin altında olması ve şeklinin genellikle küresel yapıda olması puzolanik aktiviteye ve bağ yapmaya olumlu katkısı bulunmaktadır. Yüzeyinde pürüz bulunmayan küresel ince tanecikler, yüzey alanları çok geniş olduğu için kireç-silikat tepkimelerine daha hızlı girerek reaksiyon oluşturmaktadır. Genel olarak küllerin inceliği arttığı zaman SD gibi puzolanik aktivitesi de artar (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Uçucu Kül katkısının morfolojik yapısı (Yeğinoğlu,2009).

Uçucu külün kimyasal analizi: Kütahya ilinde bulunan Seyitömer Termik Santralinde, UK kimyasal bileşen değerleri Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi birbirine çok yakın olduğu için; bu tesisten uniform ve standart özellikte UK alınması mümkündür. Seyitömer UK’sinin reaktif kireç miktarı %10’dan az olması (%2.5) nedeniyle, TS EN 197-1’e göre V sınıfı (silissi UK yapısı) sınıfında bulunmaktadır. Reaktif silis miktarı %25’ten fazla (%39) olması olduğu içinde TS EN 197-1’de V sınıfı UK için istenilen şartlara uygunluk sağlamaktadır. $Fe_2O_3+SiO_2+Al_2O_3$ toplam miktarı yüzde 88,72 olup ASTM C 618’e göre %70’ten fazla olması ve CaO’in %10’dan düşük olmasından dolayı F sınıfı (düşük kireçli) UK sınıfında bulunmaktadır. $Fe_2O_3+SiO_2+Al_2O_3$ toplam miktarının %70’ten fazla olması TS 639’da istenen koşulları sağlamaktadır.

ARES ÇİMENTO A.Ş. Seyitömer Termik Santralinden getirilen F sınıfı UK’nin analizler Konya Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Kimyasal analiz ve sonuçlar Çizelge 3.7.’de verilmektedir.

Çizelge 3.7. Uçucu külün kimyasal içeriği

Bileşen (%)	F sınıfı
SiO ₂	54.49
Al ₂ O ₃	20.58
Fe ₂ O ₃	9.27
CaO	4.26
MgO	4.48
MnO	1.75
SO ₃	0.52
Reaktif kireç	2.49
Reaktif silis	39.01
Birim hacim ağırlık (KN/m ³)	21.2
Yüzey inceliği (cm ² /g)	3300

ASTM C 618’e standardına göre, $Fe_2O_3+SiO_2+Al_2O_3>%70$ şartı ve CaO yüzdesi %10’dan az olduğu için Seyitömer UK’si F sınıfında (düşük kireçli kül) bulunmaktadır. UK uygun seviyelerde ve doğru kullanımı durumunda beton ve harcın birçok özelliğine katkı sağladığı ve kimyasal etkilere karşı direnç kazandırdığı bilinmektedir. Yapılan

araştırmalarda UK'nin puzolanik tepkimeyi hızlandırmak için kullanılmış ve bu UK'nin aktifleşerek inşaat mühendisliğinde nemli bir katkı maddesi olarak kullanılmasının önü açılmıştır (Yeğınobalı, 2009).

3.2.5. Endüstriyel Kimyasal Katkılar

Taze veya sertleşmiş betonun bazı özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi yapılırken hamurun veya harcın içine çimento ağırlığına oranla belirli ölçülerde eklenen genellikle yapay olan kimyasallardır. Genelde betonun ilk karışma anındaki özelliklerini değiştirmek için hamuru karıştırma esnasında harca çimento kütlelerinin %4'ünü aşmama kaydıyla, ilave edilen organik ve inorganik maddelerden oluşan kimyasallar katkı malzemesi olarak adlandırılırlar. Katkı malzemeleri genellikle harcın içine değil karışım suyuna ilave edilir. İhtiyaç fazlası kullanımda olumsuz etkiler yaratacağı gibi gereğinden daha az eklenirse istenen görevini yapamayabilir. 1950'li yılların sonuna kadar betona ve harca ilave katkı kullanımının fayda etmeyeceği düşünülüyordu. İlerleyen yıllarda katkının önemi ve etkisi anlaşıncaya beton ve harca katılan kimyasal katkı maddeleri betonun en önemli bileşenlerinden biri olmuştur. Tüm dünyada üretilen betonların ve enjeksiyon harçlarının yarısından fazlasında kimyasal katkıların kullanıldığı bilinmektedir. (Sarıbıyık, 2013)

Kimyasal katkı malzemelerinin kullanımı tüm dünyada geniş ölçekte tercih edilmektedir. Katkısız beton günümüzde düşünülmeyen bir üretilimdir. Elbette saha uygulaması standart ve yönetmeliklerde belirtildiği gibi uygulanmaz ise, katkı malzemesinden verim alınmaz. Beton karışım hesabı, üretimi ve beton döküldükten sonraki bakımı uygun şekilde yapılmazsa, beton ve harçtan istenen ve beklenen kalite katkı malzemeleriyle iyileştirme beklenemez. Katkı malzemelerinin amaç dışı kullanımında elbette istenmeyen etkileri olacaktır. Beton katkı malzemesi kullanıldıkları beton ve harçta, çimento ve diğer bağlayıcı malzemeler ile ve aynı anda kullanılan diğer kimyasal katkı malzemeleriyle ters reaksiyona girebilir. Katkı malzemeleri genelde çimento dozajının ağırlıkça oranında ilave edilir. Katılma yüzdesine çok dikkat edilmesi gerekir. Çünkü kimyasal katkı maddeleri ek maliyet getiren ve betonun yapısını çabucak değiştiren öğelerdir. Bundan dolayı beton üretiminde kimyasal katkı maddeleri çok bilinçli kullanmak gerekir. En çok bilinen kimyasal beton katkı maddeleri şunlardır; Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı, su tutucu katkı, hava sürükleyici katkı,

priz hızlandırıcı katkı, priz geciktirici katkı, sertleşmeyi hızlandırıcı katkı, su geçirimsizlik katkısı.

Hiper akışkanlaştırıcı katkı: Beton ve harçta akma kıvamını değiştirmeden hamura girmesi gereken suyu yüksek miktarda azalmasını sağlayan ve su oranı değişmeden işlenebilirliği artıran kimyasal katkılardır. Genellikle yapay olarak üretilen Uygulamada genelde tercih edilmesinin sebebi;

- Betona katkı maddesi eklemekten üretilen betonla aynı işlenebilme kapasitesinde olmak kaydıyla su/bağlayıcı oranını azaltarak daha yüksek basınç dayanımı sağlamak.
- Baraj gibi yapılarının büyük kütleli beton imalatında hidrasyon ısını düşürerek çimento miktarının azalsa da aynı işlenebilmeyi kazanmak. Katkının bu şekilde kullanımı daha az çimento kullanımından dolayı daha ekonomik bir beton imalatı demektir.
- Yüksek katlı yapıların ulaşılabilen yerlerine pompalamayı ve kolay yerleştirilebilmeyi sağlamak amacıyla betonun işlenebilme özelliğinin korumak.

Normal akışkanlaştırıcı için yukarıdaki maddelerde belirtilen amaçlar hiper akışkanlaştırıcılar içinde geçerlidir. Fakat süper ve hiper akışkanlaştırıcılar daha çok işlenebilirliği daha fazla arttırmak için kullanılmakta, yani “akıcı ve pompalanabilir beton” üretiminde bu kimyasal katkılardan daha fazla yararlanılmaktadır. Hiper akışkanlaştırıcıların ekstra bir özelliği ise yüksek dayanım istenen beton üretiminde kullanılmakta, bu modern dönemin kimyasal katkıları sayesinde çok düşük su/bağlayıcı oranlarında katkısız betondaki işlenebilmeler elde edilmektedir.

Hiper akışkanlaştırıcıların olumlu yanlarının yanı sıra olumsuz etkileri de vardır. Hiper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak elde edilen yüksek işlenebilme kapasitesi yaklaşık bir saat sonunda çökme kaybı yaşanmakta ve giderek çökme devam etmektedir. Bu çökme kaybı, diğer katkılara nazaran daha küçük oranlarda özel katkılarla, iki saate kadar uzatılabilmektedir. Son yıllarda geliştirilen yeni nesil akışkanlaştırıcılarda bu işlenebilme kaybı ortadan kalkmıştır. Dökülen beton ertesi gün yüksek mukavemete dayanımını kazanmaya başlamaktadır. Sancak Hazır Beton A.Ş. beton santralinden temin edilen CHRYSO*DELTA 1115-3 markalı akışkanlaştırıcı katkının kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.8. verilmektedir. Bu ürün TSE EN-934-2 standardına uygundur.

Çizelge 3.8. Hiper Akışkanlaştırıcının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Sonucu	Hiper Akışkanlaştırıcı
Renk ve Görünüm	Kahverengi ve Homojen
Yoğunluk (gr/cm ³) (20°C)	1.15
pH	6.32

**Şekil 3.9.** Hiper akışkanlaştırıcı

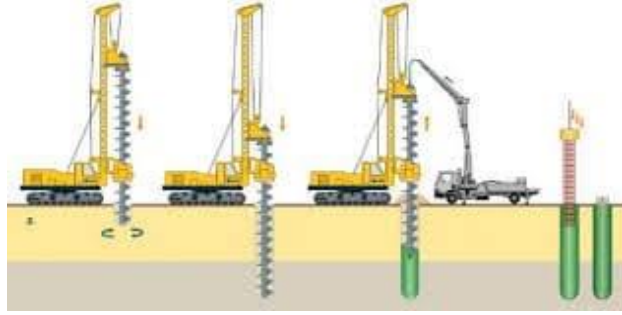
3.3. Jet Grout

Jet grout yöntemi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde sıklıkla tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Maliyetinin diğer yöntemlere göre ekonomik olması, hızlı uygulama ve makine ekipmanlarının ülkemizde üretimi, farklı zemin cinslerinde uyum sağlaması, iş güvenliği açısından ve doğayı daha az kirletmesi gibi nedenlerden dolayı da diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden ayrılır.

Bu yöntemle tek bir yöntem ve imalatla temel zemini taşıma, güçlendirme ve sızdırmazlık sağlamak mümkündür. Mevcuttaki zeminin önce özel burgu makineler ile delinmesi ve sonrasında yüksek basınçta 400-600 bar ile çimento karışımının nozullardan püskürtülerek, kötü zeminin olay yerinde parçalanarak çimento karışımı ile karıştırılması ve kullanılan özel makine ekipmanlarıyla sabit bir hızda dönerek yukarı çıkarılması yöntemiyle kazılan yere silindirik yapı oluşacak şekilde JG kolon imal edilmektedir. Bu yapım yöntemi tüm dünyada JG yöntemi olarak adlandırılır.

Ülkemizde jet grout imalatı son yıllarda zemin iyileştirmesi olarak uygulamalarda JG enjeksiyonu, 1972 yılında Japonya'dan tüm dünyaya yayılmıştır. Avrupa'da genelde SOILCRETE ismiyle bilinmektedir. Bu teknikte aşağıya doğru indirilen bir sondanın ucundaki 4-5 mm çapındaki nozuldan fişkıran çok yüksek basınçlı suyun zemini aşındırarak parçalaması özelliği kullanılır. Zemin bu yoldan istenilen derinliğe kadar parçalandıktan sonra sonda yine dönerek yukarı doğru çıkarılırken cidarlara doğru sulu

çimento ve katkı maddesi içeren enjeksiyon sıvısı basınçla püskürtülme ve sulu çimento zeminle homojen olarak karışmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Jet enjeksiyonu uygulaması

3.3.1. Jet Grout Kolonu İmalat Yöntemi

JG kolonu, 400-500 bar basınçla zemine püskürtülen su ve çimento karışımının zemindeki boşlukların dolarak zeminin sıkıştırılmasıyla imal edilir. Yüksek basınç, gönderilen enjeksiyon sıvısının nozuldan geçerken çok yüksek bir kinetik enerji kazanmasını sağlar. Su-çimento şerbetinin hızı 250 m/s hızına ulaşarak, enjeksiyon zemini parçalayarak zeminle birlikte bir kütle oluşturur. Zemin sulu çimentoyla birlikte birleşerek sertleşmeye başlar. JG'nin özelliklerini belirleyen parametreler; uygulanan zeminin cinsi, jet enjeksiyonun tij içindeki basıncı, nozul çapı, jet enjeksiyon şerbetinin içeriği ve jet enjeksiyon tijinin dönme ve çekme hızlarıdır.

3.3.1.1. Delme

Zemini delme esnasında kuyu ağzının YAS seviyesi üstünde olması çalışma imkânı açısından önemlidir. Delgi yöntemi zemin türüne bağlı olarak seçilir. Delme işleminin kolaylaştırılması ve zemine jet enjeksiyonu imalatı için delme esnasında farklı su, hava, bentonit gibi akışkanlar kullanılabilir. Uç takımı yumuşak zeminlerde genellikle matkap, sert zeminlerde ise daha keskin ve sert makine ekipmanları tercih edilir. Bağlantı manşonlarında 600 bar basınca dayanıklı sızdırmazlık ekipmanları ve delgide 90 mm çapta tijler tercih edilir.

3.3.1.2. Enjeksiyon

Tasarımda belirtilen istenilen yüksekliğe ulaşıldığı zaman delme ve basma işlemi durdurulur. Çelik bilye grout borusu içinde yollanarak harcın yönü, delgi ucunun hemen arkasında bulunan yaklaşık 2.5mm çapındaki 2 adet nozulları taşıyan ekipmana çevrilir. Su/bağlayıcı oranı genelde 1.0'dır fakat proje koşullarına göre oran 0.8 kadar çekilebilir. Yüksek basınçlı enjeksiyon sıvısı pompalanmaya başlanması ile enjeksiyon aşamasına

geçilir. Yaklaşık 250 m/s hızlı şerbet delici takımının dönme ve çekme hareketi ile dairesel silindirik kesitli bir zemin harç karışımı beton haline dönüşür. Delgi takımının önceden hesaplanmış dönme hareketi sabit bir hızla yukarı çekme ile birleşince düşey silindirik bir JG kolon şeklinde bir yapı ortaya çıkar. Zemine jet enjeksiyonu istenilen JG üst kotuna kadar yapılır. Enjeksiyonun basıncından etkilenmemek için JG üst kotu her zaman yüzeyden 30 cm aşağıda bırakılmalıdır. Basıncılı jet enjeksiyonu esnasında delgi takımının etrafından dışarıya doğru bir miktar zemin materyalinin taşması normaldir. Bu durum, enjeksiyon şerbeti ile karıştırılan zemin içerisinde aşırı şişme basıncının oluşmadığını gösterir. Aşırı şişme basıncı oluşması durumunda zeminde kırılmalar ve JG kolonlarda spiralleşme ve süreksiz kolon oluşumu gibi sorunları ortaya çıkarabilir.

Parametrelerin Belirlenmesi: JG kolonların boyutları; zeminin cinsine, çekme hızına, enjeksiyon basıncına, dönüş hızına, nozul çapı ve sayısına da bağlıdır. Çizelge 3.9.'da çapa bağlı yaklaşık olarak sarf edilecek çimento, enjeksiyon miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.9. Kullanılan malzeme miktarları*

Kolon Çapı (cm)	1 m'deki kolon hacmi (m ³)	Çimento miktarı (kg)	Enjeksiyon miktarı (lt)
40	0.13	57	75
60	0.28	127	170
80	0.50	226	301
100	0.79	353	471

*Çimento Dozajı 500 kg/ m³, Su/Çimento oranı 1.0 dir.



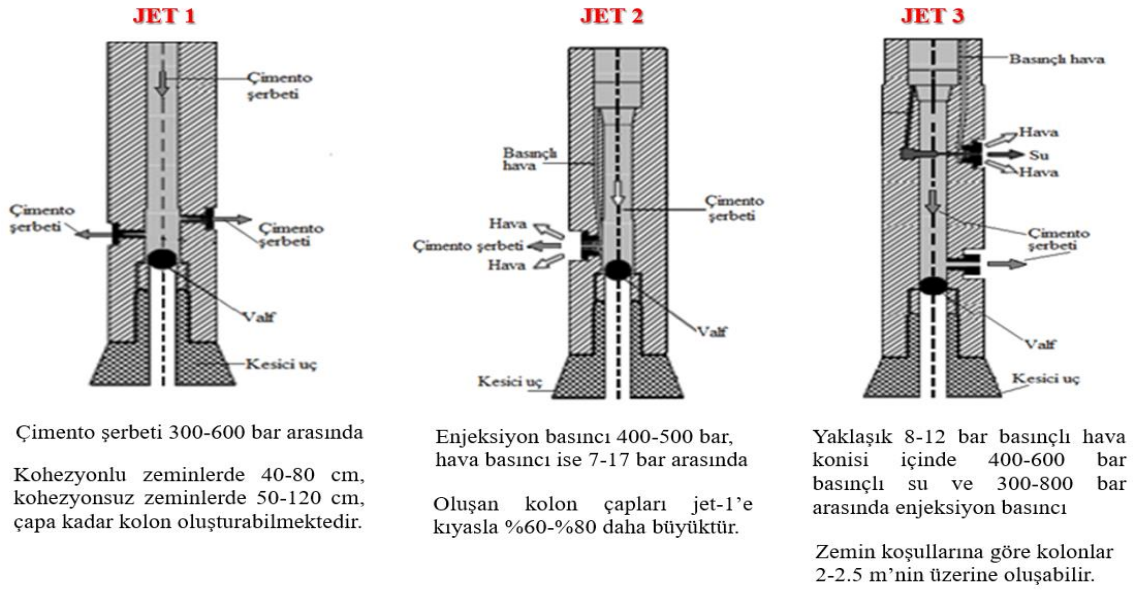
Şekil 3.11. JG makinesi ve oluşan JG kolonu

3.3.2. Jet Grout Teknikleri

Jet Grouting uygulamasında genel olarak 3 farklı yöntem kullanılabilir. Bunlar:

- Tek akışkanlı sistem (Jet-1, su+çimento karışımı)
- Çift akışkanlı sistem (Jet-2, su+çimento karışım+hava)

- Üç akışkanlı sistem (Jet-3, su+çimento karışım+hava)



Şekil 3.12. Jet Grout uygulama teknikleri (Croke vd., 2014)

3.3.2.1. Jet-1 yöntemi

Uygulaması en kolay ve sıklıkla kullanılan yöntemdir. İlk olarak 1970'de Japonya'da, 1975'te Avrupa'ya geçerek İtalya'da uygulanmıştır. Delme-enjeksiyon takımı tek çeperli bir sondadan oluşup, enjeksiyon harcı sondadan 400-500 barlık basınçla nozullardan püskürtülür. Killi zeminlerde 40-80 cm, kum-çakıl zeminlerde 50-120 cm çapa kadar kolon oluşturabilmektedir. Granüler zeminlerde mukavemeti en yüksek elemanlar tek akışkanlı sistem ile zemindeki boşluk oranları ise Jet-2 ve Jet-3 tekniğine göre daha azdır. Jet-1 yöntemi kum ve çakıl içeren zeminlerde oluşan JG kolon çapından da görüldüğü üzere daha çok tercih edilir. Ayrıca killi zeminlerde SPT Değerlerinin çok düşük olduğu zemin tiplerinde de uygulanabilir.

3.3.2.2. Jet-2 yöntemi

İki çeperli bir boru takımının delici olarak kullanıldığı, iki akışkan kullanılan yöntemdir. Enjeksiyon harcı orta borudan, ~10 barlık basınçlı hava dış borudan ilerler. Basınçlı hava, kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azalttığı için, bu yöntemle imal edilen kolon çapları Jet-1'e göre %75 daha büyük olması beklenir. Parçalanması daha zor killi ve daha sert kumlu-çakıllı zemin tiplerinde tercih edilir.

3.3.3.3. Jet-3 yöntemi

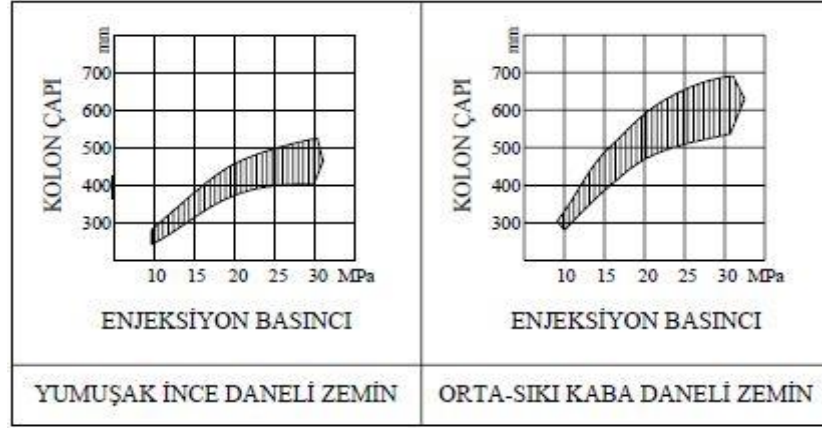
İç içe 3 borulu takım kullanılan bu yöntemde, yaklaşık 500 bar basınçlı su ortadaki borudan, yaklaşık 10 bar basınçlı hava ortadaki borudan Jet-2 yöntemine benzer nozullardan püskürtülür. 50 bar basınçlı enjeksiyon harcı en dış borudaki ayrı bir nozuldan su-hava karışımı içerisine enjekte edilir. JG kolonlarının çapları bu yöntemle 2 metreye kadar çıkarılabilir. İmalatı zor ve ekonomik olmadığı için özel tip imalatlarda bu yöntem tercih edilir.

3.3.3. Jet Grout Parametrelerin Belirlenmesi

Tek akışkanlı JG imalatı için tasarım aşamasında önceden belirlenmesi gereken 5 temel imalat parametresi vardır. Enjeksiyon basıncı, nozul sayısı ve çapı, su/bağlayıcı oranı, çekme ve dönme hızı JG kolonunun özelliğini belirleyen faktörlerdir. İki akışkanlı JG uygulamasında ise tek akışkanlı JG yöntemindeki parametrelere ek olarak hava basıncı ve hava akış oranı tasarım aşamasında önceden bilinmelidir. Üç akışkanlı yöntemde ise iki akışkanlı yönteminden farklı olarak suyun basıncı ve su jeti püskürtme ağızlığı sayısı ve çapı parametreleri de tasarlayan geoteknik mühendisi tarafından seçilmelidir.

3.3.4.1. Enjeksiyon basıncı

Tasarlanan ve istenen ölçüde JG kolon çapı imal edilebilmesi için en önemlisi enjeksiyon basıncıdır. Enjeksiyon basıncı şu şekilde gruplara ayrılabilir. 200-250 bar arası düşük basınçlı, 300-400 bar arası orta basınçlı, 400-600 bar arası yüksek basınçlı enjeksiyon kabul edilir. Enjeksiyon basıncı ile kolon çapı arasında doğru orantı bulunur. Genelde yüksek basınçlı enjeksiyonlarda aynı zemin tipinde daha büyük JG kolon çapları üretilmektedir. Basıncın her zaman artması ile istenilen çap elde edilememektedir. Çünkü kolon çapının oluşumunda geçen sürenin de önemi vardır. JG kolonun imalatı için geçen süre kolon çapının homojen bir şekilde olmasını direkt etkilemektedir. Şekil 3.13.' de enjeksiyon basıncı ve oluşan kolon çapı arasındaki ilişki görülmektedir. Enjeksiyon basıncı ayarlanırken önemli diğer bir yer ise enjeksiyon basıncının pompadan çıktıktan sonra hortumlarda, sonda ve nozulda basıncın yaklaşık %8 ini kaybedeceği unutulmamalıdır.



Şekil 3.13. Enjeksiyon basıncı JG kolonu arasındaki ilişki (Xanthakos ve ark., 1994)

3.3.4.2. Çekme ve dönme hızı

Tijin dönme ve çekme hızı oluşturacağımız JG kolonunun sürekliliği ve zemin ile enjeksiyon malzemesinin homojen bir şekilde karışabilmesi açısından büyük önem taşır. Tijin dönmesi, kendi eksenini etrafında dakikada kaç devir döndüğüdür. Tij çekilme işlemi ise öngörülen derinliğe ulaşıldıktan sonra enjeksiyonun başlamasıyla birlikte aşağıdan yukarıya doğru belli bir hızla çekilmesidir. Tij çekme işlemi delici makinenin yöntemine bağlı olarak seçilir. Aşamalı ve sürekli olmak üzere iki ayrı çekme yöntemi bulunur. Bazı makinelerde sadece aşamalı düzenek bulunurken bazılarında ise hem kademeli hem de sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır.

Tijin çekme ve dönme hızı belirlenirken; zemin özellikleri, kullanılacak jet sistemi ve birim hacime enjekte edilecek malzeme göz önünde bulundurulmalıdır. Kohezyonlu zeminlerde, zemini parçalamak ve homojen karışım oluşumunu sağlamak diğer zeminlere göre daha çok zaman alır. Jet-2 ve jet-3 yöntemlerinde de hedef daha büyük çapta JG kolonları oluşturmak olduğundan iyileştirilecek zemin hacmi artacak ve uzun sürelere gerek duyulacaktır.

Zemin ile enjeksiyon harcının homojen şekilde karışması için, dönme hızı belli bir hızdan fazla olmamalı, çekme hızı da iyileştirilen bölgenin tamamında JG kolonunun sürekliliğini sağlayacak şekilde imalat gerçekleştirilmelidir. Genelde sonda dönme hızı 10-20 rpm, özel koşullarda 30 rpm'e kadar çıkarılabilir. Sonda çekme işlemi kademeli çekme ve sürekli çekme olarak iki şekilde olabilir.

Bu iki ayrı tür çekme yöntemi, genelde delgi makinesinin imalat yöntemine bağlı olarak değişir. Bazı makinelerde sadece kademeli, bazılarında ise hem kademeli hem sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır. Kademeli çekmede, her kademede 4 cm ilerleme

ve her kademede yaklaşık 10 s. beklemek şantiyelerde tercih edilen en iyi sonuçtur. Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve zemine enjekte edilecek enjeksiyon harç miktarına bağlıdır. İnce taneli zeminlerde, jetin gerekli parçalama işlemini ve homojen karışımının sağlayabilmesi için genelde daha uzun sürelerde oluşurlar. Dönme ve çekme hızı iyileştirilecek zemine ve kullanılan JG yöntemine göre değişir. Jet-2, jet-3 ve süper jet yöntemleri, daha büyük çaplar oluşturulmak istendiği ve dolayısıyla iyileştirilen zemin hacmi daha fazla olduğu için, daha uzun süreler gerekir. Basıncın arttırılması veya çekme hızının azaltılması ile JG kolon çapında artış sağlanır.

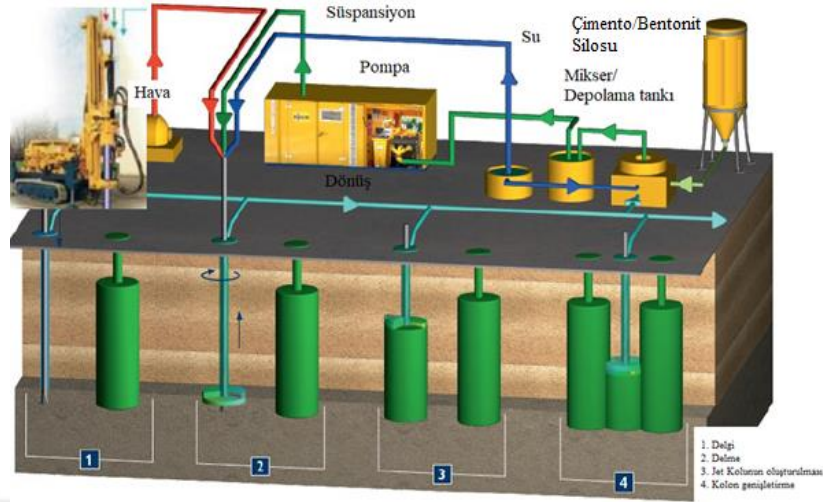
3.3.4.3. Su/Bağlayıcı (S/B) oranı

Su/çimento oranı; zeminde oluşturulacak elemanların mukavemetleri, ıslahın türü ve uygulanacak jet sistemine göre farklılık gösterir. Su/çimento oranının Jet-1 ve Jet-2 yönteminde 1.0-1.5 arasında Jet-3 yönteminde ise 1.2-1.5 arasında değiştiği görülür (Lunardi, 1977). JG kolonu imalatı için sahada en çok uygulanan s/b oranı 1'dir. Enjeksiyonun su/bağlayıcı oranındaki artış, basınç dayanımında düşüşe neden olabilmektedir. Ancak seçilen su/bağlayıcı oranı zemin türüne, uygulanan JG yöntemine ve istenilen JG kolon dayanımına göre değişir. Saha uygulamalarında enjeksiyon harcının yoğunluğu ortalama 1400-1550 kg/m³ alınır. Enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu oluşturulan JG kolonun boyutunu ve şeklini değiştirmektedir. Yüksek viskoziteli akışkanlar, düşük viskoziteli akışkan içeren harçlardan daha fazla uzağa yayılmaktadır. Bu akışkanın merkeze toplanmasını düşürmekte ve dayanımını etkilemektedir. İyileştirilmiş 1 m³ zemin içerisindeki çimento miktarı 400-600 kg olarak değişim göstermektedir (Melegary ve Garassino, 1997).

3.3.4. Jet Grout Ekipmanları

Ülkemiz konumu itibariyle sismik tehlikelerin çokça görüldüğü bir bölgede olduğundan sismik tehlikelere karşı zemin iyileştirme yöntemleri büyük önem taşır. JG yöntemi, kullanım alanının çokluğu, uygulanabilir oluşu ve daha önceden bahsettiğimiz diğer özellikleriyle, ülkemizde ve diğer ülkelerde özellikle sıvılaşma riskinin azaltılması amacı ile kullanımı oldukça yaygındır. JG yöntemi için kullanılacak ekipmanları şunlardır; çimento silosu, karışım ünitesi, yüksek basınç pompası, su pompası, hava kompresörü ve delgi makinesi şeklindedir (Şekil 3.14.). Ayrıca sahada kaynak makinesi ve elektrik kesintilerinin olması halinde 50 kVA'lık bir jeneratör de bulundurulması

gerekir (Küçükali, 2008). Karıştırma ünitesinde hazırlanan bu karışım pompa ünitesine aktarılır.



Şekil 3.14. Jet Grouting yöntemi ekipmanları (Croce ve diğ., 2014)

3.3.5.1. Delgi makinası

Delgi makinası; JG kolonu oluşturulması amacıyla yapılacak delgiyi gerçekleştiren makine olup, aynı zamanda genellikle sondaj makinesi işlevi de görmektedir. Her türlü arazi koşullarında paletli yürüme takımıyla rahatlıkla hareket edebilmektedir. Önceden tasarlanan dönme ve püskürtme hızlarında ilerlemek için; monitör, enjeksiyon tiji, su başlığı ve püskürtme ağzı ile donatılmıştır.

Tijler; delgi esnasında içinden su, JG kolonu oluşturulması sırasında ise yüksek basınçlı enjeksiyon geçirir. Monitör, adaptör takımını ve delgi ucunu istenen proje kotuna kadar inmesini sağlar. JG kolon oluşturma yöntemlerine göre su başlığı ve tijler tek, çift veya üç cidarlı olabilir. Monitör adaptör takımı; delgi makinesine bağlı bulunan su başlığı ve tij sisteminin son halkasını oluşturur. Bu ekipmanın en uç noktasına da delgi ucu takılmaktadır.

Monitör JG kolonu oluşturma yöntemlerine göre tıpkı su başlığı ve tijlerde olduğu gibi tek, çift veya üç cidardan oluşabilmektedir. Su başlığı; bir ucu enjeksiyon pompasına bağlı yüksek basınçlı dayanıklı hortumların delgi makinesindeki tijler ile bağlantısını sağlayan hareketli bir başlığa sahip bir çeşit adaptördür. Püskürtme ağzı; milimetre mertebesinde elmas cidarlı küçük bir deliktir. Monitör üzerinde bulunan yuvalara birbirleriyle 180°'lik açıda ve düşeyde 4'er cm kot farkıyla monte edilirler. Bir monitör üzerinde en az iki adet püskürtme ağzı yuvası bulunmaktadır. Püskürtme ağzı çapları genellikle 1.6 mm ile 3.0 mm arasındaki çaplardan seçilerek kullanılır (Doğanışık, 2010).

3.3.5.2. Yüksek basınç pompası

Enjeksiyon harcını istenilen çapta JG kolonu imal edebilecek basınçta basabilecek yüksek basınç üretebilen pompadan oluşan pompa ünitesidir. Kolonlarının yapımında 60 MPa'da 250–450 lt/dak. arasında enjeksiyon harcı basabilen ve en az 8 saat çalışan pompalar tercih edilmektedir.

3.3.5.3. Mikser ünitesi

Karışım ünitesi, JG kolon uygulamalarında kullanılan enjeksiyon karışımını istenen su/çimento oranında hazırlamayı sağlayan mikser ve dinlendiriciden oluşur. Ayarlanan oranlara göre otomatik olarak çimento ve su miksere aktarılırken karıştırma işlemi de başlatılır. Karıştırılan enjeksiyon maddesi dinlendirilmek üzere dinlendirme kazanına aktarılır. Monitörde komut verilerek enjeksiyon pompa ünitesi tarafından emilerek zemine yüksek basınçla gönderilir (Çınar, 2014).

3.3.5.4. Çimento silosu

Farklı kapasitelere sahip dökme çimentoyu haznesinde saklayabilen ve mikser ünitesini yeterli ölçüde besleyecek kapasitede çimento deposu ve konveyörü ekipman sisteminde yer alan ünitelerdendir.

3.3.5.5. Monitör

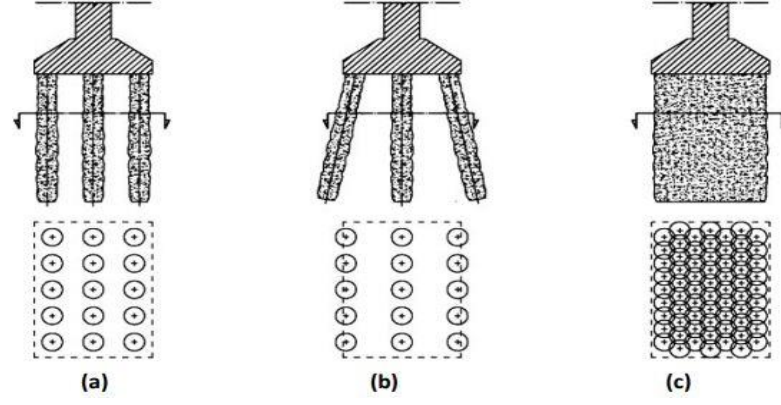
Monitör, tek akışkanlı sistem için enjeksiyon sıvısını jet haline çeviren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücüdür. Bu püskürtücüler aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda bulunabilir. İki akışkanlı sistemde ise enjeksiyon şerbeti ve havanın aynı anda jete dönüştürülmesi için tek akışkanlı sistemdeki gibi aynı veya farklı seviye ve zıt açılarda bir ya da daha fazla çift adet püskürtücü mevcuttur. Hava püskürtücü, dairesel enjeksiyon sıvısı püskürtücünün etrafını sararak halka şeklini almasını sağlar. İkili su akışkanı içeren sistemlerde suyun jet haline dönüşmesi için havalı sisteme benzer bir ya da daha çok püskürtücü ve şerbet karışımını göndermek için daha alt kısımlara yerleştirilen püskürtücüdür (TS EN 12716). Üç akışkanlı sistemde, hava ve suyun aynı anda jetlenmesi işleminde bir ya da daha çok çift püskürtücü ve enjeksiyon sıvısının zemine yollanmasını sağlayan daha da derine yerleştirilmiş bir ya da daha çok püskürtücüdür.

3.3.5. Jet Grout Yönteminin Uygulamaları

Jet enjeksiyonların farklı boyut ve şekillerde üretilebilmesi, zemini iyileştirerek taşıma gücünde artış olması, geçirimsizlik yapıları oluşturmaları ve zorlu imalat şartlarında dahi uygulanabilirliği; dünya çapında çok geniş bir uygulama sahasına sahip olmasına neden olmuştur. Sahadaki ihtiyaca göre tasarlanan JG kolonlarının kolonlar arasındaki mesafe ve yerleşim düzenine bağlı olarak zemini iyileştirme, tek boyutlu veya iki ve üç boyutlu olarak da gerçekleştirilebilmek mümkündür. Tek boyutlu iyileştirmelere örnek verecek olursak JG enjeksiyonu ile iyileştirilmiş zemindeki taşıma gücü arttırılmış temel yapıları örnek verilebilir. Bu uygulamada, boy/çap oranının yüksek olduğu ve aralıklı JG kolon yerleşimleri kazık temel sistemindeki gibi bir sistemde imal ederek yapı temelinin altındaki zeminin taşıma gücünde yükselme ve farklı oturmalarda azalma olması planlanmaktadır.

JG kolonları imalatı yeni yapılacak bir temel inşaatında kullanılabileceği gibi mevcutta bulunan ve taşıma gücü zayıf bir yapının zemininin iyileştirilmesinde de geçici veya kalıcı sistemler olarak inşa edilebilmektedir. JG uygulamalarının temel kullanım alanları şunlardır; Temel sistemleri, İstinat yapıları, Geçirimsizlik bariyerleri ve Tüneller. Her bir uygulama alanın değişik yöntemleri ve bunların avantaj ve dezavantajlarıyla beraber ayrı başlıklar içerisinde bahsedilmiştir.

JG kolonları ile taşıma gücünü arttırma ve farklı oturmaları azaltan temel altı zemin iyileştirmesi oldukça sık uygulanan bir inşa metodudur. Temel altına yapılan uygulamalarda kullanılan aralıklı tek boyutlu silindirik JG elemanları ile kesişen JG kolonlardan oluşturulan üç boyutlu blok JG birimlerinin davranışları ve performansları birbirlerinden oldukça farklıdır. Burada projeye uygun olarak JG kolon aralıklarının tasarlanması çok önemlidir. Aralıklı JG kolon uygulamalarında Şekil 3.15. 'te gösterilen JG kolon yerleşim düzeni kazıklı temellere benzemesi nedeni ile “jet enjeksiyonlu temeller” olarak bilinmektedir. Jet enjeksiyonu yapılan temeller, özellikle zemin içinde iri kaya yapılarının yer aldığı durumlarda kazık temel inşaa zorluğuna alternatif olarak uygulanmaktadır. Üst yapıdan gelen yükün üniform olarak temele etkidiği hallerde farklı ve düz oturma ve taşıma gücü sorunlarının çözümünde yeterli olan bu yöntem; donatılı olma halinde bile yanal yükler altında yeterli direnci gösteremediğinden, bazı JG kolonlar eğik olarak inşa edilmekte ve yapıya gelen yanal yüklerin düşürülmesinde faydalı olmaktadır.



Şekil 3.15. JG temel uygulamaları olan kolon destekli temeller ve blok temeller (Croce ve diğ., 2014)

3.3.6.1. Şaft uygulamaları

Şaft imalatlarında düşey yapı elemanı olarak da kullanılabilen JG kolonları, şaft etrafında tek veya çift sıra olarak inşa edilmektedir. JG kolonlarının sürekliliğinin sağlanabilmesi halinde, başka yanal destek elemanına ihtiyaç duyulmadan JG kolonlarından oluşturulan silindirik kabuk etkisi ile yanal basınçlara dirençli yapı elemanları üretilmiş olur. Uygulamada zayıf zemin tabakasını geçerken dayanımı arttırmak için JG kolonlarının donatılması tavsiye edilmektedir. Şaftların YASS altında açılması halinde şaft yüzeyine yanal destek sağlama ve geçirimsizliği azaltmak için püskürtme beton uygulaması önerilmektedir.

3.3.6.2. Dolgu tabanı uygulamaları

Dolgu tabanında JG kolonları ile zemin iyileştirmesi, farklı bilim insanları tarafından da araştırıldığı gibi birçok imalatla sıklıkla önerilen ve kullanılan bir inşaat türüdür (Şekil 3.16). Bu uygulamada JG kolon ile dolgu arasındaki temas yüzeyinde aşırı gerilmeden kaynaklı oluşabilecek zımbalama etkisinden kurtulmak ve imalatın düzgün şekilde çalışabilmesi çok önemlidir. Uygulamalardan kazanılan deneyimlerde, JG kolonları arasındaki açıklık 2D değerinden daha fazla olmaması; JG kolonları üzerinde betonarme radye temel seçimi veya geogrid ile destekli zemin malzemelerinin tercih edilmesi önerilmektedir. (Erol, 2018)

3.3.6.4. Geçirimsizlik yapısı uygulamaları

JG kolonları ile geçirimsizlik perdesi imalatında JG kolonların dar alanlarda ve farklı açılarda imal edilebilmesi, her tip zemin türünde delgi yapılabilmesi ve istenen seviye ve yüksekliklerde JG kolon oluşturulmasına imkân tanıdığı için diğer yöntemlerden öndedir. JG Kolon malzemelerinin geçirimsizlik katsayısı, zeminin geçirimsizlik katsayısına göre 10^{-7} cm/s aralığında değişim göstermektedir. İmalat hatasından kaynaklı JG kolonlar arasında gerekli kesişimin ve geçirimsizlik perdesinin sürekliliğinin sağlanamaması halinde, istenilen geçirimsizlik sonuçlarından çok daha büyük değerlerle karşılaşılabilir.

Uygulamada, sapmaya bağlı perde boyunca süreksizlikler, homojen olmayan zemin tabakalarına bağlı çap değişiklikleri, istenen kolon çapın oluşmaması, yeraltı suyu akışı veya artezyenler gibi nedenlerden oluşturulan kolonların suyla teması gibi problemlerle karşılaşılabilir. JG geçirimsizlik perdeleri betonarme ve toprak barajlar, batardolar, derivasyon savakları gibi birçok hidrolik yapı tabanında inşaat öncesinde veya servis süresinde uygulanmaktadır.

3.3.6.5. Tünel yapısı uygulamaları

JG kolonlarının sıklıkla uygulandığı bir diğer saha da tünellerdir. Tünellerde kazı safhasında destek yapısı veya geçirimsizlik elemanı oluşturmak amacıyla jet grout kazı öncesi yüzeyden veya kazı anında tünel içinden imal edilebilmektedir. Her iki uygulama tekniği de ülkemizde başarılı uygulamaları mevcuttur. Tünel kazısı öncesinde yüzeyden yapılan jet enjeksiyon uygulamalarında, zemin iyileştirmesi kazıdan ayrı olarak yapıldığından tünel kazısında zaman kaybına neden olmamaktadır.

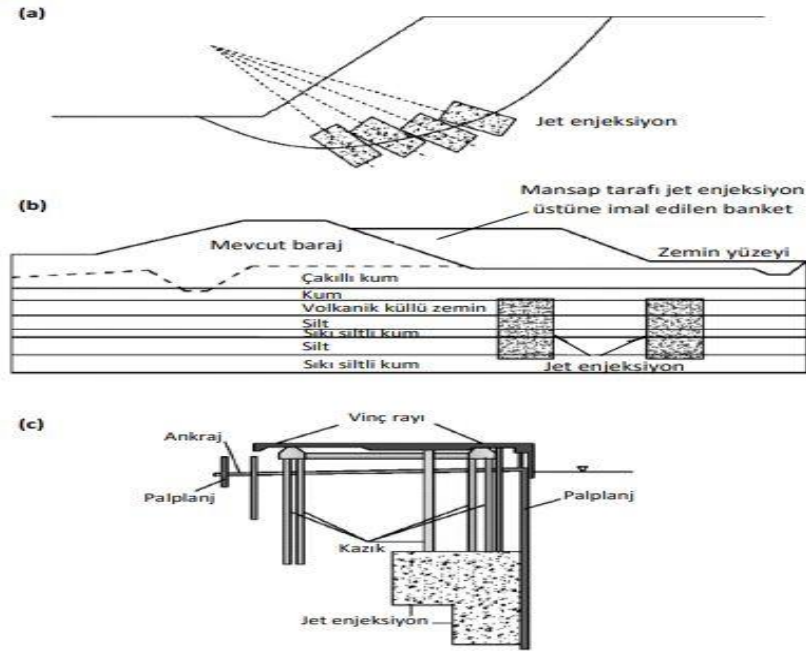
Tünel uygulamalarında kullanılan JG kolonlar, ağır işgücü ve detaylı makine işine ihtiyaç olmadığından ve yüksek basınçlı jet makineleriyle dar alanlarda tünel inşaatını tehlikeye sokabilecek muhtemel sorunlardan kaçınmak için genelde tek akışkanlı sistem ile imalatlar gerçekleştirilmektedir. Tünel üstündeki zeminde yüksek örtü kalınlıklarının olduğu hallerde veya delgi işleminin zor yapıldığı sağlam yerlerde yüzeyden işlem yapma mümkün olmamakta ve gerekli zemin iyileştirmesi tünelin içinden yapmak zorunludur. Tünel içinden kazı esnasında yapılan JG ile zemin iyileştirmesi kanopi tekniği ile yapılmaktadır.

Tünelde gerekli hallerde hangi zemin güçlendirmeleri ile ilerleneceği zemin türüne ve geçirimsizlik şartlarına bağlıdır. JG kolonlar istenilen şekilde daha geniş çaplar ile oluşturulabildiği kumlu zeminlerde, açılan tünel aynasında kemer şeklinde destek yapısı yapmak için tercih edilmektedir. JG kemer yapısı düzgün boyutlandırıldığında ve tünel aynasında boşluk suyu basıncının olmadığı hallerde geçirimsizlik yapısı vazifesi de yapabilmektedir. İnce daneli zeminlerde tek akışkanlı sistemin yeterli olamamasından dolayı, tünel etrafında JG kolonlar yerine mini çelik kazıklar uygulanmaktadır. Zorlu zemin şartlarında gerektiğinde her iki sistem de birlikte tercih edilebilir (Erol, 2018).

3.3.6.6. Diğer Uygulamalar

Şev Stabilitesinde Jet Enjeksiyon Uygulamaları: Şev stabilitesi amacıyla kullanılan JG uygulamalarında genel olarak Şekil 3.18.a'da şekil olarak gösterildiği gibi JG kolonları kritik kayma düzlemini kesecek şekilde inşa edilerek, kayma düzlemi üstündeki kesme dayanımını arttırmak bir nevi dikiş atmak amacıyla yapılmıştır.

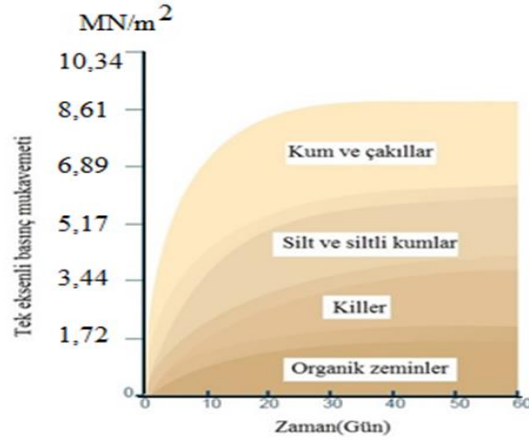
Sıvılaşma Önleyici Jet Enjeksiyon Uygulamaları: Depremle birlikte ortaya çıkan sıvılaşma riskine sahip gevşek kumlu zemin türlerinde, sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabakası kalınlığında sıkı düzende inşa edilen JG kolonları ile sıvılaşma esnasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı artışlarının ve sıvılaşma olayından sonra deformasyonların sifıra yaklaşabildiği literatürlerde belirtilmiştir. Aydın Küçük Menderes Nehri üzerinde inşa edilen Beydağ Barajı'nın altında yer alan siltli kumlu zemin türünden oluşan alüvyonun sıvılaşma potansiyeline karşı baraj tabanında JG kolonlarının yapıldığı belirtilmiştir. Aynı şekilde, ABD 'de yer alan Wickiup Barajı'nın deprem iyileştirmeleri kapsamında Şekil 3.18.b 'de gösterildiği gibi baraj dolgusu altında sıvılaşabilir siltli ve volkanik tür zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla JG kolonlarının yapıldığı kaynaklarda geçtiği görülmüştür. Ayrıca Kıyı liman yapılarında JG uygulamaları günümüzde yaygınlaşmaktadır. Şekil 3.18.c'de gösterilen uygulamada rıhtım temelini güçlendirilmesi ve deniz taban kazısının yapılabilmesi maksadıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.18. JG uygulamaları: (a) şev stabilitesi (b) sıvılaşma önleyici (c) kıyı yapılarının korunması (Croce ve diğ., 2014)

3.3.6. Jet Grout Özellikleri

JG kolon malzemelerinin yüksek kohezyonlu ve düşük zemin örtü yükleri altında olduğu durumlarda kayma direncinin genelde kohezyon değerinden dolayı gerçeği meydana gelmektedir. Bundan dolayı uygulamada JG kolon malzemelerinin kayma dayanımı, tek eksenli basınç değeri ya da bu değerin yarısı drenajsız kayma dayanımı kullanılarak elde edilmektedir. Birçok bilim insanı elde ettikleri deneysel sonuçları değerlendirerek değişik zemin tiplerinde imal edilen JG kolonlarında beklenen tek eksenli karot basınç dayanımı değerleri için belirli aralıklar belirlemişlerdir (Şekil 3.19, Çizelge 3.10.). Uygulamada su/çimento oranı 0.6-1.3 aralığındadır. Yüksek su/çimento oranları da zeminin öğütüp-dağıtma potansiyelini arttırmaktadır. Bu nedenle düşük JG kolon basınç dayanımlarına, neden olabileceği değerlendirilerek su/çimento oranları uygulama projesine göre seçilmelidir. Kullanılacak çimento çeşidi ile ilgili bir sınırlama yoktur. Ancak zemin özellikleri ve projeye özel koşullar değerlendirilerek; bazı durumlarda özel çimentoların kullanımı gerekli olmaktadır. Hızlı priz alması istenirse Portland çimentosu, bazen de puzolanik veya yüksek fırın cürufu çimentoların kullanımı önerilmektedir (Battal, 2019).



Şekil 3.19. Farklı zemin sınıflarında JG kolonlarındaki serbest basınç dayanımları (Burke, 2004)

Çizelge 3.10. Zemin sınıfına göre JG kolonlardaki serbest basınç dayanımı değerleri (Durgunoğlu, 2004)

Zemin Sınıfı	Serbest basınç Dayanımı, q_u (MPa)	Modül oranı, E/q_u
Kil	2-5	150
Silt	3-7	200
Kum	7-14	600
Çakıl	12-18	900

E: %40 gerilme seviyesine karşılık gelen elastisite modülü

3.3.7. Jet Grout Kalite Kontrolü

JG ile yapılan zemin iyileştirme uygulamalarında denetim ve kontrol işlemleri imalat aşamasında elde olmayan bazı belirsizliklerden dolayı önemlidir. Bunlar;

- Tasarlanan boy, çap ve kolonun mekanik özelliklerinin inşa sahasında sürekli şekilde imal edilip edilmediği,
- Zemin-Kolon etkileşiminin projede tasarlanan duruma uygunluğu
- İnşa edilen yapı elemanlarının çevredeki komşu yapı ve zeminlerine zarar verip vermediği.

İmalat öncesi bu problemlerin oluşmaması ve imalatın proje amacına uygun olacak şekilde üretilebilmesi için denetim ve kalite kontrol başlıkları özenle gerçekleştirilmelidir. Bunlar;

- Tasarımda planlanan imalat kriterlerinin JG inşasında kullanılacak malzeme özellikleri ile aynı olması değişecekse tasarımın yeniden projelendirilerek geoteknik mühendisi tarafından değerlendirilmesi,
- İmalat aşamasında doğru araç, ekipman, kişi ve yöntemlerin tercih edilmesi,
- JG kolonlardan oluşan derin temel yapısının performans değeri,

- JG kolonlarının komşu zeminlere ve yapılara vereceği olumlu-olumsuz etki.

En 12716-2001 standardı, Jet Grout uygulamalarında proje ve imalat kademelerinde öncelikle bazı verilerin değerlendirilmesini tavsiye etmektedir. Bunlar;

- Uygulama derinliğince zemin yapısının ve zemin profilini oluşturan katmanların geoteknik ve mekanik özelliklerinin detaylı bir şekilde belirtilmesi,
- Çevresel koşulların, komşu yapılar, yeraltına gömülü yapılar, enerji nakil hatları, vb. sınırlamalar ve sahaya ulaşımın belirlenmesi,
- Atık enjeksiyon malzemesinin doğaya verdiği zarar,
- Temel güçlendirilmesi projelerinde, yapının kendisi ve çevre yapılarda oluşacak deformasyonların önceden belirlenmesi

3.3.8.1. Zemin etütleri

JG uygulamaları bir tür zemin iyileştirme yöntemi olması nedeniyle uygulamanın başarısı çoğunlukla zeminin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bundan dolayı projenin ilk safhasında öncelikle uygulama sahasında kapsamlı bir zemin etüdünün yapılması gereklidir. Zemin etüdünün kapsamı, uygulama sahasının biraz dışına çıkılarak, zemin yapısının komşu zemin profiliyle uyumu aranmalıdır.

Uygulamada bazı özel zeminlerle karşılaşılması durumunda özellikle belirtilmesi gereken birtakım zemin tabakaları vardır. Bunlar; YASS, Sert kil tabakaları, yüksek hassasiyetli killer, organik madde içeren tabakalar, şişen zeminler, çimentolu katmanlar, iri boşluklar, yüksek geçirimli seviyeler ve kimyasal atıklardır.

3.3.8.2. Jet Grout uygulamasında kullanılan malzemeler

Standart JG uygulamasında kullanılan temel malzemeler su ve çimentodur. İhtiyaç halinde katkı malzemeleri ve donatılar da enjeksiyona ilave edilebilir. Malzeme özelliklerinin standartlara uygunluğu tedarikçi firmalar tarafından verilecek uygunluk belgeleriyle kullanılmalıdır. Kullanılacak malzemelerin enjeksiyon ve dayanım alma konusunda imalata zarar vermemesi gereklidir.

3.3.8.3. Çimento ve katkı malzemeleri

Farklı türlerdeki çimento çeşitleri roma rakamları ile sınıflandırılmış olup her tip çimento için hidrasyon ısısı, priz süresi ve sülfata karşı dayanımları birbirinden farklıdır. JG uygulamalarında genelde ekonomik olan CEM-I 32.5N mukavemet sınıfı Tip I Portland Çimentosu tercih edilmektedir. Düşük hidrasyon ısısı istendiğinde YFC erken mukavemet alması koşulu arandığında SD, ekonomik ve basınç dayanımı yüksek olması istenirse UK ikameli puzolanik içerikli çimento ve şerbetleri tavsiye edilmektedir.

Mineral ve Kimyasal katkı maddeleri, çimento enjeksiyonuna hem üretim aşamasında pompalama ve işlenebilirliği kolaylaştırmak, hem de JG kolonun mekanik özelliklerini iyileştirmek maksadıyla karıştırma aşamasında eklenen yapı kimyasallarıdır.

Kimyasalların JG kolonu imalatında sağlayacağı katkılar mevcut betondaki sağladığı katkılarla benzerdir. Pompalama kolaylığı, enjeksiyon sıvısının stabilitesi için serbest kalan suyun yüzeye çıkmasını önleyici bentonit kullanılması tavsiye edilmektedir. Bentonit, su ile karıştırıldıktan sonra ~12 saat beklemeden sonra enjeksiyon sıvısına eklenmelidir. Tedarikçi firma bentonitin kimyasal ve mineralojik özellikleri ve yan etkilerini gösteren kayıtlarını imalatçıya sunmalıdır. Örneğin kullanılacak uçucu külün kendiliğinden bağlayıcılık veya Ca(OH)_2 ile beraber puzolanik tepkimeye girmeyeceği, JG kolonda ne katkıda bulunacağı üretici sertifikalarında imalatçıya belirtilmelidir. Kontrol altında tutulması gereken diğer değerler şunlardır; kıvam limitleri, bentonitin dane dağılımı, pH değeri, su içeriği, Slamp ve Marsh değeridir.

3.3.8.4. Su

Enjeksiyon sıvısı hazırlanırken kullanılan suyun kimyasal özelliklerinin çimentonun priz alma ve hidrasyon olaylarını engel teşkil etmeyecek şekilde olması gerekmektedir. İçme suyu olarak kullanılan şehir isale hattından veya gerekli analizler yapılarak kuyudan elde edilecek sular JG enjeksiyonlarında kullanılabilir. Kullanılacak su ile ilgili beton standartlarında tanımlanan nitelikler JG uygulamaları için de aynı şekilde geçerlidir. Su sıcaklığının 50°C den az olması, tuz içeriğinin %3'den fazla olmaması, organik madde ve kil içeriğinin 2 gr/litreden az olması istenir. Tuz içeriği için verilen limit korozyon önleyici olup, donatısız kolon imalatlarında ihmal edilebilir.

3.3.8.5. Enjeksiyon sıvısı

Enjeksiyon sıvısı çimento ve su depoları, mikser, pompa ve kompresörlerden oluşan makinelerle karıştırılarak hazırlanmaktadır. Tüm bu ekipmandan nozullara ihtiyaç kadar şerbet basabilecek yeterlilikte olması zorunludur Santralde karışım miktarını düzenleyen tüm makine ekipmanların düzenli optimizasyonu gerçekleştirilmelidir. Hazırlanan enjeksiyon sıvısının zemini parçalayabilme, enjekte edilebilme, zeminle karışabilmesinin belirlenmesine yönelik deneme kolonları yapılması önerilmektedir. Bu testler şerbetin viskozitesi, S/B oranı, priz alma süresi ve harcın basınç dayanımının ölçülmesidir. Deneylerden düzenli alınan numuneler laboratuvarda incelenmelidir. Şerbetin yoğunluğu, jetin zeminde oluşması ve teşkil etmesinde direkt etkilidir. Karışım miktarının JG kolon imalatına uygunluğu piknometre deneyi ile tayin edilebilmektedir. Enjeksiyon sıvısının viskozitesi rutin olarak Marsh Hunisi deneyleri ile ölçülmelidir.

3.3.8.6. Delgi ve enjeksiyon işlemi

Uygulamada JG kolonların yerlerinin aplikasyon planında tasarlandığı gibi noktasal olarak imalat yapılmalıdır. Düşey yapılacak JG kolonlarında sapmalar ve eğimli olarak imal edilecek JG kolonlarda açılar, monitör yakın monte edilen sistemlerle ölçülebilmektedir. JG kolonlarında sapma, geçirimsiz perdeler ve kanopi yapılarında çok önemlidir. Modern jet makinelerinde kullanılan elektronik basınç ve yük hücreleri ile deplasman ölçen ekipmanlar, imalat boyunca öngörülen imalat aşamalarının düzgün bir şekilde imal olup olmadığını verebilmekte ve bu ölçümler kaydedilebilmektedir.

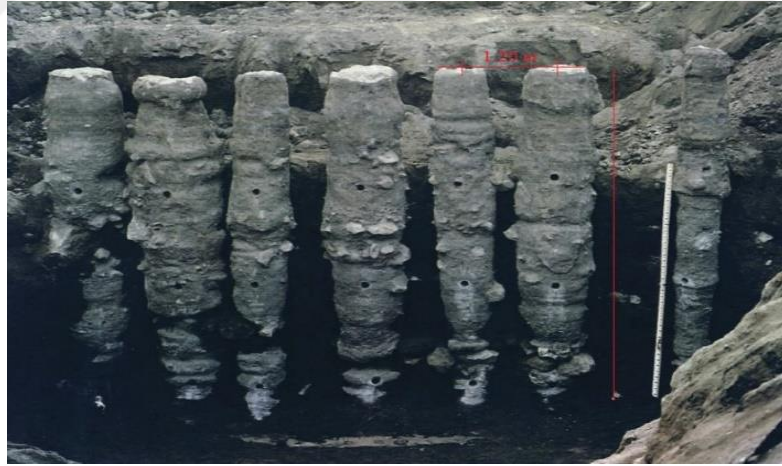
3.3.8.7. Kolon çapı

Tasarım ve imalatla dikkat edilmesi gereken en önemli oluşturulan JG kolonun çapıdır. İnşası öncesinde deneme kolonları imal edilerek kolon çapları üzerinde ölçümler yapılmalıdır. Deneme kolonlarında imalat kontrol parametreleri; dönme ve çekme hızı, enjeksiyon basınçları, nozul sayısı, çapı, su/bağlayıcı oranı değiştirilerek kolonlar imal edilmektedir. Kolonların etrafındaki zemin açılmakta ve kolon çapları direk ölçerek belirlenmektedir (Şekil 3.20.). Sonuç olarak, değiştirilen her parametrenin kolon çapına etkisi gözlemlenerek en uygun imalat parametreleri belirlenmektedir. Bu yaklaşımda aynı zemin ve imalat kontrol parametreleri ile eşdeğer kolon çapları meydana geleceği kabulü yapılmaktadır.



Şekil 3.20 Deneme JG kolonları (Kimpitis, 2013)

YASS olması durumunda pompalama ile su seviyesinin düşürülmesi veya drene edilmesi gerekmektedir. Zeminlerin kesme direnci derinliğin artmasına paralel efektif gerilmelerde artar. Dayanım artışı ile derinlik boyunca JG kolon çaplarında da bir azalma söz konusu olmaktadır. Şekil 3.21. 'de JG kolon çapının derinlikle azaldığı net bir şekilde görülebilmektedir. Dolayısıyla yüzeye yakın yapılan ölçümler yanıltıcı olup uygulamada değişik yöntemler kullanılarak kolon çaplarının derinlikle değişimi ve sürekliliği kontrol altına alınmalı ve tasarımda gerekli önlemler alınmalıdır.



Şekil 3.21. Deneme JG kolonların derinlikle değişimi (Croce ve diğ., 2014)

3.3.8.8. JG Kolon kalitesi ve sürekliliği

JG kolon imalatında bazen çimento ile karışmayan zeminler olmakta ve süreksizlikler meydana gelebilmektedir. Şekil 3.22. 'deki örnekte 3 m çapındaki kolonda araştırmacıların yaptıkları incelemeler sonucunda kolonun içinde yaklaşık %50 oranında çimentoyla karışmamış kil zemin gözlemlenmiştir. (Kimpitis, 2013).



Şekil 3.22. JG kolon içi karışmayan zemin (Kimpritis, 2013)

Alınan karotların özelliğine bağlı olarak JG kolonun kalite ölçüsü *CRI* (*Core Recovery Index*) olarak tanımlanan bir parametre ile derecelendirilmektedir. Yoshitake'nin yaptığı Şekil 3.23. 'de gösterilen bu sınıflama sisteminde 1.sınıftan 6.sınıfa kadar çok iyiden çok zayıfa doğru tanımlanmaktadır. JG Kolon kalitesinin belirlenmesi için hızlı bir değerlendirme yapmak için karotsuz sondaj yöntemi de uygulanabilir. Bu yöntemde sondaj ekipmanının dönme ve çekme hızı, uygulanan basınçlar kaydedilerek hızlı bir değerlendirme amaçlı çok zayıf ve çok sağlam seviyeler şeklinde sınıflama yapılabilmektedir

Seviye		1	2		3	4	5	6		
Değerlendirme		İYİ DERECEDE İYİLEŞTİRME					KÖTÜ DERECEDE İYİLEŞTİRME			
Karot Görünümü	Kum									
	Kil									
KAROT DURUMU		Çatlaksız sıkı katı homojen	Az çatlaklı homojene Yakın	Ufak kumlar mevcut	Ufak kiler mevcut	Dökülmüş Kütle	Sürekli ufak molozlar	Sürekli kil kütleleri	Birkaç parça katı zemin	Kolon oluşmamış

Şekil 3.23. CRI sınıflama sistemi (Yoshitake vd., 2003)

3.3.8.9. JG Kolon malzemelerinin mekanik özellikleri

JG kolonların fiziksel ve mekanik özellikleri alınan karot örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile bilinmektedir. Bu deneyler;

- Su içeriği tayini
- Kuru birim hacim ağırlık deneyi
- Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Eğer tasarımda kohezyon ve sürtünme direnci açısı esas alınmışsa üç eksenli deney yapılması gereklidir. Birim hacim ağırlık deneyleri nükleer yöntemler ile de yapılabilir. Ölçülen özellikler genellikle değişkenlik gösterdiğinden tek bir değer ile yorumlamak mümkün değildir ve elde edilecek yeterli sayıda deney sonuçları karşılaştırılarak deneysel parametreler üretilmelidir.

3.3.8.10. Yükleme deneyleri

Geleneksel yöntemlerle uygulanan kazık imalatlarında olduğu gibi düşey yük taşıyan JG kolonları üzerinde yükleme deneyleri yapılarak JG kolon taşıma kapasitesinin ölçülmesi gereklidir. Bu amaçla yapılacak yükleme prosedürleri, deneylerin düzeneği ve yük-deplasman eğrilerinden taşıma kapasitesi belirleme yöntemleri kazıklar için verilen yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. JG kolonlar üzerinde yapılan yükleme deneyindeki basit bir deney düzeneği şekil 3.24. 'te verilmiştir. Yükleme düzeneğinin başlığı, JG kolon çevresindeki zemin ile temas etmemesi yük aktarımının doğru ölçümü açısından gereklidir.



Şekil 3.24. Yükleme deneyi düzeneği (www.zeminarastirma.com)

3.3.8.11. Uygulama bölgesinde yapılması gereken gözlemler

JG uygulamalarının çevreye olumsuz etkileri arasında taşan malzemenin çevreye yayılması, imalat esnasında gürültü kirliliği oluşturması ve titreşim etkisi sayılabilir. Bu etkileri ölçme yöntemleri çeşitli yöntemleri vardır. Çevreye rahatsızlık verecek ölçüde olması halinde şantiyede gerekli önlemler alınması gereklidir. JG uygulamalarında çevredeki yapıları etkileyebilecek en önemli durum zeminde oluşan oturmalarlardır. Bu deformasyonlar çevre yapıların stabilitesini ciddi boyutta etkileyebilir. Deformasyon kontrolü ölçüm cihazlarıyla kontrol edilmelidir. Ölçümler sonrası tespit edilen kabarma veya oturmalar ciddi seviyelere ulaşmadan gerekli tedbirler alınması gereklidir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Önceki araştırmacıların yapmış olduğu (Erkan, 2013, Fidan 2015, Demiral 2017, Kanat 2018 ve Battal 2019) optimum değerler, karışımların birbiri ile karışma ve etkilememe özelliği değerlendirilerek parametreler optimum değerde sabitlenmiştir. Bu tez için yapılan deneysel çalışmada katkısız Portland çimentosu ve bağlayıcı malzemenin aşağıdaki Çizelge 4.1.'de belirtilen oranlarda SD, UK, YFC ve HA ilave edilmiştir.

Çizelge 4.1. 28 ve 56 günlük tasarım değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	Deney No	YFC	SD	UK	HA
1	0	0	0	0	43	20	10	20	0
2	0	0	0	1	44	20	10	20	1
3	0	0	0	2	45	20	10	20	2
4	0	0	10	0	46	20	20	0	0
5	0	0	10	1	47	20	20	0	1
6	0	0	10	2	48	20	20	0	2
7	0	0	20	0	49	20	20	10	0
8	0	0	20	1	50	20	20	10	1
9	0	0	20	2	51	20	20	10	2
10	0	10	0	0	52	20	20	20	0
11	0	10	0	1	53	20	20	20	1
12	0	10	0	2	54	20	20	20	2
13	0	10	10	0	55	40	0	0	0
14	0	10	10	1	56	40	0	0	1
15	0	10	10	2	57	40	0	0	2
16	0	10	20	0	58	40	0	10	0
17	0	10	20	1	59	40	0	10	1
18	0	10	20	2	60	40	0	10	2
19	0	20	0	0	61	40	0	20	0
20	0	20	0	1	62	40	0	20	1
21	0	20	0	2	63	40	0	20	2
22	0	20	10	0	64	40	10	0	0
23	0	20	10	1	65	40	10	0	1
24	0	20	10	2	66	40	10	0	2
25	0	20	20	0	67	40	10	10	0
26	0	20	20	1	68	40	10	10	1
27	0	20	20	2	69	40	10	10	2
28	20	0	0	0	70	40	10	20	0
29	20	0	0	1	71	40	10	20	1
30	20	0	0	2	72	40	10	20	2
31	20	0	10	0	73	40	20	0	0
32	20	0	10	1	74	40	20	0	1
33	20	0	10	2	75	40	20	0	2
34	20	0	20	0	76	40	20	10	0
35	20	0	20	1	77	40	20	10	1
36	20	0	20	2	78	40	20	10	2
37	20	10	0	0	79	40	20	20	0
38	20	10	0	1	80	40	20	20	1
39	20	10	0	2	81	40	20	20	2
40	20	10	10	0					
41	20	10	10	1					
42	20	10	10	2					

4.1. 28 ve 56 Günlük Numuneler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

4.1.1. Deney Programı

Çalışmada Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında çimento ve katkı malzemesi karışımları ile 50×100 mm mini ön numuneler oluşturularak dayanım etkisi araştırılmıştır. Deneyisel çalışmadaki numune hazırlama aşamaları Şekil 4.1. 'de yer görülmektedir.



Şekil 4.1. Numune hazırlama ve oluşum aşamaları

Deneyisel çalışmada kullanılan PVC borunun çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm'dir. Oluşturulan harç numunelerinin seviye ve oranları Çizelge 4.1'de verilmektedir. Harç dayanımını etkileyen parametrelerden biri enjeksiyon malzemesinin su/bağlayıcı oranıdır. Enjeksiyon malzemesinin hazırlanmasında kullanılan su/bağlayıcı oranı 0.8 alınmıştır. Bu sayede katkı malzemelerinin oranı ve etkisi hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

4.1.2. Deneylerin Yapılması

Kum ocağından getirilen kum zeminde organik madde olup olmadığı tayin edilmiştir. Elek analizi yapılarak, etüvde 100 ± 5 °C'de 24 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkan kum dinlenmeye bırakılıp, istenilen oranlardaki katkı malzemesi ve kum bir kap içerisinde homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra istenilen miktarda su eklenmesi ve mikser ile karıştırılması için bir karıştırıcı kabına aktarılmıştır. Kap içerisinde şartnamede

belirtilen sürede karıştırıldıktan sonra PVC kaplara aktarılmıştır. Prizi aldıktan sonra numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Numunelerin nemini kaybetmemesi için poşet içerisinde 28 ve 58 gün süre ile kür süresince muhafaza edilmiştir. Karışımlar, tasarım oranlarına göre hazırlandıktan sonra serbest basınç deneyi için çapı 5 cm, boyu 10 cm olan PVC kalıplara (Şekil 4.2.) doldurulmuştur. Numuneler PVC kalıplara doldurulmadan önce ise kalıp içi yağlanarak numune çıkarılması aşamasında numunenin kalıptan kolay çıkması sağlanmıştır. Kabın alt kısmı sızdırmaz poşet ile kaplanmış ve etiketlenme işlemi yapılmıştır.

Bu küçük ölçekli numunelerden tasarımın her biri için hem 28 günlük hem de 56 günlük olarak kumlu zemin için ve hem serbest basınç deneyi (yedekli) toplamda 648 adet küçük ölçekli numunesi hazırlanmıştır. Kür süresi tamamlanan serbest basınç deneyi numuneleri, numune çıkarma aleti (Şekil 4.2) yardımı ile PVC kalıplardan çıkarılmış ve yüzeyleri düzeltilerek serbest basınç deneyine hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.3.).



Şekil 4.2. Katkı malzemeleri kullanılarak oluşturulan numunelerin imalatı



Şekil 4.3. Katkı malzemeleri kullanılarak oluşturulan numunelerin oluşturulması

4.1.3. Numunelerin Kırılması

Serbest basınç deneyi ASTM D2166 standardına göre yapılmıştır. Deney, zemin içerisinde oluşturulan kolonun serbest basınç mukavemetini belirlemek amacıyla yapılır. Bu deney hem küçük ölçekli numunelere hem de büyük ölçekli deney tankından alınan karot numunelere uygulanmıştır. Alınan karot numuneler boy/çap oranı 2 olacak şekilde kesilerek kullanılmıştır. Deney uygulanırken yükleme hızı 0.4 mm/dk. olarak seçilmiştir.

Küçük ölçekli numuneler PVC kalıplardan çıkarılıp numuneler (çapı 5 cm) boyu yaklaşık 10 cm olacak şekilde alt ve üst yüzeyi kesilerek düzeltilmiştir. Yüzeyi düzeltilen numune serbest basınç deneyi aletine yerleştirilir ve üst başlık numune yüzeyine kadar indirilmiştir. Deformasyon saati ayarlanıp ve deneye başlamadan önce sıfırlanmıştır. Yükleme, numunede dakikada %0.5-%2 arası birim boy kısalması oluşturacak biçimde yapılmıştır. Numunede göçme elde edilene, en büyük dayanımın belirmediği yumuşak killerde ise %20 birim boy kısalmasına kadar sürdürülür.

Aynı doğrultuda birbirlerinden uzaklaşan zıt yönlerdeki kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeye “Çekme Gerilmesi” denir. Çekme gerilmesi kayaçların boylarında uzamaya, enlerinde ise daralmaya neden olur. Her iki ucundan çekilen bir numunenin yenildiği andaki gerilme değerine “Çekme Dayanımı” denir. Çekme dayanımı, kayaçların mekanik özelliklerinden birisidir. Çekme Dayanımı Brezilyan (Yarmada Çekme) deneyi ile belirlenebilir.

Brezilya deneyi, ise deneyin uygulanmasında, numune, deney presinin üzerine, numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmaktadır. Numunenin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kontrplak çitılar yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Numunelerin kırılması

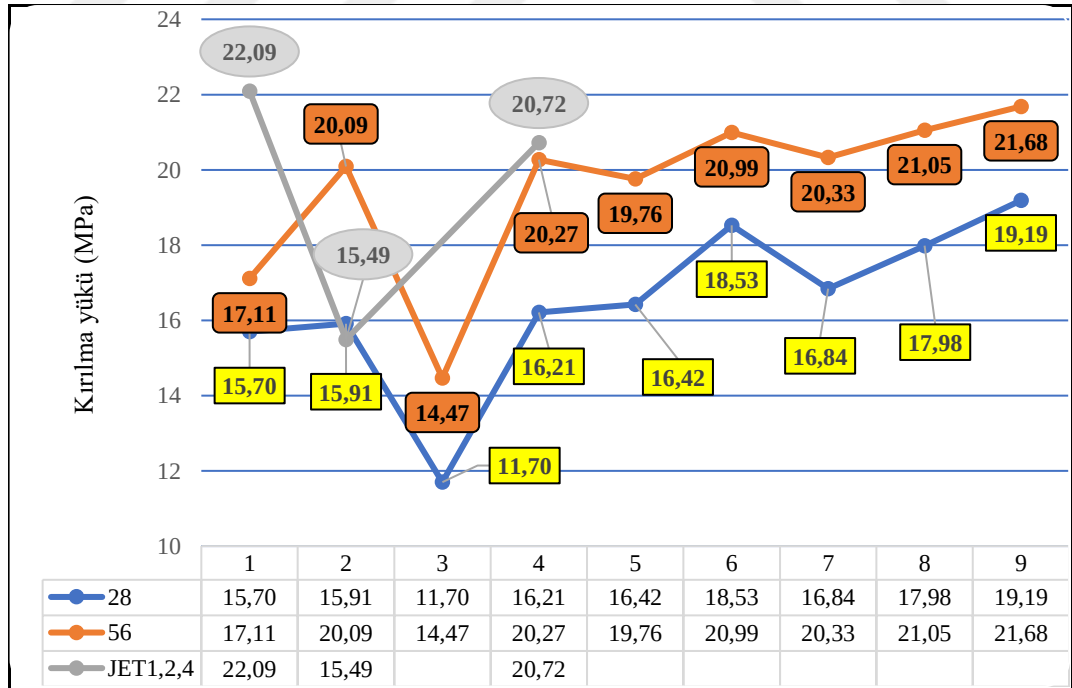
Bu çalışmada oluşturulan numunelerin serbest basınç ve çekme dayanımları incelendiğinde, literatür çalışmalarına uygun olarak katkı malzemelerin dayanımı ve sünekliliği arttırdığını gözlemlediğimiz bir çalışma olmuştur. Çalışma kapsamında numunelerden, numunelerin olabildiğince hassasiyet odaklı hata payı en az olacak şekilde özen gösterilmiştir. Numunelerin yükseklik/çap oranı yaklaşık 2 olacak şekilde kesilerek alt ve üst yüzeyleri düzeltildikten sonra, numuneler üzerlerinde serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Numunelerin kırılması

4.1.4. Numunelerin değerlendirilmesi

S/B oranı 0.8 olan kolonlar ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.6.' da görülmektedir. Burada YFC, UK ve SD değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.6. 1 ve 9 seviye arasındaki kırılma yükleri

Sonuçlara göre; mineral katkı içermeyen karışımlarda, enjeksiyon şerbeti 1.seviyede karışma etkisini tam gösterememiş fakat 2.seviyede akışkanlaştırıcı etkisini

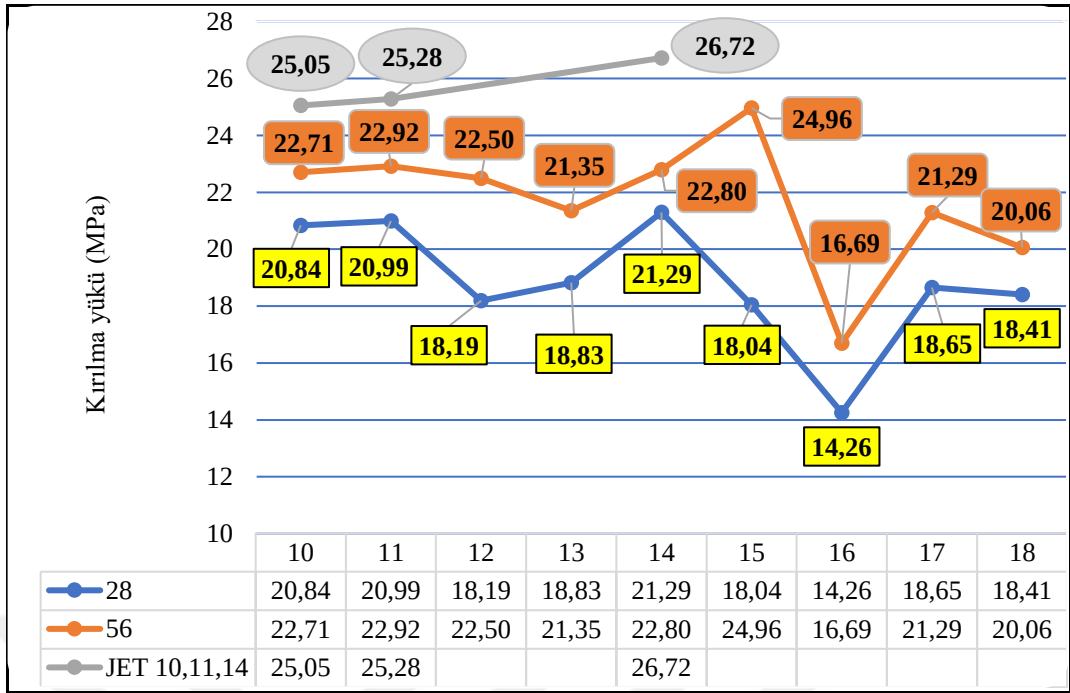
göstererek enjeksiyon karışımının daha iyi yerleşmesini sağlamıştır. 3.seviyede ise akışkanlaştırıcı su/bağlayıcı dengesini bozarak numunelerdeki harcın dayanımına etki ettiği görülmektedir. Bu etki jet grout kolonlarında çimento-katkı karışımlarının tam olarak olmaması ya da küçük numunelerde olan yerleşmenin JG kolonlarda tam sağlanamamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

4, 5 ve 6.seviyelerde YFC, SD sabit bırakılırken uçucu külün katkısının etkisi görülmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde uçucu kül mineral katkısı akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılması önerilmiştir. UK %10 kullanımı harcın dayanımına önemli bir katkı sağlamıştır. 5. seviyede UK ve HA karışımından sonra 6. seviyede mukavemetin düşüş göstermesi UK ve HA'nın ideal karışım oranına ulaşması gibi düşünülebilir. UK, 28 günlük değerler baz alındığında 56 günlük değerlerde dayanımın arttığı görülmüştür. Ayrıca 4.seviyede JG kolon örneği 56 günlük numuneye yakın çıktığı görülmüştür. JG kolonun 1.seviyeye göre daha düşük dayanımda olması yine karışımının homojen olarak karışmamasından olduğu düşünülmektedir. 4.seviyenin kendi içinde yorumlanması daha doğru olacaktır.

7, 8 ve 9.seviyelerde UK %20 kullanımı, bir önceki gruba uygun olarak karışımların mukavemet değerlerinin paralel artması bir önceki görüşü desteklemektedir. Buna göre UK ve HA karışımlarda uyum göstererek dayanımı arttırmaktadır. 28 ve 56 günlüklerde değişim göstermesi uzun vadede de dayanım almaya devam edeceğinin göstergesidir. Bu durum daha önceki çalışmalarda UK'nin geç dayanım aldığını desteklemektedir. JG kolonlar ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
1	0	0	0	0	15.70	17.11	22.09
2	0	0	0	1	15.91	20.09	15.49
3	0	0	0	2	11.70	14.47	-
4	0	0	10	0	16.21	20,27	20.72
5	0	0	10	1	16.42	19.76	
6	0	0	10	2	18.53	20.99	
7	0	0	20	0	16.84	20.33	
8	0	0	20	1	17.98	21.05	
9	0	0	20	2	19.19	21.68	



Şekil 4.7. 10 ve 18 seviye arasındaki kırılma yükleri

S/B oranı 0.8’de JG kolonlar ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.7.’ de görülmektedir. Burada YFC, UK ve SD %10 değerleri sabit bırakılarak UK ve HA’nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir.

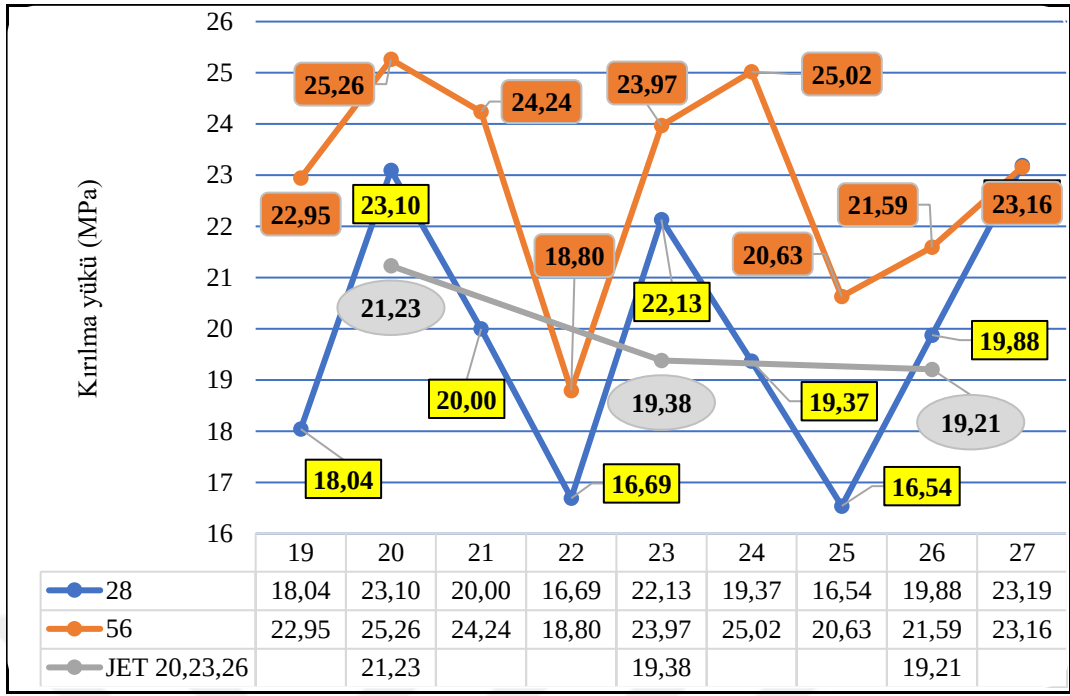
Deney sonuçlarına göre, SD’nin 28. günde etkili olduğu görülmüştür. SD’nin erken dayanım alması ve UK gibi akışkanlaştırıcı maddelerle uyum gösterdiği gözlenmiştir. Literatürde SD’nin akışkanlaştırıcı ile birlikte tercih edilmesi önerilir. SD, şerbetin içerisinde mukavemet alması ve çimentoyla reaksiyona girmesi için gereken suyun emilmesine yol açar. Bu sertleşme için gereken su ihtiyacını artırır. Akışkanlaştırıcının kullanılması tepkimelerin su ihtiyacını düşüreceği için SD ile kullanımında faydalı olabileceği görülmüştür. 28 ve 56 günlük sonuçların yakın olması yine silis dumanının erken dönemde dayanım kazandırması ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca deneylerde akışkanlaştırıcı katılmaması durumunda su ihtiyacının önemini göstermektedir. S/B oranı genelde 1.0 tercih edilirken 0.8 olduğunda ve mineral katkı tercih edildiğinde daha fazla su ihtiyacı ortaya çıkmakta ortamda yeterli su bulunmadığında reaksiyonlar yavaşlamakta ve katkılar istenilen özelliklerini sergileyememektedir. 28 ve 56 günlük dayanımların yakın olduğu da görülmüştür. 14.seviyede HA’nın kazandırdığı su sayesinde JG kolonda dayanım piklere yaklaştığı görülmüştür.

13, 14 ve 15.seviyelerde 7, 8 ve 9.seviyelerdeki UK %20 oranındaki dayanım yükselmesine benzer bir yükselme gözükmemektedir. Burada UK ve SD bir seviyeye kadar birbirlerine karşı tepkime vermediği ve benzer hareket ettiği düşünülmektedir. Erken dönemde silis dumanının etkisi, uzun vade de ise uçucu külün etkisiyle beraber dayanıma etki ettiği görülmektedir. Karışımlarda tek tür katkı maddesi yerine değişik oranlardaki 2'li ve 3'lü karışımlar, tek tür katkı maddesi içerenlere göre daha iyi oldukları değerlere bakılarak gözlemlenmiştir.

16, 17 ve 18.seviyelerde, su ihtiyacının önemi daha iyi anlaşılmıştır. 16.seviye incelenirse dayanım referans değer olan 1.seviyeden düşüktür. Su ihtiyacının fazla olmasından ve çimentodaki CaO ile suda bulunan H^+ iyonları yeterli tepkimeye giremediğinden mukavemeti sağlayan C-H bağları oluşmamaktadır. Bu durumda referans numune daha fazla bağ oluşturdıklarından 16.seviyenin dayanımı düşük çıkmaktadır. 17 ve 18.seviyelerde akışkanlaştırıcının devreye girmesiyle çimento tepkimesinin suya olan talebi azalmakta ve daha fazla C-H bağları oluşturulabilmektedir. C-H bağları yapısına Si ve Al gibi elementlerin katkısını ilave ederse C-S-H bağını oluşturur. Bu dayanım için istenen bir bağ çeşididir. UK ve SD içerisinde bulunan bu yapılar C-H bağları ile birleşerek birlikte dayanımı arttırır. 18.seviyede dayanımın bir miktar düşmesi tepkime için ihtiyaç suyun yoksunluğu, kırılma veya karılma hassasiyetinden kaynaklanan küçük yüzdelerle sapma göstermesiyle yorumlanabilir. JG kolonlar ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. SD%10, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
10	0	10	0	0	20.84	22.71	25.05
11	0	10	0	1	20.99	22.92	25.28
12	0	10	0	2	18.19	22.50	
13	0	10	10	0	18.83	21.35	
14	0	10	10	1	21.29	22.80	26.72
15	0	10	10	2	18.04	24.96	
16	0	10	20	0	14.26	16.69	
17	0	10	20	1	18.65	21.29	
18	0	10	20	2	18.41	20.06	



Şekil 4.8. 19 ve 27 seviye arasındaki kırılma yükleri

S/B oranı 0.8 olan JG kolonlar ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.8.' de verilmiştir. Burada YFC, UK ve SD %20 değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir.

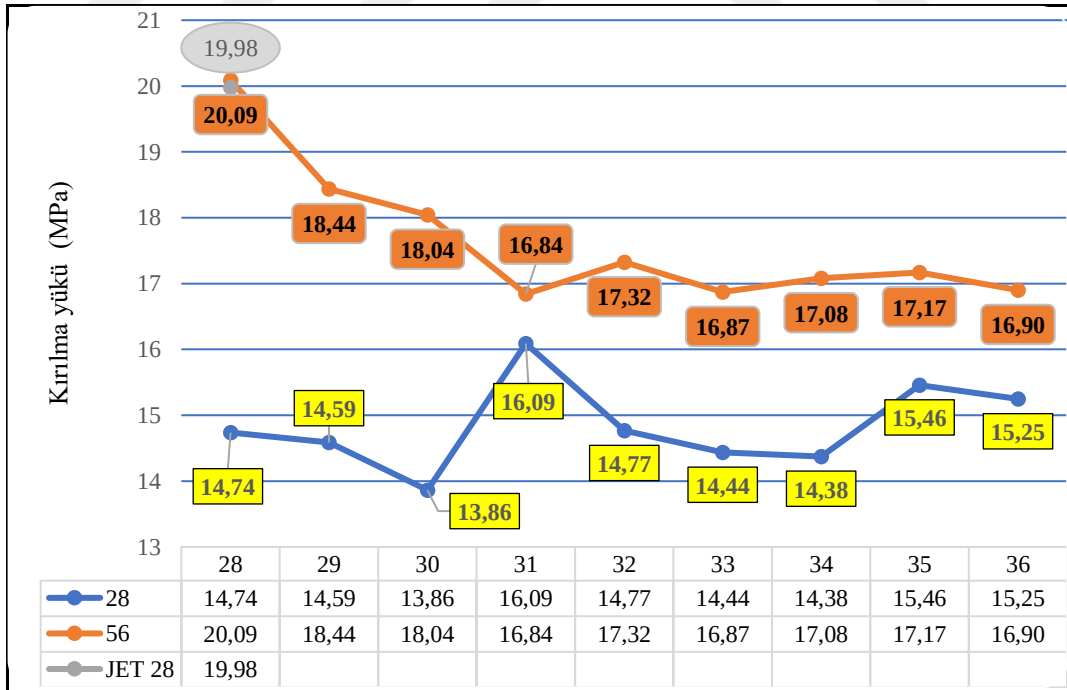
SD 'nin %20 seviyesi daha önceki çalışmalarda elde edilen bilgilerde de tekli karışımlarda dayanımın pik yaptığı değer olarak gözlemlenmiştir. Yapılan numune deneyleri ve JG kolonu bunu göstermiştir. Burada 56 günlüğün JG kolon karotuna göre daha yüksek çıkmasının sebebi karışımın daha homojen ve numune başlığının düzgün olması gösterilebilir. SD %10'a kıyasla her dönemde daha yüksek dayanım göstermesi sonuçların doğruluğunu göstermektedir. Aynı SD %10'daki gibi su ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda numuneler her dönemde düşük dayanımlar göstermektedir.

22, 23 ve 24.seviyelerde durum bir önceki seviyeye göre düşük olsa da benzerlik göstermektedir. UK ve SD dayanıma ortak katkı sağlamakta, şerbetin su ihtiyacının akışkanlaştırıcı marifetiyle giderilmesiyle dayanım alması daha da hız kazanmaktadır. UK'nin uzun vade katkısından 24.seviyede görülmektedir. Bekleme süresiyle dayanım alma hızı gün geçtikçe yavaşlasa da belli bir süre devam etmektedir. 56. Günde pik dayanıma ulaşması ön deneylerde gözüküyor olsa da JG kolonlarla bunun imalatının gerçekleştirilerek aksi bir durum olmadığının ispatlanması gerekir.

25,26 ve 27.seviyelerde çimento yerine ikame oranı %30 u geçmesi dayanımda ciddi ölçülerde zayıflamalara neden olmaktadır. Bu durum ihtiyaç olan yeterli miktarda suyun olmaması ve kimyasal tepkimelerin gerçekleşmeden sonuçlanmasıyla açıklanması daha doğru olacaktır. Bu durumda S/B oranı 1.0 alarak yeniden değerlendirme yapmak uygun olur. Akışkanlaştırıcı kullanılmasıyla bu durum aşılmış gibi gözükse de nispeten daha heterojen karışım olan JG kolonlarda bu yardımcı etkisini gösteremeyebilir. JG kolonlar ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.4.' de verilmiştir.

Çizelge 4.4. SD%20, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
19	0	20	0	0	18.04	22.95	21.23
20	0	20	0	1	23.10	25.26	
21	0	20	0	2	20.00	24.24	
22	0	20	10	0	16.69	18.80	19.38
23	0	20	10	1	22.13	23.97	
24	0	20	10	2	19.37	25.02	
25	0	20	20	0	16.54	20.63	19.21
26	0	20	20	1	19.88	21.59	
27	0	20	20	2	23.19	23.16	



Şekil 4.9. 28 ve 36 seviye arasındaki kırılma yükleri

S/B oranı 0.8 oranı olan JG kolon ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.9.' da görülmektedir. Burada YFC %20, SD değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir.

YFC UK gibi uzun vadede dayanım gösteren bir mineral katkı malzemesidir. Literatürde YFC'nin serbest basınç dayanımına katkısının araştırılmasına pek rastlanılmamıştır. Bu durum YFC kısa vadede dayanım göstermemesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kısa vadede referans katkısız numunelere göre dayanımı düşürmesi bu tezi daha da güçlendirmektedir. YFC su ile tepkimeye girdiği ve akışkanlaştırıcı kimliğine bürünerek şerbetin içinde bulunan suyun yüzeye çıkması yapılan deneylerde görülmüştür.

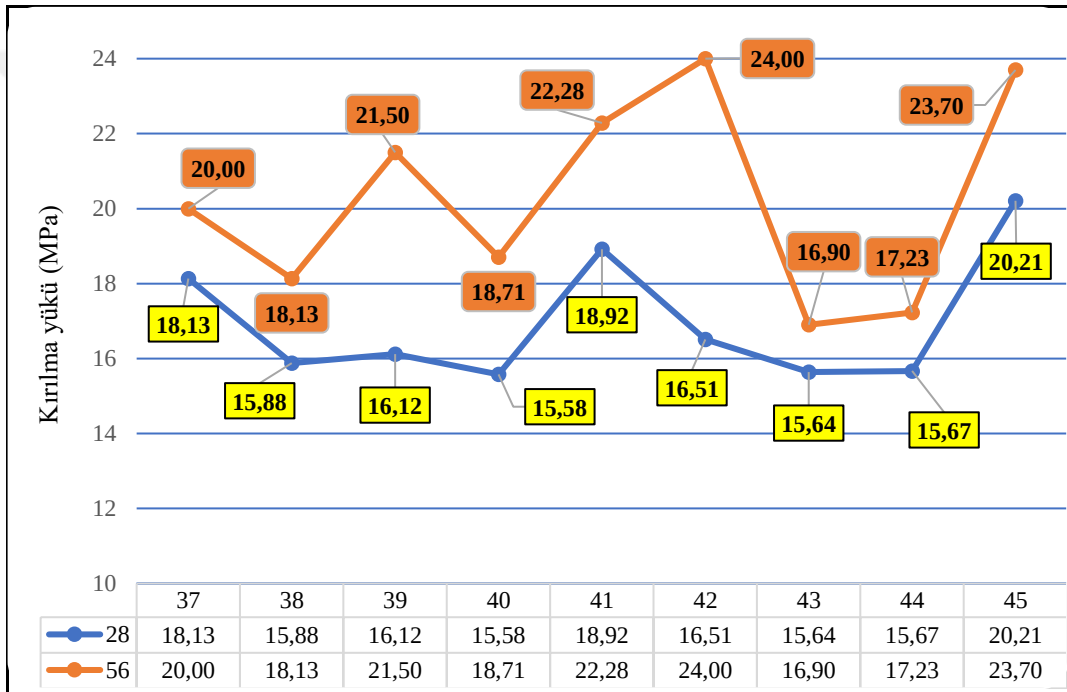
Şerbetin içinde serbest kalan suyun yüzeye çıkması harcın tepkimeye girmeden ayrışmasına ve gerekli C-H bağlarının oluşturulamamasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu durumda YFC ile birlikte harcın su ihtiyacını azaltan akışkanlaştırıcının kullanılması uygun düşmemektedir. Nitekim bu konu seviye 28, 29 ve 30.seviyelerde açıkça gözükmemektedir. 29 ve 30.seviyede HA etkisiyle dayanım 28 günde kendisini pek belli etmese de uzun vadede dayanımın gözle görülür azaldığı gözlemlenmiştir. 29.seviyedeki JG kolonu da 56 günlükte yakın değer oluşturması bu konuyu desteklemektedir. Sonuç olarak YFC tekli karışımlarda HA ile birlikte kullanıldığında ters tepki vermekte, mukavemet değerini düşürmektedir.

31 32 ve 33.seviyelerde UK ikamesiyle durum iyileşiyor gözükse de YFC yüzde olarak daha fazla olması ve UK'ye baskın olması durumu pek değiştirmemektedir. Ayrıca UK'nin de geç tepki vererek uzun dönemlerde reaksiyon vermesi, ikame oranının %30'a yaklaşması gibi sebepler sertleşmeye etki ederek priz alma süresini de etkilemektedir. Geç priz alan katkılı harç daha düşük dayanım gösterdiği bilinmektedir.

UK'nin %20 ye çıktığı 34, 35 ve 36.seviyelerinde dayanım önceki seviyelere göre iyileştiği gözlemlenebilir. Bu durum YFC'nin etkisiyle serbest kalan suyun UK mineralleri tarafından kullanılmasıyla açıklanabilir. Seviyelerin yakın çıkması değerlendirmeyi güçlendirmektedir. Uygulamalarda da YFC katkı olarak kullanımı oldukça azdır. Bu durum katkı olarak kullanımda dayanımda pek fayda sağlamamasıyla açıklanabilir. Bir diğer husus YFC'nin karılma zorluğu ve yerleşme ve JG makinesinde basınçlandırılarak püskürtme problemlerinden dolayı tercih edilmemektedir. JG kolon ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.5.'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. YFC %20 UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
28	20	0	0	0	14.74	20.09	19.98
29	20	0	0	1	14.59	18.44	
30	20	0	0	2	13.86	18.04	
31	20	0	10	0	16.09	16.84	
32	20	0	10	1	14.77	17.32	
33	20	0	10	2	14.44	16.87	
34	20	0	20	0	14.38	17.08	
35	20	0	20	1	15.46	17.17	
36	20	0	20	2	15.25	16.90	



Şekil 4.10. 37 ve 45 seviye arasındaki kırılma yükleri

S/B oranı 0.8 oranı olan numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.10.' da gösterilmiştir. Burada YFC %20, SD %10 değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir. 37, 38 ve 39.seviyelerde SD'nin etkisi 28.günde görülmüştür. Önceki seviye gruplarına kıyasla erken dayanımlarda iyileşme gözlemlenmiştir. YFC hem yüzde olarak hem de yoğunluk olarak baskın olması uzun vadede dayanımın bir önceki gruba göre değişmemesinde etkilidir. YFC'nin şerbet suyuna olan etkisi akışkanlaştırıcı katılmasıyla daha da bariz hale gelmiştir. 39.seviyede dayanımın yüksek çıkması SD'nin bağ etkisinde daha fazla rol oynayarak etkimesi olarak düşünülebilir. Tekrarlanan deneylerle durum kontrol edilmelidir.

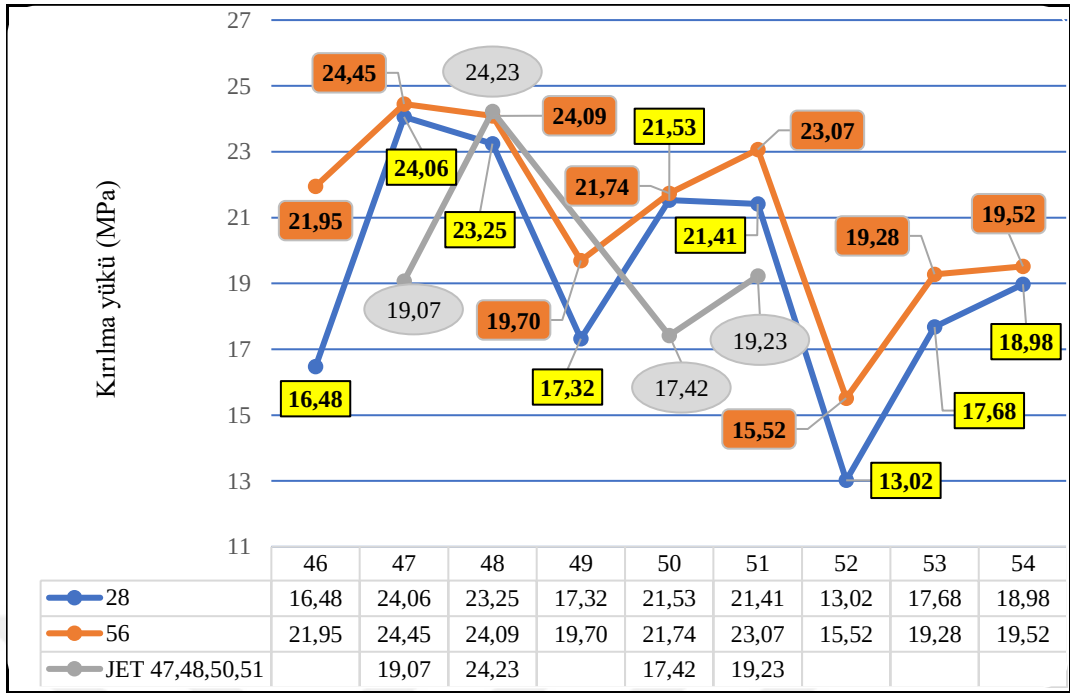
UK'nin devreye girmesiyle 40, 41 ve 42.seviyelerde su ihtiyacı artmıştır. YFC etkisi bunu karşılayamamakta ve HA tipi ihtiyaç suyunu azaltıcı katkılar gerekmektedir. 41 ve 42.seviyede HA etkisi gözükmemektedir. Akışkanlaştırıcı vasıtasıyla mineral katkılar daha fazla bağ oluşturarak dayanıma etki etmektedir. Karışıma ikame oranı %30'a yaklaşmış olması ve UK'nin uzun vadede dayanıma etki etmesi sonucu 28. Günde istenen dayanım alınamazken, 56.günde ve HA %2 seviyesinde sonuçlar referans dayanımlara göre yüksek çıkmaktadır. Sadece SD'nin katılmasının ekonomik ve çevreci olmadığı durumlarda bu tip ilave katkılar denenerek çimentodan tasarruf edilebilir. Burada katkıların birbirine etki etmediği düşünülerek tasarlanmıştır. Daha detaylı karışım ve JG deneyleri ile jete uygun olup olmadığı araştırılmalıdır.

43, 44 ve 45.seviyelerde durum bir önceki banda göre farksız değildir. YFC ilk kısımda etki edememiş, HA'nın %1'e çıkarılması dayanıma etki edememiştir. Ancak HA seviyesi %2 olduğunda istenen reaksiyonlar gerçekleşebilmiştir. Bunun etkisi şekilde açıkça görülmektedir.

40-42.seviyelere göre erken dayanım düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu erken dayanım istenen imalatlarda kullanımı uygun değildir. Ayrıca JG kolonlarda hem karılma zorluğu hem de homojen etki etme sorunundan dolayı imalatı mümkün olmamaktadır. Çimento ve su ile homojen karışmayarak çökeldiği ve sonucunda basınçlandırmayarak zemine etki ettirilemediği için bu seviyelerde JG kolonu oluşturulamamıştır. Ayrıca nozullardan geçemediği düşünülerek nozulları tıkadığı ve sistemi istemsiz basınçlandırdığı yapılan deneylerde görülmüştür. Bu gibi durumlar JG kolonlarda daha detaylı araştırmaların yapılması gerektiğini göstermiştir. Numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.6.' da verilmiştir.

Çizelge 4.6. YFC %20, SD %10, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük
37	20	10	0	0	18.13	20
38	20	10	0	1	15.88	18.13
39	20	10	0	2	16.12	21.5
40	20	10	10	0	15.58	18.71
41	20	10	10	1	18.92	22.28
42	20	10	10	2	16.51	24
43	20	10	20	0	15.64	16.9
44	20	10	20	1	15.67	17.23
45	20	10	20	2	20.21	23.7



Şekil 4.11. 46.seviye ve 54.seviye arası kırılma yükleri

S/B oranı 0.8 oranı olan JG kolonlar ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.11. 'de görülmektedir. Burada YFC %20, SD %20 değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir.

46, 47 ve 48.seviyelerde SD etkisi görülmektedir. 28. günde akışkanlaştırıcı etkisi olmadan dayanımlar düşük çıksa da %1 HA etkisiyle dayanımlar toparlanmaya başlamış ve pik değerlere yaklaşmıştır. YFC'nin suya olan etkisi ve HA %1 katkısıyla dayanım bu grup için zirve olmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken karışımların homojen yapılmasıdır. 47.seviyede yapılan JG kolon deneyinde numunedeki görülen istenen dayanıma yaklaşamamıştır. Ne kadar homojen ve hatasız karılsa da JG kolona numunedeki gibi etki etmediği karşılaştırmalı olarak görülmüştür. Homojen ve eşit dağılımlı karışım yapılarak kuma nüfuz ettirilmesi son derece önemlidir. Şerbet karışımı zemine ne kadar iyi emdirilirse dayanım numunedeki gibi o kadar yüksek çıkacağı öngörülmektedir.

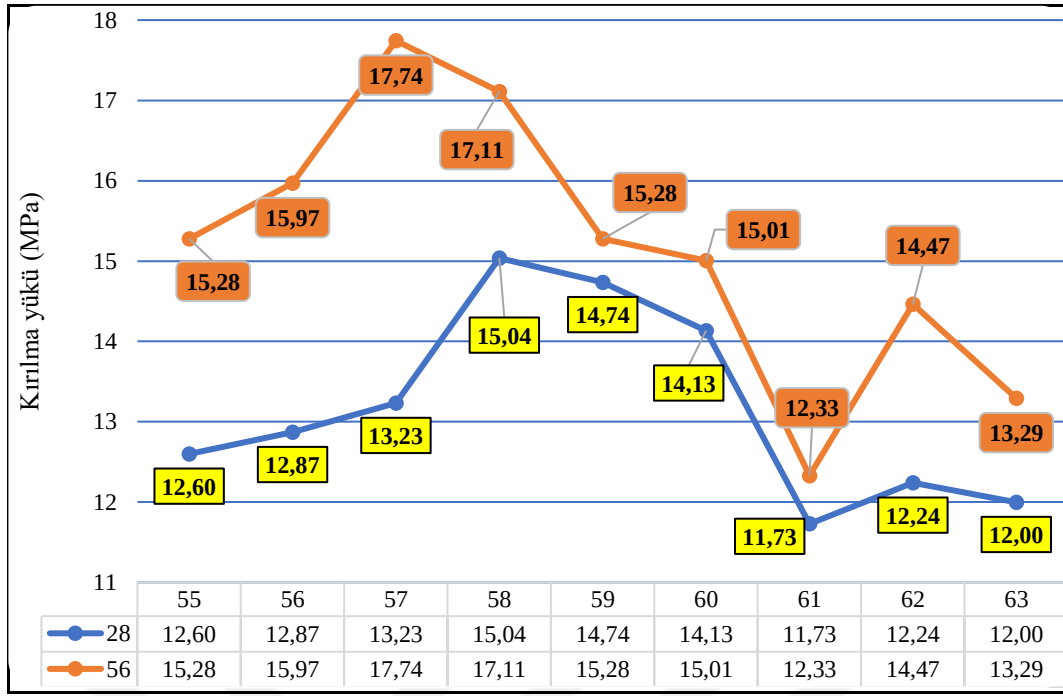
49, 50 ve 51.seviyelerde UK'nin etki etmesi ile karışımın kırılma zorluğu çıktığı yapılan deneylerde gözlemlenmiştir. Bu durum ile JG kolon imalatında da karşılaşılmış ve dayanım düşüklüğüne bunun etki ettiği düşünülmektedir. 50.seviyede 28 ve 56 günlük sonuçlar yakın çıkmasının sebebi mineral katkıların etkisinin su ihtiyacından dolayı tam gösteremediğinden kaynaklanmaktadır. 51.seviyede bu durum aşılsa da önerilen ikame oranı %30 oranını aştığı için istenilen ve beklenen dayanıma ulaşamamıştır. JG kolon

da bu söylemi ispatlar niteliktedir. 51.seviyenin 50.seviyeye göre yüksek olması nüfuz etme kabiliyetinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. İkame oranı ve katkı cinsi kadar önemli olan bir konu olan homojen dağılma ve etkileşim 50 ve 51.seviyelerde kendisini göstermiştir. 51.seviyede 56 günlük numunenin 28.güne göre gelişme göstermesi UK ve YFC'nin suyla etkileşmesi sonucu uzun vadede dayanımı geliştirdiğini göstermiştir.

Gözle gözlemlenen bir diğer konu ise YFC içeren katkıların diğer katkılara göre daha uzun sürede kırılarak deformasyon almasıdır. Bu literatürlerde süneklilik kavramıyla ilişkilendirilmiştir. Süneklilik, kırılmadan kaynaklı deformasyon yükünü alarak harcın dayanımına etki ettiği bilinmektedir. YFC ile yapılan tüm deneylerde harcın yoğunlaşması ve ağırlaşması ayrıca ek yük getirmesi de problemidir. JG kolonlar ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. YFC %20, SD %20, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
46	20	20	0	0	16.48	21.95	
47	20	20	0	1	24.06	24.45	19.07
48	20	20	0	2	23.25	24.09	24.23
49	20	20	10	0	17.32	19.70	
50	20	20	10	1	21.53	21.74	17.42
51	20	20	10	2	21.41	23.07	19.23
52	20	20	20	0	13.02	15.52	
53	20	20	20	1	17.68	19.28	
54	20	20	20	2	18.98	19.52	



Şekil 4.12. 55 ve 63.seviye arasındaki kırılma yükleri

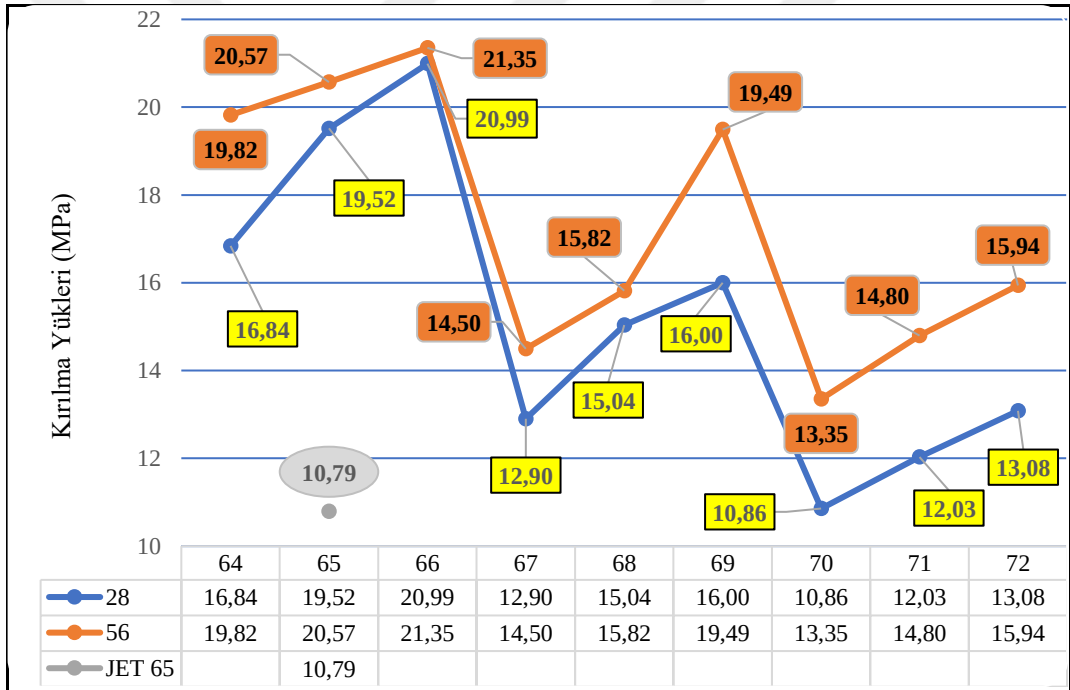
S/B oranı 0.8 oranı olan numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.12.'de görülmektedir. Burada YFC %40, SD değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir.

YFC'nin tek başına kullanımı kısa vadede fayda etmemektedir. Bu 28 günlük sonuçlara bakılarak anlaşılabılır. HA'nın devreye girerek karışıma etki etmesi karılma problemine kısmen çözüm olmuştur. YFC tekli karışımlarda etkisi katkısız referans numunelere göre daha düşük dayanım göstermiştir. İkili karışımlarda durum pek farklı değildir. Bunda ikame oranının %30'u geçmiş olması etki göstermektedir. İkame katkı oranı %30'u geçmesi dayanıma olumsuz yansımaktadır. Şerbetlerde istenen homojen karımlar yapılamamaktadır. İstenen karılma yapılamadığı için çimento ve bağlayıcı beklenen etkileşimi yapamamaktadır. UK katkısı uzun vadede dayanıma etki etmiş gibi gözükse de sonuçlar pek değişmemiş 28 ve 56 günlük grafikler yakın seyretilmiştir. %40 olan ikame seviyesi UK ile %60 lara kadar yükselmiş bu da gerekli ihtiyaç bağlayıcı madde olan çimentonun ilave edilmemesine neden olmuştur. Katkı maddeleri tek başlarına bağlayıcılık özellikleri zayıftır. Bu sebeple çimentoya %30 ikamesinin önemi bir kere daha görülmüştür. Daha önce edinilen basınç ve karılma tecrübelerden dolayı JG kolonu oluşturulmamıştır. Numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.8.'de verilmiştir. Önceki yapılan imalatlarda görülen süneklilik olayı buradaki serbest basınç dayanımı testinde de gözlemlenmiştir. Numuneler düşük dayanım olsa da

kırılma işleminde fazlaca deformasyon almış ve numune boyları referans numunelere göre kısalmıştır. Bu durum YFC kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.8. YFC %40, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük
55	40	0	0	0	12.6	15.28
56	40	0	0	1	12.87	15.97
57	40	0	0	2	13.23	17.74
58	40	0	10	0	15.04	17.11
59	40	0	10	1	14.74	15.28
60	40	0	10	2	14.13	15.01
61	40	0	20	0	11.73	12.33
62	40	0	20	1	12.24	14.47
63	40	0	20	2	12.00	13.29



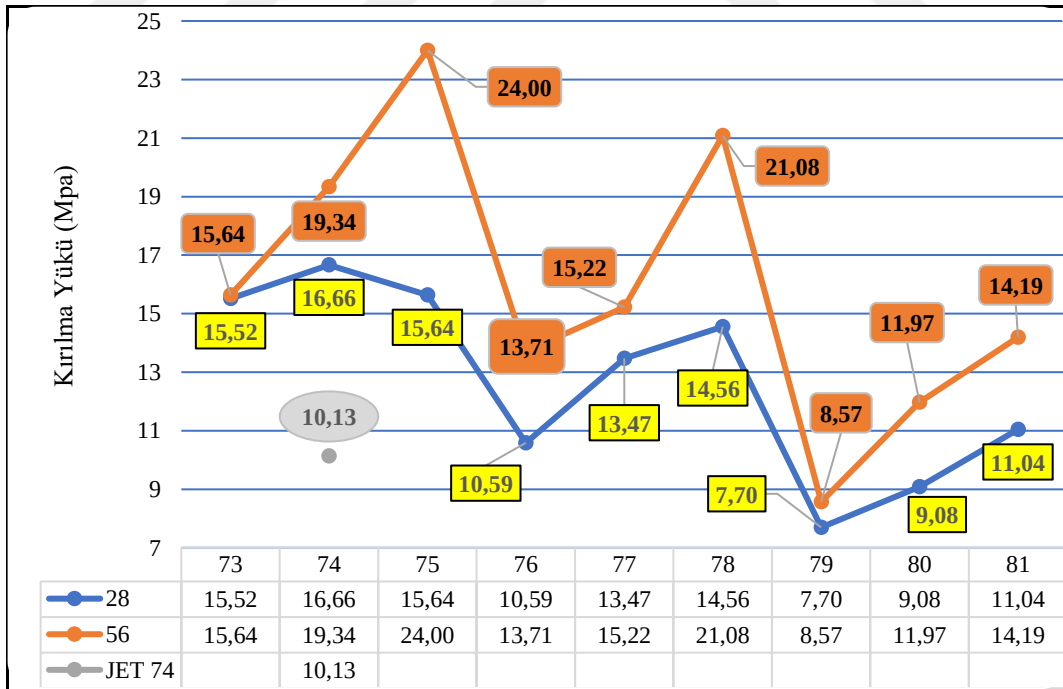
Şekil 4.13. 64 ve 72 seviye arasındaki kırılma yükleri

S/B oranı 0.8 olan JG kolon ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.13.' te görülmektedir. Burada YFC %40, SD %10 değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir. Önceki incelenen grupta pek fark olmamıştır. Yeterli çimento olmadığı için gerekli bağlar yapılamamaktadır. C-H bağları dayanım gereklidir. SD %10 etkisi göstermiştir. Oluşturulan JG kolonundan alınan karot örneğinin sonuçları çok düşük kalmıştır. İkamenin oranı %30'u geçerek %70'lere yaklaşmıştır. Bu durum kırılma ve homojen dağılma konusunda problemler

oluşturmuştur. UK'nin uzun vade etkisi kısmen gözükmemektedir. Artan HA oranlarında dayanım devam edecek gibi görünse de ikame oranı şartına takılması muhtemeldir. Araştırmalarda HA'nın %2'den fazla kullanılmaması önerilmektedir. 64-72.seviyelerde basınç altında deformasyon kısmen görülmüş ama YFC %20 seviyesi kadar dayanmadığı gözlenmiştir. Buradan YFC'nin etkisini tam olarak gösteremediği düşünülmektedir. JG kolon ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları çizelge 4.9'de verilmiştir.

Çizelge 4.9. YFC %40, SD %10, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
64	40	10	0	0	16.84	19.82	
65	40	10	0	1	19.52	20.57	10.79
66	40	10	0	2	20.99	21.35	
67	40	10	10	0	12.90	14.50	
68	40	10	10	1	15.04	15.82	
69	40	10	10	2	16.00	19.49	
70	40	10	20	0	10.86	13.35	
71	40	10	20	1	12.03	14.80	
72	40	10	20	2	13.08	15.94	



Şekil 4.14. 73.seviye ve 81.seviye arası kırılma yükleri

S/B oranı 0.8 oranı olan JG kolonlar ve numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 4.14. 'te görülmektedir. Burada YFC %40, SD %20 değerleri sabit bırakılarak UK ve HA'nın SBD değeri değişimleri incelenmiştir. İkame oranının %80'e

yaklaşması ve bundan kaynaklı karılamama, reaksiyonlar için yeterli çimentonun olmayışı gibi nedenlerden dolayı 73-81.seviyelerde istenen sonuçlar gözlenememiştir. Bu bize mineral katkı malzemelerinin tek başına bağlayıcı madde özelliğinin yeteri kadar olmadığı sonucunu olduğunu gösterir. 74. seviyede JG kolon numunesinde düzgün karot alınamamıştır. İkame oranı %30'u geçtiği zaman ve HA kullanılmadığında basınç dayanımlarının düşük olduğu görülmüştür.

75 ve 78.seviyede dayanımın yüksek çıkması SD %20 ve SD %20, UK %10 katkı maddesinin fazla olması nedeniyle SD'nin YFC'ye göre ayırt edici renginden dolayı gözle görülmüştür.

79-81.seviyeler arası UK ve SD ikamesi karışamamadan dolayı dayanıma katkı sağlayamamış, referans değerlerden de aşağıda olduğu görülmüştür. Uzun vadelere bakıldığında dayanımda bir artış olduğu gözükse de erken dayanım alması gereken koşullar altında kullanılması uygun değil ve zararlıdır. JG kolon ve numunelere ait karışım çizelgesi ve serbest basınç dayanımları Çizelge 4.10.' da verilmiştir.

Çizelge 4.10. YFC %40, SD %20, UK %10 ve %20 değerlendirilmesi

Deney No	YFC	SD	UK	HA	28 günlük	56 günlük	JG
73	40	20	0	0	15.52	15.64	10.13
74	40	20	0	1	16.66	19.34	
75	40	20	0	2	15.64	24	
76	40	20	10	0	10.59	13.71	10.13
77	40	20	10	1	13.47	15.22	
78	40	20	10	2	14.56	21.08	
79	40	20	20	0	7.7	8.57	10.13
80	40	20	20	1	9.08	11.97	
81	40	20	20	2	11.04	14.19	



Şekil 4.15. 28.gün karot numune kırma işlemleri



Şekil 4.16. Numunelerin 56 günlük kırma işlemleri

Çizelge 4.11. Numunelerin 28 günlük dayanım sonuçları

Deney No	YFC	SD	UK	HA	Ort. Mpa SBD	Ort. MPa YÇD	Deney No	YFC	SD	UK	HA	Ort. Mpa SBD	Ort. MPa YÇD
1	0	0	0	0	14.98	2.64	43	20	10	20	0	16.36	2.94
2	0	0	0	1	15.34	2.47	44	20	10	20	1	12.00	3.11
3	0	0	0	2	10.38	2.47	45	20	10	20	2	20.21	2.45
4	0	0	10	0	16.21	3.06	46	20	20	0	0	16.48	3.01
5	0	0	10	1	16.12	3.14	47	20	20	0	1	24.06	3.53
6	0	0	10	2	18.53	2.83	48	20	20	0	2	23.25	3.15
7	0	0	20	0	16.24	2.83	49	20	20	10	0	17.32	2.71
8	0	0	20	1	17.17	2.82	50	20	20	10	1	22.44	3.49
9	0	0	20	2	18.28	2.45	51	20	20	10	2	21.41	3.32
10	0	10	0	0	21.44	3.00	52	20	20	20	0	13.02	2.74
11	0	10	0	1	23.40	2.68	53	20	20	20	1	17.68	3.03
12	0	10	0	2	16.99	3.52	54	20	20	20	2	18.98	2.70
13	0	10	10	0	18.83	3.41	55	40	0	0	0	12.60	2.59
14	0	10	10	1	21.74	3.82	56	40	0	0	1	12.57	2.50
15	0	10	10	2	16.99	3.16	57	40	0	0	2	13.23	2.29
16	0	10	20	0	14.26	2.44	58	40	0	10	0	15.04	2.34
17	0	10	20	1	17.74	3.44	59	40	0	10	1	14.74	2.25
18	0	10	20	2	20.12	2.97	60	40	0	10	2	14.13	2.19
19	0	20	0	0	18.04	3.14	61	40	0	20	0	11.73	2.17
20	0	20	0	1	23.10	3.59	62	40	0	20	1	12.24	2.13
21	0	20	0	2	19.40	4.06	63	40	0	20	2	12.00	2.10
22	0	20	10	0	17.35	3.30	64	40	10	0	0	15.64	2.56
23	0	20	10	1	22.22	3.20	65	40	10	0	1	19.52	2.52
24	0	20	10	2	19.37	3.89	66	40	10	0	2	20.99	2.63
25	0	20	20	0	16.54	2.28	67	40	10	10	0	12.90	2.56
26	0	20	20	1	19.88	3.76	68	40	10	10	1	15.04	2.36
27	0	20	20	2	23.52	3.46	69	40	10	10	2	15.22	2.96
28	20	0	0	0	14.74	2.23	70	40	10	20	0	10.86	1.68
29	20	0	0	1	14.59	2.43	71	40	10	20	1	12.03	2.29
30	20	0	0	2	13.86	2.45	72	40	10	20	2	13.08	2.29
31	20	0	10	0	16.09	2.91	73	40	20	0	0	15.52	2.61
32	20	0	10	1	14.77	2.60	74	40	20	0	1	16.66	2.82
33	20	0	10	2	14.44	2.48	75	40	20	0	2	15.64	2.77
34	20	0	20	0	14.38	1.94	76	40	20	10	0	10.59	2.00
35	20	0	20	1	15.46	2.10	77	40	20	10	1	13.47	2.44
36	20	0	20	2	15.25	2.50	78	40	20	10	2	14.56	2.61
37	20	10	0	0	17.83	3.46	79	40	20	20	0	7.70	1.53
38	20	10	0	1	15.88	2.73	80	40	20	20	1	9.08	1.72
39	20	10	0	2	16.12	3.18	81	40	20	20	2	11.04	1.85
40	20	10	10	0	15.58	3.31							
41	20	10	10	1	18.92	3.05							
42	20	10	10	2	16.06	3.06							

Çizelge 4.12. Numunelerin 56 günlük dayanım sonuçları

Deney No	YFC	SD	UK	HA	Ort. Mpa SBD	Ort. Mpa YÇD	Deney No	YFC	SD	UK	HA	Ort. Mpa SBD	Ort.Mpa YÇD
1	0	0	0	0	19.18	2.04	43	20	10	20	0	16.90	1.83
2	0	0	0	1	20.84	2.39	44	20	10	20	1	17.23	1.75
3	0	0	0	2	14.47	1.62	45	20	10	20	2	23.40	1.88
4	0	0	10	0	19.67	1.64	46	20	20	0	0	23.16	2.20
5	0	0	10	1	19.76	2.13	47	20	20	0	1	23.58	2.13
6	0	0	10	2	20.72	2.04	48	20	20	0	2	23.49	1.76
7	0	0	20	0	20.18	1.83	49	20	20	10	0	17.89	1.90
8	0	0	20	1	21.05	1.78	50	20	20	10	1	21.44	2.20
9	0	0	20	2	20.60	2.11	51	20	20	10	2	22.28	2.59
10	0	10	0	0	21.65	2.03	52	20	20	20	0	14.92	1.54
11	0	10	0	1	22.62	2.17	53	20	20	20	1	19.28	2.26
12	0	10	0	2	22.50	2.38	54	20	20	20	2	17.23	2.01
13	0	10	10	0	21.35	1.81	55	40	0	0	0	15.28	1.82
14	0	10	10	1	22.07	2.47	56	40	0	0	1	14.77	1.58
15	0	10	10	2	25.68	2.26	57	40	0	0	2	17.74	1.68
16	0	10	20	0	16.69	1.56	58	40	0	10	0	17.11	1.57
17	0	10	20	1	21.59	1.83	59	40	0	10	1	14.98	1.81
18	0	10	20	2	19.16	2.26	60	40	0	10	2	13.80	1.74
19	0	20	0	0	22.95	1.95	61	40	0	20	0	12.33	1.58
20	0	20	0	1	25.26	2.35	62	40	0	20	1	14.47	1.49
21	0	20	0	2	25.29	2.18	63	40	0	20	2	13.29	1.47
22	0	20	10	0	18.13	2.42	64	40	10	0	0	19.82	2.06
23	0	20	10	1	23.88	2.43	65	40	10	0	1	20.57	2.19
24	0	20	10	2	25.83	2.45	66	40	10	0	2	20.75	2.29
25	0	20	20	0	19.13	2.05	67	40	10	10	0	14.50	1.73
26	0	20	20	1	21.29	2.41	68	40	10	10	1	15.82	1.54
27	0	20	20	2	22.56	2.06	69	40	10	10	2	20.69	2.07
28	20	0	0	0	20.39	1.78	70	40	10	20	0	13.35	1.56
29	20	0	0	1	18.44	1.97	71	40	10	20	1	14.80	1.52
30	20	0	0	2	17.44	1.61	72	40	10	20	2	15.94	1.6
31	20	0	10	0	16.84	2.09	73	40	20	0	0	12.45	1.8
32	20	0	10	1	17.32	2.01	74	40	20	0	1	18.74	1.84
33	20	0	10	2	16.87	1.94	75	40	20	0	2	24.00	2.35
34	20	0	20	0	17.98	1.65	76	40	20	10	0	13.71	1.7
35	20	0	20	1	15.67	1.49	77	40	20	10	1	15.22	2.04
36	20	0	20	2	16.90	1.65	78	40	20	10	2	21.08	2.02
37	20	10	0	0	20.00	1.75	79	40	20	20	0	8.27	1.33
38	20	10	0	1	18.13	2.39	80	40	20	20	1	11.97	1.53
39	20	10	0	2	21.80	2.26	81	40	20	20	2	14.19	1.33
40	20	10	10	0	18.71	1.84							
41	20	10	10	1	21.47	1.55							
42	20	10	10	2	24.60	1.83							

4.2. Jet Grout Kolonları Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, katkısız normal Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) ve katkı malzemeleri (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve hiper akışkanlaştırıcı) içeren bazı karışımların JG kolonların mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmış ve küçük ölçekli yapılan harç numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Deneyler zemin mekaniği laboratuvarında laboratuvar tipi jet enjeksiyon makinesi kullanılarak imalat gerçekleştirilmiştir.

Kum zemin, 120 litrelik plastik varil içinde, 11.5 litrelik enjeksiyon tankı, kontrol paneli, JG kolonu oluşturacak yatay ve düşey yönde hareket edebilen delgi makinesi ve tij, 1.5 mm çapında konik nozul, basınçlandırılan enjeksiyon pompası ve kompresörden oluşan JG makinesi, arazi şartlarına uygun JG makinalarıyla aynı mantalitede çalışan bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Laboratuvar deneylerine başlanmadan önce makine takımının kalibrasyon ayarı yapılarak deneme JG kolonları imal edilmiştir. Arazide standart Jet-1 grout sistemi başlıca çimento silosu, su deposu, karıştırıcı mikser, pompa, delgi makinesi, tij takımı ve kontrol panelinden oluşur. Laboratuvar çalışmaları için tasarlanan JG makinesi temel çalışma prensibi ve ekipmanları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Laboratuvar tipi JG kolon makinesi ve ekipmanı

4.2.1 Jet Grout İmalat İçin Enjeksiyon Şerbetinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan iyi derecelenmiş kumun (SW) özellikleri bölüm 3.1’de detaylı olarak verilmiştir. 55 cm çapında 105 cm yükseklikteki plastik varillerin içerisine kum zemin rölatif sıkılık %35 olacak şekilde yerleştirilmiştir. Hazırlanan enjeksiyon şerbetleri, 3000 dev/dk. ’lık karıştırıcı makineyle karıştırılarak hazırlanmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4. 18. JG için enjeksiyon şerbeti hazırlama işlemi

4.2.2. Jet Grout İmalat Parametreleri ve Deney Akışı

Erkan (2013), JG kolonlarını oluşumunu ve mekanik özelliklerini etkileyen değerlerin, su/bağlayıcı, tijn dönme ve çekme hızı ayrıca enjeksiyon basıncı olarak belirlemiştir. Jet grout kolonların oluşumunu etkileyen değerleri, önceki araştırmacıların yapmış olduğu (Erkan, 2013, Fidan 2015, Demiral 2017, Kanat 2018 ve Battal 2019) optimum değerler, karışımların birbiri ile karışma ve etkilememe özelliği, nozuldan enjekte edilebilirliği de değerlendirilerek parametreler optimum değerde sabitlenmiştir. Bu tez için yapılan deneysel çalışmada katkısız Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) ve bağlayıcı malzemenin aşağıdaki kütlege Çizelge 4.13’de belirtilen oranlarda SD, UK, YFC ve HA ilave edilmiştir. JG kolonların mekanik özelliğinin araştırılması planlanarak 16 farklı JG kolon parametresi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.13. JG imalatı için tasarlanan değerler

SD	UK	YFC	HA
0	0	0	0
10	0	0	0
0	10	0	0
0	0	20	0
0	0	0	1
10	0	0	1
10	10	0	1
20	10	0	1
20	0	0	1
20	20	0	1
20	0	20	1
20	0	20	2
20	10	20	1
20	10	20	2
10	0	40	1
20	0	40	1

4.2.3. JG Makinesinin Kalibresi ve İmalat Öncesi Deneme Kolonları

Erkan 2013,'de kolon çapı ve serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametrenin enjeksiyon basıncı olduğunu; enjeksiyon basıncı arttırıldıkça kolonların çaplarında artış, serbest basınç mukavemetinde doğrusal düşüş olduğunu belirtmiştir. Demiral, 2017'de tez çalışmasında jet grout kolonlarında tijin çekme hızı 30 cm/dak, dönme hızı 10 devir/dak jet grout kolonlarını oluşturmuştur. Çekme hızı 5,9 cm/dak'da tijin 15 cm yukarı veya aşağıya doğru hareket ettiğini, dönme hızı 3,8 cm/dak'da tijin saat yönü veya tersi yönünde 5 devir/dak yaptığını belirtmiştir (Fidan, 2015)

Bu tez çalışmasında, araştırmacılar ve literatürdeki çalışmalar birlikte değerlendirilerek jet grout kolonların oluşturulmasında enjeksiyon basıncı 30 bar, tijin çekme hızı 30 cm/dak ve dönme hızı 10 devir/dak olarak belirlenmiştir. Deneylerde enjeksiyon parametreleri ve portland çimentoları ile uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu karışımıyla oluşturulan kolonların serbest basınç ve yarmada çekme dayanımlarının aynı koşullarda değerlendirilmesi için sabit seçilmiştir. Belirlenen parametrelerde 2 adet deneme kolonları oluşturulmuştur. Deneme kolonları üzerinde ön değerlendirmeler yapılmış ve esas çalışmadaki kolonların istenilen özelliklerde oluşturulabileceği görülmüştür.

4.2.4. Jet Grout Kolon İmalatı

Deneme JG kolonlarının imalatı gerçekleştirildikten sonra aynı şekilde plastik variller içerisine belirlenen rölatif sıklıkta kum yerleştirildikten sonra JG kolon imalatı için tij kumun içine belirli yüksekliğe kadar daldırılır. Tij daldırıldıktan sonra dönme ve çekme hız değerleri kontrol edilerek imalata başlanır. İmal edilen JG kolonlar gerekli kür işlemi tamamladıktan sonra mukavemet özelliklerini değerlendirmek için JG kolonlardan karot alınır. Alınan karotlar üzerinde serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. JG kolon imalat işlemi



Şekil 4.20. JG kolon üretim aşamaları

4.2.5. Jet Grout Karot Alınması ve Yapılan Deneyler

Jet grout kolonlarından karot alma işlemi, Deprem ve Yapı Malzemesi Laboratuvarında alınmıştır. Karot makinesi ile birlikte JG kolonlarından 50 mm çapında karot numuneleri alınmıştır. Karot numuneleri karışımın homojen olduğu kısımlardan alınmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. JG kolon karot alma ve başlık düzeltme aşamaları

Oluşturulan jet grout kolonları ve karot numuneler incelendiğinde karışımın homojen olduğu gözlenmiştir. Karot alma işlemlerin sonucunda JG kolon makinesi ile düzgün bir şekilde imalatların yapıldığını göstermektedir. Karot numunelerin başlıklar düzgün kesilerek boy/çap oranı 2 olacak şekilde kısımlara ayrılmıştır. Her JG kolonundan 4-6 adet sağlam numuneler alınmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. JG kolon karot alma ve başlık düzeltme aşamaları

4.2.6. Jet Grout Serbest Basınç Deneyleri

Tek eksenli basınç deneyi, ince taneli zeminlerin tek eksenle serbest basınç dayanımını ölçmek için yapılmaktadır. Deney doymuş, doymuş olmayan killeri, kumlar ve çimentolaşmış zeminler üzerine yapılabilir. Aynı zamanda deformasyon-yük grafiği de çizilebilir. Silindirik zemin numunesi sadece eksene dik doğrultuda yüklemeye tabi tutulmalıdır. Eksenel yük artışları altında meydana gelen boy kısalması ölçülür ve gerilme-şekil değiştirme grafiği çizilebilmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri zeminin serbest basınç değerini vermektedir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, boy/çap oranının iki olarak seçilmesi standart değerlendirme için gereklidir. Serbest basınç deneyi sadece herhangi bir yanal destek

olmadan kendi kendini tutabilen zeminlerde uygulanabilir. JG kolonlarından alınan karot numuneleri 0.4 mm/dk yükleme hızıyla tek eksenli basınç deneyi düzeneğinde karot numunelerin kırılması gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. JG kolon karot numune kırma işlemleri

4.2.7. Jet Grout Yarmada Çekme (Brezilya) Deneyleri

JG kolonlarından alınan karotların çekme dayanımı deneyinin uygulanmasında, karot numuneleri iki parçaya ayrıldığı için bu yöntem “yarmada çekme deneyi” olarak adlandırılmıştır. Yarmada çekme deneyi önerisi ilk kez 1953’de Brezilya’da ortaya atılmıştır (Carneir ve diğ., 1953).

Brezilya deneyinin uygulanmasında, JG kolonlarından alınan karot numunelerinin çekme dayanımını belirlemek için TS 3129 ve ASTM C496’ya uygun şekilde yarmada çekme ekipmanı kullanılmıştır (Şekil 4.24). Numune deney presinin üzerine numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda prese koyulmaktadır. Numunenin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 20 mm eninde ve yaklaşık 2 mm kalınlığında kontrplak çiteler yükü üniform dağıtmak için yerleştirilmektedir.

Deneyde uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) değeri ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindirik numunenin ideal kırılma şekli, numunenin ortadan ikiye yarılarak iki eşit parçaya ayrılması şeklinde olmalıdır. Yatay konumda bulunan karota uygulanan dikey basınç yüküyle uygulandığı eksen doğrultusunda kısaltmalar meydana gelirken yatay ekseninde kısmi uzamalar oluşur. Basınç Yükleme sonucunda numune yük eksenini boyunca kırılma uğrar ve çekme

dayanımı belirlenir. Bağıntı 4.1’de belirtilen formülle yarmada çekme dayanımı belirlenir.

$$\text{Çekme gerilmesi} = \sigma_{\text{çekme}} = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (4.1)$$



Şekil 4.24. JG kolon karot numune yarmada çekme deney işlemleri

Formülde; P: Kırırma neden olan basınç yükü (N), L: Silindir karot numunesinin boyu (mm), D: Silindir karot numunesinin çapı (mm)’ na karşılık gelir.

16 adet JG kolonundan alınan karot örnekleri üzerinde yapılan serbest basınç ve yarmada çekme deneylerinden elde edilen dayanım değerleri araştırma sonuçları bölümünde verilmiştir. Her deney için minimum 2 düzgün numune alınmasına çaba gösterilmiştir. Alınan karot numuneleri alındıktan sonra JG kolon dayanımını en iyi temsil edecek numuneler seçilerek, deneysel karşılaştırmalar yapılmıştır. Numune boyları kesilme aşamasında eşit olmadığı için standartlara göre düzeltme yapılmıştır. ASTM C 42’ye göre farklı boy/çap oranlarındaki karot numuneleri için düzeltme katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.14’de verilmiştir. Bağıntıda, $\lambda = l/d$ boyun çapa oranı ile hesaplanır. Karşılık gelen değer düzeltme katsayısını verir. BS 1881’de düzeltme katsayısı $K_\lambda = 2/(1,5+1/\lambda)$ formülüyle hesaplanır.

Çizelge 4.14. Numune boy/çap düzeltme katsayısı

Boy / Çap (λ)	Düzeltilme Katsayısı
2.00	1
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Çizelge 4.15. Numunelerin JG kolon dayanım sonuçları

Ön Deneyde Karşılığı	28 günlük	56 günlük	JG numune düzeltme SBD	SD	UK	YFC	HA
1	1	14.98	19.18	22.09	0	0	0
2	10	21.44	21.65	25.05	10	0	0
3	4	16.21	19.67	20.72	0	10	0
4	28	14.74	20.39	19.98	0	0	20
5	2	15.34	20.84	15.49	0	0	0
6	11	23.40	22.62	25.28	10	0	0
7	14	21.74	22.07	26.72	10	10	0
8	23	22.22	23.88	19.38	20	10	0
9	20	23.10	25.26	21.23	20	0	0
10	26	19.88	21.29	19.21	20	20	0
11	47	24.06	23.58	19.07	20	0	20
12	48	23.25	23.49	24.23	20	0	20
13	50	22.44	21.44	17.42	20	10	20
14	51	21.41	22.28	19.23	20	10	20
15	65	19.52	20.57	10.79	10	0	40
16	74	16.66	18.74	10.13	20	0	40

Ön Deneyde Karşılığı	28 günlük	56 günlük	JG numune düzeltme YÇD	SD	UK	YFC	HA
1	1	2.64	2.04	2.00	0	0	0
2	10	3.00	2.03	2.25	10	0	0
3	4	3.06	1.64	1.86	0	10	0
4	28	2.23	1.78	1.98	0	0	20
5	2	2.47	2.39	2.20	0	0	0
6	11	2.68	2.17	2.55	10	0	0
7	14	3.82	2.47	3.00	10	10	0
8	23	3.20	2.43	2.22	20	10	0
9	20	3.59	2.35	2.24	20	0	0
10	26	3.76	2.41	3.02	20	20	0
11	47	3.53	2.13	2.01	20	0	20
12	48	3.15	1.76	2.15	20	0	20
13	50	3.49	2.20	1.78	20	10	20
14	51	3.32	2.59	2.31	20	10	20
15	65	2.52	2.19	1.50	10	0	40
16	74	2.82	1.84	1.55	20	0	40

4.2.8. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

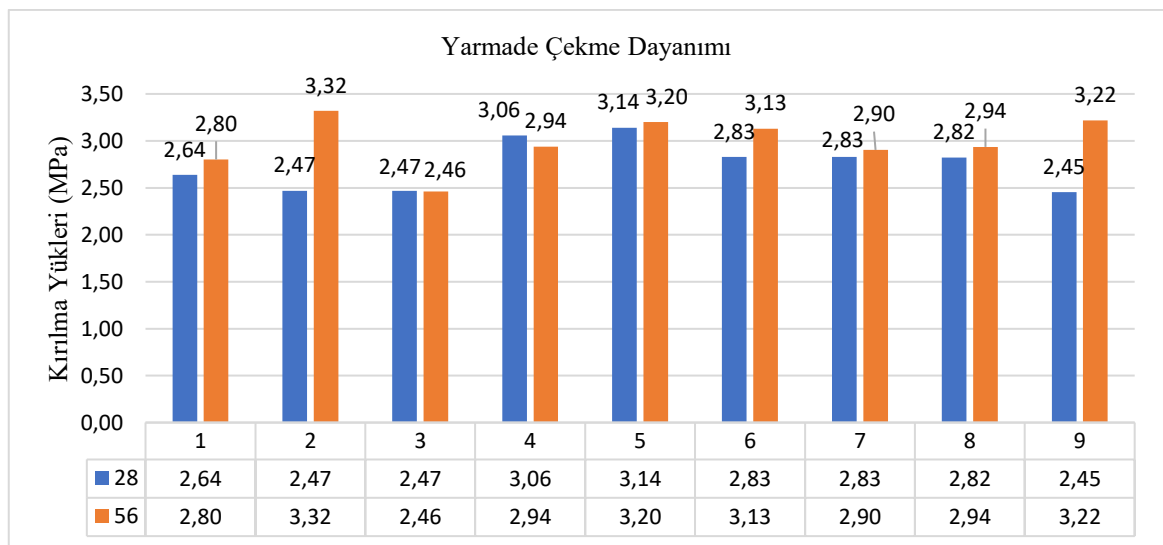
JG kolonlarından alınan karot numuneler üzerinde Konya Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan tek eksenli basınç deney düzeneğinde, yarmada çekme numuneleri kırılmıştır (Şekil 4.24). Düzenek, yukarı yönlü 0.4 mm/dk. Hızla hareket ederek özel yarmada çekme aparatıyla tüm yüzeye eşit basınç uygulamaktadır.

81 seviye çimento ve mineral katkı malzemesi kullanılarak imal edilen numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme (brezilyan) deneyinden elde edilen çap-boy değerleri, dayanım ve kırılma yükü değerleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.25. - 4.33). Serbest basınç deneyinde olduğu gibi yarmada çekme deneyleri için JG kolonlarından numuneler

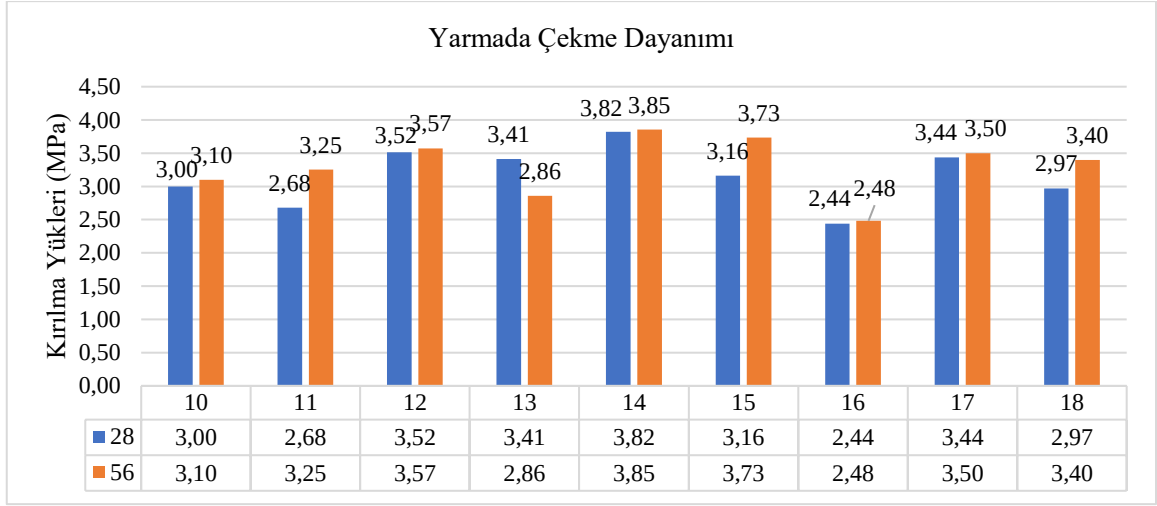
alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan bölüm 3'te verilen bağıntı 3.2' ye göre çekme dayanımları hesaplanarak değerler oluşturulmuştur (Çizelge 4.15).

Şekil 4.25-4.33'deki yarmada çekme dayanım sonuçları incelediği zaman aynı JG kolondan alınan karot numunelerinde, çekme dayanımının farklılık gösterdiği görülmüştür ve ortalama değerler alınmıştır. Sonuç olarak karot yüzeyinin düzgün olmamasından ve makine hassasiyetinin yüksek olmamasından dolayı sonuçlar anlamsız yakın olacak, yorumlama işlemleri düzgün olamayacaktır.

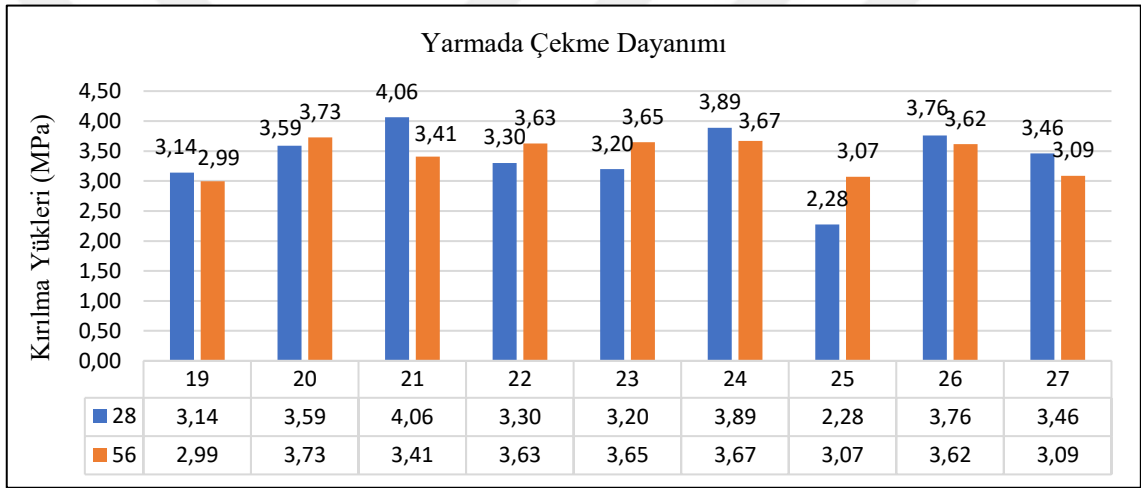
- Mineral katkı içeren JG kolonlarının ve numunelerin yarmada çekme dayanımının katkı içermeyen JG kolonların ve numunelerin çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu da gözlemlenmiştir.
- SD içeren numunelerin serbest basınç deneylerinde olduğu gibi maksimum yarmada çekme dayanım değerine sahip olduğu görülmektedir. İkame oranı %30'larda çekme dayanımının genel olarak maksimum %50'den sonra azaldığı izlenmiştir.
- UK ve YFC'nin uzun vadede basınç dayanımının arttırdığı bilinmektedir. Bu durum çekme dayanımına da yansımıştır. Uzun vadede UK ve YFC'nin çekme dayanımını arttırdığı görülmüştür.
- HA etkisi serbest basınçta olduğu gibi çekme dayanımında etkili rol oynadığı görülmüştür. HA içeren numunelerin çekme dayanımı içermeyen seviyelere göre yüksektir.



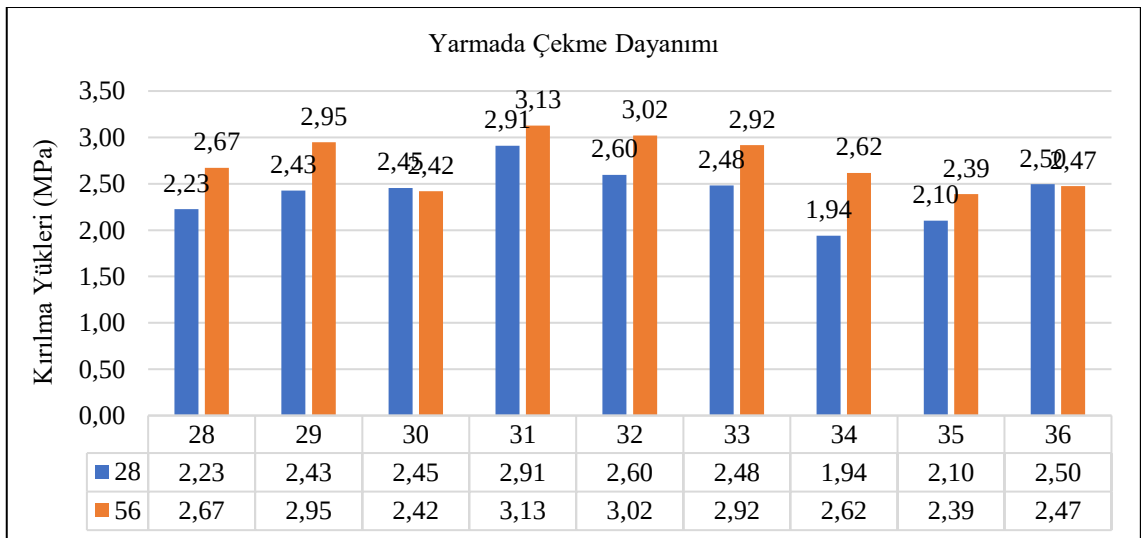
Şekil 4.25. 1-9. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



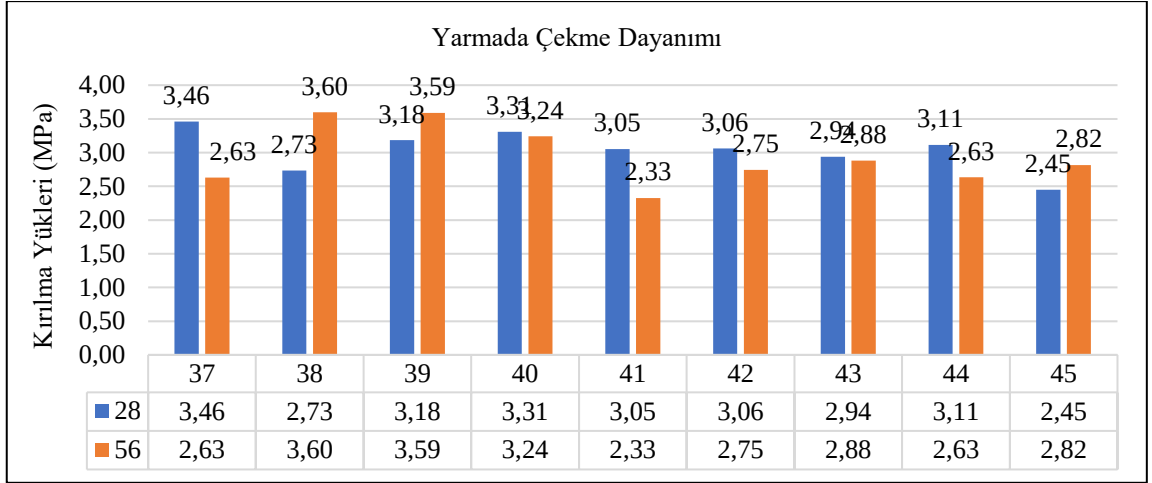
Şekil 4.26. 10-18. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



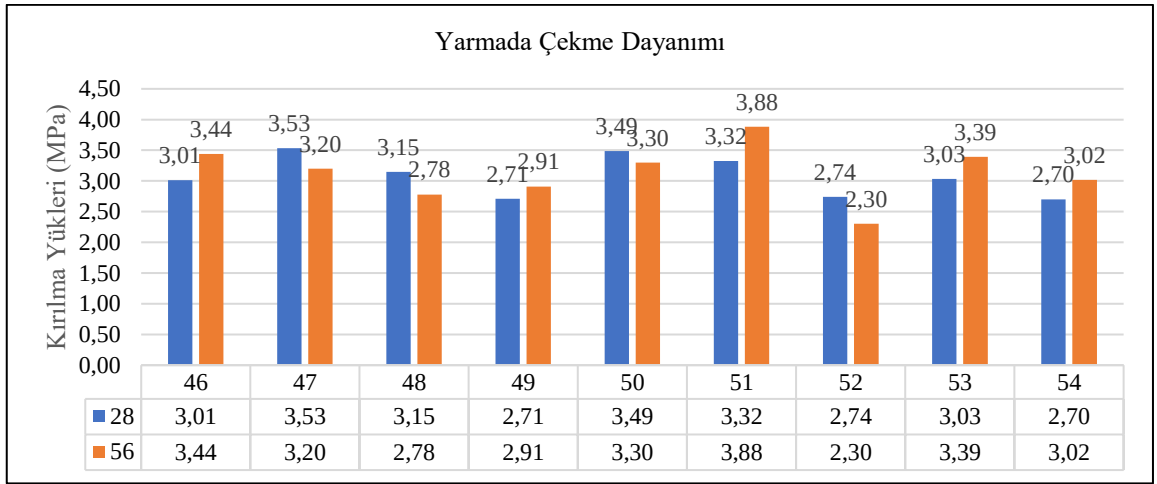
Şekil 4.27. 19-27. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



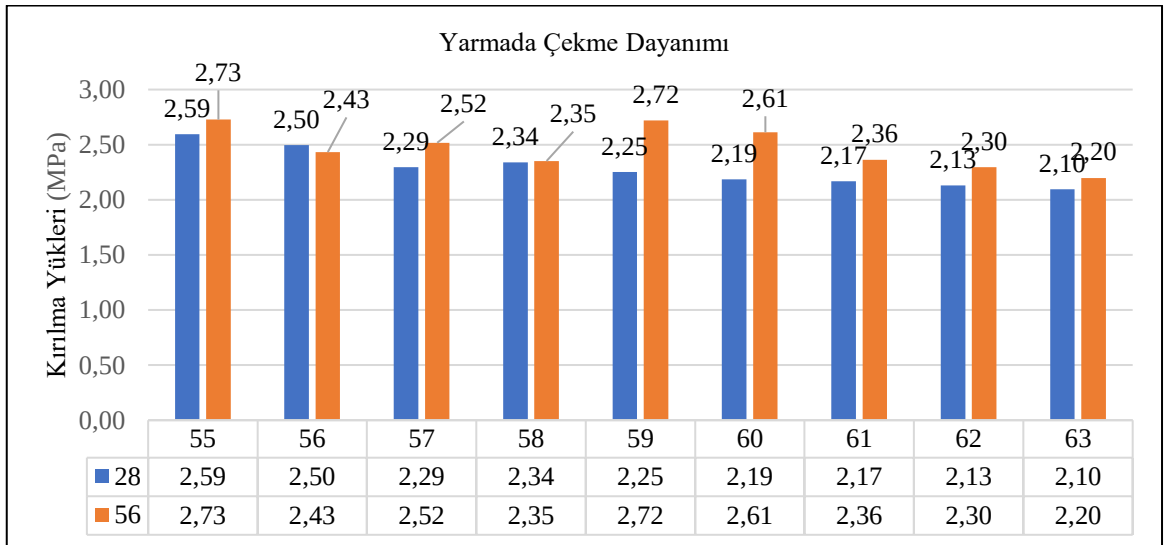
Şekil 4.28. 28-36. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



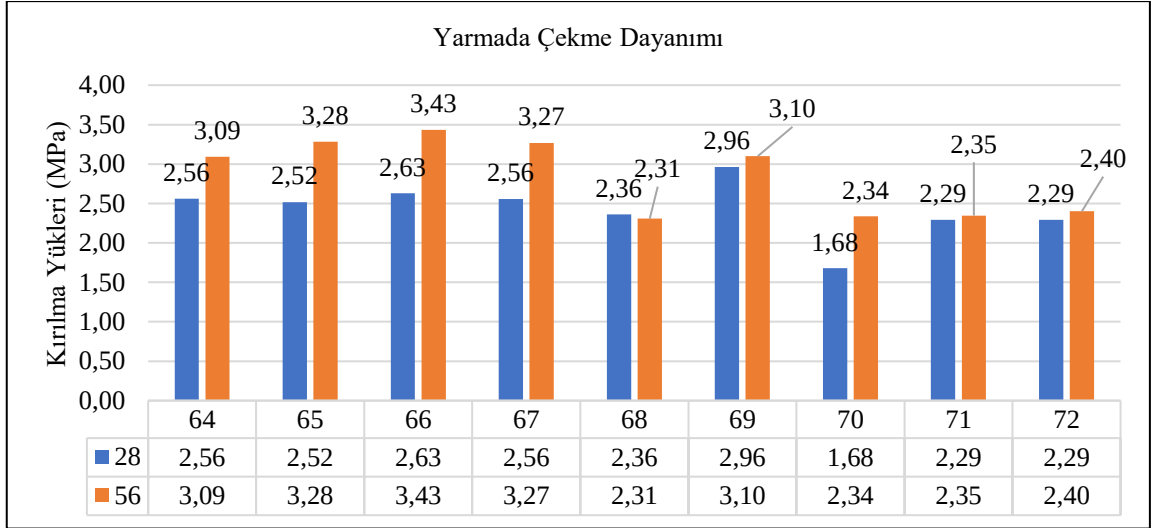
Şekil 4.29. 37-45. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



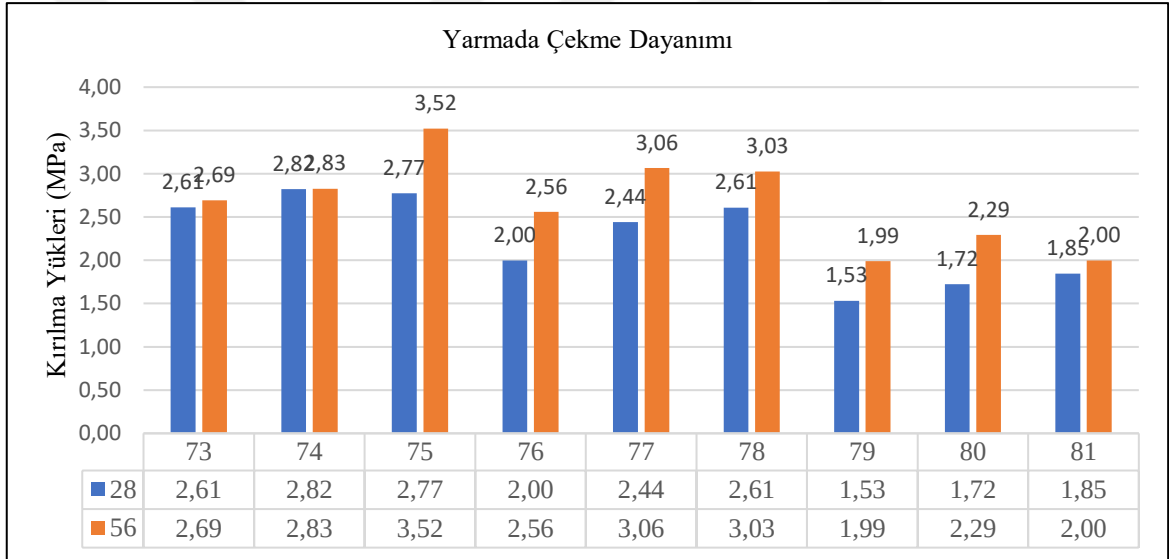
Şekil 4.30. 46-54. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



Şekil 4.31. 55-63. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



Şekil 4.32. 64-72. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları



Şekil 4.33. 73-81. seviye arası yarmada çekme dayanım sonuçları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında çimento (CEM-I 42.5R) ile mineral katkı malzemeleri (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve hiper akışkanlaştırıcı) JG yöntemi ile iyi derecelenmiş kumlu zeminde gösterdiği mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çimento ve diğer katkı malzemeleri bağlayıcı madde olarak kabul edilmektedir. Bağlayıcı malzemelerin iyileştirme performanslarını incelemek amacıyla bazı deneyler yapılmıştır.

Farklı su/bağlayıcı aralığında enjeksiyonlarda 0.8 S/B oranının kullanılmasına karar verilmiş, ön değerlendirme için 648 adet küçük numuneler hazırlanmış ve deneyler yapılarak uygun JG kolonu yapımı için 648 numune arasından değerler seçilmiştir.

Ön deneyler için enjeksiyonların tasarımına karar verilmesinin akabinde numunelerin hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Kumlu zeminin sıklığı $D_r = \%35$ alınarak küçük ve büyük ölçekli numunelerde kolonların imal edilmiştir. Bu sıklık değeri, laboratuvar ortamında JG kolonların imalatını kolaylaştırmak amacıyla seçilmiştir.

Enjeksiyonların kararlılığı açısından deney sonuçları değerlendirildiğinde en kararlı mineral katkılı silis dumanlı enjeksiyonların olduğu görülmüştür. UK %40'a yaklaşan katkılı içeriklerde kararlı kalabilirken YFC'nin çoğu enjeksiyon karışımı çimentoyla birleşince serbest kalan suyun yüzeye çıkarması etkisinden dolayı kararlı özellik göstermemiştir.

Priz süreleri incelendiğinde en erken priz alan ince tane yüzeyli olmasından dolayı silis dumanı ve silis dumanlı katkılar, ardından sırasıyla uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren katkılı enjeksiyonların olduğu görülmüştür.

Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç ve yarmada çekme dayanım testleri uygulanmıştır. Elde hazırlanan küçük numunelerde 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç ve yarmada çekme dayanım testleri uygulanmıştır.

28 günlük dayanım sonuçlarına bakıldığında SD içeren numuneler genellikle en yüksek dayanımı vermiştir. Ortalama serbest basınç dayanımları, silis dumanlı 17.12 Mpa, uçucu küllü 15.87 Mpa, yüksek fırın cürufu 15.28 MPa, hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile hazırlanan numunelerde 16.87 MPa olarak belirlenmiştir.

28 günlük dayanımlarda katkı malzemelerin spesifik yüzeyi etkili olmuştur. İçerisinde çimentoyla etkileşime giren YFC katkılı numuneler nispeten düşük sonuçlar vermişlerdir. UK etkileşime geç girdiği bilindiğinden düşük sonuçlar vermiştir. SD ince taneli katkı malzemesi ise yüksek özgül yüzey alanı sayesinde daha hızlı hidratasyon ve etkileşim sağlamış ve diğerlerine göre erken dayanım kazandırmıştır.

28 günlük kür süresinin sonunda en büyük dayanımı tekli karışımlarda SD'ye ait 10 nolu deneyde %10 SD içeren numunelerden ortalama 21.44 MPa olarak elde edilirken ikili karışımlarda çimentosunun SD'ye ait 11 nolu deneyde %10 SD %1 HA içeren numunelerinin ortalama dayanımı 23.52 MPa iken üçlü karışımlarda %20 UK %20 SD %2 HA içeren 27 nolu deneyde numunelerinin ortalama dayanımı 23.25 MPa olarak belirlenmiştir. YFC içeren 48 nolu deneyde numunelere ait maksimum dayanım 23.25 MPa, olarak belirlenmiştir. Sonuçlar SD'nin ince taneli spesifik yüzeyi ve çimento ile anahtar-kilit ilişkisi oluşturan C-S-H jelinin etkili olduğunu göstermiştir. YFC'nin düşük reaktifliği etkili olurken UK uzun vadede diğer karışımlara göre daha yüksek sonuçlar vermiştir.

Uzun dönem dayanım sonuçlarında katkı malzemelerinden beklenen etkiyi geç dönemde göstermesi dolayı sıralama değişmiştir. 56 günlük kür süresinin sonunda 3lü karışımlardaki numuneler en yüksek sonuçları vermiştir. 24 nolu deneyde %20 SD %10 UK %2 HA içeren numunelerden elde edilen ortalama dayanım değeri 25.83 MPa iken 15 nolu deneyde %10 SD %10 UK %2 HA içeren numunelerden elde edilen ortalama dayanım değeri 25.68 MPa olmuştur. %20 SD %2 HA içeren ikili karışım 21 nolu numunede maksimum dayanımı 25.29 Mpa, %20 YFC %10 SD %10 UK %2 HA 24.60 MPa dayanım sağlarken %20 YFC %10 SD %20 UK %2 HA maksimum dayanımı 23.40 MPa elde edilmiştir. Özetle küçük numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerine bakıldığında; üçlü katkı içeren deneyler kısa vadede dezavantajlı olurken uzun vadede 3lü ve 4lü numunelere göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. YFC ve UK katkısı uzun vadede SD kadar etkili olmuştur.

Jet grout kolonlarının 56 günlük basınç dayanım sonuçlarına bakıldığında küçük numunelerden elde edilen sonuçlara göre değişikliklerin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dayanım sonuçları genellikle elde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlara göre tekli ve ikili karışımlarda yüksek, ikili ve üçlü karışımlarda az da olsa daha düşük olduğu görülmüştür.

Küçük numuneler homojen bir şekilde hazırlandığı için sonuçlarda çimentonun ve katkı malzemelerinin karakteristik özellikleri ve S/B oranı başlıca etken olmuştur. Piyasa uygulamasındaki JG sisteminin birebir minyatür kopyası olan sistem kullanılarak üretilen JG kolonlarında ise çimento enjeksiyonlarının ve katkı malzemeleriyle gösterdiği reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan enjeksiyonun reolojik özellikleri oldukça etkili olduğu görülmüştür. Reolojik özellikler çimento ve katkılı enjeksiyonlarının zemine etki edebilme kabiliyetini ve enjeksiyon nozullarından çıkarak kumla homojen karışımını etkilemiştir. S/B oranı 0.8 olan enjeksiyonlar kullanılarak hazırlanan JG kolonlarının serbest basınç dayanımları kıyaslandığında 28 ve 56 günlük numunelerde görülen SD etkisi, UK ve YFC ile oluşturulan JG kolon dayanımlarına göre belirgin şekilde yüksek olduğu görülmektedir. Çimentoların karakteristik özelliklerinin kıyaslanması amacıyla yapılan küçük ölçekli deney sonuçlarında da ikili olan karışımlar ve SD içerenler uzun vadede en yüksek dayanımı veren enjeksiyon tipi olmuştur. Ancak dayanımlar arası fark bu denli bariz olmamıştır.

Puzolanik katkı olan UK'nın model deneylerde YFC kadar etkili olamamasının en temel nedenlerinden biri enjeksiyonların reolojik özellikleridir. Ayrıca üçlü karışımlarda UK'nın S/B oranı 0.8 için belirlenen viskozitesi incelendiğinde YFC içeren enjeksiyonlara göre çok daha akışkan özellikte olduğu deneyler esnasında bariz görülmüştür. Karışımlarda UK içeren enjeksiyonlar bu özelliği sayesinde üçlü katkı içeren YFC'li enjeksiyonlara göre zemine homojen karışarak zemin numunelerinde daha iyi sonuçlar alındığı belirlenmiştir.

Silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak oluşturulan numunelerin serbest basınç ve yarmada çekme dayanımlarının esas alınan katkısız normal Portland çimentolu numuneye göre daha yüksek olduğu, yüksek fırın cürufu içerenlerde daha düşük olduğu görülmüştür. Daha uzun süreler ve geniş kapsamlarda bu değerler değişkenlik gösterebileceği için araştırılması gerekir.

Silis dumanı, çok ince olması ve yüksek silis içeriğinden dolayı genel olarak oldukça yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Silis dumanının inceliği diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha iyi görülmektedir. Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli görevi, C_2S ve C_3S hidratasyonları sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ 'i bağlamak ve yeni bir CSH jeli meydana getirmektir. Bu jel çimento hamurunda normal olarak oluşan CSH jellerinden biraz farklıdır, yoğunluğu daha azdır ancak geçirimsizliği daha fazladır. Böylece silis dumanı taneleri, büyük kristaller yerine çok sayıda daha küçük ve daha

sağlam $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin oluşmasına yardımcı olmaktadır. Küçük kürecikler halindeki silis dumanı tanecikleri, uygun oranda akışkanlaştırıcı katkı kullanılması halinde, çimento taneleri arasındaki boşluklarda suyun yerini alarak daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirebilmektedirler. Portland çimentosunun (NPC) yüzey alanından kat kat büyük olduğu için, silis dumanı kullanılarak imal edilen numunelerin dayanımlarından yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çok sayıda CSH jeli içindeki CH ve etrenjit yapısında iyileştirmektedir.

Küçük numuneler hazırlanırken YFC ve HA karışımlar da numunelerde çökmelerin olduğu görülmüştür. YFC ve HA içeren numunelerin geç priz aldığı (48 saatte) gözlemlenmiştir. Bunun nedeni YFC'nin UK ve SD'na göre daha iri tane boyutuna sahip olması ve içerdiği SiO_2 oranından dolayı tam istenen özellikte puzolanik davranış sağlamamasıdır. Buna rağmen ağırlıkça %20 katkılı YFC'nin 28 gündeki basınç dayanımı katkısız PC'nin %98'ine, %40 katkılı YFC'nin 28 gündeki basınç dayanımı katkısız PC'nin %84'üne ulaşmıştır. Bu durum karışımda askıda bulunan katı taneler, sudaki elektriksel yükleri sebebiyle bir araya gelemediği için bu elektriksel ortamı bozmak ve tanecikleri birbirine yaklaştırarak suda çökebilir kütlelere getirmek amaçlı pıhtılaşmanın (çökkelmenin) iyi olmasından kaynaklanmasıyla açıklanabilir.

NPC'li numunelere nazaran YFC'li numunelerde, YFC katkısıyla açığa çıkan CH miktarının azalmasıyla erken dayanım düştüğü gözlemlenmiştir. Puzolanik özellikteki YFC daha sonraki yaşlarda kalan CH'ı zamanla kendine bağlayarak C-S-H jeline dönüştüreceği, gözenekleri kapatacağı ve hidrasyon ısını azaltacağı literatürdeki araştırmalar tarafından bildirilmiştir. Bu nedenle ilerleyen yaşlarda sülfat direncinin artacağı ayrıca dayanımda artacağı öngörülmektedir.

Yarmada çekme dayanım değerleri incelendiğinde 28 günlük dayanımlarında serbest basınç deneylerinde olduğu gibi yüksek katkılı çimentolar ve mineral katkılar etkili olmadığı görülmüştür. 56 günlük çekme dayanımlarına bakıldığında SD'li ve ikili karışım numunelerinden elde edilen çekme dayanımları diğer mineral katkılara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle elde hazırlanan küçük numunelerin çekme dayanımları incelendiğinde SD'nin tekli karışımlarının en etkili olduğu görülmüştür. Bunu oluşan CSH jelleriyle açıklamak mümkündür.

Katkı malzemeli numuneler, katkısız NPC'ye göre daha sünek davranış, %1 HA içeren karışımlar, diğer karışımlara göre daha fazla süneklik göstermiştir. Bunun sebebi

HA'nın su/bağlayıcı oranındaki değişimine katkısına bağlı bağlayıcılık artışına neden olduğu, %2 HA içeren karışımlar, su ihtiyacını yüksek oranda azalttığı için numune içindeki boşluk oranı arttırdığı ve buna bağlı mekanik özelliklerini zayıflattığı düşünülmektedir.

Enjeksiyon karışımında YFC'nin daha etkili olduğu, HA'nın %0, SD'de HA'nın %1, UK'de HA'nın %2 basınç değerlerinin maksimum olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin YFC'nin harcın içindeki serbest kalan suyun yüzeye çıkarmasına ve su/bağlayıcı oranını artırmasına, silis dumanının %1'den sonraki HA değerinde suya doyması ve boşluk oranının arttırmasına, uçucu külün su ihtiyacının daha fazla olmasıyla ve su artışıyla beraber daha fazla puzolanik reaksiyona ulaştığı şeklinde düşünülmektedir.

11, 20, 23, 27, 47, 48 ve 50 no'lu karışımlarda maksimum değerlerin elde edildiği görülmüştür. Burada SD'nin erken dönemde prize katkısından dolayı dayanımı kısa vadede arttırdığı gözlemlenmiştir.

UK'in kullanıldığı durumlarda UK'nin belirli bir su/bağlayıcı oranın altında kullanılmaması gerekmektedir. YFC'nin HA ile birlikte çok fazla kullanılmaması gerektiği önerilmektedir.

Çimento içerisinde bir miktar SiO_2 içermektedir. Fazla miktardaki SiO_2 ve diğer katkı bileşenleri dayanıma etki etmemekle kalmayıp düşük dayanıma neden olmaktadır. Özetle katkı malzemeleri yardımcı eleman, ana hammadde çimentodur.

5.2. Öneriler

Zemin iyileştirmede kullanılacak çimento tipinin seçilmesinin yanı sıra katkı malzemesinin seçimi karakteristik özelliklerinin incelenmesi önemlidir. Yalnızca çimentonun ve katkı malzemelerinin tipik özelliklerini karşılaştırma yaparak tercih yapılması pek de kabul edilmeyecek bir yaklaşım olarak görülmelidir. İyileştirme yapılacak zeminin fiziksel özellikleri de dikkate alınmalı ve buna göre tasarım yapılarak katkı malzemeleri değerlendirilmelidir.

Aynı su/bağlayıcı oranında farklı çimento enjeksiyon harçları için oluşturulan JG kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılacak deneylerde, katkı malzemeleri oranı %50'yi geçtiği zaman bağlayıcı madde olan çimento görevini yerine getirememektedir. Bunun sebebi olarak katkı malzemeleriyle çimentonun C-S-H bağlarını oluşturmamasıdır. C-S-H bağını çimentonun içerisindeki CaO ile katkı malzemelerinde bulunan SiO_2 ve sudan gelen H_2 oluşturur. C-S-H bağlarının

oluşmamasından dolayı gerekli ve istenen özellikteki JG kolonlar oluşmamaktadır. Bağlayıcı madde karışım oranının %50'yi geçmemesi istenilen özellikteki JG kolonun oluşması açısından faydalı görülmektedir.

İyileştirilecek zeminin su içeriği, sıklık durumu (Dr) ve hatta zeminin fizyolojik yapısı bağlayıcı madde seçiminin tercihinde etkili olabilir. Bu özellikler dikkate alınarak bağlayıcı madde ve katkı maddesi tercih edilmelidir. Zemin profil yapısına uygun puzolanik katkının tercihi ve kullanımının pek çok fayda ve katkıları olması beklenir. Puzolanik katkılar çizelgelerde görüldüğü üzere dayanıma katkı artışı sağlamıştır ve atık malzeme olduğu için iyileştirme maliyetlerine büyük ölçüde ekonomik katkı sağlamaktadır.

Su/bağlayıcı oranı ($S/B=0.8$) bağlayıcı maddenin fazla su istediği durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu durum JG kolonun, spiralli, helezonik ya da hiç oluşmamasına neden olmaktadır. Farklı su/bağlayıcı oranı kullanılarak (1.0, 1.2, 1.5) kullanılarak çimento enjeksiyon harçları ve şerbetleri oluşturulmalıdır. İmalata başlamadan reolojik (Marsh Hunisi Sedimentasyon ve Vicat İğnesi) deneyler ve ön araştırma deneyleri ile desteklenerek JG kolonların imal edilmesi tavsiye olunur.

Enjeksiyonun reolojik özellikleri sonuçlarda önemli etkilere sahiptir. Genel olarak uygulamalarda reolojik özelliklerin istenen seviyeye gelmesi için S/B oranı değiştirilmektedir. Çoğunlukla jet enjeksiyonlarında hemen hemen her tür zemin için S/B oranı 0.8-1.0 olarak tercih edilmektedir. S/B oranının artırılması yerine reolojik özellikleri olumlu etkileyen mineral katkılar kullanılması JG kolondan daha fazla kullanma kapasitesi imkânı sağlayacaktır. Reolojik özelliklerin iyileşmesi artan enjeksiyon miktarını azaltmaya gidecek, JG kolon çapını artıracak ve enjeksiyonun zeminde daha homojen dağılımını ve JG kolonun dayanımının artışı sağlayacaktır.

Farklı tipteki çimentolar (daha ince taneli çimento veya katkısız diğer özellikler) ve endüstriyel atıklar (çimento ile birlikte bağlayıcılık yapabilen) ile genişletilecek deneysel çalışmalardan varılacak sonuçların, bu tezdeki sonuçlar ile birlikte değerlendirilmesi; ileride yapılacak tez ve makale çalışmalarının hazırlanmasında fayda sağlayacaktır. Özellikle uçucu kül UK ve silis dumanı SD katkılı enjeksiyonların, farklı katkılar ile karşılaştırılması çalışmasının genişletilmesi uygun olacaktır.

Çeşitli puzolanik katkıların farklı zeminlerle etkileşimleri ile ilgili çalışmaların yapılması ve zemin türüne göre puzolanik mineral katkıların araştırılması gerekir. Bu

çalışmalarla çimentoya alternatif mineral katkı malzemelerin kullanımı artırılmalıdır. Çimento üretimi doğaya en çok zarar veren ve kirlenmeye neden olan endüstri üretimlerinden birisidir. Bu endüstriyel atıkların katkı olarak kullanımı sağlatılacağından hem doğaya hem de milli ekonomiye faydası kaçınılmaz olacaktır.

Numuneler elde hazırlandığı ve küçük ölçekli olduğundan sonuçların doğruluğunun geçerli olması için saha ve laboratuvar ortamında daha kapsamlı JG ve benzeri deneyleri ile incelenmesi, ayrıca UK gibi geç dayanım kazanan malzemelerin daha uzun vadeli dayanımlarının da incelenmesi faydalı olacağı uygun görülmüştür.

Numuneler elde hazırlanırken karışabilen karışımlar JG kolon imalatı esnasında düzgün karışma sağlamayabilmektedir. Bu yüzden karışımlardaki bazı sonuçlar istenilen türde etkileşim olmadığından seviyeleri veya türleri değiştirilmesi uygun olacaktır.

Teşekkür

Bu yüksek lisans tez çalışması, “Mineral Katkı Malzemeleri ile Çimento Karışımların Jet Grout Kolonlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından tez projesi no: 191004037 ile desteklenmiştir. Sağlamış olduğu katkılardan dolayı, Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü’ne teşekkür ederiz. Yüksek Fırın Cürufunun temin edilmesinde yardımcı olan ADANA Çimento A.Ş.’ ye ve Hiper Akışkanlaştırıcı tedarikinde yardımcı olan Sancak Hazır Beton A.Ş. ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Akan R., Keskin S. N., 2014, “Jet Grout Yönteminin Zemin İyileştirmesine Katkısının ve Bu Yöntemde Kullanılan Parametrelerin Etkilerinin İrdelenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 22-26, Isparta.
- Alireza G., & Mamadou F., 2015, “Coupled Behavior of Cemented Paste Backfill At Early Ages”, *Geotechnical And Geological Engineering*.
- ASTM-C42, Standart Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete: ASTM, Pennsylvania, 1-7, 2018
- ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM, Pennsylvania, 1-8, 2018
- ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM, Pennsylvania, 1-5, 2004
- ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM, Pennsylvania, 1-5, 2015
- ASTM C939, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), ASTM, Pennsylvania, 1-3, 2016
- ASTM C940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, ASTM, Pennsylvania, 1-3, 2016
- ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania, 1-15, 2010
- ASTM D1143, Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, ASTM, Pennsylvania, 1-15, 2007
- ASTM D2166, Standart Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, Pennsylvania, 1-7,2016
- ASTM D4253, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM, Pennsylvania, 1-14,2016
- ASTM D4254, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight Of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM, Pennsylvania, 1-8, 2006
- ASTM D6913-04, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM, Pennsylvania, 1-38, 2009
- Avcı, E., 2009, “Farklı rölatif sıklık ve tane dağılımına sahip kum zeminlerde ULTRAFİN 12 enjeksiyonu permeasyon yetisi”, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- Aytekin, S., Güneyli, H., ve Yüksel, Ö., "Uçucu küllerin killi zeminler üzerindeki etkileri", Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, no.2, ss.207-218. 2008.
- Baoguo Ma, Meng Qi, Jun Peng, Zongjin Li. 1999, "The compositions, surface texture, absorption, and binding properties of fly ash in China", *Environment International*.
- Battal H., Demiröz A., 2018, "Uçucu kül ve mikro taneli çimento karışımlarının Jet Grout kolonlarının dayanımına etkisinin incelenmesi", *Selçuk-Teknik Dergisi*, Cilt 17, Sayı:3-2018.
- Burke, G. K. & Yoshida, H.; Editor: Kirsch, K. and Bell, A. 2013, "Jet Grouting", *Ground Improvement, 3rd, CRC Press: Taylor & Francis Group*, pp: 207 – 258.
- Carneirg, F. L. L. B. ve Barcellas, A., 1953, Concrete Tensile Strenght. RİLEM, Bulletin. 13: 97-123.
- Croce, P., Flora, A. and Modoni, G. 2014, "Jet Grouting Technology, Design and Control", *CRC Press: Taylor & Francis Group*.
- Çınar, M., 2014, "Zemin iyileştirilmesinde Jet Grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları", Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, s. 5-8, 2014.
- Demiral, Ö. T., 2017, Sülfatlı Su İçerikli Kum Zeminlerde Portland Çimentosu ve Sülfata Dayanıklı Çimento Kullanılarak Oluşturulan Jet- Grout Kolonlarının Taşıma Gücüne Sülfatın Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Doğu, O. 2005, "Jet Grouting Tekniği ile Zemin Islahı", *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., İstanbul*.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., ve Uçar, A., 2010, "Uçucu kül katkılı çimento hidratasyonuna elektrokinetik özelliklerin etkisi", *Gazi Üniversitesi*.
- Durgunoğlu, T. H., 2014, "Jet grout kolonların zemin ıslahında kullanımı ve kalite kontrol yöntemleri – bir vaka analizi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On beşinci Ulusal Kongresi 16- 17 Ekim 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
- Duval, R., & Kadri, E.H., 1998, "Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 533-547, 1998.
- Erdoğan, T. Y., 2003, *Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş.* Ankara, 741s.
- Erkan, İ. H., 2013, "Jet Grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması", *Doktora Tezi, S.Ü. Konya*.
- Erol, A. O. ve Çekinmez, Z., 2019, "Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri", *Yüksel Proje Yayınları No: 14-01*, Ankara.

- Fidan, B., 2014, “İnce taneli çimentonun Jet Grout kolonların performansı üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, S.Ü., Konya*.
- Görhan, G., Kahraman E., Başpınar M. S., Demir, İ., 2009, “Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 5, No: 2, (33-42)*
- Gündeşli U., 2008, “Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması”, *Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*.
- Hassan, K. E., Cabrera, J. G., Bajracharya, Y. M., 1997. “The Influence of Fly Ash Content and Curing Temperature on the Properties of High-Performance Concrete”. *Proceedings of the Fifth International Conference, Vol. 1. Bahrain, pp. 345-65*.
- Kadiroğlu İ., 2019, “Basınç Dayanımı Tayini için Taze ve Sertleşmiş Betondan (KAROT) Numune Alma ve Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi” *İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Semineri*.
- 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*.
- Kaymakçı, S., 2014, “Jet Grout kolona soketli fore kazığının çalışma performansının araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., İstanbul*.
- Keller Holding GmbH-Germany, 2016, *Katalog*.
- Khayat, K. H., et al., 1997, “Use of Blended Silica Fume Cement in Commercial Concrete Mixtures”. *ACI Material Journal, 94(3), pp. 183-193*
- Kimpritis, T., 2013, “The Control of Column Diameter and Strength in Jet Grouting Processes and the Influence of Ground Conditions”, *Master Thesis, Imperial College, London*.
- Kutzner, C., 1996, “Grouting of Rock and Soil”, *Balkema Publishers, Netherlands, 10-12, 190-195. (English)*
- Özarslan, M., 2012, “Katkılı ince taneli çimento şerbetinin ve enjekte edildiği ince ve orta taneli kumların bazı mühendislik özelliklerinin belirlenmesi”, *Doktora Tezi, S.Ü., Konya*.
- Özdemir, E., 2006, “PÇ ve Mineral Katkı maddelerinin ikili, üçlü ve dördü kombinasyonlarını içeren harç numunelerinin bazı özelliklerinin incelenmesi”, *Doktora Tezi, Ç.Ü. Adana*.
- Poon, C. S., Lam, Wong, Y. L., 2000. “A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volumes of Low Calcium Fly Ash”. *Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 447-455*
- Sarıbıyık M., 2013, “beton katkı maddeleri ders notları”, *Sakarya Üniversitesi ders notları 2013, Sakarya*.

- Shibazaki, M. 2003, "State of Practice in Jet Grouting", *Proc.3rd. International Conference. of Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE GSP 120*, syf. 198 – 217.
- Sprung, S., Siebel, E., 1991, "Assessment of the suitability of limestone for producing Portland limestone cement (PKZ)", *Zement-Kalk-Gips 44(1)*, 1-11.
- Şenkaya, A., 2019, "Farklı Çimento Tipleriyle Oluşturulmuş Jet Grout Kolonların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ultra Ses Yöntemiyle İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, KTÜN, Konya*.
- Tan, Özcan ve Zaimoğlu, Ahmet Şahin. 2004, "Çimento enjeksiyonlarında kullanılan katkı malzemelerinin reolojik özelliklere etkilerinin araştırılması", *TUBITAK*.
- Taşdemir M.A., ACE 2002 Sempozyumu / *İTÜ İnşaat Fakültesi*
- Tekin, E. ve Mollamahmutoğlu, M., 2010, "Çok ince taneli çimento (Rheocem 900) enjeksiyonu ile farklı gradasyona sahip kumların enjekte edilebilirliği", *Gazi Üniversitesi*.
- Temiz, H., Yeğınobalı, A., 1995. "Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Çimento Hamur ve Harçlarının Bazı Özellikleri", *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara*, s. 213-225
- Thomas, M. D. A. et al, 1999. "Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete". *Cement and Concrete Research, Vol. 29*, pp. 1207-1214.
- Thomas, M. D. A. et al., 1999, "Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete", *Cement and Concrete Research, Vol. 29*, pp. 1207-1214.
- Tokay M., 2013, "Betonda UK, YFC ve SD' nin rolü: mevcut bilgi birikimi, Beton Tasarımında Silis Dumanı Kullanımı", *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ*
- Tokay M., Erdoğan K., 2009, "Cürufur ve Cürufu Çimentolar" *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 8. Baskı, Temmuz 2009, Ankara*
- Topçu, İlker Bekir ve Canbaz, Mehmet. 2008, "Silis dumanının betonda mekanik çatlak oluşumlarına etkisi", *Osmangazi Üniversitesi*.
- Topçu, İlker, Bekir and Boğa, Ahmet, Raif. 2008, "Betonarmede donatı ve beton arasındaki aderansa korozyonun etkisi", *Osmangazi Üniversitesi*.
- Tunçdemir, F., 2004, İnşaat Yüksek Mühendisi, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, *TMH- Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 430- 2004/2*
- Uyan, M., Yıldırım, H., 1991, "Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Süper Akışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği", *TMMOB İnşaat*

Mühendisleri Odası, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, 27-30 Mayıs 1991.

Yeğınobalı, A. 2009, “Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı” *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, 6. Baskı, Temmuz 2009, Ankara*

Yeğınobalı, A., 2009, “Çimento “Yeni bir çağın malzemesi” *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, 2. Baskı, 2009 Ankara*

Yeğınobalı, A., 1993, “Silis dumanının beton katkı maddesi olarak değeriendirilmesi”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 149-167, İMO, Ankara.*

Yıldız, B., 2007, “Rheobuild 2000 pf katkılı rheocem 900 ince taneli çimentonun değışik gradasyonlu kum numunelere penetrasyon yetisi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 18-31.*



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: YASİN ÇALI

Uyruğu: T.C.

Doğum Yeri ve Tarihi: Selçuklu-1993

Telefon: (0507) 515 59 44

E-mail: ysncalibey@hotmail.com, ysncalibey@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Selçuklu Özel Büyükkoyuncu Anadolu Lisesi	2011
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Müh. Fak. İnş. Müh. Böl.	2016
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. İSGTYL	2018
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üni. Lisansü. Eğt. Ens. İnş. Müh. YL	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2011-	Çalı Mühendislik Ltd. Şti.	İnşaat Mühendisi
2016	İGA ve İçtaş İnşaat	İnşaat Mühendisi
2013-2019	Meridyen Yapı Denetim Ltd. Şti.	İnşaat Mühendisi

UZMANLIK ALANI

- Betonarme Yapılar ve Temeller
- İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı (B SINIFI)
- Enerji Uzmanı

YABANCI DİLLER

- İngilizce İyi

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

- İdecad ve Sta4cad - iyi derecede
- Autocad ve Sap2000 - orta derecede

YAYINLAR

Demiröz A., Çalı Y., “Investigation of Mechanical Properties of Cement Mixtures Obtained by Using Mineral Additive Materials”, Selçuk-Teknik Dergisi, Cilt 19, Sayı:1-2020.