



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO PARTİKÜLER MALZEMELERİN UÇUCU KÜL MİNERAL KATKILI
ÇİMENTO BAZLI HARÇLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

SAMET MÜFİT BOZKIR

Ağustos 2021

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

NANO PARTİKÜLER MALZEMELERİN UÇUCU KÜL MİNERAL KATKILI
ÇİMENTO BAZLI HARÇLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

SAMET MÜFİT BOZKIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman

Doç. Dr. Fatih Çelik

Ağustos 2021

Samet Müfit BOZKIR tarafından **Doç. Dr. Fatih ÇELİK** danışmanlığında hazırlanan “**Nano Partiküler Malzemelerin Uçucu Kül Mineral Katkılı Çimento Bazlı Harçların Reolojik Özellikleri Üzerinde Etkisinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Fatih ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Prof. Dr. Hanifi ÇANAKÇI, Hasan Kalyoncu Üniversitesi,

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ, Niğde Ömer Halisdemir 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 BARUT
MÜDÜR

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.

Samet Müfit BOZKIR

ÖZET

NANO PARTİKÜLER MALZEMELERİN UÇUCU KÜL MİNERAL KATKILI ÇİMENTO BAZLI HARÇLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BOZKIR, Samet Müfit

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Fatih Çelik

Ağustos 2021, 145 sayfa

Bu tez kapsamında çeşitli ilave oranlarında (%0.0, %0.3, %0.6, %0.9, %1.2 ve %1.5) 4 farklı nano partiküller malzemenin (n-SiO₂, n-TiO₂, n-ZnO ve n-Al₂O₃) farklı ikame oranlarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) uçucu kül (UK) mineral katkılı çimento esaslı harçların reolojik, akışkanlık ve stabilite özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir ve bu etkilerin permeasyon enjeksiyon uygulamalarında küresel ve radyal akış modellerine göre enjeksiyon basınçlarını nasıl değiştirdiği araştırılmıştır. UK katkısız harç karışımlarında %0,6 oranına kadar n-ZnO miktarındaki artış plastik viskozite değerlerini diğer tüm nano malzemelere kıyasla en düşük değerlere indirmiştir. Bu orandan sonraki katkı oranlarında ise plastik viskozite değerlerini artırmaya başlamış ve %0,9 oranından sonraki karışımlarda n-Al₂O₃ ve n-TiO₂ katkılarına kıyasla daha büyük plastik viskozite değerleri almaya başlamıştır. Dolayısı ile çimento esaslı harçlarda akışkanlığın artırılmasını kontrol etmek amacıyla, n-ZnO malzemenin katkı malzemesi olarak kullanılmasında bu nano malzemenin %0,6 oranına kadar UK katkısız kullanılması bu çalışmada kullanılmış tüm nano malzemelere kıyasla en elverişli katkı malzemesi olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Çimento esaslı harçlar, harçların reolojisi, harçların akışkanlığı, nano partiküller malzemeler (NPM), mineral katkı harçlar, uçucu kül, permeasyon enjeksiyon

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANO PARTICLE MATERIALS ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT-BASED GROUTS INCORPORATED WITH FLY ASH AS MINERAL ADDITIVE

BOZKIR, Samet Müfit

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Fatih ÇELİK

August 2021, 145 pages

In this thesis, the effects of four different types of Nano Particular Materials (n-SiO₂, n-TiO₂, n-ZnO and n-Al₂O₃) additions at different amounts (%0.0, %0.3, %0.6, %0.9, %1.2 and %1.5) on rheological, workability and stability of cement-based grouts incorporated with fly ash as mineral additive were investigated. And more, it was also investigated how these changes affected the permeation grout injection pressure based on spherical and radial flow models. The increase of n-ZnO addition up to %0,6 percent at all grout mixes without fly ash made the plastic viscosity values decrease to the lowest level comparing with the others nano materials. After n-ZnO addition passed this ratio it started to make the plastic viscosity values increase. And then, it started to have higher plastic viscosity values than n-Al₂O₃ and n-TiO₂ addition after %0,9 addition ratios. Therefore, the usage of n-ZnO as additive to the cement-based grouts by 0.6% contribution without using any fly ash as mineral additive were considered as the best condition comparing with the other nano materials because of providing the control based on increase of fluidity.

Keywords: Cement based grout, rheology of grouts, fluidity of grouts, nano particular materials (NPM), grouts with mineral additive, fly ash, permeation grout

ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Fatih ÇELİK' e en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında her türlü yardım ve araştırmamın tamamlanmasında kıymetli katkılarından dolayı değerli arkadaşlarım Osman AKÇURU ve Sinem DOĞAN 'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta babam Yusuf BOZKIR ve annem Şükran BOZKIR olmak üzere değerli aileme ithaf ediyorum.

Bu çalışmaya 219M522 numaralı proje ile finansal destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiv
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II LİTERATÜR ÖZETİ.....	6
2.1 Zeminlerde Enjeksiyon	6
2.1.1 Enjeksiyon tanımı ve amacı	6
2.1.2 Zeminlerde enjeksiyon çeşitleri	6
2.1.3 Harç malzemelerinin sınıflandırılması.....	7
2.1.4 Harç malzemesi parametreleri	7
2.1.5 Enjeksiyon yöntemi parametreleri	8
2.1.6 Viskozite	8
2.1.7 Görünür viskozite	11
2.1.8 Değiştirilmiş darcy yasası	12
2.1.9 Tikotropi (Karıştırma sonucunda viskozitenin değişmesi durumu).....	13
2.2 Zeminlerde Permeasyon Enjeksiyonu	13
2.2.1 Enjeksiyon testi ve tekniği	14
2.2.2 Gözenekli ortamda harç akış teorisi.....	15
2.2.3 Harç enjeksiyonunda doğal fiziksel kısıtlamalar	18
2.3 Çimento Esaslı Harçların Enjeksiyonu	18
2.3.1 Permeasyon (Sızma) enjeksiyonu	23
2.3.2 Çatlatma enjeksiyonu.....	25
2.3.3 Kompaksiyon enjeksiyonu.....	26
2.3.4 Jet enjeksiyonu (Jet Grout)	26
2.4 Enjeksiyon Tasarımı ve Parametreleri	32
2.5 Çimento Esaslı Harçların Reolojisi.....	33

2.5.1 Stabilite	33
2.5.2 Priz süresinin belirlenmesi	34
2.5.3 Viskozite	35
2.6 Mineral Katkılar.....	36
2.7 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Uçucu Kül Kullanımı	36
2.8 Çimento Esaslı Harçlarda Nano Partiküler Malzemelerin Kullanımı	38
BÖLÜM III GEREÇ VE YÖNTEM	40
3.1 Deneysel Çalışma Kapsamında Kullanılmış Malzemeler	40
3.2 Harç Karışımları Hazırlama Yöntemleri ve Yapılan Deneyler	44
3.2.1 Reoloji deneyleri ve değerlendirmeleri.....	47
3.2.2 Akışkanlık, işlenebilirlik ve stabilite deneyleri	49
3.2.3 Permeasyon enjeksiyonu tasarımı için kullanılan analitik akış modelleri.....	52
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA	54
4.1 Harç karışımlarının akışkanlık (İşlenebilirlik) özellikleri	54
4.1.1 Nano titanyum oksit (n-TiO ₂) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler	54
4.1.2 Nano çinko oksit (n-ZnO) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler.....	58
4.1.3 Nano alümina (n-Al ₂ O ₃) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler	61
4.1.4 Nano silika (n-SiO ₂) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler	65
4.2 Harç Karışımlarının Reolojik Özellikleri	70
4.2.1 Nano titanyum oksit (n-TiO ₂) katkılı karışımlar-reolojik Özellikler.....	70
4.2.2 Nano çinko oksit (n-ZnO) katkılı karışımlar-reolojik özellikler	75
4.2.3 Nano alümina (n-Al ₂ O ₃) katkılı karışımlar-reolojik özellikler	81
4.2.4. Nano silika (n-SiO ₂) katkılı karışımlar-reolojik özellikler	87
4.3 Harç Karışımlarının Permeasyon Enjeksiyon Basınç Davranışları	94
4.3.1 Nano titanyum oksit (n-TiO ₂) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları.....	94
4.3.2 Nano çinko oksit (n-ZnO) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları	97
4.3.3 Nano alümina (n-Al ₂ O ₃) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları	100
4.3.4 Nano silika (n-SiO ₂) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları	102
4.4 Harç Karışımlarının Stabilite-Çökeltme (Bleeding) Davranışları	105
4.4.1 Nano titanyum oksit (n-TiO ₂) katkılı karışımlar- stabilite	

(Bleeding) davranışları	106
4.4.2 Nano çinkooksit (n-ZnO) katkıli karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları	107
4.4.3 Nano alümina (n-Al ₂ O ₃) katkıli karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları	108
4.4.4 Nano silika (n-SiO ₂) katkıli karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları	110
4.5 Nano Partiküler Malzemelerin Reolojik Parametreler Üzerindeki Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi	112
4.6 Nano Partiküler Malzemelerin Permeasyon Enjeksiyon Basıncı Üzerindeki Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi	116
BÖLÜM V SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR	137
ÖZ GEÇMİŞ	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Zemin tipleri ve enjeksiyon tekniği (Avrupa Standartları 1996'dan sonra)	14
Çizelge 2.2. Karışım çeşitlerinin sınıflandırılması (Gallavresi, 1992)	20
Çizelge 2.3. Farklı tip zeminlerde uygulanabilen enjeksiyon yöntemleri.	22
Çizelge 2.4. Jet grout yönteminin işletim parametreleri (Xanthakos, 1994)	32
Çizelge 3.1. CEM-I 42.5 R çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	40
Çizelge 3.2. Kullanılan nano partiküler malzemeler için elementer analiz sonuçları	42
Çizelge 3.3. Kullanılan nano partiküler malzemelerin bazı fiziksel özellikleri.....	43
Çizelge 3.4. Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri	44
Çizelge 4.1. n-TiO ₂ ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri	55
Çizelge 4.2. n-ZnO ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri.....	59
Çizelge 4.3. n-Al ₂ O ₃ ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri.....	63
Çizelge 4.4. n-SiO ₂ ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri.....	67
Çizelge 4.5. n-TiO ₂ katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri .	74
Çizelge 4.6. n-ZnO katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri .	80
Çizelge 4.7. n-Al ₂ O ₃ katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri	86
Çizelge 4.8. n-SiO ₂ katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri .	93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Enjeksiyon teknikleri (Mitchell, 1981).....	7
Şekil 2.2. Newton model (Çelik, 2016)	10
Şekil 2.3. Newton sıvısı (Çelik, 2016).....	10
Şekil 2.4. Reolojik model ve hız profili – I (Çelik, 2016)	11
Şekil 2.5. Reolojik model ve hız profili – II (Çelik, 2016).....	11
Şekil 2.6. Görünür viskozite (Çelik, 2016).....	12
Şekil 2.7. Tikotropik karışımların reolojik özellikleri (Nonveiller, 2013).....	13
Şekil 2.8. Küresel akış enjeksiyonu (Çelik, 2016).....	16
Şekil 2.9. Silindirik borudan radyal enjeksiyon (Çelik, 2016)	17
Şekil 2.10. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi (Kutzner, 1996).....	21
Şekil 2.11. Çatlatma enjeksiyonu (Keller, 2014).....	25
Şekil 2.12. Kompaksiyon enjeksiyonu (Essler vd., 2000)	26
Şekil 2.13. Tipik jet enjeksiyon uygulamaları (Croce vd., 2014).....	27
Şekil 2.14. Zemin tipine bağlı soilcrete dayanımları (Hayward vd., 2010).....	28
Şekil 2.15. Jet 1 yöntemi (Keller, 2014)	29
Şekil 2.16. Jet 2 yöntemi (Bakım, 2007)	30
Şekil 2.17. Jet 3 yöntemi (Bakım, 2007)	31
Şekil 2.18. Süper jet yöntemi (Çınar, 2014)	31
Şekil 3.1. CEM-I 42.5 R çimento ve uçucu külün (UK) parçacık dane dağılımı	41
Şekil 3.2. Kayma gerilmesi- kayma hızı ilişkisine dayalı artan ve azalan eğriler	48
Şekil 3.3. Görünür viskozite- kayma oranı eğri ilişkisi	49
Şekil 4.1. Mini slamp yayılma çapı-n-TiO ₂ miktarı ilişkisi.....	54
Şekil 4.2. Marsh hunisi akma süresi-n-TiO ₂ miktarı ilişkisi.....	56
Şekil 4.3. n-TiO ₂ katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi	56
Şekil 4.4. Plaka kohezyon-n-TiO ₂ katkı oranı ilişkisi	57
Şekil 4.5. n-TiO ₂ katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi.....	57
Şekil 4.6. Mini slamp yayılma çapı-n-ZnO miktarı ilişkisi	58
Şekil 4.7. Marsh hunisi akma süresi-n-ZnO miktarı ilişkisi	60
Şekil 4.8. n-ZnO katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi	60
Şekil 4.9. Plaka kohezyon-n-ZnO katkı oranı ilişkisi.....	61

Şekil 4.10. n-ZnO katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi	61
Şekil 4.11. Mini slamp yayılma çapı-n-Al ₂ O ₃ miktarı ilişkisi.....	62
Şekil 4.12. Marsh hunisi akma süresi-n-Al ₂ O ₃ miktarı ilişkisi.....	64
Şekil 4.13. n-Al ₂ O ₃ katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi ..	64
Şekil 4.14. Plaka kohezyon-n-Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	65
Şekil 4.15. n-Al ₂ O ₃ katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi	65
Şekil 4.16. Mini slamp yayılma çapı-n-SiO ₂ miktarı ilişkisi.....	66
Şekil 4.17. Marsh hunisi akma süresi-n-SiO ₂ miktarı ilişkisi.....	68
Şekil 4.18. n-SiO ₂ katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı- gerilme ilişkisi ...	68
Şekil 4.19. Plaka kohezyon-n-SiO ₂ katkı oranı ilişkisi.....	69
Şekil 4.20. n-SiO ₂ katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi	69
Şekil 4.21. n-TiO ₂ katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi.....	70
Şekil 4.22. n-TiO ₂ katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi	73
Şekil 4.23. n-TiO ₂ katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b).	74
Şekil 4.24. n-ZnO katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi	76
Şekil 4.25. n-ZnO katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi.....	79
Şekil 4.26. n-ZnO katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b) .	79
Şekil 4.27. n-Al ₂ O ₃ katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi	83
Şekil 4.28. n-Al ₂ O ₃ katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi.....	84
Şekil 4.29. n-Al ₂ O ₃ katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b)	86
Şekil 4.30. n-SiO ₂ katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi	89
Şekil 4.31. n-SiO ₂ katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi.....	91
Şekil 4.32. n-SiO ₂ katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b) .	92
Şekil 4.33. n-TiO ₂ katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b).....	96
Şekil 4.34. n-ZnO katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b)	99
Şekil 4.35. n-Al ₂ O ₃ katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b)	101
Şekil 4.36. n-SiO ₂ katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b)	105
Şekil 4.37. n-TiO ₂ katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri.....	107
Şekil 4.38. n-ZnO katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri	108
Şekil 4.39. n-Al ₂ O ₃ katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri.....	110
Şekil 4.40. n-SiO ₂ katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri.....	111
Şekil 4.41. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda plastik viskoziteye etkisi	114
Şekil 4.42. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda akma gerilmesine etkisi.....	116
Şekil 4.43. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda küresel akma modeline etkisi. .	119

Şekil 4.44. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda radyal akma modeline etkisi .. 120



FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Bleeding (çökme) deneyi (Çelik, 2016).....	33
Fotoğraf 3.1. Tez kapsamında kullanılmış nano partiküler malzemeler (NPM)	43
Fotoğraf 3.2. Deneysel çalışmada kullanılmış ultrasonikatöre ait görsel	46
Fotoğraf 3.3. Tek eksenli dönen silindirik reometre (a) ve brookfield'in ekranı (b)	47
Fotoğraf 3.4. Mini slamp yayılma deneyi.....	50
Fotoğraf 3.5. Mars hunisi akma deneyi (a) ve deneyde kullanılan marsh hunisi (b).....	50
Fotoğraf 3.6. Deneyde kullanılan plaka kohezyon deney aleti öncesi (a) ve sonrası (b).....	51
Fotoğraf 3.7. Bleeding (çökme) deneyi deney başı (a) ve deney sonu (b).	52

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

n-Al ₂ O ₃	Nano alümina
n-SiO ₂	Nano silika
n-TiO ₂	Nano titanyum oksit
n-ZnO	Nano çinko oksit

Açıklama

Kısaltma

s/ç	Su/Çimento Oranı
s/b	Su/Bağlayıcı Oranı
NPM	Nano Partiküler Malzeme
UK	Uçucu Kül

Açıklama

BÖLÜM I

GİRİŞ

Çimento bazlı harç karışımlar geoteknik arazi uygulamalarında enjeksiyon malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Nonveiller, 1989). Çimento bazlı harçların kullanıldığı uygulama alanları; Jet enjeksiyon, Permeasyon (Sızdırma) enjeksiyon, Kompaksiyon harcı, Ön germeli ankraj uygulamaları, Tünel uygulamaları olarak örnek verilebilir (Stille ve Gustafson, 2010; Yean ve Han, 1997; Baltazar vd., 2012). Zeminlerde enjeksiyon yöntemi, bir veya birkaç akışkanın (çimento şerbeti, hava ve su) belirli bir basınç altında zemine enjekte edilme esasına dayanmaktadır. Mühendislik uygulamalarında enjeksiyon yapımının ana amacı, taşıma kapasitesi açısından daha dayanıklı, daha sıkı ve geçirimsizliği daha düşük zemin şartlarını sağlamak olarak tanımlanır. Bu sebeple, çimento bazlı harçların reolojik özellikleri geoteknik uygulamalarda, harcın zemine enjekte edilebilmesi için gerekli pompalanabilme ve akışkanlık özelliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu tür karışımlar genellikle çok kompleks reolojik davranışlar sergilerler. Bunun sebebi, bu karışımların akışkanlık özelliklerini etkileyen birçok parametrenin (su-bağlayıcı oranı, çimento tipi ve dozajı, kullanılan kimyasal katkı malzemelerinin tipi, kullanılan mineral katkısı v.b. gibi) etkin faktörler olarak rol almalarıdır.

Çimento bazlı harçlar genellikle su, çimento ve çeşitli katkı malzemeleriyle hazırlanan bir süspansiyon kompoziti olarak ifade edilir. Çimento bazlı harçların mekanik, durabilite ve reolojik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri su-çimento oranı (s/ç) olarak bilinir. Bu oran jet enjeksiyon uygulamalarında 0.6 ile 2 arasında değişkenlik gösterir (Moseley, 1993). Ayrıca permeasyon enjeksiyon uygulamalarında bu oranın 0.5 ile 1.5 arasında değiştiği yaygın olarak bilinmektedir (Danot ve Derache, 2007). Genellikle çimento bazlı harçların akışkanlık davranışları su-bağlayıcı oranıyla kontrol edilir. Bu sebeple, bu karışımlar içerisindeki su miktarındaki artış malzemenin viskozitesini düşürmektedir, dolayısıyla malzemenin akışkanlığını artırmaktadır. Fakat yaygın olarak bilindiği üzere karışım içerisindeki su miktarındaki artış viskoziteyi düşürmesine rağmen, malzemenin çökeltme oranını artırmakta ve ayrıca mekanik özelliklerini de olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple, en uygun malzeme seçimi ve

karışım oranlarının belirlenmesi, çimento bazlı harç karışımlar için gerekli reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerinin sağlanmasında kilit rol oynayacaktır.

Çimento bazlı harçların reolojik özellikleri genellikle kimyasal ve mineral katkı malzemeleriyle iyileştirilir. Birçok enjeksiyon uygulamasında katkı malzemesi olarak uçucu kül, bentonit, silis dumanı, metakaolin ve fırın cürufu gibi mineral katkıları yaygın olarak kullanılmıştır (Aitcin vd., 1984; Bustamante ve Gouvenot, 1983; Deere, 1982; Ruggiero, 1984; Weaver vd., 1990). Daha önce tamamlanmış literatürdeki çalışmalara göre, uçucu kül gibi birkaç nadir mineral hem harç karışımların durabilite özelliğini iyileştirirken, hem de akışkanlık ve reolojik özelliklerinde de dikkate değer iyileştirmeler sağlamıştır (Sonebi, 2002). Sonuç olarak denilebilir ki; çimento bazlı harçların üretiminde mineral katkısı olarak uçucu külün kullanımı hem maliyet açısından fayda sağlarken hem de akışkanlık özelliklerinde ciddi iyileştirmeler sağlayacaktır. Bu mineral katkı malzemelerine ek olarak, alternatif ya da yardımcı eleman olarak devreye girebilecek başka katkı malzemeleri kullanım isteği dünyada yaygın olarak çalışılmaktadır. Nano teknolojinin gelişmesiyle elde edilebilen nano partiküler malzemeler, birçok alanda olduğu gibi inşaat sektöründe de kullanılabilir. Bununla ilgili yapılmış ve yapılmakta olan çeşitli çalışmalar mevcuttur (Li, 2004; Luo vd., 2004; Li vd., 2006; Zhang, 2007; Ge ve Gao, 2008; Nazari ve Riahi, 2011; Luo vd., 2012; Taha ve Taha, 2012; Ugwu vd., 2013; Rezagholilou ve Nikraz, 2014; Bahmani vd., 2014; Moradi ve Seyedi, 2015; Alsharif vd., 2016; Huang ve Wang, 2016; Subromani ve Sridevi, 2016). Bu çalışmalarda genellikle beton ve zemin iyileştirmelerinde çeşitli nano malzemelerin katkı maddesi olarak kullanılması bahsedilmiş ve nano malzeme kullanımının hem betonun hem de zeminin mekanik ve dayanım özelliklerini dikkate değer bir şekilde iyileştirdiği belirtilmiştir.

Son zamanlarda Nano-Silika ($n\text{-SiO}_2$) gibi nano partiküler malzemelerin inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla, bu tür malzemelerin yapı sektöründe de kullanılabilirliği konusu oldukça popüler olmaya başlamıştır. Daha önce yapılmış çalışmalarda nano partiküler malzeme katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri incelenmiştir (Coppola vd., 2014; Coppola vd., 2011; Senff vd., 2009; Jo vd., 2007; Björnström vd., 2004; Qing vd., 2007). Fakat bu çalışmalarda sadece tek tip bir nano partiküler malzemenin (Nano-Silika) kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu nano

malzemelerin mineral katkılı harçların reolojik özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olacağı da bu çalışmalarda incelenmemiştir. Collepardi ve diğ. (2005) tarafından yapılmış çalışmada, Nano-silika miktarının çimento bazlı harç karışımlarda artışının harcın piriz alma süresini kısalttığı, segregasyon ve çökme miktarını azalttığı ve taze haldeki harcın kohezyonunu iyileştirdiği sunulmuştur. Ayrıca Senff ve diğ. (2009), s/b=0.35 oranında hazırladıkları çimento bazlı harç karışımlarına, bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça %0.0 ve %2.5 aralığı oranlarında Nano-silika eklemişler ve harç karışımların reolojik özellikleri üzerinde ki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda nano malzeme miktarındaki artışın harç karışımların akma gerilmesini (kohezyon) dikkate değer oranlarda arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bunlara ek olarak bu çalışmada, yüksek oranlarda nano-silika katkısının viskoziteyi arttırdığı belirtilmiştir. Literatürde sunulmuş bu çalışmalar ışığında, çimento bazlı harçların hazırlanmasında nano partiküler malzemelerin kullanımının, bu malzemelerin reolojik özellikler üzerinde dikkate değer etkilerinin olacağı açık bir şekilde görülmektedir.

Nano partiküler malzemelerin parçacık dane boyutunun nano ölçekte olması sebebiyle, mineral katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerinde olumlu yönde iyileştirmeler sağlayacağı düşünülmektedir. Bir diğer deyişle bu harç karışımların akışkanlık özelliklerini arttıracığı ve bunun sonucu olarak saha uygulamaları esnasında harç enjeksiyon basınçlarını azaltacağı öngörülmektedir. Harç enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basıncının azalmasıyla toplam proje maliyetleri üzerinden ekonomik kazançlar elde edilebilecektir. Böylece daha az enerji tüketimiyle daha etkili ve daha ekonomik enjeksiyonlar yapılabilecektir. Bu kapsamda, mevcut tez önerisinde 4 adet nano partiküler malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler sırasıyla Nano Alümina ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$), Nano Silika ($n\text{-SiO}_2$), Nano Titanyum Oksit ($n\text{-TiO}_2$) ve Nano Çinko Oksit ($n\text{-ZnO}$) olarak belirlenmiştir. Ticari olarak hizmet veren kuruluşlar tarafından temin edilebilen bu nano partiküler malzemeler, bu çalışma kapsamında çeşitli oranlarda uçucu kül mineral katkılı harç karışımlara karıştırılmış ve reolojik ve akışkanlık özelliklerine ne gibi etkilerinin olduğu araştırılmıştır. Harç karışımlarının hazırlanmasında en önemli parametrelerden biri olan su/bağlayıcı (s/b) oranı 1 olarak belirlenmiştir. Bu seçilmiş değer geoteknik mühendisleri tarafından jet grout uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir orandır. Ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) ve yukarıda bahsedilmiş 4 adet farklı nano partiküler malzeme, bağlayıcı malzemenin ağırlığı

oranınca katkı oranlarında (% 0.0-kontrol numunesi, % 0.3, % 0.6, % 0.9, % 1.2 and % 1.5) hazırlanmış çimento bazlı harç karışımları çeşitli reoloji ve akışkanlık deneylerine maruz bırakılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında kullanılmış nano partiküler malzemelerin katkı miktarları dikkate alındığında, harç karışımların toplam miktarının çok altında olduğu görülecektir. Bu sebeple bu tür uygulamalarda kullanılacak nano partiküler malzemelerin çok ciddi maliyetlere sebebiyet vermeyeceği bu çalışma kapsamında açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu katkı miktarları, daha önce literatürde yapılmış çalışmalar ve mevcut tezin ön deneysel çalışmaları kapsamında yapılmış deney sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu ön çalışmalar kapsamında, yüksek miktarda nano partiküler malzeme katkısının harç karışımların viskozite değerini arttıracak, dolayısıyla bu karışımların reolojik özellikleri üzerinde olumsuz etki yaratacağı belirlenmiştir.

Yukarıdaki paragraflarda detaylarıyla bahsedildiği üzere, nano partiküler malzemelerin çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerinde etkisi literatürde sunulmuş çalışmalarda da incelenmiştir. Fakat bu çalışmalarda sadece tek tip bir nano partiküler malzemenin (Nano-Silika) kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu nano malzemelerin mineral katkılı harçların reolojik özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olacağı da bu çalışmalarda incelenmemiştir. Mevcut tezimizde ise, daha önceki çalışmalarda kullanılmış nano partiküler malzemelerden farklı olarak Nano Alümina ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$), Nano Silika (SiO_2) Nano Titanyum Oksit ($n\text{-TiO}_2$) ve Nano Çinko Oksit ($n\text{-ZnO}$) gibi bilinen nano malzemeler kullanılmıştır. Bu nano partiküler malzemelerin uçucu kül mineral katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Literatürde bu karışımlarda hazırlanmış ve üzerinde reolojik deneyler yapılmış karışımlar bulunmamaktadır. Bu sebeple, deneysel programımız ve kullandığımız farklı katkı malzemeleri tez önerisinin özgün değerini göstermektedir. Bunlara ek olarak, literatürde sunulmuş çalışmalar genellikle harç karışımlarını “malzeme bilimi” disiplini başlığı altında inceledikleri için, kullanılan s/b (su-bağlayıcı) oranları 0.5’ten küçük olduğu görülmektedir. Halbuki geoteknik uygulamalarda çok daha yüksek s/b oranları kullanılmaktadır. Bu da harç karışımların reolojik özellikleri üzerinde ciddi etkiler oluşturmaktadır. Bu sebeple, mevcut tezimizde seçtiğimiz s/b=1.0 değeri, literatürde sunulmuş çalışmalarda kullanılan oranlara göre ciddi farklılık göstermektedir. Sonuç olarak bu durum mevcut çalışmanın bir diğer özgün değerini ortaya koymaktadır.

Mevcut tez önerimizin hazırlanmasına sebep olan ARAŞTIRMA SORUSU (HİPOTEZ) aşağıda belirtildiği gibidir;

HİPOTEZ: Nano partiküler boyutta malzemelerin uçucu kül mineral katkılı çimento bazlı harçlara katkı malzemesi olarak katılması, bu malzemelerin Reolojik-Akışkanlık-İşlenebilirlik ve bunlara bağlı olarak etkin enjeksiyon basınçları gibi davranışlarını nasıl etkiler?

Tezimiz kapsamında ulaşmayı planladığımız amacımız; hipotezde de belirtildiği gibi, nano partiküler malzemelerin mineral katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu etkilerin etkin enjeksiyon basınçlarını ne seviyede değiştirdiğini gözlemlemektir. Bu tezimiz kapsamında tez önerisinin amacına ulaşabilmesi için planladığımız hedefler aşağıda belirtildiği gibi planlanmıştır.

- Tez önerisi kapsamında kullanılması düşünülen çimento, mineral katkısı olarak Uçucu Kül (UK) ve 4 farklı nano partiküler malzemenin temin edilmesi.
- Deneysel çalışma kapsamında hazırlanacak harç karışımlarının reolojik özellikler kapsamında bir reometre yardımıyla, plastik vizkozite, görünür vizkozite ve akma gerilmesi gibi parametrelerin elde edilmesi.
- Bu harç karışımlarının akışkanlık ve işlenebilirlik gibi davranışlarını inceleyebilmek için, Marsh hunisi akma süresi testi, Mini slamp yayılma testi ve Plaka kohezyon deneyi gibi bazı laboratuvar deneylerinin yapılması. Bu deneylerden harç karışımların marsh hunisi akma süresi, mini slamp yayılma çapı ve plaka kohezyon yapışma miktarı gibi verilerin elde edilmesi.
- Üretilen harç karışımların reolojik ve işlenebilirlik özelliklerine ek olarak stabilite özelliklerinin bleeding (çökme) deneyi yardımıyla belirlenmesi.
- Elde edilecek test verilerinin harç enjeksiyon uygulamalarında etkin enjeksiyon basıncına etkilerinin karşılaştırılması olarak incelenmesi.

Tezimiz kapsamında planladığımız şekilde yürüttüğümüz deneysel programımız ile tezin amacına ulaşmak için belirlenmiş tüm hedefler başarıyla tamamlanmış bulunup, tüm sonuçlar bu tezde tüm detaylarıyla tartışılarak sunulmuştur.

BÖLÜM II

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Zeminlerde Enjeksiyon

2.1.1 Enjeksiyon tanımı ve amacı

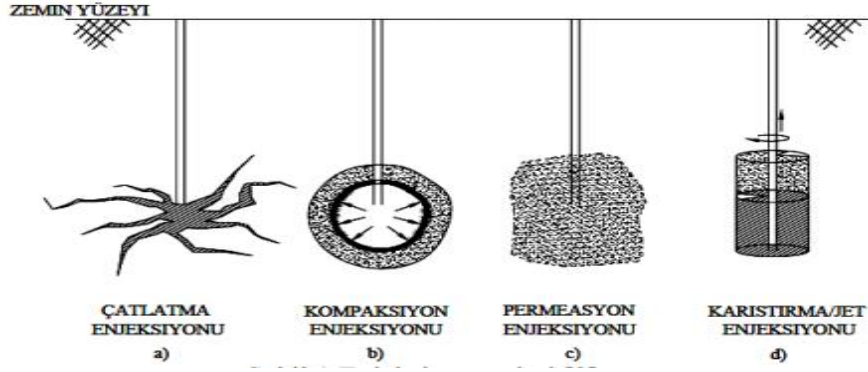
Enjeksiyon, akışkanlaştırılmış malzemelerin, zemin ve bitişik yapılar arasındaki zemin boşluklarına enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Enjeksiyonun ana hedefleri daha güçlü, daha yoğun, daha az geçirgen bir zemin veya kaya oluşturmaktır. Ayrıca enjeksiyon, başka türlü erişilemeyen bir zeminde veya bir yapıdan zemine aktarılan gerilmeyi zemindeki boşluklardan dolayı yeterli gerilmeyi önleyemeyen boşlukları doldurarak zemine gelen gerilmeleri karşılamaında etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

2.1.2 Zeminlerde enjeksiyon çeşitleri

Zemine veya kaya içerisine yerleştirme biçimine bağlı olarak 4 ana gruba ayrılır. Bunlar;

- I. Permasyon (emdirme) enjeksiyonu
- II. Çatlatma enjeksiyonu
- III. Kompaksiyon enjeksiyonu
- IV. Jet enjeksiyonu

olarak 4 ana gruba ayrılır. Enjeksiyon teknikleri Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Enjeksiyon teknikleri (Mitchell, 1981)

2.1.3 Harç malzemelerinin sınıflandırılması

Bileşenlerine göre 3 temel harç türü vardır. Bunlar;

- **Süspansiyon:** İki fazdan birinin katı, diğerinin sıvı olma durumudur. Küçük katı parçacıkların sıvı ortamında erimeden dağılması olarak ifade edilebilir. Örneğin Bingham'ın sıvı özelliklerine sahip sudaki çimento ve kil.
- **Emülsiyonlar:** Her iki fazın da sıvı olması durumudur. Bu sıvılardan birinin diğeri içerisinde ufak damlacıklar halinde dağılması neticesinde oluşan koloid karışıma emülsiyon denir. Evrimsel Newton sıvıları olan bitüm ve emülsiyonlara örnek olarak verilebilir.
- **Solusyonlar:** iki veya daha fazla sıvı maddenin homojen karışımıdır. Örnek olarak sodyum silikat, organik reçineler ve çeşitli kimyasal harçlar olarak adlandırılan çok çeşitli, viskozitesinin ayarlanabilir bir süre içinde reaksiyon göstermeden sabit olduğu Newton çözeltileri verilebilir.

Bu çalışmada yer alan harç malzemesi tipi harç süspansiyon (çimento) türüdür. Harç malzemelerinin özellikleri ve işlenebilirlikleri çimento harcı kullanılarak geçirgen derzlerin başarıyla uygulanmasını sağlamak için, harç malzemesini ve enjeksiyon dolgu yönteminin parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

2.1.4 Harç malzemesi parametreleri

Daneli harçların gözenekli ortamda geçirgenliği aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Stabilite (kararlılık)
- Enjeksiyon basıncı
- Reoloji (işlenebilirlik ve viskozite)
- Dane büyüklüğü

Yukarıda belirtildiği gibi çözeltili harçlarının zemine enjekte olmaları Darcy yasasına göre enjeksiyon süreleri boyunca Newton sıvı gibi davranır. Bu nedenle penetrasyon (sızma) mesafesi ve harç özellikleri üzerindeki temel kontroller şunlardır;

- Zeminin geçirgenliği ve gözenekliliği
- İlk harç viskozitesi ve değişimi, Deere ve Lombardi (1985) enjeksiyon uzaklığını ve viskozitesinin enjeksiyon debisinin belirlediğini belirtmiştir.
- Basınç
- Enjeksiyon süresi

2.1.5 Enjeksiyon yöntemi parametreleri

Fransız Tünel Birliği (AFTES 1991) enjeksiyonda 4 ana parametreyi tanımlayan bir yaklaşım sağlar. Bu parametreler;

- Harç hacmi, V
- Enjeksiyon basıncı, P
- Enjeksiyon hızı, Q
- Enjeksiyon süresi, $t=V/Q$

2.1.6 Viskozite

Katı, sıvı veya gaz formunda bir akışkanın şekil değişikliğine (deformasyon) karşı gösterdiği mukavemettir. Dilimizde akmaya karşı gösterdiği direnç anlamına gelen akmazlık olarak da adlandırılır.

Enjeksiyon için hazırlanan süspansiyon karışımlar Newton akışkanı olarak tanımlanmaz. Bingham sıvısı olarak tanımlanır. Newton sıvısında viskozite değeri

kayma oranının değişmesiyle sabitken Bingham sıvılarında kayma oranı ile kayma gerilmesine göre değişiklik gösterir. Bingham modelinde eğim viskoziteyi verir (bakınız Şekil 2.2 – Şekil 2.3).

- Laminer akım / Newton sıvılar için (2.1) denklemi

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} = \eta \gamma \quad (2.1)$$

Burada;

τ = sıvı içindeki kayma gerilmesi

$\frac{dv}{dz}$ = hız gradyanı (eğim); bir sıvı katmanının, bitişik sıvı katmanına göre rölatif hareketinin ne hızla olduğunu temsil eder.

μ = viskozite

Bu denklem laminer akım için geçerlidir.

- Türbülanslı akış için (2.2) denklemi

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dz} \quad (2.2)$$

Burada;

τ : kayma gerilmesi

η : basınçlı viskozite katsayısı

μ : dinamik girdap viskozitesi

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \text{ (Kinematik viskozite)} \quad (2.3)$$

Burada;

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

ρ =yoğunluk

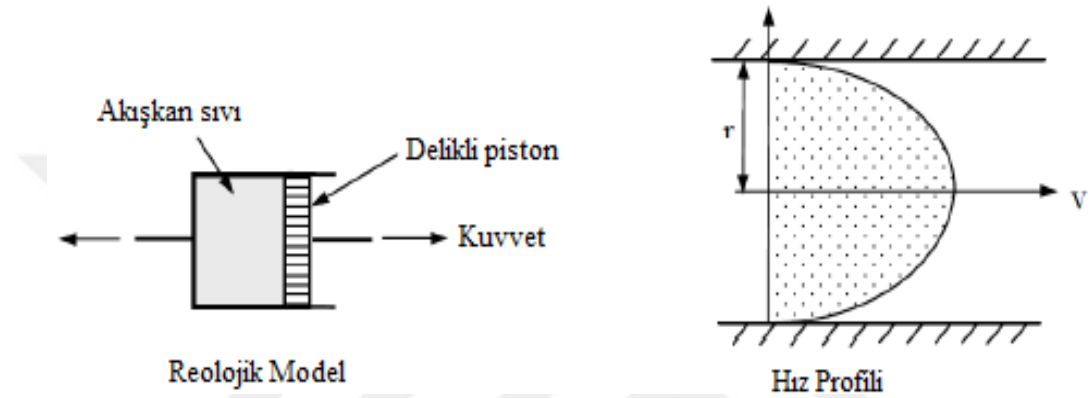
$\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

- Süspansiyonlar genellikle Newton sıvısı olarak değil Bingham sıvısı olarak ifade edilir. Bingham sıvısı aşağıda verilen (2.4) denklemine göre belirlenir.

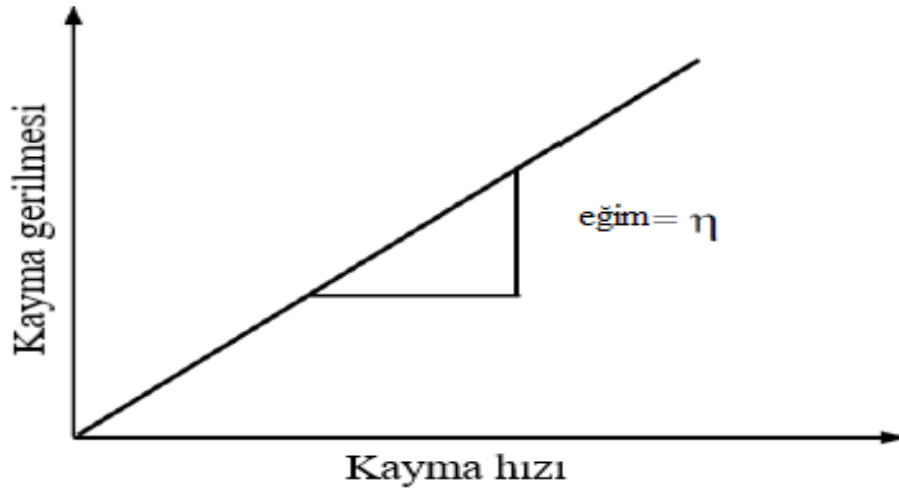
$$\tau = \tau_o + \eta_p \frac{dv}{dz} = \tau_o + \eta_p \gamma \quad (2.4)$$

Burada;

η_p = plastik viskozite



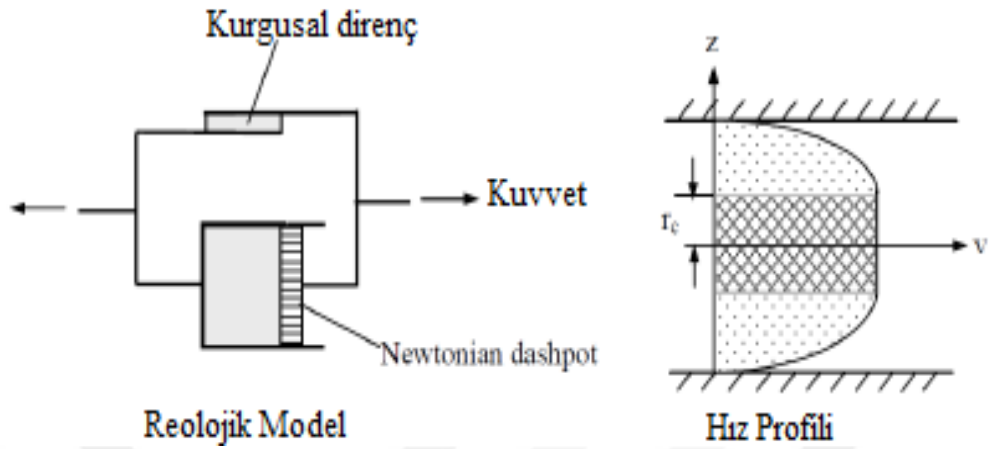
Şekil 2.2. Newton model (Çelik, 2016)



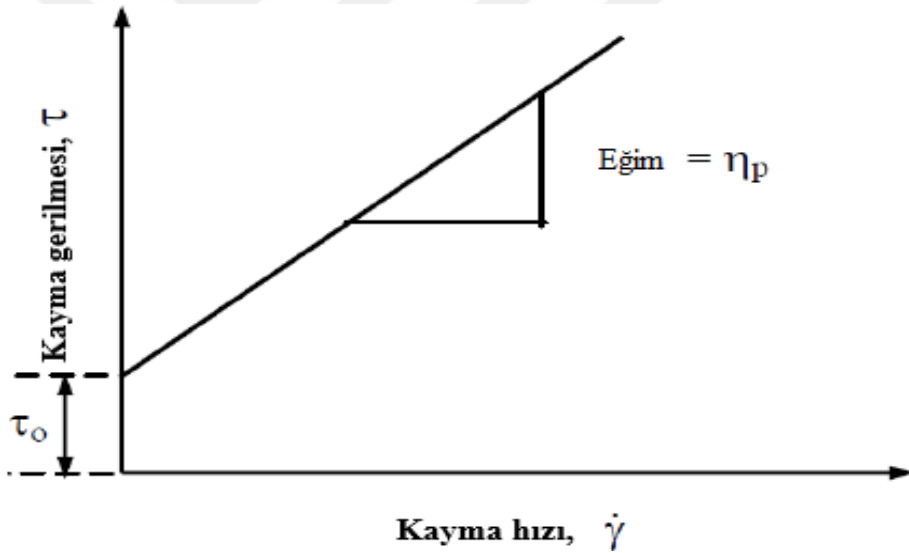
Şekil 2.3. Newton sıvısı (Çelik, 2016)

Bingham'ın sıvıları, akış limiti, akma gerilimi veya eşik direnci ile (Şekil 2.4'te ve Şekil 2.5'te gösterildiği gibi) işaretlenir. Akma noktası büyük ölçüde harici parametrelere bağlıdır. Akmaya başlamak için ilk kayma direncinin aşılması gerekir. Bundan sonra,

viskozitenin Bingham sıvıları için geçerli bulunan sabit olduğu varsayılabilir. Bu süreçte, kayma gerilimi ve kayma hızı (gradyan) birbirleriyle orantılıdır.



Şekil 2.4. Reolojik model ve hız profili – I (Çelik, 2016)



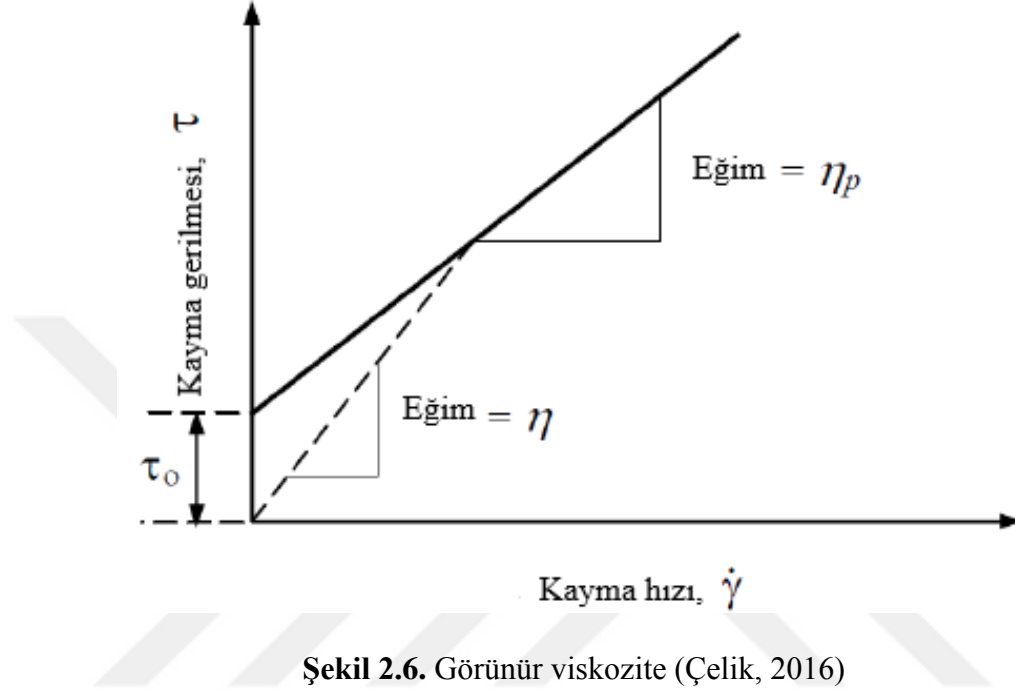
Şekil 2.5. Reolojik model ve hız profili – II (Çelik, 2016)

2.1.7 Görünür viskozite

Darcy yasası geçirgenlik katsayısındaki viskozite terimi için görünür bir viskozite (η) ekleyerek Newton yasası olmadan genişletilebilir (Vossoughi, 1999). Görünür viskozite Bingham denkleminin viskozite açısından aşağıdaki (2.5) denklemi gibi yazılmasıyla elde edilir.

$$\eta = \eta_p + \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} \quad (2.5)$$

Burada η , görünür olmayan viskozite adı verilen belirli bir kesme hızında Newton olmayan bir materyalin eşdeğer Newton viskozitesidir (bkz. Şekil 2.6).



2.1.8 Değiştirilmiş darcy yasası

Zhang'a (2002) göre, Bingham'ın sıvısı için değiştirilmiş Darcy'nin yasası aşağıdaki (2.6) denklemi gibidir:

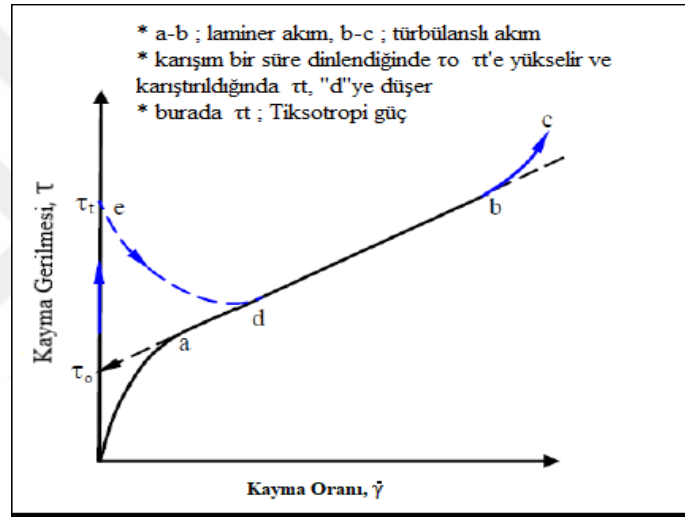
$$v = \frac{K\rho g}{\eta} \quad (2.6)$$

Burada $K = \frac{k\eta}{\eta}$ gözenekli ortamın içsel geçirgenlik katsayısı, Darcy yasasının aynı formülündeki harç için geçirgenlik katsayısı (k_G) aşağıdaki (2.7) denklemi gibidir:

$$k_G = \frac{K\rho g}{\eta} \quad (2.7)$$

2.1.9 Tikotropi (Karıştırma sonucunda viskozitenin değişmesi durumu)

Tiktotropi gibi ek özellikler göz önüne alındığında çimento harcının reolojik davranışının daha eksiksiz bir temsili elde edilebilir. Tikotropi, yapısal bozulma nedeniyle kayma altında viskozitenin azaldığı Newton olmayan maddelerin özelliğidir (bkz. Şekil 2.7). Kayma oranı durduktan sonra viskozitesini geri kazanacaktır. Aynı numuneye yukarı ve aşağı kayma oranı rampaları döngüsel olarak uygulandığında tiktotropi döngü testi durumunda, aşağı eğri, yukarı eğriden daha düşük kayma gerilmeleri kaydeder ve aralarında bir alan olarak bir hysteresis (ani değişiklik sonucu gecikme döngüsü) döngüsü oluşturulur.



Şekil 2.7. Tikotropik karışımların reolojik özellikleri (Nonveiller, 2013)

2.2 Zeminlerde Permeasyon Enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu, enjeksiyon sıvısının zemin yapısında bir değişikliğe neden olmadan sabit bir enjeksiyonda harcın enjekte edildiği bir tekniktir. Harç penetrasyonu zeminin geçirgenliğine bağlı olduğundan düşük viskoziteli harçlar temiz kum, çakıl ve açık dolgulara nüfuz etmeleri ile sınırlıdır. Genel bir kılavuz olarak sıradan çimento harcı (Portland Tipi I) kullanılarak geçirgenlik katsayısı (su) 5×10^{-4} m/sn' den az olan zeminlere nüfuz etmesi zordur (Littlejohn, 1982). Enjeksiyon işleminde zemine doğrudan enjekte edilebilmesi için zemindeki boşlukların harç tarafından nasıl doldurulduğunu ve harç geçirgenliğini etkileyen faktörlerin neler olduğunun iyi

anlamak önemlidir. Genel olarak zemine enjekte edilen harç, aşağıdaki şekillerde nüfuz etmektedir.

- Granüler (kaba daneli) zeminde geçirgenlik
- Çatlaklar yoluyla geçirgenlik
- Çatlaklar ve boşlukları çimento harcı ile doldurma

2.2.1 Enjeksiyon testi ve tekniği

Permeasyon enjeksiyonu öncelikle zeminin geçirgenliğinden etkilenir. Doğal zeminlerde ve kayalarda bulunan önemli farklılıklar sonucunda etkili bir enjeksiyon için bir dizi harç ve enjeksiyon tekniği gerektirmektedir (bkz. Çizelge 2.1). Çizelge 2.1 'de verilen k değerleri, harcın enjekte edilebilir viskozitesi üzerindeki etkisini dikkate almadığından ve k değeri için ölçüm yöntemi rapor edilmediğinden sadece genel bir rehberdir.

Bu nedenle geçirgenlik değerlendirmesi zeminlerin enjekte olabilirliği araştırmanın önemli bir bölümünü oluşturur. Zeminde aşağıda gösterildiği gibi belirli harçların nüfuz edilebilirliğini (Mitchell, 1981) değerlendirmek için ampirik geçirgenlik oranı yani $N=D_{15}/d_{85}$ ve $N_c = D_{10}/d_{95}$ kullanılabilir.

Çizelge 2.1. Zemin tipleri ve enjeksiyon tekniği (Avrupa Standartları 1996'dan sonra)

Enjeksiyon yöntemi Zemin türü	Permeasyon	Sıkıştırma/ Çatlatma / Jet enjeksiyonu
Çakıl, kaba kum ve kumlu çakıl $k > 5 \times 10^{-3}$ m/sn	Saf çimento süspansiyonlar, çimento esaslı süspansiyonlar	Harçlar, çimento esaslı süspansiyonlar
Orta kum $5 \times 10^{-3} < k < 1 \times 10^{-5}$	Mikro-ince süspansiyonlar, Solisyon	Çimento esaslı süspansiyonlar
İnce kum, silt, siltli kil $5 \times 10^{-4} < k < 1 \times 10^{-6}$ m/sn	Özel kimyasallar	Çimento esaslı harçlar, çimento esaslı süspansiyonlar

- $N > 24$, Başarılı enjeksiyon
- $N_c > 11$, çimento enjeksiyonları mümkün

- $N_c < 6$, çimento enjeksiyonları mümkün değil

Burada;

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

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

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

d_{95} - çimentonun dane dağılım eğrisinde %95'a karşılık gelen boyutu

2.2.2 Gözenekli ortamda harç akış teorisi

Zeminin harç geçirgenliği, Darcy yasasına göre geçirgenlik katsayısı k cinsinden ölçülen harç geçirgenliği ile ilgilidir. Belirli bir sıvı için k öncelikle boşluk oranının bir fonksiyonudur. Ancak parçacık boyutu dağılımı, zemin yapısı, doygunluk ve diğer faktörlerde değerini etkiler. Düzgün zeminlerde geçirgenlik, basit matematiksel modellerle temsil edilebilecek çok düzenli bir form izler. Aşağıdaki iki bölümde gösterildiği gibi gözenekli bir ortam için küresel ve silindirik akış modelleri (Raffle ve Greenwood, 1961), sondaj deliklerinden zeminin nüfuz etme enjeksiyonu için önerilmiştir.

R_o yarıçapının küresel bir boşlukta akışını korumak için gerekli olan yerel hidrostatik basınç (P_e), enjeksiyon debisi, zemin geçirgenliği ve harç viskozitesinin ilişkisini ifade eden fonksiyon aşağıda (2.8) denkleminde verilmiştir.

$$P_e = \frac{Q\gamma}{ckG} = \frac{Q\gamma\eta}{ck\eta w} \quad (2.8)$$

Burada;

Q : enjeksiyon debisi, m^3/sn

γ : enjeksiyon harcının birim hacim ağırlığı, kN/m^3

C : şekil katsayısı = $4\pi R_o$, R_o küre yarıçapı

k_G : zemin enjeksiyon geçirgenliği m/sn

k : zemin su geçirgenliği m/sn

η : viskozite Newton akışkan için, $Pa.sn$

η_w : suyun viskozitesi, $Pa.sn$

Not: $1 \text{ Pa}\cdot\text{sn} = 1 \text{ N}\cdot\text{sn}/\text{m}^2$

$\eta_w = 10.09 \text{ mPas } 20^\circ\text{C}$

Zaman içerisinde küresel harç enjeksiyonu sırasında t zamanda alınan harç aşağıdaki (2.9) denklemindeki gibidir.

$$Qdt = 4\pi r^2 ndr \quad (2.9)$$

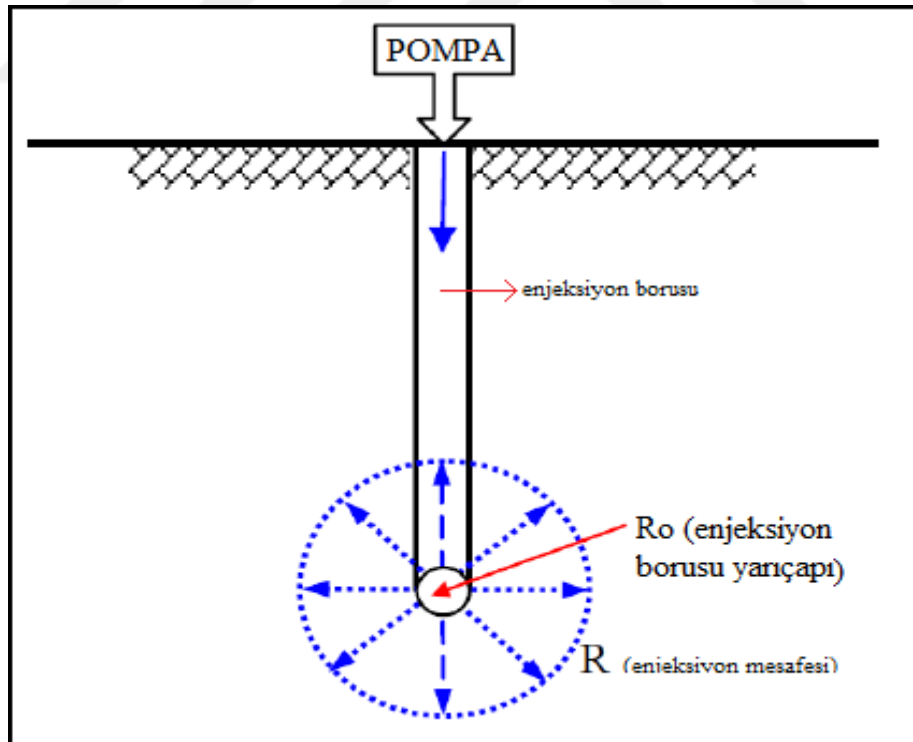
Burada;

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

dr = harç enjeksiyon mesafesi

R_0 yarıçapına sahip küresel bir boşluktan, enjeksiyon harcının R mesafesini kat etmesi için gereken süre aşağıdaki (2.10) denklemindeki gibi hesaplanabilir:

$$t = \frac{4\pi n}{3Q} (R^3 - R_0^3) \quad (2.10)$$



Şekil 2.8. Küresel akış enjeksiyonu (Çelik, 2016)

(2.8) ve (2.10) denklemlerine eşdeğer denklem silindirik bir delikten belirli bir kalınlığa sahip bir tabakaya radyal akış durumu aşağıdaki (2.11) denklemi gibi ifade edilir.

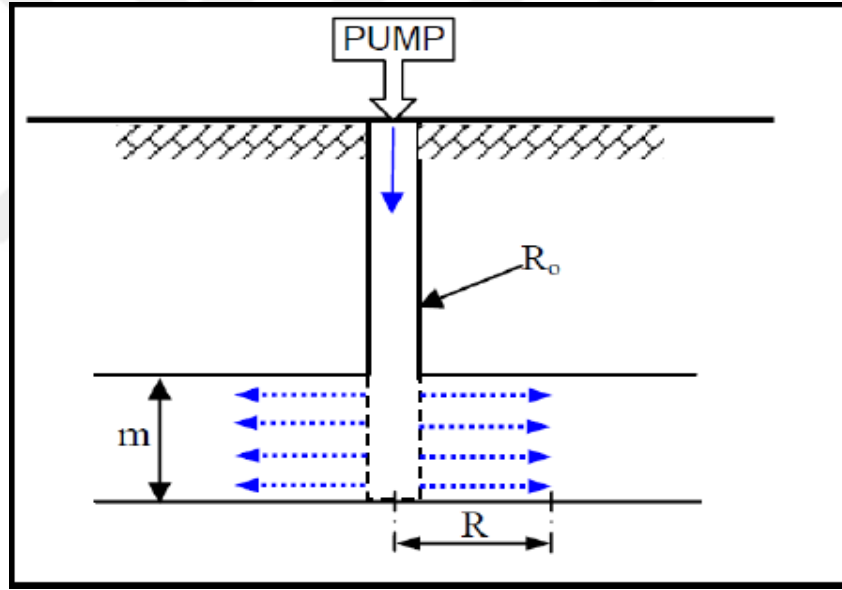
$$Pe = \frac{Q\gamma\eta}{2\pi nk\eta w} \ln \frac{R}{R_o} \quad (2.11)$$

Burada;

R = enjeksiyon noktasında olan uzunluk

R_o = enjeksiyon boru yarıçapı

Bu modellerden, yola çıkılarak harç ve zeminin özelliklerinden enjeksiyon aralığını, enjeksiyon noktasından uzaklığı R ve nüfuz etme süresini (t) tahmin etmek aşağıda verilen (2.12) denklemiyle mümkündür.



Şekil 2.9. Silindirik borudan radyal enjeksiyon (Çelik, 2016)

$$t = \frac{\pi m n}{Q} (R^2 - R_o^2) \quad (2.12)$$

Enjeksiyon harcının basıncı $p(R)$ sondaj deliğinden R mesafesi arttıkça azalır,

$$p(R) = Pe - \frac{Q\gamma\eta}{2\pi nk\eta w} \ln \frac{R}{R_o} \quad (2.13)$$

Yukarıdaki (2.12) ve (2.13) denklemleri, zeminin enjeksiyon borusundan belirli bir mesafe boyunca işlenmesi için gereken sürenin (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 bağlı olduğu göstermektedir. Daha büyük çaptan enjeksiyon için belirli bir mesafede daha yüksek basınç gerekir.

2.2.3 Harç enjeksiyonunda doğal fiziksel kısıtlamalar

Permeasyon enjeksiyonu uygulaması, partikül büyüklüğü, dağılımı ve geçirgenlik ölçümleri ile uygulanacak zeminin gözenek boyutunun doğru değerlendirilmesine bağlıdır. Harç penetrasyonuna direnç gösteren üç temel fiziksel neden vardır:

- I. **Parçacıkların filtrelenmesi** zemindeki boşluklardan geçemeyecek büyüklükteki daneleri ayırmak için;
- II. **Kayma direnci** harç parçacıklarının kıvrımlı zemin boşluklarından akması;
- III. **Harç viskozitesi** sıvının zemin boşluklarından akma hızını belirler;

2.3 Çimento Esaslı Harçların Enjeksiyonu

Enjeksiyon, zemin mühendisliğinde boşlukları veya çatlakları doldurmak için uygulanan bir işlemdir. İstenilen mukavemet parametrelerini sağlayamayan zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için birtakım yöntemler uygulanır. Taşıma gücü yetersiz, işlenebilirliği az, şişme potansiyeli yüksek, yüksek deformasyon vb. özelliklere sahip zeminler ile karşılaşılması durumunda bu zemin tabakası kaldırılabilir ve yerine mukavemet parametreleri yüksek zeminler kademeli olarak yerleştirilip sıkıştırılabilir. Ancak bu yöntemi her zaman uygulamak mümkün olmamaktadır. Buna benzer sebeplerden dolayı zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmektedir. Değiştirilmesi mümkün olmayan veya düşünülmeyen zeminler mekanik veya kimyasal yöntemler uygulanarak iyileştirilebilirler. Mekanik yöntemlerle iyileştirme her zaman mümkün ve yeterli olmayabilir. Özellikle kohezyonlu zeminlerin mekanik yöntemlerle iyileştirilmesi pek mümkün değildir. Kohezyonlu zeminler çoğunlukla çimento, bitüm, kireç, reçine vb. katkıları kullanılarak kimyasal yöntemlerle iyileştirilebilir.

Zeminlerde enjeksiyon, akışkan bir harcın basınç ile zemin veya çatlaklı kayalar içerisine enjekte edilmesi ile zamanla sertleşmesi şeklinde uygulanan bir yöntemdir.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesiyle oturmaların izin verilebilir değerlerde olması, taşıma gücünün artması vb. durumlar için enjeksiyon yöntemi çatlaklı kaya ve granüler zeminlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca barajlarda suyun sızması için geçirimsizlik perdesi oluşturulmasında zemin enjeksiyon yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemle zemin danelerinin birbirlerine bağlanması veya boşlukları doldurarak ortamın geçirimsizliği azaltılıp kayma mukavemeti parametreleri artırılır.

Enjeksiyon yöntemi, ilk zamanlarda maden endüstrisinde ve baraj temellerinde su sızıntılarını önlemek ve dayanım kontrolü uygulanmalarında kullanılmıştır. Daha sonra inşaat mühendisliğinde zeminlerin şev stabilitesini arttırmak, kayma mukavemeti parametrelerini arttırarak deformasyonları azaltmak, tünel yüzeyindeki beton ile zemin arasındaki boşlukları doldurmak, farklı oturma yapan yapıların düzeltilmesi, ankrajların zemine sabitlenmesi, iksa sistemlerinde yanal gerilmelerin, sıvılaşma riski olan zeminlerin iyileştirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmıştır.

Enjeksiyon malzemeleri, reolojik ve performans özellikleri itibariyle temel olarak üç çeşit karışımdan oluşmaktadır. Bunlar daneli karışımlar (süspansiyon veya çimentolaşma özelliği olan malzemeler), solüsyon (boyutsuz/danesiz, kimyasal) ve emülsiyonlardır.

- Çimento esaslı süspansiyon harçlar; çimento, kil, bentonit, bazen de kum ile hazırlanır. Çökme hızına göre stabil veya stabil olmayan harçlar olarak ifade edilir.
- Solüsyonlar (kimyasal harçlar); organik monomerlerden (glikoz, fruktoz gibi aminoasitler organik monomere örnek olarak verilebilir) yapılırlar. Bunlar Newtonyum akışkanlardır. Viskoziteleri suyun viskozitesine yakındır ve priz alana kadar da sabit kalır. Organik reçine olarak da adlandırılırlar. Solüsyonların yüzlerce çeşidi bulunmaktadır.
- Emülsiyonlar; gazların emülsifiye (emülsifiye birbiri içinde çözünmeyen iki maddenin üçüncü bir birleşik ile bir arada tutulması) edilmesi ile elde edilen

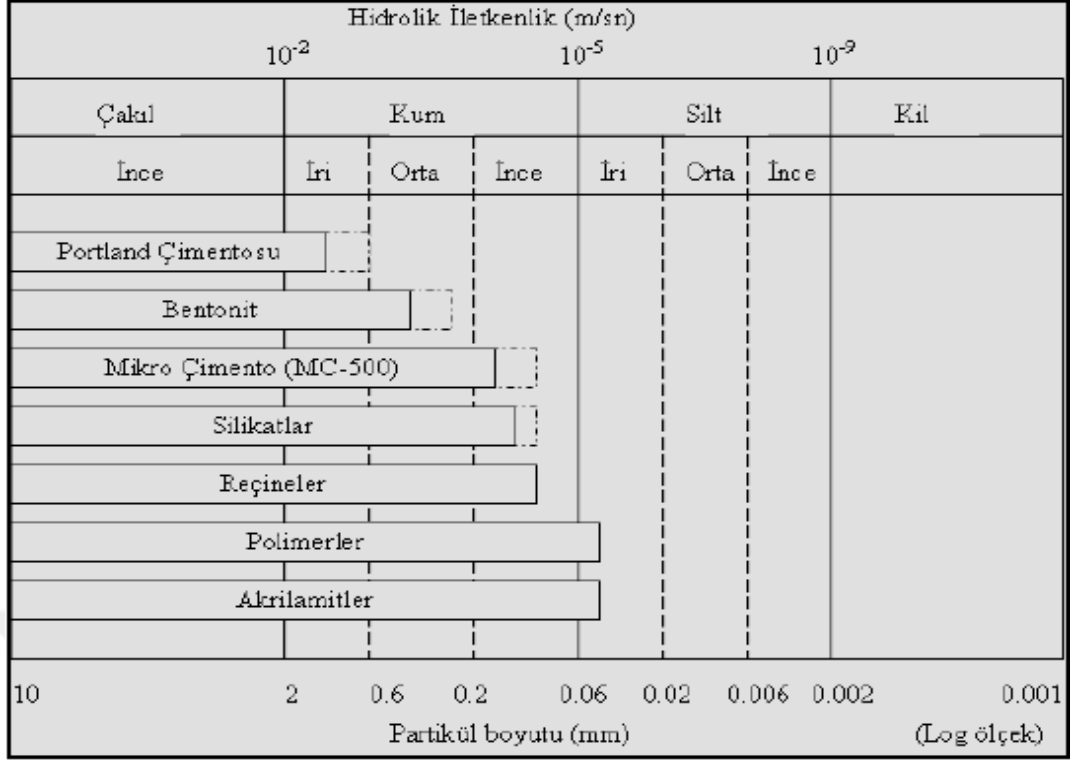
köpüklerde enjeksiyon harcı olarak kullanılır. Bu köpükler bir kabarma değeri ile tanımlanır. Kabarma değeri gazın hacminin sıvının hacmine oranıdır.

Yukarıda bahsedilen karışım çeşitlerinin enjekte edilebilir ortamlar ile ilgili sınıflandırması Gallavresi (1992) tarafından yapılmış ve Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.2. Karışım çeşitlerinin sınıflandırılması (Gallavresi, 1992)

Reolojik Kategori	Partiküler süspansiyonlar (Bingham Akışkanlar)		Çözeltiler (Newton Akışkanlar)			Gaz Emülsiyonu	
	Kararsız	Kararlı	Koloit çözeltiler (viskozite zamanla artmakta)	Saf çözeltiler (viskozite zamanla değişmemekte)			
Enjeksiyon Malzemesinin Ana Türleri	Sedecemento	Bentont veya kil ile birlikte çimento	Topaklaşmamış bentonit	Kimyasal enjeksiyon Malzemeleri		Şişebilen enjeksiyon malzemeleri	
				Sodyum silikat bazlı			
				Yüksek dayanımlı	Orta-düşük dayanımlı	Organik reçinele r bazlı	Çimento bazlı
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 kumlar	
Geçirgenlik katsayısı k (m/s)		$>5 \times 10^{-4}$	$>5 \times 10^{-5}$	$>5 \times 10^{-5}$	$>1 \times 10^{-5}$	$>1 \times 10^{-6}$	
Özgül yüzey (m ² /N)		<0,5	<1,5	<1,5	<4	<10	
Temel Enjeksiyon tekniği	Yüksek basınç	Kontrollü hacim ve basınç				Düşük basınç (Boşlukların doldurulması)	

Zeminin enjeksiyona uygun olup olmadığını anlamak için zeminin permabilite katsayısı en iyi göstergedir. Kimyasal harçların enjeksiyonu daneli olmadığı için kullanılabilirlikleri zeminin permeabilite katsayısına doğrudan bağlıdır. Daneli enjeksiyon harçları için ise bazı alt sınırlar vardır (Littlejohn, 1986). Bu sınırlar, çimento esaslı harç için 5×10^{-4} m/sn ve kimyasal harçlar için 1×10^{-6} m/sn’dir.



Şekil 2.10. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi (Kutzner, 1996)

Enjeksiyon harcının cinsi, doğrudan iyileştirilecek zeminin dane çapı ile ilgilidir. Çakıl dane boyutundan orta kum boyutuna kadar olan zeminlerde çimento, bentonit ve kireç gibi daneli karışımlar kullanılmaktadır. İnce kum ve siltlerin dane çapları çok küçük olduğundan dolayı bunların enjeksiyonu için kimyasal eriyikler kullanılmalıdır. Kil zeminlerinin enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi mümkün değildir. Dane çapına bağlı olarak zeminlerin hangi tür enjeksiyon malzemesi ile enjekte edilebilirliği Şekil 2.10'da görülmektedir.

Enjeksiyon malzemelerinin temel karakteristik özellikleri; stabilite, priz süresi, viskozite, yoğunluk, dane çapı gibi fiziksel özelliklerle ifade edilir. Bunları kısaca açıklamak gerekirse;

- **Stabilite (kararlılık):** Karışımın enjekte edilmesi planlanan bölgeye ulaşıncaya kadar segregasyona uğramamış ise bu enjeksiyon malzemesine stabil veya kararlı malzeme denilmektedir. Karışımların stabilite ölçümleri, basit bir laboratuvar deneyiyle yapılır. Enjeksiyon karışımı hazırlandıktan sonra ölçekli silindirik kapta serbest bırakılır. Karışım çökeldikten sonra ayrılmış su

yüksekliğinin çökelen malzeme yüksekliğine oranı ile yüzde kaç olduğu hesaplanır. Bu değere ayrışma diğer adıyla bleeding (çökme) değeri denir. Sadece çimento ile hazırlanmış yüksek su/çimento oranına sahip harçlar stabil olmayan karışımlardır. İçerisine bentonit katılarak stabilitesi sağlanır.

- **Priz süresi:** Çimento bazlı harç enjeksiyon malzemesinin su ile reaksiyona girerek mukavemet kazanması için geçen süredir. Çimento bazlı karışımlar, katkı malzemelerine göre, Türkiye'de üretilen portland çimentoları için priz başlama ve priz sona erme süreleri 1-10 saat aralığındadır. Kimyasal karışımlarda jelleşme veya priz süresi kritik olabilir. Bu tarz karışımlarda priz çok çabuk (birkaç dakikada) oluşabilir.
- **Viskozite:** Akışkanın, yüzeyde oluşan kayma gerilmesi altında deforme olmaya karşı gösterdiği dirençtir. Başka bir deyişle akışkanların akmaya karşı gösterdiği iç dirençtir. Enjeksiyon karışımının viskozitesi, arazide belirli karakteristikteki huni şeklindeki kaptan belirli miktar akışkanın ne kadar sürede geçtiği ölçülerek belirlenebilir. Bu kaplardan en çok kullanılanı Marsh konisidir. Lombardi'nin (1985) de belirttiği gibi Marsh konisi ile yapılan ölçümde, esasında malzemenin reolojik özelliklerinin bir kombinasyonu ölçülmektedir. Bu ölçümlerin sonucunda bulunan parametre yalnızca viskozite değil "görünür viskozite'dir.

İdeal olan bir enjeksiyon malzemesi; düşük viskoziteli, kontrol edilebilir priz süresine sahip ve zemin içerisinde yüksek dayanım özelliklerine sahip olmak ile toksik olmayan, kalıcı ve ucuz bir malzeme olmalıdır. Enjeksiyon teknikleri çatlatma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, permeasyon enjeksiyonu ve jet enjeksiyonu olarak dörde ayrılır (Gallavresi, 1992).

Çizelge 2.3. Farklı tip zeminlerde uygulanabilen enjeksiyon yöntemleri

Zemin tipi	Enjeksiyon Yöntemi			
	Permeasyon	Çatlatma	Kompaksiyon	Jet
Çakıl	✓	✗	✗	✗
Kum	✓	✓	✓	✓
Silt	✗	✓	✓	✓
Kil	✗	✓	✓	✓
Ayrışmış kaya	✓	✓	✓	✓
Fisürlü kaya	✓	✓	✓	✗
Boşluklu zemin	✗	✗	✓	✗
Dolgular	✗	✓	✓	✓

Bu yöntemler farklı zemin türlerine uygulandığı gibi aynı tip zeminlere de uygulanabilir. Farklı zemin türlerinde uygulanabilecek enjeksiyon yöntemleri Çizelge 2.3'te verilmiştir (Mitchell ve Jardine, 2002).

2.3.1 Permeasyon (Sızma) enjeksiyonu

Permeasyon (sızma) enjeksiyon yöntemi, zemindeki daneler arasındaki boşluklara viskozitesi düşük enjeksiyon malzemesinin düşük basınçlarla enjekte edilmesi olarak ifade edilir. Bu enjeksiyon yönteminde zeminin hacmi ve yapısı değiştirilmeden enjeksiyon işlemi yapılır. Kullanılan enjeksiyon malzemesi, zeminin dane çapına bağlı olarak farklı malzemelerin karışımı ile oluşturulabilir.

Enjeksiyon malzemesinin zemine uygunluğu, malzemenin inceliğinin yanı sıra enjekte edilecek boşlukların boyutuna da bağlıdır (Bell, 1993). Bu durumda enjekte olabilirlik N katsayısıyla açıklanır. Burwell (1958) süspansiyonlar için aşağıdaki (2.14) denklemini önermiştir:

$$N_a = \frac{(D_{15})_{zemin}}{(D_{85})_{enjeksiyon}} \quad (2.14)$$

D_{15} : %15 geçen zemine karşılık gelen dane çapı

D_{85} : %85 geçen enjeksiyon malzemesine karşılık gelen dane çapı

Olmak üzere;

$N_a > 24$ için enjeksiyon sürekli mümkün.

$N_a < 11$ için enjeksiyon mümkün değil.

$11 < N_a < 24$ için enjeksiyon olabilirliği deneme enjeksiyonları ile belirlenmelidir.

ve buna ek olarak aşağıdaki (2.15) denklemi de kullanılmalıdır:

$$N_j = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyon}} \quad (2.15)$$

D_{10} : %10 geçen zemine karşılık gelen dane çapı

D_{95} : %95 geçen enjeksiyon malzemesine karşılık gelen dane çapı.

Olmak üzere;

$N_j > 11$ için enjeksiyon sürekli mümkün.

$N_j < 6$ için enjeksiyon mümkün değil.

$6 < N_j < 11$ için enjeksiyon olabilirliği deneme enjeksiyonları ile belirlenmelidir.

Littlejohn, (1986) geçirimsizliği $k = 5 \times 10^{-5}$ m/s'den az olan zeminlerin iyileştirilmesinde çimento bazlı malzemelerin enjeksiyonda kullanılmamasını önermiştir.

Akbulut ve Sağlamer (2002) granüler zeminlerde enjeksiyon yapılabirlik oranı için, zemin ve enjeksiyonun dane dağılımına ek olarak enjeksiyon s/ç oranı, basıncı ile zemin ince dane oranı, rölatif sıklığı da dikkate alan aşağıdaki (2.16) ampirik denklemi önermiştir:

$$N = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyon}} + k_1 \frac{s/\zeta}{FC} + k_2 \frac{P}{Dr} \quad (2.16)$$

Burada;

$D_{10}(zemin)$: %10 geçen zemine karşılık gelen dane çapı.

$D_{90}(enjeksiyon)$: %90 geçen enjeksiyon karışımına karşılık gelen dane çapı.

s/ç: Enjeksiyonun Su/Çimento oranı

FC : Zeminin 0.6 mm elekten geçen ince dane oranı (toplam zemin ağırlığının yüzde kaçını 0,6 mm elekten geçmiştir).

P : Enjeksiyon basıncı (kPa)

Dr : Zeminin rölatif sıklığı

k_1, k_2 : N değerlerini normalize etmek için kullanılan sabitler $k_1 = 0,5$ $k_2 = 0,01$ (1/kPa)

$N > 28$ için zemin yeterince enjekte edilebilir.

$N < 28$ için zemin enjekte edilemez.

Eşitlik 2.16'daki N değerleri diğer parametrelerin aşağıdaki değer aralıkları için makul sonuçlar vermektedir. Bu değer aralıkları:

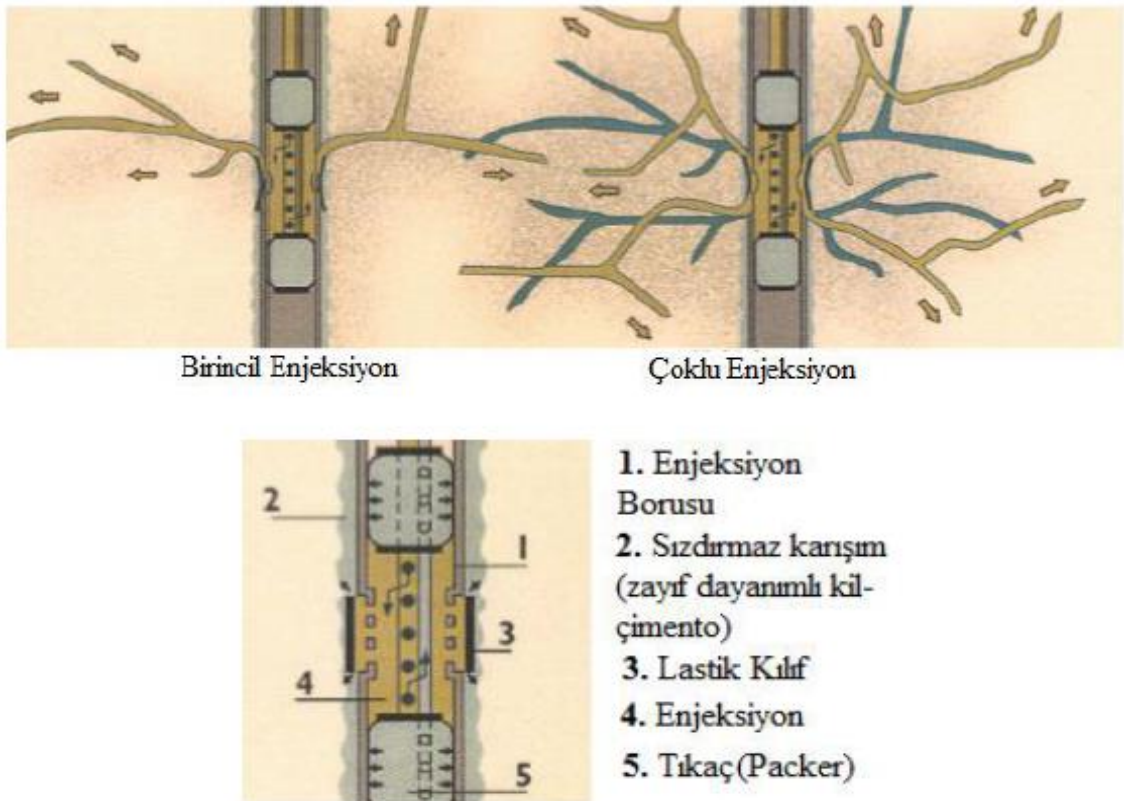
$$0 < FC < \%6$$

$$0,8 < s/\zeta < 2$$

$$50 \text{ Pa} < P < 200$$

2.3.2 Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu yönteminde, zemin kontrollü bir şekilde, yüksek basınçlarda (5-40 MPa arasında) düşük viskoziteli çimento bazlı harç enjeksiyonu ile zeminin çatlatılması söz konusudur. Bu enjeksiyon şekli permasyon (sızma) enjeksiyonun mümkün olmadığı geçirimsizliği düşük olan zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Çatlatma enjeksiyonun gelişimi tünel uygulamaları veya oluşan farklı oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır (Tunçdemir, 2004).

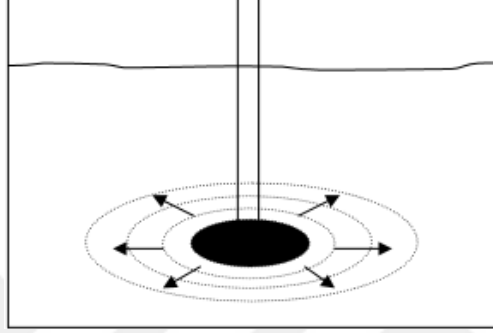


Şekil 2.11. Çatlatma enjeksiyonu (Keller, 2014)

Çatlatma enjeksiyonu yönteminde zemin içerisinde damar gibi sertleşmiş çimento ağları oluşur ve zemin bu sayede kontrollü bir şekilde sıkışmaktadır (bkz. Şekil 2.11). Çimento şerbeti yüksek basınçlarla zemine enjekte edilir ve zeminin çatlatılması sonucu çatlayan yerlere çimento şerbeti dolar. Oluşan çatlakların çapı ve boyu enjeksiyon basıncına ve zeminin geostatik gerilmelerine bağlıdır (Tunçdemir, 2004).

2.3.3 Kompaksiyon enjeksiyonu

Çimento veya zeminden oluşan harç yüksek bir basınçla (3.5 MPa yaklaşık) zemine enjekte edilir. Örselenmiş veya gevşek zeminleri sıkıştırmada kullanılır. Kompaksiyon enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu gibi enjeksiyonun yapılma noktasından çok uzaklara gitmeyen bir enjeksiyon türüdür. Çok yüksek basınçlarla enjekte edildiğinden zemin yüzeyine yakın yerlerde zeminde kabarmalara yol açabilir (bkz. Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Kompaksiyon enjeksiyonu (Essler vd., 2000)

Kompaksiyon enjeksiyonu çok derindeki zemin tabakalarının iyileştirilmesi, ekipmanların dar bölgelerde rahat kullanımı, uygulanma esnasında nispeten daha az atık ve kirlilik oluşumu, enjeksiyon esnasında mevcut binalar üzerinde titreşimin çok az olması gibi nedenlerden dolayı son zamanlarda popüler olmaya başlamıştır. Kompaksiyon enjeksiyonunun kullanım yerleri;

- Gevşek zeminlerin sıkıştırılması,
- Oturma oluşan yapıların temel sistemlerinin kaldırılarak tekrar düzeltilmesi,
- Yapı altında destekleyici taşıyıcı kolonların oluşturulması gibi sıralanabilir (Toğrol ve Çinicioğlu 1994).

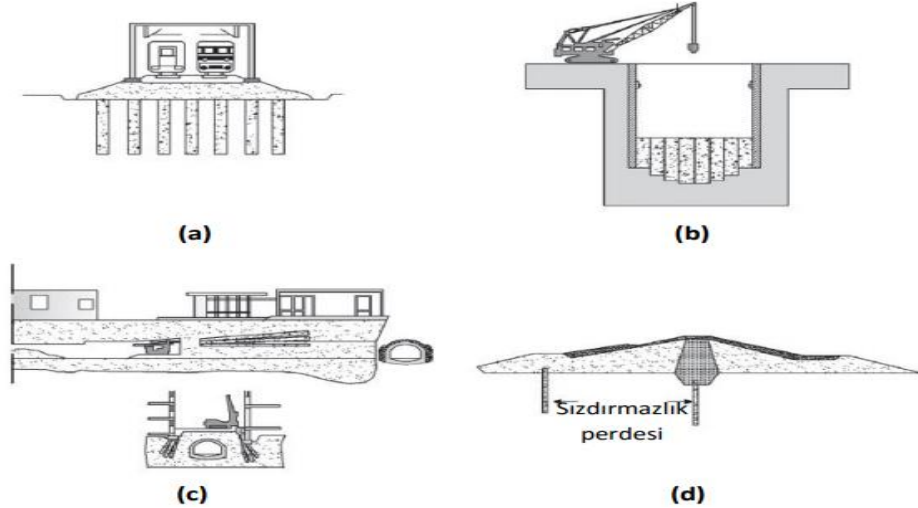
2.3.4 Jet enjeksiyonu (Jet Grout)

Jet enjeksiyonu, iyileştirilmesi planlanan zeminin istenilen derinliğe kadar özel delgi makinesi ile delinmesi, daha sonra jet grout ekipmanı kullanılarak yüksek basınçla (400-500 bar) çimento şerbetinin zemin içerisine püskürtülmesi ve kullanılan özel tijn belirli bir hızla döndürülerek istenilen derinlikten itibaren yukarı doğru çekilmesiyle

yerinde silindirik kolon oluşturma işlemidir. Bu işlem sonucunda zemin-çimento karışımı zaman içerisinde priz alarak “soilcrete” adı verilen zemin-çimento kolonlar oluşur. Böylece mevcut zeminin mukavemeti artar, deformasyonlar azalır ve permeabilitesi azalır. Yüksek basınçla enjekte edilmesi mevcut zemini kesmesi ve beraber zeminle çimento şerbetinin karışması sonucu oluşan kolonlar homojen bir eleman olarak işlev görür (bkz. Şekil 2.13).

Jet grout’ın uygulandığı zemin aralığının çok çeşitli olması, kullanılma alanının çok geniş olması açısından son yıllarda oldukça öne çıkan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Jet grout yönteminin diğer enjeksiyon yöntemlerine göre avantajları (İdiman ve Okyay, 1987)

- Her türlü zemin cinsine uygulanabilir olması,
- Tasarımın boyutlarının önceden yapılması ve bu ölçüler çerçevesinde enjeksiyon yapıldığından malzeme miktarı önceden hesaplanabilir.
- Kimyasal enjeksiyon yerine çoğunlukla çimento-su karışımı kullanıldığı için çevre kirliliği yaratmaması,
- Jet grout kolonları istenilen çapta ve derinlikte imal edilebilir.

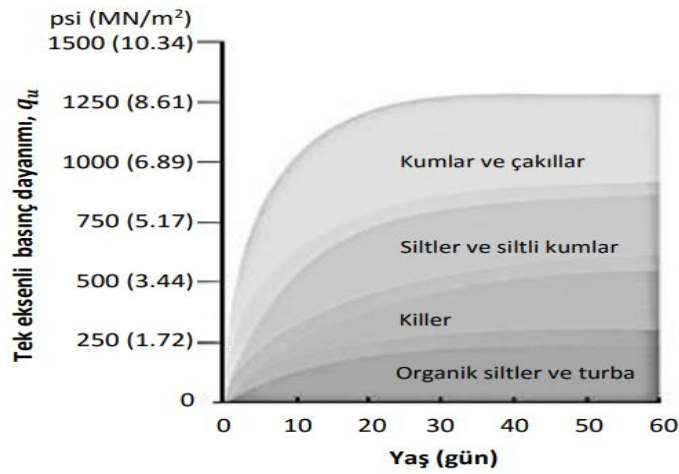


Şekil 2.13. Tipik jet enjeksiyon uygulamaları (Croce vd., 2014)

Jet enjeksiyonu kolonlarının çeşitli maksatlarla kullanımları Durgunoğlu (2006) tarafından aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Temeller, dolgular altında düşey yükler için basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü
- Havuzlarda, yeraltı su depolarında ve su yapılarında, donatı ile çekme elemanı olarak
- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması
- Kazılarda donatı ile düşey eğilmeye maruz iksa elemanı olarak
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak
- Geçirimli zeminlerde, yüksek yeraltı suyu seviyesi yüksek kazılar ve kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında geçirimsiz perde kaplama elemanı olarak
- Kazı alanının tabanından gelebilecek yeraltı suyunu önlemek amaçlı
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak
- Tünel üstündeki yumuşak zeminin iyileştirilmesi
- Zeminde oluşacak dinamik kuvvetler sonucu yanal ve düşey deplasmanlar sonucu zeminin sıvılaşma riskini azaltmak amaçlı yapı etrafında veya altında kapama elemanları olarak,

Jet enjeksiyonu zemini aşındırarak çimento şerbetiyle karıştırır. Aşınabilirlik en fazla kaba daneli zeminlerde, en az ise plastik killi zeminlerde görülür. Oluşturulan zemin-enjeksiyon karışımının dayanımı bu karışımın homojenliği ile doğrudan ilgilidir. Şekil 2.14'te farklı zeminlerde uygulanan jet enjeksiyonu sonucu oluşan soilcrete kolonların serbest basınç dayanım değerleri gösterilmiştir.

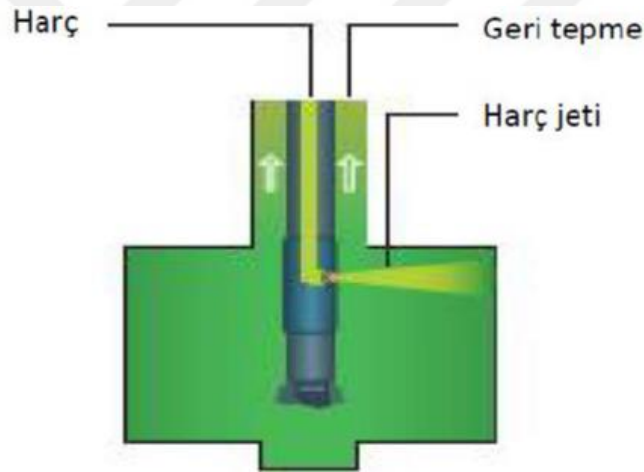


Şekil 2.14. Zemin tipine bağlı soilcrete dayanımları (Hayward vd., 2010)

Jet enjeksiyon teknikleri, zemin tipine, istenilen kolonun özelliğine göre değişiklik gösterir. Kullanım şekline ve amacına göre dört farklı ana enjeksiyon tekniği vardır. Bunlar, Jet 1, Jet 2, Jet 3 ve süper jet olarak tanımlanır.

Jet 1 yöntemi:

En basit ve en çok kullanılan yöntemdir (bkz. Şekil 2.15). Bu yöntemde enjeksiyon takımı tek çeperli bir borudan oluşup enjeksiyon malzemesi bu borudan yaklaşık 200 m/sn ve 300-600 bar'lık bir basınçla zemine enjekte edilir. Bu yöntemle oluşturulan kolonlar, zemin türüne ve parametre aralığına bağlı olarak çakıllı zeminlerde 0.6 ile 1.2 metre çapında kolonlar oluşturulabilir. Bu yöntem çakıllı zeminlerde etkili olduğu kadar kohezyonlu zeminlerde etkili değildir (Küsin, 2009).



Şekil 2.15. Jet 1 yöntemi (Keller, 2014)

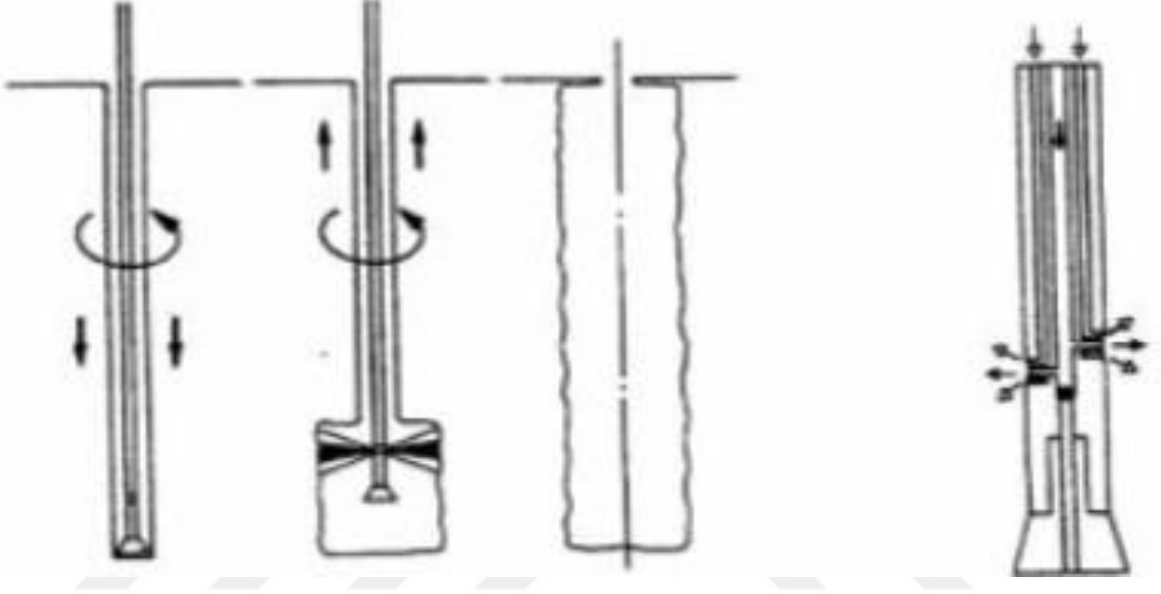
Jet 2 yöntemi:

Çift çeperli bir borunun kullanıldığı, çift akışkanlı metottur. Bu yöntemde orta borudan enjeksiyon malzemesi, basınçlı hava dış boruda zemine püskürtülür (bkz. Şekil 2.16). Kullanılan basınçlı hava (8-12 bar) sürtünme kayıplarını azalttığı için jet1 yöntemine göre daha büyük çapta kolonlar oluşturulur (Bakım, 2007).

Kumlu zeminde yapılan bir uygulamada, jet grout enjeksiyonu ile kolon yapılırken zeminin örselenmesi için yaklaşık 45 MPa basınç uygulanarak, delgi borusunun dönme hızı 8-10devir/dk, çimento/su oranı 1-1.25 harcına çimento 930 kg/m, harç debisi 130

lt/dk, harcın birim hacim ağırlığı 16-17 kN/m³ iken 1,4 m çapında kolon elde edilmiştir (Ichihashi vd., 1992).

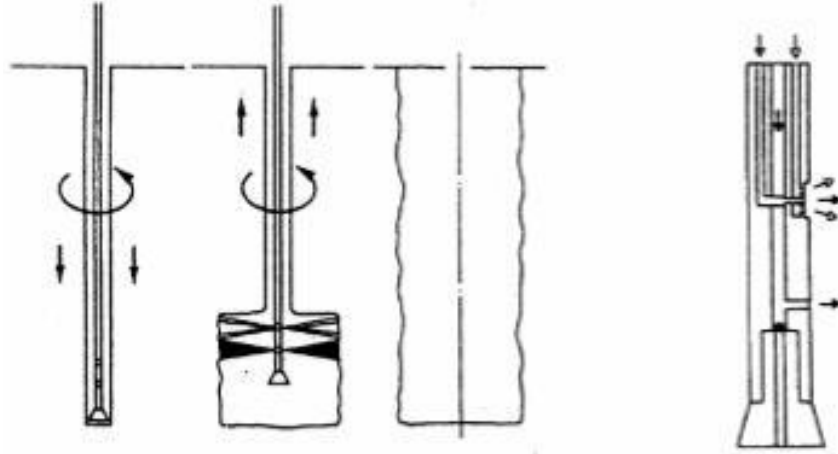
Jet 2 yönteminin dezavantajı çimento ile zemin içerisine hava püskürtülmesi sonucu kolondaki hava içeriği artmasıdır. Bunun sonucunda elde edilen zemin-çimento karışımın mukavemeti jet 1 yöntemine göre daha düşüktür.



Şekil 2.16. Jet 2 yöntemi (Bakım, 2007)

Jet 3 yöntemi:

İç içe üç boru kullanılan bu yöntemde, su ortadaki borudan 400-600 bar basınçla, 8-12 bar basınçlı hava ara borudan, 30-80 bar basınçlı enjeksiyon malzemesi ise en dış borudan ayrı bir nozul'dan, su-hava karışımının içine enjekte edilmektedir (bkz. Şekil 2.17). Bu yöntemle yapılan kolonlar 2 m'yi geçmektedir (Küsin 2009).

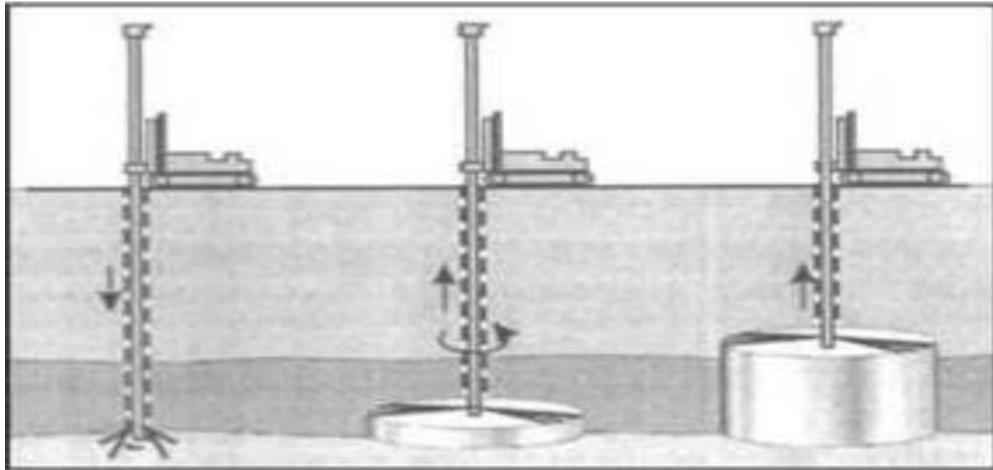


Şekil 2.17. Jet 3 yöntemi (Bakım, 2007)

Jet 3 yöntemi kohezyonlu zeminlerde daha etkilidir. Aynı su/çimento dozajlı jet enjeksiyonlarında jet 3 enjeksiyonu jet1 ve jet 2 yöntemlerine göre mukavemeti daha düşüktür. Bunu sebebi de jet 3 yönteminin içerdiği yüksek su miktarından kaynaklanmaktadır (Bakım, 2007).

Süper jet yöntemi:

Süper jet yöntemi son zamanlarda daha büyük kolon çaplarını yüksek hızda ve düşük maliyetlerle elde etmek için geliştirilmiştir (bkz. Şekil 2.18). Bu yöntemle 3-5 metreye varan çaplarda kolonlar elde edilmektedir. Bu yöntem tijlerin ucundaki yüksek çaplı nozullardan çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçlarla püskürtülür ve zemin ilk önce parçalanarak kolon oluşturulur (Küsin,2009).



Şekil 2.18. Süper jet yöntemi (Çınar, 2014)

Süper jet kolonları uygulamasında 3-4 devir/dk. dönüş hızı, 7 mm/dk. çekme hızı, 40 MPa (400 bar) enjeksiyon basıncı ile jet grout kolon çapının 4 m'ye kadar ulaşabileceği gözlemlenmiştir. Bu yöntem geçirimsiz perde duvar imalatında, zemin suyu kontrolünde, sıvılaştıran zemin tabakaların stabilizasyonunda, kazı yan yüzlerinin desteklenmesinde kullanılmaktadır (Küsin, 2009).

2.4 Enjeksiyon Tasarımı ve Parametreleri

Jet enjeksiyonu imalatında kullanılan parametrelerinin tipik değerleri Çizelge 2.4 'de verilmiştir. Jet grout kolon çapı, zemin tipine ve seçilen enjeksiyon sistemine göre değişmektedir. Ülkemizde Jet 1 ve Jet 2 yaygın olarak kullanılmaktadır (Küsin, 2009).

Çizelge 2.4. Jet grout yönteminin işletim parametreleri (Xanthakos, 1994)

Parametreler			Jet Grout Sistemleri		
			Tek (Jet 1) Akışkanlı	Çift (Jet 2) Akışkanlı	Üç (Jet 3) Akışkanlı
Enjeksiyon Basıncı	Su	(bar)	ÖY(200-300)	ÖY(200-300)	300-500
	Enjeksiyon Harcı	(bar)	300-600	300-600	400-600
	Sıkıştırılmış Hava	(bar)	Yok	8-12	8-13
Akışkan Oranı	Su	(lt/dk)	ÖY	ÖY	70-100
	Enjeksiyon Harcı	(lt/dk)	60-150	100-150	150-250
	Sıkıştırılmış Hava	(lt/dk)	Yok	10-30000	10-30000
Püskürtme Ağzılığının (Nozzle) Büyüklüğü	Su	(mm)	ÖY (1.6-2.4)	ÖY (1.6-2.4)	1.8- 2.5
	Enjeksiyon Harcı	(mm)	1.6-3	2-4	3.5-6
Püskürtme Ağzılığının (Nozul) Sayısı	Su	Adet	ÖY(1)	ÖY(1)	1-2
	Enjeksiyon Harcı	Adet	2-6	1-2	1
Tijin Dönme Hızı		(Devir/dk)	10-30	10-30	10-30
TİJİN BİR ADIM İÇİN ÇEKİLME SÜRESİ (4 Cm)		(sn)	8-15	10-20	15-25
Kolon Çapı	Çakıllı/Kumlu Zeminler	(m)	0.6-1	1-2	1.5-2,5
	Killi Zeminler	(m)	0.5-1	1-1.5	1-2
Su/Çimento Oranı		S/Ç	0.8:1-2:1		
Islah Edilen Zeminin Birim Hacim Ağırlığı		kg/m ³	400-800	400-800	400-800
Zeminin Mukavemet	Çakıllı/Kumlu Zeminler	kg/m ³	100-300	75-250	75-250
	Killi Zeminler	kg/m ³	15-100	15-85	15-75
NOT: ÖY=Ön Yıkama					

2.5 Çimento Esaslı Harçların Reolojisi

Reoloji, sıvıların akış, katıların deformasyon özelliklerini tanımlayan reoloji, rheos(akış) ve logos (bilim) kelimelerinden oluşmaktadır. Reoloji gerilme altında cisimlerin zamana bağlı şekil değişimini (deformasyon) inceleyen bilim dalıdır. İster katı ister sıvı olsun her malzeme gerilme altında şekil değiştirir. Enjeksiyon harcının en temel reolojik özellikleri, stabilite, priz(katılaşma) süresi ve viskozitedir (Schwarz, 1998). Diğer mühendislik özellikleri, süspansiyonların dane boyutu, yoğunluk ve enjekte edilecek zeminin temel mukavemet parametreleridir. Su/çimento oranı, özgül yüzey, karıştırma süresi, yoğunluğu gibi özellikler harç reolojisini etkilemektedir (Hakansson, 1992).

2.5.1 Stabilite

Süspansiyon karışımlar serbest haldeyken çökme eğilimindedirler. Bunun sonucunda daneler dibe doğru çöker, çökme sonucu su malzemelerin üstüne çıkar buna sedimentasyon (bleeding) denir (Warner, 2004).



Fotoğraf 2.1. Bleeding (çökme) deneyi (Çelik, 2016)

Bleeding tekniği Stokes yasası prensibine dayanmaktadır (bkz. Fotoğraf 2.1). Prensibin uygulanma yöntemi hazırlanan karışım bir silindirde çökelmeye bırakılır. Yerçekimi kuvveti ile daneler, aşağı doğru hareket ederken buna ters yönde olan stokes sürtünme kuvvetine maruz kalır. Bu iki kuvvetin eşitliğinde daneler çökme hızı limit değere ulaşır ve daneler sıvı içinde düzgün doğrusal bir hareket ile aşağı doğru çöker. Farklı büyüklükteki daneler farklı hızlarda çökecekleri esasına dayanarak büyüklüklerinin bilinmesi prensibini içerir (Akbulut ve Sağlamer, 2002). Hazırlanan çimentolu karışımında çökme olmuyorsa hazırlanan süspansiyon karışım stabil, süspansiyon karışım çöküyorsa stabil değildir (Hausman, 1990). Hazırlanan süspansiyonun stabilitesi şu şekilde tanımlanır; 1000 ml ölçekli mezur içindeki enjeksiyon karışımın 2 saat sonunda çökme sonucu üstte kalan su hacminin toplam süspansiyon karışımın hacminin %5'inden az ise karışım stabil kabul edilir (Hakansson vd., 1992).

2.5.2 Priz süresinin belirlenmesi

Enjeksiyon materyalinin akışkanlık özelliğini kaybetme süresi olarak tanımlanır. Priz süresi su ve çimentonun karıştırıldığı zaman ile çimento şerbetinin fiziksel ve kimyasal değışiklik göstererek plastikliğini kaybetme zamanına kadar geçen süre olarak ifade edilir. Çimentolu karışımlar için bu süre kullanılan katkı maddesine bağlı olarak 2 ile 24 saat arasında değışir (Warner, 2004).

Priz süresi enjeksiyon deneylerini kontrol altında tutmak için çok önemli bir parametredir. Zemin enjeksiyon esnasında zeminde yeraltı suyu bulunabilir. Bu gibi sebeplerden priz alma süresinin hızlı olması istenir ama aynı zamanda zemindeki tüm boşluklara ulaşması için belli bir süre gereklidir. Bu gibi nedenlerden optimum priz süresi deneylerle belirlenmesi gerekir (Warner, 2004). Priz süresini etkileyen faktörler (Warner, 2004);

- Sıcaklık: Sıcaklık arttığında hidrasyon hızlandığından priz süresi kısalmır.
- s/ç oranının artması priz süresini uzatmaktadır.

2.5.3 Viskozite

Katı, sıvı veya gaz formunda bir akışkanın şekil değişikliğine (deformasyon) karşı gösterdiği mukavemettir. Dilimizde akmaya karşı gösterdiği direnç anlamına gelen akmazlık olarak da adlandırılır.

Enjeksiyon için hazırlanan süspansiyon karışımlar Newton akışkan olarak tanımlanmaz. Bingham sıvısı olarak tanımlanır. Newton sıvısında viskozite değeri kayma oranının değişmesiyle sabitken, bingham sıvılarında kayma oranı ile kayma gerilmesine göre değişiklik gösterir. Bingham modelinde eğim viskoziteyi verir.

Su, Newton davranış gösteren bir sıvıdır. Süspansiyon içindeki kil veya çimento enjeksiyonu yaklaşık olarak bir Bingham davranış modeli gibi düşünülebilir. Karıştırıldığında rijitliğini kaybeden ancak bir süre durduğunda tekrar rijitliğini kazanan karışımlara tiksotropik olarak adlandırılır. Bentonit kil, tipik bir tiksotropik karışımdır. Viskozite (μ), kütle yoğunluğu (ρ) ile bölünürse kinematik viskozite(ν) adını alır (Warner, 2004).

Türbülanslı akım, pompalama esnasında enjeksiyon karışımının stabilitesinin sürdürülmesi dikkate alındığında önemlidir. Kaya veya zemine enjeksiyonun yayılma alanı ve mesafesi değerlendirildiğinde, çoğunlukla laminer akım şartları kabul edilir (Warner, 2004).

İdeal bir harç düşük viskoziteli, kontrol edilebilir priz süresi ve zemine enjekte edildiğinde yüksek mukavemettir. Harç reoloji özellikleri doğrudan veya dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Harçların reolojisi birkaç test yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Viskometre (reometre)
- Marsh hunisi akma deneyi
- Plaka kohezyon yapışma deneyi
- Mini slamp yayılma deneyi

2.6 Mineral Katkılar

İnşaat sektöründe çimento kullanımının fazla olması nedeniyle çimento hammaddeleri hızla tükenmektedir. Bu hammaddenin yerine daha ucuz ve benzer özelliklere sahip malzemelerin kullanılmasıyla beton kalitesi düşürülmeden, üretim maliyeti düşürülebilmektedir (Nuntachai vd., 2009). Bu nedenle inşaat sektöründe kaynakların tükenmesini azaltmak için atık malzemelerin kullanımı son yıllarda üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir konudur (Papayianni ve Anastasiou, 2010). Çimento ve betonda kullanılan atık malzemeler arasında puzolanik özellik gösteren malzemeler önemli bir yer tutmaktadır. Puzolan, tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme olarak tanımlanmaktadır. Puzolanlara örnek olarak uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, tras ve silis dumanı gibi örnekler gösterilebilir (Özkan vd., 2007).

Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik maddeler ve kireç taşı tozu gibi ince taneli mineral katkı maddeleri beton teknolojisinde giderek artan oranda kullanılmakta ve çok sayıda araştırmaya konu olmaktadır. Bu atık malzemeler ekonomik yararlarının yanı sıra betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini de iyileştirmektedir.

2.7 Çimento Esaslı Harçlarda Mineral Katkı Olarak Uçucu Kül Kullanımı

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75-%80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli (0.5-150 mikron) küllerdir. Bu kül taneciklerinin baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle "uçucu kül" (UK) olarak adlandırılmaktadır. Birçok ülke standartında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 no.'lu standart, uçucu küllerini F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir. Ayrıca, %10'dan daha az CaO içeren uçucu küller, "düşük kireçli uçucu küller", %10'dan daha çok CaO içerenler ise,

“yüksek kireçli uçucu küller” olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 1997; Al-Harthy vd., 2004).

Bugün Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup, bu santrallerden yılda toplam 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir. Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır, ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik yani bağlayıcılık özelliği gösterirler. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır (Türker ve Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60- %90’ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde, mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir. Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5’i (hacminin %20’si) içi boş (nitrojen veya karbondioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyumhidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadırlar. O nedenle hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar.

Çimento esaslı harçların reolojik, durabilite ve taze özellikteki davranışları genellikle kimyasal ve mineral katkılarla iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Çimento esaslı kompozitlere farklı katkı oranlarında mineral katkıların eklenmesi bu harç karışımların hem mekanik davranışlarını hem de akışkanlık davranışlarını ciddi oranda etkilemektedir. Bu mineral katkıların çimento esaslı harçların reolojik davranışları üzerine yayımlanmış literatürde birçok çalışma mevcuttur (Aitein v.d., 1984; Bustamante ve Gouvenot, 1983; Deere, 1982; Ruggiero, 1984; Weaver v.d., 1990). Literatürde yayımlanmış bu çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, çok nadir mineral katkıları (uçucu kül gibi) bu karışımların hem durabilite özelliklerini iyileştirebildiği gibi hem de akışkanlık davranışlarını iyileştirebilmektedir (Sonebi, 2002). Dolayısı ile uçucu kül gibi mineral katkıların çimento esaslı harçların hazırlanmasında kullanılması uygulamaların maliyetini düşürebileceği gibi aynı zamanda bu karışımların akışkanlık özelliklerini arttırabilmektedir. Ayrıca tezimiz kapsamında sonuçlarda açıkça görüleceği üzere çimento esaslı harçlarda uçucu külün nano partiküler malzemelerle beraber kullanımı, bu harçların akışkanlık davranışları üzerinde ciddi etkilere sebep olmuştur.

2.8 Çimento Esaslı Harçlarda Nano Partiküler Malzemelerin Kullanımı

Yukarıda bahsedilmiş mineral katkı malzemelerine ek olarak, alternatif ya da yardımcı eleman olarak devreye girebilecek başka katkı malzemeleri kullanım isteği dünyada yaygın olarak çalışılmaktadır. Nano teknolojinin gelişmesiyle elde edilebilen nano partiküler malzemeler, birçok alanda olduğu gibi inşaat sektöründe de kullanılabilir. Bununla ilgili yapılmış ve yapılmakta olan çeşitli çalışmalar mevcuttur (Li, 2004; Luo vd., 2004; Li vd., 2006; Zhang, 2007; Ge ve Gao, 2008; Nazari ve Riahi, 2011; Luo vd., 2012; Taha ve Taha, 2012; Ugwu vd., 2013; Rezagholilou ve Nikraz, 2014; Bahmani vd., 2014; Moradi ve Seyedi, 2015; Alsharif vd., 2016; Huang ve Wang, 2016; Subromani ve Sridevi, 2016). Bu çalışmalarda genellikle beton ve zemin iyileştirmelerinde çeşitli nano malzemelerin katkı maddesi olarak kullanılması bahsedilmiş ve nano malzeme kullanımının hem betonun hem de zeminin mekanik ve dayanım özelliklerini dikkate değer bir şekilde iyileştirdiği belirtilmiştir.

Son zamanlarda Nano-Silika ($n\text{-SiO}_2$) gibi nano partiküler malzemelerin inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla, bu tür malzemelerin yapı sektöründe de

kullanılabileceği konusu oldukça popüler olmaya başlamıştır. Daha önce yapılmış çalışmalarda nano partiküler malzeme katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri incelenmiştir (Coppola vd., 2014; Coppola vd., 2011; Senff vd., 2009; Jo vd., 2007; Björnström vd., 2004; Qing vd., 2007). Fakat bu çalışmalarda sadece tek tip bir nano partiküler malzemenin (Nano-Silika) kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu nano malzemelerin mineral katkılı harçların reolojik özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olacağı da bu çalışmalarda incelenmemiştir. Collepari ve diğ. (2005) tarafından yapılmış çalışmada, Nano-silika miktarının çimento bazlı harç karışımlarda artışının harcın piriz alma süresini kısalttığı, segregasyon ve çökme miktarını azalttığı ve taze haldeki harcın kohezyonunu iyileştirdiği sunulmuştur. Ayrıca Senff ve diğ. (2009), $s/b=0,35$ oranında hazırladıkları çimento bazlı harç karışımlarına, bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça %0,0 ve %2,5 aralığı oranlarında Nano-silika eklemişler ve harç karışımların reolojik özellikleri üzerinde ki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda nano malzeme miktarındaki artışın harç karışımların akma gerilmesini (kohezyon) dikkate değer oranlarda arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bunlara ek olarak bu çalışmada, yüksek oranlarda nano-silika katkısının viskoziteyi arttırdığı belirtilmiştir. Literatürde sunulmuş bu çalışmalar ışığında, çimento bazlı harçların hazırlanmasında nano partiküler malzemelerin kullanımının, bu malzemelerin reolojik özellikler üzerinde dikkate değer etkilerinin olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Nano partiküler malzemelerin parçacık dane boyutunun nano ölçekte olması sebebiyle, mineral katkılı çimento bazlı harçların reolojik özellikleri üzerinde olumlu yönde iyileştirmeler sağlayacağı düşünülmektedir. Bir diğer deyişle bu harç karışımların akışkanlık özelliklerini arttıracığı ve bunun sonucu olarak saha uygulamaları esnasında harç enjeksiyon basınçlarını azaltacağı öngörülmektedir. Harç enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basıncının azalmasıyla toplam proje maliyetleri üzerinden ekonomik kazançlar elde edilebilecektir. Böylece daha az enerji tüketimiyle daha etkili ve daha ekonomik enjeksiyonlar yapılabilecektir.

BÖLÜM III

GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Deneysel Çalışma Kapsamında Kullanılmış Malzemeler

Bu çalışma kapsamında ASTM C150 standardına göre Tip-I çimento türü olarak adlandırılan CEM-I 42.5R Portland çimento kullanılmıştır. Ayrıca mineral katkı harç karışımların üretilebilmesi için katkı malzemesi olarak Uçucu Kül (UK) kullanılmıştır. Kullanılan Uçucu Kül (UK), İskenderun da bulunan İsken Sugözü Termik Enerji Santralinden temin edilmiştir. Uçucu kül ve Çimentoya ait bazı kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1’de belirtilmiştir. Çizelge 3.1’de verilen çimentoya ve UK’ya ait veriler üretici kurumlardan temin edilmiştir.

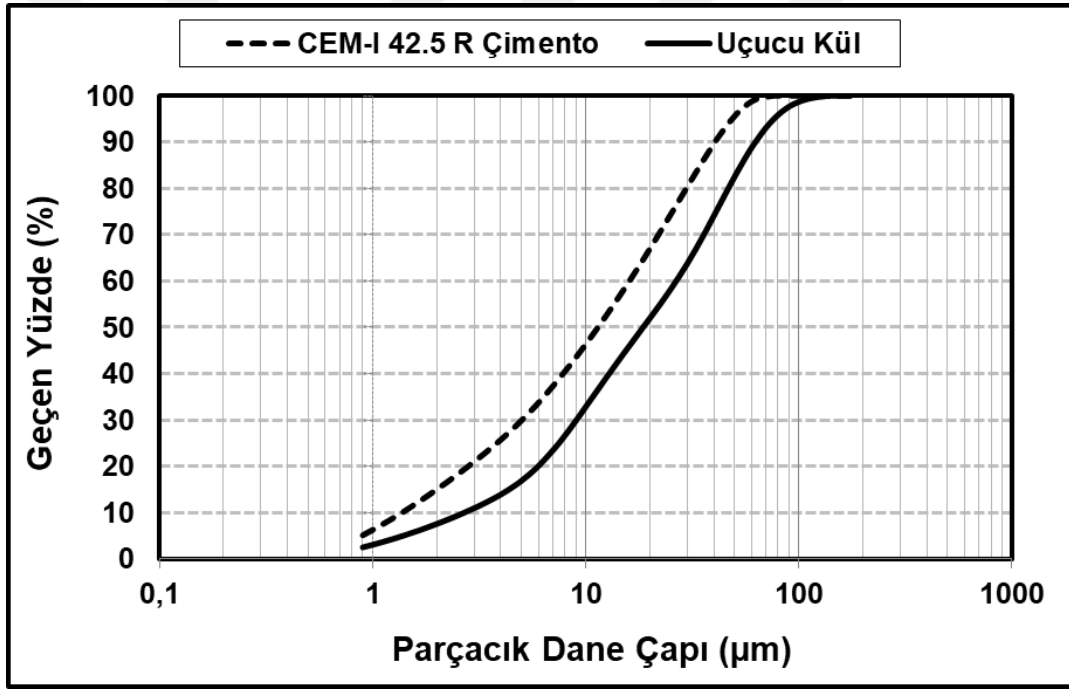
Çizelge 3.1. CEM-I 42.5 R çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

<i>Elementer analiz (%)</i>	CEM-I 42.5 R (Çimento)	Uçucu Kül (UK)
CaO	60,15	1,717
SiO ₂	20,46	62,204
Al ₂ O ₃	7,78	21,145
Fe ₂ O ₃	3,09	7,298
MgO	2,66	1,586
SO ₃	2,33	0,148
K ₂ O	0,82	2,121
Na ₂ O	0,22	0,94
TiO ₂	0,30	0,826
<i>Fiziksel özellikler</i>		
Kızdırma kaybı	2,55	2,010
Özgül ağırlık	3,10	2,33

Çimento esaslı harçların reolojik özellikleri üzerinde önemli olan parametrelerden biri de bağlayıcı malzemelerin (çimento ve mineral katkı malzemesi gibi) parçacık dane dağılımıdır. Bu sebeple mevcut çalışmamız kapsamında kullanılmış çimento ve Uçucu Külü ait parçacık dane dağılımı grafiği Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’de açıkça görüldüğü üzere, Uçucu Külün parçacık dane dağılımı çimentonun dağılımına yakınlık göstermektedir. Uçucu Külün parçacık dane boyutunun neredeyse tamamına yakını 100 mikronun altındadır. Bu durum, mineral katkısı olarak Uçucu Külün harç karışımların

reolojik özelliklerine pozitif yönde katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.1’de sunulmuş parçacık dane dağılımı eğrileri, tezin yürütüldüğü kurum olan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Laboratuvarlarında yapılan lazer taramalı parçacık boyutu belirleme deney cihazı yardımıyla belirlenmiştir (Mastersizer).

Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0.5-150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.1. CEM-I 42.5 R çimento ve uçucu külün (UK) parçacık dane dağılımı

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 , alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO , %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'ten fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

İlgili standarda göre (ASTM C 618) mevcut tezimizde kullanılan İskan Sugözünden temin edilmiş Uçucu Kül Çizelge 3.1 dikkate alındığında;

$$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3 = 62,204 + 21.145 + 7,298 = \%90,647 > \%70$$

olduğu için ve ayrıca CaO yüzdesi (%1.717) %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak adlandırılabilir. Bu Uçucu Kül ASTM C 618'e göre "F Sınıfı UK" olarak adlandırılmıştır. Dolayısıyla puzolanik özelliğe sahip UK olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2. Kullanılan nano partiküler malzemeler için elementer analiz sonuçları

Elementer Analiz	Na	Fe	Cr	Ca	Mn	Co	K	Al	Cu
Nano Alumina (Al_2O_3) (ppm)	<70	<80	<4	<25	<3	<2	-	-	-
Nano Titanium Oksit (TiO_2) (%)	0,0076	0,0046	-	-	-	-	0,0085	0,0055	-
Nano Silika (SiO_2)	-	0,0056	-	0,022	-	-	-	-	-
Nano Çinko Oksit (ZnO)	-	0,001	-	0,002	0,0005	-	-	0,002	0,0003

Çizelge 3.3. Kullanılan nano partiküler malzemelerin bazı fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	n-Al ₂ O ₃	n-TiO ₂	n-SiO ₂	n-ZnO
Saflık (%)	99,5+	99,55	99,65	99,5
Renk	Beyaz	Beyaz	Beyaz	Süt Beyazı
Ortalama Dane Boyutu (nm)	18	38	13-23	30-50
Özgül Yüzey alanı (m ² /g)	140	35	650	70
Kütle Yoğunluğu (g/cm ³)	-	0,4	-	-
Özgül Isı Kapasitesi (J/Kg.K)	890	-	-	-
Gerçek Yoğunluk (kg/m ³)	3900	4100	2200	5500
Kurumada Ağırlık Kaybı (%)	-	1,2	-	-
Kızdırma Kaybı (%)	-	3,2	-	-
pH	-	5,5-6,5	-	-
Morfolojik yapı	Yaklaşık küresel	-	Gözenekli	-

Tez kapsamında kullanılmış Nano Partiküler Malzemeler (NPM) sırasıyla; Nano Alümina (n-Al₂O₃), Nano Silika (n-SiO₂), Nano Titanyum Oksit (n-TiO₂) ve Nano Çinko Oksit (n-ZnO) olarak belirlenmiştir (bkz. Fotoğraf 3.1). Bu malzemeler, Türkiye’de hizmet etmekte olan ticari bir kuruluş olan Nanografi firması tarafından temin edilmiştir. Kullanılan bu nano oksit malzemelere ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de verilmiştir. Bu özellikler bu nano malzemeleri üretilen satan Nanografi firması tarafından sağlanmıştır.



Fotoğraf 3.1. Tez kapsamında kullanılmış nano partiküler malzemeler (NPM)

3.2 Harç Karışımları Hazırlama Yöntemleri ve Yapılan Deneyler

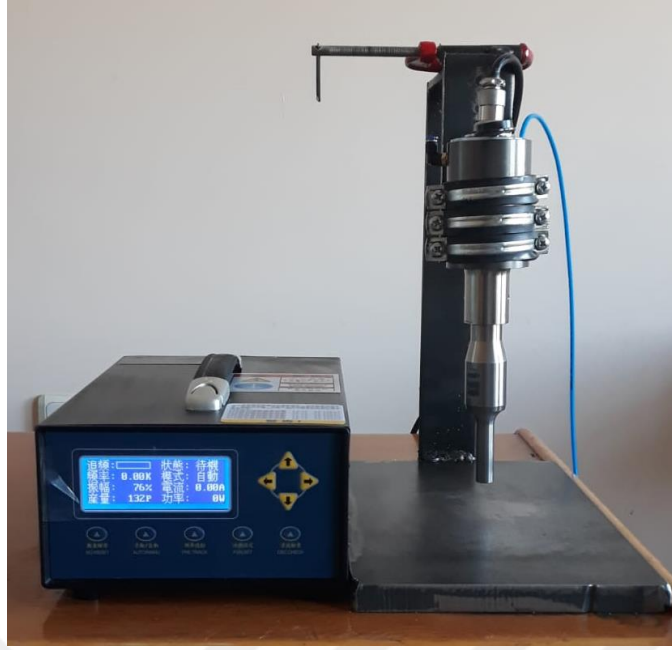
Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, çimento bazlı harçların mekanik, durabilite ve reolojik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri su-bağlayıcı malzeme oranı (s/b) olarak bilinir. Harç karışımlarının hazırlanmasında en önemli parametrelerden biri olan su/bağlayıcı (s/b) oranı, bu çalışma kapsamında s/b=1 olarak belirlenmiştir. Bu seçilmiş değer geoteknik mühendisleri tarafından jet grout ve permeasyon enjeksiyon gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir orandır. Ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) ve yukarıda bahsedilmiş 4 adet farklı nano partiküler malzeme, bağlayıcı malzemenin ağırlığına kıyasla katkı oranlarında (%0,0-kontrol numunesi, %0,3, %0.6, %0.9, %1.2 and %1.5) hazırlanarak çimento esaslı harç karışımları, çeşitli reoloji ve akışkanlık deneylerine maruz bırakılmıştır. Uçucu kül ve Nano partiküler malzemelerle (NPM) hazırlanacak çimento esaslı harç numunelerine ait karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri tüm detaylarıyla Çizelge 3.4’de gösterilmiştir. Çizelge 3.4’de görüleceği üzere 4 farklı NPM için 147 (35 X 4 farklı NPM+ 7 Kontrol) adet karışım hazırlanmıştır.

Çizelge 3.4. Karışım oranları ve bunlara ait karışım tasarım parametreleri

Karışım ID	w/b	U K (%)	PÇ (g)	U K (g)	Su (g)	NP M (g)	Karışım ID	w/b	U K (%)	PÇ (g)	U K (g)	Su (g)	NP M (g)
M1	1.0	-	1500	-	1500	-	M22	1.0	15	1275	225	1500	27
M2	1.0	-	1500	-	1500	9	M23	1.0	15	1275	225	1500	36
M3	1.0	-	1500	-	1500	18	M24	1.0	15	1275	225	1500	45
M4	1.0	-	1500	-	1500	27	M25	1.0	20	1200	300	1500	-
M5	1.0	-	1500	-	1500	36	M26	1.0	20	1200	300	1500	9
M6	1.0	-	1500	-	1500	45	M27	1.0	20	1200	300	1500	18
M7	1.0	5	1425	75	1500	-	M28	1.0	20	1200	300	1500	27
M8	1.0	5	1425	75	1500	9	M29	1.0	20	1200	300	1500	36

M9	1.0	5	142 5	75	150 0	18	M30	1.0	20	120 0	30 0	150 0	45
M10	1.0	5	142 5	75	150 0	27	M31	1.0	25	112 5	37 5	150 0	-
M11	1.0	5	142 5	75	150 0	36	M32	1.0	25	112 5	37 5	150 0	9
M12	1.0	5	142 5	75	150 0	45	M33	1.0	25	112 5	37 5	150 0	18
M13	1.0	10	135 0	15 0	150 0	-	M34	1.0	25	112 5	37 5	150 0	27
M14	1.0	10	135 0	15 0	150 0	9	M35	1.0	25	112 5	37 5	150 0	36
M15	1.0	10	135 0	15 0	150 0	18	M36	1.0	25	112 5	37 5	150 0	45
M16	1.0	10	135 0	15 0	150 0	27	M37	1.0	30	105 0	45 0	150 0	-
M17	1.0	10	135 0	15 0	150 0	36	M38	1.0	30	105 0	45 0	150 0	9
M18	1.0	10	135 0	15 0	150 0	45	M39	1.0	30	105 0	45 0	150 0	18
M19	1.0	15	127 5	22 5	150 0	-	M40	1.0	30	105 0	45 0	150 0	27
M20	1.0	15	127 5	22 5	150 0	9	M41	1.0	30	105 0	45 0	150 0	36
M21	1.0	15	127 5	22 5	150 0	18	M42	1.0	30	105 0	45 0	150 0	45

Nano partiküllerin sıvıların içinde çökelme olmadan suda asılı kalması durumu partiküllerin su içerisinde homojen bir dağılımı ile gerçekleşir. Nano partiküllerin suda çökelmemesi ve birbirine yapışık halde olan nano partiküllerin birbirinden ayrılması suda asılı kalarak suyun içerisinde homojen bir dağılımın gerçekleşmesiyle mümkün olmaktadır. Harç karışımları hazırlanmadan önce Nano partiküllerin su içerisinde üniform dağılımını sağlamak için nano partiküler malzemeler hassas terazide tartılarak hazırlanır. Sonra bu nano malzemeler damıtılmış su içinde süspense edilir. Bu malzemelerin distile suda homojen dağılımını sağlamak için en az 180 dakika Ultrasonikatör de işleme tabi tutulacaktır. Bu işlem nano partiküllerin harç karışımı içerisinde homojen dağılarak, deneyler için hassas değerlendirmeye olanak sağlayacaktır. Bu kapsamda proje bütçesi kullanılarak alınmış ve kullanılmış Ultrasonikatöre ait görsel Fotoğraf 3.2'de görülmektedir.,



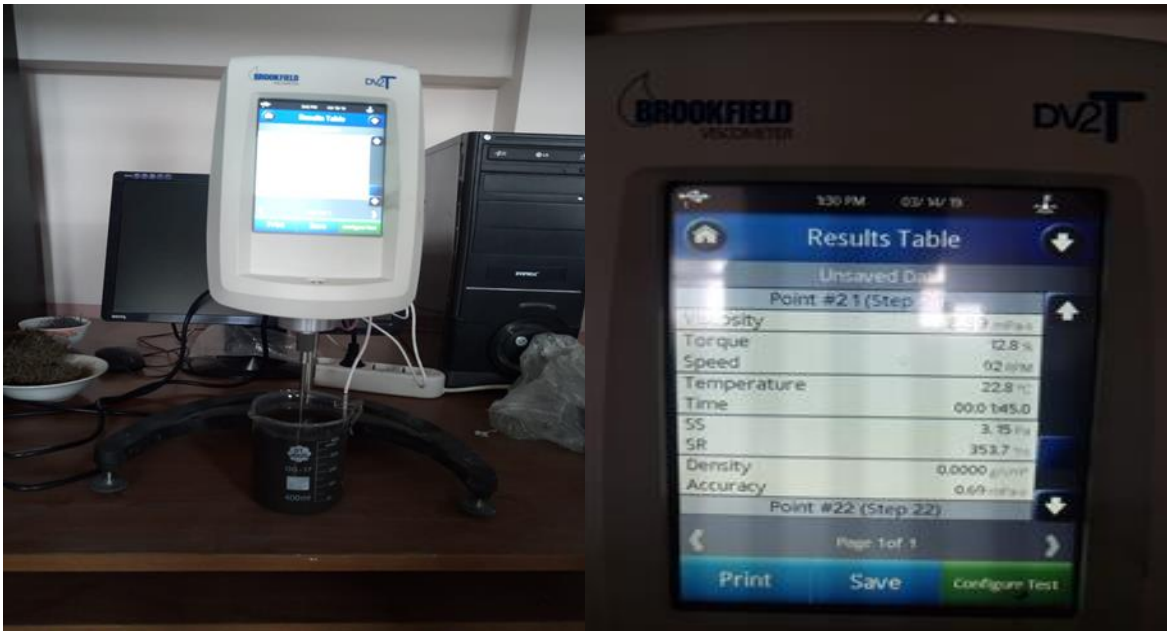
Fotoğraf 3.2. Deneysel çalışmada kullanılmış ultrasonikatöre ait görsel

Tüm deneysel çalışmada, harç karışımları hazırlamak için benzer karıştırma metodolojisi uygulanmıştır. Karışım numunelerini elde edebilmek için 5 litre hacme sahip standart rotari laboratuvar tipi çırpıcı kullanılmıştır. Tüm karışım numuneleri için uygulanan standart numune karıştırma yöntemi sırasıyla aşağıda verildiği gibidir.

- Uçucu kül ve çimentodan oluşan bağlayıcı malzeme öncelikli olarak 1 dakika süreyle su ile sabit hızda karıştırılmıştır.
- Daha sonra çırpıcı ile karıştırma işlemi durdurularak ve daha homojen bir karışım sağlamak amacıyla tekrar 1 dakika el ile manuel olarak karıştırmaya devam edilmiştir.
- Devamında bağlayıcı malzeme bulunan karışım 3 dakika süreyle çırpıcıda sabit hızda karıştırılmıştır
- En son aşamada, 200 ml distile suda homojen dağılımını sağlamak için en az 180 dakika Ultrasonikatör ile karıştırılmış nano partiküler malzeme (NPM), mineral katkıli harç karışımının içerisine dökülerek, çırpıcı yardımıyla 1 dakika süreyle sabit hızda karıştırılmıştır.

Tüm karışımların hazırlanması esnasında ve deneylerin yapılması sırasında ortam sıcaklığı 23 ± 3 °C derecede ve ortam nem oranı ise %55-%65 aralığında sabit tutulmuş

ve ortam sıcaklık-nem ölçerle kontrol edilmiştir. Harç karışımları hazırlanır hazırlanmaz reoloji deneyleri Tek Eksenli Dönen Silindirik Reometre (Brookfield Viskometre DV2T deney aleti) yardımıyla yapılmıştır (bkz. Fotoğraf 3.3). Reoloji deneyleri kapsamında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarlarında mevcut olan Reometre deney aleti kullanılmıştır. Ayrıca aynı karışımlar üzerinde akışkanlık ve işlenebilirlik deneyleri kapsamında; Marsh Hunisi Akma deneyleri, Mini Slamp Yayılma deneyleri ve Plaka Kohezyon Yapışma deneyleri yapılmıştır. Tüm bu deneylere ek olarak harç karışımların stabilite özelliklerini belirlemek amacıyla Bleeding (Çökme) deneyleri de yapılmıştır.



(a)

(b)

Fotoğraf 3.3. Tek eksenli dönen silindirik reometre (a) ve brookfield'in ekranı (b)

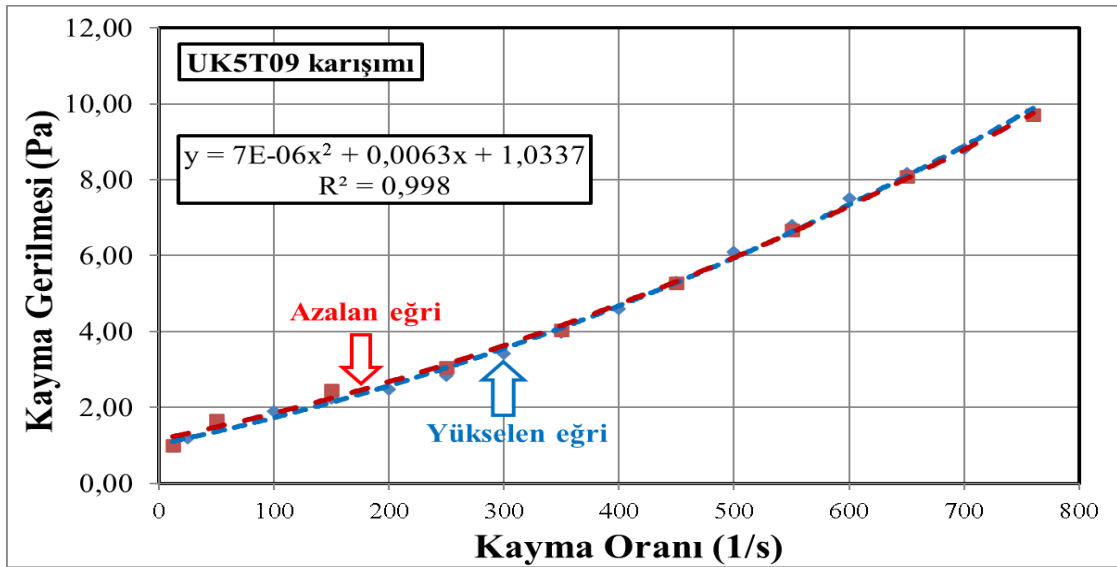
3.2.1 Reoloji deneyleri ve değerlendirmeleri

Reometre yardımıyla enjeksiyon harcının reolojik özellikleri olarak plastik viskozite, akma gerilmesi ve görünür viskozite değerleri elde edilmiştir. Reoloji deneyi kapsamında kayma oranı olarak 12 s^{-1} - 760 s^{-1} aralığı kullanılmıştır. Bu aralığın geniş olması yüksek kayma hızlarında da ölçüm yapabilmeye olanak tanımıştır. Enjeksiyon harcının reolojik özelliklerinin belirlenmesi ve tanımlanması amacıyla çeşitli analitik modeller literatürde kullanılmaktadır. Reolojik özelliklerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan analitik modellerden biri de Bingham Model'dir (Yahia ve Khayat,

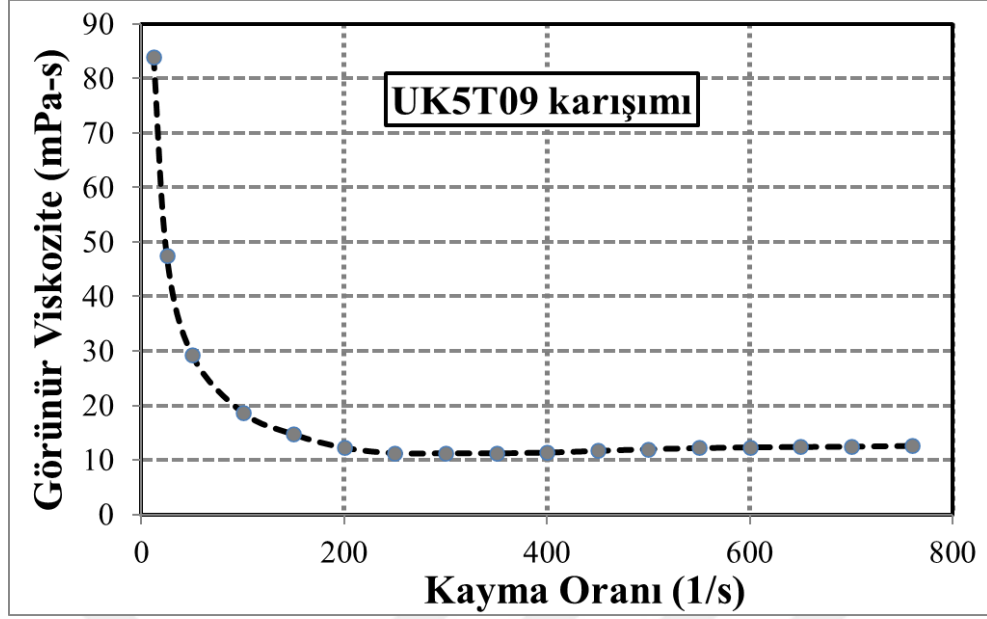
2001). Plastik viskozite (μ_p) ve akma gerilmesi (τ_0) değerleri kayma gerilmesi-kayma oranı grafiğinden elde edilir. Eğer bu eğride kabaran kayma gerilmesi (shear thickening) davranış gözlemlenirse, akma gerilmesi değerinin belirlenmesinde çok doğru sonuçlar elde edilemeyebilir. Bu sebepten, böyle durumlarda Modifiye Bingham Model kullanılarak plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri belirlenebilir. Mevcut tezimiz kapsamında kullandığımız s/b=1.0 oranı değerinin yüksek olması sebebiyle, ön deneysel çalışmamızda da belirlendiği üzere kabaran kayma gerilmeleri (shear thickening) gözlemlenecektir. Bu çalışma için test edilen tüm harç örneklerinde dilatant (akma kalınlaşması) davranışı gözlemlendiğinden, çimento bazlı harçların plastik viskozitesini ve akma gerilimini belirlemek için Modifiye Bingham modeli kullanılmıştır. Modifiye Bingham Model ikinci derece bir polinom denklemdir ve aşağıdaki eşitlikte (3.1) denkleminde verildiği gibi ifade edilir (Yahia ve Khayat, 2001).

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2 \quad (3.1)$$

Burada; τ = Kayma gerilmesi (Pa), τ_0 = Akma gerilmesi (Pa), μ_p = Plastik viskozite (Pa.s) ve $\dot{\gamma}$ = Kayma oranı (1/sn)'dir. Modifiye Bingham Model kabaran kayma davranışı gösteren harçlar için geleneksel bir analitik yöntem olan Bingham Model'e göre daha doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmektedir (Khayat ve Yahia, 1997; Celik ve Canakci, 2015; Celik, 2019).



Şekil 3.2. Kayma gerilmesi- kayma hızı ilişkisine dayalı artan ve azalan eğriler



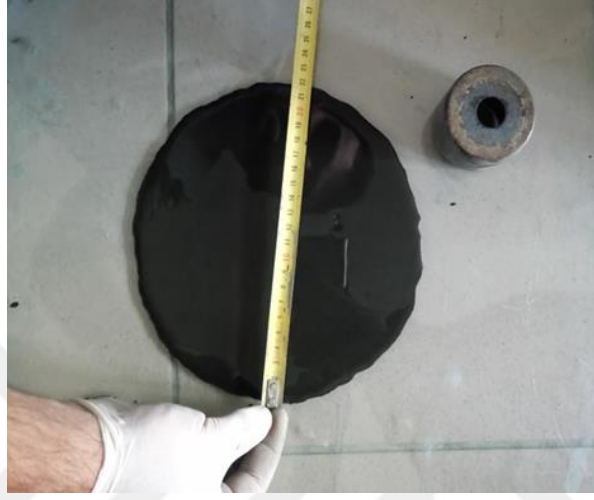
Şekil 3.3. Görünür viskozite- kayma oranı eğri ilişkisi

Bu çalışmadaki görünür viskozite-kayma oranı eğrileri esas alınarak, hazırlanan mineral katkılı ve nano malzeme katkılı çimento esaslı harçların reolojik akışkan davranışları, akma kalınlaşması davranışı olarak gözlenmiştir (bkz. Şekil 3.2 - Şekil 3.3). Şekil 3.2'deki UK5T09 karışımına göre kayma gerilme-kayma hızı ilişkilerine dayanan artan ve azalan eğriler görülmüş ve bu eğriler numunenin akma kalınlaşması davranışını göstermektedir. Diğer karışımlar için de benzer akış davranışları gözlemlenmiştir ve ileriki bölümlerde tüm detaylarıyla tartışılmıştır.

3.2.2 Akışkanlık, işlenebilirlik ve stabilite deneyleri

Yukarıda da bahsedilmiş olan bu deneyler çimento esaslı harçların akışkanlık ve işlenebilirlik özelliklerini tanımlamak için özellikle Reometre'nin kullanılmadığı saha uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu deneylerden Mini Slamp Yayılma deneyi, konik şekilli bir kalıbın içerisine harç konulması ve koninin kaldırılması suretiyle, bu harcın bir plaka üzerinde yayılmasını amaçlamaktadır (bkz. Fotoğraf 3.4). Dairesel olarak yayılmış harcın çapı ölçülür ve bu çap yayılma çapı olarak tanımlanır (Celik and Canakci, 2015). Bu deneyde kullanılacak konik şekilli kalıbın boyutları olarak taban çapı, tepe çapı ve yükseklik değerleri sırasıyla 19, 57 ve 38 mm'dir (Kantro, 1980). Marsh hunisi akma süresi belirlenmesinde kullanılacak huninin boyutları; uç iç çapı 5 mm ve 1500 ml hacim kapasitesine sahip bir huni olarak belirlenmiştir (Ozawa et al.,

1995). Bu deney esnasında alt ucu kapalıyken 1250 ml harç karışımıyla doldurulacak ve alt uç deliği açıldıktan sonraki 1000 ml harcın akma süresi belirlenecektir (bkz. Fotoğraf 3.5). Geçen süre marsh hunisi akma süresi olarak tanımlanacaktır. Kontrol ve karşılaştırma amacıyla bu deney su ile yapılmış ve suyun akma süresi 24 saniye olarak belirlenmiştir.



Fotoğraf 3.4. Mini slump yayılma deneyi



(a)



(b)

Fotoğraf 3.5. Mars hunisi akma deneyi (a) ve deneyde kullanılan marsh hunisi (b)

Malzemenin kohezyonu Lombardi tarafından geliştirilen plaka kohezyon metre yardımıyla hesaplanmıştır. Bu deneyin şu an için herhangi bir uluslararası standardı yoktur fakat yapılmış birçok çalışmayla plaka kohezyon metre aletinin boyutları belirlenmiştir (Weaver, 1991). Kullanılacak plaka kohezyon metrenin boyutları 100x100x3 mm olarak belirlenmiştir (bkz. Fotoğraf 3.6). Plakanın her iki yüzeyi sürtünmesiz bir yüzey olarak tanımlanır. Plaka, hazırlanmış harç karışımlarının içerisine daldırılarak ve plakaya yapışan harç miktarı belirlenerek, yapışan malzemenin miktarı yapışma yüzey alanından yapışma kalınlığı cinsinden “mm” olarak hesaplanır.



(a)

(b)

Fotoğraf 3.6. Deneyde kullanılan plaka kohezyon deney aleti öncesi (a) ve sonrası (b)

Harç karışımların stabilite özelliklerini tanımlamak maksadıyla bleeding (çökme) deneyleri yapılmıştır. 1000 ml hacme ve 60 mm çapa sahip silindirik bir dereceli kaba aktarılan harç karışımların, 2 saat süre içerisinde çökme miktarları belirlenmiştir (bkz. Fotoğraf 3.7). Çökelen hacmin toplam hacme oranı bleeding oranı olarak tanımlanır (Deere, 1982). Harç karışımının stabil olarak tanımlanabilmesi için bu oranın %10 değerinin altında olması istenir. Bu oranın yüksek olması, harç karışımların yüksek hızlarda enjeksiyonu esnasında, süspanse haldeki partiküllerin topaklanmasına ve bunun sonucu olarak yüksek kayma hızlarında dahi düşük akışkanlıklar elde edilmesine

sebebiyet verecektir. Bu sebeple yüksek bleeding değerleri iyi bir akışkanlık için istenmeyen bir durumdur ve harç karışımların reolojisini doğrudan etkileyen bir parametredir.



(a)

(b)

Fotoğraf 3.7. Bleeding (çökeltme) deneyi deney başı (a) ve deney sonu (b)

3.2.3 Permeasyon enjeksiyonu tasarımı için kullanılan analitik akış modelleri

Çimento esaslı harç için permeasyon enjeksiyon akışı basit analitik modeller kullanılarak tanımlanabilir. Bu nedenle, literatürde Raffle ve Greenwood tarafından sunulan çok basit iki matematiksel akış modeli vardır (Raffle ve Greenwood, 1961). Bu modeller, küresel ve radyal akış modelleri prensibine dayanmaktadır (bkz. Şekil 2.8 - Şekil 2.9). Tüm permeasyon harç parametreleri bu modeller kullanılarak tahmin edilebilir. Bu nedenle, mineral bazlı bir katkı maddesi olarak UK ve 4 farklı NPM

kullanımının çimento esaslı permeasyon enjeksiyon yöntemi üzerindeki reolojik ve işlenebilirlik etkilerini araştırmak için bu çalışmada iki model kullanılmıştır. Bu modellere dayanarak, (3.2), (3.3), (3.3) ve (3.4) denklemlerinde görülen matematiksel denklemler türetilmiş (Raffle ve Greenwood, 1961) ve aşağıdaki şekilde sunulmuştur:

$$P_e = \frac{Q\gamma}{Ck_G} = \frac{Q\gamma\mu}{Ck\mu_w} \quad (\text{Küresel akış modeli için net basınç}) \quad (3.2)$$

$$t = \frac{4\pi n}{3Q} (R^3 - R_o^3) \quad (\text{Küresel akış modeli için akış süresi}) \quad (3.3)$$

$$P_e = \frac{Q\gamma\mu}{2\pi mk\mu_w} \ln\left(\frac{R}{R_o}\right) \quad (\text{Radyal akış modeli için net basınç}) \quad (3.4)$$

$$t = \frac{\pi mn}{Q} (R^2 - R_o^2) \quad (\text{Radyal akış modeli için akış süresi}) \quad (3.5)$$

Burada;

P_e = net enjeksiyon basıncı (kPa), Q = enjeksiyon akış hızı (m^3/sn), γ = harç birim hacim ağırlığı (kN/m^3), $C= 4\pi R_o$ (şekil katsayısı), k_G = zeminin geçirgenlik katsayısı (m/sn), k = zeminin su geçirgenlik katsayısı (m/sn), μ = harcın plastik viskozitesi (Pa.sn), μ_w = suyun viskozitesi (0,0015 Pa.s 20 °C), t = enjeksiyon süresi (sn), n = zemin gözenekliliği, m = enjeksiyon edilen zemin tabaka kalınlığı (m), R = enjeksiyon noktasından uzaklık (m), R_o = enjeksiyon boru yarıçapı (m).

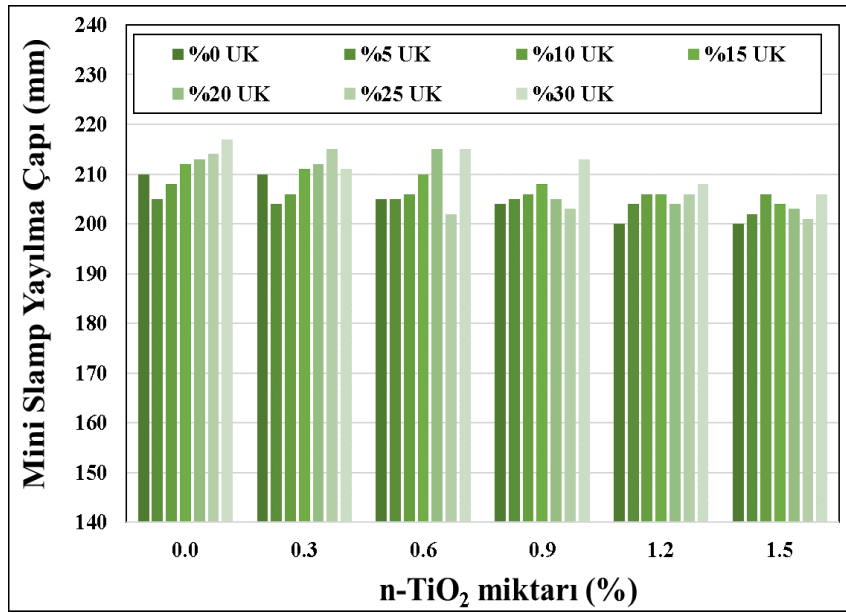
BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Harç karışımlarının akışkanlık (İşlenebilirlik) özellikleri

4.1.1 Nano titanyum oksit (n-TiO₂) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler

Bu çalışmada hazırlanan Nano Titanyum oksit (n-TiO₂) ve UK Katkılı harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri olarak Marsh hunisi akış süresi, mini çökme yayılma çapı ve Lombardi plaka kohezyon ölçüm cihazı ile test edilmiş ve sonuçları Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, karışımlardaki UK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.1). Uçucu külün mineral katkı olarak kullanılmasının beklenildiği şekilde akışkanlığın artması yönünde pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan genel bir trend olarak n-TiO₂ miktarındaki artışın mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır. Bu davranış Şekil 4.1'de ve Şekil 4.3'te açık bir şekilde görülmektedir.



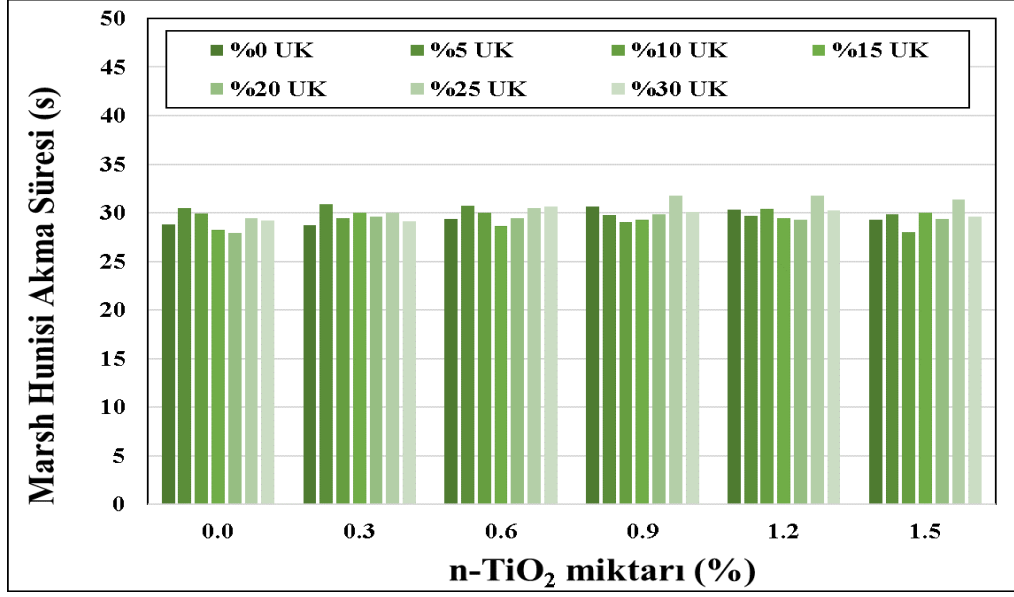
Şekil 4.1. Mini slamp yayılma çapı-n-TiO₂ miktarı ilişkisi

Ayrıca, bu çalışmada hazırlanan çimento esaslı harç karışımlarının bir başka işlenebilirlik özelliği olan marsh hunisi akış süreleri gözlemlenmiştir. Mini slamp yayılma çapı deneyinde olduğu gibi UK katkısının beklenen davranış olarak akışkanlığı artırdığı, bu davranışın marsh hunisi akma sürelerinde azalma olarak davranış gösterdiği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.2). n-TiO₂ miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini artırdığı, bunun sebebinin de kohezyon değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.3'ten de açıkça görüldüğü üzere, mini slamp yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak bir birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir.

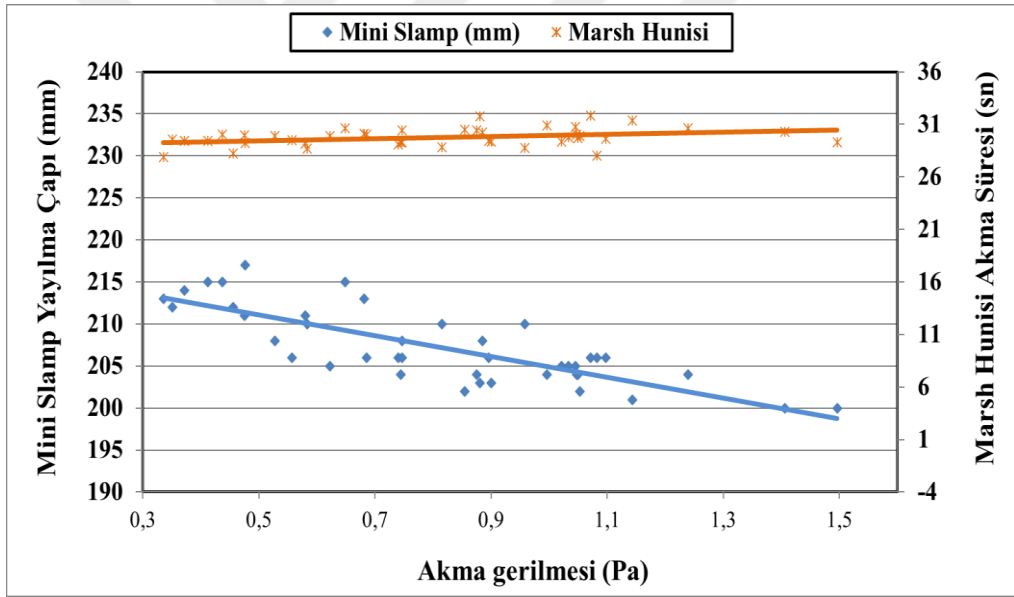
Çizelge 4.1. n-TiO₂ ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri

Karışım Adı	s/b	PÇ (g.)	U.K (g.)	Su (g.)	TiO ₂ (gr.)	Yoğunluk (g/cm ³)	D _{yayılım} (mm)	T _{akış} (s)	T _{kohezyon} (mm)
UK0T00	1.00	751	0	751	0	1,518	210	28,84	0,049
UK 0T03	1.00	751	0	751	5	1,518	210	28,76	0,054
UK 0T06	1.00	751	0	751	9	1,518	205	29,35	0,051
UK 0T09	1.00	751	0	751	14	1,518	204	30,61	0,056
UK 0T12	1.00	751	0	751	18	1,518	200	30,3	0,054
UK 0T15	1.00	751	0	751	23	1,518	200	29,32	0,051
UK 5T00	1.00	711	37	748	0	1,512	195	30,45	0,054
UK 5T03	1.00	711	37	748	4	1,512	204	30,86	0,052
UK 5T06	1.00	711	37	748	9	1,512	205	30,74	0,054
UK 5T09	1.00	711	37	748	13	1,512	205	28,77	0,052
UK 5T12	1.00	711	37	748	18	1,512	204	29,66	0,051
UK 5T15	1.00	711	37	748	22	1,512	202	29,87	0,054
UK 10T00	1.00	670	74	745	0	1,505	208	29,91	0,047
UK 10T03	1.00	670	74	745	4	1,505	206	29,46	0,058
UK 10T06	1.00	670	74	745	9	1,505	206	30,03	0,063
UK 10T09	1.00	670	74	745	13	1,505	206	29,07	0,057
UK 10T12	1.00	670	74	745	18	1,505	206	30,44	0,059
UK 10T15	1.00	670	74	745	22	1,505	206	28,02	0,064
UK 15T00	1.00	630	111	742	0	1,499	212	28,24	0,051
UK 15T03	1.00	630	111	742	4	1,499	211	29,99	0,047
UK 15T06	1.00	630	111	742	9	1,499	210	28,66	0,055
UK 15T09	1.00	630	111	742	13	1,499	208	29,28	0,059
UK 15T12	1.00	630	111	742	18	1,499	206	29,44	0,060
UK 15T15	1.00	630	111	742	22	1,499	204	30,03	0,061
UK 20T00	1.00	591	148	738	0	1,493	213	27,91	0,048
UK 20T03	1.00	591	148	738	4	1,493	212	29,59	0,055
UK 20T06	1.00	591	148	738	9	1,493	215	29,42	0,048
UK 20T09	1.00	591	148	738	13	1,493	205	29,86	0,062
UK 20T12	1.00	591	148	738	18	1,493	204	29,29	0,070
UK 20T15	1.00	591	148	738	22	1,493	203	29,33	0,061
UK 25T00	1.00	551	184	735	0	1,486	214	29,43	0,058
UK 25T03	1.00	551	184	735	4	1,486	215	30,03	0,049
UK 25T06	1.00	551	184	735	9	1,486	202	28,46	0,070
UK 25T09	1.00	551	184	735	13	1,486	203	27,75	0,070
UK 25T12	1.00	551	184	735	18	1,486	206	31,8	0,070
UK 25T15	1.00	551	184	735	22	1,486	201	31,33	0,071
UK 30T00	1.00	512	220	732	0	1,480	217	29,21	0,050
UK 30T03	1.00	512	220	732	4	1,480	211	29,13	0,054
UK 30T06	1.00	512	220	732	9	1,480	215	30,61	0,056
UK 30T09	1.00	512	220	732	13	1,480	213	30,11	0,056
UK 30T12	1.00	512	220	732	18	1,480	208	30,23	0,055
UK 30T15	1.00	512	220	732	22	1,480	206	29,6	0,052

*Karışım adları içeriklerindeki n-TiO₂ ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15T06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında TiO₂ katkılı anlamına gelmektedir.



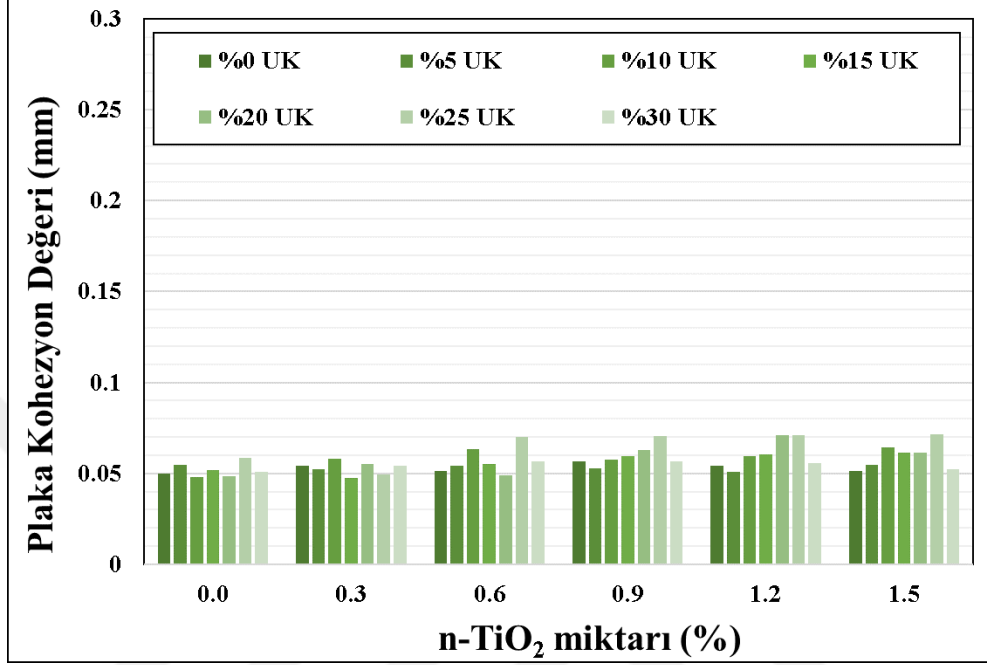
Şekil 4.2. Marsh hunisi akma süresi-n-TiO₂ miktarı ilişkisi



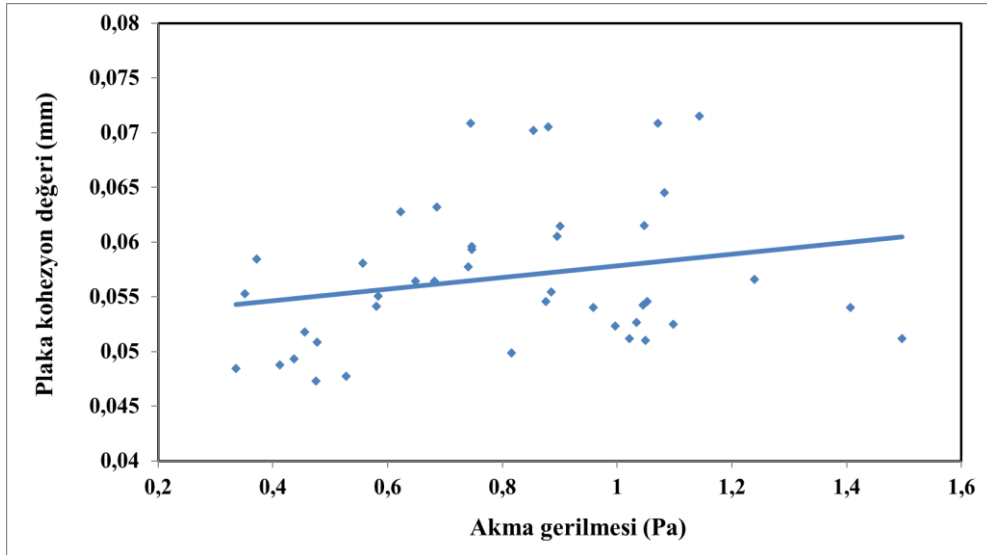
Şekil 4.3. n-TiO₂ katkılı karışımların için akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi

Şekil 4.4'de görüldüğü üzere karışımlara TiO₂ ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artışına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. %30 UK ikamesinde TiO₂ eklenmesine rağmen kohezyon değerlerinde azalma gözlemlenmiş olup, bu nano malzemenin kohezyonu artıran etkisi sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırma ilgili harç karışımlarının reolojik davranışlarında bir

iyileştirme olarak kabul edilebilir. Ayrıca Şekil 4.5’de görüldüğü üzere, karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında etkili bir korelasyona rastlanmamıştır.



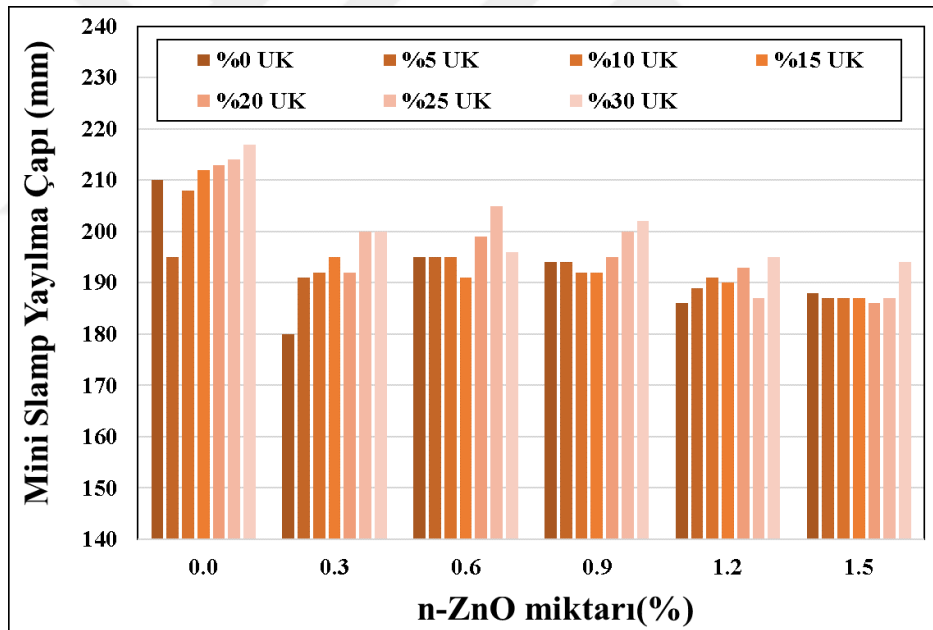
Şekil 4.4. Plaka kohezyon-n-TiO₂ katkı oranı ilişkisi



Şekil 4.5. n-TiO₂ katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi

4.1.2 Nano çinko oksit (n-ZnO) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler

Bu çalışmada hazırlanan Nano Çinko oksit (n-ZnO) ve UK Katkılı harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri olarak Marsh hunisi akış süresi, mini çökme yayılma çapı ve Lombardi plaka kohezyon ölçüm cihazı ile test edilmiş ve sonuçları Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, karışımlardaki UK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir (bkz Şekil 4.6). Uçucu külün mineral katkı olarak kullanılmasının beklenildiği şekilde akışkanlığın artması yönünde pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan genel bir trend olarak n-ZnO miktarındaki artışın mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır. Bu davranış Şekil 4.6'da ve Şekil 4.8'de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.6. Mini slamp yayılma çapı-n-ZnO miktarı ilişkisi

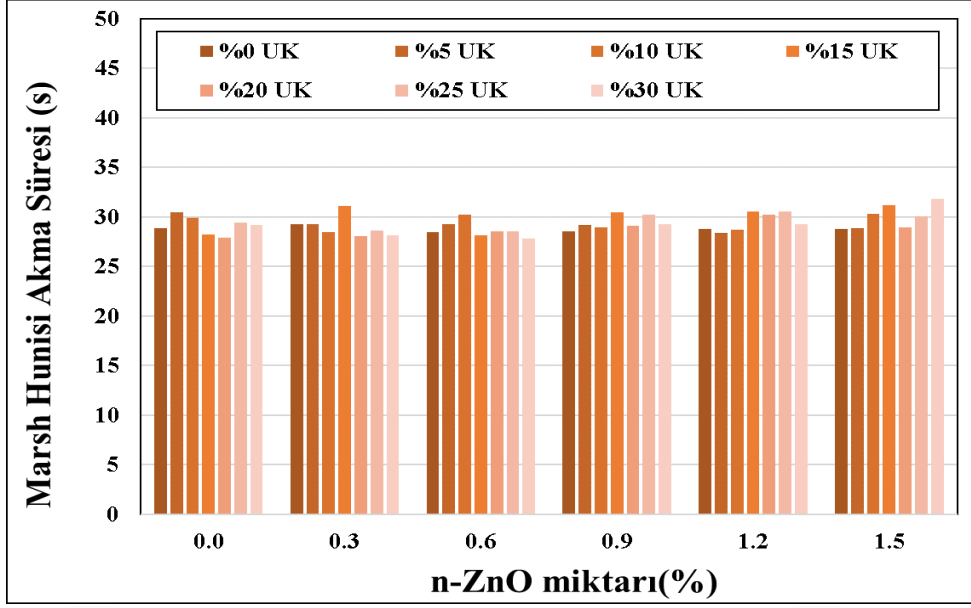
Ayrıca, bu çalışmada hazırlanan çimento esaslı harç karışımlarının bir başka işlenebilirlik özelliği olan marsh hunisi akış süreleri gözlemlenmiştir. Mini slamp yayılma çapı deneyinde olduğu gibi UK katkısının beklenen davranış olarak akışkanlığı artırdığı, bu davranışın marsh hunisi akma sürelerinde azalma olarak davranış gösterdiği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.7). n-ZnO miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini artırdığı, bunun sebebinin de kohezyon

değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.7'den de açıkça görüldüğü üzere, mini slamp yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak bir birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir.

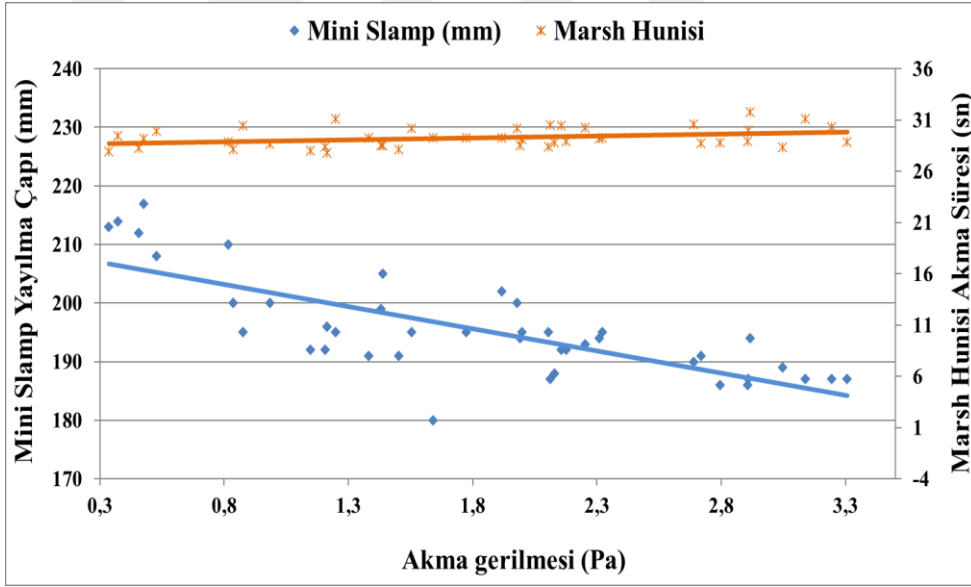
Çizelge 4.2. n-ZnO ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri

Karışım Adı	s/b	PÇ (g.)	U.K (g.)	Su (g.)	ZnO (g.)	Yoğunluk (g/cm ³)	Dyayılım [*] (mm)	Takış ^{**} (s)	Tkohezyon ^{***} (mm)
UK 0Z00	1.00	751	0	751	0	1,518	210	28,84	0,049
UK 0Z03	1.00	751	0	751	5	1,518	180	29,28	0,054
UK 0Z06	1.00	751	0	751	9	1,518	195	28,43	0,055
UK 0Z09	1.00	751	0	751	14	1,518	194	28,56	0,064
UK 0Z12	1.00	751	0	751	18	1,518	186	28,77	0,066
UK 0Z15	1.00	751	0	751	23	1,518	188	28,77	0,080
UK 5Z00	1.00	711	37	748	0	1,512	195	30,45	0,054
UK 5Z03	1.00	711	37	748	4	1,512	191	29,23	0,052
UK 5Z06	1.00	711	37	748	9	1,512	195	29,28	0,043
UK 5Z09	1.00	711	37	748	13	1,512	194	29,18	0,061
UK 5Z12	1.00	711	37	748	18	1,512	189	28,36	0,078
UK 5Z15	1.00	711	37	748	22	1,512	187	28,88	0,086
UK 10Z00	1.00	670	74	745	0	1,505	208	29,91	0,047
UK 10Z03	1.00	670	74	745	4	1,505	192	28,42	0,049
UK 10Z06	1.00	670	74	745	9	1,505	195	30,2	0,054
UK 10Z09	1.00	670	74	745	13	1,505	192	28,93	0,070
UK 10Z12	1.00	670	74	745	18	1,505	191	28,7	0,080
UK 10Z15	1.00	670	74	745	22	1,505	187	30,32	0,083
UK 15Z00	1.00	630	111	742	0	1,499	212	28,24	0,051
UK 15Z03	1.00	630	111	742	4	1,499	195	31,12	0,064
UK 15Z06	1.00	630	111	742	9	1,499	191	28,12	0,071
UK 15Z09	1.00	630	111	742	13	1,499	192	30,43	0,070
UK 15Z12	1.00	630	111	742	18	1,499	190	30,57	0,075
UK 15Z15	1.00	630	111	742	22	1,499	187	31,14	0,082
UK 20Z00	1.00	591	148	738	0	1,493	213	27,91	0,048
UK 20Z03	1.00	591	148	738	4	1,493	192	28,02	0,063
UK 20Z06	1.00	591	148	738	9	1,493	199	28,56	0,052
UK 20Z09	1.00	591	148	738	13	1,493	195	29,11	0,060
UK 20Z12	1.00	591	148	738	18	1,493	193	30,25	0,066
UK 20Z15	1.00	591	148	738	22	1,493	186	28,91	0,101
UK 25Z00	1.00	551	184	735	0	1,486	214	29,43	0,058
UK 25Z03	1.00	551	184	735	4	1,486	200	28,65	0,062
UK 25Z06	1.00	551	184	735	9	1,486	205	28,52	0,071
UK 25Z09	1.00	551	184	735	13	1,486	200	30,2	0,073
UK 25Z12	1.00	551	184	735	18	1,486	187	30,52	0,088
UK 25Z15	1.00	551	184	735	22	1,486	187	30,02	0,098
UK 30Z00	1.00	512	220	732	0	1,480	217	29,21	0,050
UK 30Z03	1.00	512	220	732	4	1,480	200	28,12	0,066
UK 30Z06	1.00	512	220	732	9	1,480	196	27,8	0,063
UK 30Z09	1.00	512	220	732	13	1,480	202	29,29	0,081
UK 30Z12	1.00	512	220	732	18	1,480	195	29,25	0,084
UK 30Z15	1.00	512	220	732	22	1,480	194	31,79	0,085

*Karışım adları içeriklerindeki n-ZnO ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15Z06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında n-ZnO katkılı anlamına gelmektedir.

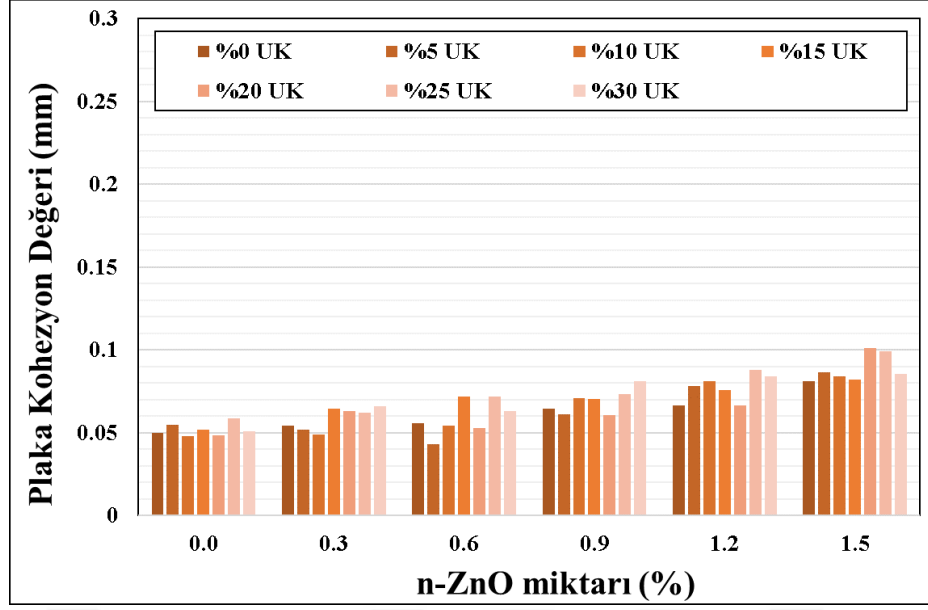


Şekil 4.7. Marsh hunisi akma süresi-n-ZnO miktarı ilişkisi

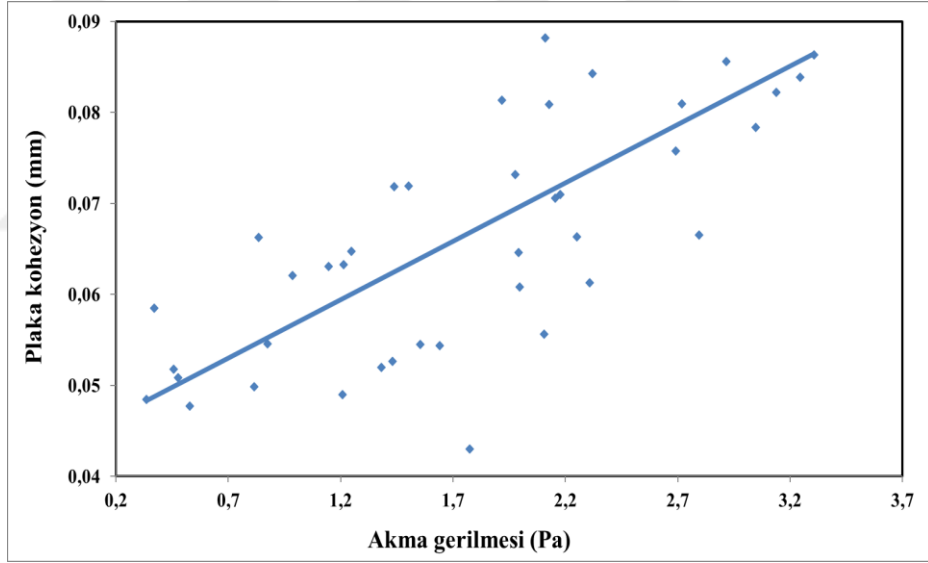


Şekil 4.8. n-ZnO katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi

Şekil 4.9'da görüldüğü üzere karışımlara n-ZnO ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artmasına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında etkili bir korelasyona rastlanmamıştır.



Şekil 4.9. Plaka kohezyon-n-ZnO katkı oranı ilişkisi

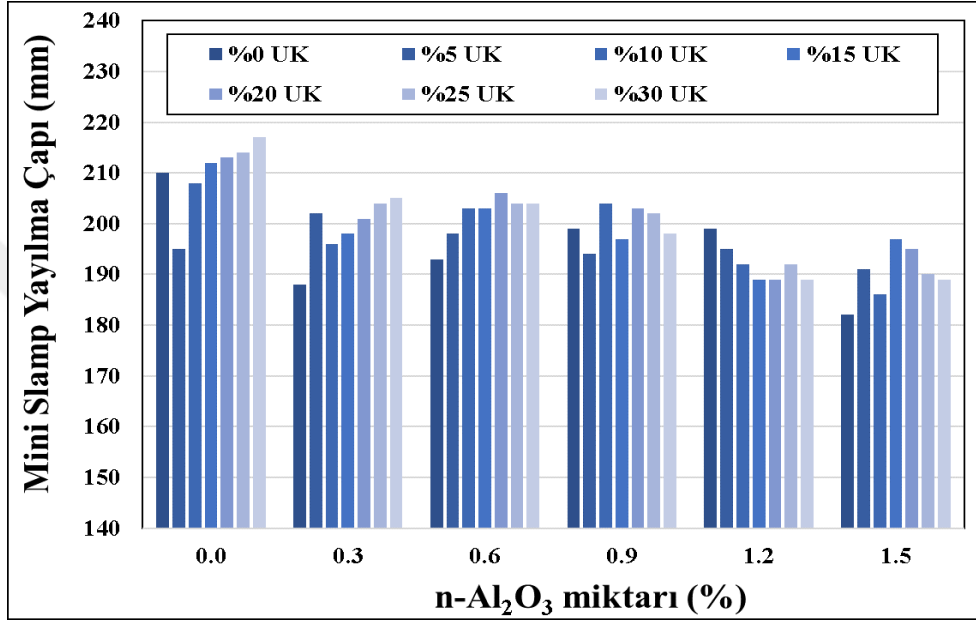


Şekil 4.10. n-ZnO katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi

4.1.3 Nano alümina (n-Al₂O₃) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler

Bu çalışmada hazırlanan Nano Alümina (n-Al₂O₃) ve UK katkılı harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri olarak Marsh hunisi akış süresi, mini çökme yayılma çapı ve Lombardi plaka kohezyon ölçüm cihazı ile test edilmiş ve sonuçları Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, karışımlardaki UK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.11). Uçucu külün

mineral katkı olarak kullanılmasının beklenildiği şekilde akışkanlığın artması yönünde pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan genel bir trend olarak $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ miktarındaki artışın mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır. Bu davranış Şekil 4.11’de ve Şekil 4.13’de açık bir şekilde görülmektedir.



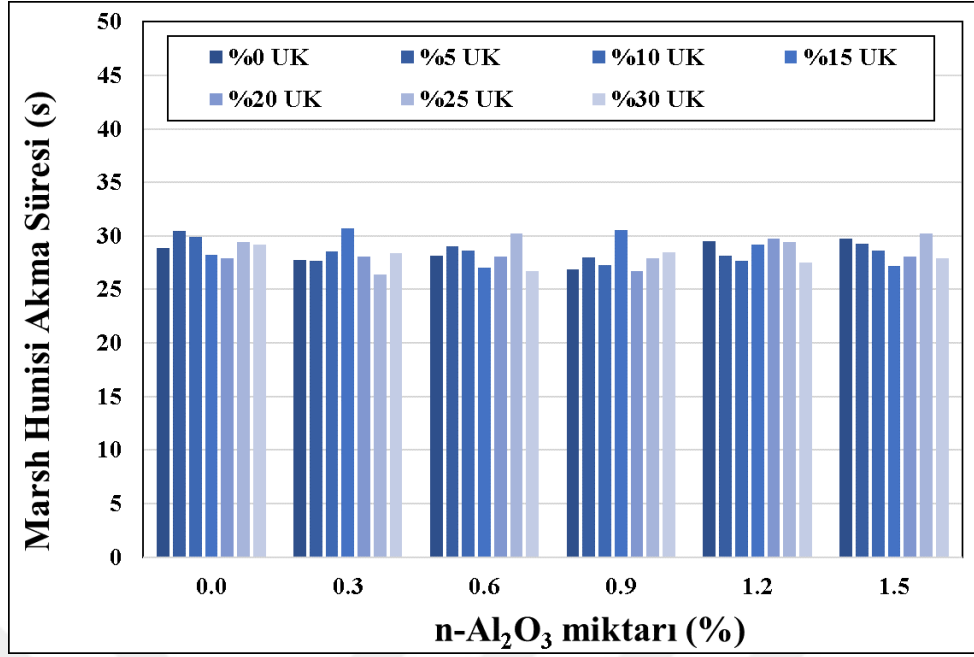
Şekil 4.11. Mini slamp yayılma çapı-n-Al₂O₃ miktarı ilişkisi

Ayrıca, bu çalışmada hazırlanan çimento esaslı harç karışımlarının bir başka işlenebilirlik özelliği olan marsh hunisi akış süreleri gözlemlenmiştir. Mini slamp yayılma çapı deneyinde olduğu gibi UK katkısının beklenen davranış olarak akışkanlığı artırdığı, bu davranışın marsh hunisi akma sürelerinde azalma olarak davranış gösterdiği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.12). $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini artırdığı, bunun sebebinin de kohezyon değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.12’den de açıkça görüldüğü üzere, mini slamp yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak bir birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir.

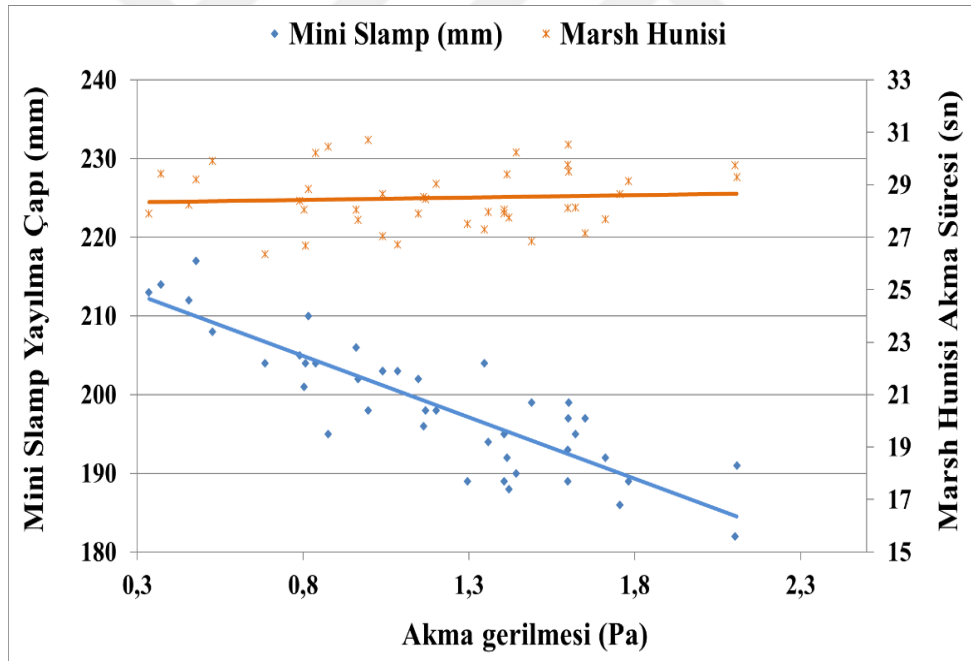
Çizelge 4.3. n-Al₂O₃ ve UK katkıli harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri

Karışım Adı	s/b	PÇ (g.)	U.K (g.)	Su (g.)	Al ₂ O ₃ (gr.)	Yoğunluk (g/cm ³)	D _{yayılım} (mm)	T _{takiş} (s)	T _{kohezyon} (mm)
UK 0A00	1.00	751	0	751	0	1,518	210	28,84	0,049
UK 0A03	1.00	751	0	751	5	1,518	188	27,74	0,053
UK 0A06	1.00	751	0	751	9	1,518	193	28,11	0,054
UK 0A09	1.00	751	0	751	14	1,518	199	26,84	0,053
UK 0A12	1.00	751	0	751	18	1,518	199	29,51	0,058
UK 0A15	1.00	751	0	751	23	1,518	182	29,75	0,061
UK 5A00	1.00	711	37	748	0	1,512	195	30,45	0,054
UK 5A03	1.00	711	37	748	4	1,512	202	27,67	0,048
UK 5A06	1.00	711	37	748	9	1,512	198	29,03	0,053
UK 5A09	1.00	711	37	748	13	1,512	194	27,97	0,055
UK 5A12	1.00	711	37	748	18	1,512	195	28,13	0,055
UK 5A15	1.00	711	37	748	22	1,512	191	29,29	0,057
UK 10A00	1.00	670	74	745	0	1,505	208	29,91	0,047
UK 10A03	1.00	670	74	745	4	1,505	196	28,55	0,049
UK 10A06	1.00	670	74	745	9	1,505	203	28,66	0,049
UK 10A09	1.00	670	74	745	13	1,505	204	27,3	0,050
UK 10A12	1.00	670	74	745	18	1,505	192	27,68	0,063
UK 10A15	1.00	670	74	745	22	1,505	186	28,65	0,058
UK 15A00	1.00	630	111	742	0	1,499	212	28,24	0,051
UK 15A03	1.00	630	111	742	4	1,499	198	30,7	0,045
UK 15A06	1.00	630	111	742	9	1,499	203	27,04	0,062
UK 15A09	1.00	630	111	742	13	1,499	197	30,53	0,057
UK 15A12	1.00	630	111	742	18	1,499	189	29,15	0,063
UK 15A15	1.00	630	111	742	22	1,499	197	27,16	0,063
UK 20A00	1.00	591	148	738	0	1,493	213	27,91	0,048
UK 20A03	1.00	591	148	738	4	1,493	201	28,06	0,051
UK 20A06	1.00	591	148	738	9	1,493	206	28,04	0,050
UK 20A09	1.00	591	148	738	13	1,493	203	26,73	0,053
UK 20A12	1.00	591	148	738	18	1,493	189	29,76	0,058
UK 20A15	1.00	591	148	738	22	1,493	195	28,04	0,067
UK 25A00	1.00	551	184	735	0	1,486	214	29,43	0,058
UK 25A03	1.00	551	184	735	4	1,486	204	26,35	0,052
UK 25A06	1.00	551	184	735	9	1,486	204	30,22	0,058
UK 25A09	1.00	551	184	735	13	1,486	202	27,89	0,052
UK 25A12	1.00	551	184	735	18	1,486	192	29,41	0,057
UK 25A15	1.00	551	184	735	22	1,486	190	30,23	0,066
UK 30A00	1.00	512	220	732	0	1,480	217	29,21	0,050
UK 30A03	1.00	512	220	732	4	1,480	205	28,39	0,055
UK 30A06	1.00	512	220	732	9	1,480	204	26,68	0,057
UK 30A09	1.00	512	220	732	13	1,480	198	28,46	0,060
UK 30A12	1.00	512	220	732	18	1,480	189	27,51	0,058
UK 30A15	1.00	512	220	732	22	1,480	189	27,92	0,073

*Karışım adları içeriklerindeki n-Al₂O₃ ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15A06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında n-Al₂O₃ katkıli anlamına gelmektedir.



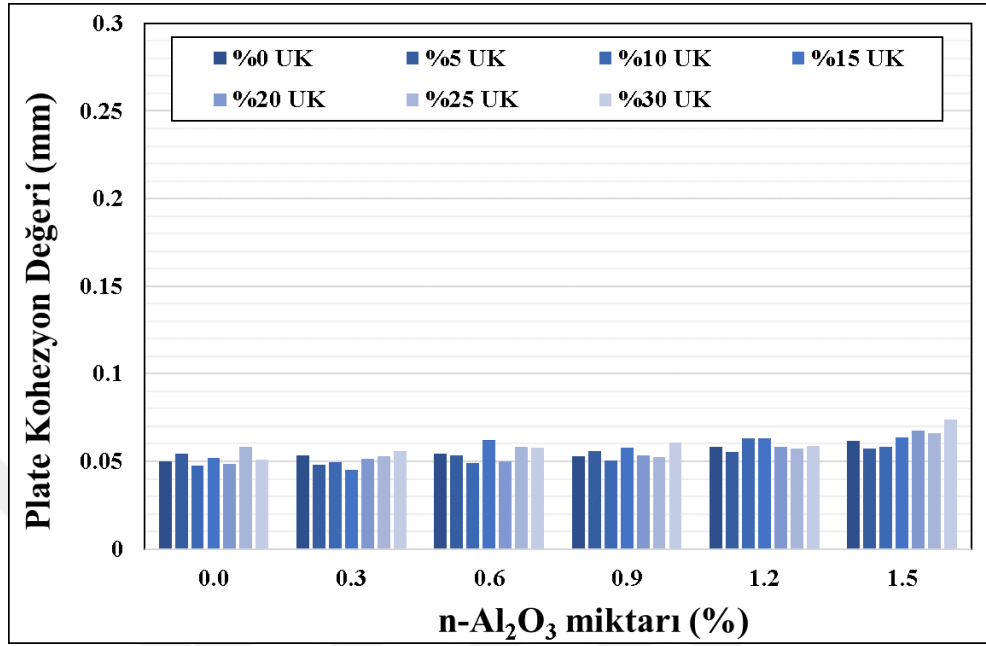
Şekil 4.12. Marsh hunisi akma süresi-n-Al₂O₃ miktarı ilişkisi



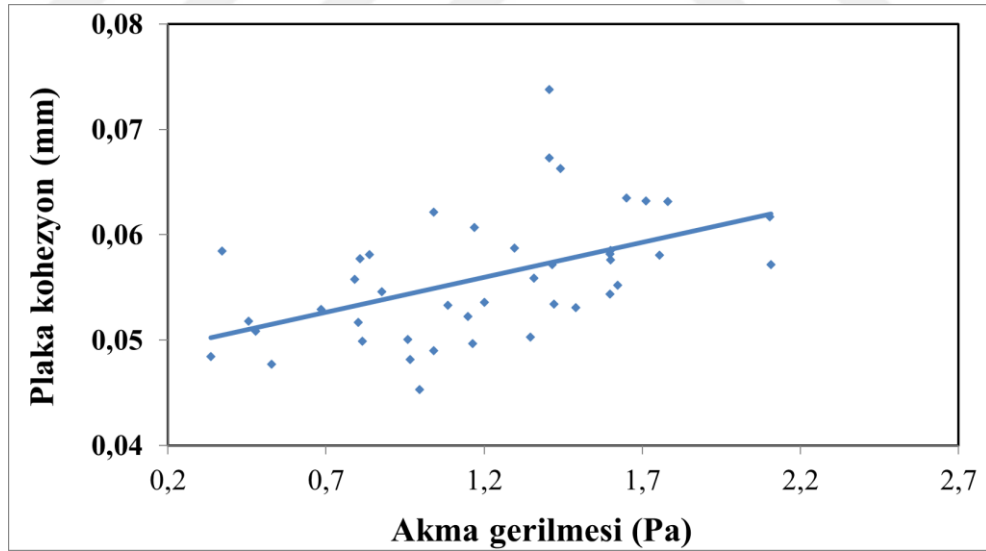
Şekil 4.13. n-Al₂O₃ katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere karışımlara n-Al₂O₃ ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artışına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, karışımların plaka

kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında etkili bir korelasyona rastlanmamıştır.



Şekil 4.14. Plaka kohezyon-n-Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

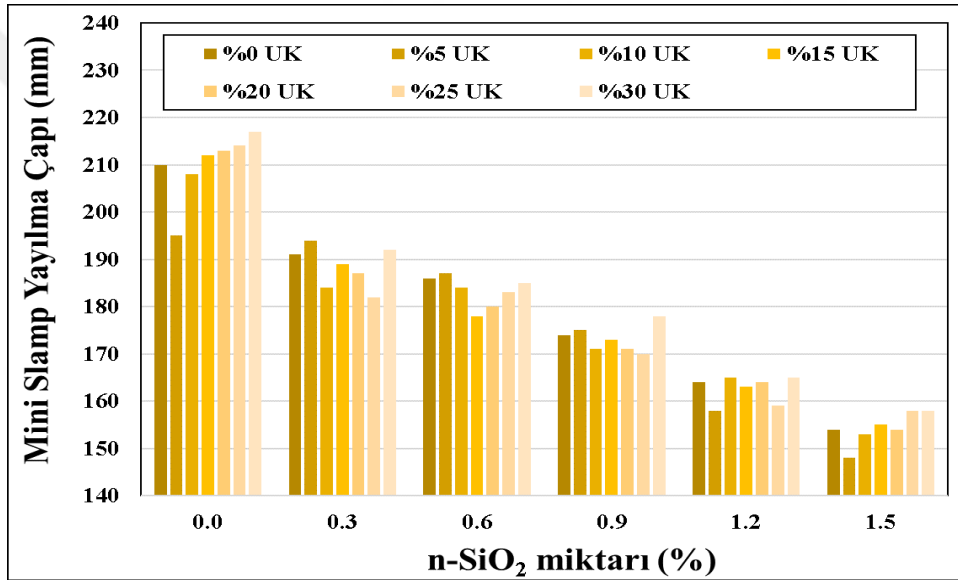


Şekil 4.15. n-Al₂O₃ katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi

4.1.4 Nano silika (n-SiO₂) katkılı karışımlar-işlenebilirlik özellikler

Bu çalışmada hazırlanan Nano Silika (n-SiO₂) ve UK katkılı harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri olarak Marsh hunisi akış süresi, mini çökme yayılma çapı ve

Lombardi plaka kohezyon ölçüm cihazı ile test edilmiş ve sonuçları Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, karışımlardaki UK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.16). Uçucu külün mineral katkı olarak kullanılmasının beklenildiği şekilde akışkanlığın artması yönünde pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan genel bir trend olarak tüm karışımlarda n-SiO₂ miktarındaki artışın doğrusal olarak mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır. Bu davranış Şekil 4.16'da ve Şekil 4.18'de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.16. Mini slamp yayılma çapı-n-SiO₂ miktarı ilişkisi

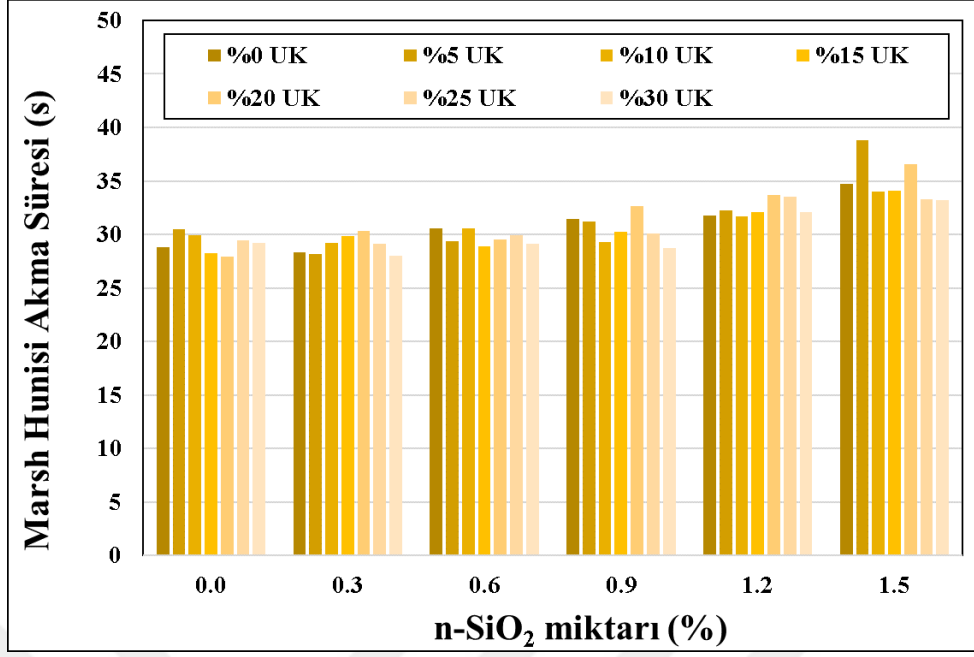
Ayrıca, bu çalışmada hazırlanan çimento esaslı harç karışımlarının bir başka işlenebilirlik özelliği olan marsh hunisi akış süreleri gözlemlenmiştir. Mini slamp yayılma çapı deneyinde olduğu gibi UK katkısının beklenen davranış olarak akışkanlığı artırdığı, bu davranışın marsh hunisi akma sürelerinde azalma olarak davranış gösterdiği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.17). n-SiO₂ miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini artırdığı, bunun sebebinin de kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.17'den de açıkça görüldüğü üzere, mini slamp yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak bir birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir. Şekil 4.18'de görüldüğü üzere,

akma gerilmesi ile hem marsh hunisi akma süresi hem de mini slamp yayılma çapı arasında etkili korelasyonların olduğu tespit edilmiştir. Akışkanlığın n-SiO₂ katkısına bağlı işlenebilirlik parametrelerinde akışkanlığın azalmasındaki sebep, akma gerilmesinin artması ve dolayısıyla akışkanlık parametrelerinin de bundan etkilenmesine olarak açıklanabilir. Özellikle akma gerilmesi ile mini slamp yayılma çapı arasındaki yüksek korelasyon ($R^2=0,9034$) mini slamp yayılma çapının akma gerilmesinden ne kadar etkilendiğini göstermektedir.

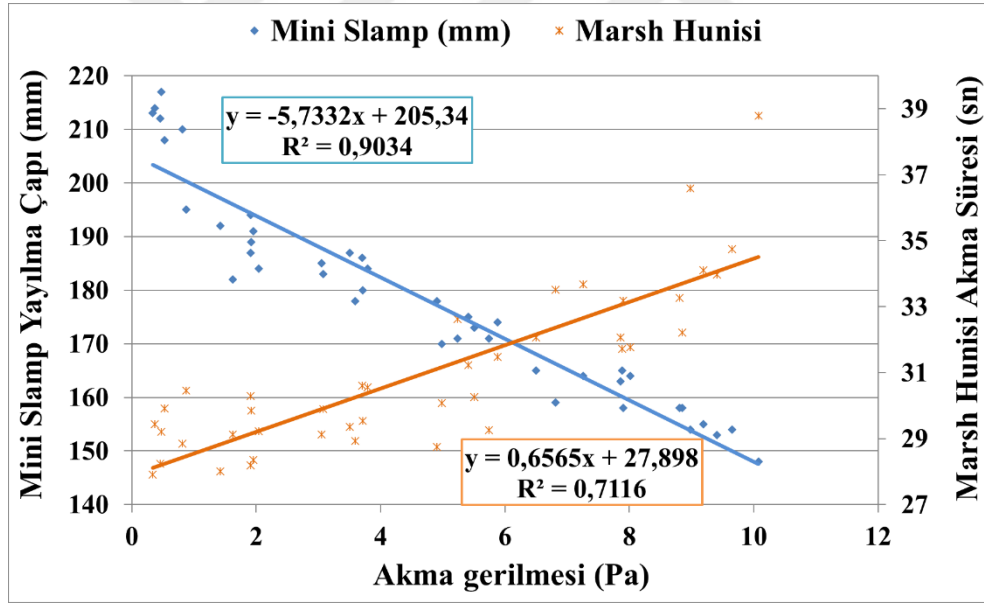
Çizelge 4.4. n-SiO₂ ve UK katkılı harçlara ait karışımların akışkanlık özellikleri

Karışım Adı	s/b	PÇ (g.)	U.K (g.)	Su (g.)	SiO ₂ (gr.)	Yoğunluk (g/cm ³)	D _{yayılım} (mm)	T _{akış} (s)	T _{kohezyon} (mm)
UK 0S00	1.00	751	0	751	0	1,518	210	28,84	0,049
UK 0S03	1.00	751	0	751	5	1,518	191	28,35	0,065
UK 0S06	1.00	751	0	751	9	1,518	186	30,6	0,089
UK 0S09	1.00	751	0	751	14	1,518	174	31,48	0,155
UK 0S12	1.00	751	0	751	18	1,518	164	31,77	0,223
UK 0S15	1.00	751	0	751	23	1,518	154	34,75	0,253
UK 5S00	1.00	711	37	748	0	1,512	195	30,45	0,054
UK 5S03	1.00	711	37	748	4	1,512	194	28,19	0,074
UK 5S06	1.00	711	37	748	9	1,512	187	29,36	0,110
UK 5S09	1.00	711	37	748	13	1,512	175	31,22	0,156
UK 5S12	1.00	711	37	748	18	1,512	158	32,21	0,240
UK 5S15	1.00	711	37	748	22	1,512	148	38,79	0,261
UK 10S00	1.00	670	74	745	0	1,505	208	29,91	0,047
UK 10S03	1.00	670	74	745	4	1,505	184	29,22	0,076
UK 10S06	1.00	670	74	745	9	1,505	184	30,56	0,095
UK 10S09	1.00	670	74	745	13	1,505	171	29,25	0,146
UK 10S12	1.00	670	74	745	18	1,505	165	31,72	0,196
UK 10S15	1.00	670	74	745	22	1,505	153	33,98	0,272
UK 15S00	1.00	630	111	742	0	1,499	212	28,24	0,051
UK 15S03	1.00	630	111	742	4	1,499	189	29,85	0,073
UK 15S06	1.00	630	111	742	9	1,499	178	28,92	0,088
UK 15S09	1.00	630	111	742	13	1,499	173	30,26	0,145
UK 15S12	1.00	630	111	742	18	1,499	163	32,07	0,205
UK 15S15	1.00	630	111	742	22	1,499	155	34,11	0,243
UK 20S00	1.00	591	148	738	0	1,493	213	27,91	0,048
UK 20S03	1.00	591	148	738	4	1,493	187	30,29	0,063
UK 20S06	1.00	591	148	738	9	1,493	180	29,53	0,101
UK 20S09	1.00	591	148	738	13	1,493	171	32,63	0,136
UK 20S12	1.00	591	148	738	18	1,493	164	33,68	0,184
UK 20S15	1.00	591	148	738	22	1,493	154	36,58	0,236
UK 25S00	1.00	551	184	735	0	1,486	214	29,43	0,058
UK 25S03	1.00	551	184	735	4	1,486	182	29,12	0,061
UK 25S06	1.00	551	184	735	9	1,486	183	29,9	0,097
UK 25S09	1.00	551	184	735	13	1,486	170	30,07	0,151
UK 25S12	1.00	551	184	735	18	1,486	159	33,51	0,179
UK 25S15	1.00	551	184	735	22	1,486	158	33,26	0,186
UK 30S00	1.00	512	220	732	0	1,480	217	29,21	0,051
UK 30S03	1.00	512	220	732	4	1,480	192	28	0,075
UK 30S06	1.00	512	220	732	9	1,480	185	29,13	0,099
UK 30S09	1.00	512	220	732	13	1,480	178	28,74	0,128
UK 30S12	1.00	512	220	732	18	1,480	165	32,07	0,172
UK 30S15	1.00	512	220	732	22	1,480	158	33,18	0,195

*Karışım adları içeriklerindeki n-SiO₂ ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15S06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında n-SiO₂ katkılı anlamına gelmektedir.



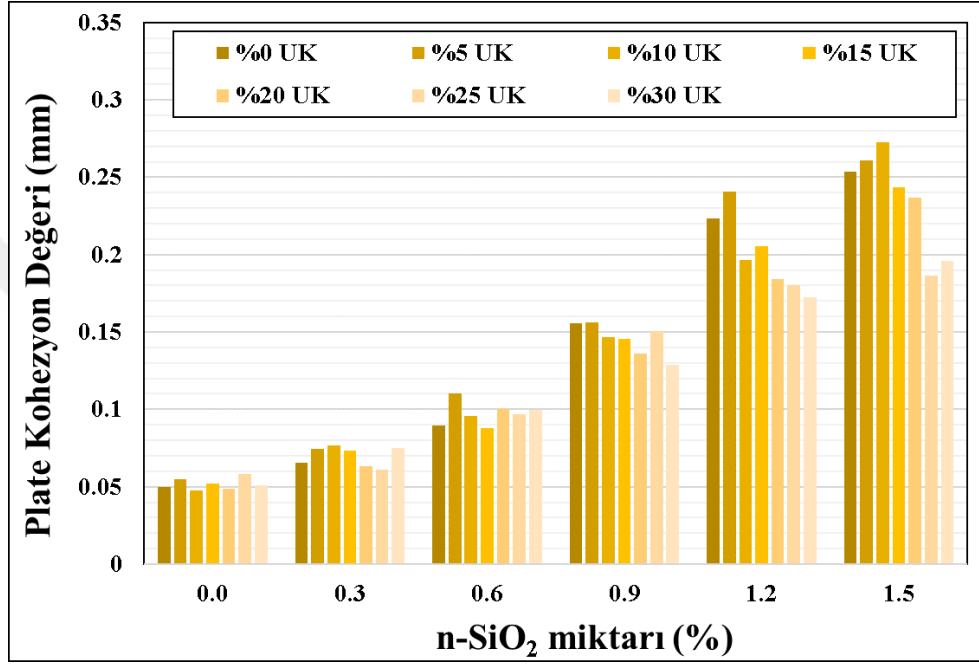
Şekil 4.17. Marsh hunisi akma süresi-n-SiO₂ miktarı ilişkisi



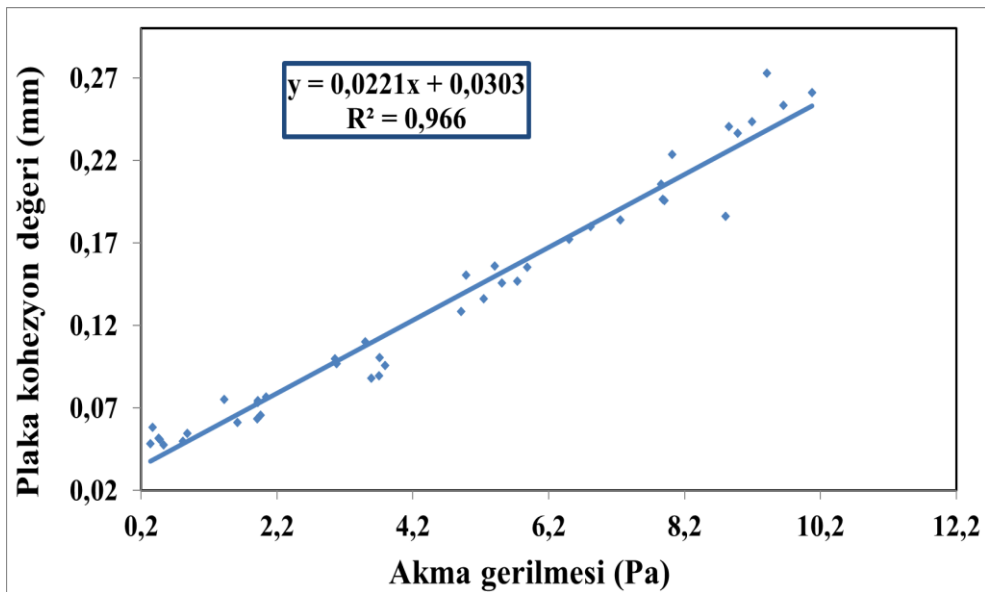
Şekil 4.18. n-SiO₂ katkılı karışımların akma süresi ve yayılma çapı-gerilme ilişkisi

Şekil 4.19'da görüldüğü üzere karışımlara n-SiO₂ ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artmasına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde yukarıda tartışıldığı gibi dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. UK miktarındaki artış beklenildiği üzere kohezyon değerlerini azaltmakta ve akışkanlığı artırmaktadır. Ayrıca Şekil 4.20'de

görüldüğü gibi, karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında dikkate değer etkili bir korelasyon vardır ($R^2=0,966$). Bu korelasyon, plaka kohezyon deneyi ile n-SiO₂ ve UK katkılı çimento esaslı harçların reolojik parametrelerinden olan akma gerilmesinin tahmin edilmesine katkı sağlayabilecektir. Ayrıca plaka kohezyon deneyinin çimento esaslı harç karışımların reolojik ve akışkanlık davranışları üzerinde ne kadar etkili olduğunu göstermesi açısından önem taşımaktadır.



Şekil 4.19. Plaka kohezyon-n-SiO₂ katkı oranı ilişkisi

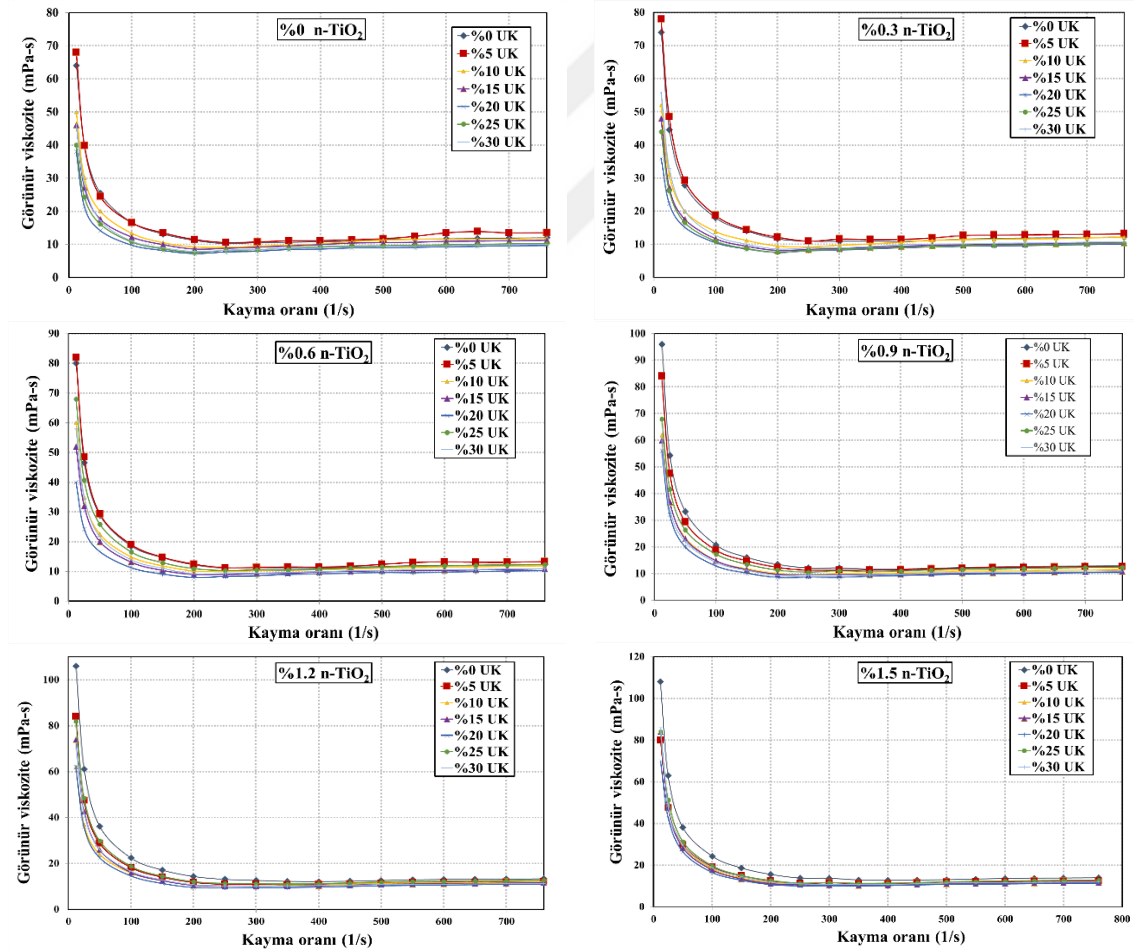


Şekil 4.20. n-SiO₂ katkı oranları için plaka kohezyon-akma gerilmesi ilişkisi

4.2 Harç Karışımlarının Reolojik Özellikleri

4.2.1 Nano titanyum oksit (n-TiO₂) katkıli karışımlar-reolojik Özellikler

Tez kapsamında, s/b=1.0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, % 0.3, % 0.6, % 0.9, % 1.2 ve % 1.5 oranlarında Nano Titanyum oksit (n-TiO₂) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde reoloji deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda plastik viskozite, görünür viskozite ve kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Reoloji deneyi kapsamında kayma oranı olarak 12 s⁻¹- 760 s⁻¹ aralığı kullanılmıştır (bkz. Şekil 4.21 - Şekil 4.22).

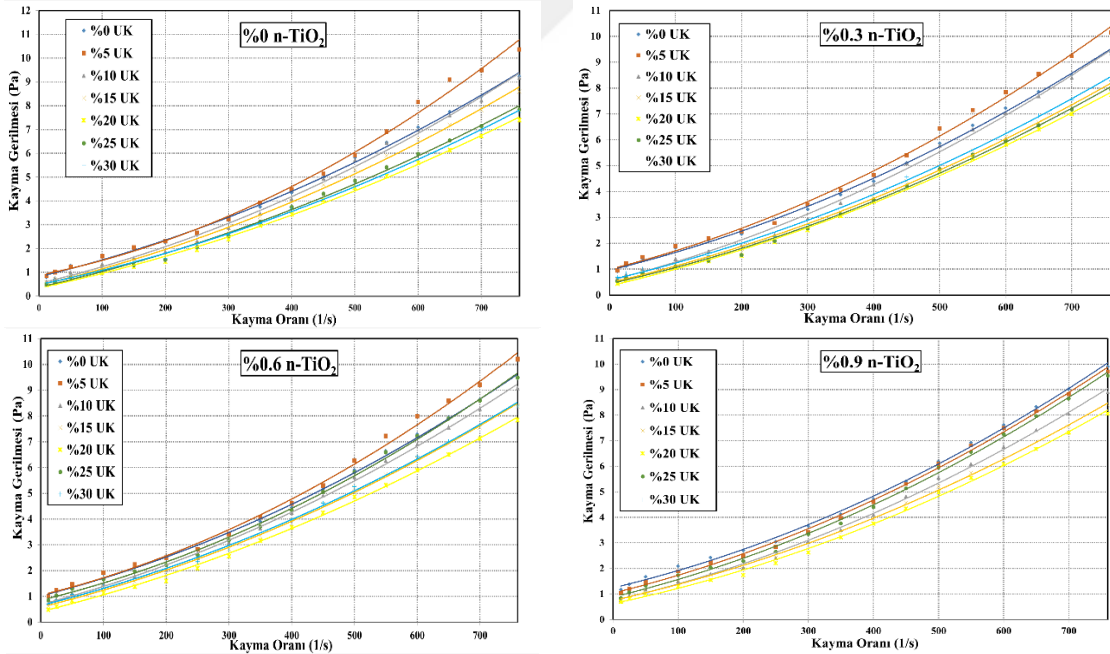


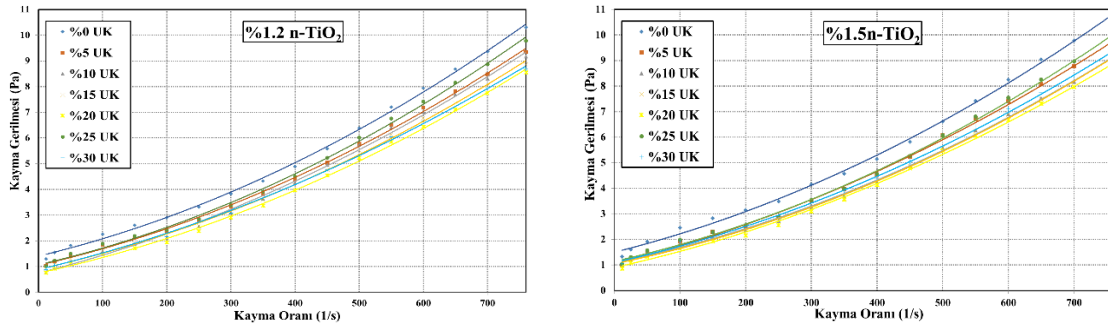
Şekil 4.21. n-TiO₂ katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi

Harç karışımlarıyla ilgili tüm karışım matrislerinde çeşitli kayma hızı eğrilerine karşı görünür viskozite değerleri, Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Şekil 4.21'e göre, tüm n-TiO₂ katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalmıştır. Bu akış davranışı beklenen bir durumdur. Çünkü harç karışımlarındaki UK miktarı arttıkça akışkanlık artar. Bununla birlikte, Şekil 4.21'de açıkça görüldüğü gibi, tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur. Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini göstermektedir. Bu durum ileriki bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır.

Şekil 4.22'de görüldüğü gibi kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenmiştir. Şekil 4.22'ye göre, tüm harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Bu beklenen davranış bazı geçmiş araştırmalarda belirtilmiştir (Çelik ve Çanakçı, 2015; Yahia ve Khayat, 2001; Cry vd., 2000). Bu akış davranışı Hoffman tarafından önerilen düzenli-düzensiz geçiş teorisi ile tanımlanmaktadır (Hoffman, 1998). Bu teori, belirli bir kritik kayma hızında düzenli durumdan düzensiz duruma dönüşen akış davranışına dayanır. Başka bir deyişle, akış enerjisinin çoğu, süspansiyon akışını elde etmek için daha az düzenli yapılarda topaklanma sırasında parçacıklar arasındaki çarpışmalar tarafından emilir (Çelik ve Çanakçı, 2015). Bu nedenle, akışta kayma hızı arttıkça, bu çalışma için hazırlanan tüm karışımlarda dilatant davranış nedeniyle görünen viskozite ve kayma gerilimi katlanarak artmıştır. Bu tür harç karışımları için daha yüksek kesme hızlarında daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Ayrıca Şekil 4.22'de açıkça görüldüğü üzere tüm karışımlar için düşük kayma oranlarında ölçülen kayma gerilmeleri birbirine çok yakın değerler almasına rağmen, yüksek kayma oranlarında birbirinden uzaklaşan kayma gerilmesi değerleri almışlardır. Bu durum dilatant davranışın yüksek kayma oranlarında daha belirgin şekilde ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında (s/b>1.0) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için

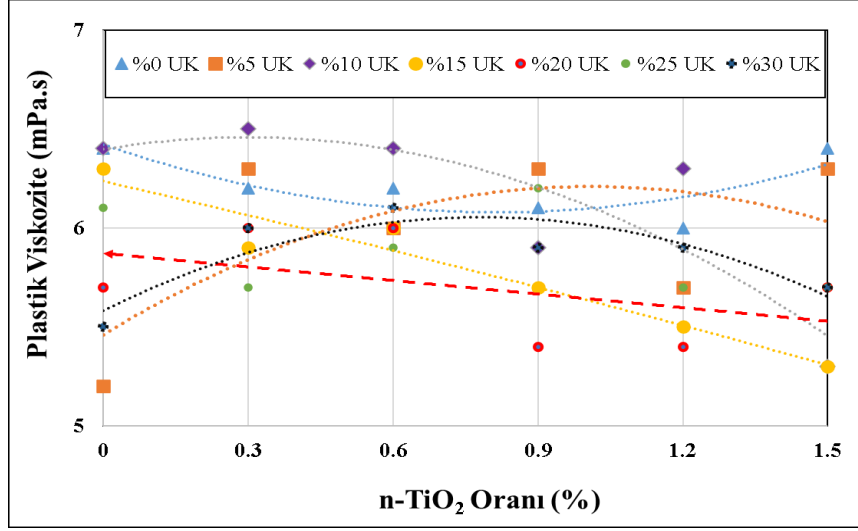
çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı gözlemlenebilir. Bu kısmi flokülasyon daha yüksek kesme hızlarında gözlenen parçacıklar arasındaki hidrodinamik etkileşim ile tanımlanabilir (Çelik ve Çanakçı, 2015). Sonuç olarak, kısmi flokülasyonun neden olduğu kümelenme, süspansiyon üzerinde daha fazla basınç gereksinimi getirebilir ve harç karışımlarının akışkanlığını azaltabilir. Bu nedenle, akma sırasında harç matrislerindeki süspansiyon parçacıklarının daha yüksek kayma hızlarında daha fazla enerjiye ihtiyacı olabilir ve bu görünür viskozite değerlerinde bir artışa neden olur (Wagner ve Brady, 2009). Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymaktadır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere n-TiO₂ katkısının etkileri yüksek kayma oranlarında açıkça görülmektedir. Bu değişimlerin sebebi sadece n-TiO₂ miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Bu değişim nano malzemenin UK ile kullanılmasının bir sonucu olarak açıklanabilir. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.



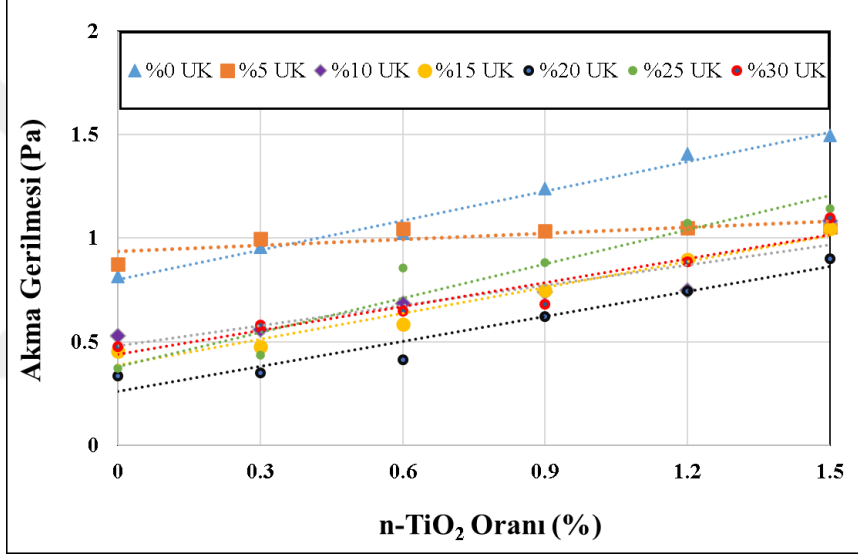


Şekil 4.22. n-TiO₂ katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi

Tüm karışımlar için deneylerden elde edilmiş Plastik viskozite ve Akma gerilmeleri Şekil 4.23'de ve Çizelge 4.5'te görülmektedir. Şekil 4.23'ten de açıkça görüldüğü üzere, UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları taban tabana zıt bir davranış sergilemektedir. Fakat nano Titanyum oksit (n-TiO₂) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano alümina katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.23-b). Şekil 4.23-a'dan da açıkça görüleceği üzere, UK katkısız farklı n-TiO₂ oranlarında plastik viskozite belirli bir n-TiO₂ miktarına kadar (%0,6) düşüş gösterirken, bu oran aşıldıktan sonra tekrar artmaya başlamaktadır. Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %0,6 n-TiO₂ oranında ulaşılmıştır. Bu durum akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-TiO₂ katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı ise farklılık göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-TiO₂ miktarındaki artışla belirli bir n-TiO₂ miktarına kadar plastik viskozite artarken, bu değerler aşıldığında plastik viskozite değerleri tekrar azalmakta bu da akışkanlığın arttığı anlamına gelmektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-TiO₂ beraber kullanılacaksa, ya çok düşük n-TiO₂ kullanılmalı (%0,6'dan az) ya da yüksek n-TiO₂ miktarları (%0,6'dan fazla) kullanılmalıdır.



(a)



(b)

Şekil 4.23. n-TiO₂ katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b)

Çizelge 4.5. n-TiO katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri

Karışım Adı*	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R^2	Karışım Adı*	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R^2
UK 0T00	0,8157	0,0064	0,9978	UK 15T09	0,7472	0,0057	0,9986
UK 0T03	0,9581	0,0062	0,9982	UK 15T12	0,8957	0,0055	0,9984
UK 0T06	1,0219	0,0062	0,9982	UK 15T15	1,0472	0,0053	0,9982
UK 0T09	1,2398	0,0061	0,9984	UK 20T00	0,3354	0,0057	0,9981
UK 0T12	1,4064	0,0060	0,9983	UK 20T03	0,3513	0,0060	0,9983
UK 0T15	1,4964	0,0064	0,998	UK 20T06	0,4122	0,0060	0,9983

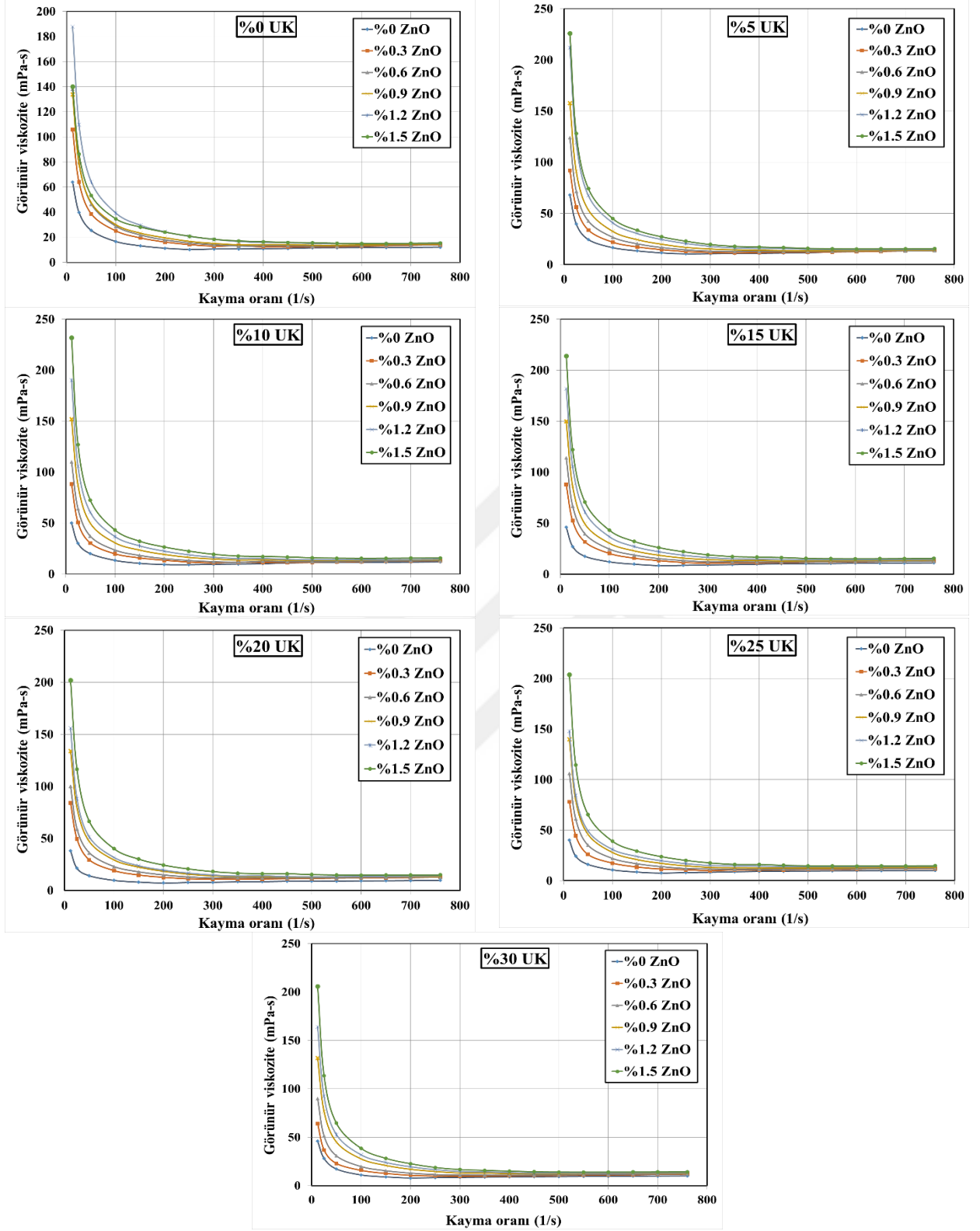
UK 5T00	0,8756	0,0055	0,9951	UK 20T09	0,6228	0,0059	0,9981
UK 5T03	0,9966	0,0063	0,9966	UK 20T12	0,7442	0,0054	0,9987
UK 5T06	1,0456	0,0060	0,9961	UK 20T15	0,9004	0,0051	0,9983
UK 5T09	1,0337	0,0063	0,998	UK 25T00	0,3714	0,0051	0,9974
UK 5T12	1,0498	0,0057	0,9984	UK 25T03	0,4370	0,0057	0,9981
UK 5T15	1,0527	0,0054	0,9979	UK 25T06	0,8545	0,0059	0,9979
UK 10T00	0,5275	0,0060	0,9962	UK 25T09	0,8805	0,0062	0,998
UK 10T03	0,5568	0,0065	0,9971	UK 25T12	1,0715	0,0057	0,9983
UK 10T06	0,6860	0,0064	0,9986	UK 25T15	1,1433	0,0054	0,9981
UK 10T09	0,7401	0,0059	0,9981	UK 30T00	0,4768	0,0052	0,9982
UK 10T12	0,7468	0,0063	0,9978	UK 30T03	0,5802	0,0060	0,9972
UK 10T15	1,0828	0,0053	0,9985	UK 30T06	0,6487	0,0061	0,9978
UK 15T00	0,4556	0,0057	0,9976	UK 30T09	0,6814	0,0059	0,9979
UK 15T03	0,4749	0,0059	0,9979	UK 30T12	0,8848	0,0059	0,9984
UK 15T06	0,5833	0,0060	0,9982	UK 30T15	1,0975	0,0054	0,9979

*Karışım adları içeriklerindeki n-TiO₂ ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15T06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında TiO₂ katkıli anlamına gelmektedir.

4.2.2 Nano çinko oksit (n-ZnO) katkıli karışımlar-reolojik özellikler

Tez kapsamında, s/b=1.0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, % 0.3, % 0.6, % 0.9, % 1.2 ve % 1.5 oranlarında Nano Çinko oksit (n-ZnO) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde reoloji deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda plastik viskozite, görünür viskozite ve kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Reoloji deneyi kapsamında kayma oranı olarak 12 s⁻¹- 760 s⁻¹ aralığı kullanılmıştır (bkz. Şekil 4.24 - Şekil 4.25).

Harç karışımlarıyla ilgili tüm karışım matrislerinde çeşitli kayma hızı eğrilerine karşı görünür viskozite değerleri, Şekil 4.24'te gösterilmektedir. Şekil 4.24'e göre, tüm n-ZnO katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında da artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Şekil 4.24'te açıkça görüldüğü gibi, tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur.



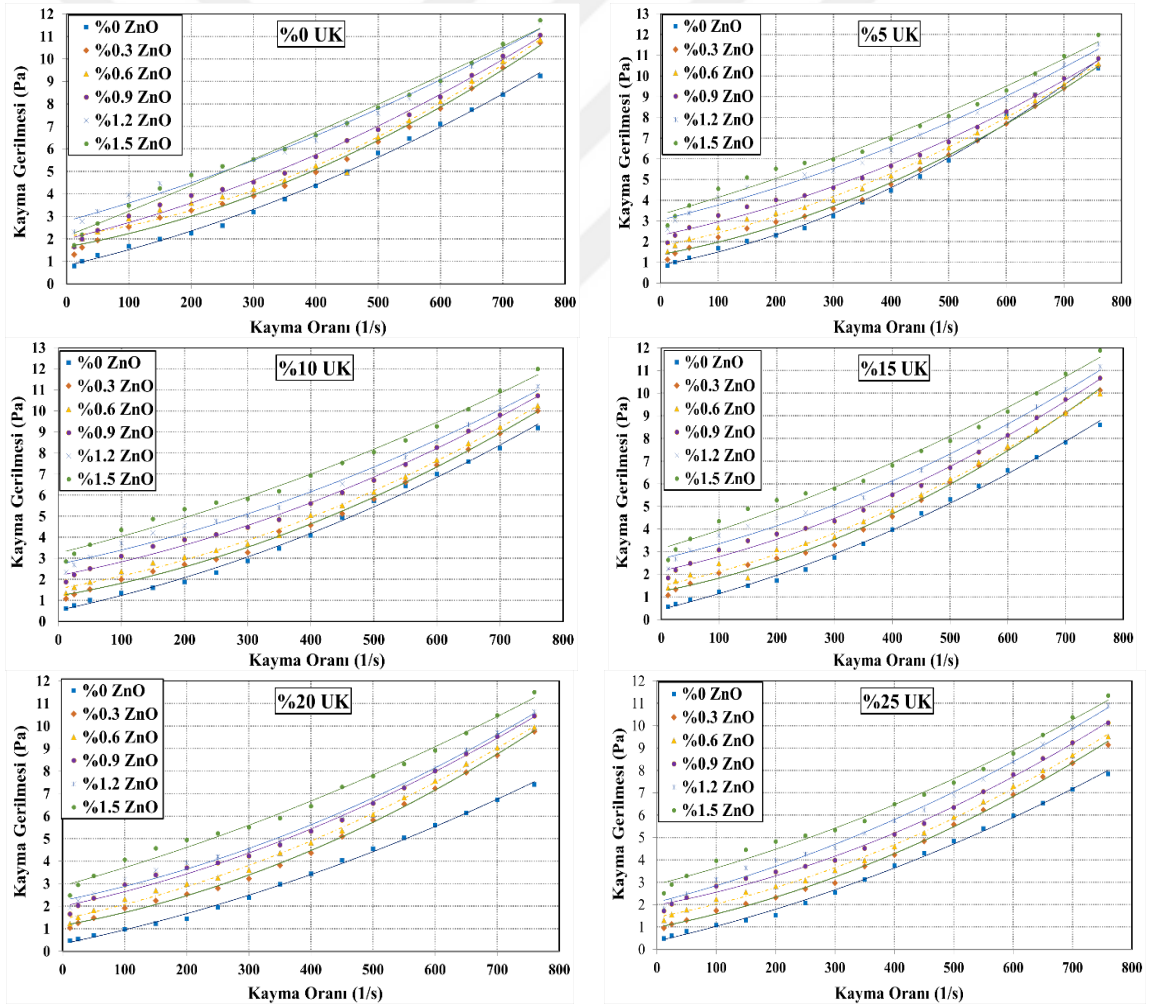
Şekil 4.24. n-ZnO katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi

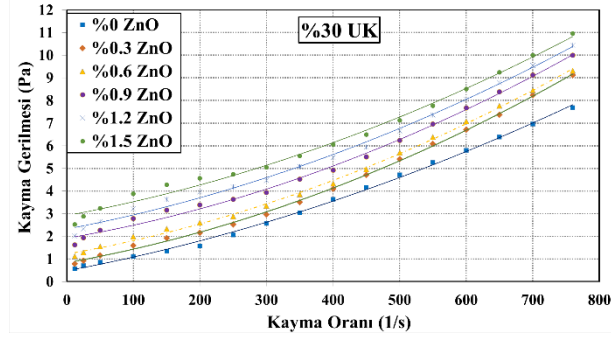
Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini

göstermektedir. Bu durum ileriki bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır. Ayrıca düşük kayma oranlarında katkı malzemeleriyle harçların görünür viskoziteleri değişkenlikler arz ederken, yüksek kayma oranlarında tüm UK ikamelerinde n-ZnO katkı etkisi çok fazla görülmemektedir. Hatta çok yüksek kayma oranlarında neredeyse aynı görünür viskoziteler elde edilmektedir. Bu durum yüksek kayma oranlarında partiküler malzemelerin topaklaşması sonucu katılan malzemelerin dane boyut etkisinin ortadan kalkmasıyla açıklanabilir.

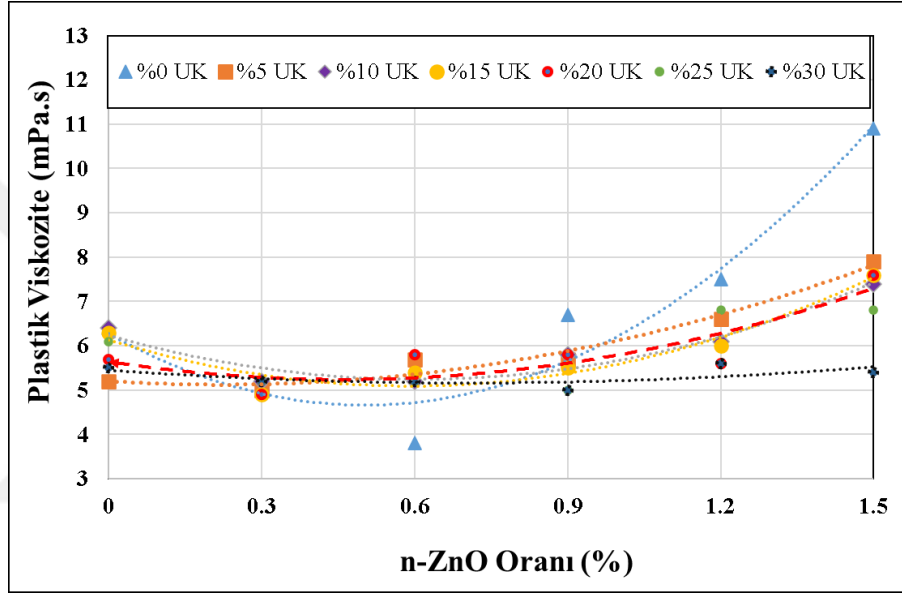
Şekil 4.25'te görüldüğü gibi kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenmiştir. Şekil 4.25'e göre, tüm harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Bu beklenen davranış bazı geçmiş araştırmalarda belirtilmiştir (Çelik ve Çanakçı, 2015; Yahia ve Khayat, 2001; Cry vd., 2000). Bu akış davranışı Hoffman tarafından önerilen düzenli-düzensiz geçiş teorisi ile tanımlanmaktadır (Hoffman, 1998). Bu teori, belirli bir kritik kayma hızında düzenli durumdan düzensiz duruma dönüşen akış davranışına dayanır. Başka bir deyişle, akış enerjisinin çoğu, süspansiyon akışını elde etmek için daha az düzenli yapılarda topaklanma sırasında parçacıklar arasındaki çarpışmalar tarafından emilir (Çelik ve Çanakçı, 2015). Bu nedenle, akışta kayma hızı arttıkça, bu çalışma için hazırlanan tüm karışımlarda dilatant davranış nedeniyle görünen viskozite ve kayma gerilimi katlanarak artmıştır. Bu tür harç karışımları için daha yüksek kesme hızlarında daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Ayrıca Şekil 4.25'te açıkça görüldüğü üzere tüm karışımlar için düşük kayma oranlarında ölçülen kayma gerilmeleri birbirine çok yakın değerler almasına rağmen, yüksek kayma oranlarında birbirinden uzaklaşan kayma gerilmesi değerleri almışlardır. Bu durum dilatant davranışın yüksek kayma oranlarında daha belirgin şekilde ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında ($s/b > 1.0$) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı gözlemlenebilir. Bu kısmi flokülasyon daha yüksek kesme hızlarında gözlenen parçacıklar arasındaki hidrodinamik etkileşim ile tanımlanabilir (Çelik ve Çanakçı, 2015). Sonuç olarak, kısmi flokülasyonun neden olduğu kümelenme, süspansiyon üzerinde daha fazla basınç gereksinimi getirebilir ve harç karışımlarının akışkanlığını azaltabilir. Bu nedenle, akma

sırasında harç matrislerindeki süspansiyon parçacıklarının daha yüksek kayma hızlarında daha fazla enerjiye ihtiyacı olabilir ve bu görünür viskozite değerlerinde bir artışa neden olur (Wagner ve Brady, 2009). Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymaktadır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere n-ZnO katkısının etkileri yüksek kayma oranlarında açıkça görülmektedir. Bu değişimlerin sebebi sadece n-ZnO miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Bu değişim nano malzemenin UK ile kullanılmasının bir sonucu olarak açıklanabilir. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.

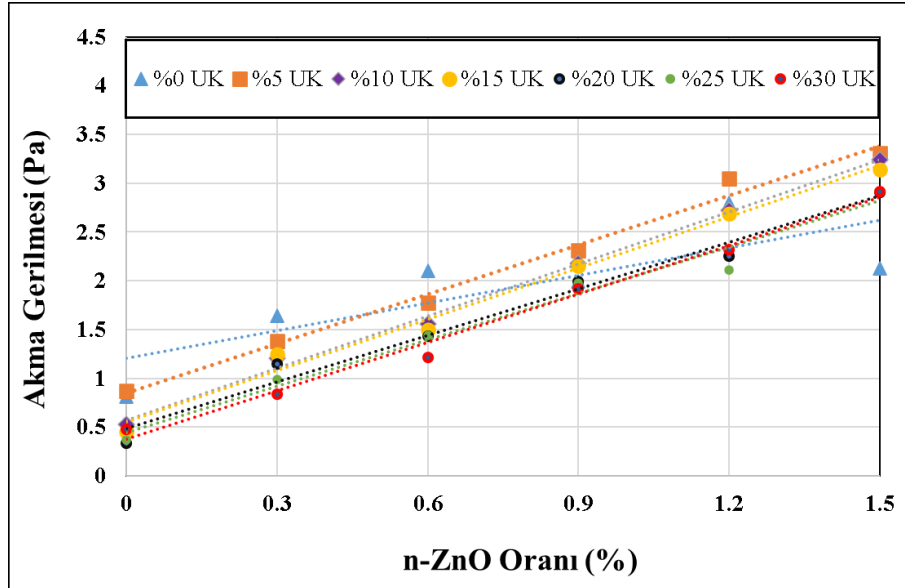




Şekil 4.25. n-ZnO katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi



(a)



(b)

Şekil 4.26. n-ZnO katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b)

Tüm karışımlar için deneylerden elde edilmiş Plastik viskozite ve Akma gerilmeleri Şekil 4.26'da ve Çizelge 4.6'da görülmektedir. Şekil 4.26'dan da açıkça görüldüğü üzere, UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları benzer yönde eğilim gösterse de UK katkısının viskozite değerlerini azaltma eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir. Fakat nano Çinko oksit (n-ZnO) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano çinko oksit katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.26-b). Şekil 4.26-a'dan da açıkça görüleceği üzere, UK katkısız farklı n-ZnO oranlarında plastik viskozite belirli bir n-ZnO miktarına kadar (%0,6) düşüş gösterirken, bu oran aşıldıktan sonra tekrar artmaya başlamaktadır. Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %0,6 n-ZnO oranında ulaşılmıştır. Bu durum akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-ZnO katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı da benzer yaklaşım göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-ZnO miktarındaki artışla belirli bir n-ZnO miktarına kadar plastik viskozite azalırken, bu değerler aşıldığında plastik viskozite değerleri tekrar artmaya, bu da akışkanlığın azaldığı anlamına gelmektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-ZnO beraber kullanılacaksa, ya UK katkılı ve katkısız tüm karışımlarda %0,3-%0,6 n-ZnO katkısının kullanılması fayda sağlayacaktır. Özet olarak UK katkılı harçlarda n-ZnO kullanımı viskozitenin kontrol edilmesinde dikkate değer katkılar sağlayabilecektir.

Çizelge 4.6. n-ZnO katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri

Karışım Adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R^2	Karışım Adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R^2
UK 0Z00	0,8157	0,0064	0,9978	UK 15Z09	2,1559	0,0055	0,9957
UK 0Z03	1,6411	0,0050	0,9956	UK 15Z12	2,690	0,0060	0,9924
UK 0Z06	2,1043	0,0048	0,988	UK 15Z15	3,1394	0,0076	0,9883
UK 0Z09	1,9915	0,0067	0,9945	UK 20Z00	0,3354	0,0057	0,9981
UK 0Z12	2,7953	0,0075	0,9901	UK 20Z03	1,1474	0,0049	0,9984
UK 0Z15	3,4500	0,0109	0,9912	UK 20Z06	1,4305	0,0058	0,9975
UK 5Z00	0,8756	0,0052	0,9951	UK 20Z09	1,9971	0,0058	0,9948
UK 5Z03	1,3804	0,0050	0,9973	UK 20Z12	2,2514	0,0056	0,9944
UK 5Z06	1,7732	0,0057	0,997	UK 20Z15	2,9057	0,0076	0,9919

UK 5Z09	2,3089	0,0057	0,9948	UK 25Z00	0,3714	0,0061	0,9974
UK 5Z12	3,0464	0,0066	0,9905	UK 25Z03	0,9853	0,0052	0,9983
UK 5Z15	3,3060	0,0079	0,9867	UK 25Z06	1,4377	0,0052	0,9979
UK 10Z00	0,5275	0,0064	0,9962	UK 25Z09	1,9778	0,0050	0,9964
UK 10Z03	1,2070	0,0052	0,9977	UK 25Z12	2,1110	0,0068	0,9956
UK 10Z06	1,5550	0,0052	0,9972	UK 25Z15	2,9098	0,0068	0,9921
UK 10Z09	2,1763	0,0058	0,9955	UK 30Z00	0,4768	0,0055	0,9982
UK 10Z12	2,7188	0,0061	0,9921	UK 30Z03	0,8361	0,0052	0,999
UK 10Z15	3,2443	0,0074	0,9913	UK 30Z06	1,2139	0,0052	0,9983
UK 15Z00	0,4556	0,0063	0,9976	UK 30Z09	1,9177	0,0050	0,9957
UK 15Z03	1,2480	0,0049	0,9977	UK 30Z12	2,3208	0,0056	0,9952
UK 15Z06	1,5018	0,0054	0,994	UK 30Z15	2,9172	0,0054	0,9929

*Karışım adları içeriklerindeki n-ZnO ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15Z06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında n-ZnO katkılı anlamına gelmektedir.

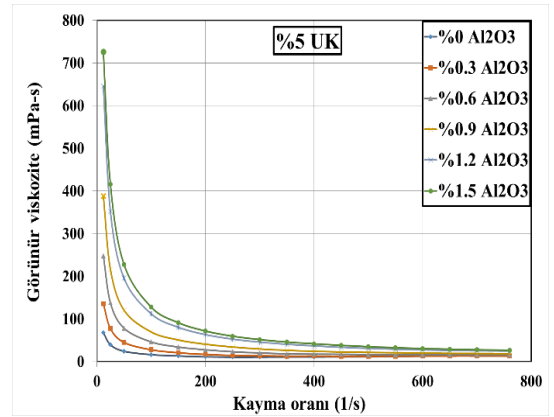
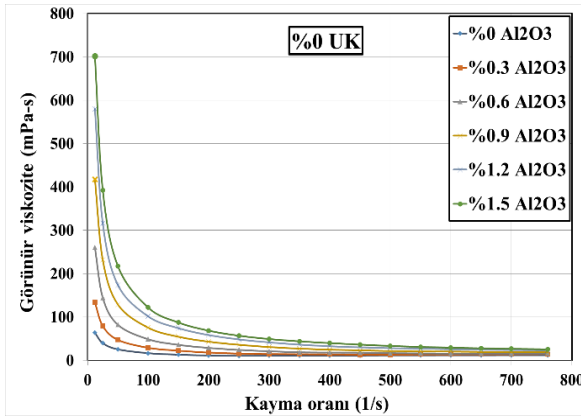
4.2.3 Nano alümina (n-Al₂O₃) katkılı karışımlar-reolojik özellikler

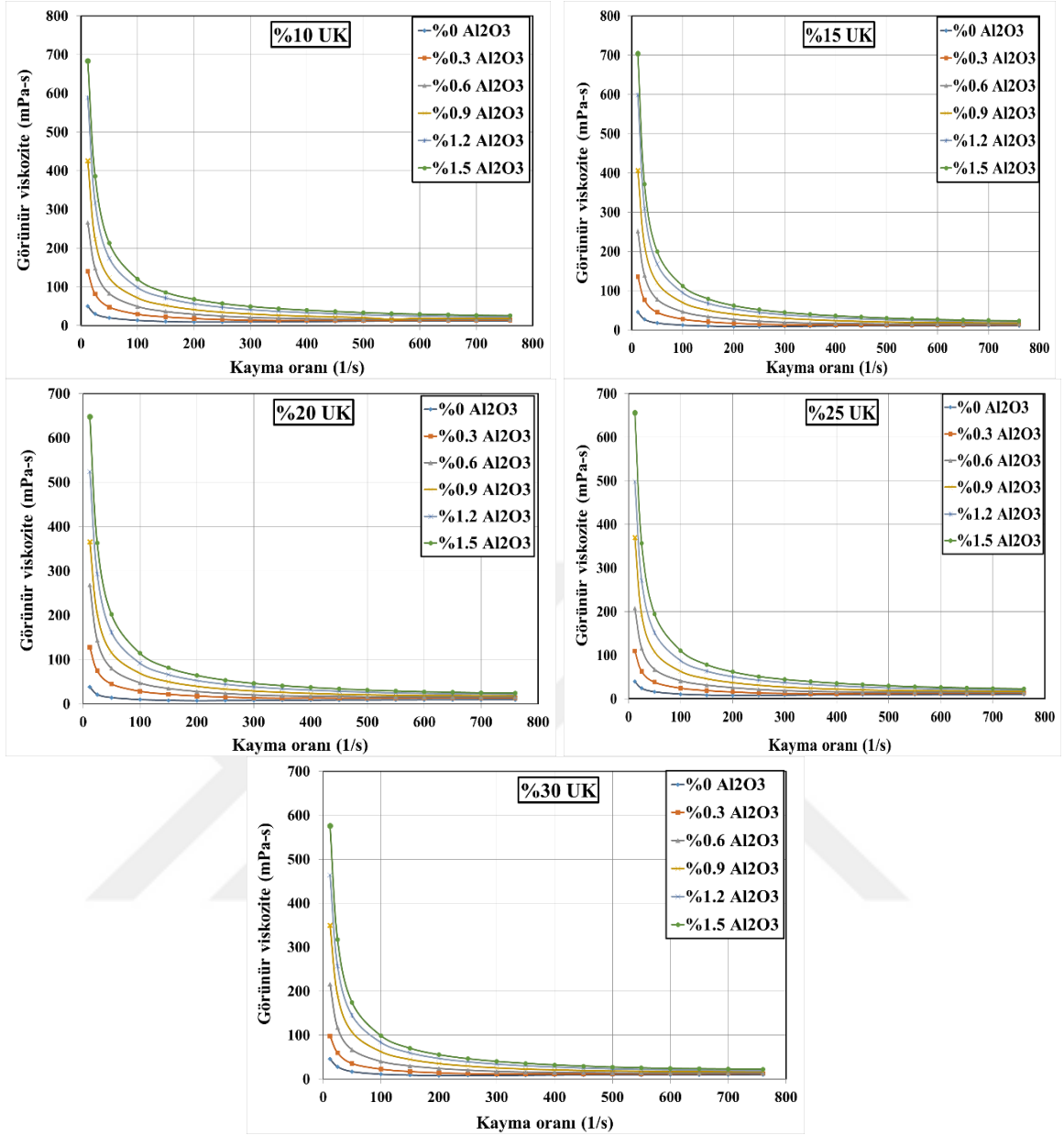
Tez kapsamında, s/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında Nano Alümina (n-Al₂O₃) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde reoloji deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda plastik viskozite, görünür viskozite ve kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Reoloji deneyi kapsamında kayma oranı olarak 12 s⁻¹- 760 s⁻¹ aralığı kullanılmıştır (bkz. Şekil 4.27 - Şekil 4.28).

Harç karışımlarıyla ilgili tüm karışım matrislerinde çeşitli kayma hızı eğrilerine karşı görünür viskozite değerleri, Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Şekil 4.27'ye göre, tüm n-Al₂O₃ katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Şekil 4.27'de açıkça görüldüğü gibi, tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur. Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini göstermektedir. Bu durum ileriki bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır. Ayrıca düşük kayma oranlarında katkı malzemeleriyle

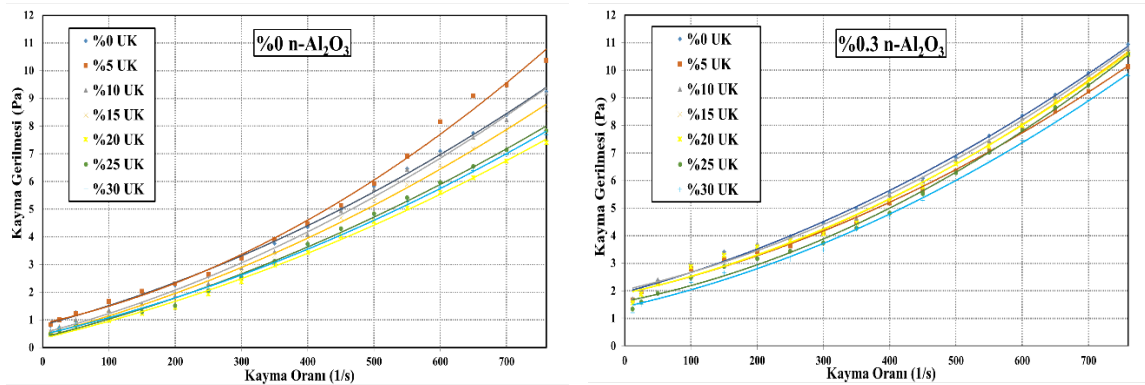
harçların görünür viskoziteleri değişkenlikler arz ederken, yüksek kayma oranlarında tüm UK ikamelerinde n-Al₂O₃ katkı etkisi çok fazla görülmemektedir. Hatta çok yüksek kayma oranlarında neredeyse aynı görünür viskoziteler elde edilmektedir. Bu durum yüksek kayma oranlarında partiküler malzemelerin topaklaşması sonucu katılan malzemelerin dane boyut etkisinin ortadan kalkmasıyla açıklanabilir.

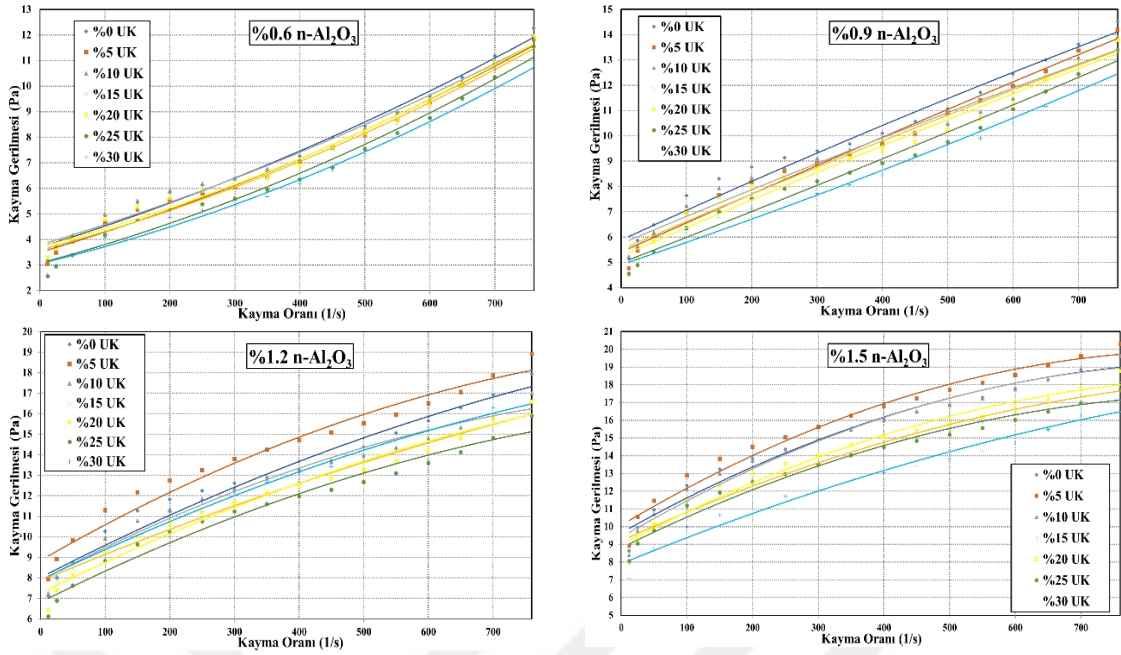
Şekil 4.28’de görüldüğü gibi kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde %0,6 n-Al₂O₃ katkı oranlarına kadar kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenirken, bu orandan sonraki katkı miktarlarında incelen kayma davranışı (Shear thinning) gözlemlenmeye başlamıştır. Şekil 4.28’e göre, kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gösteren harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Bu beklenen davranış bazı geçmiş araştırmalarda belirtilmiştir (Çelik ve Çanakçı, 2015; Yahia ve Khayat, 2001; Cry vd., 2000). Bu akış davranışı Hoffman tarafından önerilen düzenli-düzensiz geçiş teorisi ile tanımlanmaktadır (Hoffman, 1998). Bu teori, belirli bir kritik kayma hızında düzenli durumdan düzensiz duruma dönüşen akış davranışına dayanır. Başka bir deyişle, akış enerjisinin çoğu, süspansiyon akışını elde etmek için daha az düzenli yapılarda topaklanma sırasında parçacıklar arasındaki çarpışmalar tarafından emilir (Çelik ve Çanakçı, 2015).





Şekil 4.27. n-Al₂O₃ katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi





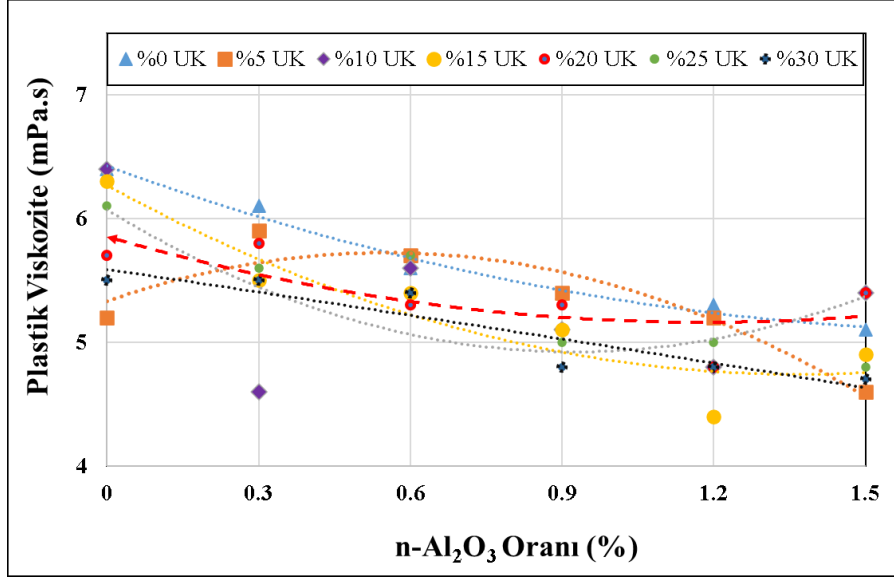
Şekil 4.28. n-Al₂O₃ katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi

Bu nedenle, akışta kayma hızı arttıkça, bu çalışma için hazırlanan tüm karışımlarda dilatant davranış nedeniyle görülen viskozite ve kayma gerilimi katlanarak artmıştır. Bu tür harç karışımları için daha yüksek kesme hızlarında daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında ($s/b > 1.0$) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı gözlemlenebilir. Bu kısmi flokülasyon daha yüksek kesme hızlarında gözlenen parçacıklar arasındaki hidrodinamik etkileşim ile tanımlanabilir (Çelik ve Çanakcı, 2015). Sonuç olarak, kısmi flokülasyonun neden olduğu kümelenme, süspansiyon üzerinde daha fazla basınç gereksinimi getirebilir ve harç karışımlarının akışkanlığını azaltabilir. Bu nedenle, akma sırasında harç matrislerindeki süspansiyon parçacıklarının daha yüksek kayma hızlarında daha fazla enerjiye ihtiyacı olabilir ve bu görünür viskozite değerlerinde bir artışa neden olur (Wagner ve Brady, 2009). Fakat diğer taraftan tüm UK mineral katkılı karışımlar için %0,6 n-Al₂O₃ katkı oranlarından sonra bu davranış sözde plastik (pseudo plastic) davranışa dönmeye başlamıştır. Bu davranış Bingham sıvı davranışı olarak ta adlandırılmaktadır. Yüksek kayma oranlarında viskozitenin azaldığı ve akışkanlığın arttığı anlamını taşımaktadır. Dolayısı ile bu çalışma kapsamında hazırlanmış UK katkılı %0,6 oranından fazla n-Al₂O₃ ilavesinin reolojik davranışı tamamen değiştirdiği gözlemlenmiştir. Yüksek kayma oranlarında akışkanlığı artırarak bu harç karışımların

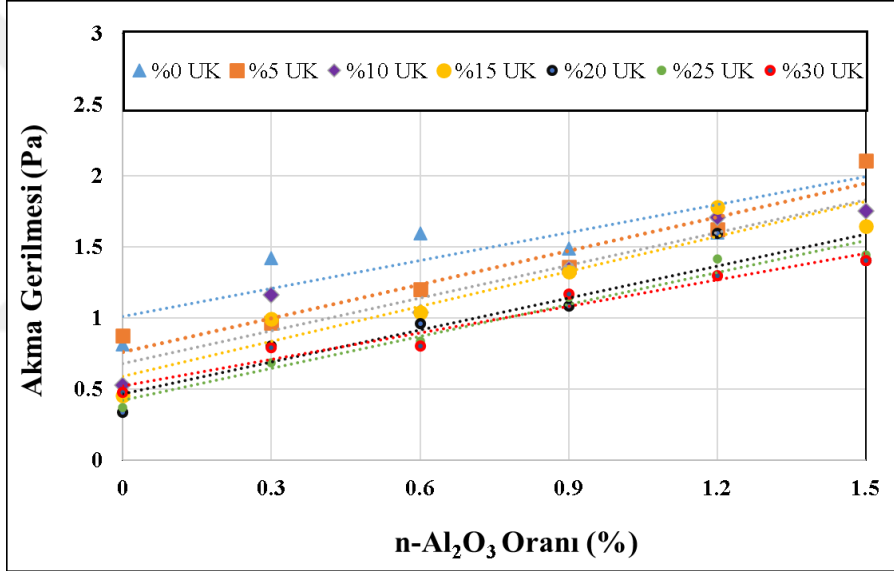
reolojik özelliklerinde iyileştirmeye katkı sağladığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymaktadır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere n-Al₂O₃ katkısının etkileri yüksek kayma oranlarında açıkça görülmektedir. Bu değişimlerin sebebi sadece n-Al₂O₃ miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Bu değişim nano malzemenin UK ile kullanılmasının bir sonucu olarak ta açıklanabilir. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.

Tüm karışımlar için deneylerden elde edilmiş Plastik viskozite ve Akma gerilmeleri Şekil 4.29'da ve Çizelge 4.7'de görülmektedir. Şekil 4.29'dan da açıkça görüldüğü üzere, UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları benzer yönde eğilim gösterse de UK katkısının viskozite değerlerini azaltma eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir. Fakat nano Alümina (n-Al₂O₃) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano alümina katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.29-b). Şekil 4.29-a'dan da açıkça görüleceği üzere, UK katkısız farklı n-Al₂O₃ oranlarında plastik viskozite doğrusala yakın bir şekilde azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum nano alümina katkısına bağlı plastik viskozitenin azalması ve sonucu olarak akışkanlığın artması anlamını taşımaktadır.

Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %1,5 n-Al₂O₃ oranında ulaşılmıştır. Bu durum UK katkısız harçlar için akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-Al₂O₃ katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı da benzer yaklaşım göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-Al₂O₃ miktarındaki artışla plastik viskozite değerleri azalma trendi göstermektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-Al₂O₃ beraber kullanılacaksa, UK katkılı ve katkısız tüm karışımlarda %1,5 n-Al₂O₃ katkısının kullanılması fayda sağlayacaktır. Özet olarak UK katkılı harçlarda Al₂O₃ kullanımı viskozitenin kontrol edilmesinde dikkate değer katkılar sağlayabilecektir.



(a)



(b)

Şekil 4.29. n-Al₂O₃ katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b)

Çizelge 4.7. n-Al₂O₃ katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri

Karışım Adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R ²	Karışım Adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R ²
UK 0A00	0,8157	0,0064	0,9978	UK 15A09	1,3267	0,0051	0,9975
UK 0A03	1,4212	0,0061	0,9974	UK 15A12	1,7809	0,0044	0,9976
UK 0A06	1,5983	0,0056	0,9972	UK 15A15	1,6497	0,0049	0,9981
UK 0A09	1,4891	0,0054	0,998	UK 20A00	0,3354	0,0057	0,9981
UK 0A12	1,6003	0,0053	0,9976	UK 20A03	0,8023	0,0058	0,9983

UK 0A15	2,1028	0,0051	0,9974	UK 20A06	0,9593	0,0053	0,9981
UK 5A00	0,8756	0,0052	0,9951	UK 20A09	1,0850	0,0053	0,9977
UK 5A03	0,9652	0,0059	0,9984	UK 20A12	1,5976	0,0048	0,9978
UK 5A06	1,2014	0,0057	0,998	UK 20A15	1,4057	0,0054	0,9976
UK 5A09	1,3578	0,0054	0,9977	UK 25A00	0,3714	0,0061	0,9974
UK 5A12	1,6220	0,0052	0,9978	UK 25A03	0,6848	0,0056	0,9982
UK 5A15	2,1077	0,0046	0,997	UK 25A06	0,838	0,0057	0,9983
UK 10A00	0,5275	0,0064	0,9962	UK 25A09	1,1480	0,0050	0,9981
UK 10A03	1,1642	0,0046	0,9984	UK 25A12	1,4145	0,0050	0,9977
UK 10A06	1,0400	0,0056	0,9983	UK 25A15	1,4421	0,0048	0,9982
UK 10A09	1,3462	0,0051	0,9979	UK 30A00	0,4768	0,0055	0,9982
UK 10A12	1,7109	0,0048	0,998	UK 30A03	0,7905	0,0055	0,9964
UK 10A15	1,7546	0,0054	0,9973	UK 30A06	0,8071	0,0054	0,998
UK 15A00	0,4556	0,0063	0,9976	UK 30A09	1,1698	0,0048	0,9981
UK 15A03	0,9965	0,0055	0,9979	UK 30A12	1,2959	0,0048	0,9982
UK 15A06	1,0398	0,0054	0,9974	UK 30A15	1,4058	0,0047	0,9981

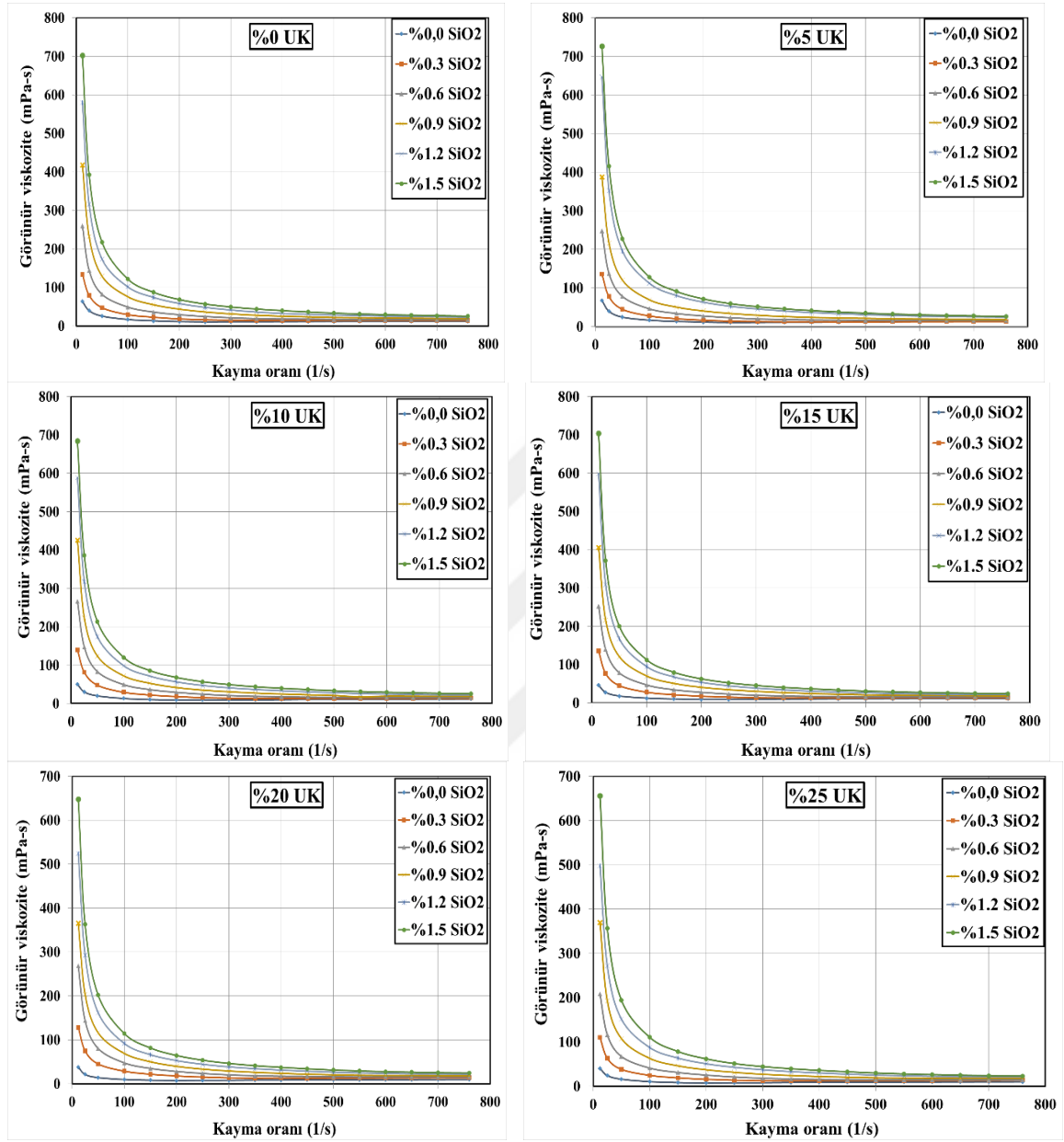
*Karışım adları içeriklerindeki n-Al₂O₃ ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15A06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında n-Al₂O₃ katkılı anlamına gelmektedir.

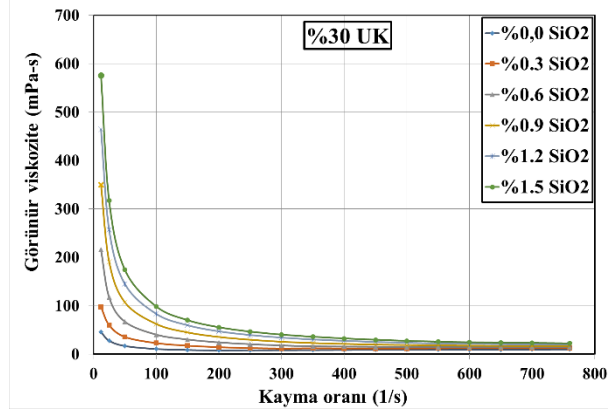
4.2.4. Nano silika (n-SiO₂) katkılı karışımlar-reolojik özellikler

Tez kapsamında, s/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında Nano Silika (n-SiO₂) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde reoloji deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda plastik viskozite, görünür viskozite ve kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Reoloji deneyi kapsamında kayma oranı olarak 12 s⁻¹ - 760 s⁻¹ aralığı kullanılmıştır (bkz. Şekil 4.30 - Şekil 4.31).

Harç karışımlarıyla ilgili tüm karışım matrislerinde çeşitli kayma hızı eğrilerine karşı görünür viskozite değerleri, Şekil 4.30'da gösterilmektedir. Şekil 4.30'a göre, tüm n-SiO₂ katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Şekil 4.30'da açıkça görüldüğü gibi, tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek

şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur.



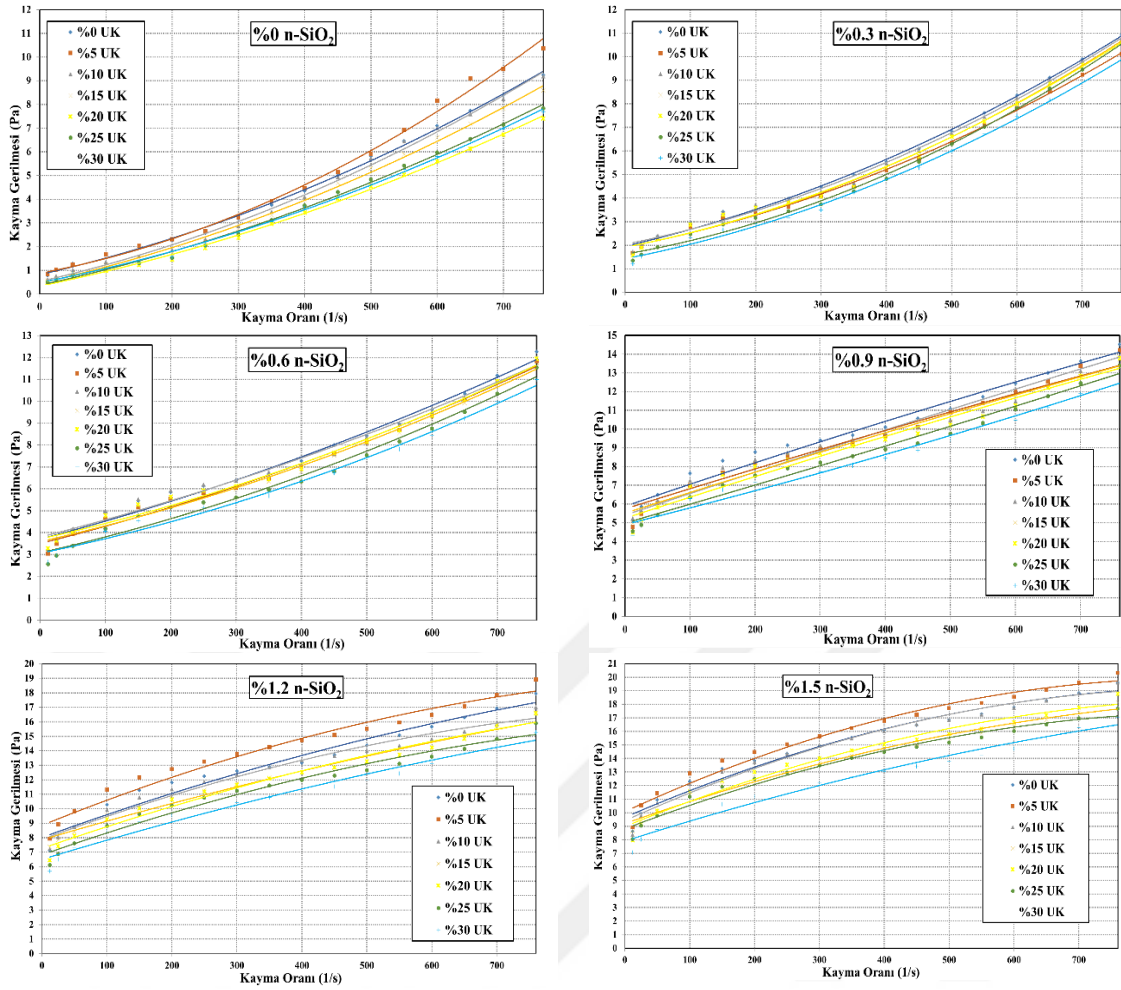


Şekil 4.30. n-SiO₂ katkı oranlarında kayma oranı-görünür viskozite ilişkisi

Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini göstermektedir. Bu durum ileriki bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır. Ayrıca düşük kayma oranlarında katkı malzemeleriyle harçların görünür viskoziteleri değişkenlikler arz ederken, yüksek kayma oranlarında tüm UK ikamelerinde n-SiO₂ katkı etkisi çok fazla görülmemektedir. Hatta çok yüksek kayma oranlarında neredeyse aynı görünür viskoziteler elde edilmektedir. Bu durum yüksek kayma oranlarında partiküler malzemelerin topaklaşması sonucu katılan malzemelerin dane boyut etkisinin ortadan kalkmasıyla açıklanabilir.

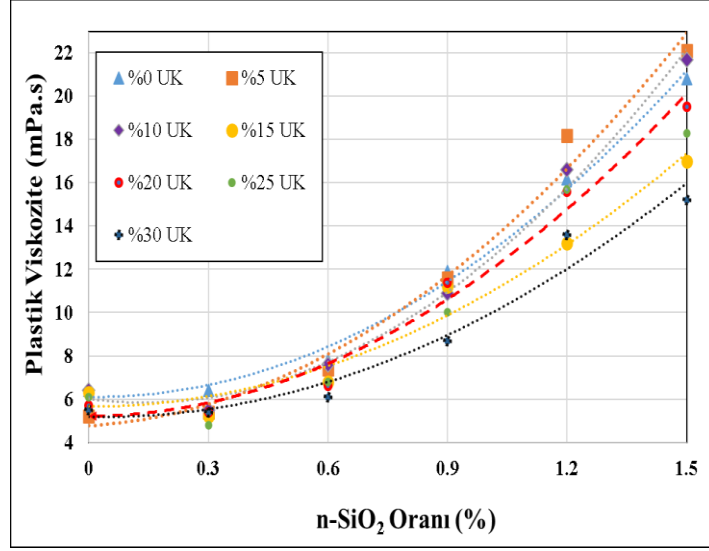
Şekil 4.31’de görüldüğü gibi kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde %0,6 n-SiO₂ katkı oranlarına kadar kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenirken, bu orandan sonraki katkı miktarlarında incelen kayma davranışı (Shear thinning) gözlemlenmeye başlamıştır. Şekil 4.31’e göre, kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gösteren harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Bu beklenen davranış bazı geçmiş araştırmalarda belirtilmiştir (Çelik ve Çanakçı, 2015; Yahia ve Khayat, 2001; Cry vd., 2000). Bu akış davranışı Hoffman tarafından önerilen düzenli-düzensiz geçiş teorisi ile tanımlanmaktadır (Hoffman, 1998). Bu teori, belirli bir kritik kayma hızında düzenli durumdan düzensiz duruma dönüşen akış davranışına dayanır. Başka bir deyişle, akış enerjisinin çoğu, süspansiyon akışını elde etmek için daha az düzenli yapılarda topaklanma sırasında parçacıklar arasındaki çarpışmalar tarafından emilir (Çelik ve Çanakçı, 2015). Bu

nedenle, akışta kayma hızı arttıkça, bu çalışma için hazırlanan tüm karışımlarda dilatant davranış nedeniyle görünen viskozite ve kayma gerilimi katlanarak artmıştır. Bu tür harç karışımları için daha yüksek kesme hızlarında daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında ($s/b > 1.0$) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı gözlemlenebilir. Bu kısmi flokülasyon daha yüksek kesme hızlarında gözlenen parçacıklar arasındaki hidrodinamik etkileşim ile tanımlanabilir (Çelik ve Çanakcı, 2015). Sonuç olarak, kısmi flokülasyonun neden olduğu kümelenme, süspansiyon üzerinde daha fazla basınç gereksinimi getirebilir ve harç karışımlarının akışkanlığını azaltabilir. Bu nedenle, akma sırasında harç matrislerindeki süspansiyon parçacıklarının daha yüksek kayma hızlarında daha fazla enerjiye ihtiyacı olabilir ve bu görünür viskozite değerlerinde bir artışa neden olur (Wagner ve Brady, 2009). Fakat diğer taraftan tüm UK mineral katkılı karışımlar için %0,6 n-SiO₂ katkı oranlarından sonra bu davranış sözde plastik (pseudo plastic) davranışa dönmeye başlamıştır. Bu davranış Bingham sıvı davranışı olarak ta adlandırılmaktadır. Yüksek kayma oranlarında viskozitenin azaldığı ve akışkanlığın arttığı anlamını taşımaktadır. Dolayısı ile bu çalışma kapsamında hazırlanmış UK katkılı %0,6 oranından fazla n-SiO₂ ilavesinin reolojik davranışı tamamen değiştirdiği gözlemlenmiştir. Yüksek kayma oranlarında akışkanlığı artırarak bu harç karışımların reolojik özelliklerinde iyileştirmeye katkı sağladığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymaktadır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere n-SiO₂ katkısının etkileri yüksek kayma oranlarında açıkça görülmektedir. Bu değişimlerin sebebi sadece n-SiO₂ miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Bu değişim nano malzemenin UK ile kullanılmasının bir sonucu olarak ta açıklanabilir. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.

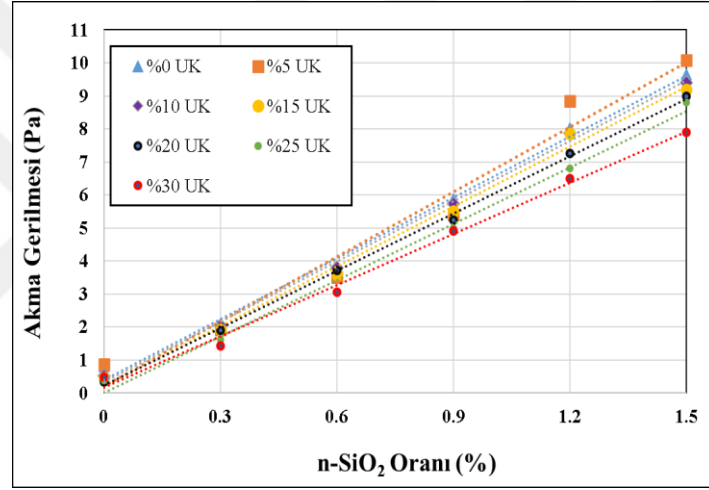


Şekil 4.31. n-SiO₂ katkı oranlarında kayma oranı-kayma gerilmesi ilişkisi

Tüm karışımlar için deneylerden elde edilmiş Plastik viskozite ve Akma gerilmeleri Şekil 4.32'de ve Çizelge 4.8'de görülmektedir. Şekil 4.32'den de açıkça görüldüğü üzere, UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları benzer yönde eğilim gösterse de UK katkısının viskozite değerlerini azaltma eğilimde olduğu açıkça görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.32. n-SiO₂ katkılarda plastik viskozite ilişkisi (a) ve akma gerilme ilişkisi (b)

Fakat nano Silika (n-SiO₂) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano alümina katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.32-b). Şekil 4.32-a'dan da açıkça görüleceği üzere, UK katkısız farklı n-SiO₂ oranlarında plastik viskozite doğrusala yakın bir şekilde azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum nano alümina katkısına bağlı plastik viskozitenin azalması ve sonucu olarak akışkanlığın artması anlamını taşımaktadır. Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %1,5 n-SiO₂ oranında ulaşılmıştır. Bu durum UK katkısız harçlar için akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-

SiO₂ katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı da benzer yaklaşım göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-SiO₂ miktarındaki artışla plastik viskozite değerleri azalma trendi göstermektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-SiO₂ beraber kullanılacaksa, UK katkılı ve katkısız tüm karışımlarda %1,5 n-SiO₂ katkısının kullanılması fayda sağlayacaktır. Özet olarak UK katkılı harçlarda n-SiO₂ kullanımı viskozitenin kontrol edilmesinde dikkate değer katkılar sağlayabilecektir.

Çizelge 4.8. n-SiO₂ katkılı karışımların plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri

Karışım Adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R ²	Karışım Adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R ²
UK 0S00	0,8157	0,0064	0,9978	UK 15S09	5,5098	0,0112	0,9798
UK 0S03	1,9567	0,0064	0,9967	UK 15S12	7,8574	0,0132	0,9776
UK 0S06	3,7021	0,0078	0,9872	UK 15S15	9,1922	0,017	0,9856
UK 0S09	5,8817	0,0119	0,9757	UK 20S00	0,3354	0,0057	0,9981
UK 0S12	8,0174	0,0162	0,9683	UK 20S03	1,9124	0,0054	0,9942
UK 0S15	9,6527	0,0208	0,9753	UK 20S06	3,7106	0,0066	0,9890
UK 5S00	0,8756	0,0052	0,9951	UK 20S09	5,2407	0,0114	0,9713
UK 5S03	1,9140	0,0054	0,9968	UK 20S12	7,2581	0,0156	0,9756
UK 5S06	3,5033	0,0074	0,9903	UK 20S15	8,9823	0,0195	0,9706
UK 5S09	5,4080	0,0116	0,9836	UK 25S00	0,3714	0,0061	0,9974
UK 5S12	8,8509	0,0182	0,9708	UK 25S03	1,6192	0,0048	0,9965
UK 5S15	10,078	0,0221	0,9751	UK 25S06	3,0752	0,0068	0,9839
UK 10S00	0,5275	0,0064	0,9962	UK 25S09	4,9848	0,0100	0,9820
UK 10S03	2,0390	0,0055	0,9954	UK 25S12	6,8156	0,0157	0,9731
UK 10S06	3,7927	0,0076	0,9852	UK 25S15	8,8064	0,0183	0,9787
UK 10S09	5,7408	0,0109	0,9752	UK 30S00	0,4768	0,0055	0,9982
UK 10S12	7,8819	0,0166	0,9779	UK 30S03	1,4258	0,0054	0,9971
UK 10S15	9,4094	0,0217	0,9772	UK 30S06	3,0552	0,0061	0,9894
UK 15S00	0,4556	0,0063	0,9976	UK 30S09	4,9084	0,0087	0,9802
UK 15S03	1,9165	0,0052	0,9962	UK 30S12	6,5015	0,0136	0,9738
UK 15S06	3,5881	0,0068	0,9874	UK 30S15	7,9059	0,0152	0,9753

*Karışım adları içeriklerindeki n-SiO₂ ve UK oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin; UK15S06 %15 UK ikame edilmiş ve %0,6 oranında n-SiO₂ katkılı anlamına gelmektedir.

4.3 Harç Karışımlarının Permeasyon Enjeksiyon Basıncı Davranışları

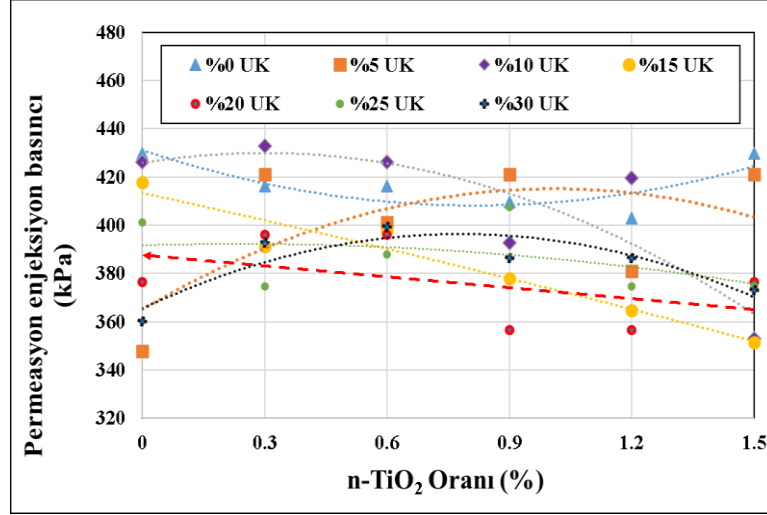
Permeasyon enjeksiyon uygulamalarında harcın zeminde akma ve yayılma karakteristiğini etkileyen etkin enjeksiyon basıncı doğrudan harcın reolojisine (Plastik viskozite ve akma gerilmesi) ve akma debisine bağlıdır. Bu sebepten enjeksiyon harcının reolojisinin permeasyon enjeksiyon analizlerinde değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple tez önerimiz kapsamında elde ettiğimiz reolojik parametrelerin uygulama açısından nasıl bir anlam ifade ettiğini anlamak ve ön çalışma kapsamında hazırlanmış harç karışımlarının viskozite değişimlerinin enjeksiyon basıncını nasıl etkilediğini görmek için Raffle ve Greenwood (1961) tarafından sunulmuş bir yaklaşımla bazı hesaplamalar yapılmıştır. Permeasyon enjeksiyonun zeminde akışı basit matematiksel eşitliklerle kolaylıkla hesaplanabilir. Enjeksiyonun zemin içerisinde daneler arası boşlukları doldurabilmesi ve ilerleyebilmesi için gerekli enjeksiyon basıncının hesaplanmasına bağlı olarak hazırlanmış matematiksel yaklaşım küresel akma davranışı prensibine göre eşitlikler (2.8) ve (2.11) de verildiği gibidir (bkz. Şekil 2.8 - Şekil 2.9).

4.3.1 Nano titanyum oksit (n-TiO₂) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basıncı davranışları

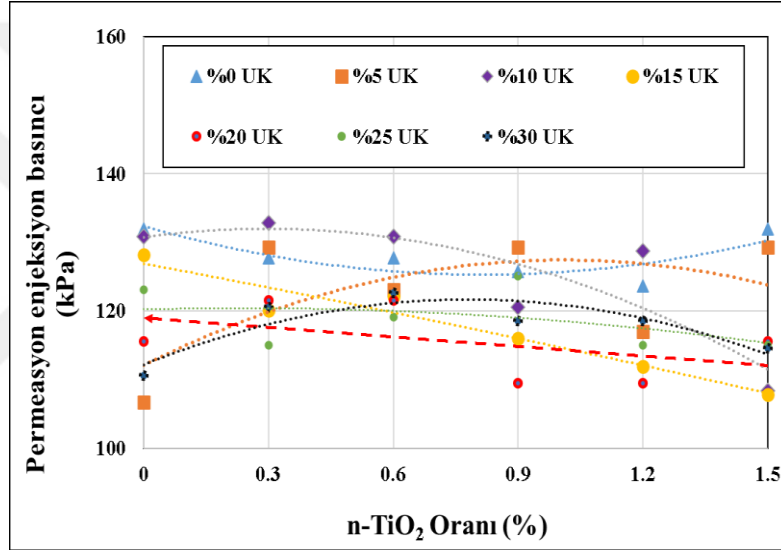
Harç karışımların viskozite değerlerinin değişiminin enjeksiyon basıncını nasıl etkilediğini belirleyebilmek için, analitik hesapta bazı parametreler sabit tutulmuştur. Sabit tutulan parametreler ve değerleri; $Q= 0,01 \text{ m}^3/\text{sn}$, $\gamma=14,22 \text{ kN/m}^3$, $R_0=0,02 \text{ m}$, $R=2,0 \text{ m}$, $m=0.6 \text{ m}$ ve $k=0,006 \text{ m/sn}$ 'dir. Şekil 4.33'de Nano TiO₂ değişim miktarına bağlı %0 UK ile %30 UK arasında katkılı karışımlar için harç enjeksiyon basıncı davranışları hem küresel akma modeline göre hem de radyal akma davranışına göre gösterilmiştir.

Şekil 4.33 incelendiğinde nano TiO₂ katkı oranının çimento bazlı harçların akışkanlık özellikleri ve dolayısıyla enjeksiyon basıncı üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Şekil 4.33'e göre bu çalışma kapsamında belirlenmiş nano malzeme katkı oranlarının incelenmesi gereken aralıkta olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.33-a'da görüleceği üzere küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (430 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 n- TiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (336 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında

%1,5 n-TiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 94 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %22 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (410 kPa) yaklaşık %0,9 n-TiO₂ katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda daha farklı şekilde gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.33-b'de açıkça görüleceği üzere, enjeksiyon basıncının tüm UK oranlarında hazırlanmış karışımlarda %0,6 n-TiO₂ katkı oranından sonraki oranlarda doğrusal olmayan bir davranışla düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.33-b'de görüleceği üzere radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (132 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 n-TiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (105 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 n-TiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 27 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %21 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (125 kPa) yaklaşık %0,6 n-TiO₂ katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda daha farklı şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 4.33-b'de açıkça görüleceği üzere, enjeksiyon basıncının tüm UK oranlarında hazırlanmış karışımlarda %0,6 n-TiO₂ katkı oranından sonraki oranlarda doğrusal olmayan bir davranışla düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.33. n-TiO₂ katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b)

Bu sebeple bu davranışlar incelendiğinde, mevcut tez önerimiz harç karışımların reolojik özelliklerinin mineral katkısı ve nano partiküler malzemelerin beraber kullanımıyla ne denli etkileneceğini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çimento esaslı harç enjeksiyonlarının zemin iyileştirmelerde permeasyon enjeksiyon olarak uygulanması ile harç karışımlarının zeminde küresel ya da radyal yayılacağı kabul edilmektedir. En gerçekçi davranışın ise küresel olacağı düşünülmektedir. Şekil 4.33'den açıkça görüleceği üzere radyal akış modelinden elde edilen enjeksiyon basınçları küresel akış modelinden elde edilen basınçlara göre oldukça düşüktür. Burada değerlendirmenin sahada uygulamayı tasarlayacak ve imalatı gerçekleştirecek mühendisin saha ve zemin şartlarına göre belirlemesi daha gerçekçi olacaktır. Bu

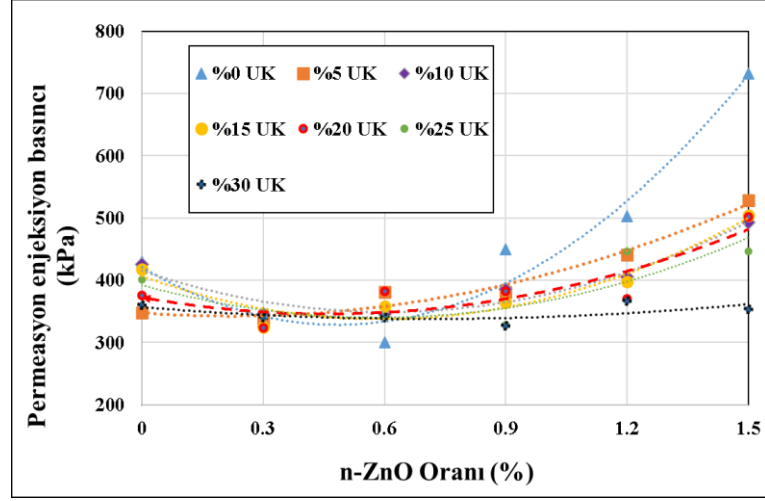
çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait reolojik davranışların hem radyal hem de küresel akma modellerinde benzer davranışlar göstermesi, harçların reolojik parametrelerinin enjeksiyon basınçları üzerinde ne kadar etkili ve önemli olduğu göstermiştir.

4.3.2 Nano çinko oksit (n-ZnO) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları

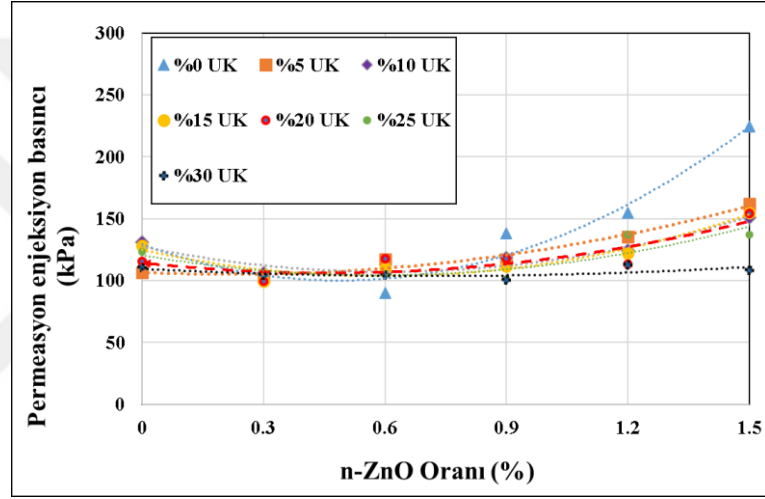
Harç karışımların viskozite değerlerinin değişiminin enjeksiyon basıncını nasıl etkilediğini belirleyebilmek için, analitik hesapta bazı parametreler sabit tutulmuştur. Sabit tutulan parametreler ve değerleri; $Q= 0,01 \text{ m}^3/\text{sn}$, $\gamma=14,22 \text{ kN/m}^3$, $R_o=0,02 \text{ m}$, $R=2,0 \text{ m}$, $m=0,6 \text{ m}$ ve $k=0,006 \text{ m/sn}$ 'dir. Şekil 4.33'de Nano ZnO değişim miktarına bağlı %0 UK ile %30 UK arasında katkılı karışımlar için harç enjeksiyon basıncı davranışları hem küresel akma modeline göre hem de radyal akma davranışına göre gösterilmiştir.

Şekil 4.34 incelendiğinde nano ZnO katkı oranının çimento bazlı harçların akışkanlık özellikleri ve dolayısıyla enjeksiyon basıncı üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Şekil 4.34'e göre bu çalışma kapsamında belirlenmiş nano malzeme katkı oranlarının incelenmesi gereken aralıkta olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.34-a'da görüleceği üzere küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (740 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 nano ZnO katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (340 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %0,6 n-ZnO katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 400 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %57 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (350 kPa) yaklaşık %0,6 nano çinko oksit katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle tüm karışımlarda %0,6 n-ZnO ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlarına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-ZnO ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,6 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak

küresel akma modelinde %0,6 n-ZnO ilavesi hem mineral katkılı hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.34-b'de açıkça görüleceği üzere, silindirik (radyal) akma modelinde enjeksiyon basıncının küresel akma modeliyle beklendiği üzere benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.34-b'de görüleceği üzere radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (225 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 n-ZnO katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (100 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %0,6 n-ZnO katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 125 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %56 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle tüm karışımlarda %0,6 n-ZnO ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-ZnO ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,6 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde %0,6 n-ZnO ilavesi hem mineral katkılı hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.34. n-ZnO katkı oranlarında küresel yayılım (a) radyal yayılım (b)

Bu sebeple bu davranışlar incelendiğinde, mevcut tez önerimiz harç karışımların reolojik özelliklerinin mineral katkısı ve nano partiküler malzemelerin beraber kullanımıyla ne denli etkileneceğini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çimento esaslı harç enjeksiyonlarının zemin iyileştirmelerde permeasyon enjeksiyon olarak uygulanması ile harç karışımlarının zeminde küresel ya da radyal yayılacağı kabul edilmektedir. En gerçekçi davranışın ise küresel olacağı düşünülmektedir. Şekil 4.34'ten açıkça görüleceği üzere radyal akış modelinden elde edilen enjeksiyon basınçları küresel akış modelinden elde edilen basınçlara göre oldukça düşüktür. Burada değerlendirmenin sahada uygulamayı tasarlayacak ve imalatı gerçekleştirecek mühendisin saha ve zemin şartlarına göre belirlemesi daha gerçekçi olacaktır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait reolojik davranışların hem radyal hem de

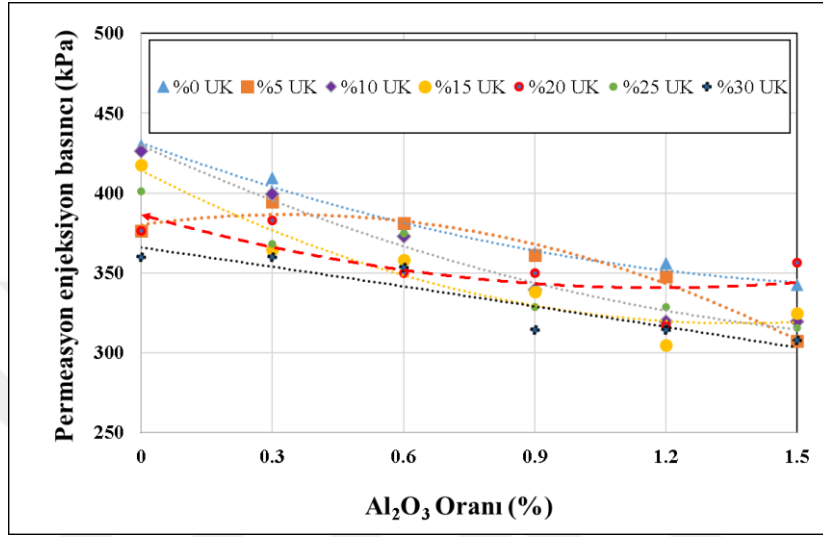
küresel akma modellerinde benzer davranışlar göstermesi, harçların reolojik parametrelerinin enjeksiyon basınçları üzerinde ne kadar etkili ve önemli olduğu göstermiştir.

4.3.3 Nano alümina ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$) katkı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları

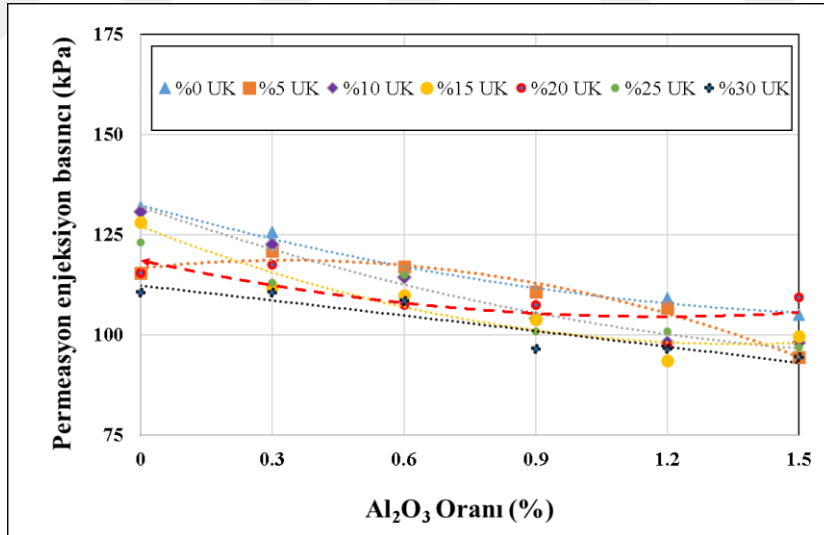
Harç karışımların viskozite değerlerinin değişiminin enjeksiyon basıncını nasıl etkilediğini belirleyebilmek için, analitik hesapta bazı parametreler sabit tutulmuştur. Sabit tutulan parametreler ve değerleri; $Q= 0,01 \text{ m}^3/\text{sn}$, $V=14,22 \text{ kN/m}^3$, $R_0=0,02 \text{ m}$, $R=2,0 \text{ m}$, $m=0,6 \text{ m}$ ve $k=0,006 \text{ m/sn}$ 'dir. Şekil 4.34'te Nano Al_2O_3 değişim miktarına bağlı %0 UK ile %30 UK arasında katkı karışımlar için harç enjeksiyon basıncı davranışları hem küresel akma modeline göre hem de radyal akma davranışına göre gösterilmiştir.

Şekil 4.35 incelendiğinde nano Al_2O_3 katkı oranının çimento bazlı harçların akışkanlık özellikleri ve dolayısıyla enjeksiyon basıncı üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Şekil 4.35'e göre bu çalışma kapsamında belirlenmiş nano malzeme katkı oranlarının incelenmesi gereken aralıkta olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.35-a'da görüleceği üzere küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (430 kPa) mineral katkısız karışımların %0 nano Al_2O_3 katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (300 kPa) ise %30 mineral katkı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 130 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %30 azalmıştır. Bu durum mineral katkı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (430 kPa) yaklaşık %0 nano alümina katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle tüm karışımlarda $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ ilavesinin enjeksiyon basınçlarını azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkı veya katkısız tüm karışımlarda $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de tüm nano alümina katkılarında benzer eğilimler göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 4.35-b'de açıkça görüleceği üzere, silindirik (radyal) akma modelinde enjeksiyon basıncının

küresel akma modeliyle beklendiği üzere benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.35-b’de görüleceği üzere radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (135 kPa) mineral katkısız karışımların %0 n-Al₂O₃ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (90 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 n-Al₂O₃ katkısında hesaplandığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.35. n-Al₂O₃ katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b)

En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 45 kPa’dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %33 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle küresel akma modelinde olduğu gibi tüm

karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesinin enjeksiyon basınçlarını azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de tüm nano alümina katkılarında benzer eğilimler göstermektedir.

Bu sebeple bu davranışlar incelendiğinde, mevcut tez önerimiz harç karışımların reolojik özelliklerinin mineral katkısı ve nano partiküler malzemelerin beraber kullanımıyla ne denli etkileneceğini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çimento esaslı harç enjeksiyonlarının zemin iyileştirmelerde permeasyon enjeksiyon olarak uygulanması ile harç karışımlarının zeminde küresel ya da radyal yayılacağı kabul edilmektedir. En gerçekçi davranışın ise küresel olacağı düşünülmektedir. Şekil 4.35'ten açıkça görüleceği üzere radyal akış modelinden elde edilen enjeksiyon basınçları küresel akış modelinden elde edilen basınçlara göre oldukça düşüktür. Burada değerlendirmenin sahada uygulamayı tasarlayacak ve imalatı gerçekleştirecek mühendisin saha ve zemin şartlarına göre belirlemesi daha gerçekçi olacaktır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait reolojik davranışların hem radyal hem de küresel akma modellerinde benzer davranışlar göstermesi, harçların reolojik parametrelerinin enjeksiyon basınçları üzerinde ne kadar etkili ve önemli olduğu göstermiştir.

4.3.4 Nano silika (n-SiO₂) katkılı karışımlar- permeasyon enjeksiyon basınç davranışları

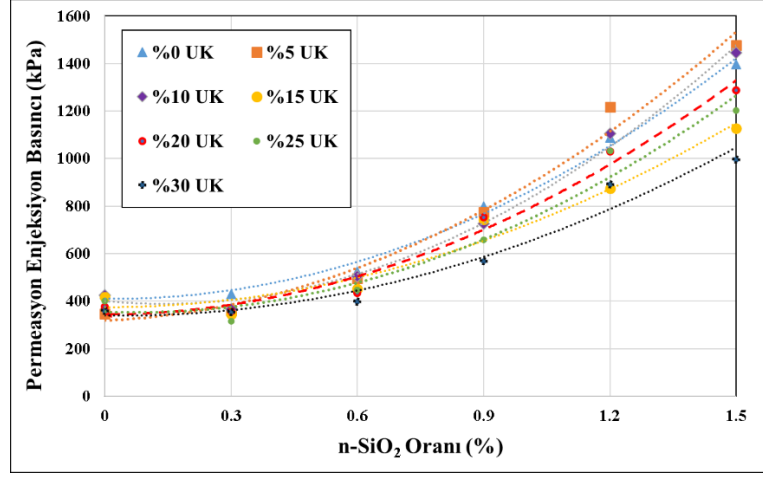
Harç karışımların viskozite değerlerinin değişiminin enjeksiyon basıncını nasıl etkilediğini belirleyebilmek için, analitik hesapta bazı parametreler sabit tutulmuştur. Sabit tutulan parametreler ve değerleri; $Q= 0,01 \text{ m}^3/\text{sn}$, $\gamma=14,22 \text{ kN/m}^3$, $R_0=0,02 \text{ m}$, $R=2,0 \text{ m}$, $m=0,6 \text{ m}$ ve $k=0,006 \text{ m/sn}$ 'dir. Şekil 4.35'te Nano SiO₂ değişim miktarına bağlı %0 UK ile %30 UK arasında katkılı karışımlar için harç enjeksiyon basıncı davranışları hem küresel akma modeline göre hem de radyal akma davranışına göre gösterilmiştir.

Şekil 4.36 incelendiğinde nano SiO₂ katkı oranının çimento bazlı harçların akışkanlık özellikleri ve dolayısıyla enjeksiyon basıncı üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir.

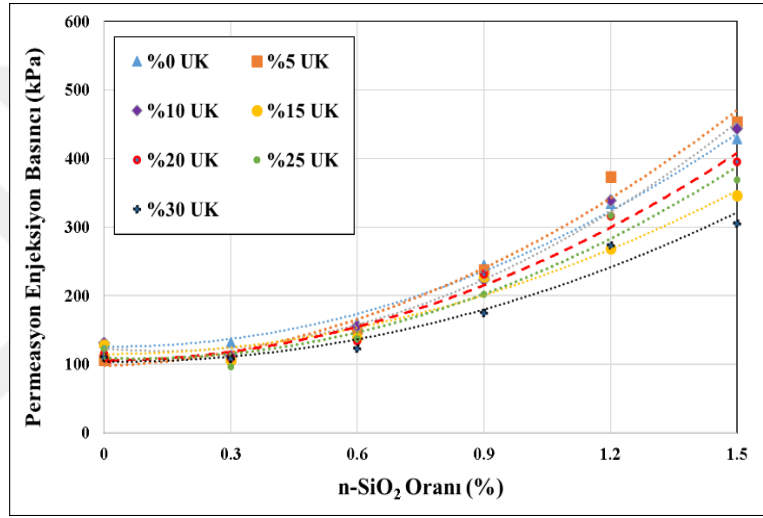
Şekil 4.36'ya göre bu çalışma kapsamında belirlenmiş nano malzeme katkı oranlarının incelenmesi gereken aralıkta olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.36-a'da görüleceği üzere küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (1477 kPa) %5 UK mineral katkılu karışımın %1,5 nano SiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (350 kPa) ise %30 mineral katkılu (uçucu kül) harç karışımlarında %0,3 n-SiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 1127 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %76 azalmıştır. Bu durum mineral katkılu harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (429 kPa) yaklaşık %0,3 nano silika katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılu harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle tüm karışımlarda %0,3 n-SiO₂ ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılu veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılu veya katkısız tüm karışımlarda n-SiO₂ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,3 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde %0,3 n-SiO₂ ilavesi hem mineral katkılu hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.36-b'de açıkça görüleceği üzere, silindirik (radyal) akma modelinde enjeksiyon basıncının küresel akma modeliyle beklendiği üzere benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.36-b'de görüleceği üzere radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (453 kPa) %5 UK mineral katkılu karışımın %1,5 nano SiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (100 kPa) ise %30 mineral katkılu (uçucu kül) harç karışımlarında %0,3 n-SiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 353 kPa'dır ve bir diğer deyişle yaklaşık %78 azalmıştır. Bu durum mineral katkılu harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle tüm karışımlarda %0,3 n-SiO₂ ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılu veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılu veya katkısız tüm karışımlarda n-SiO₂ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,3 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde %0,3 n-SiO₂ ilavesi hem mineral katkılu hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir. Bu orandan sonraki hesaplanacak olan tüm basınçlar n-SiO₂ miktarına bağlı

olarak artış gösterecektir. Dolayısı ile enjeksiyon esnasında akışkanlığa çok fazla bir pozitif katkısı olmayacaktır. Mineral katkısı olarak UK kullanımı ise beklenen şekilde akışkanlığı artıran etki göstermektedir. Bu durum n-SiO₂'in yoğunluğunun hem diğer nano malzemelerden hem de uçucu külden daha düşük olması ile açıklanabilir. Aynı ağırlıkta hacimsel olarak daha fazla yer kaplaması ve elektriksel çekimlere daha fazla kalması ve yüzeyinde daha fazla su iyonları tutması sebebiyle akışkanlığı azaltmaktadır.

Bu sebeple bu davranışlar incelendiğinde, mevcut tez önerimiz harç karışımların reolojik özelliklerinin mineral katkısı ve nano partiküler malzemelerin beraber kullanımıyla ne denli etkileneceğini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çimento esaslı harç enjeksiyonlarının zemin iyileştirmelerde permeasyon enjeksiyon olarak uygulanması ile harç karışımlarının zeminde küresel ya da radyal yayılacağı kabul edilmektedir. En gerçekçi davranışın ise küresel olacağı düşünülmektedir. Şekil 4.36'dan açıkça görüleceği üzere radyal akış modelinden elde edilen enjeksiyon basınçları küresel akış modelinden elde edilen basınçlara göre oldukça düşüktür. Burada değerlendirmenin sahada uygulamayı tasarlayacak ve imalatı gerçekleştirecek mühendisin saha ve zemin şartlarına göre belirlemesi daha gerçekçi olacaktır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait reolojik davranışların hem radyal hem de küresel akma modellerinde benzer davranışlar göstermesi, harçların reolojik parametrelerinin enjeksiyon basınçları üzerinde ne kadar etkili ve önemli olduğunu göstermiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.36. n-SiO₂ katkı oranlarında küresel yayılım (a) ve radyal yayılım (b)

4.4 Harç Karışımlarının Stabilite-Çökelleme (Bleeding) Davranışları

Harç karışımların stabilite özelliklerini tanımlamak amacıyla bleeding (çökelleme) deneyleri yapılmıştır. 1000 ml hacme ve 60 mm çapa sahip silindirik bir dereceli kaba aktarılan harç karışımların, 2 saat süre içerisinde çökelleme miktarları belirlenmiştir (bkz. Fotoğraf 3.7). Çökelen hacmin toplam hacme oranı bleeding oranı olarak tanımlanır (Deere, 1982). Bu oranın yüksek olması, harç karışımların yüksek hızlarda enjeksiyonu esnasında, süspansiyon halindeki partiküllerin toplanmasına ve bunun sonucu olarak yüksek kayma hızlarında dahi düşük akışkanlıklar elde edilmesine sebebiyet verecektir. Bu sebeple yüksek bleeding değerleri iyi bir akışkanlık için istenmeyen bir durumdur ve harç karışımların reolojisini doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu tez kapsamında

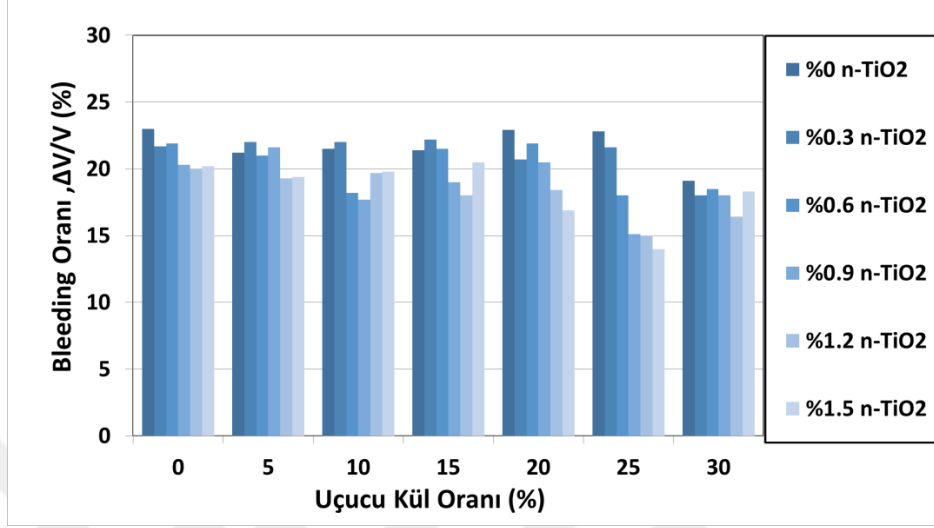
UK mineral katkılı ve 4 farklı nano partiküler malzeme ile çeşitli katkı oranlarında s/b=1 olacak şekilde hazırlanmış çimento esaslı harç karışımlarının çökeltme-stabilite (bleeding) davranışları incelenmiştir ve bulgular aşağıda alt başlıklarda tek tek verilerek tartışılmıştır.

4.4.1 Nano titanyum oksit (n-TiO₂) katkılı karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları

Tez kapsamında, s/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında Nano Titanyum oksit (n-TiO₂) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde çökeltme (bleeding) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışımların stabilitesini ifade eden bleeding değerleri belirlenmiştir. Tüm karışımlara ait bleeding çökeltme değerleri Şekil 4.37’de görülmektedir.

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere n-TiO₂ katkılı ve katkısız tüm karışımların bleeding değerleri 900 ml’nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Bu durum harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökeltme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışının (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Diğer bir deyişle yüksek kayma oranlarında (Bu durum enjeksiyon uygulamalarında yüksek enjeksiyon basınç durumunu da temsil etmektedir) yüksek kayma gerilmeleri ve buna bağlı olarak yüksek görünür viskozite değerlerinin gelişmesi olarak ortaya çıkmıştır. Bleeding değerlerinin bu denli yüksek olmasının sebebi yüksek kabul edilen su-bağlayıcı (s/b=1) oranının kullanılması olarak açıklanır. Bu su-bağlayıcı oranı genellikle zemin iyileştirme uygulamalarında permeasyon enjeksiyon yönteminde kullanılan bir değerdir. Şekil 4.37’de açıkça görüldüğü üzere harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı karışımlarda n-TiO₂ ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma

gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-TiO₂ ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde küçükte olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir.



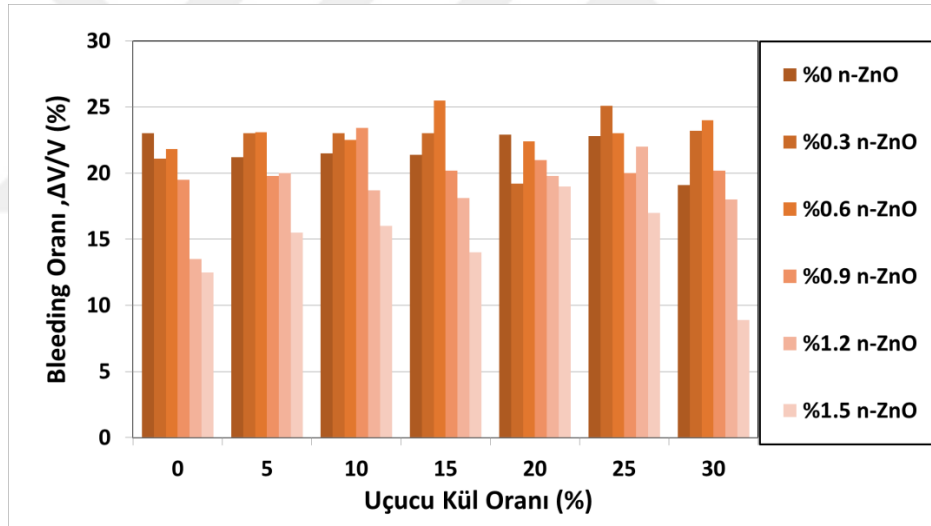
Şekil 4.37. n-TiO₂ katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri

4.4.2 Nano çinkooksit (n-ZnO) katkılı karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları

Tez kapsamında, s/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında Nano Çinko oksit (n-ZnO) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde çökme (bleeding) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışımların stabilitesini ifade eden bleeding değerleri belirlenmiştir. Tüm karışımlara ait bleeding çökme değerleri Şekil 4.38’de görülmektedir.

Şekil 4.38’de görüldüğü üzere n-ZnO katkılı ve katkısız tüm karışımların bleeding değerleri 900 ml’nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Sadece %30 UK mineral katkılı %1,5 n-ZnO ilave edilmiş karışımda bu oranın üzerinde kalmıştır. Bleeding oranının %10’nun üstünde olma durumu harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran

kayma gerilme davranışının (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Diğer bir deyişle yüksek kayma oranlarında (Bu durum enjeksiyon uygulamalarında yüksek enjeksiyon basınç durumunu da temsil etmektedir) yüksek kayma gerilmeleri ve buna bağlı olarak yüksek görünür viskozite değerlerinin gelişmesi olarak ortaya çıkmıştır. Bleeding değerlerinin bu denli yüksek olmasının sebebi yüksek kabul edilen su-bağlayıcı ($s/b=1$) oranının kullanılması olarak açıklanır. Bu su-bağlayıcı oranı genellikle zemin iyileştirme uygulamalarında permeasyon enjeksiyon yönteminde kullanılan bir değerdir. Şekil 4.38’de açıkça görüldüğü üzere harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı karışımlarda n-ZnO ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-ZnO ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde küçüğe olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir.



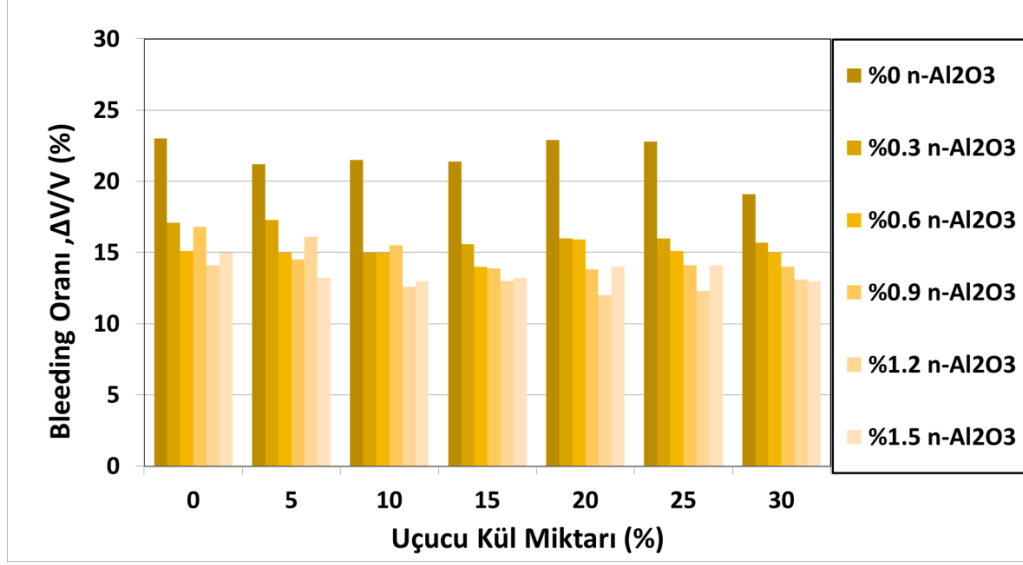
Şekil 4.38. n-ZnO katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri

4.4.3 Nano alümina ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$) katkılı karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları

Tez kapsamında, $s/b=1,0$ oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında Nano Alümina ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde çökme (bleeding) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler

sonucunda karışımların stabilitesini ifade eden bleeding değerleri belirlenmiştir. Tüm karışımlara ait bleeding çökeltme değerleri Şekil 4.39'da görülmektedir.

Şekil 4.39'da görüldüğü üzere n-Al₂O₃ katkılı ve katkısız tüm karışımların bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Fakat n-Al₂O₃ katkılı karışımlarda elde edilen bleeding oranları hem n-TiO₂'te elde edilen hemde n-ZnO'te elde edilen bleeding oranlarından daha düşük sonuçlar vermiştir. Bir deyişle Stabiliteye katkı açısından n-Al₂O₃ diğer iki nano katkı malzemesine kıyasla daha etkili olmuştur. Bleeding oranının %10'nun üstünde olma durumu harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökeltme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışının (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Diğer bir deyişle yüksek kayma oranlarında (Bu durum enjeksiyon uygulamalarında yüksek enjeksiyon basınç durumunu da temsil etmektedir) yüksek kayma gerilmeleri ve buna bağlı olarak yüksek görünür viskozite değerlerinin gelişmesi olarak ortaya çıkmıştır. Bleeding değerlerinin bu denli yüksek olmasının sebebi yüksek kabul edilen su-bağlayıcı (s/b=1) oranının kullanılması olarak açıklanır. Bu su-bağlayıcı oranı genellikle zemin iyileştirme uygulamalarında permeasyon enjeksiyon yönteminde kullanılan bir değerdir. Şekil 4.39'da açıkça görüldüğü üzere harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-Al₂O₃ ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde diğer nano malzemeler gibi küçükte olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir.



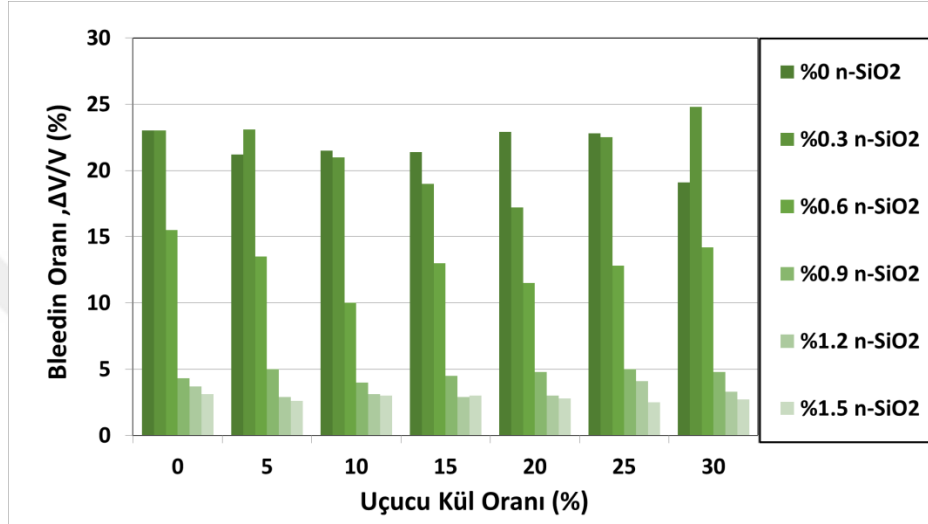
Şekil 4.39. n-Al₂O₃ katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri

4.4.4 Nano silika (n-SiO₂) katkılı karışımlar- stabilite (Bleeding) davranışları

Tez kapsamında, s/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında Nano Silika (n-SiO₂) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde çökme (bleeding) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışımların stabilitesini ifade eden bleeding değerleri belirlenmiştir. Tüm karışımlara ait bleeding çökme değerleri Şekil 4.40'da görülmektedir.

Şekil 4.40'da görüldüğü üzere mineral katkılı ve katkısız %0,9 ve üzeri oranlarda n-SiO₂ katkılı harçların bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı altında) üstünde kalmıştır. Bunların dışındaki diğer karışımlarda bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Bu davranış bundan önce bahsedilmiş tüm nano katkı malzemelerinin davranışından farklı gelişmiştir. Bleeding oranının %10'nun üstünde olma durumu harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışın (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Diğer bir deyişle

yüksek kayma oranlarında (Bu durum enjeksiyon uygulamalarında yüksek enjeksiyon basınç durumunda temsil etmektedir) yüksek kayma gerilmeleri ve buna bağlı olarak yüksek görünür viskozite değerlerinin gelişmesi olarak ortaya çıkmıştır. Bleeding değerlerinin bu denli yüksek olmasının sebebi yüksek kabul edilen su-bağlayıcı (s/b=1) oranın kullanılması olarak açıklanır. Bu su-bağlayıcı oranı genellikle zemin iyileştirme uygulamalarında permeasyon enjeksiyon yönteminde kullanılan bir değerdir.



Şekil 4.40. n-SiO₂ katkı oranlarında ve farklı UK katkılarında stabilite değerleri

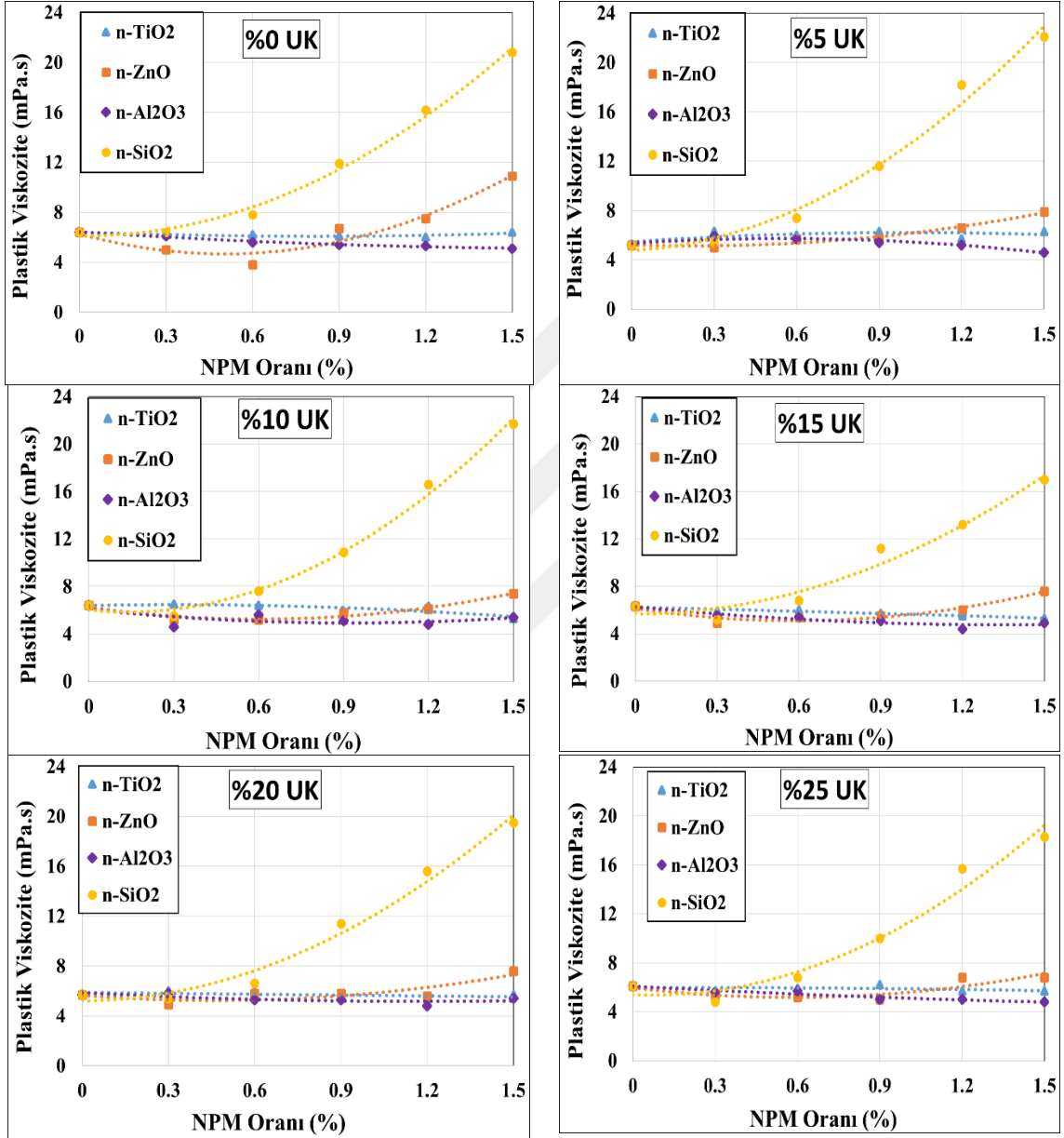
Şekil 4.40'da açıkça görüldüğü üzere harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin diğer nano malzemelerde olduğu gibi bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı ve katkısız karışımlarda n-SiO₂ ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-SiO₂ ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde diğer nano malzemeler gibi küçükte olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir. Tüm bunlara ek olarak %0,9 oranında ve daha fazlasında katkı olarak kullanılacak n-SiO₂'in harç karışımlarının bleeding oranını %10'un altına çekmesinden dolayı bu karışımların stabil duruma geçmesine katkı sağlamıştır. Bu davranışın aynı zamanda harç karışımların reolojik parametrelerinden biri olan akma gerilmesinin (kohezyon) diğer nano malzeme katkılı karışımlara kıyasla n-SiO₂ katkılı karışımlarda daha yüksek çıkmasıyla ilişkili olduğu varsayılmaktadır.

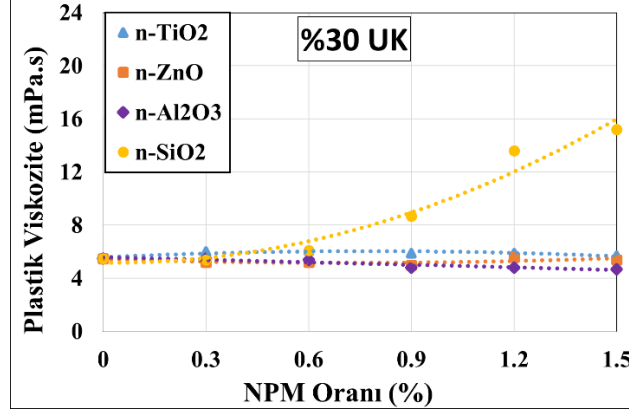
4.5 Nano Partiküler Malzemelerin Reolojik Parametreler Üzerindeki Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi

Tez kapsamında, w/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında 4 farklı Nano partiküler malzeme (n-SiO₂, n-TiO₂, n-ZnO ve n-Al₂O₃) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde reoloji deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışımların akışkanlık davranışlarını temsil eden plastik viskozite ve akma gerilmesi değerleri belirlenmiştir. Tüm karışımlara ait plastik viskozite ve akma gerilmesi Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de görülmektedir.

Şekil 4.41’de açıkça görüldüğü üzere 4 farklı nano malzemenin değişik katkı oranlarında farklı UK mineral katkılarına bağlı olarak çimento esaslı harçların plastik viskozite değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere her bir nano malzeme için plastik viskozite değerleri farklı UK katkılarına bağlı olarak ciddi farklar göstermektedir. Tüm UK karışımlarında n-SiO₂ için plastik viskozite değerleri diğer nano malzemelerden çok farklı olarak nano malzeme oranındaki artışa bağlı ciddi artışlar göstermiştir. Bu durum n-SiO₂’in harç karışımlarında UK katkısından bağımsız olarak plastik viskoziteyi artırdığı ve bu sebeple akışkanlığı azalttığı anlamını taşımaktadır. Plastik viskozitedeki bu artış diğer nano malzemelere göre oldukça büyük değerler almıştır. Buradan çimento esaslı harçlara UK katkılı veya katkısız n-SiO₂ ilavesinin %0,3 oranından fazla katılması akışkanlık davranışları yönünden çok uygulanabilir görülmemektedir. Bir diğer nano malzeme olan n-ZnO için durum biraz daha farklı gerçekleşmiştir. Şekil 4.41’den de açıkça görüldüğü üzere UK katkısız harç karışımlarında %0,6 oranına kadar n-ZnO miktarındaki artış plastik viskozite değerlerini diğer tüm nano malzemelere kıyasla en düşük değerlere indirmiştir. Bu orandan sonraki katkı oranlarında ise plastik viskozite değerlerini artırmaya başlamış ve %0,9 oranından sonraki karışımlarda n-Al₂O₃ ve n-TiO₂ katkılarına kıyasla daha büyük plastik viskozite değerleri almaya başlamıştır. Fakat mineral katkısı olarak UK ikamesinin artması n-ZnO katkısının plastik viskoziteyi arttıran bölümünde bu parametreyi tekrar azaltmaya başlayarak, n-Al₂O₃ ve n-TiO₂ katkılarının plastik viskozite değerlerine yakın değerler almasını sağlamıştır. Dolayısı ile çimento esaslı harçlarda akışkanlığın arttırılmasını kontrol etmek amacıyla, n-ZnO malzemenin katkı

malzemesi olarak kullanılmasında bu nano malzemenin %0,6 oranına kadar UK katkısız kullanılması bu çalışmada kullanılmış tüm nano malzemelere kıyasla en elverişli katkı malzemesi olarak değerlendirilmiştir. %0,6 oranından fazla kullanılması durumunda ise mutlaka mineral katkı olarak UK ile kullanılması tavsiye edilmektedir.





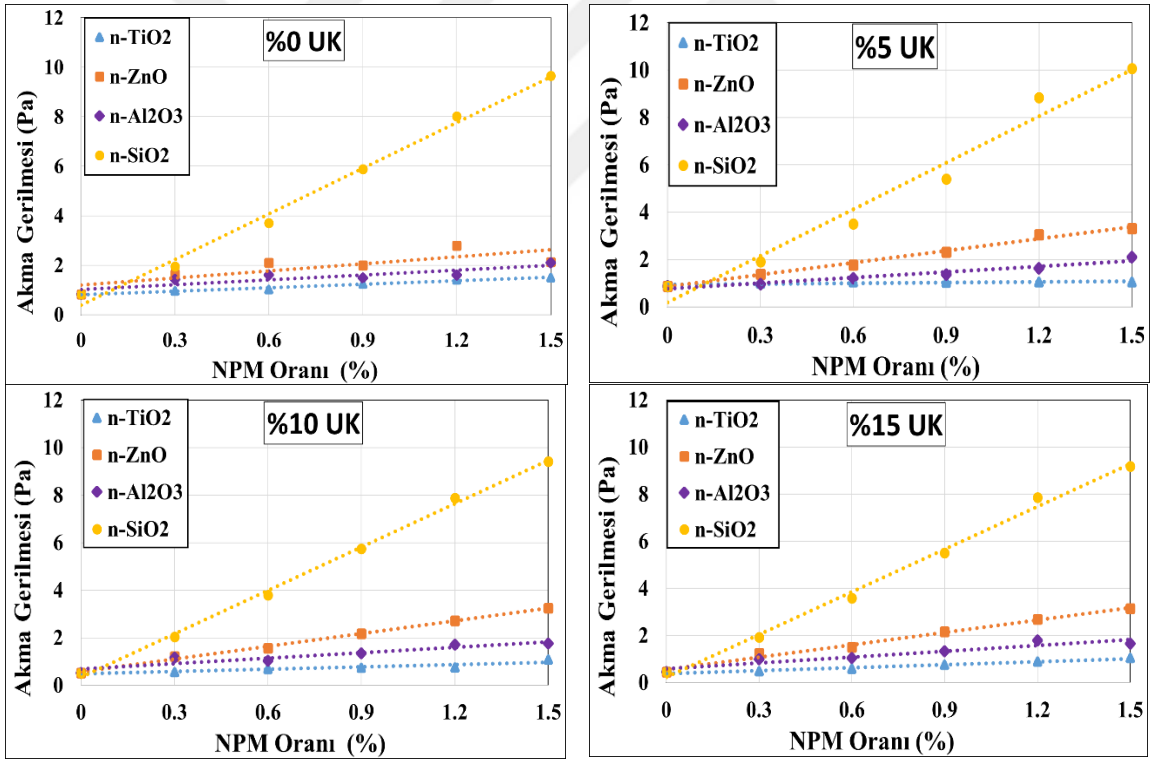
Şekil 4.41. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda plastik viskoziteye etkisi

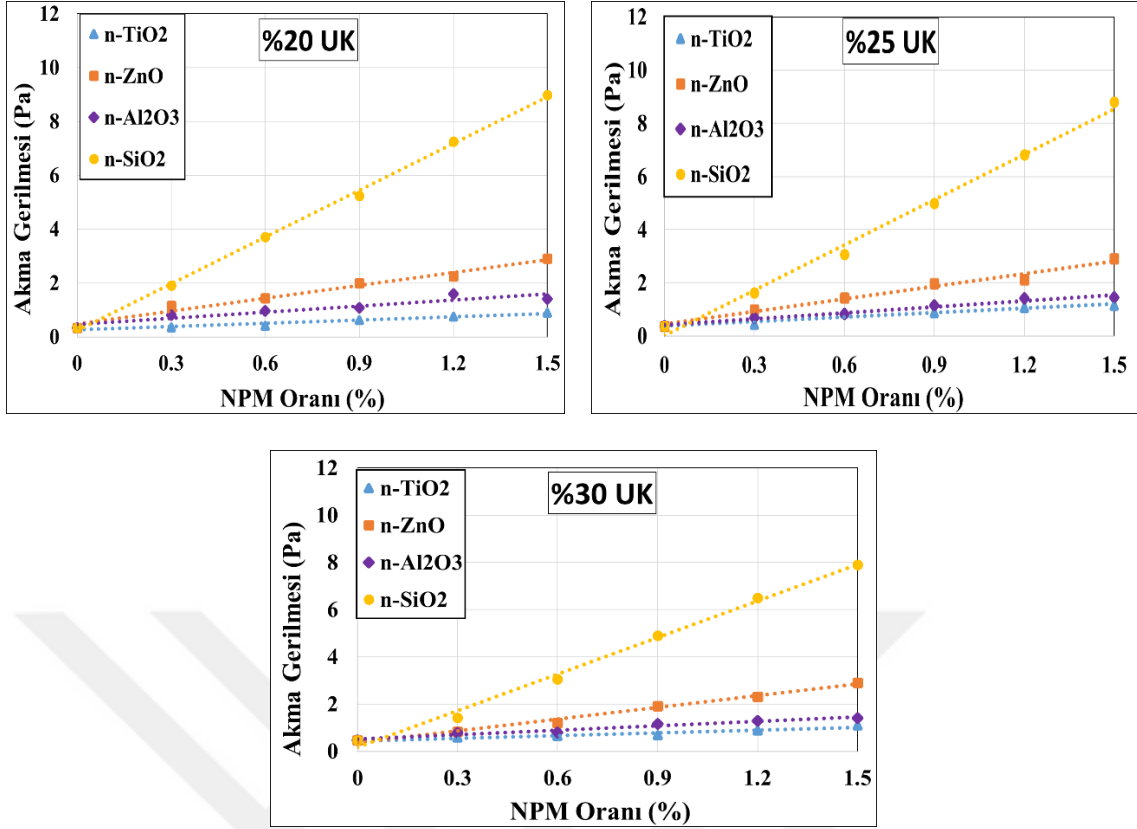
Diğer iki nano malzeme n-TiO₂ ve n-Al₂O₃ olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.41’de görüldüğü üzere bu iki nano malzemenin harç karışımları üzerindeki etkileri UK katkılı ve katkisız durumlarda benzer davranış olarak gözlemlenmiştir. Her iki nano malzemenin de ilave oranlarının artmasına bağlı plastik viskozite değerleri çok dikkate değer bir şekilde azalma veya artma eğilimi göstermemiştir. Belirli miktarda sadece bir miktar azalma eğilimi göstermişlerdir. Ayrıca bu nano malzemelerin UK ile harç karışımlarına katılmaları da sonuçları çok değiştirmemiştir. Nano alümina nano titanyum oksite göre ufak bir miktarda olsa nano malzeme artış oranına bağlı azalma eğiliminde bulunmuştur. Buna rağmen UK mineral katkılı karışımlar içerisinde en düşük plastik viskozite değerine %5 UK katkısı ve %1,5 n-Al₂O₃ katkı oranında ulaşılmıştır.

Şekil 4.42’de açıkça görüldüğü üzere 4 farklı nano malzemenin değişik katkı oranlarında farklı UK mineral katkılarına bağlı olarak çimento esaslı harçların akma gerilmesi değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere her bir nano malzeme için plastik viskozite değerleri farklı UK katkılarına bağlı olarak ciddi farklar göstermektedir. UK katkılı ve katkisız tüm karışımlarda nano malzeme oranının artışı akma gerilmelerinin doğrusal bir şekilde artmasına sebep olmuştur.

Şekil 4.42’de açıkça görüldüğü üzere tüm nano malzemeler içerisinde akma gerilmesi nano malzeme oranındaki artışa bağlı olarak ciddi miktarda artan nano partiküler malzeme n-SiO₂ olarak belirlenmiştir. UK katkılı veya UK katkisız farketmeden harç karışımlarında n-SiO₂ miktarı arttığında akma gerilmelerinde doğrusal olarak yüksek bir eğimle artış göstermektedir. Şekil 4.41’de de tartışıldığı üzere en yüksek plastik

viskozite değeri n-SiO₂ katkıli harçlarda tespit edilmiştir. Akma gerilmesindeki bu durum plastik viskozite davranışıyla paralellik arz etmektedir. Bunun aksine tüm UK katkıli veya katkısiz harç karışımlarında tüm nano malzeme miktarlarında en düşük akma gerilmeleri n-TiO₂ katkıli harçlarda tespit edilmiştir. Bir diğer taraftan harç karışımlarında UK miktarındaki artış tüm nano katkıli harçların belirli miktar (özellikle n-SiO₂ katkıli karışımlarda) akma gerilmesi değerlerini azaltsa da, akma gerilmesi davranışları üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olmamıştır. En büyük etkiyi n-SiO₂ katkıli karışımlar üzerinde göstermiştir. Bu durum çalışma kapsamında kullanılan UK'nın tanecik boyutlarının çimentonun tanecik boyutlarına yakın olması ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Akma gerilmesinin yükselmesi çimento esaslı harçların özellikle akmaya başlamadan hemen önceki durumda akmaya karşı direncin artması olarak ifade edilmektedir. Bu sebepten yüksek akışkanlık istenen karışımlarda bu değerlerin yükselmesi çok istenen bir durum değildir.





Şekil 4.42. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda akma gerilmesine etkisi

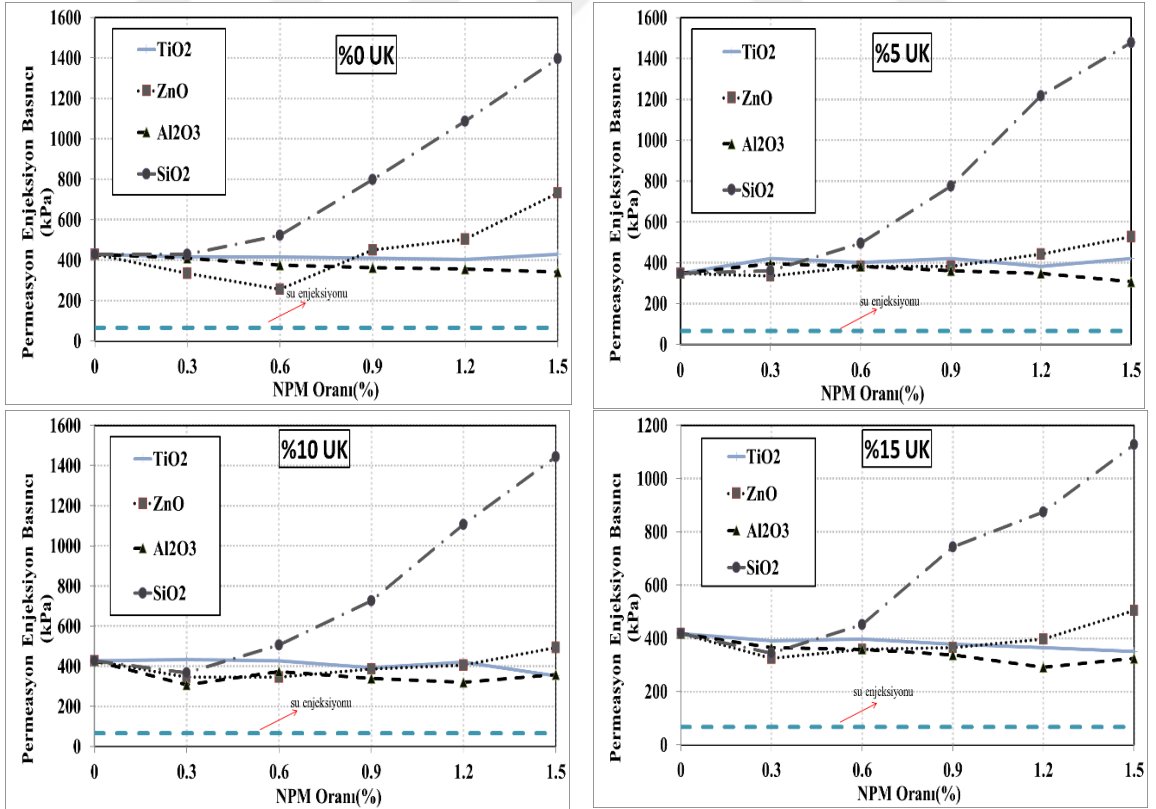
4.6 Nano Partiküler Malzemelerin Permeasyon Enjeksiyon Basıncı Üzerindeki Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi

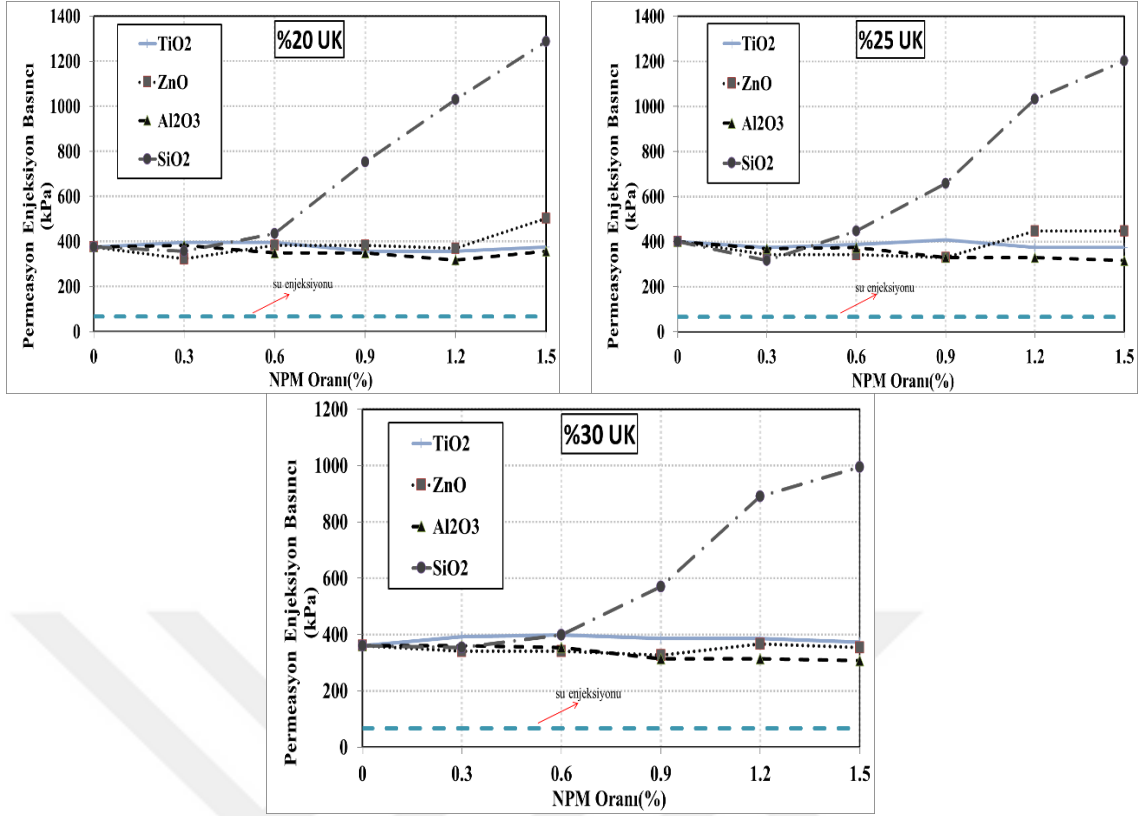
Tez kapsamında, w/b=1,0 oranında ağırlıkça farklı uçucu kül katkılarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) harç karışımlarına, deney programında katılan, bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında 4 farklı Nano partiküler malzeme (n-SiO₂, n-TiO₂, n-ZnO ve n-Al₂O₃) katılarak harç karışımları elde edilmiştir. Bu karışımlar üzerinde reoloji deneyleri yapılmış ve buradan özellikle karışımların plastik viskozite değerleri kullanılarak permeasyon enjeksiyon basınçları hesaplanmıştır. Bu hesaplamada iki akış modeli dikkate alınmıştır. Bunlar silindirik (radyal) akış ve küresel akış modelleridir. Tüm karışımlara ait küresel ve radyal akış modellerine göre hesaplanmış permeasyon enjeksiyon basınçlarındaki değişimler Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de görülmektedir.

Şekil 4.43'de görüldüğü üzere tüm karışımlarda nano malzeme oranı artışına bağlı permeasyon enjeksiyon basınçlarında en yüksek basınç değerleri yüksek plastik

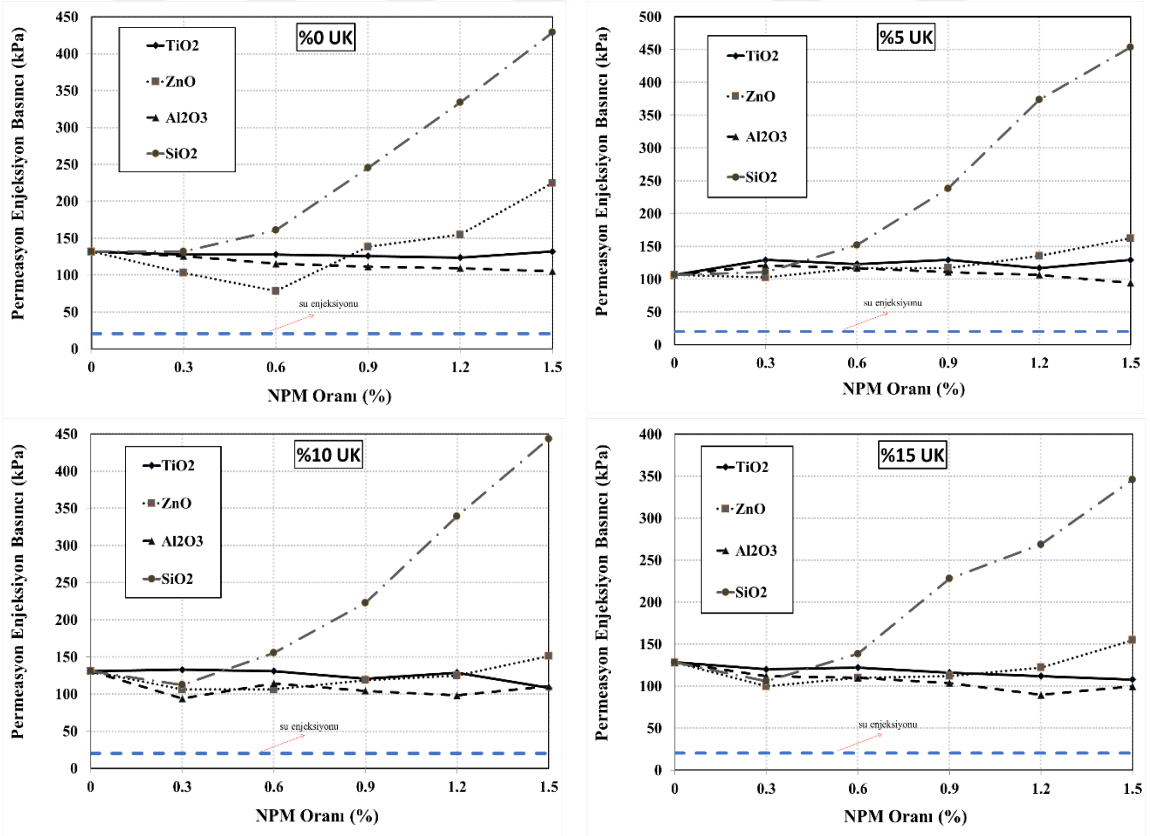
viskozite değerlerine sahip olması sebebiyle n-SiO₂ katkıli numunelerde gözlemlenmiştir. Nano silika artışı ile permeasyon enjeksiyon basınçları dikkate değer oranlarda artış göstermiştir. %15 UK katkısından sonra tüm UK katkı oranlarında n-SiO₂ katkıli harçlar enjeksiyon basınçlarında dikkate değer düşüşler gösterse de hala diğer 3 nano malzemeye kıyasla yüksek enjeksiyon basınçlarına sahiptirler. Bu durum mineral katkısı olan UK kullanımının bir etkisi olarak yorumlanmıştır. Nano silika katkıli harçlara ait en düşük enjeksiyon basıncı %30 UK mineral katkıli harç karışımlarında gözlemlenmiştir. Bu durum n-SiO₂ katkıli harçlarda enjeksiyon basıncının kontrolü açısından mineral katkı olarak UK kullanımının önemi göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 4.43'e göre n-ZnO katkıli karışımların enjeksiyon basınç davranışları incelendiğinde, nano silika katkıli harçlara göre oldukça farklı davranış sergilediği anlaşılmaktadır. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere tüm nano katkıli numuneler içerisinde, en düşük enjeksiyon basıncına UK katkısız ve %0,6 n-ZnO katkıli harçlarda ulaşıldığı görülmüştür. %0 UK katkısında %0,6'ya kadar n-ZnO katkıli harçlarda enjeksiyon basınçlarında belirli bir azalma gözlemlenirken, %0,6 n-ZnO ilavesinden sonraki karışımlarda n-ZnO ilavesinin enjeksiyon basınçlarını yükselttiği gözlemlenmiştir. Buradan n-ZnO katkıli harçlarda enjeksiyon basınçları açısından en elverişli durumun %0 UK katkısında ve %0,6 n-ZnO katkı oranında olduğu görülmektedir. %0,6 n-ZnO katkı oranından sonraki ilavelerde UK miktarının artması enjeksiyon basınçlarını belirli bir miktar aşağıya çekmiştir. Diğer taraftan n-TiO₂ ve n-Al₂O₃ katkıli harçların enjeksiyon basınç davranışları tüm UK katkıli ve katkısız karışımlarda neredeyse benzer davranışlar göstermişlerdir. Nano alümina katkıli harçların enjeksiyon basınçlarının tüm karışımlarda n-TiO₂ katkıli karışımlardan bir miktar düşük olduğu görülmektedir. Tüm bunlara ek olarak %30 UK mineral katkıli harçlarda, n-ZnO, n-TiO₂ ve n-Al₂O₃ ilave edilmiş harçların neredeyse benzer enjeksiyon basıncı davranışları gösterdiği Şekil 4.43'ten açıkça görülmektedir. Bu üçlü nano malzemeden ayrı n-SiO₂ katkıli harçlar ise tamamen farklı davranış sergileyerek en yüksek enjeksiyon basınçlarını geliştirmiştir. Şekil 4.43'te verilen tüm grafiklerde görüldüğü üzere, hiçbir katkı içermeyen sadece su enjeksiyonunun basınç değeri beklenildiği üzere deneysel programda hazırlanmış tüm karışımlardan çok daha düşük değer almıştır. Bu değer enjeksiyon uygulamasında olabilecek en düşük değeri temsil etmesi açısından, tüm karışımların enjeksiyon basınçlarını karşılaştırabileceğimiz bir veri olarak sunulmuştur. Bu değer sınır-limit değer olarak değerlendirilmelidir.

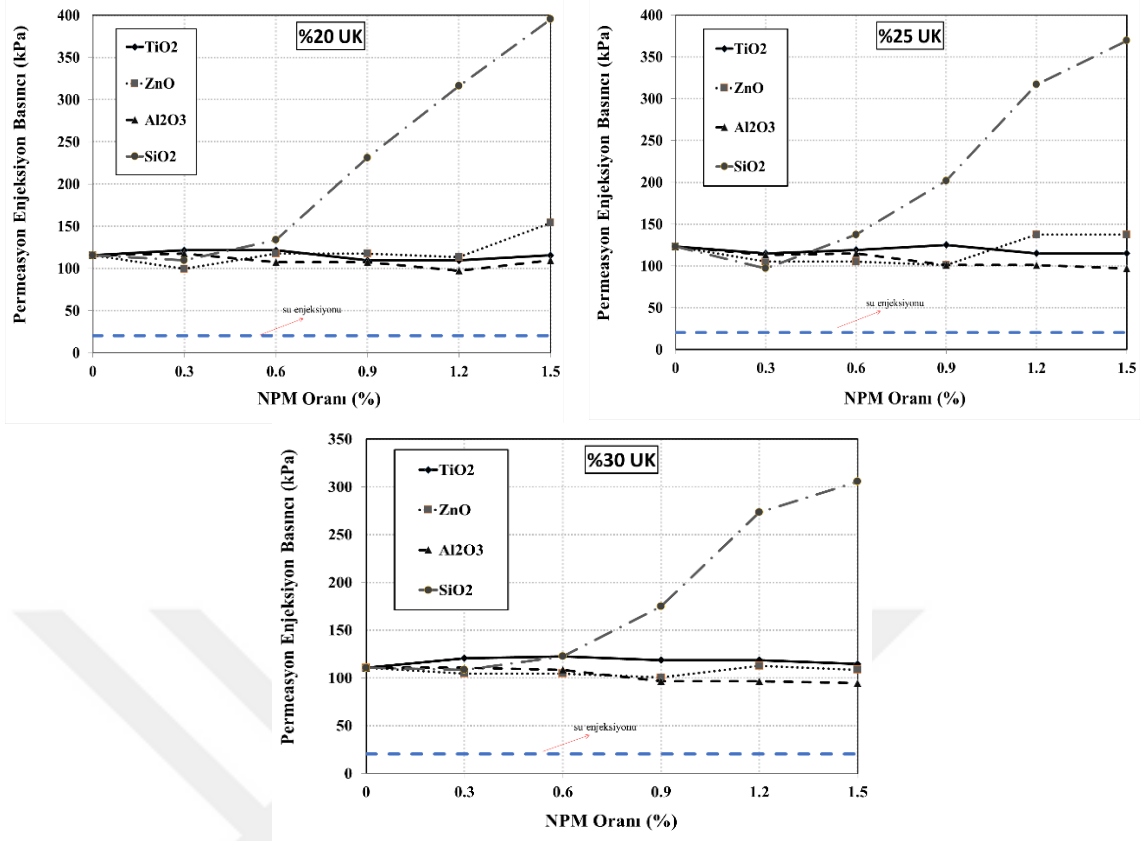
Şekil 4.43'te sunulmuş tüm enjeksiyon basınç davranışları benzer olarak silindirik (radyal) akış modelinde de gözlemlenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.44'te sunulmuştur. Bu sebeple bu davranışlar incelendiğinde, mevcut tezimizde harç karışımların reolojik özelliklerinin mineral katkısı ve nano partiküler malzemelerin beraber kullanımıyla ne denli etkileneceğini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çimento esaslı harç enjeksiyonlarının zemin iyileştirmelerde permeasyon enjeksiyon olarak uygulanması ile harç karışımlarının zeminde küresel ya da radyal yayılacağı kabul edilmektedir. En gerçekçi davranışın ise küresel olacağı düşünülmektedir. Şekil 4.44'ten açıkça görüleceği üzere radyal akış modelinden elde edilen enjeksiyon basınçları küresel akış modelinden elde edilen basınçlara göre oldukça düşüktür. Burada değerlendirmenin sahada uygulamayı tasarlayacak ve imalatı gerçekleştirecek mühendisin saha ve zemin şartlarına göre belirlemesi daha gerçekçi olacaktır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait reolojik davranışların hem radyal hem de küresel akma modellerinde benzer davranışlar göstermesi, harçların reolojik parametrelerinin enjeksiyon basınçları üzerinde ne kadar etkili ve önemli olduğunu göstermiştir.





Şekil 4.43. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda küresel akma modeline etkisi





Şekil 4.44. 4 farklı nano malzemenin farklı katkılarda radyal akma modeline için etkisi

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında çeşitli ilave oranlarında (%0.0, %0.3, %0.6, %0.9, %1.2 ve %1.5) 4 farklı nano partiküler malzemenin (n-SiO₂, n-TiO₂, n-ZnO ve n-Al₂O₃) farklı ikame oranlarında (%0-kontrol numune, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30) uçucu kül (UK) mineral katkılı çimento esaslı harçların reolojik, akışkanlık ve stabilite özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir ve bu etkilerin permeasyon enjeksiyon uygulamalarında küresel ve radyal akış modellerine göre enjeksiyon basınçlarını nasıl değiştirdiği araştırılmıştır. Tezimiz kapsamında planladığımız şekilde yürüttüğümüz deneysel programımız ile tezin amacına ulaşmak için belirlenmiş tüm hedefler başarıyla tamamlanmış bulunup, tüm sonuçlar aşağıda maddeler halinde tüm detaylarıyla listelenmiştir.

- n-TiO₂ katkılı harçlarda karışımlardaki UK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.1). Uçucu külün mineral katkı olarak kullanılmasının beklenildiği şekilde akışkanlığın artması yönünde pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan genel bir trend olarak n-TiO₂ miktarındaki artışın mini slump yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slump yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır.
- n-TiO₂ katkılı harçlarda mini slump yayılma çapı deneyinde olduğu gibi UK katkısının beklenen davranış olarak akışkanlığı artırdığı, bu davranışın marsh hunisi akma sürelerinde azalma olarak davranış gösterdiği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.2). n-TiO₂ miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini artırdığı, bunun sebebinin de kohezyon değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir.
- Karışımlara n-TiO₂ ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artışına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. %30 UK ikamesinde n-TiO₂ eklenmesine rağmen kohezyon değerlerinde azalma gözlemlenmiş olup, bu

nano malzemenin kohezyonu artıran etkisi sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırma ilgili harç karışımlarının reolojik davranışlarında bir iyileştirme olarak kabul edilebilir. Ayrıca karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında etkili bir korelasyona rastlanmamıştır.

- n-ZnO katkılı harçlarda karışımlardaki UK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.6). Uçucu külün mineral katkı olarak kullanılmasının beklenildiği şekilde akışkanlığın artması yönünde pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan genel bir trend olarak n-ZnO miktarındaki artışın mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır.
- Mini slamp yayılma çapı deneyinde olduğu gibi UK katkısının beklenen davranış olarak akışkanlığı artırdığı, bu davranışın marsh hunisi akma sürelerinde azalma olarak davranış gösterdiği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.7). n-ZnO miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini arttırdığı, bunun sebebinin de kohezyon değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci arttırdığı gözlemlenmiştir. Mini slamp yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak bir birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir.
- Karışımlara n-ZnO ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artışına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında etkili bir korelasyona rastlanmamıştır.
- Tüm karışımlarda n-Al₂O₃ miktarındaki artışın mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır.
- n-Al₂O₃ miktarındaki artışın ise genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini arttırdığı, bunun sebebinin de kohezyon değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci arttırdığı gözlemlenmiştir. Mini slamp

yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak bir birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir.

- Karışımlara n-Al₂O₃ ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artışına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip tespit edilmiştir. Ayrıca karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında etkili bir korelasyona rastlanmamıştır.
- Tüm karışımlarda n-SiO₂ miktarındaki artışın doğrusal olarak mini slamp yayılma çapını azalttığı tespit edilmiştir. Karışımların mini slamp yayılma çapının azalmasının anlamı, kohezyonun arttığı ve bununla beraber numunelerin akışkanlığının belirli derecede azaldığı anlamını taşımaktadır.
- n-SiO₂ miktarındaki artışın genel anlamda mineral katkılı harçların marsh hunisi akma sürelerini arttırdığı, bunun sebebinin de kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinde artışa sebep olması ve böylece akmaya karşı direnci arttırdığı gözlemlenmiştir. Mini slamp yayılma çapı ile marsh hunisi akma sürelerinin akma gerilmesindeki değişime bağlı olarak birbirleriyle uyumlu davrandığı belirlenmiştir. Akma gerilmesi ile hem marsh hunisi akma süresi hem de mini slamp yayılma çapı arasında etkili korelasyonların olduğu tespit edilmiştir. Akışkanlığın n-SiO₂ katkısına bağlı işlenebilirlik parametrelerinde akışkanlığın azalmasındaki sebep, akma gerilmesinin artması ve dolayısıyla akışkanlık parametrelerinin de bundan etkilenmesine olarak açıklanabilir. Özellikle akma gerilmesi ile mini slamp yayılma çapı arasındaki yüksek korelasyon ($R^2=0,9034$) mini slamp yayılma çapının akma gerilmesinden ne kadar etkilendiğini göstermektedir.
- Karışımlara n-SiO₂ ilave oranının artışı karışımların kohezyon (akma gerilmesi) değerlerinin artışına neden olmuştur. Bu artış akışkanlık özellikleri üzerinde yukarıda tartışıldığı gibi dikkate değer etkilere sebep olmaktadır. Buna ek olarak karışımlarda UK ikamesinin akma gerilmesi değerlerinde etkiye sahip belirlenmiştir. UK miktarındaki artış beklenildiği üzere kohezyon değerlerini azaltmakta ve akışkanlığı arttırmaktadır. Ayrıca karışımların plaka kohezyon değerleriyle akma gerilmesi değerleri arasında dikkate değer etkili bir korelasyon vardır ($R^2=0,966$). Bu korelasyon, plaka kohezyon deneyi ile n-SiO₂ ve UK katkılı çimento esaslı

harçların reolojik parametrelerinden olan akma gerilmesinin tahmin edilmesine katkı sağlayabilecektir.

- Tüm n-TiO₂ katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalmıştır. Bu akış davranışı beklenen bir durum olarak yorumlanır. Çünkü harç karışımlarındaki UK miktarı arttıkça akışkanlık artar. Bununla birlikte, tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olarak görülmüştür.
- Tüm n-TiO₂ katkılı harçlara ait kayma oranı- kayma gerilmesi eğrilerinde kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenmiştir. Tüm n-TiO₂ katkılı harçların reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Ayrıca tüm n-TiO₂ katkılı harç karışımlar için düşük kayma oranlarında ölçülen kayma gerilmeleri birbirine çok yakın değerler almasına rağmen, yüksek kayma oranlarında birbirinden uzaklaşan kayma gerilmesi değerleri almışlardır. Bu durum dilatant davranışın yüksek kayma oranlarında daha belirgin şekilde ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında (s/b>1.0) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta TiO₂ katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymuştur. N-TiO₂ katkısının etkileri yüksek kayma oranlarında tespit edilmiştir. Bu değişimlerin sebebi sadece n-TiO₂ miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Bu değişim nano malzemenin UK ile kullanılmasının bir sonucu olarak açıklanabilir. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında ortaya konmuştur.
- Nano Titanyum oksit (n-TiO₂) katkılı harçlarda UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları taban tabana zıt bir davranış sergilemektedir. Fakat nano Titanyumoksit (n-TiO₂) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano Titanyumoksit katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral

katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.23-b). UK katkısız farklı n-TiO₂ oranlarında plastik viskozite belirli bir n-TiO₂ miktarına kadar (%0,6) düşüş gösterirken, bu oran aşıldıktan sonra tekrar artmaya başlamıştır. Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %0,6 n-TiO₂ oranında ulaşılmıştır. Bu durum akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-TiO₂ katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı ise farklılık göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-TiO₂ miktarındaki artışla belirli bir TiO₂ miktarına kadar plastik viskozite artarken, bu değerler aşıldığında plastik viskozite değerleri tekrar azalmakta bu da akışkanlığın arttığı anlamına gelmektedir. Buradan şu durum ortaya konmuştur; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-TiO₂ beraber kullanılacaksa, ya çok düşük n-TiO₂ kullanılmalı (%0,6'dan az) ya da yüksek n-TiO₂ miktarları (%0,6'dan fazla) kullanılmalıdır.

- Tüm n-ZnO katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında da artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur. Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini göstermektedir. Ayrıca düşük kayma oranlarında katkı malzemeleriyle harçların görünür viskoziteleri değişkenlikler arz ederken, yüksek kayma oranlarında tüm UK ikamelerinde n-ZnO katkı etkisi çok fazla görülmemiştir. Hatta çok yüksek kayma oranlarında neredeyse aynı görünür viskoziteler elde edilmiştir. Bu durum yüksek kayma oranlarında partiküler malzemelerin topaklaşması sonucu katılan malzemelerin dane boyut etkisinin ortadan kalkmasıyla açıklanmıştır.
- N-ZnO katkılı harçlara ait kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenmiştir. Tüm harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Ayrıca tüm karışımlar için düşük kayma oranlarında ölçülen kayma gerilmeleri birbirine çok yakın değerler almasına rağmen, yüksek kayma oranlarında birbirinden uzaklaşan kayma gerilmesi değerleri almışlardır. Bu durum dilatant davranışın

yüksek kayma oranlarında daha belirgin şekilde ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında ($s/b > 1.0$) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı tespit edilmiştir. N-ZnO katkısının etkileri yüksek kayma oranlarında açıkça görülmektedir. Bu değişimlerin sebebi sadece n-ZnO miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Bu değişim nano malzemenin UK ile kullanılmasının bir sonucu olarak açıklanabilir. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.

- Nano Çinko oksit (n-ZnO) katkılı harçlarda UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları benzer yönde eğilim gösterse de UK katkısının viskozite değerlerini azaltma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Fakat nano Çinko oksit (n-ZnO) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano Çinko oksit katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.26-b). UK katkısız farklı n-ZnO oranlarında plastik viskozite belirli bir n-ZnO miktarına kadar (%0,6) düşüş gösterirken, bu oran aşıldıktan sonra tekrar artmaya başlamaktadır. Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %0,6 n-ZnO oranında ulaşılmıştır. Bu durum akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-ZnO katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı da benzer yaklaşım göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-ZnO miktarındaki artışla belirli bir n-ZnO miktarına kadar plastik viskozite azalırken, bu değerler aşıldığında plastik viskozite değerleri tekrar artmaya, bu da akışkanlığın azaldığı anlamına gelmektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-ZnO beraber kullanılacaksa, ya UK katkılı ve katkısız tüm karışımlarda %0,3-%0,6 n-ZnO katkısının kullanılması fayda sağlayacaktır. Özet olarak UK katkılı harçlarda ZnO kullanımını viskozitenin kontrol edilmesinde dikkate değer katkılar sağlayabilecektir.
- Tüm n-Al₂O₃ katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek

şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur. Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini göstermektedir. Ayrıca düşük kayma oranlarında katkı malzemeleriyle harçların görünür viskoziteleri değişkenlikler arz ederken, yüksek kayma oranlarında tüm UK ikamelerinde n-Al₂O₃ katkı etkisi çok fazla görülmemektedir. Hatta çok yüksek kayma oranlarında neredeyse aynı görünür viskoziteler elde edilmektedir. Bu durum yüksek kayma oranlarında partiküler malzemelerin topaklaşması sonucu katılan malzemelerin dane boyut etkisinin ortadan kalkmasıyla açıklanmıştır.

- n-Al₂O₃ katkılı harçlar için kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde %0,6 n-Al₂O₃ katkı oranlarına kadar kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenirken, bu orandan sonraki katkı miktarlarında incelen kayma davranışı (Shear thinning) gözlemlenmeye başlamıştır. Kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gösteren harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Fakat diğer taraftan tüm UK mineral katkılı karışımlar için %0,6 n-Al₂O₃ katkı oranlarından sonra bu davranış sözde plastik (pseudo plastic) davranışa dönmeye başlamıştır. Bu davranış Bingham sıvı davranışı olarak adlandırılmaktadır. Yüksek kayma oranlarında viskozitenin azaldığı ve akışkanlığın arttığı anlamını taşımaktadır. Dolayısı ile bu çalışma kapsamında hazırlanmış UK katkılı %0,6 oranından fazla n-Al₂O₃ ilavesinin reolojik davranışı tamamen değiştirdiği gözlemlenmiştir. Yüksek kayma oranlarında akışkanlığı artırarak bu harç karışımların reolojik özelliklerinde iyileştirmeye katkı sağladığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymuştur. Bu değişimlerin sebebi sadece n-Al₂O₃ miktarının değişmesiyle açıklanamaz. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.
- Nano Alümina (n-Al₂O₃) katkılı harçlarda UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları benzer yönde

eğilim gösterse de UK katkısının viskozite değerlerini azaltma eğilimde olduğu açıkça görülmektedir. Fakat nano Alümina ($n\text{-Al}_2\text{O}_3$) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano alümina katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır (bkz. Şekil 4.29-b). UK katkısız farklı $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ oranlarında plastik viskozite doğrusala yakın bir şekilde azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum nano alümina katkısına bağlı plastik viskozitenin azalması ve sonucu olarak akışkanlığın artması anlamını taşımaktadır. Diğer bir deyişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %1,5 $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ oranında ulaşılmıştır. Bu durum UK katkısız harçlar için akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı da benzer yaklaşım göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ miktarındaki artışla plastik viskozite değerleri azalma trendi göstermektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ beraber kullanılacaksa, UK katkılı ve katkısız tüm karışımlarda %1,5 $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ katkısının kullanılması fayda sağlayacaktır. Özet olarak UK katkılı harçlarda $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ kullanımı viskozitenin kontrol edilmesinde dikkate değer katkılar sağlayabilecektir.

- Tüm $n\text{-SiO}_2$ katkı oranları için UK miktarı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte tüm karışımlar için görünür viskoziteler birbirine çok yakındır. Başka bir deyişle, tüm harç karışımlarında görünür viskozite harç karışımlarında sonuçları çok etkileyecek şekilde değişiklik göstermemiş gibi görünse de ölçülen viskozite değerlerinin çok küçük değerlere sahip olması bu duruma sebep olmuştur. Değerler her ne kadar küçük görünse de ufak değişiklikler bile zemin enjeksiyon uygulamalarında enjeksiyon basınçlarının dikkate değer şekilde etkilenebileceğini göstermektedir. Ayrıca düşük kayma oranlarında katkı malzemeleriyle harçların görünür viskoziteleri değişkenlikler arz ederken, yüksek kayma oranlarında tüm UK ikamelerinde $n\text{-SiO}_2$ katkı etkisi çok fazla görülmemektedir. Hatta çok yüksek kayma oranlarında neredeyse aynı görünür viskoziteler elde edilmektedir. Bu durum yüksek kayma oranlarında partiküler malzemelerin topaklaşması sonucu katılan malzemelerin dane boyut etkisinin ortadan kalkmasıyla açıklanmıştır.

- n-SiO₂ katkılı harçlarda kayma gerilmesi-kayma oranı grafikleri çizilmiş, bu grafiklerden Modifiye Bingham model dikkate alınarak reolojik parametreler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde %0,6 n-SiO₂ katkı oranlarına kadar kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gözlemlenirken, bu orandan sonraki katkı miktarlarında incelen kayma davranışı (Shear thinning) gözlemlenmeye başlamıştır. Kabaran kayma davranışı (Shear thickening) gösteren harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Bu nedenle, akışta kayma hızı arttıkça, bu çalışma için hazırlanan tüm karışımlarda dilatant davranış nedeniyle görünen viskozite ve kayma gerilimi katlanarak artmıştır. Bu tür harç karışımları için daha yüksek kesme hızlarında daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında (s/b>1.0) harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve UK) kısmi bir flokülasyona maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Fakat diğer taraftan tüm UK mineral katkılı karışımlar için %0,6 n-SiO₂ katkı oranlarından sonra bu davranış sözde plastik (pseudo plastic) davranışa dönmeye başlamıştır. Bu davranış Bingham sıvı davranışı olarak ta adlandırılmaktadır. Yüksek kayma oranlarında viskozitenin azaldığı ve akışkanlığın arttığı anlamını taşımaktadır. Dolayısı ile bu çalışma kapsamında hazırlanmış UK katkılı %0,6 oranından fazla n-SiO₂ ilavesinin reolojik davranışı tamamen değiştirdiği gözlemlenmiştir. Yüksek kayma oranlarında akışkanlığı artırarak bu harç karışımların reolojik özelliklerinde iyileştirmeye katkı sağladığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile akışkanlığı yüksek bu tür çimento esaslı harç karışımlarında nano boyutta katkıların etkisinin gözlemlenmesi açısından önemli bir durum ortaya koymaktadır. Dolayısı ile yüksek akışkanlığa sahip çimento esaslı harçların incelenmesinde özellikle nano boyutta parçacıkların etkisinin gözlemlenmesinde yüksek kayma oranlarının seçilmesinin faydalı olacağı bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.
- Nano Silika (n-SiO₂) katkılı harçlarda UK mineral katkılı harç karışımının reolojik davranışıyla mineral katkısız harç karışımlarının davranışları benzer yönde eğilim gösterse de UK katkısının viskozite değerlerini azaltma eğilimde görülmüştür. Fakat nano Silika (n-SiO₂) miktarındaki artış ile hem mineral katkısız hem de mineral katkılı harçların akma gerilmelerinin (Kohezyon değerleri) doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkılı harçların nano silika katılmasıyla elde edilmiş kohezyon değerleri, mineral katkısız olan karışımlara göre daha düşük olmaktadır

(bkz. Şekil 4.31-b). UK katkısız farklı n-SiO₂ oranlarında plastik viskozite doğrusala yakın bir şekilde azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum nano silika katkısına bağlı plastik viskozitenin azalması ve sonucu olarak akışkanlığın artması anlamını taşımaktadır. Diğer bir değişle en küçük plastik viskoziteye yaklaşık %1,5 n-SiO₂ oranında ulaşılmıştır. Bu durum UK katkısız harçlar için akışkanlığın en yüksek olduğu yer olarak görülmektedir. Diğer taraftan, UK ve n-SiO₂ katkılarıyla hazırlanmış numunelerin davranışı da benzer yaklaşım göstermiştir. Tüm UK katkı oranlarında n-SiO₂ miktarındaki artışla plastik viskozite değerleri azalma trendi göstermektedir. Buradan şu durum ortaya çıkmaktadır; eğer yüksek akışkanlık için UK ile n-SiO₂ beraber kullanılacaksa, UK katkılı ve katkısız tüm karışımlarda %1,5 n-SiO₂ katkısının kullanılması fayda sağlayacaktır. Özet olarak UK katkılı harçlarda n-SiO₂ kullanımı viskozitenin kontrol edilmesinde dikkate değer katkılar sağlayabilecektir.

- Nano Silika (n-TiO₂) katkılı harçlarda küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (430 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 n- TiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (336 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 n-TiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 94 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %22 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (410 kPa) yaklaşık %0,9 n-TiO₂ katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda daha farklı şekilde gözlemlenmiştir. Benzer şekilde enjeksiyon basıncının tüm UK oranlarında hazırlanmış karışımlarda %0,6 n-TiO₂ katkı oranından sonraki oranlarda doğrusal olmayan bir davranışla düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (132 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 n-TiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (105 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 n-TiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 27 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %21 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (125 kPa) yaklaşık %0,6 n-TiO₂ katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda daha farklı şekilde

gözlemlenmiştir. Enjeksiyon basıncının tüm UK oranlarında hazırlanmış karışımlarda %0,6 n-TiO₂ katkı oranından sonraki oranlarda doğrusal olmayan bir davranışla düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir.

- Nano Çinko oksit (n-ZnO) katkılı harçlarda küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (740 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 nano ZnO katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (340 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %0,6 n-ZnO katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 400 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %57 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (350 kPa) yaklaşık %0,6 nano çinko oksit katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer değişle tüm karışımlarda %0,6 n-ZnO ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-ZnO ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,6 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde %0,6 n-ZnO ilavesi hem mineral katkılı hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde silindirik (radyal) akma modelinde enjeksiyon basıncının küresel akma modeliyle beklendiği üzere benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (225 kPa) mineral katkısız karışımların %1,5 n-ZnO katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (100 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %0,6 n-ZnO katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 125 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %56 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer değişle tüm karışımlarda %0,6 n-ZnO ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-ZnO ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,6 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde

%0,6 n-ZnO ilavesi hem mineral katkılı hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir.

- Nano Alümina (n-Al₂O₃) katkılı harçlarda küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (430 kPa) mineral katkısız karışımların %0 nano Al₂O₃ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (300 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 n-Al₂O₃ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 130 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %30 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (430 kPa) yaklaşık %0 nano alümina katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer değişle tüm karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesinin enjeksiyon basınçlarını azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de tüm nano alümina katkılarında benzer eğilimler göstermektedir. Benzer şekilde silindirik (radyal) akma modelinde enjeksiyon basıncının küresel akma modeliyle beklendiği üzere benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (135 kPa) mineral katkısız karışımların %0 n-Al₂O₃ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (90 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %1,5 n-Al₂O₃ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 45 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %33 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer değişle küresel akma modelinde olduğu gibi tüm karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesinin enjeksiyon basınçlarını azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de tüm nano alümina katkılarında benzer eğilimler göstermektedir.
- Nano Silika (n-SiO₂) katkılı harçlarda küresel akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (1477 kPa) %5 UK mineral katkılı karışımın %1,5 nano SiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (350 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %0,3 n-SiO₂ katkısında

hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 1127 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %76 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçların reolojik davranışlarının mineral katkısız harçlardan daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Mineral katkısız harçlarda en düşük enjeksiyon basıncı (429 kPa) yaklaşık %0,3 nano silika katkısında elde edilmiştir. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer değişle tüm karışımlarda %0,3 n-SiO₂ ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlarına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-SiO₂ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,3 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde %0,3 n-SiO₂ ilavesi hem mineral katkılı hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde silindirik (radyal) akma modelinde enjeksiyon basıncının küresel akma modeliyle beklendiği üzere benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Radyal akma modelinde en yüksek enjeksiyon basıncının (453 kPa) %5 UK mineral katkılı karışımın %1,5 nano SiO₂ katkı oranında olduğu görülürken, en düşük enjeksiyon basıncının (100 kPa) ise %30 mineral katkılı (uçucu kül) harç karışımlarında %0,3 n-SiO₂ katkısında hesaplandığı görülmektedir. En yüksek ve en düşük enjeksiyon basınçları arasındaki fark yaklaşık 353 kPa'dır ve bir diğer değişle yaklaşık %78 azalmıştır. Bu durum mineral katkılı harçlarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir. Bir diğer değişle tüm karışımlarda %0,3 n-SiO₂ ilavesinin neredeyse benzer enjeksiyon basınçlarına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mineral katkılı veya katkısız olması durumunda tüm karışımlar için aynıdır. Mineral katkılı veya katkısız tüm karışımlarda n-SiO₂ ilavesi basınç değişimlerinde birbirinden sayısal olarak farklı değerler gösterse de %0,3 katkı oranı öncesi ve sonrası benzer eğilimler göstermektedir. Sonuç olarak küresel akma modelinde %0,3 n-SiO₂ ilavesi hem mineral katkılı hem de mineral katkısız karışımlarda kritik değer olarak tespit edilmiştir. Bu orandan sonraki hesaplanacak olan tüm basınçlar n-SiO₂ miktarına bağlı olarak artış gösterecektir. Dolayısı ile enjeksiyon esnasında akışkanlığa çok fazla bir pozitif katkısı olmayacaktır. Mineral katkısı olarak UK kullanımı ise beklenen şekilde akışkanlığı artıran etki göstermektedir. Bu durum n-SiO₂'in yoğunluğunun hem diğer nano malzemelerden hem de uçucu külden daha düşük olması ile açıklanabilir. Aynı ağırlıkta hacimsel olarak daha fazla yer

kaplaması ve elektriksel çekimlere daha fazla kalması ve yüzeyinde daha fazla su iyonları tutması sebebiyle akışkanlığı azaltmaktadır.

- Mevcut tez önerimiz harç karışımların reolojik özelliklerinin mineral katkısı ve nano partiküler malzemelerin beraber kullanımıyla ne denli etkileneceğini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çimento esaslı harç enjeksiyonlarının zemin iyileştirmelerde permeasyon enjeksiyon olarak uygulanması ile harç karışımlarının zeminde küresel ya da radyal yayılacağı kabul edilmektedir. En gerçekçi davranışın ise küresel olacağı düşünülmektedir. Radyal akış modelinden elde edilen enjeksiyon basınçları küresel akış modelinden elde edilen basınçlara göre oldukça düşüktür. Burada değerlendirmenin sahada uygulamayı tasarlayacak ve imalatı gerçekleştirecek mühendisin saha ve zemin şartlarına göre belirlemesi daha gerçekçi olacaktır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait reolojik davranışların hem radyal hem de küresel akma modellerinde benzer davranışlar göstermesi, harçların reolojik parametrelerinin enjeksiyon basınçları üzerinde ne kadar etkili ve önemli olduğunu göstermiştir.
- n-TiO₂ katkılı ve katkısız tüm karışımların bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Bu durum harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışının (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı karışımlarda n-TiO₂ ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-TiO₂ ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde küçükte olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir.
- n-ZnO katkılı ve katkısız tüm karışımların bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Sadece %30 UK mineral katkılı %1,5 n-ZnO ilave edilmiş karışımda bu oranın üzerinde kalmıştır. Bleeding oranının %10'nun üstünde olma durumu harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökme davranışlarından ciddi oranda

etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışının (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı karışımlarda n-ZnO ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer değişle n-ZnO ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde küçükte olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir.

- n-Al₂O₃ katkılı ve katkısız tüm karışımların bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Fakat n-Al₂O₃ katkılı karışımlarda elde edilen bleeding oranları hem n-TiO₂'te elde edilen hem de n-ZnO'te elde edilen bleeding oranlarından daha düşük sonuçlar vermiştir. Bir değişle Stabiliteye katkı açısından n-Al₂O₃ diğer iki nano katkı malzemesine kıyasla daha etkili olmuştur. Bleeding oranının %10'nun üstünde olma durumu harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökeltme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışının (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı karışımlarda n-Al₂O₃ ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-Al₂O₃ ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde diğer nano malzemeler gibi küçükte olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir.
- Mineral katkılı ve katkısız %0,9 ve üzeri oranlarda n-SiO₂ katkılı harçların bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı altında) üstünde kalmıştır. Bunların dışındaki diğer karışımlarda bleeding değerleri 900 ml'nin (%10 bleeding oranı üstünde) altında kalmıştır. Bu davranış bundan önce bahsedilmiş tüm nano katkı malzemelerinin davranışından farklı gelişmiştir. Bleeding oranının %10'nun üstünde olma durumu harçların stabilitesi açısından çok istenilen bir durum değildir. Bu karışımlara ait reolojik ve akışkanlık parametrelerinde de görüldüğü üzere karışımların akışkanlığı bu çökeltme davranışlarından ciddi oranda etkilenmiştir. Özellikle bleeding değerlerinin bu denli yüksek olması harç karışımlarının reolojik

parametrelerinden olan kayma oranı-kayma gerilmesi davranışlarında kabaran kayma gerilme davranışın (shear thinning) gelişmesine neden olmuştur. Harç karışımlarına mineral katkı olarak UK ikamesinin diğer nano malzemelerde olduğu gibi bleeding sonuçları üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemektedir. Bunun aksine tüm UK katkılı ve katkısız karışımlarda n-SiO₂ ilavesinin artışına bağlı olarak bleeding değerlerinde belli bir miktar azalma gözlemlenmektedir. Bir diğer deyişle n-SiO₂ ilavesinin harç karışımların bleeding değerlerinde diğer nano malzemeler gibi küçüğe olsa bir iyileştirme yaptığı söylenebilir. Tüm bunlara ek olarak %0,9 oranında ve daha fazlasında katkı olarak kullanılacak n-SiO₂'in harç karışımlarının bleeding oranını %10'un altına çekmesinden dolayı bu karışımların stabil duruma geçmesine katkı sağlamıştır. Bu davranışın aynı zamanda harç karışımların reolojik parametrelerinden biri olan akma gerilmesinin (kohezyon) diğer nano malzeme katkılı karışımlara kıyasla n-SiO₂ katkılı karışımlarda daha yüksek çıkmasıyla ilişkili olduğu varsayılmaktadır.

KAYNAKLAR

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.

Akbulut, S. and Saglamer, A., “Estimating the groutability of granular soils: A new approach”, *Tunnelling and Underground Space Technology* 17(4), 371-380, 2002.

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.

Alsharif, J. M. A., Taha, M. R., Firoozi, A. K. and Govindasamy, P. “Potential of using Nano carbons to stabilize weak soils”, *Applied and Environmental Soil Science*, 2016.

Bahmani, S. H., Huat, B. B. K., Asadi, A. and Farzadnia, N. “Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement”, *Construction and Building Materials* 64, 350-359, 2014.

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

Baltazar, L. G., Henriques F. M. A. and Jorne, F., “Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments”, *Construction and Building Materials* 35, 838–845, 2012.

Bell, F., Engineering Treatment of Soils, *CRC Press*, Florida, 1993.

Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L. and Panas, I., “Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement”, *Chemical Physics Letters* 392, 242–248, 2004.

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.

Collepari, S., Borsoi, A., Olagot, J. J. O., Troli, R., Collepari, M. and Cursio, A. Q., “Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC”, *In Proceedings of the 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee, UK, s. 55-66, 5–7 July, 2005.

Coppola, A. I., Ziolkowski, L. A., Masiello, C. A. and Druffel, E. R. M. “Aged black carbon in marine sediments and sinking particles”, *Geophysical Research Letters* 41, 2427-2433, 2014.

Coppola, L., Buoso, A. and Corazza, F., ” Electrical Properties of Carbon Nanotubes Cement Composites for Monitoring Stress Conditions in Concrete Structures”, *Applied Mechanics and Materials* 82, 118-123, 2011.

Croce, P., Flora, A. and Modoni, G., Jet Grouting: Technology, Design and Control, *CRC Press*, Florida, 2014.

Cry M., Legrand C. and Mouret M., “Study of the Shear Thickening Effect of Superplasticizers on the Rheological Behaviour of Cement Pastes Containing or not Mineral Additives”, *Cement and Concrete Research* 30, 1477-1483, 2000.

Çelik, F. and Canakci, H., “An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA)”, *Construction and Building Materials* 91, 187–194, 2015.

Çelik, F., “The observation of permeation grouting method as soil improvement technique with different grout flow models”, *Geomechanics and Engineering* 17(4), 367-374, 2019.

Danot, C. and Derache, N., “Grout injection in the laboratory”, *International symposium on earth reinforcement*, IS Kyushu, 13-17 November, 2007.

Deere, D. U., “Cement-bentonite grouting for dams”, *Proceedings of ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, New Orleans, U.S.A, s. 279–300, 1982.

Deere Don U. and Lombardi G., “Grout slurries – Thick or thin ?”, *Issues in Dam Grouting, Proceedings of the session sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE*, Convention in Denver, Colorado, 156-164, 1985.

Durgunoglu, H. T., “Utilization of high modulus columns in foundation engineering under seismic loadings”, *In US 8th National Conf. On Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute*, San Francisco, California, USA, s. 9763-9773, 18-22 April, 2006.

Erdoğan, T. Y., Admixtures for Concrete, PhD Thesis, *Middle East Technical University*, Ankara, s. 188, 1997.

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

Gallavresi, F., “Grouting Improvement of Foundation Soils”, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication, ASCE*, 1-39, 1992.

Ge, Z. and Gao, Z., “Applications of Nanotechnology and Nanomaterials in Construction”, *First International conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-I), Advancing and Integrating Construction Education, Research & Practice*, Karachi, Pakistan, s. 235-240, 4-5 August, 2008.

Håkansson, U., Hässler, L. and Stille, H., “Rheological properties of microfine cement grouts”, *Tunnelling and Underground Space Technology* 7(4), 453-458, 1992.

Hayward D. and Dwight P. B., *Serving Jesus with Integrity: Ethics and Accountability in Mission*, *William Carey Library Publishers*, California, 2010.

Hoffman, E., McCabe, K. A. and Smith, V. L., “Behavioral foundations of reciprocity: Experimental economics and evolutionary psychology”, *Economic inquiry* 36(3), 335-352, 1998.

Huang, Y. and Wang, L., “Experimental studies on nano materials for soil improvement: a review”, *Environmental Earth Sciences*. 75, 497, 2016.

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. and Okyay, Y., “Postimperative Negative Variation in Psychiatric Disorders”, *Neurophysiological Correlates of Relaxation and Psychopathology* 16, 191-198, 1987.

Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H. and Park, J. B., “Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles”, *Construction and Building Materials* 21(6), 1351-1355, 2007.

Kantro, D. L., “Influence of water reducing admixtures on properties of cement paste a miniature slump test”, *Cement, Concrete and Aggregates* 2(2), 95–102, 1980.

Küsin, C. C., Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s 10-17, 2009.

Kutzner, C., Grouting Of Rock and Soil, *CRC Press*, Florida, 1996.

Li, G., “Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂”, *J. Cement and Concrete Research* 34, 1043-1049, 2004.

Li, H., Zhang, M. and Ou, J., “Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement”, *Int. J. Fatigue* 29, 1292–1302, 2006.

Littlejohn, G. S., “Design of Cement Based Grouts”, *Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE* 1(1), 35-48, 1982.

Littlejohn, R. G., “The semiclassical evolution of wave packets”, *Physics Reports* 138(4), 193-291, 1986.

Luo, H. L., Hsiao, D. H., Lin, D. F. and Lin, C. K., “Cohesive Soil Stabilized Using Sewage Sludge Ash/Cement and Nano Aluminum Oxide”, *Int. J. Transport. Sci. Tech.* 1(1), 83-100, 2012.

Luo, H. L., Lin, D. F. and Kuo, W. T., “The effects of nano materials on the behaviors of sludge mortar specimens”, *Water Sci. Tech.* 50 (9), 57-65, 2004.

Mitchell, J. K., “Soil improvement-state of the art report”, *Proc., 11th Int. Conf. On SMFE*, Stockholm, Sweden, s. 509-565, 15-19 June, 1981.

Mitchell, J. M. and Jardine, F. M., A guide to ground treatment, *CIRIA*, Londra, 2002.

Moradi, G. and Seyedi, S., “Effect of Sampling Method on Strength of Stabilized Silty sands with colloidal Nano Silica”, *J. Civ. Eng. Res.* 5(6), 129-135, 2015.

Moseley, M. P., “Ground improvement”, *Published in the USA and Canada by CRC Press Inc.*, Boca Raton, Florida, 1993.

Nazari, A. and Riahi, S., “The effects of zinc dioxide nanoparticles on flexural strength of self-compacting concrete”, *Composites: Part B* 42(2), 167-175, 2011.

Nonveiller, E., Grouting, Theory and Practice, *Elsevier Science*, Amsterdam, 1989.

Nonveiller, E., Grouting Theory and Practice, *Elsevier Science*, 2013.

Ozawa, K., Sakata, N. and Okamura, H., “Evaluation of self compactibility of fresh concrete using the funnel test”, *Proc. Of JSCE Concrete Library International* 25, 61–70, 1995.

Özkan, Ö., Yüksel, I. and Muratoğlu, Ö., “Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag”, *Waste Management* 27(2), 161-167, 2007.

Papayianni, I. and Anastasiou, E., “Production of high-strength concrete using high 142rojec of industrial by-products”, *Construction and Building Materials* 24(8), 1412-1417, 2010.

Qing, Y., Zenan, Z., Kong, D. and Rongshen, C., “Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica 142roj”, *Construction and Building Materials* 21(3), 539-545, 2007.

Raffle, J. F. and Greenwood, D. A., “The relationship between the rheological characteristics of grouts and their capacity to permeate soils”, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, France, s. 788-793, 17-22 July, 1961.

Rezagholilou, A. and Nikraz, H., “The Reasons for Introducing Nano-silica in cementitious layer in Pavement”, *Electronic J. Geotech. Eng.* 19, 1761-1768, 2014.

Ruggiero, J. G., “Low slump compactive tail shield grouting in 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, Doctor of Philosophy, *Northwestern University*, Evanston, s. 1, 1998.

Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D. and Repette, W. L., “Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars”, *Construction and Building Materials* 23(7), 2487-2491, 2009.

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.

Stille, B. and Gustafson, G., “A review of the Namntall tunnel 143roject with regard to grouting performance”, *Tunn. Undergr. Sp. Tech.* 25(4), 346–356, 2010.

Subramani, V. and Sridevi, S., “Soil stabilization using nano materials”, *Int. J. Res. App. Sci. Eng. Tech (IJRASET)* 4, 2321-9653, 2016.

Taha, M. R. and Taha, O. M. E., “Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior”, *J. Nanopart. Res.* 14(10), 1-13, 2012.

Togrol, E. and Cinicioglu, S. F., “Stage construction of embankments on soft soils”, *Developments in Geotechnical Engineering. CRC Press*, 401-407, 1994.

Tunçdemir, F., “Temel zeminlerinin enjeksiyon tekniğiyle iyileştirilmesi”, *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.

Ugwu, O. O., Arop, J. B., Nwoji, C. U. and Osadebe, N. N., “Nano technology as a preventive engineering solution to highway infrastructure failures”, *J. Constr. Eng. Manage* 139, 987-993, 2013.

Vossoughi, S., “Flow of non-newtonian fluids in porous media”, *Rheology Series Elsevier* 8, 1183-1235, 1999.

Wagner, N. J. and Brady, J. F., “Shear thickening in colloidal dispersions”, *Physics Today* 62(10), 27-32, 2009.

Warner, J., Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures, *John Wiley & Sons*, New York, 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.

Weaver, K., “Dam foundation grouting”, *American Society of Civil Engineers, ASCE*, Virginia, 1991.

Xanthakos, P. P., Abramson, L. W. and Bruce, D. A., “Ground Control and Improvement”, *John Wiley & Sons*, New York, 1994

Yahia, A. and Khayat, K. H., “Analytical models for estimating yield stress of high performance pseudo plastic grout”, *Cement Concrete Res.* 31(5), 731-738, 2001.

Yeon, K. S. and Han, M. Y., “Fundamental properties of polymer–cement mortars for concrete repair”, *In: Proceedings of the 7th International Conference on Structural Faults and Repair 2*, Edinburgh, Scotland, 469–476, 8 July, 1997.

Zhang, G., “Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils”, *Advances in measurement and modeling of soil behavior*, 1-13, 2007.

Zhang, J., Campbell, R. E., Ting, A. Y. and Tsien, R. Y., “Creating new fluorescent probes for cell biology”, *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 3(12), 906-918, 2002.

ÖZ GEÇMİŞ

Samet Müfit BOZKIR tarihindeda doğdu. İlk orta ve lise eğitimini tamamladı. yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bölümü'nden mezun oldu. eğitim öğretim yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmektedir.



