



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI MİNERAL KATKILARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA REOLOJİK
VE PERMEASYON ENJEKSİYON TASARIM PARAMETRELERİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI OLARAK ANALİTİK VE İSTATİSTİKSEL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

BURAK YAŞAR

KASIM 2022

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI MİNERAL KATKILARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA REOLOJİK
VE PERMEASYON ENJEKSİYON TASARIM PARAMETRELERİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI OLARAK ANALİTİK VE İSTATİSTİKSEL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

BURAK YAŞAR

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Fatih ÇELİK

Kasım 2022

Burak YAŞAR tarafından **Doç. Dr. Fatih ÇELİK** danışmanlığında hazırlanan “**Farklı Mineral Katkıların Çimento Esaslı Harçlarda Reolojik ve Permeasyon Enjeksiyon Tasarım Parametreleri Üzerine Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak Analitik ve İstatistiksel Yöntemlerle İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Fatih ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim FEDAKAR, Abdullah Gül Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burak YAŞAR

ÖZET

FARKLI MİNERAL KATKILARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA REOLOJİK VE PERMEASYON ENJEKSİYON TASARIM PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI OLARAK ANALİTİK VE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

YAŞAR, Burak

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Fatih ÇELİK

Kasım 2022, 100 sayfa

Bu çalışma çimento esaslı harçlarda farklı mineral katkıların çimento yerine ikame edilmesinin permeasyon enjeksiyon tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini gözlemlemeyi ve bunun yanı sıra bu mineral katkıların çimento esaslı harçların reolojik özellikleri üzerinde etkisini incelemeyi hedeflemiştir. Çalışmada kullanılan mineraller; uçucu kül (FA), pirinç kabuğu külü (RHA) ve kazan altı taban külü (BA) olarak belirlenmiştir. Harç karışımlarının plastik viskozite ve akma gerilmesi gibi reolojik parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiş olup etkin enjeksiyon tasarım parametreleri irdelenmiştir. Sonuç olarak, çimento esaslı harçlarda farklı oranlarda çimento yerine ikame edilen mineral katkıların gerek reolojik davranışları üzerinde gerekse de enjeksiyon tasarım parametreleri üzerinde önemli etkilere neden olduğu karşılaştırmalı olarak analitik ve istatistiksel yöntemlerle tespit edilmiştir. Bu kapsamda özellikle permeasyon enjeksiyon zemin iyileştirme uygulamalarında bu mineral katkıların kullanılabilirliği çevresel, sürdürülebilirlik ve ekonomik açılarından faydalı olabilecektir.

Anahtar Sözcükler: Reoloji, viskozite, permeasyon enjeksiyon, mineral katkılı harçlar, SPSS

SUMMARY

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTS OF DIFFERENT MINERAL ADDITIVES ON RHEOLOGICAL AND PERMEATION INJECTION DESIGN PARAMETERS IN CEMENT BASED GROUTS BY ANALYTICAL AND STATISTICAL METHODS

YAŞAR, Burak

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor

: Assoc. Prof. Dr. Fatih ÇELİK

November 2022, 100 pages

This study aimed to observe the effects of substitution of different mineral additives for cement in cement-based grouts on the permeation injection design parameters, as well as to examine the effects of these mineral additives on the rheological properties of grouts. Minerals used in the study; fly ash (FA), rice husk ash (RHA) and bottom ash (BA). Rheological parameters of grout mixtures such as plastic viscosity and yield stress were evaluated in this work. The results were analyzed using various statistical methods and effective injection design parameters were examined. As a result, it has been determined by comparative analytical and statistical methods that the mineral additives substituted for cement at different rates in cement-based grouts cause significant effects on both the rheological behavior and the injection design parameters. In this context, the usability of these mineral additives, especially in permeation injection ground improvement applications, may be beneficial in terms of environmental, sustainability and economic aspects.

Keywords: Rheology, viscosity, permeation injection, mineral additives, SPSS

ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam esnasında, çalışmalarına ve araştırmalarına rehberlik eden, bilgisini, birikimini ve her türlü konuda yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Fatih ÇELİK'e teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmama olan önemli katkılarından dolayı değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim FEDAKAR'a; ayrıca yüksek lisansım esnasında bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Destek ve motivasyonlarıyla ilham kaynağım olan kıymetli eşim Esma KARAKOYUN YAŞAR'a; hayatım boyunca her daim yanımda bulunan annem Zarif YAŞAR ve babam Halil İbrahim YAŞAR'a ve tüm aileme teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam esnasında destekleriyle yanımda olan değerli eşimin çok kıymetli ailesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiv
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	1
BÖLÜM II	6
LİTERATÜR ÖZETİ.....	6
2.1 Zemin İyileştirme.....	6
2.1.2 Zeminlerde İyileştirme Neden Gereklidir.....	7
2.1.3 Zeminlerde İyileştirme Yöntemleri	7
2.2 Zeminlerde Enjeksiyon	9
2.2.1 Zeminlerde Enjeksiyonun Tarihi	10
2.2.2 Zeminlerde Enjeksiyon Amacı ve Uygulama Alanları.....	11
2.2.3 Zeminlerde Enjeksiyon Çeşitleri	11
2.3 Enjeksiyon Tasarımı ve Parametreleri	20
2.3.1 Enjeksiyon Testi ve Tekniği	20
2.3.2 Gözenekli Ortamda Harç Akış Teorisi	21
2.3.3 Harç Enjeksiyonunda Doğal Fiziksel Kısıtlamalar	24
2.3. Enjeksiyon Yöntemi Parametreleri	24
2.4 Çimento Esaslı Harçların Enjeksiyonu	25
2.5 Çimento Esaslı Harçların Reolojisi.....	28
2.5.1 Stabilite	29
2.5.2 Priz süresinin belirlenmesi.....	30
2.5.3 Viskozite	30

2.6 Mineral Katkılar.....	33
2.6.1 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Uçucu Kül Kullanımı .	34
2.6.2 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Kazan Altı Kül Kullanımı	38
2.6.3 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Pirinç Kabuğu Külü Kullanımı	41
2.7 İstatistiksel Değerlendirme	44
BÖLÜM III.....	46
MATERYAL VE METOD.....	46
BÖLÜM IV.....	48
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
4.1 Uçucu Kül (FA) Karışım Parametreleri.....	48
4.2 Pirinç Kabuğu Külü (RHA) Karışım Parametreleri.....	49
4.3 Kazan Altı Taban Külü (BA) Karışım Parametreleri	50
4.4 Mineral Katkıların Parametrelerinin Değerlendirilmesi	52
4.4.1 w/b=0,75 oranında	52
4.4.2 w/b=1,00 oranında	57
4.4.3 w/b=1,25 oranında	63
4.4.4 Değişken Parametrelere Göre Silindirik Akma Modeli t(sn)	68
4.4.5 Değişken Parametrelere Göre Küresel Akma Modeli t(sn).....	71
4.5 Çalışmadaki Verilerin İstatistiksel Değerlendirilmesi	73
4.5.1 Normal Dağılıma Uygunluk Testleri Sonuçları.....	74
4.5.2 Varyansların Homojenliği Testinin Sonuçları	75
4.5.3 ANOVA Testi.....	76
4.5.4 Kruskal- Wallis Testi.....	77
4.5.6 POST- HOC Testi.....	78
4.5.7 MANN- WHITNEY U Testi	83
BÖLÜM V	87
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Dane büyüklüğüne göre zeminlerin sınıflandırılması (Uzuner, 2007)	6
Çizelge 2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri (Yıldırım, 2002).....	9
Çizelge 2.3. Zemin Tipleri ve Enjeksiyon Tekniği (Avrupa Standartları 1996'dan sonra)	21
Çizelge 2.4. Gallavrasi (1992) Karışım Çeşitleri Sınıflandırılması.....	27
Çizelge 2.5. Örnek uçucu kül kimyasal analiz değerleri (Yazıcı, 2004)	36
Çizelge 2.6. Kazan Altı Taban Külü (BA) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	41
Çizelge 2.7. Pirinç kabuğu için dünyadaki üretim oranları (İşbilir, 2012)	42
Çizelge 4.1. Uçucu Kül Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri (Çelik vd., 2022).....	48
Çizelge 4.2. FA katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri (Çelik vd., 2022).....	49
Çizelge 4.3. Pirinç Kabuğu Külü Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri (Çelik, 2016).....	49
Çizelge 4.4. RHA katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri (Çelik, 2016).....	50
Çizelge 4.5. Kazan Altı Taban Külü Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri (Çelik ve Akçuru, 2020).....	51
Çizelge 4.6. BA katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri (Çelik ve Akçuru, 2020)	52
Çizelge 4.7. w/b=0,75 Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	55
Çizelge 4.8. w/b=0,75 Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	55
Çizelge 4.9. w/b=0,75 Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli.....	56
Çizelge 4.10. w/b=0,75 Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli	57
Çizelge 4.11. w/b=1,00 RHA, BA ve FA Plastik Viskozite Değerleri.....	58

Çizelge 4.12. $w/b=1,00$ RHA, BA ve FA Modifiye Plastik Viskozite Oranı	59
Çizelge 4.13. $w/b=1,00$ Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	60
Çizelge 4.14. $w/b=1,00$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	60
Çizelge 4.15. $w/b=1,00$ Uçucu Kül Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	60
Çizelge 4.16. $w/b=1,00$ Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli.....	62
Çizelge 4.17. $w/b=1,00$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli.....	63
Çizelge 4.18. $w/b=1,00$ Uçucu Kül Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli	62
Çizelge 4.19. $w/b =1,25$ Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	65
Çizelge 4.20. $w/b =1,25$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı	65
Çizelge 4.21. $w/b=1,25$ Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli.....	67
Çizelge 4.22. $w/b=1,25$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli.....	67
Çizelge 4.23. $m= 0,3$ için Silindirik Akma Modeli Süresi	69
Çizelge 4.24. $m= 0,6$ için Silindirik Akma Modeli Süresi	69
Çizelge 4.25. $m= 0,9$ için Silindirik Akma Modeli Süresi	69
Çizelge 4.26. $m= 1,2$ için Silindirik Akma Modeli Süresi	69
Çizelge 4.27. $Q = 0,04$ m için Silindirik Akma Modeli Süresi.....	70
Çizelge 4.28. $Q = 0,06$ m için Silindirik Akma Modeli Süresi.....	70
Çizelge 4.29. $Q = 0,08$ m için Silindirik Akma Modeli Süresi.....	71
Çizelge 4.30. $Q = 0,1$ m için Silindirik Akma Modeli Süresi.....	71
Çizelge 4.31. $n= 0,2$ için Küresel Akma Modeli $t(sn)$	72
Çizelge 4.32. $n= 0,4$ için Küresel Akma Modeli $t(sn)$	72
Çizelge 4.33. $n= 0,6$ için Küresel Akma Modeli $t(sn)$	72
Çizelge 4.34. $n= 0,8$ için Küresel Akma Modeli $t(sn)$	73
Çizelge 4.35. $n= 1,0$ için Küresel Akma Modeli $t(sn)$	73

Çizelge 4.36. Değişkenlere Yapılan Testler ile Çoklu Kıyaslama Testleri	74
Çizelge 4.37. Normal Dağılıma Uygunluk Testi	75
Çizelge 4.38. Varyansların Homojenliği Testi	76
Çizelge 4.39. ANOVA Çizelgesi (μ -RHA Miktarı, $w/b=0,75$)	76
Çizelge 4.40. ANOVA Çizelgesi (μ -BA Miktarı, $w/b=0,75$)	76
Çizelge 4.41. ANOVA Çizelgesi (μ -FA Miktarı, $w/b=1,00$)	77
Çizelge 4.42. ANOVA Çizelgesi (μ -BA Miktarı, $w/b=1,00$)	77
Çizelge 4.43. ANOVA Çizelgesi(μ -RHA Miktarı, $w/b=1,00$)	77
Çizelge 4.44. Kruskal-Wallis Testi Sonucu (RHA, $w/b=1,25$)	79
Çizelge 4.45. Kruskal-Wallis Testi Sonucu (BA, $w/b=1,25$);	79
Çizelge 4.46. Post-Hoc Test Sonuçları (FA)	79
Çizelge 4.47. Post-Hoc Test Sonuçları (BA; $w/b= 0,75$).....	80
Çizelge 4.48. Post-Hoc Test Sonuçları (BA; $w/b= 1,00$).....	81
Çizelge 4.49. Post-Hoc Test Sonuçları (RHA)	82
Çizelge 4.50. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (FA).....	83
Çizelge 4.51. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (RHA)	84
Çizelge 4.52. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (BA)	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çalışmanın Akış Şeması	5
Şekil 2.1. Enjeksiyon Teknikleri (Mitchell, 1981)	12
Şekil 2.2. Çatlatma enjeksiyonu (Keller, 2014; Gallavresi, 1992)	12
Şekil 2.3. Kompaksiyon enjeksiyonu (Raju ve Sondermann, 2005; Lomize ve diğ., 1973)	13
Şekil 2.4. Jet enjeksiyon uygulamaları (URL- 1)	14
Şekil 2.5. İdeal Jet Enjeksiyonu (Baş, 2006)	15
Şekil 2.6. Jet 1 yöntemi (Keller, 2014; URL-2).....	16
Şekil 2.7. Jet 2 yöntemi (Bakım, 2007; URL-2).....	17
Şekil 2.8. Jet 3 yöntemi (Bakım, 2007; URL-2).....	17
Şekil 2.9. Süper jet yöntemi (Welsh ve Burke, 2000)	18
Şekil 2.10. Silindirik Borudan Radyal Enjeksiyon (Çelik, 2016).....	22
Şekil 2.11. Küresel Akış Enjeksiyonu (Çelik, 2016).....	22
Şekil 2.12. Newton Modeli (Çelik,2016).....	31
Şekil 2.13. Reolojik Model ve Hız Profili I (Çelik, 2016).....	32
Şekil 2.14. Newton Sıvısı	32
Şekil 2.15. Reolojik Model ve Hız Profili I- II (Çelik, 2016).....	33
Şekil 2.16. Görünür Viskozite	32
Şekil 3.1. Silindirik Akma Modeli (a) ve Küresel Akma Modeli(b)	46
Şekil 3.2. Yöntem İçeriği.....	47
Şekil 4.1. w/b=0,75 Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külü plastik viskozite değerleri	53
Şekil 4.2. w/b=0,75 Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külü Modifiye Plastik Viskozite Değerleri	54
Şekil 4.3. w/b=0,75'te RHA ve BA'nın silindirik akma enjeksiyon basıncına etkisi ...	55
Şekil 4.4. w/b=0,75'te RHA ve BA'nın modifiye enjeksiyon basıncına etkisi	56
Şekil 4.5. w/b= 0,75 Küresel Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli	57
Şekil 4.6. w/b=1,00 iken RHA, BA ve FA Minerallerinin Plastik Viskoziteye Etkisi...	58
Şekil 4.7. w/b=1,00 HA, BA ve FA Mineral Katkı Oranlarına Göre Modifiye Plastik Viskozite Oranı	59

Şekil 4.8. $w/b=1,00$ için FA, RHA ve BA Silindirik Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli	61
Şekil 4.9. $w/b=1,00$ için FA, RHA ve BA Modifiye Enjeksiyon Basıncı Modeli.....	61
Şekil 4.10. $w/b= 1,00$ Küresel Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli	63
Şekil 4.11. $w/b=1,25$ için RHA ve BA Mineral Katkı Oranlarına Göre Plastik Viskozite Değerleri	64
Şekil 4.12. $w/b=1,25$ için RHA ve BA Mineral Katkı Oranlarına Göre Plastik Viskozite Değerleri	64
Şekil 4.13. $w/b=1,25$ için RHA ve BA Silindirik Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli....	66
Şekil 4.14. $w/b=1,25$ için RHA ve BA Modifiye Enjeksiyon Basıncı Modeli.....	66
Şekil 4.15. $w/b= 1,25$ Küresel Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli	68
Şekil 4.16. $m= 0,3- 0,6- 0,9- 1,2$ değişkenlerine göre silindirik akma modeli $t(sn)$	70
Şekil 4.17. $Q= 0,04- 0,06- 0,08- 0,1m^3/s$ değişkenine göre silindirik akma modeli $t(sn)$	71
Şekil 4.18. $n= 0,2- 0,4- 0,6- 0,8- 1,0$ değerlerine göre Küresel Akma Modeli için $t(sn)$	73

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Bleeding deneyi (Çelik, 2016)	29
Fotoğraf 2.2. Uçucu Küller (Aygün, 2019)	38
Fotoğraf 2.3. Zemin Uçucu Külün Zemin Uygulanması (Aygün, 2019).....	38
Fotoğraf 2.4. Öğütölmüş Kazan Altı Taban Külünün 2000 Ölçekle Büyütölmüş Mikro Görüntüsü (Toprak, 2011)	40
Fotoğraf 2.5. Pirinç kabuğu(a) ve pirinç kabuğu külü(b)	43



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
$D_{10}(\text{zemin})$	%10 zemin dane çapı
$D_{95}(\text{enjeksiyon})$	%95 enjeksiyon karışımı dane çapı
$D_{15}(\text{zemin})$	%15 zemin dane çapı
$D_{85}(\text{enjeksiyon})$	%85 enjeksiyon karışımı dane çapı
$D_{10}(\text{zemin})$	%10 zemin dane çapı
$D_{95}(\text{enjeksiyon})$	%95 enjeksiyon karışımı dane çapı
w/b- s/ç:	Enjeksiyon Su/çimento oranı
FC	Zeminin 0.6 mm elekten geçen ince dane oranı
Dr	Zeminin rölatif sıkılığı
P	Enjeksiyon basıncı (kPa)
Q	Enjeksiyon debisi, m^3/sn
k_g	Zemin enjeksiyon geçirgenliği m/sn
γ	Enjeksiyon harcının birim hacim ağırlığı, kN/m^3
C	Şekil katsayısı = 4π
R_o	Küre yarıçapı
k	Zemin su geçirgenliği m/sn
η_w	Suyun viskozitesi, $\text{Pa}\cdot\text{sn}$
n	Zemin boşluk oranı (boşluk hacim/toplam hacim)
dr	Harç enjeksiyon mesafesini ifade etmektedir.

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM :	American Society for Testing and Materials
CBR :	California Bearing Ratio
TS :	Türk Standartları
FA	Uçucu Kül
BA	Kazan Altı Taban Külü
RHA	Pirinç Kabuğu Külü

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Yapı inşasında dikkat edilen temel özellik yapı zemininin uygunluğudur. Yapı zeminleri mühendislik özellikleri iyi olan zeminler arasından tercih edilmektedir. Günümüzde kentleşme ve yoğun nüfus artışının getirdiği alan yetersizliği sorunu, yeni yer arayışına girilmesine sebep olmuştur. Bu bağlamda zemin özellikleri uygun olmayan alanların değerlendirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu alanlar bataklık, dere yatağı, döküm ve dolgu alanları gibi yapı yapımına uygun olmayan alanlardır. Bu alanların zemin özelliklerinde iyileştirmelere gidilerek zemin, yapı inşa edilebilirliğine uygun hale getirilmektedir. Özellikle 1950'li yıllardan sonra zemin iyileştirme çalışmaları geoteknik mühendisliğinin en önemli alanlarından biri olmuştur. Zayıf zeminlerde zemin koşullarının iyileştirilmesi için zemin iyileştirme teknikleri kullanılmaktadır.

Düşük taşıma kapasitesi, yüksek sıvılaşma ve sıkıştırılabilme özelliklerine sahip zeminler yumuşak veya zayıf zemin olarak adlandırılmaktadır. Buna örnek olarak gevşek kumlu zemin, kohezyonsuz ve suya doymuş zeminleri vermek mümkündür (Tolon, vd., 2011). Drenaj yapılmadığı zaman sıkışma durumu, basıncı arttırarak zeminin sıvı gibi hareket etmesine ve zeminde büyük hareketler olmasına neden olmaktadır. Bu durum sıvılaşma olarak tanımlanmaktadır. Sıvılaşma olan zeminlerde dinamik yüklerden gelen etkiyle artan boşluk suyu basıncı zemin taşıma gücünün kaybedilmesine sebep olmaktadır. (Tolon, 2013).

Zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliğinin doğru bir şekilde ilerlemesi için zeminlerin doğru sınıflandırılması gerekmektedir (Tolon, vd., 2015). Uygun olmayan zemin koşullarındaki sorunlar genel olarak aşırı yer altı suyu ve taşıma gücü eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Bu tür zeminlerde büyük hareketler ve oturmalar görülmektedir. Bu oturmaların boyutu arttıkça yapıya ve çevresine büyük zararlar verebilir. Şantiyelerde ön yükleme gibi ön hazırlık ve testlerle inşaat sonrası oluşabilecek oturmalar en aza indirgenmeye çalışılmaktadır. Projeye başlanmadan önce yapılan zemin etüdü zeminde binanın ağırlığına karşı gerekli mukavemetin olmadığını gösteriyorsa zemin

iyileştirilmeli ve mukavemetinin artırılması hedeflenmektedir. Bunun sonucunda zemin taşıma kapasitesi artarak elastisitesi artırılıp geçirgenliği azaltılmaktadır. Zemin mühendisliğinde boşluk ve çatlakları doldurmak için yapılan işlem enjeksiyon olarak tanımlanmaktadır. Gerekli mukavemet özelliklerini sağlamayan zeminlerde rehabilite çalışmaları için bazı teknikler uygulanmaktadır. Zeminlerde görülen düşük taşıma gücü, yüksek deformasyon ve şişme potansiyeli yüksek bunun yanı sıra işlenebilirliği de az olan zeminlerle karşılaşılabilir. Bu gibi durumlarda zeminin mühendisliği kötü olan katmanları kaldırılarak yerine parametreleri daha iyi olan bir zemin yerleştirilebilir. Ancak bu yöntem her uygulamada yapılamayabilir. Zemin iyileştirmenin önemi ve ekonomik avantajları, uygulamalarda kullanımlarının artmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda ilk olarak uygulama alanındaki zemin değerlendirilerek uygun zemin iyileştirme yönteminin belirlenmesi gerekmektedir. Katmanlarının kaldırılarak yeni bir katman ile yer değiştirmesi mümkün olmayan uygulamalarda fiziksel veya kimyasal yöntemler kullanılarak zemin iyileştirme yapılmaktadır. Ancak mekanik yöntemler bu bağlamda yetersiz kalabilmektedir. Örneğin kohezyonlu zeminlerde mekanik yöntemler yetersiz olduğu için bu tip zeminlerde kimyasal yöntemlerden olan özellikle kireç, çimento, bitüm ve reçine gibi katkıları kullanılarak iyileştirme sağlanmaktadır (Hakansson, 1992).

Zemin iyileştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan permeasyon enjeksiyon yönteminde, enjeksiyon malzemesi olarak kullanılan çimento bazlı harç karışımların akışkanlık ve yayılma davranışını birinci derecede etkileyen reolojik parametrelerin, farklı mineral katkılarının kullanılmasıyla gösterdiği değişim durumunun ortaya çıkarılmasını hedeflenmektedir. Permeasyon (sızdırma) enjeksiyon yönteminin tasarımı ve zemindeki davranışı doğrudan harcın stabilitesine, filtrasyon basıncına, reolojisine ve dane çapı dağılımına bağlıdır. Harç reolojisinin doğru olarak belirlenerek enjeksiyonun zemin içerisindeki hareketine etkisini analiz etmek, bu uygulama yönteminin tasarımının en etkili ve doğru bir şekilde yapılmasına olanak sağlayacaktır. Literatürde daha önce yapılmış araştırma ve deneylerde, farklı su/çimento oranında mineral katkılarıyla hazırlanmış harç karışımlarının reolojik özelliklerinin bu karışımların davranışına etkisi incelenmiştir. Ancak yapılan çalışmalar birbirleriyle karşılaştırılmamıştır. Bu sebepten dolayı, çalışmam kapsamında kullanılan verilerin literatürde yaygın olarak kullanılmış değerlerden olmak suretiyle alınarak farklı mineral katkılarının çimento esaslı harçların

reolojik parametreleri üzerine ve permeasyon enjeksiyonu tasarım parametreleri üzerine etkileri değerlendirilmiş ve mineraller bu bağlamda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Harç karışımlarında; plastik viskozite, kayma eşiği ve akma gerilmesi gibi reolojik parametreler kullanılmıştır. Ayrıca karışımların, enjekte edilebilme katsayıları ve enjeksiyon için uygun olup olmadıkları bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Sonuçlar istatistiki olarak sunulurken, birçok deneyden elde edilmiş veriler analiz edilmiş ve etkin parametreler tartışılarak sunulmuştur.

Bu çalışma farklı mineral katkılarının kullanılmasıyla permeasyon enjeksiyonundaki değişim ve gelişimleri gözlemlemek bunun yanı sıra bu mineral katkılarının çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerine etkisini incelemeyi hedeflemektedir. Çalışmada kullanılan mineraller uçucu kül (FA), pirinç kabuğu külü (RHA) ve kazan altı taban külü (BA) olarak belirlenmiştir.

Uçucu küller özellikle yumuşak zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmaya başlamıştır. Laboratuvarında belirlenen uçucu kül, gerekli su ve yumuşak zemin ile karıştırılarak iş makineleri yardımıyla sıkıştırılmaktadır. Uçucu kül kullanımı sonucu zeminde mukavemet artar, yapım hızı artarak dolgu kalınlığı azaltılır ve kazı ile dolgudan tasarruf edilir (Şenol ve Edil, 2004).

Pirinç kabuğunun yakılma işlemi sırasında yüksek sıcaklık kullanılarak elde edilen külün hızlı bir şekilde soğutulmasıyla kül içerisindeki silika, amorf bir yapıya dönüşmektedir. Bu yapı pirinç kabuğu külünün yüksek yüzey alanına ve çok ince tanelere sahip olmasına bunun yanı sıra puzolanik ve yüksek reaktif özellik göstermesine sebep olmaktadır (Yıldız vd. 2007; Erdoğan, Erdoğan, 2007).

Kazan altı taban külünün öğütülmeden ince agreganın yerine kullanılması sonucu harç karışımında çatlama ve büzülme durumlarının incelenmesi ve farklı oranlarda kullanımlarına yönelik halka(ring) testi yapılmasıyla kazan altı taban külünün kullanılan agregaya oranla büzülme yani rötreyi azalttığına ulaşılmıştır. Ancak kazan altı taban külünün fazla miktarda kullanımı sonucu meydana gelen gözenek artışı; dayanım modülü ve elastisitede azalmaya sebep olmuştur (Topçu ve Bilir, 2010).

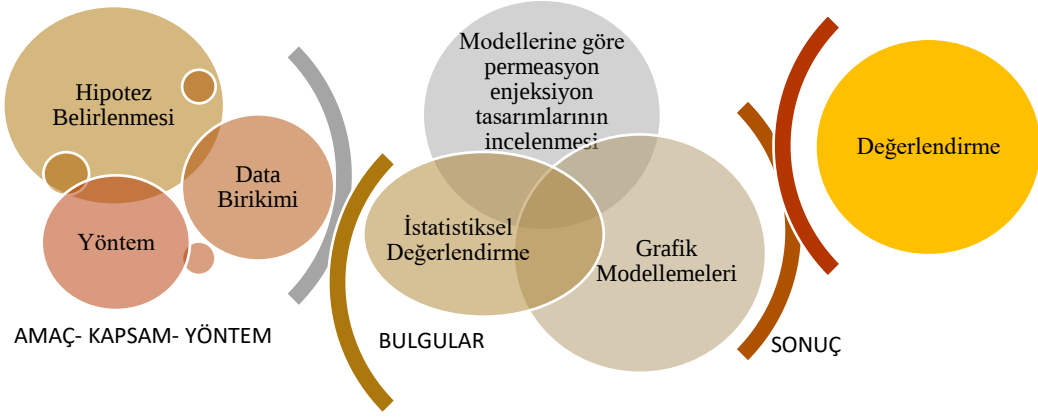
Bu çalışmada;

Farklı mineral katkıların çimento esaslı harçların reolojik özelliklerine ve permeasyon enjeksiyon basıncı ile tasarım parametreleri üzerine etkilerinin analitik olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

Mineral katkılarının çimento esaslı harç karışımlarının reolojisine etkileri birçok farklı çalışma kapsamında değerlendirilmiş olup belirlenen katkılar karşılaştırılabilir özelliklerde olmadığı için karşılaştırmaları yapılmamıştır. Bu bağlamda tez kapsamında mineral katkılı karışımlar ortak payda da toplanarak sınanabilir duruma getirilerek karşılaştırmalı, analitik ve istatistiksel değerlendirmelerinin yapılması amaçlanmıştır.

Çalışma içeriği;

- Bölüm I' de çalışmanın amacı ve kapsamı yer almaktadır. Farklı mineral katkılarının araştırılmasıyla çimento harcı içerisinde kullanımının zemin iyileştirme konusunda katkılarından bahsedilmiştir.
- Bölüm II' de kapsamlı bir literatür taraması yapılarak zemin iyileştirme işlemlerinin neden gerekli olduğu, nasıl yapılması gerektiği, zemin iyileştirme yöntemleri, zemin enjeksiyonlarının amaçlarını, enjeksiyon türleri, enjeksiyon parametreleri, permeasyon enjeksiyonu, mineral katkılarının özellikleri ve zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılma biçimleri ele alınmıştır.
- Bölüm III' de çalışmada kullanılan materyaller ve yöntem üzerine bilgilendirme yapılmış, kullanılan programlar, bölüm içerikleri gibi aşamalardan bahsedilmiştir.
- Bölüm IV' de araştırmalar sonucu elde edilen bilgiler ve oluşturulan çizelge ve grafikler paylaşılmıştır. SPSS ile elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.
- Bölüm V' de mineral katkılarının çimento harcı ile karıştırılması sonucu farklı değişkenler ışığında olumlu ve olumsuz katkıları tartışılarak çalışmanın sonucu ortaya konulmuştur.



Şekil 1.1. Çalışmanın Akış Şeması

BÖLÜM II

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Zemin İyileştirme

Zemin, ayrışma veya taşınma ile meydana gelmektedir. Ayrışma ile meydana gelen zemin, kayaların fiziksel veya kimyasal olarak parçalanıp birbirinden ayrışmasıyla oluşmaktadır. Fiziksel ayrışma sıcaklık farkı, rüzgâr, bitki kökleri gibi sebeplerden meydana gelirken; kimyasal ayrışmalar suyu, yağmur, havadaki oksijen gibi nedenlerden oluşan asidin kayayla tepkimeye girmesi sonucu oluşmaktadır. Taşınma sonucu oluşan zemin ise rüzgâr, akarsu, yerçekimi sonucunda parçalanmış kaya danelerinin bir arada toplanmasıyla meydana gelmektedir. Zeminler iri ve ince daneli zemin olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İnce daneli olanlara silt ve kil örnek verilirken iri danelilere kum ve çakıl örnek gösterilebilir. (Uzuner, 2007).

Çizelge 2.1. Dane büyüklüğüne göre zeminlerin sınıflandırılması (Uzuner, 2007)

Zemin Tipi	Dane Çapı (mm)	Elek No	Grup Sembolü
İri Daneli Zeminler	75 - 0,075	200 Üstü	G
Çakıl	75 - 4,75	4 Üstü	
Kaba Çakıl	75 - 19		
İnce Çakıl	19 - 4,75		
Kum	4,75 - 0,075	4 - 200	S
Kumtaşı	4,75 - 2,00	4 - 10	
Orta Kum	2,00 - 0,425	10 - 40	
İnce Kum	0,425 - 0,075	40 - 200	
İnce Daneli Zeminler	< 0,075	200 Altı	
Silt			M
Kil			C

Zemin, yapı yüklerinin temeller aracılığıyla aktarıldığı taşıyıcı bir mekanizmadır. Zeminler gerekli taşıma kapasitesine sahip olduklarında üzerlerine inşa edilecek yapıları

sorunsuz bir şekilde taşımaktadır. Ancak günümüzde artan nüfus, barınma ihtiyacı ve hızla büyüyen sanayi bölgelerinin neden olduğu yapılaşmadaki artış sonucunda bu zeminlerin yanı sıra taşıma kapasitesi az, sıvılaşma oranı yüksek zeminlerin de kullanılma ihtiyacı doğmuştur. Ancak bu tip zeminler kullanıma açılmak istenildiğinde birçok sorunla karşılaşılabilir. Bu nedenle zeminde karakteristik zayıflıklar nedeniyle ortaya çıkan; taşıma kapasitesi, oturma ve sıvılaşma gibi sorunların giderilerek zeminin uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Zemin iyileştirme bu gibi zeminlerdeki sorunları gidermek amacıyla kullanılmaktadır (Gouvenot, 1998; Ribay vd., 2006).

Zemin iyileştirmesi yapılması gereken zeminlere; gevşek kumlu, sıvılaşma oranı yüksek zeminler, yumuşak killi zeminler ve bataklıklar örnek verilebilir. Bu zeminler yapılar için elverişli olmadığından, istenmeyen zemin gruplarındandır. Örneğin yumuşak killi veya yer altı suyu seviyesinin yüksek olduğu durumlarda zeminlerde sıvılaşma artmakta ve taşıma gücü çok az olup bu zeminlere yapılan yapılaşmalarda büyük çaplı deformasyonlar görülebilmektedir. Bu sebeple böyle zeminlerden mümkün olduğunca uzak durulmalıdır (Taşçı, 2011).

2.1.2 Zeminlerde İyileştirme Neden Gereklidir

Zeminin herhangi bir yapıya uygun olmamasının sonucunda zemin yapıya uydurulmalıdır. Bu nedenle zeminde iyileştirmeye gidilmesi gerekmektedir (Özdemir, 2006). Bu kısımda devreye geoteknik mühendisliği girmektedir. Normal bir zemine oturtulan yapılarda taşıma kapasitesi yüzeysel temellerle halledilebiliyorken bu tür sorunlu zeminlerde derin temel kullanılarak ya da zemin, iyileştirme yöntemi ile taşıma kapasitesi yükseltilerek düzeltilebilmektedir (Tachir, 2015).

2.1.3 Zeminlerde İyileştirme Yöntemleri

Zemin ile yapı arasındaki uyumsuzluğun giderilmesi için üç alternatif bulunmaktadır; tasarımı zemine göre yapmak, projenin yapılmasının düşünüldüğü zemini uygun bir zeminle değiştirmek, zeminde iyileştirmeye gitmek. İlk seçenekte zemin taşıma kapasitesi ve zayıf özelliklerine göre yapı tasarlanarak zemin ile uyumu sağlanabilecektir. Bu seçeneğe göre proje bir ölçüte bağlı olduğu için gelişimi kısıtlı olacaktır. İkinci seçenekte uyumsuz zemin kullanılmayacak ve uygun bir zemine inşa edilecektir. Ancak

yeni alan bulmak, projeyi o alana taşımanın maliyeti ve bütün incelemelerin başa alınması gerekeceği için zaman kaybı sebebiyle olumsuz karşılanmaktadır. Üçüncü seçenekte ise zemin iyileştirilerek taşıma kapasitesi arttırılacak ve artan kentleşme karşısında alternatif zeminlerin kullanılması sağlanacaktır (Doğu, 2005). Bu bağlamda üçüncü alternatif seçildiği zaman, zeminin mevcut durumunun iyi analiz edilmesi ve bu analize uygun olarak en doğru zemin iyileştirme yönteminin belirlenmesi gerekmektedir. Böylece hem hızlı hem de ekonomik çözümlere ulaşılmış olunacaktır. Bu yöntemler fiziksel ve kimyasal, mekanik, hidrolik, ekleme ve sınırlama yöntemleri olup bu sayede zeminde büyük yüklere karşı oluşabilecek sorunların giderilmesinde kullanılabileceklerdir (Yıldırım, 2002).

Mekanik iyileştirme yöntemi ile, zemine kısa süreli aralıklarla titreşimli statik silindirler, sıkıştırma kazıkları ve derin sıkıştırma ile büyük yük uygulanarak zemindeki boşlukları azaltarak sıkıştırmak amaçlanmaktadır. Hidrolik iyileştirme yöntemi ile dane çapı büyük çakıllı bir kuyudan veya drenaj bağlantısından suyun uzaklaştırılması gibi zemin içindeki su boşaltılarak zemindeki kesme mukavemetinin arttırılmasının sağlanması amaçlanmaktadır. Kimyasal madde ve fiziksel yöntemlerle zemin iyileştirilmesi, zeminle doğrudan temas edecek bazı malzemelerin zeminle reaksiyona girmeleriyle sağlanan iyileştirme yöntemidir. Bu katkı malzemelerinin zemindeki boşluklara zemin delinmesiyle veya çatlaklara uygulanan basınç yardımıyla doldurulmasına enjeksiyon denilmektedir. Sınırlama ve ekleme yöntemleri, zemini sıkıştırarak zemin deformasyonunu önleme prensibiyle çalışmaktadır. Buna örnek olarak zemine yapılan ankraj, gabion elemanları, geokolon, taş kolon ve kafes ve geotekstil duvarların üretimleri bu gruba örnek olarak verilebilir (Harputlugil, 2018). Yapılar yüklerini temel üzerinden zemine ilettiği için zemin gerekli taşıma kapasitesine sahip olduğunda ve oturmaya dayanabildiğinde, zemin yapıyı güvenli ve sorunsuz bir şekilde taşıyacaktır. Fakat zemin, yapılan yapının temel üzerinden zemine ilettiği gerilmeleri karşılayamıyorsa, zemine istenilen özellikleri kazandırmak için iyileştirme çalışmaları yapılabilir. (Kaymakçı, 2014)

Günümüzde nüfus ve konut ihtiyacındaki artış, binaların büyümesi ve sanayi bölgelerinin genişlemesi gibi nedenlerle zayıf zeminlerin değerlendirilmesi durumu söz konusu olmuştur. Zayıf zemin üzerine yapı inşa etme ihtiyacının kaçınılmaz olduğu durumlarda, inşaat yüklerine dayanamayan zeminlerin iyileştirilmesi gerekir. Bazı inşaat sahalarında

karşılaşılan zemin problemleri projenin uygulanabilirliğini etkileyecek boyutlara ulaşmaktadır. Böylesi hallerde zemin şartlarının iyileştirilmesi mühendislik seçeneklerinden birisidir. (Özdemir, 2006) Zemin özelliklerinin uygulanacak proje esaslarına göre belirlenmesi, zeminlerin iyileştirilmesi kavramını ortaya çıkarmıştır. Zemin iyileştirme yöntemi dört başlıkta ele alınmıştır. Bu başlıklar; mekanik, hidrolik, fiziksel- kimyasal ve ekleme- sınırlamadır (Yıldırım, 2002).

Çizelge 2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri (Yıldırım, 2002)

Mekanik	Hidrolik	Fiziksel- Kimyasal	Ekleme- Sınırlama
Titreşimli Sıkıştırma	Ön Yükleme	Enjeksiyon	Şerit
Darbeli Silindir	Geosentetikler	Isıtma	Donatı
Titreşimli Tabla	Diyafram Duvar	Dondurma	Hasır
Derinde Titreşim	Palplanş Duvar	Jet Grout	Ankraj
Statik Sıkıştırma	Geomembran	Çimento v.b. Katkı Maddeleri	Gabion
Sıkıştırma Kazıkları	Basıncılı Hava		Bohçalama
Patlatma	Pompalama		Taşkolon
			Geokolon
			Fiber

2.2 Zeminlerde Enjeksiyon

Zemine dışarıdan sondaj kuyusu benzeri bir girişten belli bir basınçla iletilen akışkanlaştırılmış bir madde ile stabilizasyon ve iyileştirme yapmaya yönelik işlemlere enjeksiyon denilmektedir.

Bu iyileştirme zemindeki dayanım, gerilme ve deformasyon özellikleri gibi mühendislik özelliklerini değiştirerek elde edilmektedir. Zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için zemin geçirimliliği azaltılıp kayma mukavemeti arttırılmakta ve zemin

enjeksiyonu ile parçacıkların birbirlerine kenetlenmesi sağlanarak zemindeki şekil değiştirme direnci arttırılmaktadır. Zemin enjeksiyonu işlemlerinde çimento, bentonit, bitüm, kireç gibi kimyasal maddeler çözelti halinde kullanılmaktadır. Enjeksiyon malzemesi, enjeksiyonun amacına ve zemindeki boşluklu yapıya göre belirlenmektedir. Enjeksiyon teknikleri, zemin özellikleri ile enjeksiyon malzemesinin zemine uygulanma biçimine göre belirlenmektedir. Enjeksiyonun diğer adı da içitme olarak bilinmektedir.

2.2.1 Zeminlerde Enjeksiyonun Tarihi

Zemin iyileştirmesinde enjeksiyon yöntemi 19. yüzyıl başlarında ortaya çıkmış, en önemli gelişmeler ise 20. yüzyılda meydana gelmiştir. Enjeksiyon teknolojisi sürekli gelişim göstermekte olan, tarihi diğer zemin iyileştirme teknikleri kadar eskiye dayanan bir teknolojidir. Günümüzde enjeksiyon; kullanılacak malzeme ve teknikler gelişip değiştikçe kendini yenilemektedir. İlk enjeksiyon uygulaması 1802’de Dieppe de Charles Berigny tarafından Fransa’da dalgaların gelgit sonucu aşındırdığı bir köprü ayağının temeline su ve puzolanlı çimentodan oluşan süspansiyonel bir karışımla zeminde açmış olduğu deliklere enjeksiyon yapılmasıyla ortaya çıkmıştır. Enjeksiyon yöntemi ilk ortaya çıktığında puzolan, kil ve hidrolik kireç enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmıştır. 1821 yılında Portland çimentosu bulunmuş ve enjeksiyon malzemesi olarak çimento kullanılmaya başlanmıştır.

Albert Francois 1914 yılında kesonların zemine uygulanmasında yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu yöntemini kullanmıştır. Hugo Joosten 1925 yılında yüksek kırılma direnci ve kalıcı sertlikle elde edilen jel tipi enjeksiyon yöntemi kullanarak tanımlanmıştır. Enjeksiyon için gerekli basınca daha kolay ulaşılması II. Dünya Savaşı’ndan sonra ahşap malzeme kullanılarak oluşturulan pompaların yerine demir elemanlar içeren hidrolik pompalar kullanılmasıyla sağlanmıştır. 1950’de tek bileşenli enjeksiyon tekniği geliştirilmiştir. 1970 yılını takip eden 10 yıl içerisinde enjeksiyon uygulanan zeminin şekil değiştirme biçimleri ve davranışları deney yöntemiyle incelenmiştir. Zeminlerde enjeksiyon, son 10-15 yılda deprem sırasında sıvılaşabilecek gevşek zeminlerde, granüler zeminlerde sıvılaşmanın azaltılmasında, zemin taşıma kapasitesinin arttırılmasında ve tünel kazımı sebebiyle yüzeyde meydana gelebilecek zararlı oturmaların engellenmesinde kullanılmaktadır.

2.2.2 Zeminlerde Enjeksiyon Amacı ve Uygulama Alanları

Enjeksiyon, zemindeki boşluklara akışkanlaştırılmış bir malzemenin doldurulması olarak tanımlanmaktadır. Enjeksiyon, zeminin daha yoğun ve daha az geçirgen olmasını sağlayarak daha güçlü bir zemin oluşturulmasını hedeflemektedir. Enjeksiyon uygulamaları çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bunlar; baraj temellerinde geçirimsizliği sağlamak, sıvılaşma durumunun azaltılması, zemin güçlendirilmesi, mukavemetin iyileştirilmesi, komşu yapıların güvenliği için kazı duvarları yapılması gibi uygulamalardır. Zemin enjeksiyonunun kullanım alanları;

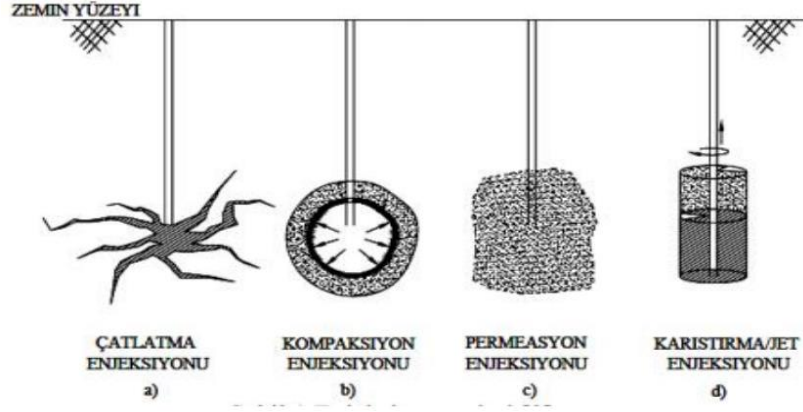
- Bitişik kazılarda zemin hareketinin önlenmesi
- Aşırı oturmaların engellenmesi için zemindeki boşlukların doldurulması
- Yapıların sonradan büyütülmesinde zemin emniyet gerilmesini artırma
- Yer altı sularının akışını kontrol etme, eğim stabilizasyonu
- Yapı ile zemin arasındaki boşlukların doldurulması, temel takviyesi
- Dinamit atımları ile gevşemiş zemin tabakasını üst katmanlarında sağlamlaştırma gibi alanlardır.

Zemin enjeksiyonlarının başarılı olması için enjeksiyon harcının türü, dolgu malzemesinin özelliği, enjeksiyon tekniği ve zeminin enjeksiyona karşı davranışının bilinmesi gerekmektedir.

2.2.3 Zeminlerde Enjeksiyon Çeşitleri

Zeminlerde enjeksiyon çeşitleri 4 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

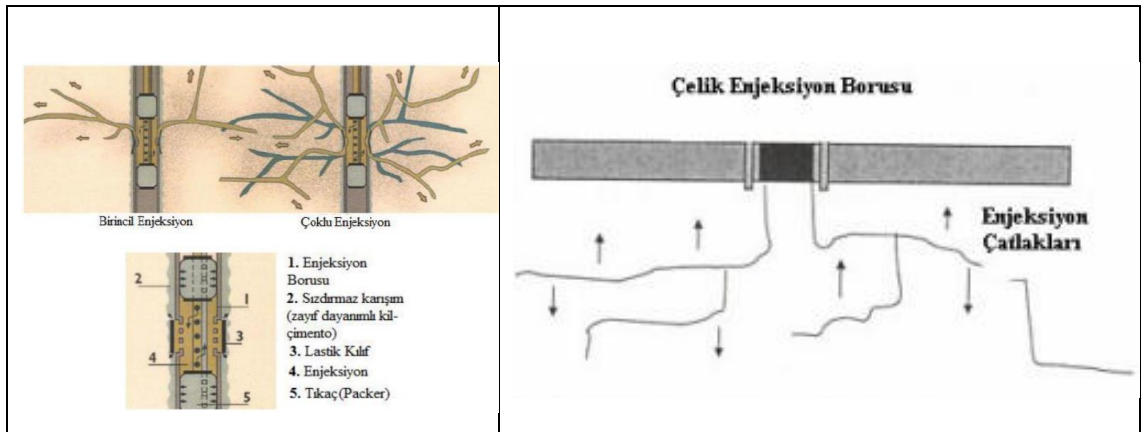
- Çatlatma Enjeksiyonu,
- Kompaksiyon Enjeksiyonu
- Jet Enjeksiyonu (Jet 1, Jet 2, Jet 3, Süper Jet)
- Permeasyon Enjeksiyonudur (Mitchell, 1981).



Şekil 2.1. Enjeksiyon Teknikleri (Mitchell, 1981)

Çatlatma Enjeksiyonu

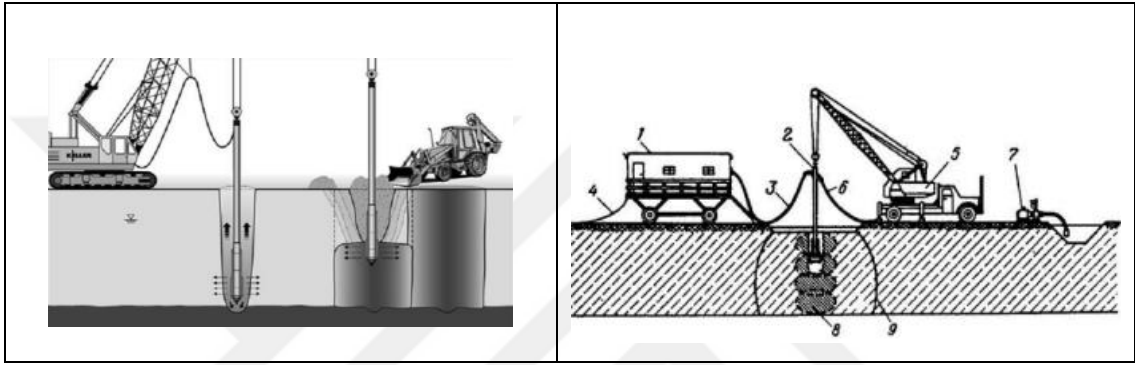
Çatlatma enjeksiyonu tekniğinde zemine kontrollü olarak 5-40 MPa arasında yüksek bir basınç değeri kullanılarak düşük viskoziteye sahip çimento bazlı harcın enjekte edilmesiyle zemin çatlatılır. Bu enjeksiyon yöntemi, zemin geçirirliiliği düşük olan ve permeasyon enjeksiyonu yapılmasının mümkün olmadığı zeminlerde uygulanmaktadır. Bu uygulama yöntemi, zeminlerde oluşan farklı oturmalar ve tünel uygulamaları çalışmalarıyla gelişim göstermiştir (Tunçdemir, 2004). Çatlatma enjeksiyonunda zeminin içerisinde damar şeklinde sert bir biçimde çimento ağları oluşarak zeminin kontrollü bir şekilde sıkıştırılması sağlanmaktadır. Hazırlanan çimento şerbeti 5- 40 MPa aralığında yüksek bir basınçla zemine enjekte edilir ve bunun sonucunda zeminde çatlayan yerlere dolar. Zeminde meydana gelen çatlakların boyu ve çapı enjeksiyonda kullanılan basınca ve zemindeki geostatik gerilmelere bağlıdır (Tunçdemir, 2004).



Şekil 2.2. Çatlatma enjeksiyonu (Keller, 2014; Gallavresi, 1992)

Kompaksiyon Enjeksiyonu

Zeminden alınan bir karışımla veya çimentodan oluşan bir harç yaklaşık 3 MPa'lık bir basınçla zemine enjekte edilir. Bu yöntem gevşemiş veya örselenmiş zeminlerde kullanılmaktadır. Kompaksiyon enjeksiyonu, uygulanan noktadan çok fazla uzağı etkilememekte ve bu yönüyle çatlatma enjeksiyonu yöntemine benzemektedir. Basıncının yüksek olması sebebiyle zemin üzerinde kabarmalar görülməsi mümkündür (Essler vd., 2000).



Şekil 2.3. Kompaksiyon enjeksiyonu (Raju ve Sondermann, 2005; Lomize ve diğ., 1973)

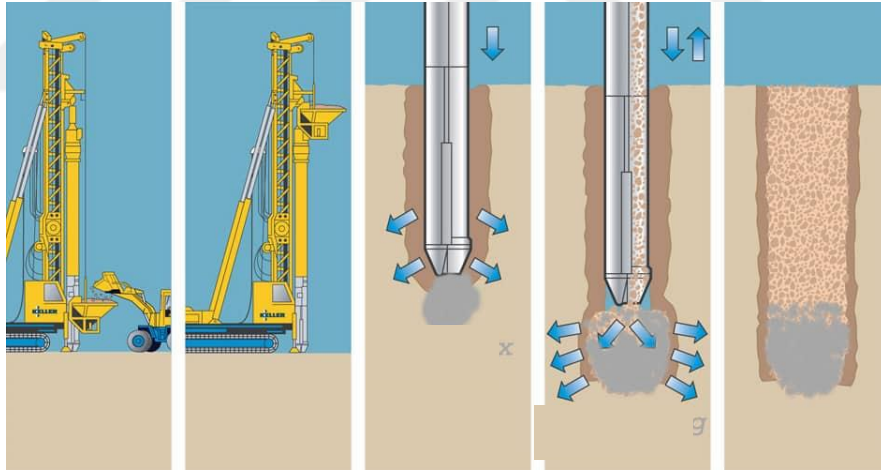
Kompaksiyon enjeksiyonu yönteminde derinliği fazla olan zemin tabakalarında iyileştirme, dar bölgelerde rahat ekipman kullanımı, enjeksiyon esnasında çıkan titreşimin minimum düzeyde olması, uygulama esnasında diğer yöntemlere nispeten daha temiz ve atıksız bir çalışma ortamı bırakılması gibi nedenlerden dolayı son dönemlerde diğer yöntemlerden daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır (Toğrol ve Çinicioğlu 1994). Kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi; Gevşek zeminlerde sıkılaştırma, yapı temelinde destekleyici kolon oluşturma ve oturmuş yapılarda temel sistemlerinin kaldırılıp tekrar düzeltilmesi gereken yerlerde kullanılabilir (Toğrol ve Çinicioğlu 1994).

Jet Enjeksiyonu (Jet Grout)

Jet Grout enjeksiyonu yöntemi, uygulanacak zeminin istenilen derinliğe kadar özel bir delgi aracı ile delinerek jet grout ekipmanı aracılığıyla 400- 500 bar aralığında bir basınçla püskürtülen çimento şerbetinin kullanılan özel bir tijin belirli bir hızla döndürülmesi sonucunda yerinde silindirik bir kolon oluşturma işlemidir. Bu uygulama sonucunda

çimento- zemin karışımı zamanla priz alıp katılaşıp çimento- zemin kolonları (soilcrete) oluşturulur. Böylece zemin mukavemeti artırılarak zemindeki deformasyonlar ve permeabilite azalır. Bu kolonlar yüksek basınçla enjekte edilmeleri, uygulandıkları zemini kesmeleri ve zeminle çimento şerbetinin birbirine karışması sonucunda oluştuğu için homojen eleman rolü almaktadır. Jet Grout yöntemi kullanım alanları diğer enjeksiyon yöntemlerine oranla daha yüksektir (İdiman ve Okyay, 1987). Bu sebeple son yıllarda öne çıkan enjeksiyon yöntemleri arasında yer almaktadır. Diğer enjeksiyon yöntemlerinden jet grout enjeksiyonunu ayıran temel özellikler ise;

- Malzeme miktarının önceden hesaplanabilir olması (Tasarım boyutları önceden planlandığı için)
- Her cins zemine uygulanabilir olması
- Jet Grout kolonlarının istenilen derinlik ve çapta imal edilebilir olması
- Kimyasal enjeksiyondan ziyade su- çimento karışımı kullanılarak çevre kirliliğini önlemesidir (İdiman ve Okyay, 1987).



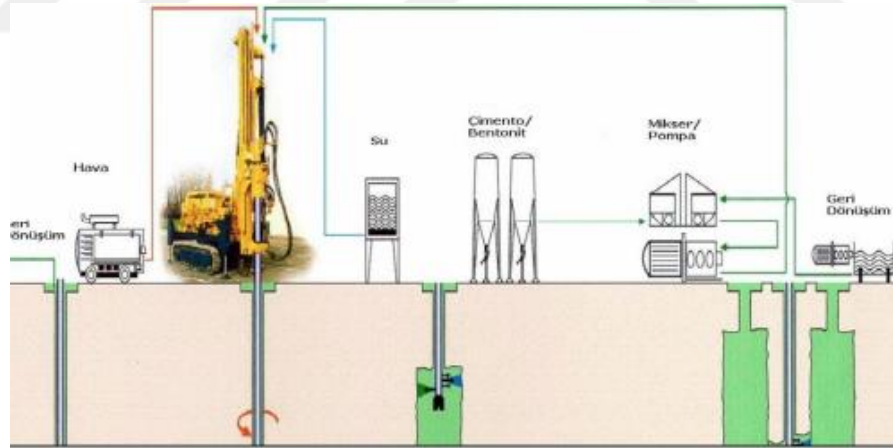
Şekil 2.4. Jet enjeksiyon uygulamaları (URL- 1)

Durgunoğlu (2006)' a göre jet enjeksiyonunda kullanılan kolonları;

- Havuz, su yapıları ve su depolarında çekme ve donatı elemanı olarak;
- Dolgu ve temeller altına düşey yükler için basınç elemanı maksadıyla deplasman kontrolü ve çekme gücünü sağlamak için
- Ankrajlı istinat yapılarında ve kazılarda ankraj ve donatı elemanı olarak

- Yüksek yer altı su seviyesi olan derin kazılarda ve geçirimli zeminlerde taşıyıcı elemanlar arasında geçirimsiz perde kaplama elemanı olarak
- Kazılarda düşey eğilmenin etkilediği iksa elemanı olarak
- Kazı alanlarında tabandan gelmesi muhtemel yer altı sularını engellemek için
- Yüksek eğimli yerlerde stabilitenin sağlanması amacıyla zemin takviye elemanı olarak
- Zemindeki sıvılaşma riskine karşı yapı etrafında ve yapı temelinde kaplama elemanları olarak
- Tünel üstü yumuşak zemin tabakasını iyileştirmek için kullanılmaktadır (Hayward vd., 2010).

Jet enjeksiyonu yöntemi uygulanırken zemin aşındırılarak çimento şerbeti ile karıştırılmaktadır. Oluşturulan enjeksiyon ve zemin karışımının dayanımı karışımın homojenliği ile ilişkilidir. Farklı zemin tiplerine uygulanan jet enjeksiyon yöntemi sonucunda oluşan soilcrete kolonlarının serbest basınç dayanım değerleri değişiklik göstermektedir.

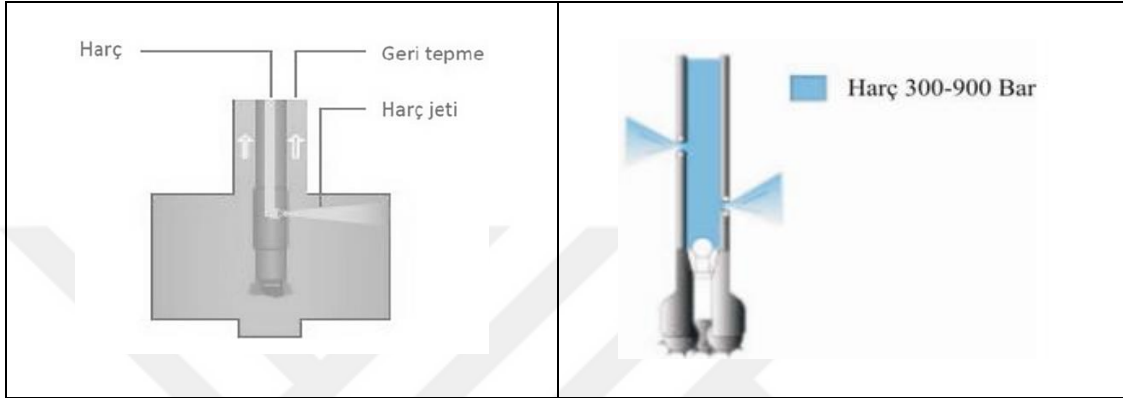


Şekil 2.5. İdeal Jet Enjeksiyonu (Baş, 2006)

Jet enjeksiyonu yöntemi zemin tipine ve uygulanmak istenen kolonun özelliğine göre farklılık göstermektedir. Jet enjeksiyon yöntemi; amacı ve kullanım şekline göre dört tip olarak değerlendirilmektedir. Bunlar, Jet 1, Jet 2, Jet 3 ve süper jet olarak bilinmektedir.

Jet 1 yöntemi:

Diğer yöntemler arasında en kolay uygulanan yöntemdir. Jet 1 yönteminde enjeksiyon takımı tek çeperli bir borudan oluşur ve enjeksiyon malzemesi bu tek çeperli borudan 200 m/sn ile 300-600 bar oranlarında bir basınçla zemine enjekte edilir. Jet 1 yöntemiyle oluşturulan kolon modelleri zemin tipi ve parametre aralıklarına bağlı olup çakıllı zemin üzerinde 0.6- 1,2 m çapında kolonlar oluşturulmaktadır. Jet 1 yöntemi çakıllı zeminlerde etkiliyken kohezyonlu zeminlerde kullanılması önerilmemektedir (Keller, 2014).

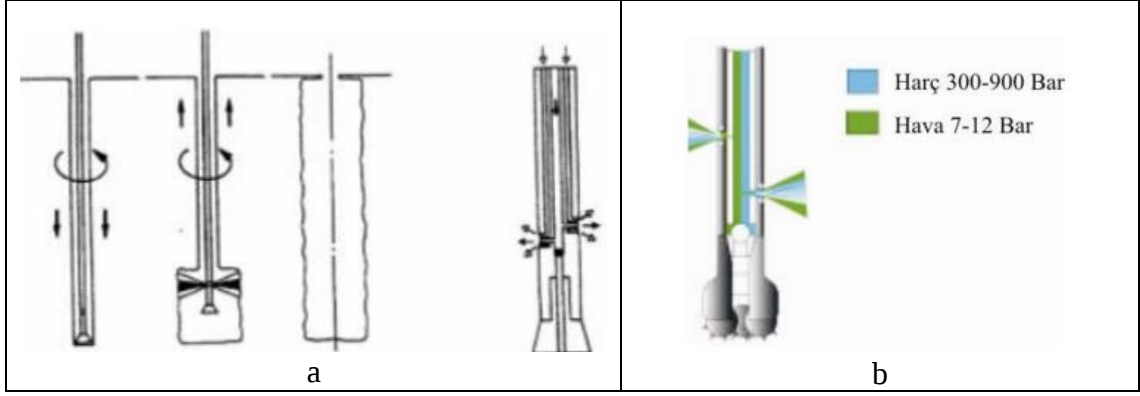


Şekil 2.6. Jet 1 yöntemi (Keller, 2014; URL-2)

Jet 2 yöntemi:

Jet 2 yöntemi çift akışkanlı bir yöntem olup uygulamada çift çeperli bir boru kullanılmaktadır. Orta borudan zemine, basınçlı hava yardımıyla enjeksiyon malzemesi püskürtülmektedir. Basınçlı hava yaklaşık 8-12 bar aralığında olup sürtünme kayıplarını azaltmakta ve bunun sonucunda Jet 1 yöntemine oranla daha büyük çapta kolonlar oluşturulmaktadır (Bakım, 2007). Kumlu zeminde Jet 2 yöntemi kullanılarak yapılan bir enjeksiyon uygulamasında kolon yapılırken zeminin örselenmesi için 45 MPa değerinde bir basınç yardımıyla, harç debisi 139 lt/dk, çimento/su oranı 1-1.25, harcın birim hacim ağırlığı 16-17 kN/m³ ve delgi borusunun dönme hızı 8-10 devir/dk iken 1.4 m çapında kolon elde edilmiştir (Ichihashi vd., 1992).

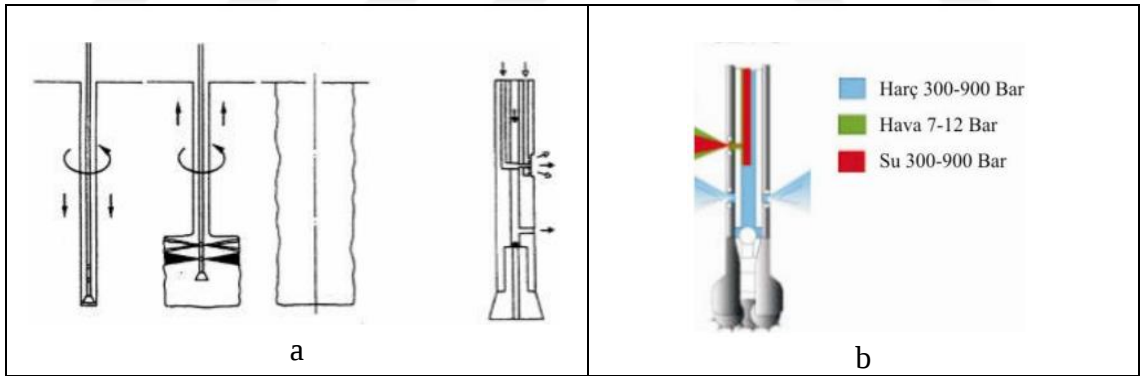
Jet 2 yönteminin diğer yöntemlere göre dezavantajı ise çimento ve zemin içerisine hava püskürtülmesi sebebiyle kolondaki havanın artmasıdır. Jet 2 yöntemi sonucu oluşturulan zemin- çimento mukavemeti Jet 1 yöntemine oranla daha düşüktür.



Şekil 2.7. Jet 2 yöntemi (Bakım, 2007; URL-2)

Jet 3 yöntemi:

Jet 3 yönteminde iç içe borular kullanılmaktadır. Ortadaki borudan su 400 ile 600 bar aralığında bir basınçla gelirken hava, 8 ile 12 bar aralığında bir basınçla gelir. 30- 80 bar basınçlı enjeksiyon malzemesi de en dış boru içerisinde farklı bir nozuldan hava- su karışımının içine enjekte edilmektedir. Jet 3 yöntemi ile yapılan kolonlar en çok 2m uzunluğunda olabilmektedir (Küsin, 2009).



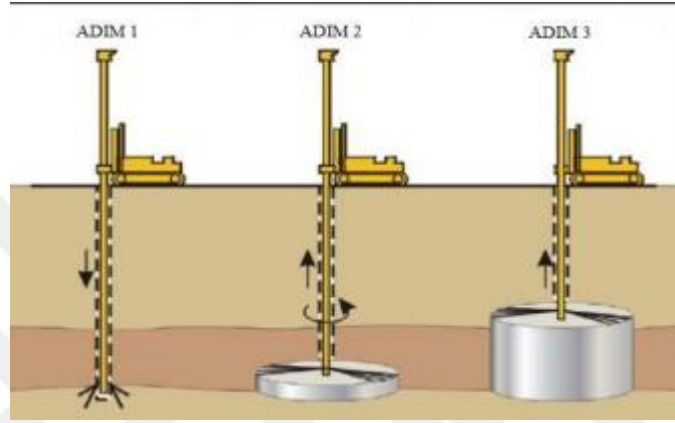
Şekil 2.8. Jet 3 yöntemi (Bakım, 2007; URL-2)

Jet 3 yönteminin en etkili olduğu zemin kohezyonlu zemin türüdür. Ancak Jet 3 yöntemi ile aynı dozajda yapılan enjeksiyon mukavemeti Jet1 ve Jet 2 yöntemlerine göre daha düşüktür. Bu durumun sebebi Jet 3 yönteminin yüksek su miktarı içermesidir (Bakım, 2007).

Süper jet yöntemi:

Süper jet yöntemi diğer yöntemlerle oluşturulan kolonlardan daha yüksek çapta kolon üretimini daha yüksek hız ve düşük maliyetle elde etmek amacıyla geliştirilmiştir. Süper jet yöntemiyle 3 metre ile 5 metre arasında çaplarda kolon üretilebilmektedir.

Süper jet yöntemi tijlerin ucundaki büyük çaplı nozullardan çimentolu harç ve hava karışımının yüksek basınçla püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Zemin parçalanarak kolon oluşturma işlemi gerçekleştirilmektedir (Küsin, 2009).



Şekil 2.9. Süper jet yöntemi (Welsh ve Burke, 2000)

Süper jet enjeksiyonu sonucu oluşturulan kolon uygulamalarında 3 ile 4 devir/dk dönüş hızı, 400 bar enjeksiyon basıncı kullanılarak kolon çapının 4 metreye kadar ulaşması sağlandığı gözlemlenmiştir. Süper jet yöntemi; zemin suyu kontrolünde, perde duvar imalatında, sıvılaşmış zemin tabakalarının stabilizasyonunda ve kazı yan yüzlerinin desteklenmesinde kullanılmaktadır (Küsin, 2009).

Permeasyon (Sızma) Enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu, sızma enjeksiyonu olarak da bilinmekte olup enjeksiyon sıvısının sabit bir hızla zemine enjekte edildiği bir tekniktir. Permeasyon enjeksiyonu, zemindeki boşluklara viskozitesi düşük olan bir enjeksiyon malzemesinin düşük bir basınçla enjekte edilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu yöntemde zeminin hacim ve yapısında değişikliğe sebep olunmaz. Enjeksiyon malzemesi farklı karışımlardan oluşturabilir. Bu karışımlar zeminin dane çapına ve malzemenin inceliğine göre belirlenmektedir (Bell, 1993). Zeminin enjekte edilebilirliği N katsayısı ile açıklanmaktadır. Bu durumda enjekte olabilirlik N katsayısıyla açıklanır.

- Burwell (1958)' in önerisine göre süspansiyonlarda kullanılacak (2.1) denklemi;

$$Na = \frac{(D_{15})_{zemin}}{(D_{85})_{enjeksiyon}} \quad 2.1$$

Bu denklemde;

$D_{15}(\text{zemin})$: %15 zemin dane çapı

$D_{85}(\text{enjeksiyon})$: %85 enjeksiyon karışımı dane çapı

$Na < 11$ için enjeksiyon mümkün değil.

$Na > 24$ için enjeksiyon her zaman mümkün.

$11 < Na < 24$ için enjeksiyon deneme yoluyla belirlenebilmektedir.

- Burwell (1958)' in önerisine göre süspansiyonlarda kullanılacak (2.2) denklemi;

$$Nj = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyon}} \quad 2.2$$

Bu denklemde;

$D_{10}(\text{zemin})$: %10 zemin dane çapı

$D_{95}(\text{enjeksiyon})$: %95 enjeksiyon karışımı dane çapı

$Nj > 11$ için enjeksiyon her zaman mümkün. 24

$Nj < 6$ için enjeksiyon mümkün değil.

$6 < Nj < 11$ için enjeksiyon deneme yoluyla belirlenebilmektedir.

Littlejohn (1986)' a göre geçirimsizlik kat sayısı $k = 5 \times 10^{-5}$ m/s'den düşük zeminler iyileştirilirken çimento bazlı malzeme kullanılmamalıdır. Akbulut ve Sağlamer (2002)' e göre granüler zeminler için enjeksiyon yapılabilirlik oranında rölatif sıklığı, enjeksiyon dane dağılımı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon su/çimento oranı dikkate alınmalıdır.

- Akbulut ve Sağlamer (2002)' e göre granüler zeminler için enjeksiyon yapılabilirlik oranı (2.3) denklemi;

$$N = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyon}} + k_1 \frac{s/\zeta}{FC} + k_2 \frac{P}{Dr} \quad 2.3$$

Bu denklemde;

w/b- s/ç: Enjeksiyon Su/Çimento oranı

FC: Zeminin 0.6 mm elekten geçen ince dane oranı (yüzde olarak).

Dr: Zeminin rölatif sıkılığı

P: Enjeksiyon basıncı (kPa)

k₁, k₂ : N değerlerini normal duruma getirmek için kullanılan sabitler k₁ = 0,5 k₂ = 0,01 (1/kPa)

N < 28 için zemin enjekte edilemez.

N > 28 için zemin enjekte edilebilir.

Bu değerler için normal parametreler;

0 < FC < %6

0,8 < s/ç < 2

50 Pa < P < 200 olarak ifade edilmektedir.

Harç enjektesi zemin geçirgenliğine bağlıdır ve enjeksiyon işlemini iyi anlamak gereklidir. Harcın zemin boşluklarını nasıl doldurduğu ve harç geçirgenliğini nelerin etkilediği bu işlem için temel adımlardır. Düşük viskoziteli harçlar temiz kum, açık dolgu ve çakıllı zeminlere nüfuz etmeleriyle sınırlıdır ve normal bir çimento harcı (Portland Tipi I) kullanılarak geçirgenliği 5x10⁻⁴ m/sn' den az olan zeminlere nüfuz edilmesi zordur. Zemine enjekte edilen harç genellikle 3 şekilde nüfuz etmektedir. Bunlar; çatlaklar yoluyla geçirgenlik, granüler (kaba daneli) zeminde geçirgenlik, boşluk ve çatlakları çimento harcı ile doldurma

- Zemin geçirgenliği, enjeksiyon debisi ve harç viskozitesi arasındaki ilişkinin silindirik boşlukta akışını koruması için permeasyon enjeksiyonu için (2.4) denklemi;

$$Pe = \frac{Q\gamma\eta}{2\pi n k_{\eta} w} \ln \frac{R}{R_o} \quad 2.4$$

2.3 Enjeksiyon Tasarımı ve Parametreleri

2.3.1 Enjeksiyon Testi ve Tekniği

Zeminler kendi içerisinde farklılıklar oluşturmaktadır. Bu farklılıklardan ötürü birçok farklı harç ve enjeksiyon tekniği bulunmaktadır. Bu bağlamda Çizelge 2. 3'te Avrupa standartlarına göre zemin tipleri ve permeasyon enjeksiyon tekniğinin işleyişi gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Zemin Tipleri ve Enjeksiyon Tekniği (Avrupa Standartları 1996'dan sonra)

Enjeksiyon Yöntemi Zemin Tipi	Permeasyon Enjeksiyonu
Çakıl, kaba kum ve kumlu çakıl $k > 5 \times 10^{-3}$ m/sn	Saf çimento süspansiyonlar, çimento esaslı süspansiyonlar
Orta kum $5 \times 10^{-3} < k < 1 \times 10^{-5}$	Mikro-ince süspansiyonlar, Solisyon
İnce kum, silt, siltli kil $5 \times 10^{-4} < k$	Özel kimyasallar

Zeminlerin enjekte edilebilirliğinin değerlendirilmesi için ampirik geçirgenlik oranı kullanılmaktadır.

Bu oranlar; $N = D_{15}/d_{85}$ ve $N_c = D_{10}/d_{95}$ kullanılabilir;

$N > 24$ ise enjeksiyon başarılıdır.

$N_c > 11$ ise çimento enjeksiyonları mümkündür.

$N_c < 6$ ise çimento enjeksiyonları mümkün değildir.

D_{10} - zeminin dane dağılım eğrisinde %10'a karşılık gelen boyutunu

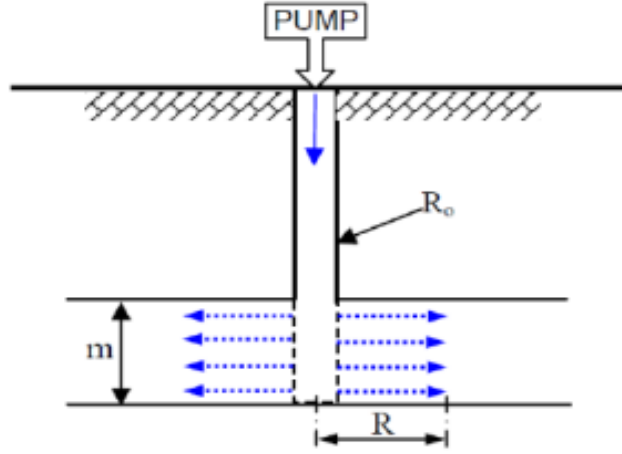
D_{15} - zeminin dane dağılım eğrisinde %15'a karşılık gelen boyutunu

d_{85} - çimentonun dane dağılım eğrisinde %85'a karşılık gelen boyutunu

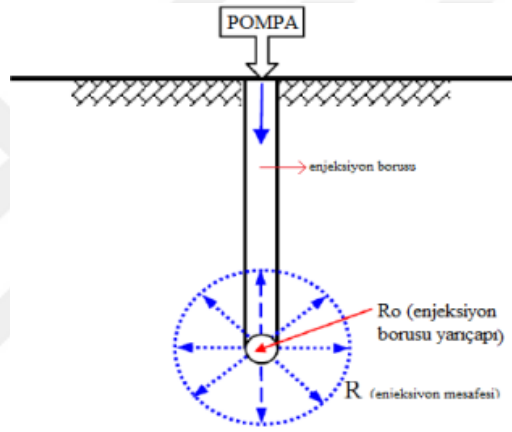
d_{95} - çimentonun dane dağılım eğrisinde %95'a karşılık gelen boyutunu ifade etmektedir.

2.3.2 Gözenekli Ortamda Harç Akış Teorisi

Zeminin harç geçirgenliği, geçirgenlik katsayısı ile ilgilidir. Geçirgenlik katsayısı Darcy yasasına göre ölçülmektedir. Belirli bir sıvı için geçirgenlik katsayısı boşluk oranının fonksiyonunu oluşturmaktadır. Ancak zemin yapısı, dane boyutu, doygunluk vb. diğer faktörlerde bu değeri etkilemektedir. Geçirgenlik, düzgün zeminlerde temel matematiksel modeller yardımıyla düzenli bir form izlemektedir (Raffle ve Greenwood, 1961).



Şekil 2.10. Silindirik Borudan Radyal Enjeksiyon (Çelik, 2016)



Şekil 2.11. Küresel Akış Enjeksiyonu (Çelik, 2016)

Yerel hidrostatik basınç (P_e) R_o yarıçaplı enjeksiyon basıncının küresel bir boşlukta akışını koruması için gereklidir.

- Zemin geçirgenliği, enjeksiyon debisi ve harç viskozitesi arasındaki ilişkinin küresel boşlukta akışını koruması için (2.5) denklemi;

$$P_e = \frac{Q\gamma}{CkG} = \frac{Q\gamma\eta}{Ck\eta w} \quad 2.5$$

- Zemin geçirgenliği, enjeksiyon debisi ve harç viskozitesi arasındaki ilişkinin silindirik boşlukta akışını koruması için (2.6) denklemi;

$$P_e = \frac{Q\gamma\eta}{2\pi n k \eta w} L n \frac{R}{R_o} \quad 2.6$$

Bu denklemde;

Q: enjeksiyon debisi, m³/sn

k_G: zemin enjeksiyon geçirgenliği m/sn

γ: enjeksiyon harcının birim hacim ağırlığı, kN/m³

C: şekil katsayısı = 4πR_o, R_o küre yarıçapı

k: zemin su geçirgenliği m/sn

η_w: suyun viskozitesi, Pa.sn

η: viskozite Newton akışkan için, Pa.sn ifade etmektedir.

1 Pa.sn = 1 N.sn/m²

η_w = 10.09 mPas 20°C

- Küresel harç enjeksiyonu için t zamanda alınan harç (2.7) denklemi;

$$Qdt = 4\pi r^2 ndr$$

2.7

Bu denklemde;

n = zemin boşluk oranı (boşluk hacim/toplam hacim)

dr = harç enjeksiyon mesafesini ifade etmektedir.

- Enjeksiyon harcının R_o yarıçaplı küresel bir boşluktan R mesafesini kat etmesi için gerekli süreyi hesaplamak için (2.8) denklemi;

$$t = \frac{4\pi n}{3Q} (R^3 - R_o^3)$$

2.8

Bu denklemde;

R = enjeksiyon noktasına olan uzaklık,

R_o = enjeksiyon boru yarıçapını ifade etmektedir.

- Zemin ve harcın özelliklerinden enjeksiyon noktasından uzaklığı (R), nüfuz etme süresini (t) ve enjeksiyon aralığını (2.9) denklemiyle tahmin etmek mümkündür,

enjeksiyon harcının basıncı $p(R)$, sondaj deliğinin R mesafesi arttıkça azalmaktadır;

$$t = \frac{\pi m n}{Q} (R^2 - R_o^2) \quad 2.9$$

- Enjeksiyon harç basıncı (2.10) denklemiyle hesaplanmaktadır;

$$p(R) = P_e - \frac{Q \gamma \eta}{2 \pi n k \eta w} \ln \frac{R}{R_o} \quad 2.10$$

Bu denklemlerde görüldüğü üzere zeminin enjeksiyon borusundan belirli bir mesafe boyunca işlenmesi için gereken süre (t), harcın sertleşme süresinden daha büyük olmamalıdır daha yüksek bir enjeksiyon basıncı (zeminin çatlamasına neden olmadan) veya daha düşük bir viskozite harcı kullanılarak arttırılabilen enjeksiyon (Q) oranına bağlıdır. Daha büyük çaplı enjeksiyon için belirli bir mesafede daha yüksek basınç gerekmektedir.

2.3.3 Harç Enjeksiyonunda Doğal Fiziksel Kısıtlamalar

Permeasyon enjeksiyonu; dane büyüklüğü, geçirgenlik ölçümleri ve danelerin dağılımı ile uygulanacağı zeminin gözenek boyutunun doğru değerlendirilmesine bağlı bir uygulamadır. Harç işlenmesine direnç gösteren üç ana fiziksel neden vardır. Bunlar;

- Parçacıkların filtrelenmesi, zemin boşluklarından geçemeyecek büyüklükteki partikülleri ayırmak için kullanılır
- Harç viskozitesi, sıvının zemin boşluklarından akma hızını belirler;
- Kayma direnci, harç partiküllerinin kıvrımlı zemin boşluklarından akmasıdır.

2.3. Enjeksiyon Yöntemi Parametreleri

Fransız Tünel Birliği (AFTES 1991)' ne göre enjeksiyon parametreleri 4 tanedir. Bunlar harç hacmi (V), enjeksiyon basıncı (P), enjeksiyon hızı (Q), enjeksiyon süresi(t) ve bağıntısı $t = V/Q$ dur.

2.4 Çimento Esaslı Harçların Enjeksiyonu

Olması gereken mukavemet özelliklerini sağlamayan zeminleri iyileştirmek için bazı yöntemler uygulanmaktadır. Zeminlerde görülen yüksek deformasyon ve düşük taşıma gücü sorunlarının yanı sıra şişme potansiyeli yüksek ve işlenebilirliği az olan zeminlerle de karşılaşmak mümkündür. Böyle durumlarda zeminin bu katmanı kaldırılıp yerine mühendislik parametreleri daha iyi olan bir zemin yerleştirilerek sıkıştırılabilir. Ancak bu yöntem her zaman uygulanamayabilir ve bu sebeple farklı zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Yeni bir katman ile değiştirilmesi mümkün olmayan zeminlerde kimyasal veya fiziksel yöntemler kullanılarak bir zemin iyileştirmeye gidilebilir. Ancak mekanik yöntemlerin yetersiz kaldığı zemin tipleri mevcuttur. Kohezyonlu zeminler bu zemin tipine örnek verilebilir. Bu bağlamda bu tip zeminlerde kimyasal yöntemlerden olan özellikle bitüm, kireç, çimento ve reçine gibi katkıları kullanılarak iyileştirme sağlanmaktadır (Hakansson, 1992).

Enjeksiyon, akışkan bir harcın belli bir basınçla zemin içerisindeki çatlaklara enjekte edilmesi ve bu harcın zamanla sertleşerek zemini güçlendirmesi şeklinde uygulanmaktadır. Burada zemin çatlak kayalık bir alan da olabilmektedir. Zeminlerin parametreleri yetersiz olanlarında bina yapımına izin verilmemekte ancak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesiyle izin verilebilmektedir (Hakansson, 1992).

Enjeksiyon yöntemi genel olarak taşıma gücünün artması amacıyla çatlaklı kayalık ve granüler alanlarda; su sızmasını engellemek amacıyla geçirimsizlik perdesi rolünde barajlarda uygulanmaktadır. Bu teknikle zemin parçacıkları birbirine bağlanıp içerisindeki boşlukların doldurulmasıyla ortamdaki kayma mukavemeti parametreleri artırılmaktadır (Gallavresi, 1992).

Enjeksiyon, ilk uygulanmaya başlandığı zaman baraj temeli ve maden endüstrisinde dayanım kontrolü ve su sızıntılarını önlenmesi durumlarında kullanılmıştır. Daha sonraları zeminlerde eğim durağanlığını arttırmak, deformasyonları azaltmak, zemindeki boşluklu yapıyı doldurmak ve yanlış oturma yapan yapıların düzeltilmesi, iksa sistemlerindeki yanal gerilmelerin iyileştirilmesi, ankrajların zemine sabitlenmesi ile sıvılaşma oranı yüksek zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır (Gallavresi, 1992).

Enjeksiyon malzemeleri üç çeşit üzerinden değerlendirilmekte olup bu çeşitler performans ve reolojik özellikler doğrultusunda gelişmiştir. Enjeksiyon malzemesi çeşitleri; daneli karışım, solüsyon ve emülsiyonlardır (Gallavresi, 1992).

- Emülsiyon; Her iki bileşenin de sıvı olması durumunda görülmektedir. Sıvılardan biri diğerinin içinde damlacık şeklinde dağılır ve koloid bir karışım oluşur. Bu karışımlara emülsiyon denilmektedir. Bitüm, emülsiyona örnek olarak verilebilir
- Süspansiyon; Bileşenlerden birinin katı diğerinin sıvı olması durumunda görülmektedir. Katı parçacıklar, sıvı içerisinde erimeden dağılarak süspansiyonel karışımı oluşturmaktadır. Süspansiyona su- kil ve su çimento örneğini vermek mümkündür.
- Solisyon; İki veya daha fazla sıvı malzemenin homojen olarak karışmasıyla görülmektedir. Solisyonlara organik reçine, sodyum silikat ve çeşitli kimyasal harçlar örnek verilebilir (Gallavresi, 1992).

Bu çalışmada kullanılan harç malzemesi çimento olup farklı mineral katkılarının harç malzemesine katkılarıyla permeasyon enjeksiyonuna etkilerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Gallavresi (1992)' ye göre karışım çeşitleri enjekte edilebilirliğine göre sınıflandırılmıştır. (Çizelge 2.4.)

Çizelge 2.4. Gallavrasi (1992) Karışım Çeşitleri Sınıflandırılması

Reolojik Kategori	Partiküller (Bingham Akışkanlar)			Çözeltiler (Newton Akışkanları)			Gaz Emülsiyonu		
	Kararsız	Kararlı		Koloit Çözeltiler (viskozite zamanla artmakta)		Saf çözeltiler(viskozite zamanla değişmemekte)			
Enjeksiyon Malzemesi Ana Türleri	Sadece Çimento	Bentonit veya Kil ile Çimento	Topaklaşmış Bentonit	Kimyasal Enjeksiyon Malzemeleri			Şişebilen Enjeksiyon Malzemeleri		
				Sodyum Silikat Bazlı		Organik Reçineler Bazlı	Çimento Bazlı	Organik Ürünler Bazlı	
				Yüksek Dayanımlı	Orta-düşük dayanımlı				
Uygulama Alanları	Çatlaklı Kaya ve Duvar			Mikro Fisürlü ve Geçirimli Kaya			Büyük Boşluklar veya oyuklar	Boşluklar ve hızlı akan sızıntı suları	
		GRANÜLER ZEMİNLER							
		Çakıl	Kaba Kumlar	Orta-İnce Kum		İnce Siltli Kum			
Geçirgenlik Katsayısı k(m/s)		>5x10 ⁻⁴	>5x10 ⁻⁵	>5x10 ⁻⁵	>5x10 ⁻⁵	>5x10 ⁻⁶			
Özgül Yüzey (m³/N)		<0,5	<1,5	<1,5	<4	<10			
Temel Enjeksiyon Tekniği	Yüksek Basınç	Kontrollü Hacim ve Basınç						Düşük basınç (Boşlukların Doldurulması)	

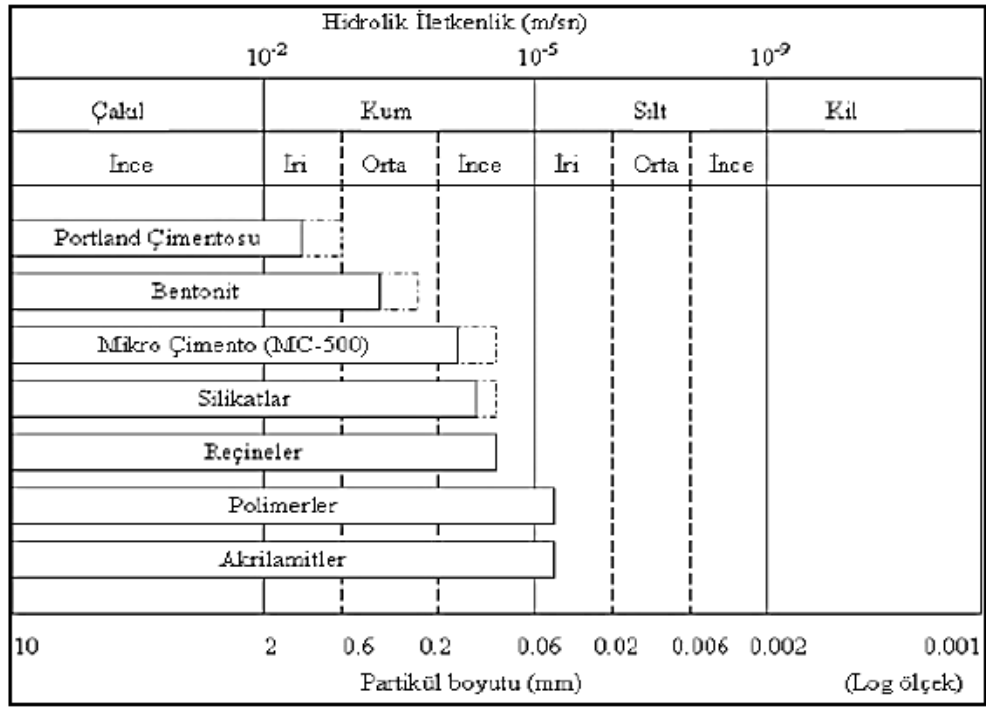
- Harç Malzemelerinin Parametreleri

Harç malzemelerinde geçirgenlik dört faktöre bağlıdır. Bunlar; stabilite, reoloji, enjeksiyon basıncı, dane boyutudur.

Bir zeminin enjeksiyon uygulaması için uygun olup olmadığını permeabilite katsayısından anlamak mümkündür. Kimyasal harç enjeksiyonları daneli yapıda olmadığı için bu harçların kullanılabilirlikleri zeminin permeabilite katsayısı ile doğrudan ilişkilidir. Daneli harçlarda ise kullanılabilirlik için bazı alt sınırlar bulunmaktadır. Bu sınırlar kimyasal harçlarda 1×10^{-6} , çimento esaslı harçlarda ise 5×10^{-4} m/sn'dir (Littlejohn, 1986).

Enjeksiyon harcının türü iyileştirilecek zeminin dane çapı ile doğrudan ilişkilidir. Orta kum boyutundan çakıl dane boyutuna kadar olan zeminlerde bentonit, çimento ve kireç gibi daneli karışımlar kullanılmaktadır. Ancak silt ve ince kumların dane çapları çok küçüktür bu nedenle bunların enjeksiyonları için kimyasal karışımlar kullanılmalıdır. Killi zeminlerde de enjeksiyon yöntemi ile iyileştirme mümkün olmayıp bu zeminlerde

kimyasal karışımlar kullanılmaktadır. Zeminlerin dane boyutlarına göre hangi enjeksiyon malzemesi ile enjekte edilmesi gerektiği Şekil 2.12’ de görülmektedir.



Şekil 2.12. Farklı Enjeksiyonlarda Penetrasyon Sınırı (Kutzner, 1996)

2.5 Çimento Esaslı Harçların Reolojisi

Reoloji yunanca akış anlamına gelen rheos ve bilim anlamına gelen logos kelimelerinden oluşmakta olup katı, sıvı ve gazların akış ve deformasyonunu incelemektedir. Reoloji, gerilme altında katıların zamana bağlı olarak şekil değişikliği (deformasyonu) ve sıvıların akışkanlık özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. Gerilme anında katı veya sıvı bütün cisimler şekil değişikliğine (deformasyon) uğramaktadır (Schwarz, 1998).

Çimento katkılı harçların reolojik özellikleri akışkanlık ve harcın zemin içerisine pompalanma özelliği ile doğrudan ilişkilidir. Çimento esaslı harç karışımları genellikle çimento, su ve farklı mineral katkıları ile hazırlanmaktadır. Çimento esaslı harçlarda su-çimento oranı (s/ç); durabilite, mekanik ve reolojik özellikleri etkileyen en önemli parametredir. Permeasyon enjeksiyon uygulamalarında s/ç oranı 0,5- 1,5 arasında değişmektedir (Moseley, 1992).

Su miktarındaki artış çimento esaslı harçların viskozitesini düşürüp malzeme akışkanlığını arttırmakta; malzemedeki çökelme oranını arttırıp mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

Çimento esaslı harçların reolojisinin iyileştirilmesinde mineral katkı malzemeleri ile kimyasal katkı malzemeleri kullanılmaktadır (Aitcin vd., 1984; Bustamante ve Gouvenot, 1983; Deere, 1982; Ruggiero, 1984; Weaver vd., 1990).

Reoloji bazı temel parametrelerden meydana gelmektedir. Bu parametreler;

- Stabilité,
- Katılma Süresi
- Viskozitedir.

Bunun yanı sıra yoğunluk, zemin mukavemeti, dispersiyonların (süspansiyon) dane boyutu ve diğer mühendislik özellikleri de reolojik parametrelere örnek verilebilir (Hakansson, 1992).

2.5.1 Stabilité

Stabilitenin sözlük anlamı kararlılıktır. Planlanan bölgeye enjekte edilecek olan karışımın sedimentasyon veya segreasyona uğramamış olma haline stabilité denilmektedir. Katı yapıdaki çok ince parçacıkların sıvı bir madde içerisinde homojen olarak dağılması sonucu süspansiyonel karışımlar oluşmaktadır. Serbest haldeyken çökme eğiliminde olan süspansiyonel karışımın daneleri dibe çökmekte bununla birlikte su yüzeye çıkıp tortulaşarak sedimentasyonu oluşturmaktadır (Warner, 2004).

Stabilité deney yapılarak kolaylıkla ölçülebilen bir parametredir. Bunun için hazırlanan enjeksiyon karışımı; silindirik, ölçekli bir kap içerisinde serbest bırakılarak karışımın malzemelerinin çökmesi beklenir, deney sonunda çöken malzeme ve bu malzemenin üzerinde kalan su yüksekliği yüzde cinsinden oranlanarak stabilité belirlenir. Belirlenen bu değer bleeding (kanama) değeri olarak bilinmektedir. Genel olarak bütün harçlar belirli bir stabilitéye sahipken sadece çimento ile hazırlanan yüksek oranda su ve

Çimentoya sahip harçlarda stabilite aranmamaktadır. Bu karışımın içerisine bentonit eklenmesi sonucu stabilitesi oluşmaktadır (Akçuru, 2020).



Fotoğraf 2.1. Bleeding deneyi (elik, 2016)

2.5.2 Priz süresinin belirlenmesi

Priz süresi, basit tanımıyla enjeksiyon malzemesinin akışkanlık özelliğini kaybederek katı hale gelme süresi olarak bilinmektedir. Su ile imento karıştırıldığında imento şerbetinin zamanla elastikliğini kaybederek katılaşmasına kadar geçen, katkı malzemesine göre değışkenlik göstererek yaklaşık 2 ile 24 saat arasında süren zaman dilimini ifade etmektedir.

Katılaşma süresi, sıcaklık ve su- imento oranına bağı olarak değışkenlik göstermektedir. Sıcaklık artışı priz süresini kısaltırken su- imento oranındaki artış bu süreyi uzatmaktadır (Warner, 2004).

2.5.3 Viskozite

Akışkan bir malzemenin deformasyona (şekil değışikliği) karşı gösterdiği mukavemete viskozite denilmektedir (Warner, 2004). TDK'ye göre viskozite “akışkanlarda moleküller arası çekim kuvvetleri(kohezyon) sebebiyle oluşan iç sürtünme, akmaya karşı gösterilen direnç.” olarak tanımlanmaktadır. Enjeksiyon karışımının viskozitesi, karışımın belli bir miktarının huni şeklinde, karakteristik özelliklere sahip bir kaba

dökülmesi sonucunda ne kadar sürede aktığı ile ölçülmektedir. Bu kaplar arasında en bilineni Mars konisidir (Tan ve Zaimoğlu, 2004).

Enjeksiyon yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan süspansiyonel karışımlar Bingham sıvısı olarak tanımlanmaktadır. Bingham sıvılarında viskozite değeri Newton sıvılarının aksine kayma gerilmesi ve kayma oranına göre değişkenlik göstermektedir. Bingham modeline göre eğim viskoziteyi göstermektedir.

- Bingham sıvıları; (2.11) denklemine göre belirlenmektedir.

$$\tau = \tau_0 + n_p \frac{dv}{dz} = \tau_0 + n_p \gamma \quad 2.11$$

- Laminer akım için (2.12) denklemi;

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} = \eta \gamma \quad 2.12$$

Bu denklemde;

τ = sıvı içindeki kayma gerilmesi

μ = viskozite

dv/dz = hız gradyanını (eğim)

μ : dinamik girdap viskozitesi

η : basınçlı viskozite katsayısını temsil etmektedir.

- Türbülanslı akış için (2.13) denklemi;

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dz} \quad 2.13$$

Bu denklemde;

τ : kayma gerilmesi

μ : dinamik girdap viskozitesi

dy/dx = hız gradyanını (eğim)

η : basınçlı viskozite katsayısı

- Kinematik Viskozite için (2.14) denklemi;

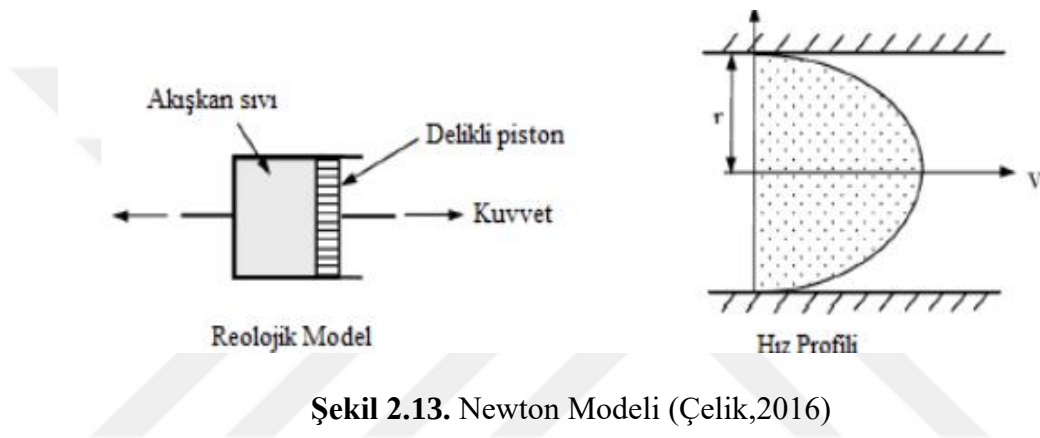
$$\nu = \mu \cdot g / \gamma = \mu / \rho \quad 2.14$$

Bu denkleme göre;

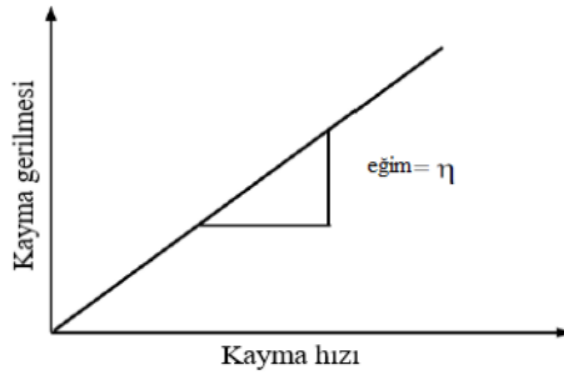
ρ =yoğunluk

$\nu=10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$

$g=9,81 \text{ m/sn}^2$

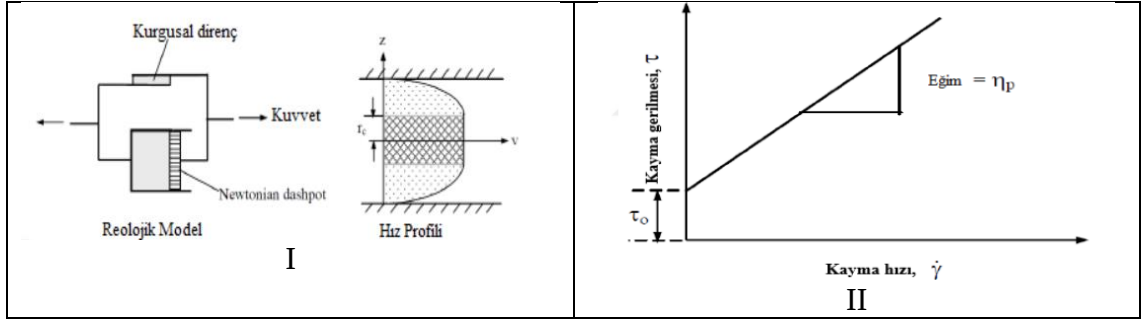


Şekil 2.13. Newton Modeli (Çelik,2016)



Şekil 2.14. Newton Sıvısı (Çelik,2016)

Bingham sıvıları, akma gerilimi, eşik direnci ve akış limiti ile ilişkilidir. Akma noktası yoğunlukla dış parametrelere bağlıdır. Akma noktasına ulaşmak için gerekli kayma direncini aşmak gerekmektedir.



Şekil 2.15. Reolojik Model ve Hız Profili I- II (Çelik, 2016)

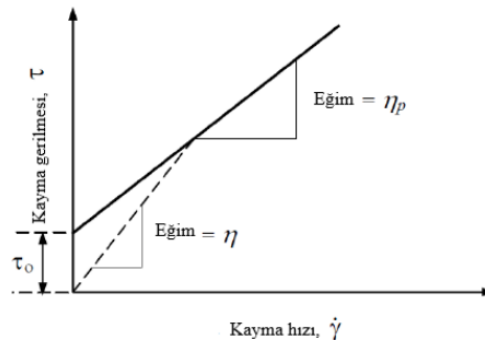
Görünür Viskozite

Darcy yasası Newton yasası olmadan, geçirgenlik katsayısındaki viskozitenin değişmesi için görünür bir viskozite(η) ekleyerek genişletilebilir (Vossoughi, 1999).

- Görünür viskozite için Bingham (2.15) denklemi;

$$\eta = \eta_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad 2.15$$

Burada; η değeri, görünür olmayan viskozite olarak bilinen belirli bir kesme hızında Newton olmayan bir malzemenin eşdeğer Newton viskozitesidir.



Şekil 2.16. Görünür Viskozite

2.6 Mineral Katkıları

İnşaat alanında çimento kullanım miktarının artış göstermesi sebebiyle çimento hammaddelerinde kaynaklar hızlıca tükenmekte ve yeni hammadde arayışlarına

girilmektedir. Çimento içerisindeki hammaddeler yerine daha ucuz, erişilebilir, beton kalitesini düşürmeyen yeni bir hammadde kullanılabilir.

Farklı mineral katkılarının çimento esaslı harçların reolojik davranışları üzerine literatürde birçok yayınlanmış çalışma yer almaktadır (Aitcin v.d., 1984; Bustamante ve Gouvenot, 1983; Deere, 1982; Ruggiero, 1984; Weaver v.d., 1990). Bu çalışmalardan varılan ortak sonuç elde edilen karışımların çimento esaslı harçların akışkanlık ve durabilite özelliklerini iyileştirdiği yönündedir (Sonebi, 2002).

Kaynak tüketimini azaltmak için ilk olarak atık madde kullanımları düşünülmekte ve bu bağlamda oldukça fazla araştırma bulunmaktadır (Papayianni ve Anastasiou, 2010). Beton ve çimentoda kullanılacak atık malzemelerden puzolanik olanları önemli bir yer tutmaktadır. Puzolan; Tek başına bağlayıcılığı bulunmayan ancak ince bir şekilde öğütülerek normal sıcaklıkta nemli bir ortamda kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özellik kazanabilen malzemeler için kullanılmaktadır. Puzolanik özellik gösteren malzemeler; uçucu kül, kazan altı külü, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü vb. malzemelerdir.

2.6.1 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Uçucu Kül Kullanımı

Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri (FA)

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri, termik santralde yakılan kömüre ve yanma olayının değişimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu küller genelde gri renkli olup açık ya da koyu gri tonlarındadırlar. Açık ya da koyu olması içerisindeki yanmamış karbon ile ilişkilidir. Uçucu kül tanelerinin inceliğini, kömürün öğütülme derecesi ve küllerin bacadan kaçmasına mani olunması durumları etkilemektedir. Küllerin bacadan kaçıışı azaldıkça incelik de artmaktadır. Uçucu küllerin boyutları 0,5 ile 200 mikron arasında değişkenlik göstermektedir. Uçucu küller yapı olarak küresel ve camsı şekle sahiptirler (Güler vd., 2005). Uçucu küllerin yoğunluğu 2,2 – 2,7 g/cm³ arasında değişmektedir. Uçucu küllerin yoğunluğu genelde mineralojik özelliklerine ve incelik kavramıyla ilişkilidir (EIE, 1982).

Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri (FA)

Uçucu kül, kömür kullanılan termik elektrik santrallerinden elde edilmektedir. Pulverize kömürün yanmasıyla oluşur ve bacadaki meydana gelen baca gazları ile taşınarak elektro filtrede toplanır. Pulverize kömürün yanmasıyla oluşan ergimiş malzeme soğur ve gaz akışı etkisi ile küresel şekilli kül taneciklerine dönüşür. Küllerin atık malzeme olarak bilinenlerinin %75-80'i bacadaki diğer gazlarla beraber dışarıya çıkma eğilimi göstermekte olup 0.5-150 mikron boyutunda çok ince daneli küllerdir. Bu kül tanecikleri bacadaki gazlar tarafından sürüklenmeleri sonucu uçucu kül (FA) adını alırlar (Erdoğan, 1997; Al-Harthy vd., 2004, Çelik vd., 2022).

Dünyada, yılda meydana gelen uçucu kül miktarı yaklaşık 600 milyon tondur. Türkiye'de Kemerköy, Çatalağzı, Afşin-Elbistan, Çayırhan, Kangal, Orhaneli, Soma, Tunçbilek, Yatağan, Seyitömer ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yılda 13 milyon ton uçucu kül elde edilmektedir (Türker ve Erdoğan, 2003).

Uçucu küller ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma yapılırken kimyasal bileşen yüzdesi esas alınmaktadır.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C olarak sınıflandırılmaktadır (ASTM C 618, 2000).

- F sınıfı; $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'ten fazla ve bitümlü kömürden üretilen uçucu küllerden oluşmaktadır. Bu küllerin CaO yüzdesi %10' un altındadır bu sebeple düşük kireçli kül olarak adlandırılmaktadırlar. Düşük kireçli uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir ve bağlayıcılıkları yok denecek kadar azdır (ASTM C 618, 2000).
- C sınıfı uçucu küller, yarı- bitümlü veya linyit kömürden üretilmektedir. C sınıfı uçucu küllerde toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ %50'den fazladır. Bu küllerin CaO miktarı %10' dan büyük olduğu için yüksek kireçli olup hem puzolanik hem bağlayıcı özelliğe sahiptirler (ASTM C 618, 2000).

TS EN 197-1'e göre yapılan uçucu kül sınıflandırmasında uçucu küller; kalkersi (W) ve silissi (V) olarak iki gruba ayrılmaktadır (TS EN 197-1, 2002).

- V sınıfı silissi küllerin çoğunluğu puzolanik özellik göstermektedir. İnce, küresel taneciklerden oluşan bir toz olup büyük oranda alüminyum oksit (Al_2O_3) ve reaktif silisyum dioksit (SiO_2)' den kalan kısmı ise demir oksit (FeO_2) ile diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Bu küllerde reaktif silis miktarının %25'ten fazla; reaktif kireç oranının ise %10'dan az olması gerekmektedir (TS EN 197-1, 2002).
- W sınıfı küller puzolanik ve/veya hidrolik özelliklerine sahip ince bir tozdur. Çoğunlukla reaktif SiO_2 reaktif CaO ve Al_2O_3 'ten oluşmakta, gerisi Fe_2O_3 'ten diğer bileşenleri içeren küllerden meydana gelmektedir. Bu küllerde reaktif silis miktarının %25, reaktif kireç oranının ise %10'dan fazla olması gerekmektedir (TS EN 197-1, 2002).

Sülfat (SO_3) ve kireç (CaO) miktarına göre sınıflandırıldığında genellikle taş kömüründen elde edilen ve esas yapısı siliko alüminalardan meydana gelen uçucu küllere siliko alümünöz uçucu küller denilmektedir. Genellikle linyit kömürü kullanımı sonucu elde edilen ve diğer uçucu küllere oranla daha fazla SO_3 ve CaO içerenlerine sülfokalsik uçucu küller denilmektedir. Yine linyit kömüründen elde edilen silika ve kireç miktarı yüksek olan uçucu küllere de silikokalsik uçucu kül olarak bilinmektedirler (Açıkgöz, 2008; Çelik, vd., 2022).

Çizelge 2.5. Örnek uçucu kül kimyasal analiz değerleri (Yazıcı, 2004)

Oksit	Sülfokalsik FA	Silikoaluminöz FA	Silikokalsik FA
SiO_2	18,2	50,0	38,0
Al_2O_3	12,0	30,0	22,0
Fe_2O_3	7,0	7,0	4,0
CaO	67,0	2,6	24,0
MgO	1,8	1,8	5,0
SO_3	6,0	0,5	1,0
K_2O	6,0	5,0	2,0
Na_2O	8,2	0,8	1,0
Diğer	1,2	3,0	3,0

Uçucu küllerde ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları dışında içerisinde bulunan CaO miktarına göre de sınıflandırma yapılabilmektedir. Uçucu küller aktivitesine göre; çok düşük, düşük, aktif ve çok aktif olmak üzere dört farklı şekilde tanımlanmaktadır (Yazıcı, 2004; Çelik, vd., 2022).

a) Çok düşük aktiviteli küller: $CaO < \%3,5$ b)

- b) Düşük aktiviteli küller: $\%3,5 < \text{CaO} < \%7$
- c) Aktif küller: $\%7 < \text{CaO} < \%14$
- d) Çok aktif küller: $\text{CaO} > \%14$

Uçucu küller kömürün özelliği ve yakılma biçimine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Silis ve alümin içeren uçucu küller puzolanik özellik göstermekte ve çimento ile beton kullanımında önerilmektedirler. Bu küller ince ve küresel yapıda olmalarıyla taze betonda işlenebilirliği arttırıp hidrasyon ısını azaltmaktadır. Çimento ile hidrasyonu sonucunda oluşan kireç ile tepkimeye girerek ek bir bağlayıcı jel oluşturur. Bu uçucu küller kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) sulu ortamda reaksiyona girdiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olurlar. Bu yüzden hem beton katkı maddesi olarak hem de Portland-puzolan tipi çimento üretiminde doğrudan kullanılmaktadırlar. Çimento hamurunda iyi yakılmayan kömürlerden, örneğin antrasit kömürü, elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olmakta bunun yanı sıra çimento ve betondaki su ihtiyacı artmaktadır. Bunun sonucunda da kaliteyi ve puzolanik özelliği olumsuz etkilemektedir (Türker ve Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin $\%60-90$ miktarı amorf durumda olup geriye kalan kısmı magnetit, mullit, hematit ve kuvars gibi kristaller yer almaktadır. Hacminin $\%20$ 'si boş parçacıklardan meydana gelmektedir.

Uçucu Kül ile Zemin İyileştirme

Uçucu küller kullanılan kömüre göre iki tip gruba ayrılmaktadır. Bunlar taş kömürü ve linyit kömürü uçucu küllerdir.

- Linyit kömürü uçucu küller: Kullanılma imkânı kimyasal ve fiziksel yapılarına bağlıdır. Genellikle koyu renklidir.
- Taş kömürü uçucu küller: Bu tip uçucu küller tümüyle kuru olarak bulunur. 200 numaralı elekten elde edilip elekten $\%16-20$ 'si kalacak şekilde elde edilmektedir.

Uçucu küllerin rengi kullanılan fırınlara ve kömürün kalitesine bağlı olarak, koyu krem renginden kahverengine kadar değişebilmektedir.



Fotoğraf 2.2. Uçucu Küller (Aygün, 2019)

Uçucu kül, özellikle yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaya başlamıştır. Yüzeysel zemin iyileştirmelerinde uygulama yöntemi olarak çimento ve kireç ile neredeyse aynıdır (Çelik, vd., 2022). Laboratuvarda belirlenen uçucu kül, optimum su ve yumuşak zemin karıştırılarak arkasından iş makineleri ile sıkıştırılmaktadır.

Uçucu kül kullanımı sonucu zeminde,

- Mukavemet artar
- Yapım hızı artar
- Kazı ve dolgu maliyetlerinde tasarruf edilir
- Dolgu kalınlığı azalır (Şenol ve Edil, 2004).



Fotoğraf 2.3. Zemin Uçucu Külün Zemin Uygulanması (Aygün, 2019)

2.6.2 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Kazan Altı Kül Kullanımı

Pirinç Kabuğu Külü (RHA) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda yakılan pirinç kabuğu ile elde edilen külün yüksek puzolanik özellik, daha büyük özgül yüzey alan ve yüksek SiO içeriğine sahip olduğu ortaya konmuştur. Puzolanik özellik gösteren pirinç kabuğu külünün beton ve çimentoda kullanımıyla betonun geçirimsizliğinin azaltılması, alkali- silika tepkimesine karşı direnç göstermesi, kimyasal etkilere karşı direnç göstermesi, işlenebilirlik özelliklerinde iyileşme ve bunların sonucunda betonun dayanıklılığında iyileşme gibi avantajlar sağlamaktadır (Yıldız vd. 2007; Givi vd. 2010; Erdoğan, Erdoğan, 2007; İşbilir, 2012).

Pirinç kabuğunun yanması ile elde edilen külün yapısında az miktarda karbon bulunmaktadır. Kabukta bulunan karbon miktarına göre pirinç kabuğu külü; odun ve kül kömürü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karbon miktarı %1,5'ten az ise kül, %1,5'ten fazla olursa odun kömürü denir (Mazlum, 1989).

Pirinç kabuğu külünde %80-90 arasında silis bulunmaktadır. Pirinç kabuğu külündeki özgül yüzeyinin büyüklüğü, gözenekli yapı ve amorf silise sahip olması külün puzolanik özelliğini göstermektedir (Mazlum, 1989).

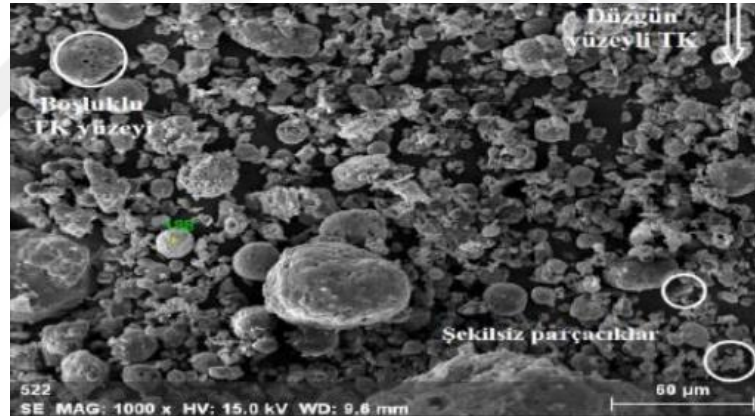
Pirinç kabuğu; %20 hidrat amorf silis , %40 selüloz ve %30 lignin grubundan oluşmaktadır (Koçak vd., 2013). Pirinç kabuğu külünde SiO₂ oranı %95- 97 arasında değişmektedir (Yıldız vd., 2009). Termal uygulamalar sonucu pirinç kabuğu içeriği silis, kristaboliteye dönüşmektedir. (Subaşı, Emiroğlu, 2015).

Termik santraller ve işletmeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kömür kullanmaktadır. Kömürün yanması ile uçucu külün yanı sıra ciddi miktarda kazan altı külü (BA) de ortaya çıkmaktadır. Kazan altı kül mineral katkısı olarak endüstride ve inşaat mühendisliğinin birçok alanında kullanılmıştır. Bunun sonucunda hem çevresel hem ekonomik yönden olumlu etkileri olmuştur (Güler, 2005).

Kazan altı külü fiziksel ve yapısal özellikleri yönünden izolasyon derecesi iyi olan bir malzemedir. Bu nedenle blok tuğla, çatı kaplama malzemesi, briket, drenajlarda filtre gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kazan altı kül doğal agregalara göre daha etkili yalıtım özelliği göstermiş ve bunun sonucunda yapı endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır.

Yapılan deneylerde Portland çimentosu yerine taban külü kullanılmasıyla betonun basınç ve eğilme dayanımlarında %10'a varan artış görülürken daha yüksek oranda kazan altı kül katılmasıyla mukavemetin düştüğü gözlemlenmiştir. İncelemeler sonucunda mukavemet değerindeki bu azalmanın yüksek yanmamış karbon içeriği ile farklı faz dağılımlarına bağlı olduğuna ulaşılmıştır (Çelik, vd., 2022a). Kazan altı taban külü kimyasal yapısı açısından uçucu kül ile benzerlik göstermektedir. Kazan altı taban külünde SiO_2 , Fe_2O_3 ve Al_2O_3 bileşenleri bulunmaktadır. Bunun yanı sıra K_2O , CaO , Na_2O_3 , SO_3 , TiO_2 , MgO , P_2O_5 bileşenleri de çok az miktarda yer almaktadır (Çelik, vd., 2022).

Kazan altı taban külü, küresel biçimli daneler halinde düzensiz olarak bulunmaktadır. Küresel danelerin puzolanik özellikleri yüksektir ve camsı bir yapıya sahiptirler. Daneler arasındaki küresel olmayanları ise kuvarz ve feldspat gibi yanma reaksiyonuna girmeyen minerallerdendir. Bunun yanı sıra boşluklu yapıya sahiptir (Tikal'sky vd., 1992).



Fotoğraf 2.4. Öğütülmüş Kazan Altı Taban Külünün 2000 Ölçekle Büyütülmüş Mikro Görüntüsü (Toprak, 2011)

Chotetanorm vd., (2013) yaptığı çalışmada kazan altı taban külünün geopolimer harçlardaki basınç dayanımını, sülfata karşı direncini ve infiltrasyon hızı (sorptivite) ile gözenek boyutuna etkisini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda yüksek kalsiyumlu kazan altı taban külünün yüksek mukavemet ürettiğini göstermiştir. Aynı zamanda karışımın emilimi ve işlenebilirliği artmıştır.

Topçu ve Bilir, (2010) kömürün yanmasıyla ortaya çıkan kazan altı taban külünün öğütülmeden ince agrega yerine kullanılmasıyla oluşturulan harç karışımında büzülme ve

çatlama durumlarını incelemiştir. Kazan altı taban külü %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100 oranlarında kullanılarak halka (ring) testi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda %100 kazan altı taban külü kullanımının kullanılan kuma oranla büzülmeyi (rötre) azalttığına ulaşılmıştır. Ancak kazan altı taban külünün artması ile meydana gelen gözenek artışı, elastisite ve dayanım modülünde azalmaya sebep olmuştur. Singh ve Siddique, (2013) beton üzerinde kazan altı taban külü kullanımını incelemiş ve genel bir değerlendirmede bulunmuştur. Çalışmasında kazan altı külünün taze betonun büzülmesi, işlenebilirliği, priz süresi ve mukavemetini nasıl etkilediğini araştırarak çalışma sonucunda ince agrega yerine kazan altı taban külü kullanımının uygun olduğuna ulaşmıştır.

Çelik vd., (2022) Mekanik özelliklere dayalı geoteknik enjeksiyon işlerinde çimentonun kısmi ikamesi ile atık taban külünün mineral katkı olarak kullanılmasını değerlendirmiştir.

2.6.3 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Pirinç Kabuğu Külü Kullanımı

Kazan Altı Taban Külü (BA) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Çizelge 2.5. Kazan Altı Taban Külü (BA) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

<i>Kimyasal Özellikler (%)</i>	Portland çimento (PC)	Kazan altı taban Külü (KATK)
CaO	61.94	3.21
SiO ₂	18.08	64.5
Al ₂ O ₃	5.58	16.1
Fe ₂ O ₃	2.43	6.52
MgO	2.43	0.81
SO ₃	2.93	0.23
K ₂ O	0.99	1.53
Na ₂ O	0.18	0.35
Kül kaybı	4.40	6.43
<i>Fiziksel Özellikler</i>		
Yoğunluk (g/cm ³)	3.15	2.18
İncelik (Blaine)(cm ² /g)	3750	3240

Dünyanın başlıca pirinç üretici ülkeleri Hindistan, Çin, Tayland ve Bangladeş olup toplam pirinç üretimi yaklaşık 500 milyondur (Şapaloğlu, 2015).

Pirinçten %20 pirinç kabuğu; pirinç kabuğundan da %20 pirinç külü çıkmaktadır. Bu bilgi dahilinde dünyada toplam pirinç külü üretiminin 20 milyon civarında olduğunu söylemek mümkündür (İşbilir, 2012).

Çizelge 2.7. Pirinç kabuğu için dünyadaki üretim oranları (İşbilir, 2012)

Ülke	Pirinç Kabuğu	Pirinç Çeltiği	Ülke	Pirinç Kabuğu	Pirinç Çeltiği
Bangladesh	5,4	27	Korea	1,8	9
Brazil	1,8	9	Philippines	1,8	9
Burma	2,6	13	Taiwan	2,8	14
China	36	180	Tailand	4	20
India	22	110	US	1,4	7
Indonesia	9	45	Wietnam	3,6	18
Japan	2,6	03	Others	5,2	26

Pirinç kabuğu farklı birçok ülkede yakıt olarak kullanılmaktadır. Külün kullanılacağı alana göre yakma derecesi ve yakma şekli değişebilmektedir. Yakıt olarak kullanılacak pirinç kabuğunun yakılma koşullarının sabit olması gerekli değildir. Ancak inşaat sektöründe çimento ve betonda kullanılması durumunda külün yakılması ve soğutulması süreçlerinde izlenmesi gereken koşullar bulunmaktadır (Givi vd. 2010).

Pirinç kabuğunun yakılma işlemi sırasında 400°C -600°C sıcaklıkları aralığı kullanıldığında ve elde edilen külün hızlı bir şekilde soğutulması sonucunda kül içerisindeki silika, amorf bir yapıya dönüşmektedir. Pirinç kabuğunda daha fazla amorf silika olması, çok ince tanelere ve yüksek yüzey alanına sahip, yüksek reaktif ve puzolanik özellik göstermesine sebep olmaktadır (Yıldız vd. 2007; Erdoğan, Erdoğan, 2007). 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda yakılan pirinç kabuğu ile elde edilen külün yüksek puzolanik özellik, yüksek SiO içeriği ve daha büyük özgül yüzey alana sahip olduğu ortaya konmuştur. Puzolanik özellik gösteren pirinç kabuğu külünün beton ve çimentoda kullanımıyla betonun kimyasal etkilere karşı direnç göstermesi, geçirimsizliğinin azaltılması, işlenebilirlik özelliklerinde iyileşme, alkali- silika tepkimesine karşı direnç ve bunların sonucunda betonun dayanıklılığında iyileşme gibi avantajlar sağlanmaktadır (Yıldız vd. 2007; Givi vd. 2010; Erdoğan, Erdoğan, 2007; İşbilir, 2012). Pirinç kabuğunun yanması ile elde edilen külün yapısında az miktarda karbon bulunmaktadır. Kabukta bulunan karbon miktarına göre pirinç kabuğu külü; kül

ve odun kömürü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karbon miktarı %1,5'ten fazla olursa odun kömürü; %1,5'ten az ise kül denir (Mazlum, 1989).

Pirinç kabuğu külünde %80-90 arasında silis bulunmaktadır. Pirinç kabuğu külündeki gözenekli yapı, amorf silise sahip olması ve özgül yüzeyinin büyüklüğü külün puzolanik özelliğini kanıtlamaktadır (Mazlum, 1989).

Gözeneklilik; Pirinç kabuğu yandığı zaman kabuğun organik yapısı bozulur ve boşluklu bir kül oluşur. Spesifik yüzey ile külün gözenekli yapısı arasında doğrusal bir bağlantı bulunmaktadır (Mazlum, 1989).

Özgül yüzey; Külün spesifik yüzeyi BET adsorpsiyon tekniği ile belirlenmektedir. Spesifik yüzey kabuğun yakılma süresi, yakma sıcaklığı, öğütme şekli ve süresi ile değişmektedir (Al- Khalaf, Yousif, 1984).

Pirinç kabuğu külü ile zemin iyileştirme

Pirinç kabuğu; %40 selüloz, %20 hidrat amorf silis ve %30 lignin grubundan oluşmaktadır (Koçak vd., 2013). Pirinç kabuğu külünde SiO₂ oranı %95-97 arasında değişmektedir (Yıldız vd., 2009). Termal uygulamalar sonucu pirinç kabuğu içeriği silis, kristaboliteye (silisin kristal hali) dönüşmektedir. Bunun yanı sıra standart yakma şartları olduğu durumlarda pirinç kabuklarından yüksek reaktivlikte çok ince tanelere sahip amorf silis elde edilmektedir (Subaşı, Emiroğlu, 2015).



a



b

Fotoğraf 2.5. Pirinç kabuğu(a) ve pirinç kabuğu külü(b)

2.7 İstatistiksel Değerlendirme

İstatistik metotlarından en çok kullanılanı parametrik analiz tekniğidir. Bu teknikle sadece grup ortalamaları arasında istatistik olarak büyük bir fark olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Grup ortalamalarından hangilerinin birbirinden farklı olduğunu ise çoklu karşılaştırma testleri ile belirlemek mümkündür. Verilerin aralıklı olması, verilen normal dağılıma uyması ve grup varyanslarının eşit olması şartları yerine getirildiği zaman ANOVA kullanılabilmektedir. Bu şartlardan biri veya birkaçının yerine getirilemediği durumlarda şartlar sağlanmaya çalışılmaktadır. Şartlar sağlanamıyorsa parametrik olmayan istatistik yöntemlerinden birinin kullanılması gerekmektedir. Bu yöntemler; Kruskal-Wallis, Mann-Whitney U testleridir (Mendeş ve Mendeş 2002).

Normal Dağılıma Uygunluk Testi;

Normal dağılıma uygunluk testi; harç karışımlarında elde edilen verilerin normal olup olmadığının belirlenmesi için yapılmaktadır. Verilerin normal dağılması sonucu parametrik testler kullanılacakken normal dağılmaması sonucunda non- parametrik testler kullanılmaktadır. Normal dağılıma uygunluk testinde Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) parametrelerine bakılmaktadır.

Testlerin normal dağılıma uygunluğu için normal dağılıma uygunluk testi $H_0 p > 0,05$ yapılmalıdır. H_0 hipotezinin sağlanmadığı durumlarda H_1 hipotezine geçilmektedir. (H_0 : Veriler normal dağılmıştır; H_1 : Veriler normal dağılmamıştır) (Koşkan 2008).

Varyansların Homojenliği Testi;

Normalliğe uygunluk testi sonrasında yapılmaktadır. Bu testin yapılma amacı; iki ya da daha fazla ortalama arasında fark olup olmadığı ile ilgili hipotezi test etmektir. Çalışma kapsamında bu bağlamda bağımlı ve bağımsız değişkenler kullanılmıştır. Bu test bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerini incelemeyi hedeflemektedir. Normalliğe uygunluk testinde Levene istatistik sonucuna bakılmaktadır. $p \leq 0,05$ durumunda varyansların homojenliği sağlanmazken; p değeri 0,05'ten büyük olduğunda varyans homojenliğinin sağlandığı bilinmektedir (Koşkan 2008).

ANOVA Testi;

ANOVA testi sayısal bir değişken olup en az 3 grubun karşılaştırılmak istendiği zaman kullanılmaktadır. Bu test yardımıyla gruplardan en az birinin diğerlerinden farklı olup olmadığı belirlenmektedir. Bu teste göre ANOVA çizelgesinde “p” değeri incelenir. “p değeri” anlamlılık durumunu göstermektedir. $p \geq 0,05$ ise gruplar arasında incelenen özellik açısından anlamlı bir fark yokken; $p \leq 0,05$ ise anlamlı fark olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda w/b= 0,75 için pirinç kabuğu külü varyans kaynağı gruplar arasında $p < 0,05$ olduğu için anlamlı bir fark olduğu söylenmektedir.

KRUSKAL Testi;

Kruskal testi iki veya daha fazla örneklem ortalamasının birbiri arasında manidar bir farka sahip olup olmadığının gösterilmesinde kullanılmaktadır. ANOVA’nın parametrik olmayan karşılığı olarak bilinmektedir. Sonucun manidar bir fark göstermesi durumunda bu farkın hangi gruplar arasında olduğunu belirleyip alt gruplar arasında her bir ikili kombinasyon için Mann- Whitney U testi uygulanmaktadır (Genç ve Soysal 2018).

POST- HOC Testi;

Varyans analizlerinde p değerinin manidar çıkması sonucunda farkın kaynağının belirlenmesi için Post-Hoc testi yapılmaktadır. Post- Hoc testi, çoklu karşılaştırma testi olarak bilinmektedir. Hem normallik durumu hem de varyans homojenliği sağlandığı için Post- Hoc testi yapılmaktadır. Post- Hoc testinde dört farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar; Tukey HSD, Scheffe, Bonferroni ve Dunnett (iki taraflı)’ tır (Genç ve Soysal 2018).

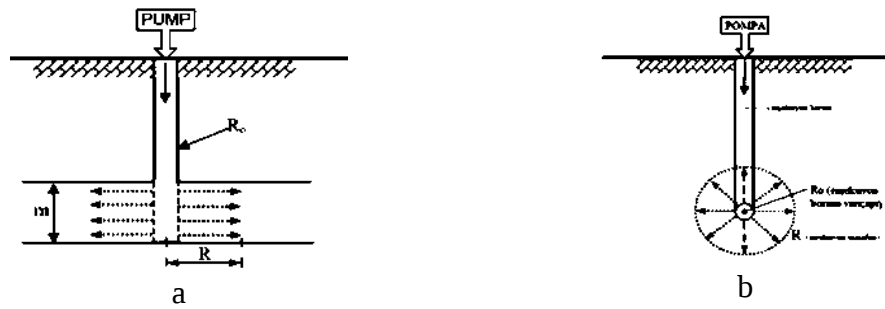
MANN- WHITNEY U Testi;

Normal dağılım göstermeyen dağılımlarda iki bağımsız grubun ortalamalarının karşılaştırmaları amacıyla kullanılmakta olan non- parametrik yöntemlerdendir. Bu testte “ $p \leq 0,05$ ” olması durumunda manidar bir fark bulunduğunu söylemek mümkündür. Sıra ortalaması büyük olanın lehine değişimler söz konusudur (URL 3).

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOD

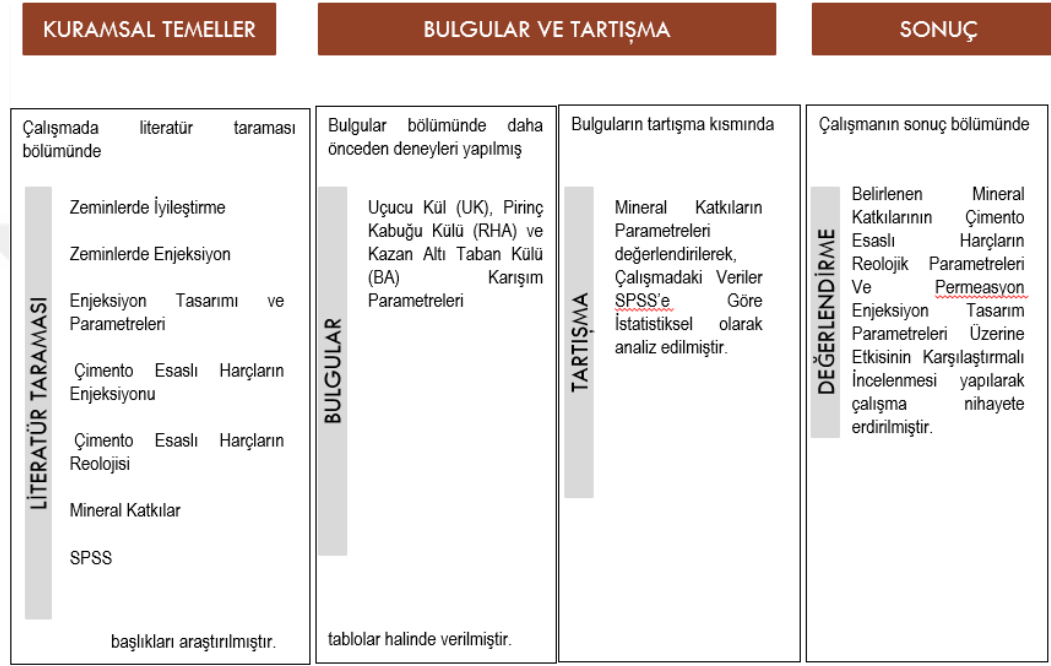
Bu tez çalışmasında farklı mineral katkıların çimento esaslı harçların reolojik parametreleri ve permeasyon enjeksiyon tasarım parametreleri üzerine etkileri sorgulanmış ve bu bağlamda üç farklı mineral katkısı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan mineraller uçucu kül (FA), pirinç kabuğu külü (RHA) ve kazan altı taban külü (BA) olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu minerallerin farklı parametreler üzerinde çizelgeleri değerlendirilmiştir. Bu çizelgelerde su/çimento (w/b) oranı, mineral katkısının miktarı ve karışım içerisindeki yüzdesi, çimento miktarı ve su miktarı gibi ölçütler kullanılmıştır. Mineral katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri verilmiştir. Daha sonra permeasyon enjeksiyonları hesaplanarak çizelgeler grafik yöntemi ile ifade edilmiştir. Permeasyon enjeksiyonları hesaplanırken w/b oranları 0,75- 1,00 ve 1,25 değerlerinde kullanılmıştır. Tez çalışmasında enjeksiyon noktasından uzaklık (R) değeri 0,5-1,00-1,25-2,00-2,5 ve 3,00 değerlerinde; enjekte edilen harç tabakasının kalınlığı (m) değeri 0,3- 0,6- 0,9 ve 1,2 değerlerinde değişken kabul edilerek silindirik akma modeline göre geçen zaman hesaplanmıştır. Daha sonra enjeksiyon noktasından uzaklık (R) değeri ile zemin boşluk oranı/porozite (n) değeri değişken kabul edilerek “ R ” değeri 0,5-1,00-1,25-2,00-2,5 ve “ n ” değeri 0,2- 0,4- 0,6- 0,8 ve 1,00 değerlerinde küresel akma modeline göre zaman hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Silindirik Akma Modeli (a) ve Küresel Akma Modeli(b)

Bunun sonucunda minerallerin çimento harcı ile kullanımı sonucunda silindirik ve küresel basınç modellerine göre zaman grafikleri oluşturulmuştur.

Çalışmada deney yapılmayıp literatürde sunulmuş ve yayınlanmış çalışmalardan elde edilen veriler ve literatürde yaygın olarak yer alan değişken değerler kullanılarak yapılan grafiklerle çalışmadaki süre değişimleri incelenmiştir. Daha sonra elde edilen veriler SPSS ile istatistiki olarak değerlendirilmiştir. Bu aşamada ANOVA, normal dağılıma uygunluk testi, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney U ve çoklu kıyaslama (Post-Hoc) testleri kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Yöntem İçeriği

Verilerin aralıklı olup verilen normal dağılıma uyması ve grup varyanslarının eşit olması sebebiyle ANOVA kullanılmıştır. (Mendeş ve Mendeş 2002). Normal dağılıma uygunluk testinde Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) parametrelerine bakılmaktadır. Testlerin normal dağılıma uygunluğu için normal dağılıma uygunluk testi $p > 0,05$ yapılmıştır.

Normalliğe uygunluk testi sonrasında varyansların homojenliği testi yapılmıştır. Bu testin yapılma amacı; iki ya da daha fazla ortalama arasında fark olup olmadığı ile ilgili hipotezi test etmektir. Çalışma kapsamında bu bağlamda bağımlı ve bağımsız değişkenler kullanılmıştır. (Koşkan 2008).

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Uçucu Kül (FA) Karışım Parametreleri

Uçucu kül mineral katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla karışımda kullanılan oranlar ve karışımın akma gerilme değerleri incelenmiştir. Çimento esaslı harçların reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri su/ çimento (w/b) oranı olarak bilinmektedir.

Bu çalışmada w/b oranı geoteknik mühendisleri tarafından permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığı için 1 olarak ele alınmıştır. w/b oranı 1.00 olan harç karışımlarında uçucu külün farklı oranlarda(%5-%10-%15-%20-%25-%30) kullanılmasıyla harç karışımındaki uçucu kül miktarı, çimento miktarı, su miktarı ve yoğunluk gibi karışım ve tasarım parametreleri verilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Uçucu Kül Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri (Çelik vd., 2022)

Karışım Adı	w/b	FA(%)	PÇ(g)	FA(g)	Su (ml)	Yoğunluk (g/cm ³)	D_{flow}^* (mm)	T_{flow}^{**} (s)	$t_{cohesion}^{**}$ * (mm)
FAK1	1,00	0	751	0	751	1,518	210	28,84	0,049
FAK2	1,00	5	711	37	748	1,512	195	30,45	0,054
FAK3	1,00	10	670	74	745	1,505	208	29,91	0,047
FAK4	1,00	15	630	111	742	1,499	212	28,24	0,051
FAK5	1,00	20	591	148	738	1,493	213	27,91	0,048
FAK6	1,00	25	551	184	735	1,486	214	29,43	0,058
FAK7	1,00	30	512	220	732	1,480	217	29,21	0,050

Tüm karışımlardan elde edilen plastik viskozite ve akma gerilmeleri Çizelge 4.2’ de görülmektedir.

Çizelge 4.2. FA katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri (Çelik vd., 2022)

Karışım Adı	Akma Gerilme τ_0 (Pa)	Plastik Viskozite μ_p (Pa.s)	R ²	Silindirik Akma Modeli için Pe (kPa)	Modifiye Basınç Oranı	Küresel Akma Modeli için Pe (kPa)
FAK1	0,8157	0,0064	0,9978	132	1,00	430
FAK2	0,8756	0,0052	0,9951	124	0,94	403
FAK3	0,5275	0,0064	0,9962	132	1,00	430
FAK4	0,4556	0,0063	0,9976	130	0,98	423
FAK5	0,3354	0,0057	0,9981	118	0,89	383
FAK6	0,3714	0,0061	0,9974	126	0,95	410
FAK7	0,4768	0,0055	0,9982	113	0,86	369

4.2 Pirinç Kabuğu Külü (RHA) Karışım Parametreleri

Bu çalışmada pirinç kabuğu külünün etkisini araştırmak için kullanılan w/b oranları 0,75-1,00 ve 1,25 olarak seçilmiştir. Çalışmadaki önemli iki oran w/b ve pirinç kabuğu külü miktarıdır. Pirinç kabuğu külü %5, %10, %20 ve %30 değerlerinde kullanılmıştır. Çalışmada 0 oranında pirinç kabuğu külü miktarının kullanılmasının sebebi pirinç kabuğu külü olmadan karışımın seyrettiği davranışın incelenebilmesidir. (Çizelge 4.3)

Çizelge 4.3. Pirinç Kabuğu Külü Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri (Çelik, 2016)

Karışım Adı	w/b	RHA (%)	PC (ml)	RHA (ml)	Su(ml)	D_{flow}^* (mm)	T_{flow}^{**} (s)	$t_{cohesion}^{***}$ (mm)
RHAK1	0,75	0	932	0	695	175	34	3,27
RHAK2	0,75	5	879	46	690	170	35	3,56
RHAK3	0,75	10	827	91	685	156	36	4,86
RHAK4	0,75	20	723	181	674	152	40	4,74
RHAK5	0,75	30	624	267	665	130	53	5,74
RHAK6	1,00	0	752	0	752	200	27	2,71
RHAK7	1,00	5	710	37	747	200	28	2,87
RHAK8	1,00	10	668	74	742	210	28	3,16
RHAK9	1,00	20	587	147	734	190	29	3,55
RHAK10	1,00	30	508	217	725	178	31	3,72
RHAK11	1,25	0	632	0	790	230	26	2,46
RHAK12	1,25	5	597	32	786	225	26	2,75
RHAK13	1,25	10	563	63	782	215	27	1,99
RHAK14	1,25	20	496	124	774	210	27	3,58
RHAK15	1,25	30	429	184	766	205	28	3,78

Pirinç kabuğu külü ile oluşturulan tüm karışımlardan elde edilen plastik viskozite ve akma gerilmeleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.4. RHA katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri (Çelik, 2016)

Karışım Adı	τ_0 (Pa)	μp (Pa s)	Grout temperature (°C)	R ²	Silindirik Akma Modeli için Pe (kPa)	Modifiye Basınç Oranı	Küresel Akma Modeli için Pe (kPa)
RHAK1	1,795	0,0070	20	0,994	144	2,33	470
RHAK2	2,028	0,0070	21,5	0,995	144	2,33	470
RHAK3	1,881	0,0090	22,2	0,991	186	2,99	604
RHAK4	2,723	0,0090	22,5	0,991	186	2,99	604
RHAK5	3,789	0,0240	22,2	0,994	495	7,98	1612
RHAK6	0,415	0,0030	24,1	0,995	62	1,00	201
RHAK7	0,068	0,0050	23,3	0,999	87	1,40	282
RHAK8	0,254	0,0040	23,2	0,996	82	1,33	269
RHAK9	0,415	0,0030	22,5	0,996	62	1,00	201
RHAK10	0,312	0,0050	22,6	0,996	60	0,96	195
RHAK11	0,163	0,0020	23,7	0,992	41	0,67	134
RHAK12	0,680	0,0020	23,2	0,997	41	0,67	134
RHAK13	0,154	0,0020	22,7	0,996	41	0,67	134
RHAK14	0,239	0,0020	22,7	0,993	41	0,67	134
RHAK15	0,333	0,0030	22.2	0,998	62	1,00	201

4.3 Kazan Altı Taban Külü (BA) Karışım Parametreleri

Su/bağlayıcı (w/b) oranı genel olarak çimento esaslı harç karışımlarının mekanik özellikleri üzerine etki eden önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada kazan altı taban külünün çimento esaslı harç karışımlarında kullanılmasıyla meydana gelen değişimin gözlemlenmesi için farklı w/b (0,75-1,00-1,25-1,50) oranları kullanılmıştır. Zemine yapılan enjeksiyon yöntemlerinden permeasyon enjeksiyonu yaygın w/b oranları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Kazan altı taban külünün karışımda meydana getirdiği etkiyi araştırmak için dört farklı w/b oranı kullanılmıştır. Portland Çimentosuna kazan altı taban külü farklı miktarlarda (%0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) karıştırıldı. Tüm w/b oranlarında; kazan altı taban külünün kullanılmadığı karışımlar (BAK1, BAK8, BAK15, BAK22) ve kullanıldığı karışımların tasarım parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kazan Altı Taban Külü Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri (Çelik ve Akçuru, 2020)

Karışım Adı	w/b	BA (%)	PC (g)	BA (g)	Su(ml)	Yoğunluk (g/cm ³)	D _{flow} * (mm)	T _{flow} ** (s)	t _{cohesion} *** (mm)
BAK1	0,75	0	927	0	696	1,62	194	32,3	0,06
BAK2	0,75	5	875	46	691	1,61	192	32,8	0,08
BAK3	0,75	10	824	92	686	1,60	191	32,4	0,08
BAK4	0,75	15	773	136	682	1,59	190	32,8	0,09
BAK5	0,75	20	723	181	678	1,58	189	32,0	0,09
BAK6	0,75	25	673	224	673	1,57	188	32,0	0,09
BAK7	0,75	30	624	268	669	1,56	187	32,8	0,10
BAK8	1,00	0	751	0	751	1,50	232	29,2	0,05
BAK9	1,00	5	710	37	747	1,49	230	29,2	0,05
BAK10	1,00	10	669	74	743	1,49	227	29,2	0,06
BAK11	1,00	15	629	111	740	1,48	225	28,8	0,06
BAK12	1,00	20	589	147	736	1,47	224	29,2	0,07
BAK13	1,00	25	549	183	732	1,46	220	28,1	0,08
BAK14	1,00	30	510	218	728	1,46	218	29,5	0,05
BAK15	1,25	0	632	0	789	1,42	227	28,0	0,04
BAK16	1,25	5	597	31	786	1,41	219	28,0	0,05
BAK17	1,25	10	563	63	782	1,41	217	28,4	0,05
BAK18	1,25	15	530	93	779	1,40	216	28,4	0,06
BAK19	1,25	20	496	124	776	1,40	215	29,2	0,06
BAK20	1,25	25	463	154	772	1,39	215	29,2	0,05
BAK21	1,25	30	430	184	769	1,38	213	29,3	0,06
BAK22	1,50	0	545	0	817	1,36	240	27,1	0,04
BAK23	1,50	5	515	27	814	1,36	237	27,4	0,05
BAK24	1,50	10	486	54	811	1,35	236	27,8	0,05
BAK25	1,50	15	458	81	808	1,35	235	27,8	0,05
BAK26	1,50	20	429	107	805	1,34	235	27,4	0,06
BAK27	1,50	25	401	134	802	1,34	234	27,3	0,05
BAK28	1,50	30	373	160	798	1,33	232	27,9	0,06

Harç karışımlarında önemli bir diğer reolojik parametre akma gerilmesidir. Akma gerilmesi (kohezyon) genellikle harç karışımının akmaya başladığı gerilme limiti olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir harç karışımındaki çökme değeri, akma gerilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu durum yerçekimi kuvvetinin akma gerilmeden az olması sonucu harç karışımında akma meydana gelmeyip yüzeye yapışması ile aynı anlama gelmektedir (Sahmaran vd., 2008). Bu çalışmada kullanılacak harç karışımının akma gerilme değerleri Çizelge 4.6’ da verilmiştir. Bu çizelgeden ulaşılan verilere göre harç karışımını tüm w/b oranlarında kazan altı taban külü ile karıştırılmasıyla önemli değişimler elde edilmemiştir. Karışımın w/b oranı arttıkça akma gerilmesi düşüş göstermiştir. Bu durum yüksek w/b oranları kullanılması sonucunda su miktarı arttıkça karışımın akışkanlığının

artarak Newton akışkanları gibi davrandığını göstermiştir (Ferraris vd., 2001; Rosquoee vd. 2003).

Çizelge 4.6. BA katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri (Çelik ve Akçuru, 2020)

Karışım Adı	Akma Gerilme τ_0 (Pa)	Plastik Viskozite μ_p (Pa.s)	R^2	Silindirik Akma Modeli için P_e (kPa)	Modifiye Basınç Oranı	Küresel Akma Modeli için P_e (kPa)
BAK1	1,7524	0,0078	0,9975	161	1,73	524
BAK2	2,0934	0,0075	0,9946	155	1,66	504
BAK3	2,0359	0,0071	0,9976	146	1,57	477
BAK4	2,0606	0,0082	0,9907	169	1,82	551
BAK5	1,6415	0,0093	0,9956	192	2,06	624
BAK6	2,2922	0,0069	0,9961	142	1,53	463
BAK7	2,575	0,0062	0,9954	128	1,37	416
BAK8	0,6822	0,0045	0,9970	93	1,00	302
BAK9	0,6926	0,0046	0,9980	95	1,02	309
BAK10	0,5789	0,0053	0,9986	109	1,17	356
BAK11	0,6120	0,0051	0,9988	105	1,13	342
BAK12	0,6996	0,0048	0,9991	99	1,06	322
BAK13	0,4856	0,0053	0,9989	109	1,17	356
BAK14	0,5703	0,0052	0,9986	107	1,15	349
BAK15	0,1867	0,0045	0,9988	93	1,00	302
BAK16	0,3202	0,0045	0,9985	93	1,00	302
BAK17	0,4619	0,0042	0,9985	87	0,93	282
BAK18	0,4330	0,0044	0,9985	91	0,98	295
BAK19	0,1821	0,0044	0,9986	91	0,98	295
BAK20	0,3337	0,0041	0,9983	85	0,91	275
BAK21	0,6230	0,0056	0,9975	115	1,24	376

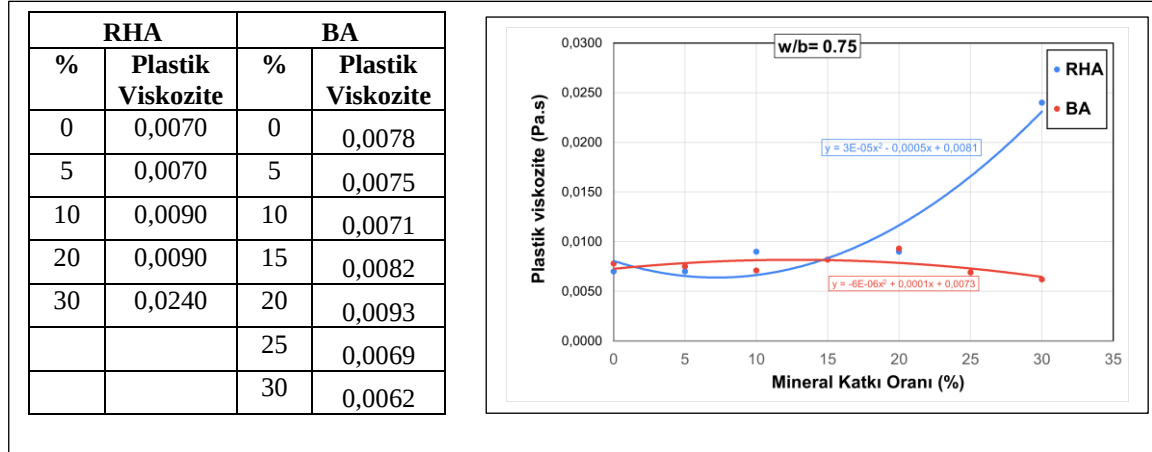
4.4 Mineral Katkıların Parametrelerinin Değerlendirilmesi

4.4.1 w/b=0,75 oranında

Plastik Viskozite Davranışı

w/b= 0,75 için pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü katkı oranları farklı yüzdelerde (RHA=0,5,10,20,30; BA=0,5,10,15,20,25,30) iken meydana gelen plastik viskozite değerleri grafikselleştirilmiştir. Oluşturulan grafiklerde pirinç kabuğu külünün katkı oranı

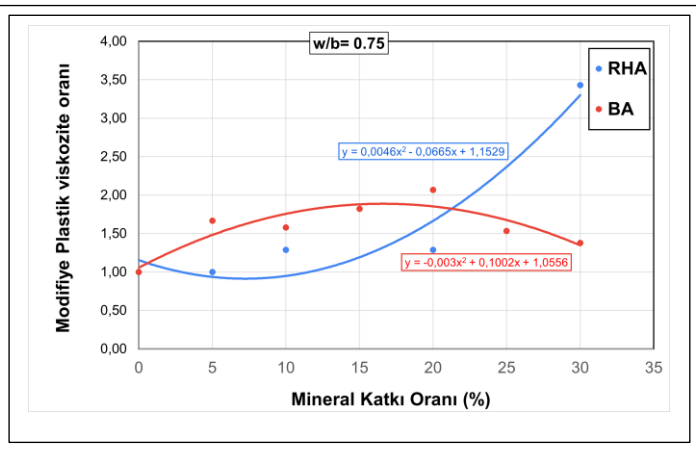
arttıkça plastik viskozitenin (Pa.s) de arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra kazan altı taban külü katkı oranı arttıkça plastik viskozite (Pa.s) de azalma görülmektedir.



Şekil 4.1. w/b=0,75 Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külü plastik viskozite değerleri

Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külünün farklı katkı oranlarında kullanılmasıyla modifiye plastik viskozite değerlerindeki değişim incelendiğinde pirinç kabuğu külünde katkı oranı arttıkça modifiye plastik viskozite oranı da artmışken kazan altı taban külünde %15'e kadar katkı oranı modifiye plastik viskozitede artışa sebep olurken %15'ten fazlası modifiye plastik viskozitede azalmaya sebep olmuştur. Buradan ulaşılan bilgilere göre kazan altı taban külünde kullanılan miktar arttıkça modifiye plastik viskozitenin azalacağı görülmektedir. Kazan altı taban külü ve pirinç kabuğu külünün karşılaştırmalı analizinin yapılabilmesi için başlangıç noktaları eşitlenmiştir. Bu bağlamda modifiye basınç oranı pirinç kabuğu külü katkısı arttıkça artarken kazan altı taban külü katkısı artarken azalış göstermektedir.

RHA		BA	
%	Modifiye Plastik Viskozite	%	Modifiye Plastik Viskozite
0	1,0000	0	1,0000
5	1,0000	5	1,6667
10	1,2857	10	1,5778
20	1,2857	15	1,8222
30	3,4286	20	2,0667
		25	1,5333
		30	1,3778



Şekil 4.2. w/b=0,75 Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külü Modifiye Plastik Viskozite Değerleri

Permeasyon Enjeksiyonu İçin Silindirik Akma Modeli

Silindirik akış modeli için pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külü, farklı w/b oranlarında permeasyon enjeksiyon basınçları Çizelge 4.7. ve Çizelge 4.8.' de gösterilmektedir. Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külünün permeasyon enjeksiyonu için silindirik akma modelinin oluşturulması aşamasında bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bunlar; enjeksiyon noktasından uzaklık ($R=2m$), enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o= 0,02 m$), enjekte edilen harç tabakasının kalınlığı ($m= 0,6$), enjeksiyon akış hızı ($Q= 0,01 m^3/s$), zeminin su geçirgenliği ($k= 0,006 m/s$) ve suyun viskozitesi ($\mu_w= 0,0015 Pa.s$)'dir.

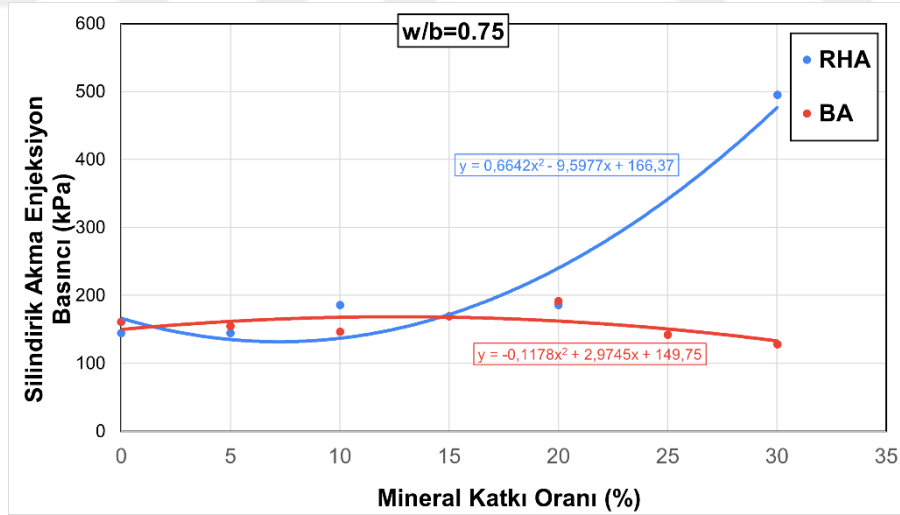
Çizelge 4.7. w/b=0,75 Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m^3/s)	Y (kN/m^3)	R_o (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ_w (Pas)	Pe (kPa)	RHA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0070	0,0015	144	0	2,33
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0070	0,0015	144	5	2,33
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0090	0,0015	186	10	2,99
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0090	0,0015	186	20	2,99
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0240	0,0015	495	30	7,98

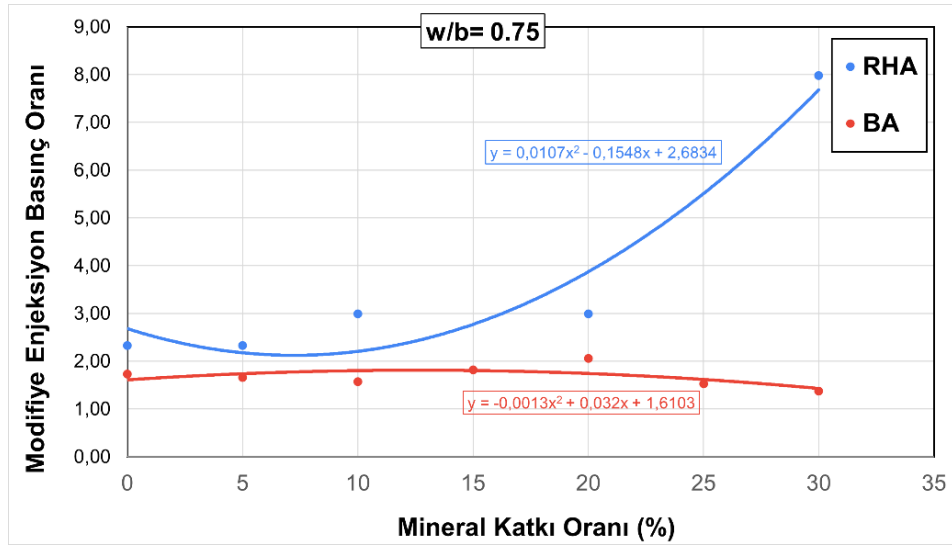
Çizelge 4.8. $w/b=0,75$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R ₀ (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μw (Pas)	Pe (kPa)	BA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0078	0,0015	161	0	1,73
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0075	0,0015	155	5	1,66
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0071	0,0015	146	10	1,57
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0082	0,0015	169	15	1,82
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0093	0,0015	192	20	2,06
6	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0069	0,0015	142	25	1,53

Çizelge 4.7. ve Çizelge 4.8. kullanılarak oluşturulan Şekil 4.3'teki grafiğe göre pirinç kabuğu külünün eklendiği karışımların silindirik akma enjeksiyon basıncının, mineral katkı oranı arttıkça arttığı; kazan altı taban külünün oluşturduğu karışımların silindirik akma enjeksiyon basıncını ise katkı oranı arttıkça azalttığı görülmektedir. Şekil 4.4' te ki modifiye enjeksiyon basınç oranının da silindirik akma enjeksiyon basıncı ile aynı yönde gelişim gösterdiği ancak artış ve azalma arasındaki eğriler arası mesafenin daha fazla olduğuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.3. $w/b=0,75$ 'te RHA ve BA'nın silindirik akma enjeksiyon basıncına etkisi



Şekil 4.4. w/b=0,75'te RHA ve BA'nın modifiye enjeksiyon basıncına etkisi

Permeasyon Enjeksiyonu İçin Küresel Akma Modeli

Küresel akma modeli için silindirik akma modelinde olduğu gibi bazı parametreler sabit tutularak elde edilmiştir. Bu parametreler; enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o = 0,02\text{m}$), enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,01\text{ m}^3/\text{s}$), zeminin su geçirgenliği ($k = 0,006\text{ m/s}$), suyun viskozitesi ($\mu_w = 0,0015\text{ Pa.s}$)'dir. Karışımların tamamında plastik viskozite değişken olarak kullanılmıştır. Sabit varsayılan değerler literatürde daha önce çalışılmış permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılan değerlerden seçilmiştir. (Çizelge 4.9, Çizelge 4.10)

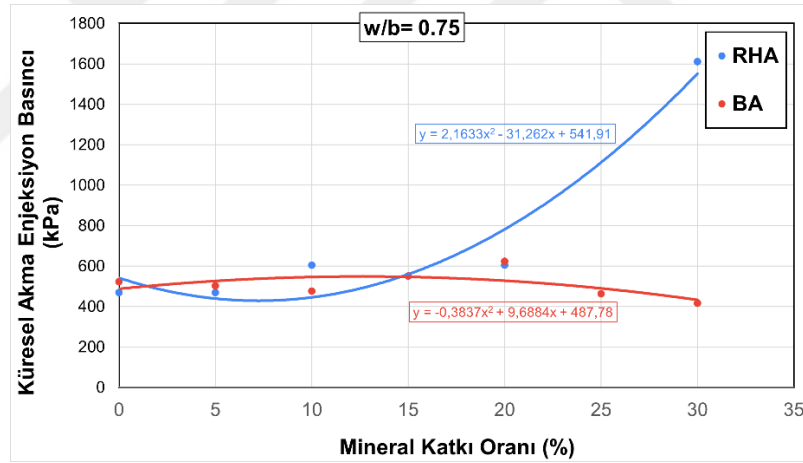
Çizelge 4.9. w/b=0,75 Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pas)	Pe (kPa)	RHA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0070	0,0015	470	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0070	0,0015	470	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0090	0,0015	604	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0090	0,0015	604	20
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0240	0,0015	1612	30

Çizelge 4.10. w/b=0,75 Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	Ro (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pa.s)	Pe (kPa)	BA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0078	0,0015	524	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0075	0,0015	504	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0071	0,0015	477	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0082	0,0015	551	15
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0093	0,0015	624	20
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0069	0,0015	463	25
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0062	0,0015	416	30

Şekil 4.5’ te ki küresel akma enjeksiyon basıncı modeli grafiğine göre pirinç kabuğu külü mineral katkı oranı arttıkça küresel akma enjeksiyon basıncı artarken kazan altı taban külü mineral katkısının artmasıyla küresel akma enjeksiyon basıncının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.5. w/b= 0,75 Küresel Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli

4.4.2 w/b=1,00 oranında

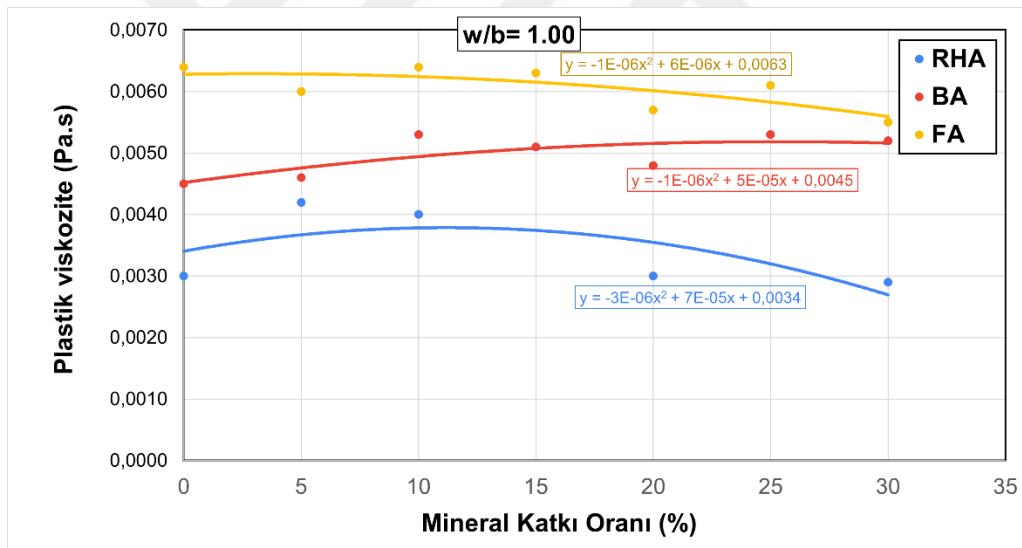
Plastik Viskozite Davranışı

w/b= 1,00 için pirinç kabuğu külü, kazan altı taban külü ve uçucu kül katkı oranları farklı yüzdelerde (RHA(%)= 0,5,10,20,30; BA(%)= 0,5,10,15,20,25,30; FA(%)= 0,5,10,15,20,25,30;) iken meydana gelen plastik viskozite değerleri Çizelge 4.11’ de verilmiştir.

Çizelge 4.11. w/b=1,00 RHA, BA ve FA Plastik Viskozite Değerleri

RHA		BA		FA	
%	Plastik viskozite (Pa.s)	%	Plastik viskozite (Pa.s)	%	Plastik viskozite (Pa.s)
0	0,0030	0	0,0045	0	0,0064
5	0,0042	5	0,0046	5	0,0060
10	0,0040	10	0,0053	10	0,0064
20	0,0030	15	0,0051	15	0,0063
30	0,0029	20	0,0048	20	0,0057
		25	0,0053	25	0,0061
		30	0,0052	30	0,0055

Çizelge 4.11 baz alınarak plastik viskozite değerlerinin mineral katkılarına göre değişim durumu Şekil 4.6’ da RHA, BA ve FA mineral katkılarının harç karışımlarının plastik viskozitelerine etkisi grafik olarak modellenmiş ve grafiğe göre; mineral katkıları arttıkça harcın plastik viskozitesinin azaldığı görülmektedir.



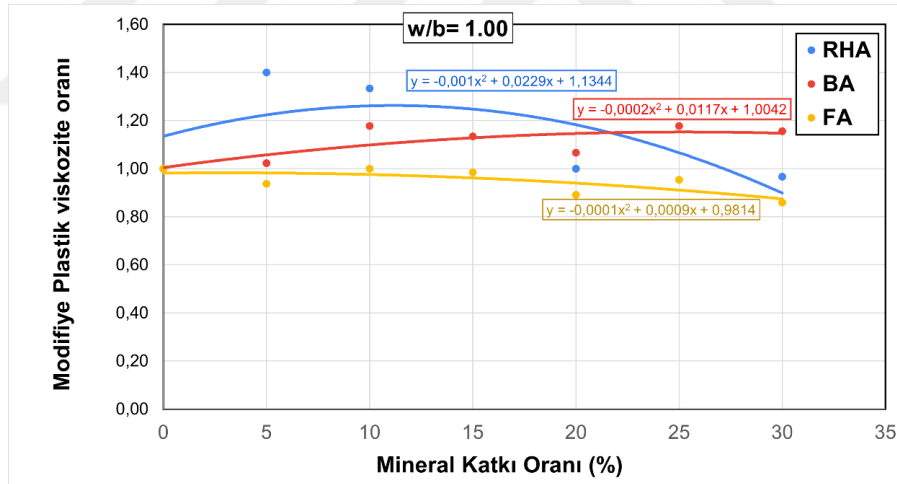
Şekil 4.6. w/b=1,00 iken RHA, BA ve FA Minerallerinin Plastik Viskoziteye Etkisi

Şekil 4.6’ da pirinç kabuğu, kazan altı taban külü ve uçucu külün modifiye plastik viskozite oranları verilmiş olup Çizelge 4.12’ de grafik modeli yapılmıştır.

Çizelge 4.12. w/b=1,00 RHA, BA ve FA Modifiye Plastik Viskozite Oranı

RHA		BA		FA	
%	Modifiye Plastik Viskozite Oranı	%	Modifiye Plastik Viskozite Oranı	%	Modifiye Plastik Viskozite Oranı
0	1,0000	0	1,0000	0	1,0000
5	1,4000	5	1,0222	5	0,9375
10	1,3333	10	1,1778	10	1,0000
20	1,0000	15	1,1333	15	0,9844
30	0,9667	20	1,0667	20	0,8906
		25	1,1778	25	0,9531
		30	1,1556	30	0,8594

Kazan altı taban külü, uçucu kül ve pirinç kabuğu külünde karşılaştırmalı analizlerin yapılabilmesi için bu üç mineral katkının başlangıç noktaları eşitlenmiştir. Bu bağlamda modifiye basınç oranı her üç katkı için de katkı miktarı arttıkça azalış göstermektedir. Şekil 4.7' ye göre mineral katkı oranları arttıkça modifiye plastik viskozite oranında azalma görülmektedir.



Şekil 4.7. w/b=1,00 HA, BA ve FA Mineral Katkı Oranlarına Göre Modifiye Plastik Viskozite Oranı

Permeasyon Enjeksiyonu İçin Silindirik Akma Modeli

Silindirik akış modeli için farklı w/b oranlarında permeasyon enjeksiyon basıncı uçucu kül, pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü içeriği ilişkileri Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'te gösterilmektedir. Karışımın silindirik akma modelinin oluşturulması aşamalarında bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bunlar; enjeksiyon noktasından uzaklık ($R=2m$), enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o=0,02\ m$), enjekte edilen harç

tabakasının kalınlığı ($m = 0,6$), enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$), zeminin su geçirgenliği ($k = 0,006 \text{ m/s}$) ve suyun viskozitesi ($\mu_w = 0,0015 \text{ Pa.s}$)'dir. Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'te mineral katkılarının (RHA- BA- FA); %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında kullanılmalarıyla elde edilen parametrelerin oluşturduğu permeasyon enjeksiyonu ve modifiye basınç oranına ulaşılmaktadır.

Çizelge 4.13. $w/b=1,00$ Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ_w (Pas)	Pe (kPa)	RHA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0030	0,0015	62	0	1,00
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0042	0,0015	87	5	1,40
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0040	0,0015	82	10	1,33
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0030	0,0015	62	20	1,00
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0029	0,0015	60	30	0,96

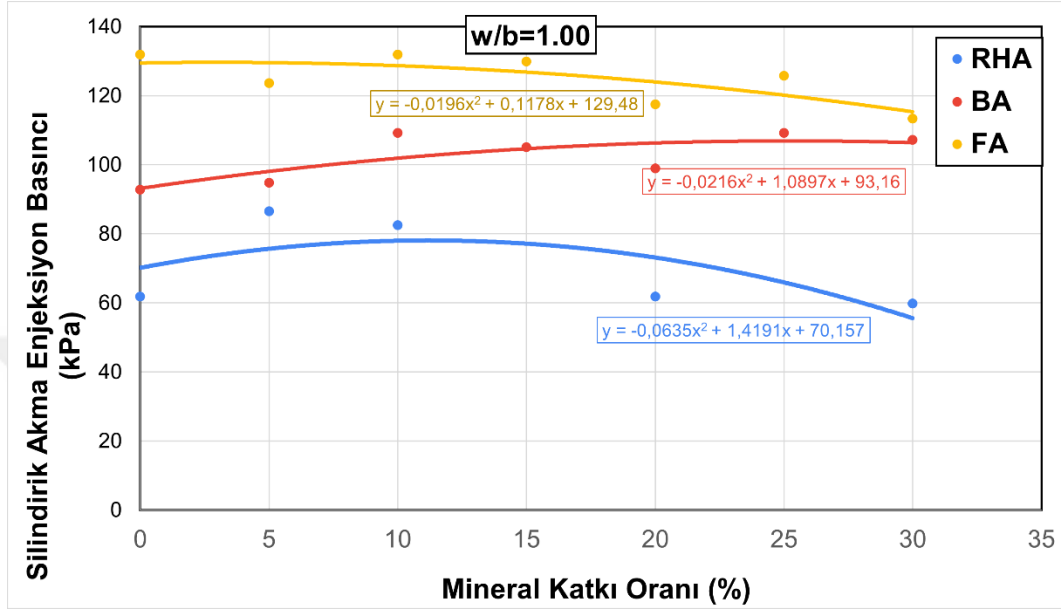
Çizelge 4.14. $w/b=1,00$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ_w (Pas)	Pe (kPa)	BA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0045	0,0015	93	0	1,00
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0046	0,0015	95	5	1,02
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0053	0,0015	109	10	1,17
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0051	0,0015	105	15	1,13
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0048	0,0015	99	20	1,06
6	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0053	0,0015	109	25	1,17

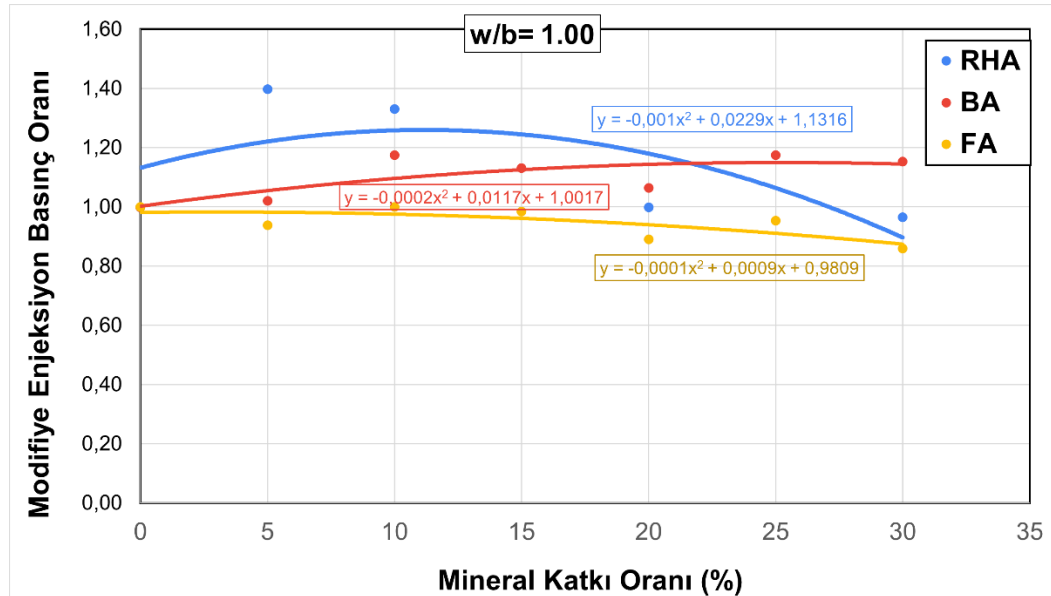
Çizelge 4.15. $w/b=1,00$ Uçucu Kül Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ_w (Pas)	Test no	FA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0064	0,0015	132	0	1,00
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0060	0,0015	124	5	0,94
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0064	0,0015	132	10	1,00
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0063	0,0015	130	15	0,98
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0057	0,0015	118	20	0,89
6	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0061	0,0015	126	25	0,95

Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'ten elde edilen bilgiler dahilinde hazırlanan Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki grafik modellerinde görüldüğü üzere $w/b=1,00$ için uçucu kül, kazan altı taban külü ve pirinç kabuğu külünün katkıları arttıkça silindirik akma ve modifiye enjeksiyon basıncında azalma görülmektedir.



Şekil 4.8. $w/b=1,00$ için FA, RHA ve BA Silindirik Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli



Şekil 4.9. $w/b=1,00$ için FA, RHA ve BA Modifiye Enjeksiyon Basıncı Modeli

Permeasyon Enjeksiyonu İçin Küresel Akma Modeli

w/b= 1,00 oranında küresel akma modeli için bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bu parametreler; enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o = 0,02\text{m}$), enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$), zeminin su geçirgenliği ($k = 0,006 \text{ m/s}$), suyun viskozitesi ($\mu_w = 0,0015 \text{ Pa.s}$)'dir. Karışımların tamamında plastik viskozite değişken olarak kullanılmıştır. Sabit varsayılan değerler permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılan değerlerden seçilmiştir. (Çizelge 4.16, Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18)

Çizelge 4.16. w/b=1,00 Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pas)	Pe (kPa)	RHA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0030	0,0015	201	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0042	0,0015	282	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0040	0,0015	269	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0030	0,0015	201	20
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0029	0,0015	195	30
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006		0,0015	0	

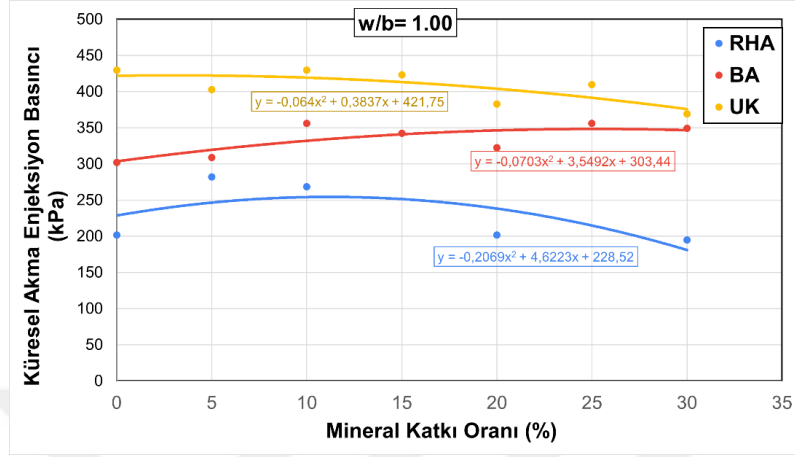
Çizelge 4.17. w/b=1,00 Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pas)	Pe (kPa)	BA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0045	0,0015	302	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0046	0,0015	309	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0053	0,0015	356	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0051	0,0015	342	15
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0048	0,0015	322	20
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0053	0,0015	356	25
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0052	0,0015	349	30

Çizelge 4.18. w/b=1,00 Uçucu Kül Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pas)	Pe (kPa)	FA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0064	0,0015	430	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0060	0,0015	403	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0064	0,0015	430	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0063	0,0015	423	15
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0057	0,0015	383	20
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0061	0,0015	410	25

Çizelge 4.16, Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18’ de verilen parametrelerden oluşturulan Şekil 4.10’da ki küresel akma enjeksiyon basıncı modeli grafiğine göre mineral katkıları arttıkça küresel akma enjeksiyon basıncında azalma görülmektedir.

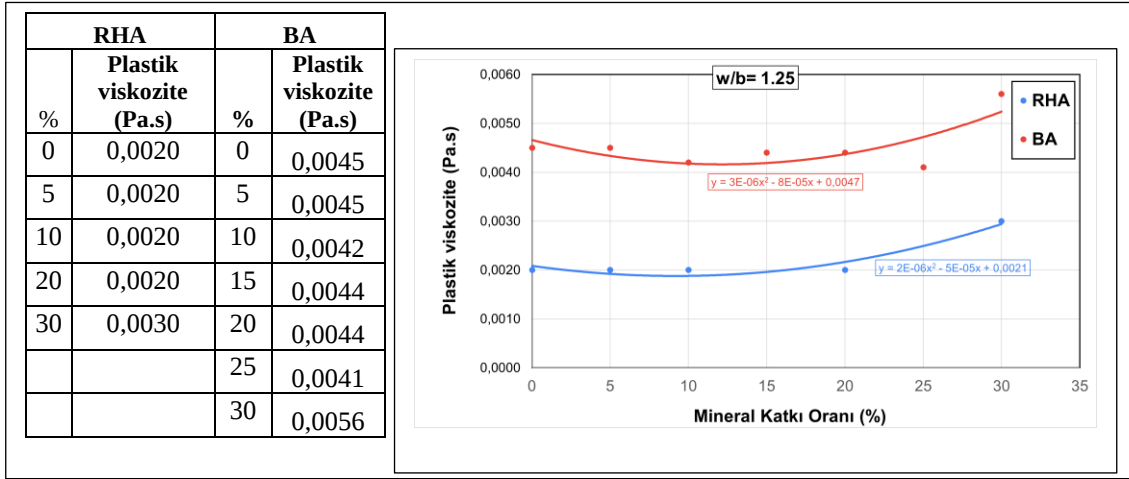


Şekil 4.10. w/b= 1,00 Küresel Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli

4.4.3 w/b=1,25 oranında

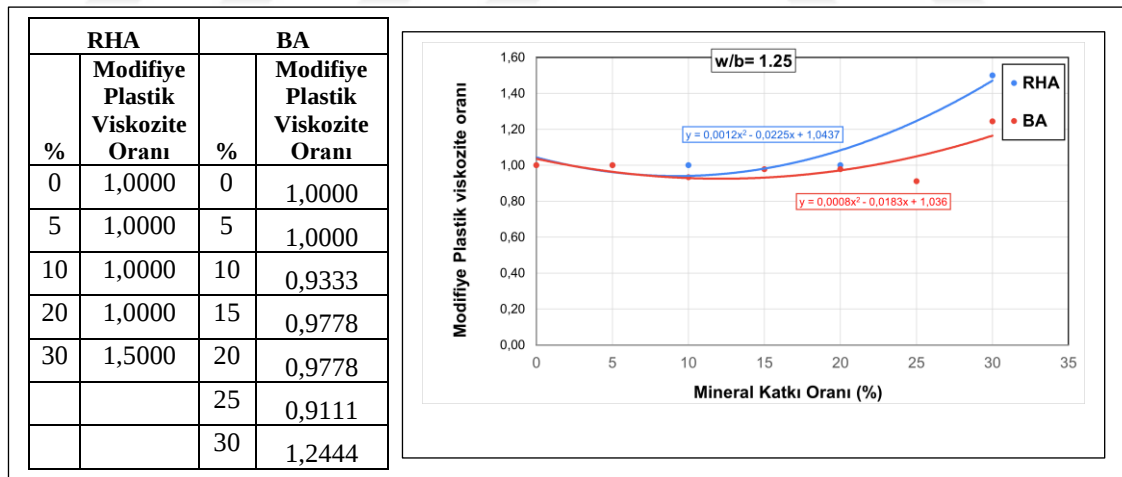
Plastik Viskozite Davranışı

w/b= 1,25 için pirinç kabğu külü ve kazan altı taban külü katkı oranları farklı yüzdelerde (RHA=0,5,10,20,30; BA=0,5,10,15,20,25,30) iken meydana gelen plastik viskozite değerleri grafik olarak modellenmiştir. Oluşturulan grafiklerde her iki mineral katkısının da katkı oranı arttıkça plastik viskozitenin (Pa.s) de arttığı görülmektedir.



Şekil 4.11. w/b=1,25 için RHA ve BA Mineral Katkı Oranlarına Göre Plastik Viskozite Değerleri

Kazan altı taban külü ve pirinç kabuğu külünün karşılaştırmalı analizinin yapılabilmesi için başlangıç noktaları eşitlenmiştir. Bu bağlamda modifiye basınç oranı her iki mineralde de katkı oranı arttıkça artış göstermektedir. Buradan yola çıkılarak w/b=1,25 değeri için plastik viskozite ile modifiye plastik viskozite oranlarının doğru orantılı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.12. w/b=1,25 için RHA ve BA Mineral Katkı Oranlarına Göre Plastik Viskozite Değerleri

Permeasyon Enjeksiyonu İçin Silindirik Akma Modeli

Silindirik akış modeli için w/b= 1,25 oranında permeasyon enjeksiyon basıncı ile pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü özellikleri Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20’de

gösterilmektedir. Karışımın silindirik akma modelinin oluşturulmasında birkaç parametre sabit tutulmuştur. Bunlar; enjeksiyon noktasından uzaklık ($R=2\text{m}$), enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o=0,02\text{ m}$), enjekte edilen harç tabakasının kalınlığı ($m=0,6$), enjeksiyon akış hızı ($Q=0,01\text{ m}^3/\text{s}$), zeminin su geçirgenliği ($k=0,006\text{ m/s}$) ve suyun viskozitesi ($\mu_w=0,0015\text{ Pa.s}$)'dir.

Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20'de mineral katkılarının (RHA- BA); %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında kullanılmalarıyla elde edilen parametrelerin oluşturduğu permeasyon enjeksiyonu ve modifiye basınç oranına ulaşılmaktadır.

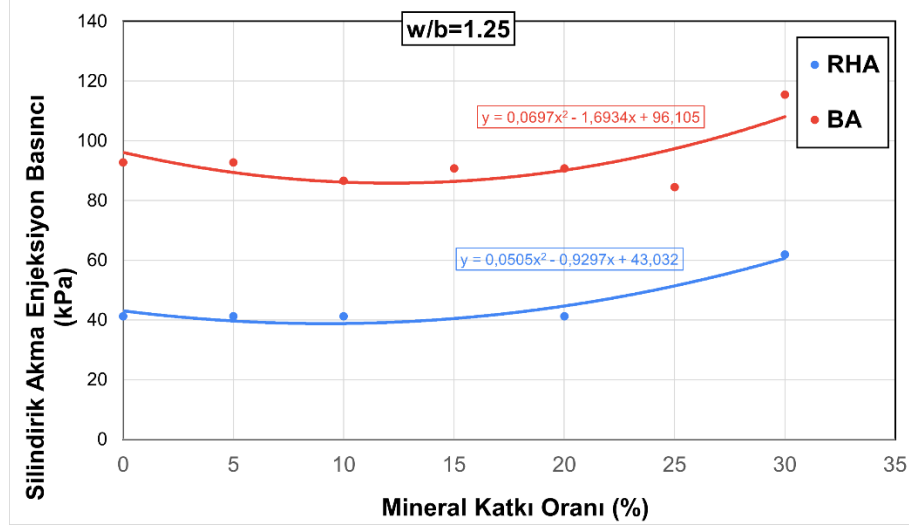
Çizelge 4.19. $w/b=1,25$ Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m^3/s)	Y (kN/m^3)	R_o (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ_w (Pas)	Pe (kPa)	RHA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0020	0,0015	41	0	0,67
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0020	0,0015	41	5	0,67
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0020	0,0015	41	10	0,67
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0020	0,0015	41	20	0,67
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0030	0,0015	62	30	1,00

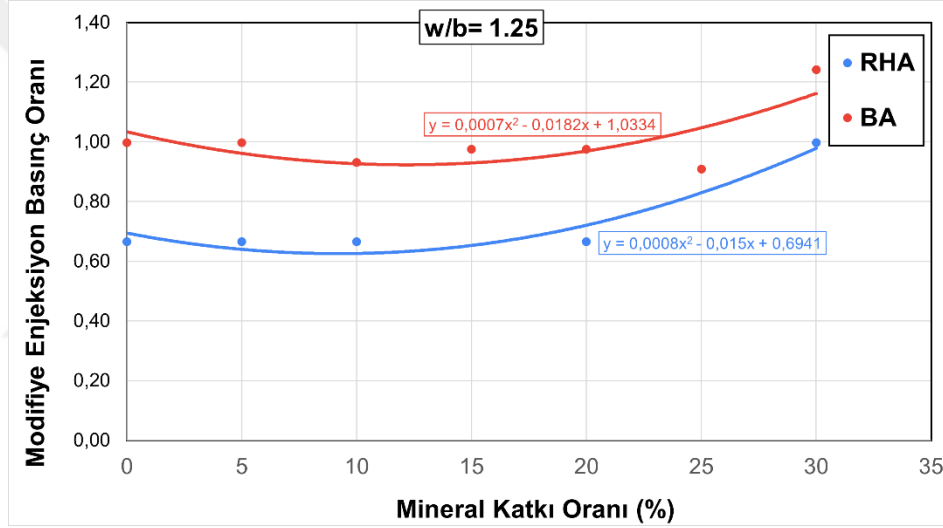
Çizelge 4.20. $w/b=1,25$ Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Silindirik Akma Modeli ve Modifiye Basınç Oranı

Test no	Q (m^3/s)	Y (kN/m^3)	R_o (m)	R (m)	m	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ_w (Pas)	Pe (kPa)	BA	Modifiye Basınç Oranı
1	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0045	0,0015	93	0	1,00
2	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0045	0,0015	93	5	1,00
3	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0042	0,0015	87	10	0,93
4	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0044	0,0015	91	15	0,98
5	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0044	0,0015	91	20	0,98
6	0,01	15,18	0,02	2	0,6	0,006	0,0041	0,0015	85	25	0,91

Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20'de kullanılarak oluşturulan Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki grafiklere göre mineral katkı oranı arttıkça her iki karışımın da hem silindirik akma enjeksiyon basıncının hem de modifiye enjeksiyon basınç oranının arttığına ulaşılmıştır.



Şekil 4.13. w/b=1,25 için RHA ve BA Silindirik Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli



Şekil 4.14. w/b=1,25 için RHA ve BA Modifiye Enjeksiyon Basıncı Modeli

Permeasyon Enjeksiyonu İçin Küresel Akma Modeli

w/b=1,25 oranında küresel akma modeli için silindirik akma modelinde olduğu gibi bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bu parametreler; enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o = 0,02m$), enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,01 m^3/s$), zeminin su geçirgenliği ($k = 0,006 m/s$), suyun viskozitesi ($\mu_w = 0,0015 Pa.s$)'dir. Karışımların tamamında plastik viskozite değişken olarak kullanılmıştır. Sabit varsayılan değerler permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılan değerlerden seçilmiştir. (Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22)

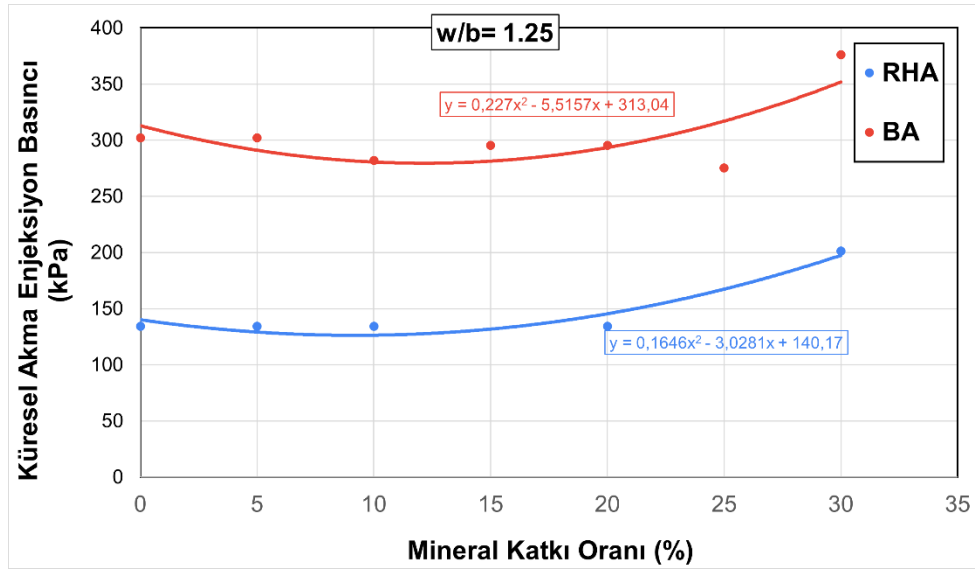
Çizelge 4.21. w/b=1,25 Pirinç Kabuğu Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pa.s)	Pe (kPa)	RHA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0020	0,0015	134	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0020	0,0015	134	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0020	0,0015	134	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0020	0,0015	134	20
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0030	0,0015	201	30
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006		0,0015	0	

Çizelge 4.22. w/b=1,25 Kazan Altı Taban Külü Permeasyon Enjeksiyonu için Küresel Akma Modeli

Test no	Q (m ³ /s)	Y (kN/m ³)	R _o (m)	C (m)	k (m/s)	μ (Pa.s)	μ _w (Pa.s)	Pe (kPa)	BA
1	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0045	0,0015	302	0
2	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0045	0,0015	302	5
3	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0042	0,0015	282	10
4	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0044	0,0015	295	15
5	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0044	0,0015	295	20
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0041	0,0015	275	25
6	0,01	15,18	0,02	0,2512	0,006	0,0056	0,0015	376	30

Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.23'te verilen parametrelerden oluşturulan Şekil 4.15'teki küresel akma enjeksiyon basıncı modeli grafiğine göre pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü mineral katkıları arttıkça küresel akma enjeksiyon basınçlarında artış görülmektedir.



Şekil 4.15. w/b= 1,25 Küresel Akma Enjeksiyon Basıncı Modeli

4.4.4 Değişken Parametrelere Göre Silindirik Akma Modeli t(sn)

Çalışma kapsamında bazı parametreler sabit seçilerek karışımların silindirik akma modeli için süreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler; enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$), enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o = 0,02\text{m}$) ve zemin boşluk oranı ($n = 0,5$) değerleridir. Bu değerler sabit tutulup seçilen parametrelere göre süredeki değişim analiz edilmiştir. Değişken parametreler; enjeksiyon noktasından uzaklık ($R = 0,5-1,00-1,5-2,00-2,5\text{m}$) ve enjekte edilen harç tabakasının kalınlığı ($m = 0,3$) değeridir.

Çizelge 4.23. $m = 0,3$ için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m^3/s)	m	R_o (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,04	0,3	0,02	0,5	0,5	2,9
2	0,04	0,3	0,02	1	0,5	11,8
3	0,04	0,3	0,02	1,5	0,5	26,5
4	0,04	0,3	0,02	2	0,5	47,1
5	0,04	0,3	0,02	2,5	0,5	73,6
6	0,04	0,3	0,02	3	0,5	106,0

Çizelge 4.24. m= 0,6 için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m ³ /s)	m	R _o (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,04	0,6	0,02	0,5	0,5	5,9
2	0,04	0,6	0,02	1	0,5	23,6
3	0,04	0,6	0,02	1,5	0,5	53,0
4	0,04	0,6	0,02	2	0,5	94,2
5	0,04	0,6	0,02	2,5	0,5	147,3
6	0,04	0,6	0,02	3	0,5	212,0

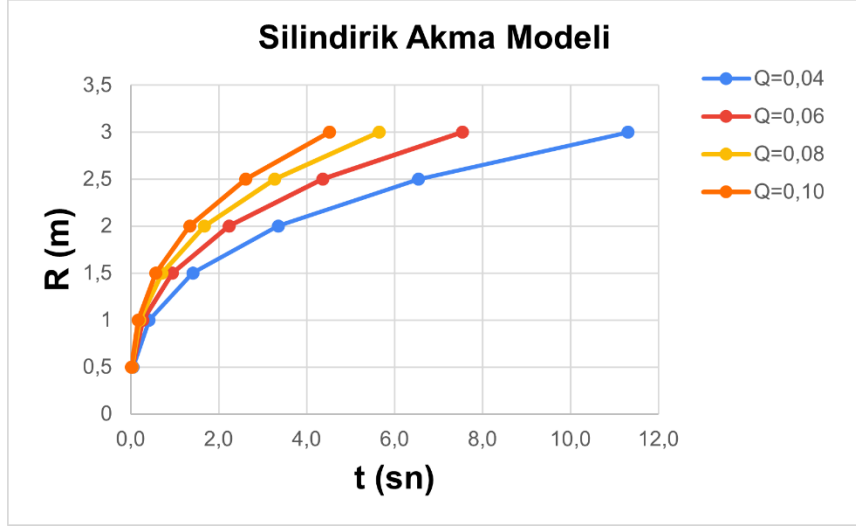
Çizelge 4.25. m= 0,9 için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m ³ /s)	m	R _o (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,04	0,9	0,02	0,5	0,5	8,8
2	0,04	0,9	0,02	1	0,5	35,3
3	0,04	0,9	0,02	1,5	0,5	79,5
4	0,04	0,9	0,02	2	0,5	141,4
5	0,04	0,9	0,02	2,5	0,5	220,9
6	0,04	0,9	0,02	3	0,5	318,1

Çizelge 4.26. m= 1,2 için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m ³ /s)	m	R _o (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,04	1,2	0,02	0,5	0,5	11,8
2	0,04	1,2	0,02	1	0,5	47,1
3	0,04	1,2	0,02	1,5	0,5	106,0
4	0,04	1,2	0,02	2	0,5	188,5
5	0,04	1,2	0,02	2,5	0,5	294,5
6	0,04	1,2	0,02	3	0,5	424,1

Şekil 4.16' daki modelde sabit bir enjeksiyon noktasından sabit 2m uzaklık değeri seçilmiştir. Sabit uzaklıkta m (enjekte edilen harç tabakasının kalınlığı) arttıkça süre artmıştır.



Şekil 4.16. $m = 0,3- 0,6- 0,9- 1,2$ değişkenlerine göre silindirik akma modeli $t(\text{sn})$

Silindirik akma Modelinde “ $t(\text{sn})$ ” değeri için belirlenen bir diğer değişken; enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,04- 0,06- 0,08- 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$) değeridir. (Çizelge 4.27, Çizelge 4.28, Çizelge 4.29 ve Çizelge 4.30)

Çizelge 4.27. $Q = 0,04 \text{ m}$ için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m ³ /s)	m	R ₀ (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,04	0,6	0,2	0,5	0,5	0,1
2	0,04	0,6	0,2	1	0,5	0,4
3	0,04	0,6	0,2	1,5	0,5	1,4
4	0,04	0,6	0,2	2	0,5	3,4
5	0,04	0,6	0,2	2,5	0,5	6,5
6	0,04	0,6	0,2	3	0,5	11,3

Çizelge 4.28. $Q = 0,06 \text{ m}$ için Silindirik Akma Modeli Süresi

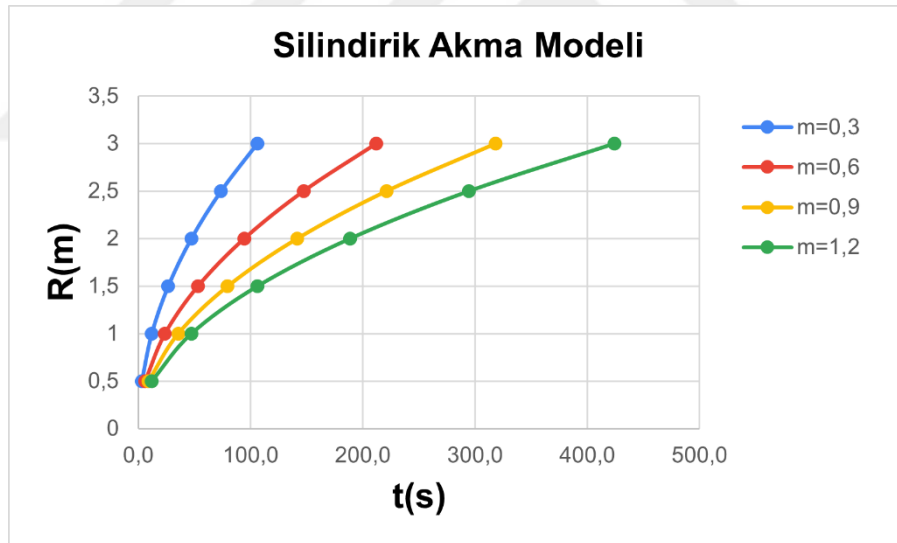
Test no	Q (m ³ /s)	m	R ₀ (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,06	0,6	0,2	0,5	0,5	0,0
2	0,06	0,6	0,2	1	0,5	0,3
3	0,06	0,6	0,2	1,5	0,5	0,9
4	0,06	0,6	0,2	2	0,5	2,2
5	0,06	0,6	0,2	2,5	0,5	4,4
6	0,06	0,6	0,2	3	0,5	7,5

Çizelge 4.29. $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m ³ /s)	m	R ₀ (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,08	0,6	0,2	0,5	0,5	0,0
2	0,08	0,6	0,2	1	0,5	0,2
3	0,08	0,6	0,2	1,5	0,5	0,7
4	0,08	0,6	0,2	2	0,5	1,7
5	0,08	0,6	0,2	2,5	0,5	3,3
6	0,08	0,6	0,2	3	0,5	5,7

Çizelge 4.30. $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ için Silindirik Akma Modeli Süresi

Test no	Q (m ³ /s)	m	R ₀ (m)	R (m)	n	Silindirik Akma Modeli için t (sn)
1	0,1	0,6	0,2	0,5	0,5	0,0
2	0,1	0,6	0,2	1	0,5	0,2
3	0,1	0,6	0,2	1,5	0,5	0,6
4	0,1	0,6	0,2	2	0,5	1,3
5	0,1	0,6	0,2	2,5	0,5	2,6
6	0,1	0,6	0,2	3	0,5	4,5



Şekil 4.17. $Q = 0,04- 0,06- 0,08- 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ değişkenine göre silindirik akma modeli t(sn)

Şekil 4.17’ deki modelde sabit bir enjeksiyon noktasından sabit 2m uzaklık değeri seçilmiştir. Sabit uzaklıkta Q (debi) arttıkça süre artmıştır.

4.4.5 Değişken Parametrelere Göre Küresel Akma Modeli t(sn)

Çalışma kapsamında bazı parametreler sabit seçilerek harç karışımlarının küresel akma modeli için süreleri hesaplanmıştır. Çalışmadaki sabit parametreler; enjeksiyon akış hızı ($Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$) ve enjeksiyon boru yarıçapı ($R_o = 0,02\text{m}$) değerleridir. Değişken parametreler; zemin boşluk oranı ($n = 0,2- 0,4- 0,6- 0,8- 1,0$) ve enjeksiyon noktasından uzaklık ($R = 0,5-1,00-1,5-2,00-2,5- 3\text{m}$) değerleridir. (Çizelge 4.31, Çizelge 4.32, Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.34)

Çizelge 4.31. $n = 0,2$ için Küresel Akma Modeli $t(\text{sn})$

Test no	Q (m ³ /s)	R _o (m)	R (m)	n	Küresel Akma Modeli için t (sn)
1	0,01	0,2	0,5	0,2	0,1
2	0,01	0,2	1	0,2	0,7
3	0,01	0,2	1,5	0,2	2,3
4	0,01	0,2	2	0,2	5,4
5	0,01	0,2	2,5	0,2	10,5
6	0,01	0,2	3	0,2	18,1

Çizelge 4.32. $n = 0,4$ için Küresel Akma Modeli $t(\text{sn})$

Test no	Q (m ³ /s)	R _o (m)	R (m)	n	Küresel Akma Modeli için t (sn)
1	0,01	0,2	0,5	0,4	0,2
2	0,01	0,2	1	0,4	1,3
3	0,01	0,2	1,5	0,4	4,5
4	0,01	0,2	2	0,4	10,7
5	0,01	0,2	2,5	0,4	20,9
6	0,01	0,2	3	0,4	36,2

Çizelge 4.33. $n = 0,6$ için Küresel Akma Modeli $t(\text{sn})$

Test no	Q (m ³ /s)	R _o (m)	R (m)	n	Küresel Akma Modeli için t (sn)
1	0,01	0,2	0,5	0,6	0,3
2	0,01	0,2	1	0,6	2,0
3	0,01	0,2	1,5	0,6	6,8
4	0,01	0,2	2	0,6	16,1
5	0,01	0,2	2,5	0,6	31,4
6	0,01	0,2	3	0,6	54,3

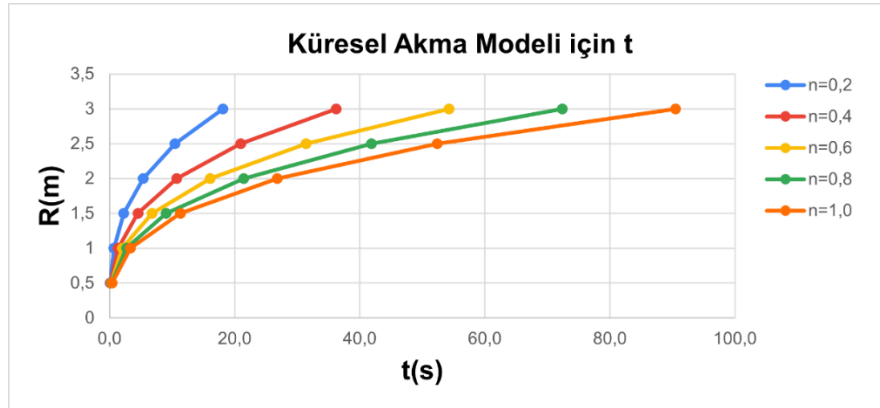
Çizelge 4.34. $n=0,8$ için Küresel Akma Modeli $t(\text{sn})$

Test no	Q (m ³ /s)	R ₀ (m)	R (m)	n	Küresel Akma Modeli için t (sn)
1	0,01	0,2	0,5	0,8	0,3
2	0,01	0,2	1	0,8	2,7
3	0,01	0,2	1,5	0,8	9,0
4	0,01	0,2	2	0,8	21,4
5	0,01	0,2	2,5	0,8	41,9
6	0,01	0,2	3	0,8	72,4

Çizelge 4.35. $n=1,0$ için Küresel Akma Modeli $t(\text{sn})$

Test no	Q (m ³ /s)	R ₀ (m)	R (m)	n	Küresel Akma Modeli için t (sn)
1	0,01	0,2	0,5	1	0,4
2	0,01	0,2	1	1	3,4
3	0,01	0,2	1,5	1	11,3
4	0,01	0,2	2	1	26,8
5	0,01	0,2	2,5	1	52,4
6	0,01	0,2	3	1	90,5

Şekil 4.18'deki modelde sabit bir enjeksiyon noktasından sabit 2m uzaklık değeri seçilmiştir. Sabit uzaklıkta n (porozite) arttıkça süre artmıştır.



Şekil 4.18. $n=0,2-0,4-0,6-0,8-1,0$ değerlerine göre Küresel Akma Modeli için $t(\text{sn})$

4.5 Çalışmadaki Verilerin İstatistiksel Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında katkı malzemelerinin miktarı ile karışımın viskozitesi arasındaki ilişki ve değişimin anlamlı olup olmadığına bakmak için elde edilen veriler Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) paket programı kullanılarak istatistiksel olarak incelenmiştir. SPSS paket programı ile parametrik ve non-parametrik testlerin analizleri

yapılabilmektedir. Parametrik testler çok daha güçlü ve esnek testlerdir. Bu bağlamda; parametrik test olarak varyans analizi (ANOVA), non-parametrik olarak ise Kruskal-Wallis ve Mann-Whitney U testleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle dağılımların normalliği kontrol edilmiştir. Bu ANOVA testinin üç varsayımı karşılaması gerekmektedir. Bunlardan birincisi dağılımın normal olduğu kabulü diğeri varyansların eşit olduğu kabulü bir diğeri ise verilerin aralıklı olması kabulüdür. Bu varsayımlarından birinin veya birkaçının ihlal edilmesi durumunda non-parametrik testler kullanılmaktadır.

4.5.1 Normal Dağılıma Uygunluk Testleri Sonuçları

Normal dağılıma uygunluk testi; harç karışımlarında elde edilen verilerin normal olup olmadığının belirlenmesi için yapılmaktadır. Verilerin normal dağılması sonucu parametrik testler kullanılacakken normal dağılmaması sonucunda non- parametrik testler kullanılmaktadır. Normal dağılıma uygunluk testinde Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, skewness ve kurtosis sonuçlarına bakılmaktadır. Testlerin normal dağılıma uygunluğu için çalışma kapsamında H_0 ve H_1 hipotezleri belirlenmiştir. H_0 hipotezi, verilerin normal dağıldığı; H_1 hipotezi, verilerin normal dağılmadığını belirtmektedir.

Çizelge 4.36. Değişkenlere Yapılan Testler ile Çoklu Kıyaslama Testleri

Değişkenler	Testler	Çok Kıyaslama Testleri
μ FA, w/b=1,00)	ANOVA	Tukey HSD, Bonferroni, Scheffe, Dunnett, MWU
μ (RHA, w/b=0,75)	ANOVA	Tukey HSD, Bonferroni, Scheffe, Dunnett, MWU
μ (RHA, w/b=1,00)	ANOVA	Tukey HSD, Bonferroni, Scheffe, Dunnett, MWU
μ (RHA, w/b=1,25)	Kruskal-Wallis	MWU
μ (BA, w/b=0,75)	ANOVA	Tukey HSD, Bonferroni, Scheffe, Dunnett, MWU
μ (BA, w/b=1,00)	ANOVA	Tukey HSD, Bonferroni, Scheffe, Dunnett, MWU
μ (BA, w/b=1,25)	Kruskal-Wallis	Dunn-Bonferroni, MWU

H_0 hipotezi için $p \geq 0,05$ olmalıdır. H_0 hipotezinin sağlanmadığı durumlarda H_1 hipotezine geçilmektedir. Bu bağlamda birinci test olan Kolmogorov-Smirnov testinde elde edilen sonuçlara göre pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü katkılarının w/b oranlarının 1,25 olduğu harç karışımı parametrelerinin H_0 hipotezini sağlamadığı; diğer karışımların ise H_0 hipotezini sağladığına ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.37)

Daha sonra Shapiro-Wilk testi değerlerine bakılması gerekmektedir. Bu test örnek sayısı otuzun altında olan karşılaştırmalar için kullanılmaktadır. Kolmogorov-Smirnov testinde olduğu gibi Shapiro-Wilk testinde de H_0 hipotezine $p > 0,05$ kuralı dahilinde bakılmalıdır.

Bu bağlamda yine Kolmogorov-Smirnov testinde olduğu gibi elde edilen sonuçlara göre göre pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü katkılarının w/b oranlarının 1,25 olduğu harç karışımı parametrelerinin H_0 hipotezini sağlamadığı; diğer karışımların ise H_0 hipotezini sağladığına ulaşılmaktadır. Normal dağılıma uygunluk testi sonucunda pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü katkılarının w/b oranlarının 1,25 olduğu harç karışımı parametrelerinin normallik dağılımını sağlamadığı diğer karışımların ise normal dağılım gösterdiğine ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.37)

Çizelge 4.37. Normal Dağılıma Uygunluk Testi

Bağımlı Değişkenler	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk			Çarpıklık (Skewness)	Basıklık (Kurtosis)	Normal Dağılım
	İstatistik	df	p	İstatistik	df	p			
μ (FA, w/b=1,00)	0,152	21	0,200	0,934	21	0,163	-0,615	-0,683	Evet
μ (RHA, w/b=0,75)	0,215	15	0,060	0,844	15	0,014	-0,723	-0,605	Evet
μ (RHA, w/b=1,00)	0,147	15	0,200	0,925	15	0,230	0,081	-1,491	Evet
μ (RHA, w/b=1,25)	0,258	15	0,008	0,784	15	0,002	1,600	1,768	Hayır
μ (BA, w/b=0,75)	0,113	21	0,200	0,968	21	0,686	0,477	-0,178	Evet
μ (BA, w/b=1,00)	0,111	21	0,200	0,972	21	0,778	-0,160	-0,538	Evet
μ (BA, w/b=1,25)	0,243	21	0,002	0,830	21	0,002	1,435	1,370	Hayır

4.5.2 Varyansların Homojenliği Testinin Sonuçları

Normalliğe uygunluk testi sonrasında yapılan bir diğer test de varyansların homojenliği testi olup bu testin yapılma amacı; iki ya da daha fazla ortalama arasında fark olup olmadığı ile ilgili hipotezi test etmektir. Çalışma kapsamında bu bağlamda bağımlı ve bağımsız değişkenler kullanılmıştır. Bu test bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerini incelemeyi hedeflemektedir. $p \leq 0,05$ durumunda varyansların homojenliği sağlanmazken; p değeri 0,05'ten büyük olduğunda varyans homojenliğinin sağlandığı söylenmektedir. Bu teste göre Çizelge 4.38'de yer alan verilerin tamamında varyans homojenliğinin sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 4.38. Varyansların Homojenliği Testi

Bağımlı Değişkenler	Bağımsız Değişkenler	Levene İstatistiği	df1	df2	p	Varyansların Homojenliği
μ (FA, w/b=1,00)	FA Miktarı (w/b=1,00)	0,437	6	14	0,842	Sağlanıyor
μ (RHA, w/b=0,75)	RHA Miktarı (w/b=0,75)	0,170	4	10	0,949	Sağlanıyor
μ (RHA, w/b=1,00)	RHA Miktarı (w/b=1,00)	0,284	4	10	0,882	Sağlanıyor
μ (RHA, w/b=1,25)	RHA Miktarı (w/b=1,25)	1,265	4	10	0,346	Sağlanıyor
μ (BA, w/b=0,75)	BA Miktarı (w/b=0,75)	0,226	6	14	0,961	Sağlanıyor
μ (BA, w/b=1,00)	BA Miktarı (w/b=1,00)	0,201	6	14	0,971	Sağlanıyor
μ (BA, w/b=1,25)	BA Miktarı (w/b=1,25)	1,301	6	14	0,319	Sağlanıyor

4.5.3 ANOVA Testi

ANOVA testi sayısal bir değişken en az 3 grupta karşılaştırılmak istendiği zaman kullanılmaktadır. Bu test yardımıyla gruplardan en az birinin diğerlerinden farklı olup olmadığı belirlenmektedir. Bu teste göre ANOVA çizelgesinde “p” değeri incelenir. “p değeri” anlamlılık durumunu göstermektedir. $p>0,05$ ise gruplar arasında incelenen özellik açısından anlamlı bir fark yokken; $p<0,05$ ise anlamlı fark olduğu anlaşılır. Bu bağlamda Çizelge 4.39 incelendiğinde, w/b= 0,75 için pirinç kabuğu külünün kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinde anlamlı bir fark bulunmaktadır ($p\leq 0,05$).

Çizelge 4.39. ANOVA Çizelgesi (μ -RHA Miktarı, w/b=0,75)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	50,18	4	12,55	409,10	0,000
Gruplar İçi	0,31	10	0,03		
Genel	50,49	14			

Çizelge 4.40’a göre w/b=0,75 için kazan altı taban külünün kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinde anlamlı bir fark bulunmaktadır ($p\leq 0,05$).

Çizelge 4.40. ANOVA Çizelgesi (μ -BA Miktarı, w/b=0,75)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	17,56	6	2,93	39,64	0,000
Gruplar İçi	1,03	14	0,07		
Genel	18,59	20			

Çizelge 4.41'e göre w/b=1,00 için uçucu külün kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinde anlamlı bir fark bulunduğu söylenebilir ($p \leq 0,05$).

Çizelge 4.41. ANOVA Çizelgesi (μ -FA Miktarı, w/b=1,00)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	3,90	6	0,65	29,01	0,000
Gruplar İçi	0,31	14	0,02		
Genel	4,21	20			

Çizelge 4.42'ye göre w/b=1,00 için kazan altı taban külünün kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinde anlamlı bir fark bulunmaktadır ($p \leq 0,05$).

Çizelge 4.42. ANOVA Çizelgesi (μ -BA Miktarı, w/b=1,00)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	2,22	6	0,37	4,27	0,012
Gruplar İçi	1,21	14	0,09		
Genel	3,43	20			

Çizelge 4.43'e göre w/b=1,00 için pirinç kabuğu külünün kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinde anlamlı bir değişim bulunmaktadır ($p \leq 0,05$).

Çizelge 4.43. ANOVA Çizelgesi (μ -RHA Miktarı, w/b=1,00)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar Arası	11,16	4	2,79	32,96	0,000
Gruplar İçi	0,85	10	0,08		
Genel	12,01	14			

ANOVA testi sonucunda w/b=0,75 ve 1,00 oranlarındayken tüm karışımlardaki artış ve azalışların anlamlı olduğuna ulaşılmaktadır ($p \leq 0,05$).

4.5.4 Kruskal- Wallis Testi

Kruskal-Wallis testi iki veya daha fazla örneklem ortalamasının birbiri arasında manidar bir farka sahip olup olmadığının gösterilmesinde kullanılmaktadır. ANOVA'nın parametrik olmayan karşılığı olarak bilinmektedir. Sonucun manidar bir fark göstermesi

durumunda bu farkın hangi gruplar arasında olduğunu belirleyip alt gruplar arasında her bir ikili kombinasyon için Mann-Whitney U testi uygulanmaktadır. Bu bağlamda verilerin normal dağılmadığı $w/b = 1,25$ oranı için kazan altı taban külü ve pirinç kabuğu külünün kullanıldığı karışımların viskozite değerlerinde anlamlı bir değişimin olup olmadığı Kruskal-Wallis testi ile değerlendirilmiştir (Çizelge 4.44 ve Çizelge 4.45)

Çizelge 4.44. Kruskal-Wallis Testi Sonucu (RHA, $w/b=1,25$)

Sıralamalar				Test İstatistikleri	
	RHA Miktarı (%)	N	Ortalama Sıra		μ (RHA, $w/b=1,25$)
μ (RHA, $w/b=1,25$)	,00	3	6,33		
	5,00	3	6,33	Chi-square	8,093
	10,00	3	8,50	df	4
	20,00	3	4,83	Asymp. Sig.	0,088
	30,00	3	14,00		
	Toplam	15			

Çizelge 4.45. Kruskal-Wallis Testi Sonucu (BA, $w/b=1,25$);

Sıralamalar				Test İstatistikleri	
	BA Miktarı (%)	N	Ortalama Sıra		μ (BA, $w/b=1,25$)
μ (BA, $w/b=1,25$)	0,00	3	13,33	Chi-square	13,636
	5,00	3	12,50	df	6
	10,00	3	8,17	Asymp. Sig.	0,034
	15,00	3	10,33		
	20,00	3	10,33		
	25,00	3	2,33		
	30,00	3	20,00		
	Total	21			

4.5.6 POST- HOC Testi

Varyans analizlerinde F değerinin manidar çıkması sonucunda farkın kaynağının belirlenmesi için Post-Hoc testi yapılmaktadır. Post-Hoc testi, çoklu karşılaştırma testi olarak bilinmektedir. ANOVA analiz sonuçlarının incelenmesi için Post-Hoc testi olarak dört farklı test kullanılmıştır. Bunlar; Tukey HSD, Scheffe, Bonferroni ve Dunnett (iki taraflı) tır.

Bu testte FA (w/b=1,00 için), BA (w/b=0,75- 1,00 için), RHA (w/b=0,75-1,00 için) parametreleri kullanılmıştır. Post-Hoc testinde hiç katkı olmadan %100 çimento ile oluşturulan harç ile %5, %10,%15,%20,%25 ve %30 değerlerinde katkı kullanılmasıyla oluşturulan harcın viskozitelerinin ortalama farklarındaki artış veya azalışların $p \leq 0,05$ iken istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterirken $p > 0,05$ iken istatistiksel olarak anlamsız olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda uçucu kül w/b=0,75 için post-hoc testlerinin sonuçlarına bakıldığında;

- FA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir azalma görüldüğüne,
- FA miktarı %10 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir değişim görülmediğine,
- FA miktarı %15 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir azalma görüldüğüne,
- FA miktarı %20, %25 ve %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir azalma görüldüğüne ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.46)

Çizelge 4.46. Post-Hoc Test Sonuçları (FA)

Bağımlı Değişken	Post-Hoc Test	FA Miktarı (%) (I)	FA Miktarı (%) (J)	Ortalama Farkı (I-J)	p
μ (FA, w/b=1,00)	Tukey HSD	0	5	1,200	0,000
			10	0,000	1,000
			15	0,133	0,921
			20	0,533	0,009
			25	0,300	0,246
			30	0,900	0,000
	Scheffe	0	5	1,200	0,000
			10	0,000	1,000
			15	0,133	0,972
			20	0,533	0,035
			25	0,300	0,460
			30	0,900	0,000
	Bonferroni	0	5	1,200	0,000
			10	0,000	1,000
			15	0,133	1,000
			20	0,533	0,014
			25	0,300	0,582
			30	0,900	0,000
	Dunnett (2-Taraflı)	0	5	1,200	0,000
			10	0,000	1,000
			15	0,133	0,762
			20	0,533	0,003
			25	0,300	0,114
			30	0,900	0,000

Kazan altı taban külü w/b= 0,75 -1,00 değerlerinde test edilmiştir. Bu bağlamda dört tane Post- Hoc testine bakıldığında;

w/b=0,75 için

- BA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir azalış görüldüğüne
- BA miktarı %10 iken Tukey HSD, Scheffe ve Bonferroni testlerinde anlamsız bir artma; Dunnet testinde ise anlamlı bir artış görülmektedir.
- BA miktarı %15 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne
- BA miktarı %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne
- BA miktarı %25 iken viskozitelerde Tukey HSD, Dunnett ve Bonferroni testlerinde anlamlı azalış, Scheffe testinde ise anlamsız bir azalış,
- BA miktarı %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir azalış görüldüğüne ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.47)

Çizelge 4.47. Post-Hoc Test Sonuçları (BA; w/b= 0,75)

Bağımlı Değişken	Post-Hoc Test	BA Miktarı (%) (I)	BA Miktarı (%) (J)	Ortalama Farkı (I-J)	p
μ (BA, w/b=0,75)	Tukey HSD	0	5	0,300	0,817
			10	0,667	0,102
			15	-0,433	0,481
			20	-1,533	0,000
			25	0,833	0,027
			30	1,533	0,000
	Scheffe	0	5	0,300	0,924
			10	0,667	0,247
			15	-0,433	0,700
			20	-1,533	0,001
			25	0,833	0,088
			30	1,533	0,001
	Bonferroni	0	5	0,300	1,000
			10	0,667	0,198
			15	-0,433	1,000
			20	-1,533	0,000
			25	0,833	0,045
			30	1,533	0,000
	Dunnett (2-Taraflı)	0	5	0,300	0,591
			10	0,667	0,042
			15	-0,433	0,262
			20	-1,533	0,000
			25	0,833	0,010
			30	1,533	0,000

w/b=1,00 için

- BA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne
- BA miktarı %10 iken Tukey HSD testinde anlamlı bir artış görülürken diğer üç testte anlamsız bir azalış görüldüğüne
- BA miktarı %15 iken Bonferroni testinde anlamsız bir artış görülürken diğer üç testte anlamlı bir artış görüldüğüne
- BA miktarı %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.48)

Çizelge 4.48. Post-Hoc Test Sonuçları (BA; w/b= 1,00)

μ (BA, w/b=1,00)	Tukey HSD	0	5	-0,067	1,000
			10	-0,833	0,046
			15	-0,600	0,232
			20	-0,300	0,864
			25	-0,800	0,058
			30	-0,733	0,094
	Scheffe	0	5	-0,067	1,000
			10	-0,833	0,133
			15	-0,600	0,442
			20	-0,300	0,947
			25	-0,800	0,162
			30	-0,733	0,233
	Bonferroni	0	5	-0,067	1,000
			10	-0,833	0,079
			15	-0,600	0,539
			20	-0,300	1,000
			25	-0,800	0,104
			30	-0,733	0,181
	Dunnett (2-Taraflı)	0	5	-0,067	1,000
			10	-0,833	0,018
			15	-0,600	0,106
			20	-0,300	0,660
			25	-0,800	0,023
			30	-0,733	0,039

w/b=0,75 için

- RHA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir azalış görüldüğüne
- RHA miktarı %10 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne
- RHA miktarı %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne
- RHA miktarı %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir azalış görüldüğüne ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.49)

w/b=1,00 için

- RHA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne
- RHA miktarı %10 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne
- RHA miktarı %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne
- RHA miktarı %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.49)

Çizelge 4.49. Post-Hoc Test Sonuçları (RHA)

Bağımlı Değişken	Post-Hoc Test	RHA Miktarı (%) (I)	RHA Miktarı (%) (J)	Ortalama Farkı (I-J)	p
μ (RHA, w/b=0,75)	Tukey HSD	0	5	0,033	0,999
			10	-2,067	0,000
			20	-1,967	0,000
			30	2,967	0,000
	Scheffe	0	5	0,033	1,000
			10	-2,067	0,000
			20	-1,967	0,000
			30	2,967	0,000
	Bonferroni	0	5	0,033	1,000
			10	-2,067	0,000
			20	-1,967	0,000
			30	2,967	0,000
	Dunnett (2-Taraflı)	0	5	0,033	0,998
			10	-2,067	0,000
			20	-1,967	0,000
			30	2,967	0,000
μ (RHA, w/b=1,00)	Tukey HSD	0	5	-2,000	0,000
			10	-1,000	0,012
			20	-0,267	0,792
			30	-2,100	0,000
	Scheffe	0	5	-2,000	0,000
			10	-1,000	0,026
			20	-0,267	0,862
			30	-2,100	0,000
	Bonferroni	0	5	-2,000	0,000
			10	-1,000	0,018
			20	-0,267	1,000
			30	-2,100	0,000
	Dunnett (2-Taraflı)	0	5	-2,000	0,000
			10	-1,000	0,006
			20	-0,267	0,641
			30	-2,100	0,000

4.5.7 MANN- WHITNEY U Testi

Normal dağılım göstermeyen dağılımlarda iki bağımsız grubun ortalamalarının karşılaştırılmaları amacıyla kullanılmakta olan non- parametrik yöntemlerdendir. Bu testte “ $p \leq 0,05$ ” olması durumunda manidar bir fark bulunduğunu söylemek mümkündür. Sıra ortalaması büyük olanın lehine değişimler söz konusudur.

FA, w/b=1,00 için

- “0-5” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna
- “0-15”, “0-20”, 0-25” ve “0-30” grupları karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.50)

Çizelge 4.50. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (FA)

Test Değişkeni	Gruplar	N	Sıra Ortalama	Sıralamaların Toplamı	Mann-Whitney U	Z	p
μ (FA, w/b=1,00)	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	5	3	2,00	6,00			
	0	3	3,50	10,50	4,500	0,000	1,000
	10	3	3,50	10,50			
	0	3	4,17	12,50	2,500	-0,886	0,376
	15	3	2,83	8,50			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	20	3	2,00	6,00			
	0	3	4,83	14,50	0,500	-1,771	0,077
	25	3	2,17	6,50			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	30	3	2,00	6,00			

RHA, w/b=0,75 için

- “0- 5” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna
- “0-30” grubu karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.51)

RHA, w/b=1,00 için

- “0” grubu ile “5-10-20 ve 30 ” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu aleyhine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.51)

RHA, w/b=1,25 için

- “0” grubu ile “10” grubu karşılaştırıldığında “10” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna
- “0” ile “20” grubu karşılaştırıldığında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna
- “0” ile “30” grubu karşılaştırıldığında “30” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır. (Çizelge 4.51)

Çizelge 4.51. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (RHA)

Test Değişkeni	Gruplar	N	Sıra Ortalama	Sıralamaların Toplamı	Mann-Whitney U	Z	p
μ (RHA, w/b=0,75)	0	3	3,67	11,00	4,000	-0,225	0,822
	5	3	3,33	10,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	10	3	5,00	15,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	20	3	5,00	15,00			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	30	3	2,00	6,00			
μ (RHA, w/b=1,00)	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,694	0,050
	5	3	5,00	15,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	10	3	5,00	15,00			
	0	3	2,67	8,00	2,000	-1,124	0,261
	20	3	4,33	13,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	30	3	5,00	15,00			
μ (RHA, w/b=1,25)	0	3	3,50	10,50	4,500	0,000	1,000
	5	3	3,50	10,50			
	0	3	3,17	9,50	3,500	-0,443	0,658
	10	3	3,83	11,50			
	0	3	3,67	11,00	4,000	-0,232	0,817
	20	3	3,33	10,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	30	3	5,00	15,00			

BA, w/b=0,75 için

- “0” grubu ile “5-10-25 ve 30” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna

- “0” grubu ile “15 ve 20” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu aleyhine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır. (Çizelge 4. 52)

BA, w/b=1,00 için

- “0” grubu ile “5-10-25 ve 30” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır. (Çizelge 4. 52)

BA, w/b=1,25 için

- “0” grubu ile “10-15-20 ve 25” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna (Çizelge 4. 52)

Çizelge 4.52. Mann-Whitney U Testi Sonuçları (BA)

Test Değişkeni	Gruplar	N	Sıra Ortalama	Sıralamaların Toplamı	Mann-Whitney U	Z	p
μ (BA, w/b=0,75)	0	3	4,33	13,00	2,000	-1,091	0,275
	5	3	2,67	8,00			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	10	3	2,00	6,00			
	0	3	2,33	7,00	1,000	-1,528	0,127
	15	3	4,67	14,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	20	3	5,00	15,00			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	25	3	2,00	6,00			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	30	3	2,00	6,00			
μ (BA, w/b=1,00)	0	3	3,33	10,00	4,000	-0,218	0,827
	5	3	3,67	11,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	10	3	5,00	15,00			
	0	3	2,17	6,50	0,500	-1,771	0,077
	15	3	4,83	14,50			
	0	3	2,67	8,00	2,000	-1,124	0,261
	20	3	4,33	13,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	25	3	5,00	15,00			
	0	3	2,17	6,50	0,500	-1,771	0,077
	30	3	4,83	14,50			
μ (BA, w/b=1,25)	0	3	3,50	10,50	4,500	0,000	1,000
	5	3	3,50	10,50			
	0	3	4,50	13,50	1,500	-1,328	0,184
	10	3	2,50	7,50			
	0	3	4,17	12,50	2,500	-0,886	0,376
	15	3	2,83	8,50			
	0	3	4,17	12,50	2,500	-0,886	0,376
	20	3	2,83	8,50			
	0	3	5,00	15,00	0,000	-1,964	0,050
	25	3	2,00	6,00			
	0	3	2,00	6,00	0,000	-1,964	0,050
	30	3	5,00	15,00			

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Su/bağlayıcı (w/b) oranı genel olarak çimento esaslı harç karışımlarının mekanik özellikleri üzerine etki eden önemli parametrelerden biridir. Bu mineral katkılarının çimento esaslı harç karışımlarında kullanılmasıyla meydana gelen değişimin gözlemlenmesi için farklı w/b (0,75-1,00-1,25-1,50) oranları kullanılmıştır.

Kazan altı taban külünde w/b oranı arttıkça akma gerilmesi düşüş göstermiştir. Bu durum yüksek w/b oranları kullanılması sonucunda su miktarı arttıkça karışımın akışkanlığının artması ve karışımın Newton akışkanları gibi davrandığını göstermektedir.

Çalışmanın sonucunda;

w/b=0,75 için,

- Pirinç kabuğu külünün katkı oranı arttıkça plastik viskozitenin (Pa.s) de arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra kazan altı taban külü katkı oranı arttıkça plastik viskozite (Pa.s) de azalma görülmektedir.
- Pirinç kabuğu külü ile kazan altı taban külünün farklı katkı oranlarında kullanılmasıyla modifiye plastik viskozite değerlerindeki değişim incelendiğinde pirinç kabuğu külünde katkı oranı arttıkça modifiye plastik viskozite oranı da artmışken kazan altı taban külünde %15'e kadar katkı oranı modifiye plastik viskozitede artışa sebep olurken %15'ten fazlası modifiye plastik viskozitede azalmaya neden olmuştur. Buradan ulaşılan bilgilere göre kazan altı taban külünde kullanılan miktar arttıkça modifiye plastik viskozitenin azalacağı görülmektedir.
- Mineral katkı oranı arttıkça pirinç kabuğu külünün silindirik akma enjeksiyon basıncını arttırdığı; kazan altı taban külünün ise katkı oranı arttıkça silindirik akma enjeksiyon basıncını azalttığı görülmektedir.
- Modifiye enjeksiyon basınç oranının silindirik akma enjeksiyon basıncı ile aynı yönde gelişim gösterdiği ancak artış ve azalma arasındaki eğriler arası mesafenin daha fazla olduğuna ulaşılmıştır.

- Küresel akma enjeksiyon basıncı modeli grafiğine göre pirinç kabuğu külü mineral katkı oranı arttıkça küresel akma enjeksiyon basıncı artarken kazan altı taban külü mineral katkısının artmasıyla küresel akma enjeksiyon basıncının azaldığı görülmektedir.

w/b=1,00 için

- RHA, BA ve FA mineral katkılarının harç karışımlarının plastik viskozitelerine etkisi grafik olarak modellenmiş ve grafiğe göre; mineral katkıları arttıkça harcın plastik viskozitesinin azaldığı görülmektedir.
- Modifiye basınç oranı her üç katkı için de miktar arttıkça azalış göstermektedir.
- Mineral katkı oranları arttıkça modifiye plastik viskozite oranında azalma görülmektedir.
- Uçucu kül, kazan altı taban külü ve pirinç kabuğu külünün katkıları arttıkça silindirik akma enjeksiyon ve modifiye enjeksiyon basıncında azalma görülmektedir.
- Küresel akma enjeksiyon basıncı modeli grafiğine göre mineral katkıları arttıkça küresel akma enjeksiyon basıncında azalma görülmektedir.

w/b=1,25 için

- RHA ve BA için her iki mineral katkısının da katkı oranı arttıkça plastik viskozitenin (Pa.s) de arttığı görülmektedir.
- Plastik viskozite ile modifiye plastik viskozite oranlarının doğru orantılı olduğunu söylemek mümkündür.
- Mineral katkı oranı arttıkça her iki külün de hem silindirik akma enjeksiyon basıncının hem de modifiye enjeksiyon basınç oranının arttığına ulaşılmıştır.
- Küresel akma enjeksiyon basıncı modeli grafiğine göre pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü mineral katkıları arttıkça küresel akma enjeksiyon basınçlarında artış görülmektedir.

Çalışma kapsamında bazı parametreler sabit seçilerek karışımların silindirik akma modeli ve küresel akma modeli için süreleri hesaplanmıştır.

m= 0,3- 0,6- 0,9- 1,2 değişkenlerine göre

- Silindirik akma modeli için m değeri arttıkça önce düzenli bir artış, sonrasında azalışa eğilim olduğuna ulaşılmaktadır.

Q= 0,04- 0,06- 0,08- 0,1m³/s değişkenlerine göre

- Q değeri arttıkça silindirik akma modeli süresi artış göstermektedir.

n= 0,2- 0,4- 0,6- 0,8- 1,0 değişkenlerine göre

- n değeri arttıkça küresel akma modeli için t(sn) değerinde sürekli artış izlenmektedir.

İstatistik sonuçları;

Kolmogorov-Smirnov testinde elde edilen sonuçlara göre pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü katkılarının w/b oranlarının 1,25 olduğu harç karışımı parametrelerinin H0 hipotezini sağlamadığı; diğer karışımların ise H0 hipotezini sağladığına ulaşılmaktadır.

Shapiro- Wilk testinde elde edilen sonuçlara göre pirinç kabuğu külü ve kazan altı taban külü katkılarının w/b oranlarının 1,25 olduğu harç karışımı parametrelerinin H0 hipotezini sağlamadığı; diğer karışımların ise H0 hipotezini sağladığına ulaşılmaktadır.

Çalışma kapsamında tüm mineral katkılarında varyans homojenliğinin sağlandığı görülmektedir.

w/b=0,75 için bağımsız grupların ortalamaları arasında tüm karışımlardaki artış ve azalışların anlamlı olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=0,75 için FA miktarı %5, %20, %25 ve %30 iken post- hoc testinde viskozitelerde anlamlı bir azalma; %15 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir azalma görüldüğüne,

w/b=0,75 için BA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir azalış; %10 iken Tukey HSD, Scheffe ve Bonferroni testlerinde anlamsız bir artma; Dunnett testinde ise anlamlı bir artış; %15 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış; %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış; %25 iken viskozitelerde Tukey HSD, Dunnett ve Bonferroni testlerinde anlamlı azalış, Scheffe testinde anlamsız bir azalış; %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir azalış görüldüğüne ulaşılmaktadır.

w/b=0,75 için BA, “0” grubu ile “5-10-25 ve 30” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna; “0” grubu ile “15 ve 20” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu aleyhine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=0,75 için RHA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir azalış görüldüğüne; %10 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne; %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne; %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir azalış görüldüğüne ulaşılmaktadır.

w/b=0,75 için RHA, “0- 5” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna; “0- 10” ve “0-20” grubunun karşılaştırmasında eşitlik olduğuna; “0-30” grubu karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için bağımsız grupların ortalamaları arasında tüm karışımlardaki artış ve azalışların anlamlı olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için BA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için BA miktarı %10 iken Tukey HSD testinde anlamlı bir artış görülürken diğer üç testte anlamsız bir azalış görüldüğüne; %15 iken Bonferroni testinde anlamsız bir artış görülürken diğer üç testte anlamlı bir artış görüldüğüne; %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne; %25 iken Dunnett testinde anlamlı bir artış görülürken diğer üç testte anlamsız bir değişim görüldüğüne; %30 iken Dunnett testinde anlamlı bir artış görülürken diğer üç testte anlamsız bir değişim görüldüğüne ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için BA, “0” grubu ile “5-10-25 ve 30” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için RHA miktarı %5 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne; %10 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne; %20 iken dört testte de viskozitelerde anlamsız bir artış görüldüğüne; %30 iken dört testte de viskozitelerde anlamlı bir artış görüldüğüne ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için RHA, “0” grubu ile “5-10-20 ve 30” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu aleyhine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=1,00 için FA, “0- 5” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna; “0- 10” grubunun karşılaştırmasında eşitlik olduğuna; “0- 15”, “0-20”, “0-25” ve “0-30” grupları karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=1,25 için RHA, “0” grubu ile “10” grubu karşılaştırıldığında “10” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna; “0” ile “20” grubu karşılaştırıldığında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna; “0” ile “30” grubu karşılaştırıldığında “30” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

w/b=1,25 için BA, “0” grubu ile “10-15-20 ve 25” grubunun karşılaştırmasında “0” grubu lehine manidar olmayan bir fark olduğuna ulaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

Açıkgöz, Y., “Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 10- 48, 2008.

Aitcin, P. C., Ballivy, G. and Parizeau, R., “The use of condensed silica 137roj in grouts: innovative cement grouting”, *American Concrete Institute* 83, 1-18, 1984.

Al-Harthy, A. S., Taha, R., Abu-Ashour, J., Al-Jabri, K. and Al-Oraimi, S. “Effect of Water Quality on the Strength of Flowable Fill Mixtures”, *Cement and Concrete Composites* 27(1), 33-39, 2004.

Al-Khalaf M. N. And H. A. Yousif, “Use Of Rice Husk Ash in Concrete,” *International Journal Of Cement Composites And Lightweight Concrete*, 6(4), 241-248, 1984.

Astm C 618, “Standard Specification For Coal Fly Ash and Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use as a Mineral Admixture in Concrete”, *Annual Book Of Astm Standard*, No. 04.02, 2000.

Aygün, T., “Siltli Bir Zeminin Kireç ve Pirinç Kabuğu Külü ile İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırklareli, 58-80, 2019.

Bakım, M., “Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, S. 5-7, 2007.

Baş, K.,” Temel Takviye Yöntemleri ve Uygulamalardan Örnekler”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 60- 90, 2006.

Burwell, E.B., “Cement And Clay Grouting Of Foundations: Practice Of The Corps Of Engineering”, *Journal Soil Mechanics And Foundation Division*, Asce 84, 1551/1-1551/22, 1958.

Bustamante, M. And Gouvenot, D., “Grouting: A Method Improving The Bearing Capacity Of Deep Foundation”, ***Eight International Conference On Soil Mechanics And Foundations***, Helsinki, Finland, S. 264–278, 23-26 May, 1983.

Chotetanorm, C.; Chindaprasirt, P.; Sata, V.; Rukzon, S. and Sathonsaowaphak, A., “High-Calcium Bottom Ash Geopolymer: Sorptivity”, ***PoreSize, and Resistance to Sodium Sulfate Attack***, 2022.

Çelik, F., “An Investigation Of Rheological And Mechanical Properties Of Cement Base Grout Mixed With Rice Husk Ash (Rha)”, ***Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Doktora Tezi, 68-80, 2016.

Çelik, F., Akçuru, O., “Rheological and workability effects of bottom ash usage as a mineral additive on the cement based permeation grouting method”, ***Construction and Building Materials***, 263, 10, 2020.

Çelik, F., Oğuzhan, Y., Bozkır, S. M., “Nano tozların ve uçucu kül kullanımının enjeksiyonların akışkanlık özelliklerine etkilerinin incelenmesi”, ***Advances in Nano Research***, 2022.

Çelik, F.; Çolak, A. B.; Yıldız, O.; Bozkır, S. M., “Uçucu Kül ile Nano-SiO₂ Kullanımının Yapay Sinir Ağı Modelleriyle İncelenmesi”, ***Advances in Cement Research***, 355-366, 2022.

Çinicioğlu, S.F., Toğrol, E., “Yüklenmiş Yumuşak Zeminlerin Davranışı Üzerine”, ***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi***, 36-46, 1994.

Deere, D. U., “Cement-Bentonite Grouting For Dams”, ***Proceedings Of Asce Specialty Conference On Grouting In Geotechnical Engineering U.S.A New Orleans***, 279– 300, 1982.

Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R., And Gouvenot, D., “Factors Affecting The Creep Behavior Of Grouted Sand”, ***Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering***, 132(4), 488-500, 2006.

Durgunoglu, H. T., “Utilization Of High Modulus Columns İn Foundation Engineering Under Seismic Loadings”, *In Us 8th National Conf. On Earthquake Engineering Earthquake Engineering Research Institute San Francisco California*, 9763- 9773, 18-22, 2006.

Doğu, O., “Jet Grouting Tekniği ile Zemin Islahı”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 100- 120, 2005

Erdoğan, T. Y., “Admixtures For Concrete, Phd Thesis”, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, 188, 1997.

Erdoğan, S. T, ve T. Y. Erdoğan, “Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri,” *2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 264-329, 2007.

Essler, R. D., Drooff, E. R. And Falk, E., “Compensation Grouting: Concept”, *Theory And Practice*, 1-15, 2000.

Håkansson, U., Hässler, L., And Stille, H., “Rheological Properties Of Microfine Cement Grouts”, *Tunnelling And Underground Space Technology*, 7(4), 453-458, 1992.

Harputlugil, F. H., “Yeraltı Suyundaki Sülfat Oranının Jet Enjeksiyonu Kolonlarının Kalitesine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 22-50, 2018.

Hayward D. And Dwight P. B., “Serving Jesus With Integrity: Ethics And Accountability İn Mission”, *William Carey Library Publisher*, 2010.

Gallavresi, F., “Grouting Improvement Of Foundation Soils”, *In Grouting, Soil Improvement And Geosynthetics*, 1-38, 1992.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordođan, H., “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.*, İzmir, 419-421, 2005.

Gouvenot, D., “Injection Des Sols Et Législation Relatives Aux Nappes Phréatiques”, *In Collectivités Territoriales Et Utilisation Du Sous-Sol. Journées D'études Internationales*, 455-460, 1988.

Ichihashi, Y., Shibasaki, M., Kubo, H., Iji, M. And Mori, A., “Jet Grouting In Airport Construction”, *Proc. Asce Conf., Grouting, Soil Improvement And Geosynthetics New Orleans*, 182-193, 1992.

Idiman, F., & Okyay, Y., “Postimperative Negative Variation In Psychiatric Disorders”, *Advances in Biological Psychiatry*, 16, 191–198, 1987.

İşbilir, B. “Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.*, 60-72, 2012.

Kaymakcı, S., “Jet Grout Kolona Soketli Fore Kazığın Çalışma Performansının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 55-60, 2006.

Kutzner, C., “Grouting of Rock And Soil, Consulting Geotechnical Engineer”, *Technical University Darmstadt*, Germany 6, 1996.

Küsin, C. C., “Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.*, 42-50, 2009.

Koçak Y., E. Taşçı, ve U. Kaya, “The Effect Of Using Natural Zeolite On The Properties And Hydration Characteristics Of Blended Cements,” *Construction and Building Materials*, 47, 720-727, 2013.

Lomize, G. M., Kirillov, A. A., Semushkina, L. A., Kirillov, Y. A., & Abramkin, A. V., “Tests of application of the electric spark method for compaction of the subsiding loess soils”, *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, 6, 22-25, 1973.

Littlejohn, R. G., “The Semiclassical Evolution Of Wave Packets”, *Physics Reports*, 138(4), 1986.

Mazlum, F. “Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etekisi,” Doktora Tezi, Yapı Mühendisliği, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 50-63, 1989.

Mendeş M, Mendeş E., “Varyans Analizi ve Welch Testi ile Bunların Permütasyon Versiyonlarının I. Tip Hata ve Testin Gücü Bakımından Karşılaştırılması”, *6. Zootekni Bilim Kongresi*, 18-27, 2002.

Mitchell, J. K., “Soil Improvement-State Of The Art Report”, *Proc., 11th Int. Conf. On Smfe, Stockholm*, Sweden, 509-565, 1981.

Moseley, M.P., “Ground Improvement”, *Macmillan Publishers New Zealand Ltd*, 10-60, 1992.

Koşkan Ö.. “Yeniden örnekleme (Resampling) Yaklaşımı ve t-Testinin Gücü ve I. Tip Hata Bakımından Karşılaştırılması”, *Türk Eğitim Bilimleri Dergisi*, 49(1): 29-37, 2008.

Özdemir, A., “Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Uygulanan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri”, *Sondaj Dünyası Dergisi*, 3, 34-38, 2006.

Papayianni, I. And Anastasiou, E., “Production Of High-Strength Concrete Using High 142rojec Of İndustrial By-Products”, *Construction And Building Materials*, 24(8), 1412- 1417, 2022.

Raffle, J. F., And Greenwood, D. A., “The Relation Between The Rheological Characteristics Of Grouts And Their Capacity To Permeate Soil”, *In Proceedings Of The 5th International Conference Of Soil Mechanics And Foundation Engineering*, 2, 789, 1961.

Raju, V.R., & Sondermann, W., “Application of the vacuum preloading method in land reclamation and soil improvement projects” *Chapter 21, Ground Improvement- Case Histories. B. Indraratna & J. Chu (Eds.)*, 601- 638, 2005.

Ruggiero, J. G., “Low Slump Compactive Tail Shield Grouting İn Soft Ground Shield Driven Tunnels; Innovative Cement Grouting”, *American Concrete Institute*, 83, 103–114, 1984.

Schwarz, L.G., “Roles Of Rheology and Chemical Filtration On Injectability Of Microfine Cement Grouts”, Master Thesis, *Northwestern University*, 37-51, 1998.

Singh, M., And Siddique, R., “Effect Of Coal Bottom Ash As Partial Replacement of Sand on Properties of Concrete”, *Resources Conservation And Recycling*, 72, 20-32, 2013.

Subaşı, A. ve M. Emiroğlu, “Effect Of Metakaolin Substitution On Physical, Mechanical And Hydration Process Of White Portland Cement,” *Construction And Building Materials*, 95, 257-268, 2015.

Sonebi, M., “Experimental Design to Optimize High-Volume of Fly Ash Grout in The Presence Of Welan Gum and 143roje Plasticizeri”, *Mater Struct*, 35(250), 373–380, 2002.

Şapaloğlu, A. “Pirinç Üretim-Tüketim Zincirinde Pazarlama Kanallarının Yapısı ve Pirinç Pazarlama Marjları,” Yüksek Lisans Tezi, Tarım Ekonomisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi*, 42-75, 2015.

Şenol, A., Edil, T.B., “Uçucu Kül İle Stabilize Edilen Yumuşak Zeminlerin Cbr Sonuçlarının Değerlendirilmesi”, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, 275-280, 2004.

Tachir, C., “Samsun Terme Kombine Doğalgaz Çevrim Santrali Zeminlerinin Fore Kazık Ve Jet Grout Yöntemleri İle İyileştirilmesi”, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, 32-40, 2015.

Tan, Ö. & Zaimoğlu, A. Ş., “Çimento Enjeksiyonlarında Kullanılan Katkı Malzemelerinin Reolojik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (2) , 275-281, 2004.

Taşçı G., “Problemli Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 28-36, 2011.

Tikalisky, P. J., Carrasquillo, R. L., and Snow, P. G., “Sulfate Resistance Of Concrete Containing Fly Ash”, **Special Publication**, 131, 255-266, 1992.

Topçu, İ. B. And Bilir, T., “Effect Of Bottom Ash As Fine Aggregate On Shrinkage Cracking Of Mortars”, **Acı Materials Journal**, 48-56, 2010.

Ts En 197-1., Çimento-Bölüm 1: “Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.

Tunçdemir, F., “Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi”, **Türkiye Mühendislik Haberleri** 430, 59-64, 2004.

Türker, P. ve Erdoğan, B., “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara, 139, 2003.

Uzuner B.A., “Temel Zemin Mekaniği”, **Derya Kitabevi**, 485s, 2007.

Yazıcı, H., “Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 2004.

Yıldırım, S., “Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı”, **Birsan Yayınevi**, 466, 2002.

Yıldız, S., Balaydın, İ., Ulucan, Z. Ç., “Pirinç Kabuğu Külünün Beton Dayanımına Etkisi,” **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 19(1), 85-91, 2007.

Yıldız, K., Koçak, Y., Dorum, A., “Pomza Zeolit ve Cem I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması,” **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 25(4), 867-879, 2009.

Warner, J., “Practical Handbook Of Grouting: Soil, Rock, and Structures”, **John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey in Canada**, 25-58, 2004.

Weaver, K. D., Evans, J. C. And Pancoski, S. E., “Grout Testing For A Hazardous Waste Application”, **Concr. Int.** 12(7), 45–47, 1990.

Welsh, J. P., & Burke, G. K., “Advances in Grouting Technology”, **In ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2000.

URL-1 <https://www.sanalsantiye.com/jet-grout-yontemiyle-zemin-islahi/>

URL- 2 www.Geoconstruction.com Jet Uygulamaları

URL-3 <http://www.p005.net/spsste-mann-whitney-u-testi>

ÖZGEÇMİŞ

..... tarihinde doğdu. Orta öğrenimini Niğde Anadolu Öğretmen Lisesinde tamamladı. Niğde Üniversitesi Bölümü'nden mezun oldu. yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



