



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

**JET-GROUT ENJEKSİYON UYGULAMALARINDA KAZAN ALTI TABAN KÜLÜ
KATKILI ÇİMENTO BAZLI HARÇLARIN REOLOJİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

OSMAN AKÇURU

Aralık 2020

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

JET-GROUT ENJEKSİYON UYGULAMALARINDA KAZAN ALTI TABAN KÜLÜ
KATKILI ÇİMENTO BAZLI HARÇLARIN REOLOJİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

OSMAN AKÇURU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Doç. Dr. Fatih ÇELİK

Aralık 2020

Osman AKÇURU tarafından **Doç. Dr. Fatih ÇELİK** danışmanlığından hazırlanan “**Jet-grout enjeksiyon uygulamalarında kazan altı taban külü katkılı çimento bazlı harçların reolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi**” 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: Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

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

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetimi Kurulu’un/....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.

Osman AKÇURU

ÖZET

JET-GROUT ENJEKSİYON UYGULAMALARINDA KAZAN ALTI TABAN KÜLÜ KATKILI ÇİMENTO BAZLI HARÇLARIN REOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AKÇURU, Osman

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Fatih ÇELİK

Aralık 2020, sayfa 134

Zemin iyileştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan jet grout enjeksiyon yönteminde, enjeksiyon malzemesi olarak kullanılan çimento bazlı harç karışımların, belirli oranlarda KATK'nün çimento yerine ikame edilmiş çimento bazlı harç karışımlarının reolojik özellikleri kapsamında, akışkanlık davranışları, işlenebilirlik ve stabilite özellikleri deneysel olarak incelenmiş olup, mekanik özellikleri kapsamında tek eksenli serbest basınç dayanımı, UPV ölçümleri ve silindirik numunelerin kırılma davranışları incelenmiştir. Deneysel program, dört farklı su/bağlayıcı oranında ($s/b=0.75, 1.00, 1.25$ ve 1.50) ve KATK'nün çeşitli oranlarda ($\%0, \%5, \%10, \%15, \%20, \%25$ ve $\%30$) çimento yerine ikame edilmesiyle 28 farklı karışım hazırlanmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için reolojik özelliklerin belirlenmesinde hazırlanan karışım oranlarına ağırlıkça $\%30$ oranında SP (Kötü derecelemiş kum) sınıfı bir kumla karıştırılmıştır. Reolojik deneylerin sonucunda, işlenebilirlik özellikleri tüm s/b oranlarında KATK'nün ikame edilmesinden çok fazla olumsuz etkilenmemiştir. Mekanik deneyler sonucu elde edilen veriler çimento yerine KATK ikamesinin artması sonucu eksenel serbest basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Bu azalma miktarı sorunlu zeminlerin stabilizasyonu için gereken basınç dayanımı değerinden yüksek bir değer olduğundan KATK'nün problemlili kumlu zeminlerin iyileştirilmesi için puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabileceği açıkça görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Reoloji, Kazan Altı Taban külü, Harç Enjeksiyonu, Çökelme, UPV ve Serbest Basınç Deneyi

SUMMARY

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL AND MECHANICAL FEATURES FOR CEMENT BASED GROUT INCORPORATED WITH BOTTOM ASH IN JET GROUTING APPLICATIONS

AKÇURU, Osman

Nigde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Fatih ÇELİK

December 2020, 134 pages

This thesis investigated the fluidity, rheological, mechanical and stability properties of the cement based grout mixed with bottom ash (BA). The experimental program consisted of fifteen different mixture and 252 soilcretes samples having 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% BA content and three different water to binder ratios ($w/b=0.75, 1.00, 1.25$ and 1.50). Workability properties, plastic viscosity, apparent viscosity, and the yield stress of the mixtures were determined in the first part of the study. And then, unconfined compressive strength (UCS), bleeding and failure criteria of the soilcrete samples prepared like first part of the study at similar proportions of BA and w/b ratios. In order to obtain soilcrete samples, this grout mixtures were mixed with poorly graded sand (SP) at 30% proportion by mass. The compressive strength, elastic modulus, stability parameters were investigated. Test results showed that increasing replacement level for the BA amount increases marsh cone flow time, plate cohesion, plastic and apparent viscosity, and the yield stress, but also decreases mini slump diameter. Shear thickening and pseudo-plastic behavior was observed for high BA content for w/b ratios greater than 1.00. All UCS values are greater than 5 MPa and all bleeding values obtained are lower than 10%.

Keywords: Rheology, Bottom ash, cement grout injection, Bleeding, UPV and Unconfined Compression Strength (UCS).

ÖN SÖZ

Yüksek lisans süresince ve tez çalışmamın planlanması, yürütülmesinde ve tüm aşamalarında bana her türlü bilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini sürekli paylaşan, yönlendirmeleriyle çalışmalarımı şekillendiren çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih ÇELİK 'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Çalışmam esnasında her türlü yardım ve araştırmamın tamamlanmasında kıymetli katkılarından dolayı değerli arkadaşım Samet Müfit BOZKIR 'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans hayatım boyunca gerek maddi gerek manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER..	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
FOTOĞRAF DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
1.1 Çimento Bazlı Harçların Enjeksiyonu	1
1.1.1 Permeasyon (Sızma) enjeksiyonu	6
1.1.2 Çatlatma enjeksiyonu	8
1.1.3 Kompaksiyon enjeksiyonu (Sıkılama).....	9
1.1.4 Jet enjeksiyonu (jet grout).....	9
1.1.4.1 Jet 1 yöntemi	12
1.1.4.2 Jet 2 yöntemi	12
1.1.4.3 Jet 3 yöntemi	13
1.1.4.3 Süper jet yöntemi	14
1.2 Enjeksiyon tasarımı ve parametreleri	14
1.3 Çimento Bazlı Harçların Reolojisi	15
1.3.1 Stabilite	16
1.3.2 Priz süresinin belirlenmesi.....	17
1.3.3 Viskozite	17
1.4 Mineral Katkılar	20
1.5 Kazan Altı Taban Külü	21
1.6 Tez Çalışmasının Amacı ve Hedefi	22

1.7 Tez Çalışmasının Düzenlenmesi	23
BÖLÜM II LİTERATÜR ÖZETİ.....	25
2.1 Çimento Esaslı Harçların Reolojik Özellikleri.....	25
2.2 Kazan Altı Taban Külü ile İlgili Literatür Taraması	28
BÖLÜM III GENEL KISIM.....	32
3.1 Zeminlerde Enjeksiyon	32
3.1.1 Enjeksiyon Tanımı ve Amacı.....	32
3.1.2 Zeminlerde Enjeksiyon Çeşitleri.....	32
3.1.3 Harç Malzemelerinin Sınıflandırılması	33
3.1.4 Harç Malzemesi Parametreleri.....	34
3.1.5 Enjeksiyon Yöntemi Parametreleri	34
3.1.6 Viskozite	34
3.1.7 Görünür Viskozite	37
3.1.8 Değiştirilmiş Darcy Yasası	38
3.1.9 Tikotropi (Karıştırma sonucunda viskozitenin değişmesi durumu)	39
3.2 Zeminlerde Permeasyon Enjeksiyonu	39
3.2.1 Enjeksiyon Testi ve Tekniği	40
3.2.2 Gözenekli Ortamda Harç Akış Teorisi	41
3.2.2.1 Gözenekli Ortam için Küresel Akış Modeli	41
3.2.2.2 Silindirik Borudan Radyal Akış (Newton Sıvısı)	43
3.2.3 Harç Enjeksiyonunda Doğal Fiziksel Kısıtlamalar	44
BÖLÜM IV MİNERAL OLARAK KATK KATKILI ÇİMENTO ESASLI KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ	45
4.1 GİRİŞ.....	45
4.2 Materyal ve Yöntemler	47
4.2.1 Kullanılan Malzemeler	47
4.2.2 Karışım parametreleri ve test yöntemleri	49

4.2.3 Permeasyon enjeksiyonu için kullanılan analitik akış modelleri	55
4.3 Test sonuçları ve tartışma	56
4.3.1 Harç karışımlarının akışkanlık (İşlenebilirlik) özellikleri	56
4.3.2 Harç karışımlarının reolojik özellikleri	59
4.3.3 Permeasyon enjeksiyonu için küresel akış modeli.....	68
4.3.4 Permeasyon enjeksiyonu için radyal (silindirik) akış modeli	70
BÖLÜM V MİNERAL OLARAK KATK KATKILI ÇİMENTO ESASLI KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	72
5.1 GİRİŞ	72
5.2 Kullanılan Malzeme ve Yöntemler	74
5.2.1 Bu çalışmada kullanılan malzemeler.....	74
5.2.2 Karışım oranları ve hazırlanış	76
5.2.3 Serbest Basınç Dayanımı (SBD) Testi	78
5.2.4 Elastisite Modülü	80
5.2.5 Taze harçların stabilizasyonu (çökme-bleeding testi).....	82
5.3 Test Sonuçları ve Tartışma.....	83
5.3.1 Serbest Basınç Dayanımı (SBD) test sonuçları	83
5.3.2 Ultrasonik Dalga Hızı (UPV)	89
5.3.3 Elastisite modülü	94
5.3.4 Çökme testi (Kanama)	96
5.3.5 Tek eksenli serbest basınç dayanım testi sonucu oluşan kırılma modellerinin incelenmesi.....	97
BÖLÜM VI SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
6.1 SONUÇ	103
6.2 ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR.	108
EK A	121
EK B	124

ÖZ GEÇMİŞ.....	133
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	134



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Karışım çeşitlerinin sınıflandırılması (Gallavresi, 1992).....	3
Çizelge 1.2. Farklı tip zeminlerde uygulanabilen enjeksiyon yöntemleri (Mitchell ve Jardine, 2002).....	6
Çizelge 1.3. Jet grout yönteminin işletim parametreleri (Xanthakos, 1994).....	15
Çizelge 3.1. Zemin tipleri ve enjeksiyon tekniği (Avrupa Standartları 1996'dan sonra)	40
Çizelge 4.1. Kullanılan Portland çimentosu ve KATK 'nın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	49
Çizelge 4.2. Kazan altı taban külü (KATK) karışım oranları ve harç karışımlarının taze işlenebilirlik özellikleri (1 litrelik karışım için).....	50
Çizelge 4.3. Modifiye Bingham Modeline dayanan harç karışımlarının plastik viskoziteleri ve akma gerilimi değerleri	68
Çizelge 5.1. 1 kg için karışımların karışım oranları.....	77
Çizelge 5.2. Su muhtevasına bağlı E/q_u oranları.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi (Kutzner, 1996)	4
Şekil 1.2. Çatlatma Enjeksiyonu (Keller, 2014)	8
Şekil 1.3. Kompaksiyon enjeksiyonu (Essler vd., 2000).....	9
Şekil 1.4. Tipik jet enjeksiyon uygulamaları: (a) dolgu taban zemini iyileştirmeleri, (b) kazı-iksa sistemlerinde taban geçirimsizlik tapaları, (c) geçici tünel destek sistemleri ve (d) barajlarda sızdırmazlık perdeleri (Croce vd., 2014).	10
Şekil 1.5. Zemin tipine bağlı soilcrete dayanımları (Hayward vd., 2010)	11
Şekil 1.6. Jet 1 yöntemi (Keller, 2014).....	12
Şekil 1.7. Jet 2 yöntemi (Bakım, 2007)	13
Şekil 1.8. Jet 3 yöntemi (Bakım, 2007)	13
Şekil 1.9. Süper Jet yöntemi (Çınar, 2014).....	14
Şekil 1.10. Bleeding(çökeltme) deneyi(Çelik, 2016).....	16
Şekil 1.11. Bingham modeli (Warner, 2004).....	18
Şekil 1.12. Bingham modelinin reolojik davranış grafiği	18
Şekil 1.13. Ögütülmüş KATK'nün 2000 ölçekle büyütülmüş mikro yapısı(Toprak, 2011).....	22
Şekil 2.1. Değişen s/ç oranı için kayma dayanımı ve viskoziteleri (Raffle ve Greenwood'dan sonra, 1961).....	27
Şekil 3.1. Enjeksiyon teknikleri (Mitchell, 1981)	33
Şekil 3.2. Newton model(Çelik, 2016).....	35
Şekil 3.3. Newton sıvısı(Çelik, 2016)	36
Şekil 3.4. Reolojik model ve hız profili – I (Çelik, 2016).....	37
Şekil 3.5. Reolojik model ve hız profili – II (Çelik, 2016).....	37
Şekil 3.6. Görünür viskozite(Çelik, 2016).....	38
Şekil 3.7. Tikotropik karışımların Reolojik özellikleri(Nonveiller, 2013)	39
Şekil 3.8. Küresel akış enjeksiyonu (Çelik, 2016).....	42
Şekil 3.9. Silindirik borudan Radyal enjeksiyon (Çelik, 2016)	43
Şekil 4.1. Kazan altı taban külü (KATK) ve Portland çimentosu dane dağılım eğrisi ...	48
Şekil 4.2. Kayma gerilmesi - kayma hızı ilişkisine dayalı artan ve azalan eğriler	54
Şekil 4.3. Görünür viskozite - kayma oranı eğri ilişkisi.....	54

Şekil 4.4. Akma gerilmesinin mini slamp ve marsh hunisi arasındaki ilişki.....	57
Şekil 4.5. Akma gerilimi ile plaka kohezyon arasındaki ilişki	58
Şekil 4.6. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %0 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri	59
Şekil 4.7. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %5 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri	60
Şekil 4.8. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %10 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri	60
Şekil 4.9. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %15 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri	61
Şekil 4.10. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %20 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri.....	61
Şekil 4.11. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %25 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri.....	62
Şekil 4.12. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %30 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri.....	62
Şekil 4.13. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %0 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	64
Şekil 4.14. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %5 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	64
Şekil 4.15. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %10 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	65
Şekil 4.16. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %15 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	65
Şekil 4.17. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %20 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	66
Şekil 4.18. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %25 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	66

Şekil 4.19. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %30 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri	67
Şekil 4.20. Permeasyon enjeksiyon basıncı ile farklı s/b oranlarında KATK içeriği ilişkilerine karşı Küresel akış modeli	69
Şekil 4.21. Permeasyon enjeksiyon basıncı ile farklı s/b oranlarında KATK içeriği ilişkilerine karşı Radyal(silindirik) akış modeli.....	71
Şekil 5.1. Kullanılan kumun (SP) gradasyon eğrisi	75
Şekil 5.2. Gerilme-Şekil Değiştirme Eğri (Yaşar, 2019).....	81
Şekil 5.3. Elastisite modülü hesaplama metodları	82
Şekil 5.4. Tüm karışım örneklerinin 3,7 ve 28. kür sürelerinde serbest basınç dayanımı (farklı s/b oranlarında; sırasıyla 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50).	84
Şekil 5.5. Karışım numunelerinin s/b = 0.75 ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları	85
Şekil 5.6. Karışım numunelerinin s/b = 1.00 ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları	85
Şekil 5.7. Karışım numunelerinin s/b = 1.25 ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları	86
Şekil 5.8. Karışım numunelerinin s/b = 1.50 ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları	86
Şekil 5.9. S/b = 0.75 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri.....	87
Şekil 5.10. S/b= 1.00 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri.....	87
Şekil 5.11. S/b= 1.25 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri.....	88
Şekil 5.12. S/b= 1.50 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri.....	88
Şekil 5.13. Farklı s/b (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarının 3 Günlük kür süresinin UPV ve KATK arasındaki ilişki	91
Şekil 5.14. Farklı s/b (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarının 7 Günlük kür süresinin UPV ve KATK arasındaki ilişki	91
Şekil 5.15. Farklı s/b (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarının 28 günlük kür süresinin UPV ve KATK arasındaki ilişki	92
Şekil 5.16. S/b oranı 0.75 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	92
Şekil 5.17. S/b oranı 0.75 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	93

Şekil 5.18. S/b oranı 0.75 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	93
Şekil 5.19. UPV ve serbest basınç dayanımının kür süresine bağlı ilişkisi.....	94
Şekil 5.20. 3,7 ve 28 günlük kür süresi için tüm numunelerin elastisite modülü sonuçları (farklı s/b oranlarında; sırasıyla 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50).....	95
Şekil 5.21. Elastisite modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki	95
Şekil 5.22. Çökelme tüm s/b oranlarında farklı KATK yüzdesine göre değişimi	97
Şekil 5.23. a) Kanat çatlağının tüm malzeme boyunca yayılmasına bağlı eksenel yarıma. b) Bitişik kanat çatlaklarının veya yakın çevredeki kanat çatlaklarının birleşmesi nedeniyle kayma hatası (oklar sıkıştırma yönünü gösterir) (Çelik, 2016).....	98
Şekil 5.24. Tek eksenli yükleme altında farklı kırılma modlarının şematik gösterimi(Çelik, 2016)	98
Şekil A.1. Tüm s/b ve KATK oranlarına göre mini slamp yayılma çapları	121
Şekil A.2. Tüm s/b ve KATK oranlarına göre marsh hunisi akma süreleri	121
Şekil A.3. S/b=0.75 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi.....	122
Şekil A.4. S/b=1.00 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi.....	122
Şekil A.5. S/b=1.25 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi.....	123
Şekil A.6. S/b=1.50 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi.....	123
Şekil B.1. S/b oranı 1.00 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	124
Şekil B.2. S/b oranı 1.00 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	124
Şekil B.3. S/b oranı 1.00 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	125
Şekil B.4. S/b oranı 1.25 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	125
Şekil B.5. S/b oranı 1.25 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	126

Şekil B.6. S/b oranı 1.25 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	126
Şekil B.7. S/b oranı 1.50 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	127
Şekil B.8. S/b oranı 1.50 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	127
Şekil B.9. S/b oranı 1.50 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	128
Şekil B.10. S/b oranı 0.75 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı.....	128
Şekil B.11. S/b oranı 1.00 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı.....	129
Şekil B.12. S/b oranı 1.25 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı.....	129
Şekil B.13. S/b oranı 1.50 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı.....	130
Şekil B.14. S/b=0.75 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı	130
Şekil B.15. S/b=1.00 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı	131
Şekil B.16. S/b=1.25 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı	131
Şekil B.17. S/b=1.50 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı	132

FOTOĞRAF DİZİNİ

Fotoğraf 4.1. Kazan Altı Taban Külünün (KATK) birikmiş yığınının görünümü	48
Fotoğraf 4.2. Koaksiyel Döner Silindir Reometresi (Brookfield Viskozimetre DV2T) .	51
Fotoğraf 4.3. Test esnasında Brookfield'in ekranı DV2T.....	51
Fotoğraf 4.4. Marsh huni testi.....	52
Fotoğraf 4.5. Mini slamp testi.....	52
Fotoğraf 5.1. Kullanılan kötü derecelenmiş kum (SP).....	75
Fotoğraf 5.2. Kullanılan standart döner tip 10 litre laboratuvar mikseri.....	77
Fotoğraf 5.3. Hazırlanan kalıp ve bu kalıplardan çıkan numuneler	79
Fotoğraf 5.4. Kalıplara dökülen soilcrete numuneler.....	79
Fotoğraf 5.5. Kalıplardan çıkartılıp traşlanan soilcrete numuneler	79
Fotoğraf 5.6. Numunelerin streç ile sarılıp su içinde küre bırakılması	80
Fotoğraf 5.7. Serbest Basınç Dayanım cihazı.....	80
Fotoğraf 5.8. 1000 ml hacimli standart mezür	83
Fotoğraf 5.9. UPV test cihazı.....	90
Fotoğraf 5.10. M1-M8 kırılma şekilleri	99
Fotoğraf 5.11. M9-M16 kırılma şekilleri.....	100
Fotoğraf 5.12. M17-M24 kırılma şekilleri.....	101
Fotoğraf 5.13. M125-M28 kırılma şekilleri.....	102

BÖLÜM I

GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde yapı tasarımı için zeminlerin sahip olduğu mühendislik özellikler önem taşımaktadır. Zeminler her zaman geçirgenlik, taşıma kapasitesi ve oturma gibi tasarım için gerekli parametreleri karşılayamamaktadır. Geoteknik mühendisliğinin önemli alanlarından birisi de bu olumsuz zemin şartlarında farklı zemin iyileştirme yöntemleri uygulayarak zeminlere istenilen mühendislik özelliklerini kazandırmaktır.

İnşaat yapılacak alanların azalması ve arazilerin bulunduğu yer itibariyle değer kazanması sonucu kötü zeminlere yapı yapılması gerekmektedir. Bunun sonucunda bu tür zeminlerin iyileştirmesi gerekmekte ve her geçen gün yeni zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri de zemindeki boşlukları doldurmak için sıvı haldeki karışımları zemine basınçlı halde enjekte etme yöntemidir. Enjeksiyon sonucunda boşluklar azalacağı için geçirgenlik azalır ve mühendislik parametreleri olumlu yönde artar (Gouvenot, 1998; Ribay vd., 2006).

Taşıma gücü ve oturma gibi kontrollerin yapılması gereken zeminler üzerinde yapı yapılması her geçen gün arttığından zeminde istenilen iyileştirme şekli ve miktarına bağlı olarak birçok yöntem geliştirilmiştir. Enjeksiyon yöntemi bu sebeplerden dolayı gün geçtikçe daha yaygın bir kullanım alanına sahip olmakta ve buna bağlı olarak gelişim göstermektedir.

1.1 Çimento Bazlı Harçların Enjeksiyonu

Enjeksiyon, zemin mühendisliğinde boşlukları veya çatlakları doldurmak için uygulanan bir işlemdir. İstenilen mukavemet parametrelerini sağlayamayan zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için bir takım 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 kayaçlar içerisine enjekte edilmesi ile zamanla serleşmesi 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 itibarıyla 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 ta 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 1.1**'de verilmektedir.

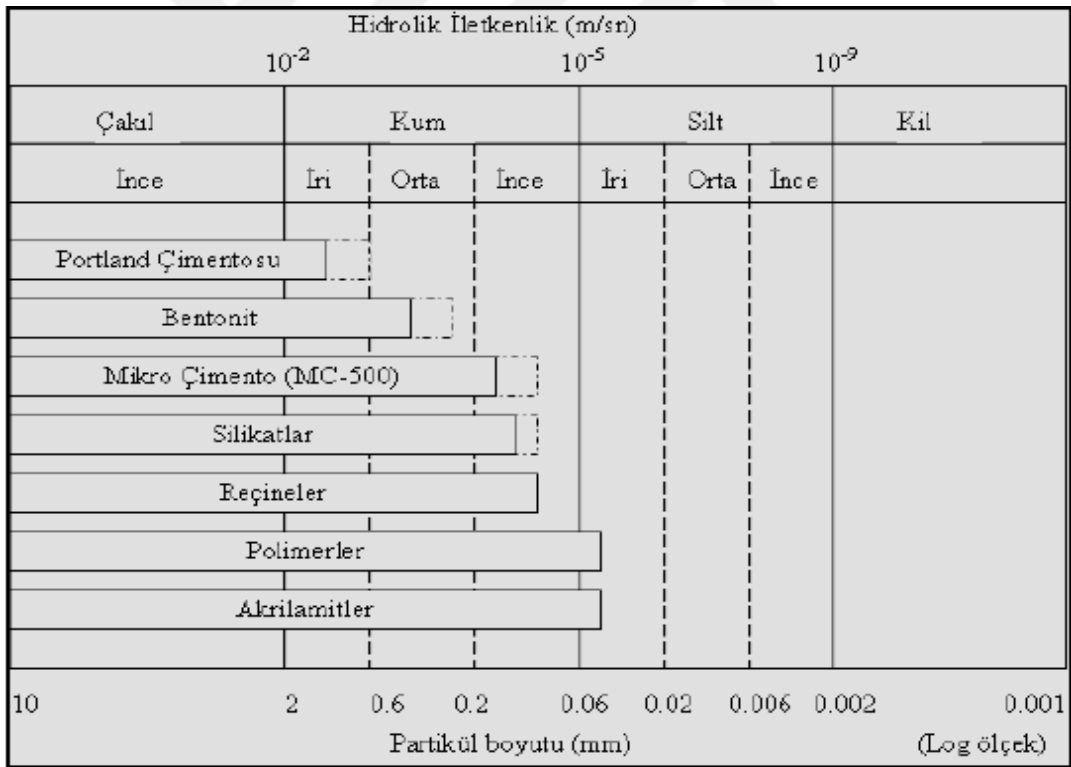
Çizelge 1.1. Karışım çeşitlerinin sınıflandırılması (Gallavresi, 1992)

Reolojik Kategori	Partiküler süspansiyonlar (Bingham Akışkanlar)			Çözeltiler (Newton Akışkanlar)			Gaz Emülsiyonu		
	Kararsı z	Kararlı		Koloit çözeltiler (viskozite zamanla artmakta)	Saf çözeltiler (viskozite zamanla değişmemekte)				
Enjeksiyon Malzemesini n Ana Türleri	Sedec çiment o	Bentoni t veya kil ile birlikte çimento	Topaklaşmam ış bentonit	Kimyasal enjeksiyon Malzemeleri			Şişebilen enjeksiyon malzemeleri		
				Sodyum silikat bazlı		Organik reçinele r bazlı	Çimento bazlı	Organik ürünler bazlı	
				Yüksek dayanıml 1	Orta- düşük dayanıml 1				
Uygulama Alanları	Çatlaklı kaya ve duvar			Mikro fisürlü ve geçirimli kaya			Büyük boşlukla r veya oyuklar	Boşlukla r ve hızlı akan sızıntı suları	
		GRANÜLER ZEMİNLER							
		Çakıl	Kaba kumlar	Orta- İnce kum		İnce siltli kumlar			
Geçirgenlik katsayısı k (m/s)		>5x10 ⁻⁴	>5x10 ⁻⁵	>5x10 ⁻⁵	>1x10 ⁻⁵	>1x10 ⁻⁶			
Özgül yüzey (m ² /N)		<0,5	<1,5	<1,5	<4	<10			
Temel Enjeksiyon teknigi	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, 1993). Bu sınırlar, çimento esaslı harç için 5×10^{-4} m/sn ve kimyasal harçlar için 1×10^{-6} m/sn'dir.

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 1.1**'de görülmektedir.



Şekil 1.1. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon yetisi (Kutzner, 1996)

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 ulaşınca 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 (kanama) 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 birlikte toksik olmayan, kalıcı ve ucuz bir malzeme olmalıdır.

Enjeksiyon teknikleri çatlatma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, permeasyon enjeksiyonu ve jet enjeksiyonu olarak dörde ayrılır (Gallavresi, 1992).

Bu yöntemler farklı zemin türlerine uygulandığı gibi aynı tip zeminlere de uygulanabilir. Farklı zemin türlerinde uygulanabilecek enjeksiyon yöntemleri Çizelge 1.2'de verilmiştir (Mitchell ve Jardine, 2002).

Çizelge 1.2. Farklı tip zeminlerde uygulanabilen enjeksiyon yöntemleri (Mitchell ve Jardine, 2002).

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

1.1.1 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 eşitliği önermiştir:

$$Na = \frac{(D_{15})_{zemin}}{(D_{85})_{enjeksiyon}} \quad (1.1)$$

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

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

Olmak üzere;

$Na > 24$ için enjeksiyon sürekli mümkün.

$Na < 11$ için enjeksiyon mümkün değil.

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

ve buna ek olarak aşağıdaki eşitlik de kullanılmalıdır:

$$N_j = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyon}} \quad (1.2)$$

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 yapılabilirlik oranı için, zemin ve enjeksiyonun dane dağılımına ek olarak enjeksiyon s/ç oranı, basıncı ile zemin ince dane oranı, rölatif sıkılığını da dikkate alan aşağıdaki ampirik eşitliği önermiştir:

$$N = \frac{(D_{10})_{zemin}}{(D_{95})_{enjeksiyon}} + k_1 \frac{s/\zeta}{FC} + k_2 \frac{P}{Dr} \quad (1.3)$$

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)

$$Dr : \text{Zeminin rölatif sıkılığı} \left(Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \right) \quad (1.4)$$

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 5.3'teki N değerleri diğer parametrelerin aşağıdaki değer aralıkları için makul sonuçlar vermektedir. Bu değer aralıkları:

$$0 < FC < \%6$$

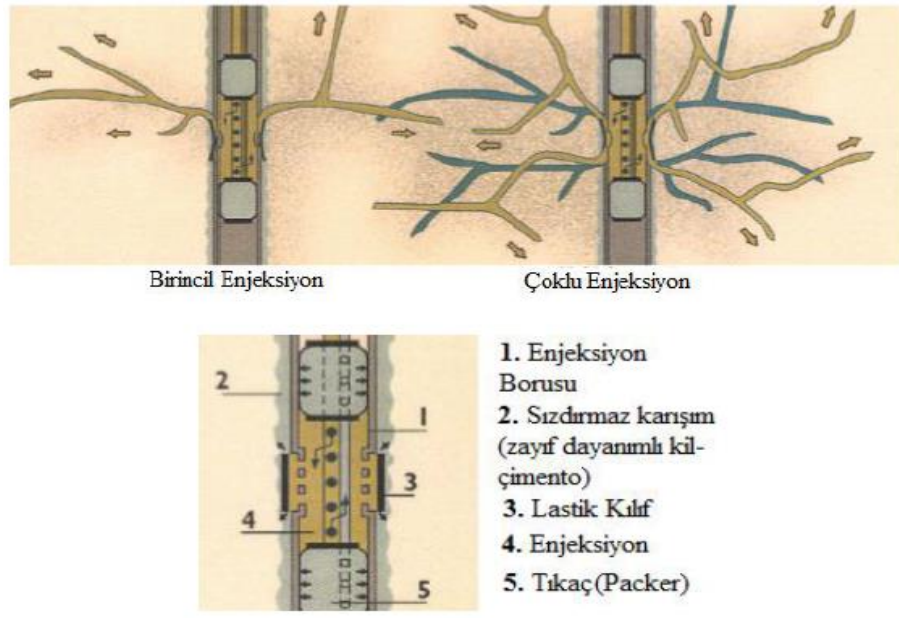
$$0,8 < s/\phi < 2$$

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

1.1.2 Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu yönteminde, zemin kontrollü bir şekilde, yüksek basınçlarda (5-40 MPa arasında) düşük vizkoziteli 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).

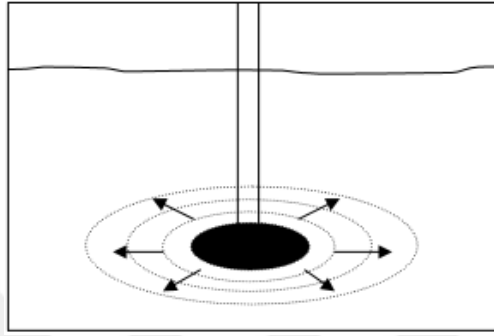
Çatlatma enjeksiyonu yönteminde zemin içerisinde damar gibi sertleşmiş çimento ağları oluşur ve zemin bu sayede kontrollü bir şekilde sıkışmaktadır. Çimento şerbeti yüksek basınçlarla zemine enjekte edilir ve zeminin çatlatılması sonucu çatlayan yerlere çimento şerbeti dolar. Oluşan çatlakların çapı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



Şekil 1.2. Çatlatma Enjeksiyonu (Keller, 2014)

1.1.3 Kompaksiyon enjeksiyonu (Sıkılama)

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.



Şekil 1.3. Kompaksiyon enjeksiyonu (Essler vd., 2000)

Kompaksiyon enjeksiyonu çok derindeki zemin tabakaların 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).

1.1.4 Jet enjeksiyonu (jet grout)

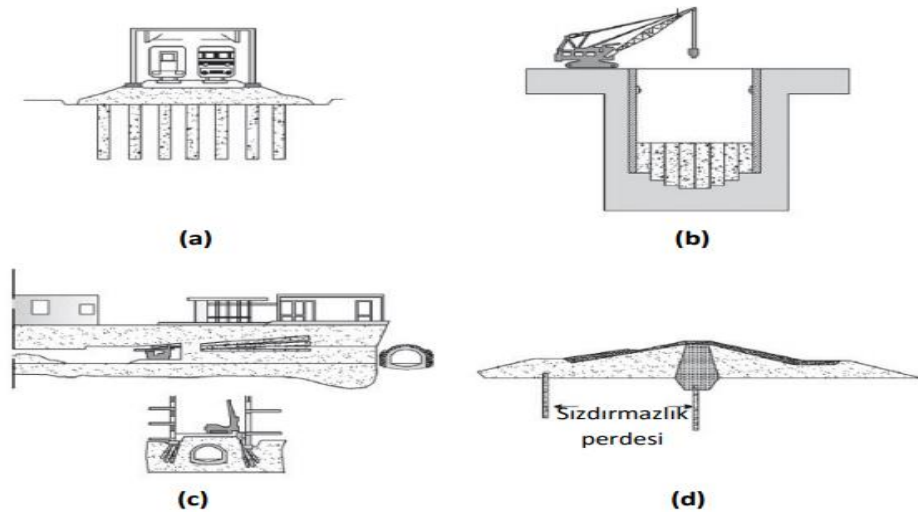
Jet enjeksiyonu, iyileştirilmesi planlanan zeminin istenilen derinliğe kadar özel delgi makinesi ile delinmesi, daha sonra jet grout ekipmanı kullanılarak yüksek basınçla (400-500 bar) çimento şerbetinin zemin içerisine püskürtülmesi ve kullanılan özel tijin belirli bir hızla döndürülerek istenilen derinlikten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

yerinde silindirik kolon oluşturma işlemidir. Bu işlem sunucunda zemin-imento karışımı zaman içerisinde priz olarak ‘‘soilcrete’’ adı verilen zemin-imento kolonlar oluşur. Böylece mevcut zeminin mukavemeti artar, deformasyonlar azalır ve permeabilitesi azalır. Yüksek basınçla enjekte edilmesi mevcut zemini kesmesi ve beraber zeminle imento şerbetinin karışması sonucu oluşan kolonlar homojen bir eleman olarak işlev görür.

Jet grout’ın uygulandığı zemin aralığının çok çeşitli olması, kullanılma alanının çok geniş olması açısından son yıllarda oldukça ne 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 imento-su karışımı kullanıldığı için evre kirliliği yaratmaması,
- Jet grout kolonları istenilen çapta ve derinlikte imal edilebilir.

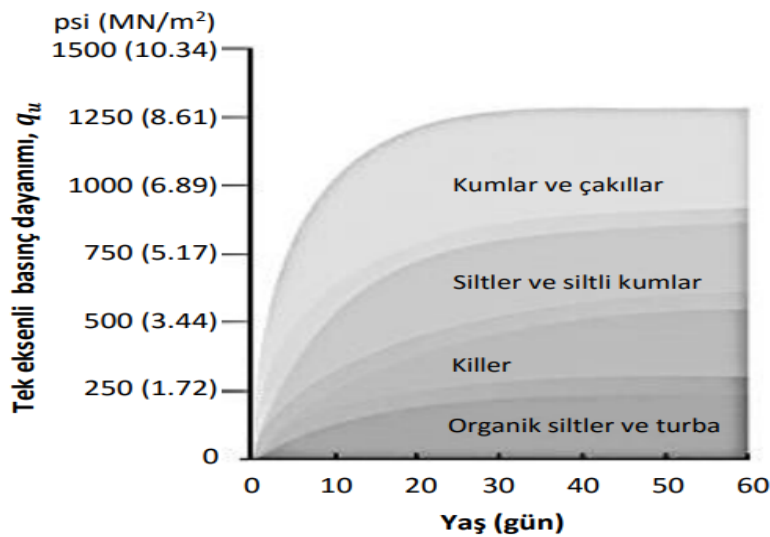


şekil 1.4. Tipik jet enjeksiyon uygulamaları: (a) dolgu taban zemini iyileştirmeleri, (b) kazı-ıksa sistemlerinde taban geçirimsizlik tapaları, (c) geçici tünel destek sistemleri ve (d) barajlarda sızdırmazlık perdeleri (Croce vd., 2014)

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 birlikte 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 1.5'te farklı zeminlerde uygulanan jet enjeksiyonu sonucu oluşan soilcrete kolonların serbest basınç dayanım değerleri gösterilmiştir.

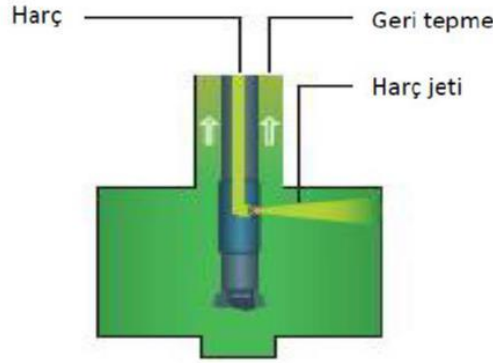


Şekil 1.5. Zemin tipine bağlı soilcrete dayanımları (Hayward vd., 2010)

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.

1.1.4.1 Jet 1 yöntemi

En basit ve en çok kullanılan yöntemdir. 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).



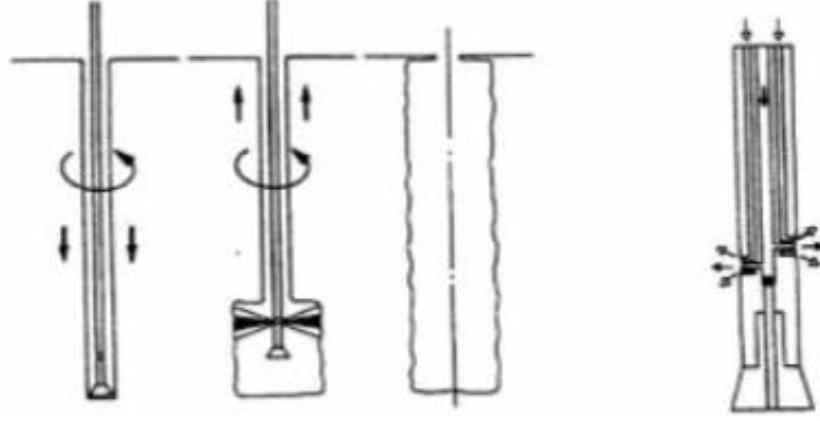
Şekil 1.6. Jet 1 yöntemi (Keller, 2014).

1.1.4.2 Jet 2 yöntemi

Çift çeperli bir borunun kullanıldığı, çift akışkanlı metottur. Bu yöntemde orta borudan enjeksiyon malzemesi, basınçlı hava dış boruda zemine püskürtülür. 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).

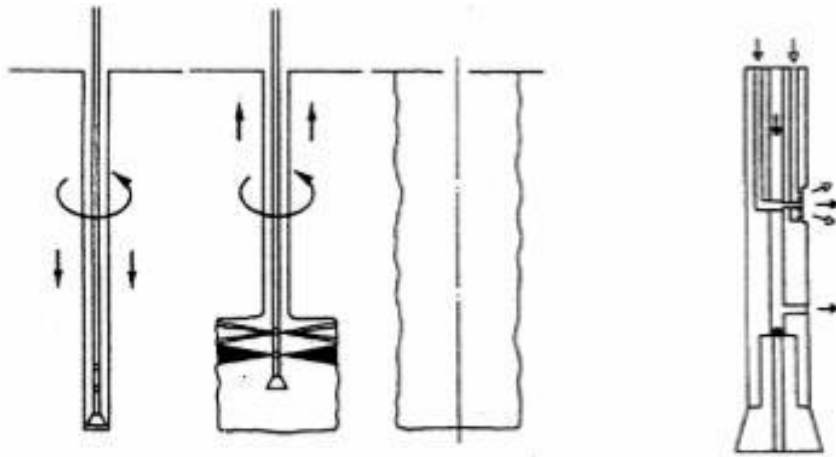
Jet 2 yönteminin dezavantajı çimento ile birlikte zemin içerisine hava püskürtülmesi sonucu kolondaki hava içeriği artmasıdır. Bunun sonucunda elde edilen zemin-çimento karışımın mukavemeti jet 1 yöntemine göre daha düşüktür.



Şekil 1.7. Jet 2 yöntemi (Bakım, 2007)

1.1.4.3 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 nozıl'dan, su-hava karışımının içine enjekte edilmektedir. Bu yöntemle yapılan kolonlar 2 m'yi geçmektedir (Küsin 2009).



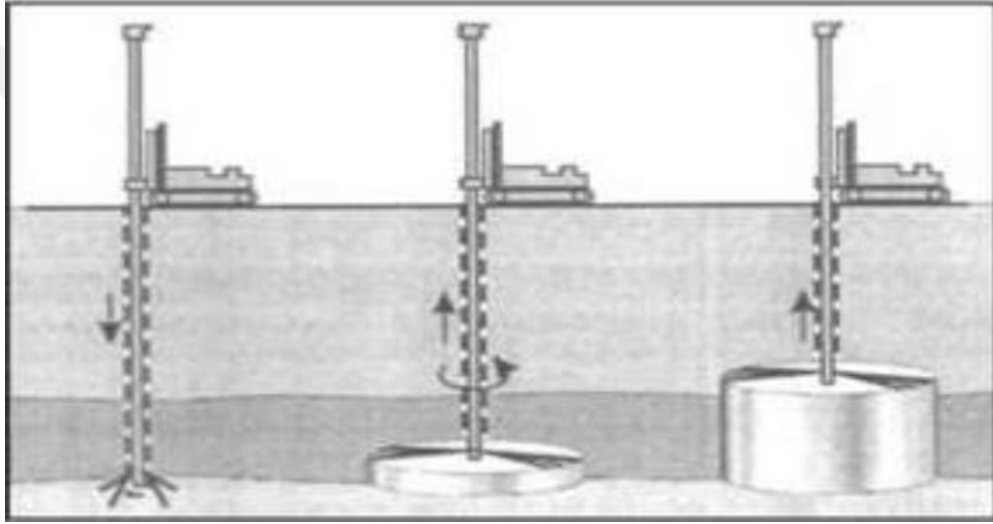
Şekil 1.8. Jet 3 yöntemi (Bakım, 2007)

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).

1.1.4.3 Süper jet yöntemi

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



Şekil 1.9. 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).

1.2 Enjeksiyon tasarımı ve parametreleri

Jet enjeksiyonu imalatında kullanılan parametrelerinin tipik değerleri Çizelge 1.3 '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 1.3. Jet grout yönteminin işletim parametreleri (Xanthakos, 1994)

PARAMETRELER			JET GROUT SİSTEMLERİ		
			TEK (JET 1) AKIŞKANLI	ÇİFT (JET 2) AKIŞKANLI	ÜÇ (JET 3) AKIŞKANLI
ENJEKSİYON BASINCI	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
AKIŞKAN ORANI	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 AĞIZLIĞININ(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 AĞIZLIĞININ (NOZUL) SAYISI	Su	Adet	ÖY(1)	ÖY(1)	1-2
	Enjeksiyon Harcı	Adet	2-6	1-2	1
TİJİN DÖNME HIZI		(Devir/dk)	10-30	10-30	10-30
TİJİN BİR ADIM İÇİN ÇEKİLME SÜRESİ (4 cm)		(sn)	8-15	10-20	15-25
KOLON ÇAPI	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/ÇİMENTO ORANI		S/Ç	0.8:1-2:1		
ISLAH EDİLEN ZEMİNİN BİRİM HACİM AĞIRLIĞI		kg/m ³	400-800	400-800	400-800
ZEMİNİN 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					

1.3 Çimento Bazlı 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).

1.3.1 Stabilité

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



Şekil 1.10. Bleeding (çökme) deneyi(Çelik, 2016)

Bleeding tekniği Stokes yasası prensibine dayanmaktadır. Prensibin uygulanma yöntemi hazırlanan karışım bir silinde çökmeye 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 karışım çökme olmuyorsa hazırlanan süspansiyon karışım stabil, süspansiyon karışım çöküyorsa stabil değildir

(Haussman, 1990). Hazırlanan süspansiyonun stabilitesi şu şekilde tanımlanır; 1000 ml ölçekli mezur içindeki enjeksiyon karışımının 2 saat sonunda çökme sonucu üstte kalan su hacminin toplam süspansiyon karışımının hacminin %5'inden az ise karışım stabil kabul edilir (Hakansson vd., 1992).

1.3.2 Priz süresinin belirlenmesi

Enjeksiyon materyalinin akışkanlık özelliğini kaybetme süresi olarak tanımlanır. Priz süresi su ve çimentonun karıştırıldığı zaman ile çimento şerbetinin fiziksel ve kimyasal değişiklik 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 değişir (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 hidratasyon hızlandığından priz süresi kısalır.

-s/ç oranının artması priz süresini uzatmaktadır.

1.3.3 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.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (1.5)$$

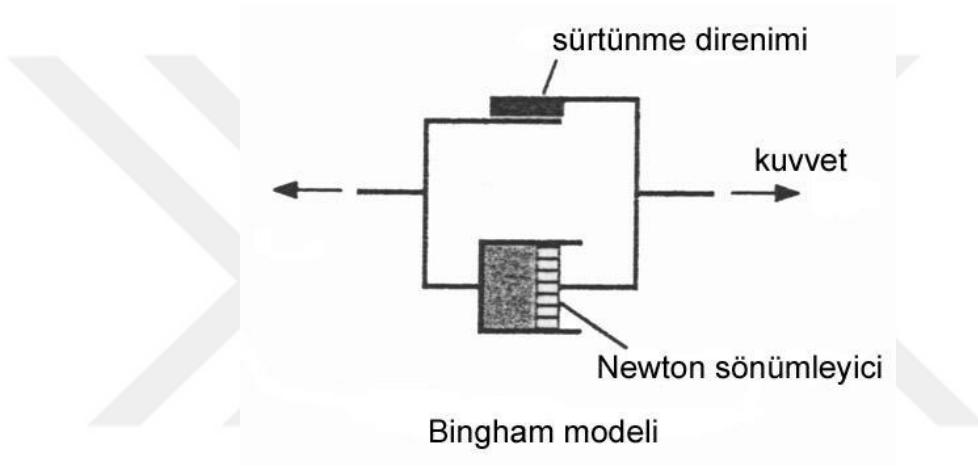
Burada,

τ = sıvı içindeki kayma gerilmesi

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

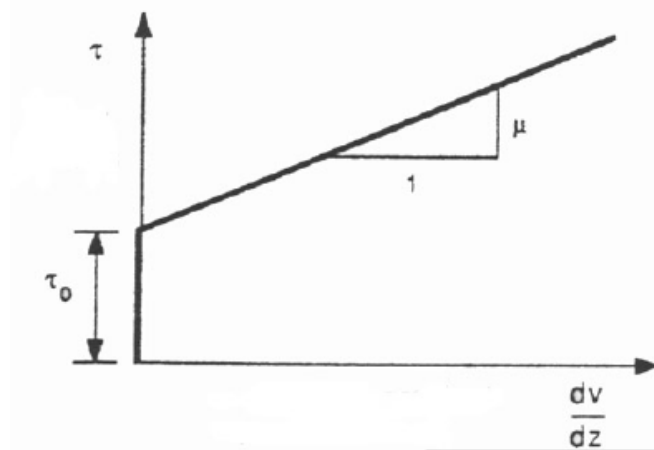
μ = viskozite

Bu denklem laminar akım için geçerlidir.



Şekil 1.11. Bingham modeli (Warner, 2004)

Non-Newton sıvısının mekanik modeli, paralel halde (bağlantılı) bir sönümleyici ve sürtünme direnimli bir elemandır (Warner, 2004).



Şekil 1.12. Bingham modelinin reolojik davranış grafiği

Bu kurala uyan karışımlar Bingham sıvısı denilir. Bingham modeli reolojik davranışı;

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dz} \quad (1.6)$$

ile ifade edilmektedir. τ_0 başlangıç akma gerilmesi (rijitlik).

Su, Newton davranış gösteren bir sıvıdır. Süspansiyon içindeki kil veya çimento enjeksiyonu yaklaşık olarak bir Bingham davranış modeli gibi düşünebilir. 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).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad (1.7)$$

Burada,

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

Kinematik viskozite birimleri, m^2/sn veya Centistoke'dur. (cSt)

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sn}$$

Yukarıdaki denklem türbülanslı akım için, dinamik eddy viskozite(η) ilave edilerek modifiye edilmiştir.

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{du}{dz} \quad (1.8)$$

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

Laminar akımdan türbülanslı akıma geçişte çoğunlukla boyutsuz Reynolds sayısı (Re) kullanılır.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1.9)$$

Burada;

v = akış hızı

R =karakteristik uzunluk

L =karakteristik uzunluk

İdeal bir harç düşük viskoziteli, kontrol edilebilir priz süresi ve zemine enjekte edildiğinde yüksek mukavemettedir. 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 slump yayılma deneyi

1.4 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.

1.5 Kazan Altı Taban Külü

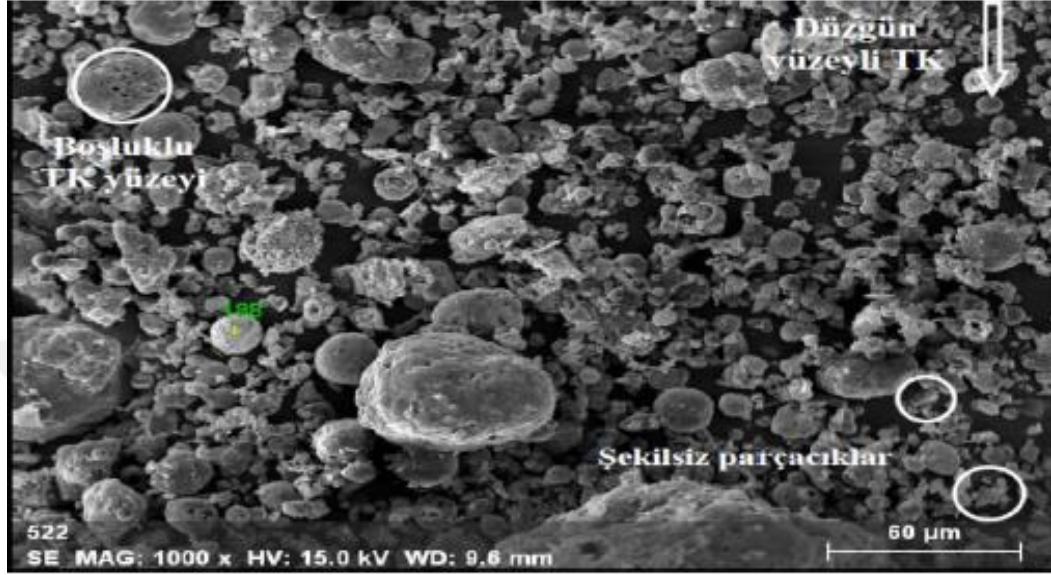
İşletmeler ve termik santraller enerji ihtiyacını karşılamak için kömür kullanmaktadır. Kömürün yanması sonucu atık malzeme olarak cüruf, uçucu kül ve kazan altı taban külü ortaya çıkar. Bu atık malzemelerin depolanması ve saklanması konusunda ciddi sıkıntılar yaşanmakta ve enerji üretimi için kullanılan kömür oranının zaman geçtikçe artması bu atık malzemelerin çevreden bertaraf edilme problemini doğurmuş ve böylece bu atık küllerinin beton teknolojisinde tekrar kullanılabilirliği birçok akademik çalışmaya konu olmuş. Termik santrallerde kömür yakılması sonucunda ortaya çıkan ciddi miktarda kazan altı taban külü ve uçucu küller mineral katkısı olarak birçok inşaat mühendisliği uygulama alanında ve endüstrinin farklı alanlarında tekrar kullanılarak gerek çevresel yönden ve gerekse de ekonomik yönden dikkate değer faydalar sağlamıştır(Güler, 2005).

Taban külü yapı ve fiziksel özellikleri bakımından iyi bir izolasyon malzemesidir. Bu sebeple inşaat sektöründe blok tuğla, briket, çatılarda kaplama malzemesi, drenaj sistemlerinde filtre görevi, sıcak asfalt ve otoyollarda kaymayı önleme amacı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Doğal agregalarla karşılaştırıldığında yalıtım yönünden daha etkili olduğu tespit edilmiş ve yapı endüstrisinde kullanılmaya başlanılmıştır.

Taban külü portland çimentosu yerine kullanılmasıyla yapılan deney ve araştırmalar beton örneklerinde %10'a varan oranlara kadar betonun basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı, daha yüksek oranlarda katıldığında mukavemet değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Yapılan incelemelerde mukavemet değerindeki azalma, farklı faz dağılımına ve daha yüksek yanmamış karbon içeriğine bağlamıştır(Kurama ve Kaya, 2008).

Kazan altı taban külünün (KATK) kimyasal yapısı uçucu kül ile benzerlik gösterir. Taban külünde Al_2O_3 , SiO_2 ve Fe_2O_3 bileşenler bulunur. CaO , K_2O , MgO , Na_2O_3 , P_2O_5 , SO_3 ve TiO_2 bileşenleri de çok az miktarda bulunur(Kaya, 2010).

KATK, küresel daneler ve düzensiz şekilde bulunmaktadır. Küresel daneler camsı yapıya sahip olup, puzolanik aktiviteleri yüksektir. Küresel olmayan daneler ise yanma reaksiyonuna girmeyen minerallerden (kuvartz ve feldispatlar) olup, boşluklu yapılara (kil kalıntıları, yanmamış karbon) sahiptir(Tikalsky vd., 1992).



Şekil 1.13. Öğütülmüş KATK'nün 2000 ölçekle büyütülmüş mikro yapısı(Toprak, 2011)

1.6 Tez Çalışmasının Amacı ve Hedefi

Bu tez çalışmasının temel amacı endüstriyel amaçlı bir fabrikanın kömür tüketmesi sonucu ortaya çıkardığı KATK'nün mineral katkısı olarak çimento bazlı harç karışımların hazırlanmasında çimento yerine ikame edilmesi sonucunda karışımların reolojik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir.

KATK ile çimento bazlı harçların yüksek su/bağlayıcı (s/b) oranına göre reolojisi, işlenebilirliği ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu deneysel araştırma sürecine dayanarak bir atık malzemesi olan KATK'nün çimento yerine ikame edilerek kullanılabilirliği araştırılıp bu atık malzemenin faydalı bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir. Bu araştırma kapsamında aşağıdaki deneysel çalışmalar yapılmıştır:

- I. KATK'nün bir katkı malzemesi olarak kullanılmasının reolojik özellikler üzerindeki etkisinin araştırmak ve genellikle jet enjeksiyon uygulamaları için

- kullanılan su/bağlayıcı (s/b) oranlarında çimento bazlı harçların özelliklerinin (viskozite ve akma gerilimi) incelenmesi
- II. KATK 'nün çimento bazlı karışımlarının işlenebilirlik özelliklerini incelemek için ayrıca marsh hunisi, mini slamp ve plaka kohezyon gibi özelliklerin incelenmesi
 - III. Daha sonra oluşturulan KATK 'nün ve çimento karışımından oluşturulan harcın mekanik özelliklerini incelemek için KATK, çimento, kum ve suyun farklı s/b oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulan soilcrete numunelerin serbest basınç dayanımı ve UPV (Ultrasonik dalga hızı) testlerinin yapılması sonucu KATK 'nın etkisinin incelenmesi
 - IV. Ayrıca değişik su/bağlayıcı (s/b) oranlarında hazırlanacak taze haldeki karışımların stabilite kontrolü açısından çökelme (bleeding) testlerinin yapılması
 - V. Son olarak sonuçlar kontrol edilip değerlendirildikten sonra literatürdeki araştırmalar ile karşılaştırılıp, KATK 'nün çimento bazlı harç enjeksiyon uygulamalarında işlenebilirlik, akışkanlık, mekanik ve stabilite özellikleri açısından kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi

1.7 Tez Çalışmasının Düzenlenmesi

Bölüm 1: Çalışmanın genel arka planı ve tanıtımı verilmiştir. Enjeksiyon dolgu teknikleri, enjeksiyon dolgu malzemeleri, çimento bazlı enjeksiyonlar, çimentonun enjeksiyon dolgularının reolojik ve mekanik özellikleri hakkında genel bilgiler bu bölümde ele alınmıştır.

Bölüm 2: Mineral katkılı çimento bazlı harçların reolojik ve mekanik özellikleri ile ilgili literatür özeti verildi.

Bölüm 3: Çimento esaslı harçların reolojik özelliklerine ait literatürde sunulmuş teorik ve analitik bilgilerin değerlendirilmesinden ve buna ek olarak kullanılan yöntem ve matematiksel modellerin incelenmesinden bahsedilmiştir. Detaylı gözden geçirilmesi ve teorik arka planı incelenmiş, yöntem ve modeller tartışılmıştır.

Bölüm 4: Bu çalışma için hazırlanan KATK ile karıştırılan çimento esaslı harçların reolojik ve işlenebilirlik özelliklerine ilişkin deneysel çalışma sunulmuştur. Ayrıca tez çalışmasından elde edilen test sonuçları tartışılmıştır.

Bölüm 5: Çimento esaslı harçların KATK ve Kötü derecelenmiş kum (SP) ile karıştırılmasından elde edilen soilcrete numunelerin tek eksenli serbest basınç dayanımı, UPV, stabilite ve kırılma kriteri analizleri araştırılmış ve test sonuçları tartışmalı olarak sunulmuştur.

Bölüm 6: Tez çalışmasından elde edilen bulgular özet olarak bu bölümde sunulmuştur.



BÖLÜM II

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Çimento Esaslı Harçların Reolojik Özellikleri

Harç karıştırma süresi, stabilite (bleeding), doygunluk derecesi ve katkı maddeleri gibi diğer etki faktörlerini içeren harçların reolojik özellikleri (örn. Akma gerilimi ve viskozitesi) 1954'ten beri çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yüksek viskozitesi ve kısa priz süresi nedeniyle çimento enjeksiyonunun zayıf geçirgenliği nedeniyle katkı harçları, mikro ince çimento harcı veya katkı maddeleri ile Portland çimento harcı özelliklerinde (örn. bentonit, vb.) yoğunlaşmıştır. Geçmiş araştırma çalışmalarından çıkarılan bazı yorumlar / bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Hakansson vd., (1992) harçların akış özelliklerini değerlendirmek için kullanılabilecek rotasyonel viskometriye dayalı bir ölçüm tekniğini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel analizlerde çimento bazlı harçların reolojik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir matematiksel model olan Bingham modelden faydalanmışlardır. Kayma gerilmesindeki artışın ve bentonit ilavesinin hem akma gerilimini hem de plastik viskoziteyi artıracağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin akma gerilimini ve plastik viskoziteyi azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bentonit ve akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin harç karışımların hazırlanmasında beraber kullanılması sonucu düşük akma gerilimi ve düşük plastik viskozite değerlerinin elde edildiği gösterilmiştir.

Vipulanandan ve Shenoy, (1992) katkı malzemeli çimento harçlarının reolojik özelliklerini incelemiş ve maksimuma uygun basınçta enjekte edebilmek için maksimum parçacık boyutunun, boşluk miktarının 1/3 ila 1/10'u geçmemesi gerektiğini belirtmiştir.

Helal ve Krizek, (1992) çimento esaslı harçla oluşturulan kumdaki boşluk yapısının düzenlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Çimento şerbeti ile enjekte edilen boşluk yapısının askıdaki partiküllerin çökme davranışı ve s/ç (su/çimento) oranının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir.

Shroff vd., (1996) mikro ince çimento tozu harçlarının reolojik özelliklerini incelemiş ve mikro ince çimento katkılı harcın $k = 7.89 \times 10^{-3}$ cm/sn geçirgenliğe sahip kumlu zemine enjekte edebildiğini bildirmiştir. Ayrıca mikro yapıda bulunan çimento harcının, birçok harç üretiminde kullanılan orta ve ince kumda enjekte kabiliyetinin olmadığı ve uygulanan harç enjeksiyonların da ise mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir.

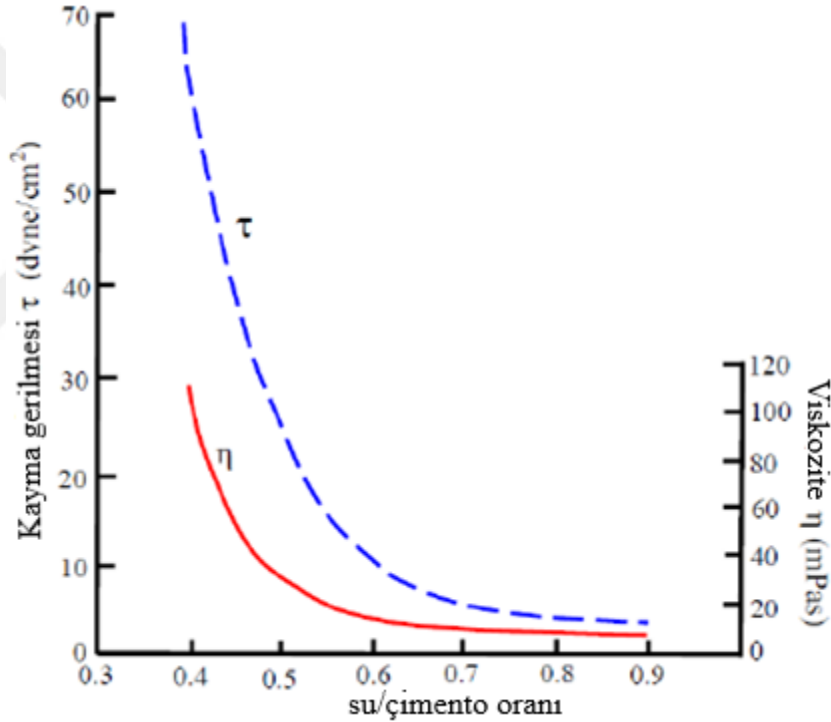
Güllü, (2015) jet enjeksiyon için karşılaştırmalı olarak farklı malzemeler ile çimento esaslı harç karışımlarının viskozite özelliklerini reolojik özellikler (viskozite, akma gerilimi) ve reolojik davranışlar (kayma gerilimi-kesme hızının akış eğrisi) açısından araştırmıştır. Karışımında kullanılan kil, kum, kireç ve kazan altı taban külü kuru ağırlığınca %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90, ve %100 oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda kullanılan karışımların, esas olarak karışım oranlarına bağlı olarak karışımların enjeksiyon edilmesine olumlu katkı sağladığı gözlemlenmiştir. %30'luk karışım oranına kadar olan oranların potansiyel olarak uygulama için elverişli olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan karışım kombinasyonları ile çimento üzerinde fayda sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışmada hazırlanan karışım oranları ile yapılan deneylerde çimento üzerindeki etkileri, reolojik etkileri ve jet enjeksiyonları için umut verici olduğunu vurgulamıştır.

Hu vd., (2019) harcın kendiliğinden çekim etkisi dikkate alınarak permeasyon enjeksiyonu için matematiksel modeller önermişler. Bingham ve Newton harcı ile ilgili modeller, genelleştirilmiş Darcy yasasına ve küresel difüzyon teorisine dayanmaktadır. Ayrıca Bingham modeli için kullanılan beton harç boyutunun bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Enjeksiyon basıncı dağıtım yasasının bir analizi ve daha sonra yerleşik modeller kullanılarak özgül ağırlık etkisi dikkate alınarak difüzyon yarıçapının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Tahmin modelini kontrol etmek ve doğrulamak için enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, enjeksiyon basıncının difüzyon yarıçapının artmasıyla doğrusal olarak azaldığını, bu durumda Bingham ve Newton harçlarında enjeksiyon basıncının doğrusal olmayan azalması doğrulanmıştır.

Sha vd., (2018) uçucu külün, çimento bazlı enjeksiyonların reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Uçucu kül, çimento bazlı harçların akışkanlığını ve yayılma özelliğini artırabileceğini, ancak taze enjeksiyonların stabilitesini azalttığını belirtmişlerdir.

Rosquoët vd., (2003) çimento harçlarının reolojik özellikleri ile ilgili yaptığı çalışmada harç karışım numunelerini 0,35 ile 1 su/çimento oranlarında hazırlamışlardır. Tüm oranlar için “gama densitometre tezgâhı” kullanılarak karışımların yoğunluklarını belirlemişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda su içeriği ve yoğunluğundan yola çıkarak çimentonun hidratasyon derecesinin belirlenebileceğini gözlemlemiştir.

Raffle ve Greenwood, (1961) çimento esaslı şerbetin, reolojik özellikleri ile zemine nüfuz etme kapasitesi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çimento esaslı harcın enjekte edilebilirliğini başlangıç ile son aşamadaki viskozite ve kayma dayanımı özellikleri incelenmiştir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi 0.6'yı geçmeyen su/çimento oranı (s/c) çimento şerbeti için viskozite ve kayma gerilmesinde belirgin artışlar bildirilmiştir.



Şekil 2.1. Değişen s/c oranı için kayma dayanımı ve viskoziteleri (Raffle ve Greenwood'dan sonra, 1961)

Park vd., (2005), silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi mineral katkı içeren harç malzemelerinin reolojik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışma, silindirik milli Rotovisco RT 20 reometre kullanılarak 3 farklı kombinasyonda karışımlar hazırlanmıştır. Tek bileşenli karışımın, süper akışkanlaştırıcı ilave edilerek elde edilen harç karışımının reolojik özelliklerini iyileştirdiği göstermiştir. Çimentoyu iki bileşenli sistemde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu (YFC) ile değiştirmek, plastik

viskozite ve akma gerilimi gibi reolojik özellikleri azaltmıştır. Böylece, PC-silis dumanı (SD) ikamesi durumunda SD 'nin artması hem plastik viskoziteyi hem de akma gerilmesini kademeli olarak arttırmıştır. Üç bileşenli harç karışımında, SD 'den elde edilen karışımlara kıyasla karışımların reolojik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

2.2 Kazan Altı Taban Külü ile İlgili Literatür Taraması

Chotetanorm vd., (2013) yüksek kalsiyum bazlı kazan altı taban külünün geopolimer harçları üzerindeki sülfata karşı direnci, basınç dayanımı, sorptivite (infiltrasyon hızı) ve gözenek boyutuna etkisi incelenmiştir. Jeopolimerizasyonu etkinleştirmek için NaOH, sodyum silikat ve sıcaklıkla küre maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, yüksek kalsiyumlu kazan altı taban külünün, iyi reaksiyon dereceleri ve ince kazan altı taban külündeki düşük gözenek miktarı nedeniyle yüksek mukavemet ürettiğini göstermiştir. Aynı zamanda karışımların işlenebilirliğini ve emilimini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Topçu ve Bilir, (2010) kazan altı taban külünü öğütmeden ince agregaya yerine ilave ederek oluşan harç karışımlarının büzülme çatlama etkilerini incelemiştir. Kazan altı taban külü, ince agregaya yerine ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90, ve %100 oranlarında kullanılmış ve büzülme çatlaklarını tespit etmek için halka (ring) testi uygulanmıştır. Sonuç olarak %100 oranındaki kazan altı taban külünün kullanımının, referans kuma göre KATK 'nın kaba yapısına bağlı olarak harç numunelerinin gözenekli yapısı nedeniyle rötre (büzülme) azalttığı gözlenmiştir. Kazan altı taban külünün artması ile gözenekli yapısının artması dayanım ve elastisite modülünde azalmaya sebep olmuştur.

Singh ve Siddique, (2014) kazan altı taban külünün (KATK) betonda ince agregaya potansiyelini değerlendirmiştir. Yapılan deneylerde kum yerine %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 kömür külü ilave edilerek betonun çatlama büzülmesi, klorür iyonu geçirgenliği, sülfat ve sülfürik asidin dış etkilere karşı direnci gibi basınç dayanımı ve dayanıklılık yönleri deneysel gözlemlerle incelenmiştir. Test sonuçları, kazan altı taban külü katkılı betonun katkısız betona kıyasla daha iyi boyutsal kararlılık, sülfürik asit etkisine karşı biraz daha iyi direnç gösterdiğini göstermiştir. Kazan altı taban külü katkılı betonun sülfat etkisi altında performansı, kontrol beton numunesi ile neredeyse

aynıdır. % 10 magnezyum sülfat çözeltisine 180 gün kür süresinden sonra kazan altı taban külü katkılı betonun basınç mukavemetinde azalma gözlenmiştir. 180 güne kadar sülfat çözeltisine daldırılmış beton numunelerinin SEM görüntüsü ve XRD spektrumunun incelenmesi sırasında hiçbir sülfat atağı belirtisi gözlenmemiştir. Kazan altı taban külü katkılı betonun klorür iyonu penetrasyonuna karşı daha iyi direnç gösterdiği görülmüştür.

Singh ve Siddique, (2013) betonda kazan altı taban külünün kullanılmasını inceleyen genel bir bilgi değerlendirmesi yapmışlardır. Kazan altı taban külünün taze betonun priz süresini, büzülmesini, işlenebilirliğini ve betonun mukavemetini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Yapılan bu araştırma sonucunda ince agregaya yerine kazan altı taban külü kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Bilir, (2012) öğütülmemiş kazan altı taban külü ve öğütülmemiş granül yüksek fırın cürufunun betonun dayanıklılığına ilişkin geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Öğütülmemiş kazan altı taban külü ve öğütülmemiş granül yüksek fırın cürufu ince agregaya olan kumun yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde bazı geçirgenlik-dayanıklılık testleri yapılmıştır. Hazırlanan beton numunesinin geçirgenliği üzerindeki etkisini gözlemlemek için, hızlı klorür geçirgenliği, donma-çözünme ve ıslatma-kurutma testleri yapılmıştır. Bu testler betonun geçirgenliğini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, bu beton numunelerinin mikro yapıları gözlemlenmiştir. Betonda kullanılan öğütülmemiş kazan altı taban külü (KATK) ve granüle yüksek fırın cürufları (GYFC) kimyasal içerikleri ve mekanik özelliklerinden kaynaklı betonda kullanıldığı zaman gözenekler içine yerleşip betonun geçirgenliğini azalttığını gözlemlenmiştir. Bu tür yan ürünler kullanılarak ekonomik, teknik ve çevresel avantajlar elde edilebilir olduğu görülmüştür.

Özkan vd., (2007) kazan altı taban külü, uçucu kül ve granüller yüksek fırın cürufu olan mineral katkıları içeren beton harçlarının basınç dayanımı özelliklerini incelemişlerdir. Uçucu kül, çimento yerine ikame edilerek, kazan altı taban külü ve granül yüksek fırın cürufu ise ince agregaya yerine ikame edilerek hazırlanan harç karışımlardan elde edilen numunelerin (7, 28 ve 90 günlük) su emme kapasitesi, birim hacim ağırlık ve tek eksenli serbest basınç dayanımları deneysel olarak değerlendirilmiştir. Bu deneyler için numuneler iki şekilde hazırlanmıştır. Birincisi kazan altı taban külü ve granüller yüksek

fırın cürufu içeren M1 ve ikincisi kazan altı taban külü, uçucu kül ve granül yüksek fırın cürufu içeren M2 numuneler üretilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında betonun basınç dayanımı ve su emme kapasitesinde dikkate değer düşüşler gözlenmiş ve betonun yoğunluğunda da azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kazan altı taban külü ile granüller yüksek fırın cürupları hafif beton üretiminde sınırlı miktarda kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Kim ve Lee, (2011) yaptıkları çalışmalarında 60-80 MPa basınç dayanımına sahip yüksek mukavemetli betonda kazan altı taban külünün (enerji santralinin yan ürünü) ince ve kaba agrega şeklinde kullanımını değerlendirmek için deneyler yapmışlardır. İlk olarak, kimyasal bileşimler, özgül ağırlık ve SEM görüntüleri gibi kazan altı taban külü parçacıklarının kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. İnce ve kaba kazan altı taban külünün farklı oranlarda (% 25,% 50,% 75 ve% 100) normal kum ve çakıl yerine ikame edilerek deneyler yapılmıştır. Mekanik özellikleri incelemek için, basınç dayanımı ve kazan altı taban külü ile yüksek dayanımlı betonun elastisite modülü ve eğilme dayanımı deneylerini yapılmıştır. Kazan altı taban külü normal kaba agregaların %100 'ünün yerine ikame edildiği zaman betonun çökme miktarının düşüş olduğu, ince kazan altı taban külünün ise çökme miktarını etkilemediği görülmüştür. Ayrıca, hem ince hem de kaba kazan altı taban külü agregalarının basınç dayanımının eğilme mukavemeti üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir.

Argiz vd., (2018) çimentoya bileşen olarak betona kazan altı taban külü eklemişlerdir. Çimentoya kazan altı taban külünü ve uçucu külü ağırlıkça %10 ve %25 ikame edilerek deneyler yapılmıştır. Betonda doğal klorür difüzyonu ve klorür göçünün yanı sıra elektriksel direnç değerlerine bakılmıştır. Sonuç olarak % 25'inin kazan altı taban külü ikame edilerek yapılan betonun klorüre karşı daha yüksek dirence sahip olduğu ve bunun da kazan taban külün inceliğine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Chindaprasirt vd., (2009) uçucu kül ve öğütölmüş kazan altı taban külünden yapılan jeopolimerler arasında karşılaştırma yapmışlardır. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri aktivatör olarak kullanılmıştır. 1.5 Na_2 bir kütle oranı $\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ve NaOH düşük konsantrasyonlarda (5, 10 ve 15 M) kullanılmıştır. Jeopolimerler 48°C ve 65 °C sıcaklıkta sertleştirilmiştir. Basınç dayanımı araştırmak için jeopolimer harçlar hazırlanmıştır. Sonuçlar, hem uçucu külün hem de kazan altı

taban külünün jeopolimerlerin üretimi için hammadde olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Jeopolimerlerin özellikleri, kaynak materyallere ve NaOH konsantrasyonuna bağlıdır. Uçucu kül daha reaktiftir ve kazan altı taban külü ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir jeopolimerizasyon derecesi üretir. 10 M'lik orta NaOH konsantrasyonunun uygun olduğunu bulunmuş ve hazırlanan jeopolimer harçları, uçucu kül 35 MPa ve kazan altı taban külü 18 MPa tek eksenli serbest basınç dayanımları görülmüştür.



BÖLÜM III

GENEL KISIM

3.1 Zeminlerde Enjeksiyon

3.1.1 Enjeksiyon Tanımı ve Amacı

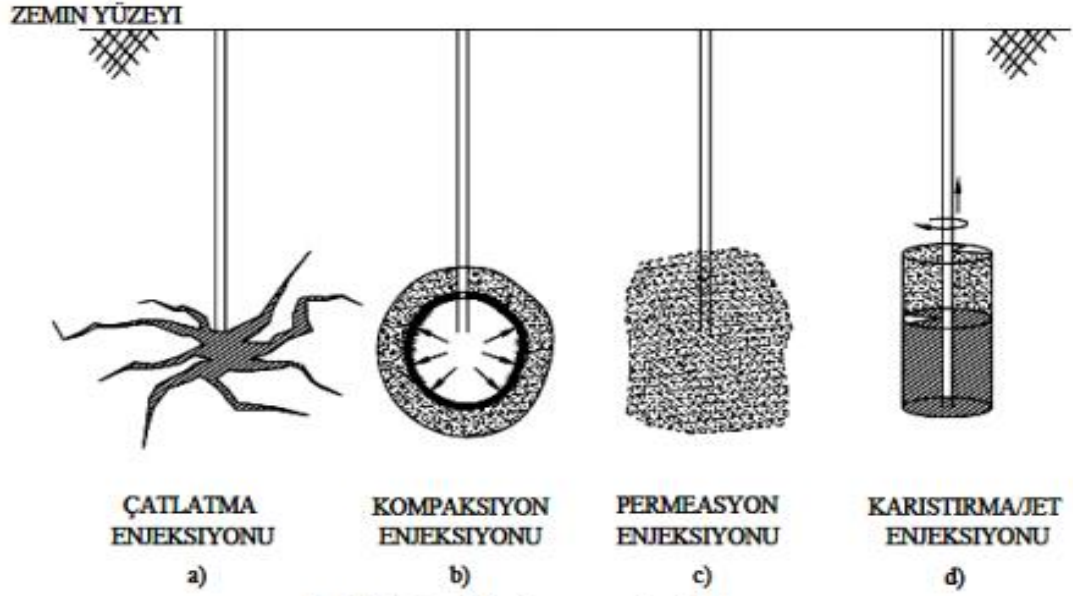
Enjeksiyon, akışkanlaştırılmış malzemelerin, zemin ve bitişik yapılar arasındaki zemin boşluklarına enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Enjeksiyonun ana hedefleri daha güçlü, daha yoğun, daha az geçirgen bir zemin veya kaya oluşturmaktır. Ayrıca enjeksiyon, başka türlü erişilemeyen bir zeminde veya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

3.1.2 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 3.1**'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Enjeksiyon teknikleri (Mitchell, 1981)

3.1.3 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 emülsüyonlara örnek olarak verilebilir.
- **Solisyonlar:** 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.

3.1.4 Harç Malzemesi Parametreleri

Daneli harçların gözenekli ortamda geçirgenliği aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

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

Yukarıda belirtildiği gibi çözelti 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

3.1.5 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, $t=V/Q$

3.1.6 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.

- Laminer akım / Newton sıvılar için

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} = \eta \gamma \quad (3.1)$$

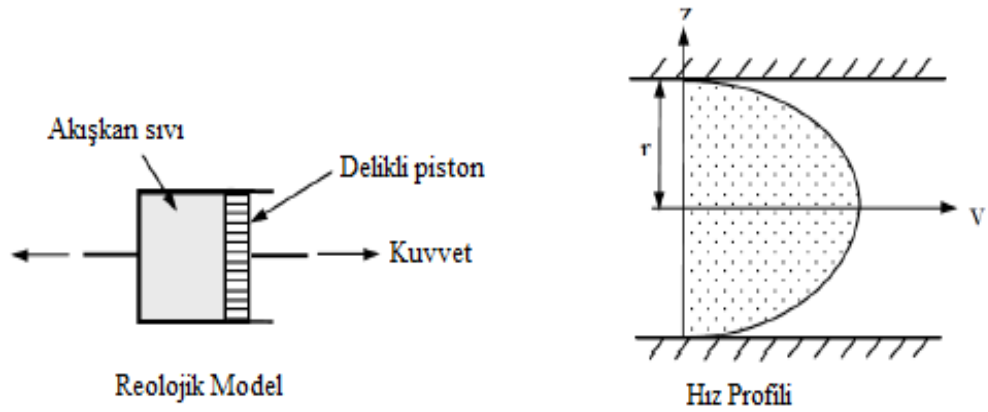
Burada,

τ = sıvı içindeki kayma gerilmesi

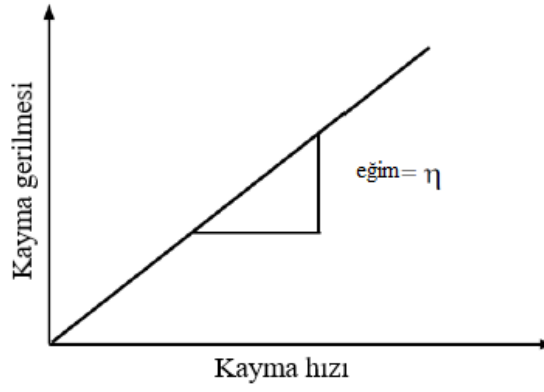
$\frac{dv}{dz}$ = hız gradyanı (eğim); bir sıvı katmanının, bitişik sıvı katmanına göre rölatif hareketinin ne hızla olduğunu temsil eder.

μ = viskozite

Bu denklem laminer akım için geçerlidir.



Şekil 3.2. Newton model(Çelik, 2016)



Şekil 3.3. Newton sıvısı(Çelik, 2016)

- Türbülanslı akış için

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dz} \quad (3.2)$$

Burada;

τ : kayma gerilmesi

η : basınçlı viskozite katsayısı

μ :dinamik girdap viskozitesi

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \text{ (kinematik viskozite)} \quad (3.3)$$

Burada;

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

ρ =yoğunluk

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

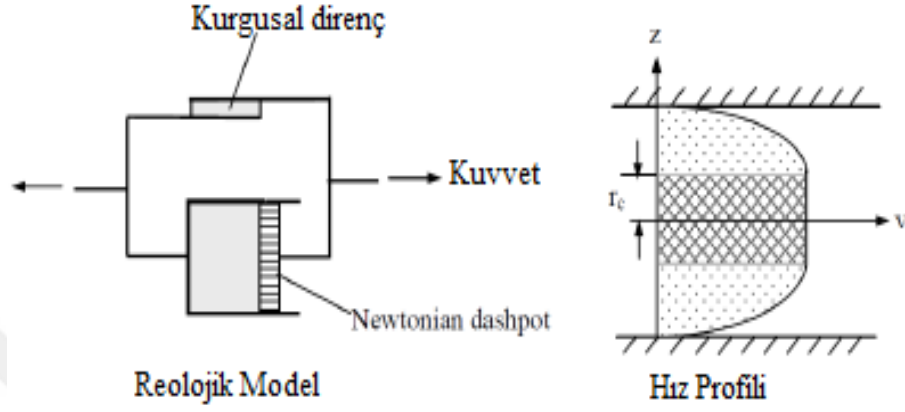
- Süspansiyonlar genellikle Newton sıvısı olarak değil Bingham'ın sıvılar olarak ifade edilir.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{dv}{dz} = \tau_0 + \eta_p \gamma \quad (3.4)$$

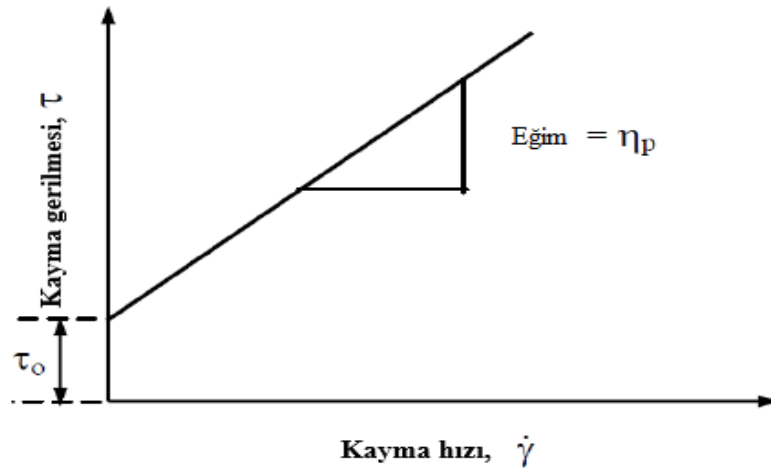
Burada;

η_p = plastik viskozite

Bingham'ın sıvıları, akış limiti, akma gerilimi veya eşik direnci ile (şekil 3.4'de ve şekil 3.5'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 varsayılabildiği sürece, kayma gerilimi ve kayma hızı (gradyan) birbiriyle orantılıdır.



Şekil 3.4. Reolojik model ve hız profili – I (Çelik, 2016)



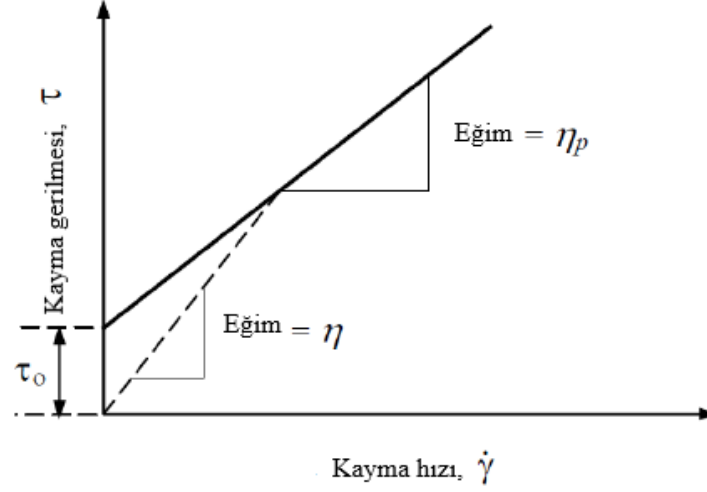
Şekil 3.5. Reolojik model ve hız profili – II (Çelik, 2016)

3.1.7 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 gibi yazılmasıyla elde edilir.

$$\eta = \eta_p + \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} \quad (3.5)$$

Burada η , görünür olmayan viskozite adı verilen belirli bir kesme hızında Newton olmayan bir materyalin eşdeğer Newton viskozitesidir.



Şekil 3.6. Görünür viskozite (Çelik, 2016)

3.1.8 Değiştirilmiş Darcy Yasası

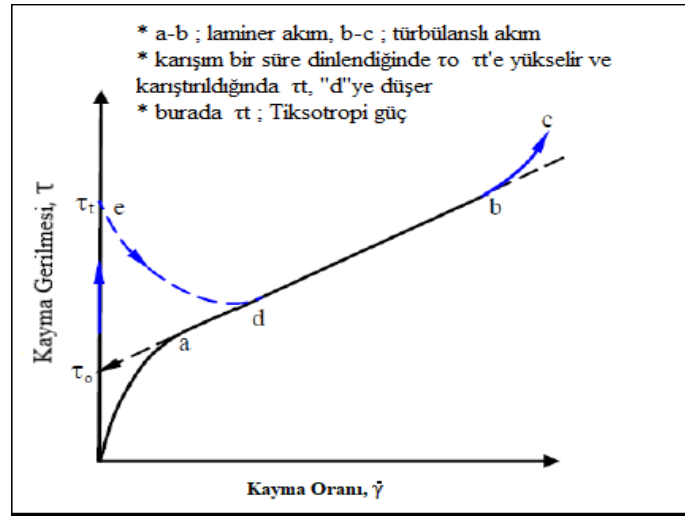
Zhang'a (2002) göre, Bingham'ın sıvısı için değiştirilmiş Darcy'nin yasası aşağıdaki gibidir:

$$v = \frac{K \rho g}{\eta} \quad (3.6)$$

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

$$k_G = \frac{K \rho g}{\eta} \quad (3.7)$$

3.1.9 Tiksotropi (Karıştırma sonucunda viskozitenin değişmesi durumu)



Şekil 3.7. Tiksotropik karışımların Reolojik özellikleri(Nonveiller, 2013)

Tiksotropi gibi ek özellikler göz önüne alındığında çimento harcının reolojik davranışının daha eksiksiz bir temsili elde edilebilir. Tiksotropi, yapısal bozulma nedeniyle kayma altında viskozitenin azaldığı Newton olmayan maddelerin özelliğidir (Şekil 3.7). Kayma oranı durduktan sonra viskozitesini geri kazanacaktır. Aynı numuneye yukarı ve aşağı kayma oranı rampaları döngüsel olarak uygulandığında tiksotropi 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. Bölüm 4'te sunulan viskozite testlerinde gerçekleştirilen döngüsel kesme, düşük su/çimento oranına sahip çimento harcının (örn. 0,75) daha kalın hysteresis döngü alanına sahip olduğunu göstermiştir. Bu da su oranı düşük çimento harcının daha kararlı bir iç yapıya sahip olduğunu göstermektedir. S/Ç oranı 1,0 'in üzerinde olan çimento harcı ile karşılaştırıldığında kaymaya daha fazla duyarlı olduğu görülmüştür.

3.2 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

3.2.1 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 (Çizelge 3.1). Çizelge 3.1 'te 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 3.1. 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

3.2.2 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.

3.2.2.1 Gözenekli Ortam için Küresel Akış Modeli

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 (Şekil 3) verilmiştir.

$$P_e = \frac{Q_Y}{CkG} = \frac{Q_Y \eta}{Ck\eta w} \quad (3.8)$$

Burada;

Q : enjeksiyon debisi, m^3/sn

η : 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

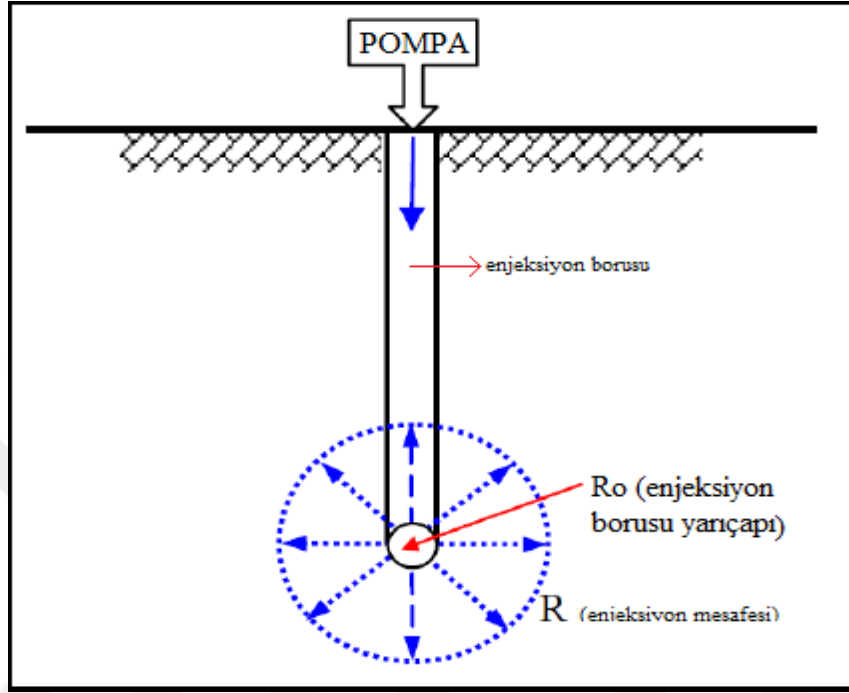
k : zemin su geçirgenliği m/sn

η : viskozite Newton akışkan için, Pa.sn

η_w : suyun viskozitesi, Pa.sn

Not: 1 Pa.sn = 1 N.sn/m²

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



Şekil 3.8. Küresel akış enjeksiyonu (Çelik, 2016)

Zaman içerisinde küresel harç enjeksiyonu sırasında t zamanda alınan harç,

$$Qdt = 4\pi r^2 n dr \quad (3.9)$$

Burada;

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

dr = harç enjeksiyon mesafesi

R_o yarıçapına sahip küresel bir boşluktan, enjeksiyon harcının R mesafesini kat etmesi için gereken süre şu şekilde hesaplanabilir:

$$t = \frac{4\pi n}{3Q} (R^3 - R_o^3) \quad (3.10)$$

3.2.2.2 Silindirik Borudan Radyal Akış (Newton Sıvısı)

(3.8) ve (3.10) denklemlerine eşdeğer denklem silindirik bir delikten belirli bir kalınlığa sahip bir tabakaya radyal akış durumu aşağıdaki gibi ifade edilir.

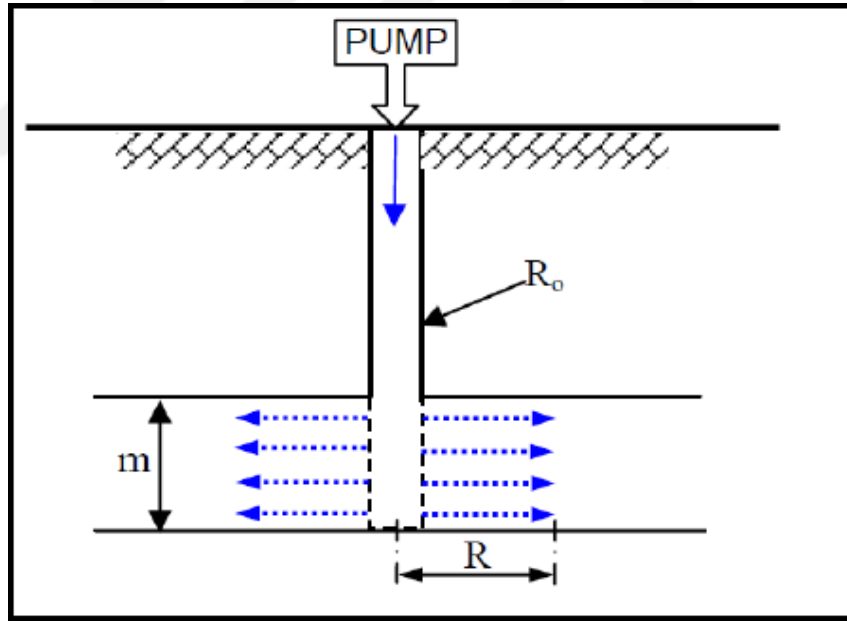
$$Pe = \frac{Q\gamma\eta}{2\pi nk\eta w} \ln \frac{R}{Ro} \quad (3.11)$$

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 mümkündür.



Şekil 3.9. Silindirik borudan Radyal enjeksiyon (Çelik, 2016)

$$t = \frac{\pi m n}{Q} (R^2 - Ro^2) \quad (3.12)$$

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

$$p(R) = Pe - \frac{Q\gamma\eta}{2\pi nk\eta w} \ln \frac{R}{Ro} \quad (3.13)$$

yukarıdaki denklemler, 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.

3.2.3 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 akama hızını belirler;

Sadece ölçülebilen parametrelerin, yani harç viskozitesinin iri kumdaki çimento harcının akış özelliklerine etkisi bu tez kapsamında araştırılmıştır.

BÖLÜM IV

MİNERAL OLARAK KATK KATKILI ÇİMENTO ESASLI KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

4.1 GİRİŞ

Enjeksiyon yöntemi, stabilite ve deformasyon problemlerine, su sızıntısının önlenmesine ve binalar için farklı yerleşim problemlerinin yanı sıra farklı inşaat mühendisliği uygulamalarına dayalı olarak zemin ıslahı için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Permeasyon enjeksiyonu, sıkıştırma enjeksiyonu ve çatlatma enjeksiyonu olarak adlandırılan üç teknik, harcın zemine yayılma mekanizmasına dayanan enjeksiyon dolgu uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu enjeksiyon teknikleri zemine enjeksiyon difüzyonu sırasında çok sayıda karmaşık form gösterebilir. Ancak bunlardan biri bazı özel koşullar altında genellikle farklı davranışlar gösterir. Örneğin, büyük gözenekliliğe sahip kumlu zeminler, zemine harç enjeksiyonu sırasında daha az engelleyici etki yaratabilir. Dolayısıyla permeasyon enjeksiyon tekniği bu gibi durumlarda diğer enjeksiyon yöntemlerinden daha uygun olacaktır.

Permeasyon enjeksiyon yöntemi, geoteknik mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan etkili bir zemin iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemin ana prensibi, çimento esaslı harcın zemindeki gözeneklere zeminin yapısında herhangi bir değişikliğe neden olmadan sabit bir şekilde enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Zeminin geçirgenliği harç penetrasyonunu doğrudan etkileyen baskın bir faktördür. Bu nedenle, bu teknik genellikle düşük viskoziteli harçlar ile nüfuz edebilen temiz kumlar, çakıl veya açık dolgulara uygulanabilir (Çelik, 2019). Bu tekniğin kullanılmasının ana nedeni, zemin geçirgenliğinin azaltılması ve yeraltı suyu akışı nedeniyle sızıntıyı kontrol etmek olarak açıklanmaktadır. Ayrıca zemini güçlendirmek ve sertleştirmek için de kullanılır (Çelik, 2019; Rawlings vd., 2000).

Bu yöntem, harç stabilitesi (çökelme kapasitesi), enjeksiyon basıncı, harç reolojisi (esas olarak kayma gerilimi ve plastik viskozite) ile zemin ve çimentonun tane büyüklüğü dağılımına bağlıdır (Keong, 2005).

Çimento esaslı harç, enjeksiyon için kullanılan diğer malzemelere göre yeterli mekanik özelliklere, kullanılabilirliğe ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle harç malzemelerinin kullanımına dayanan çok yaygın bir malzemedir (Yin ve Zhou, 2009; Lorenzo ve Bergado, 2006). Bununla birlikte, çimentoya aşırı bağımlılık nedeniyle tüm dünyada bazı çevresel endişeler artmıştır. Bu endişelerin ana nedeni, büyük CO₂ emisyonunun artması, doğal kaynakların tükenmesi ve toz oluşumu olarak açıklanabilir. Sıradan Portland Çimentosu'nun (PÇ) üretim süreci için çok büyük miktarda enerji tüketimi (5000 MJ/ton) gereklidir. Öte yandan, bu süreç önemli miktarda CO₂ emisyonuna da neden olabilir (bir ton PÇ başına yaklaşık 0.7-1.1 ton CO₂ emisyonu) (Bosoaga vd., 2009; Fatehi vd., 2018).

Çevresel etkileri azalttığı için, mineral olarak uçucu kül (UÇ), öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufu (GYFC), hurma yağı yakıt külü (HYVK), volkanik kül (VK), pirinç kabuğu külü (RHA) ve kazan altı taban külü (KATK) gibi çeşitli puzolanik malzemeler mineral katkılı çimento esaslı enjeksiyon işlerinde kullanılmıştır (Yin ve Zou, 2009; Çelik ve Çanakçı, 2015).

Günümüzde enerji, dünyanın modern toplumu için vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Bu nedenle, yaygın olarak ana enerji kaynağı kabul edilen termik santraller, dünyada bu enerjinin çoğunu elektrik gücü olarak sağlamaktadır. Örneğin, Hindistan %70'lik enerji ihtiyacını, kömür yakılarak elektrik enerjisinin üretildiği termik santrallerden almaktadır. Bu enerji tedarik sürecinin bir sonucu olarak yan ürünler, önemli miktarda kömür yanma ürünleri ortaya çıkmaktadır (Asokana vd., 2005; Mishra, 2004). Çevresel etkiler açısından, bu yan ürünün (özellikle kömür bazlı kül) atılması tüm dünyada büyük bir soruna neden olmaktadır (Yoon vd., 2009).

Kömür külü genellikle kazan altı taban külü ve uçucu kül, kazanda beslenen toplam kömürün %20'sini oluşturur. Yaygın olarak bilindiği gibi, radyoaktif partiküllerin bu atıktan yayılması kaçınılmazdır ve daha çok kanserojen maddelerin çevreye yayılmasına neden olur (Eisenbud ve Pedrow, 1964; Lalit vd., 1986).

Kazan altı taban külü neden olduğu çevresel problemler nedeniyle şimdiye kadar alt külün çimento esaslı harç uygulamalarında mineral katkı maddesi olarak kullanımı ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır(Güllü, 2017; Eisenbud ve Petrow, 1964).

Bunların çoğu mineral katkı maddeleri (özellikle kazan altı taban külü) ile birleştirilen çimento esaslı harçların reolojik özellikleri ile ilgilidir. Bazıları bu atığın puzolanik katkı maddesi olarak jet enjeksiyon uygulamalarında kullanılmasına odaklanmıştır. Bununla birlikte, bir mineral katkı maddesi olarak kazan altı taban kül kullanımının çimento esaslı permeasyon enjeksiyon tekniği üzerindeki reolojik etkileri ile ilgili herhangi bir çalışma tespit edilmemiştir. Bunlar göz önünde bulundurularak bu alanda deneysel çalışma yapılmış ve bu deneysel çalışma iki aşamadan oluşturulmuştur. (Chang vd., 2016).

Bu çalışmanın ilk bölümünde kazan taban altı külü ile birleştirilen çimento esaslı harç karışımlarının reolojik ve işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Bu bölüm açısından, test programı %0 (kontrol amaçlı), %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 kazan altı taban kül içeriğine ve dört farklı su / bağlayıcı (s/b) oranına sahip 28 farklı karışım içermiştir (s/b= 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50). Tüm karışımlar için reolojik özelliklere dayanan karışımların plastik viskozitesi, görünür viskozitesi ve akma gerilimi ölçüldü. Aynı zamanda, işlenebilirlik özellikleri açısından marsh koni akış süresi, plaka kohezyonu ve mini slump deneyleri yapıldı (Bellendir vd., 2016). Bu çalışmada elde edilen tüm reolojik özellikler, Raffle ve Greenwood tarafından önerilen iki analitik akış modeline (silindirik ve küresel akış modelleri) dayanarak permeasyon yöntemini değerlendirilmiştir(Raffle ve Greenwood, 1961).

4.2 Materyal ve Yöntemler

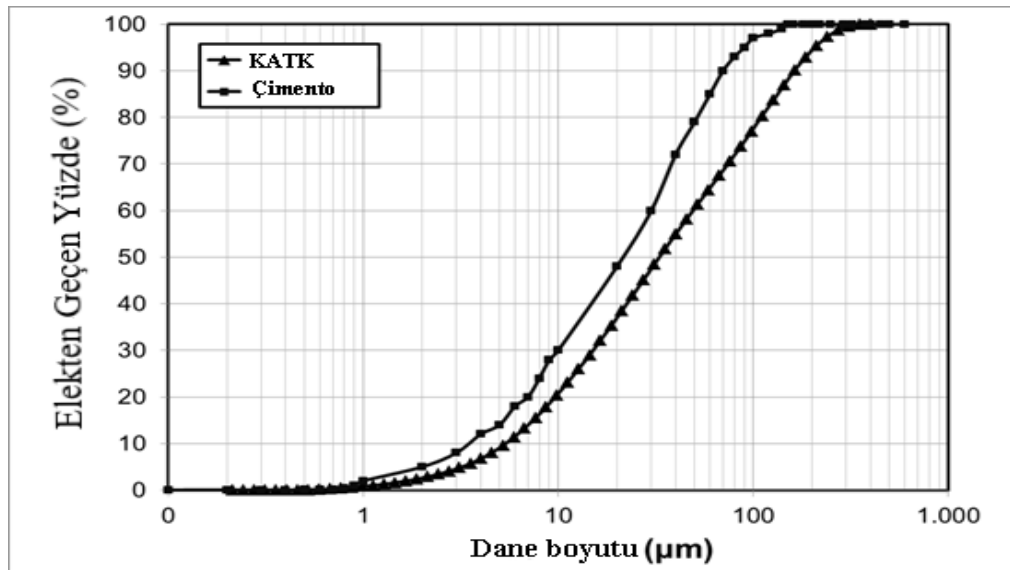
4.2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada CEM I-42.5R ASTM C150 Tip-I çimento esaslı Portland çimentosu (PC) kullanılmıştır ve mineral katkı olarak ta kazan altı taban külü (KATK) kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kazan altı taban külü, Türkiye'de Ereğli Organize Sanayi Bölgesinde kurulan Süt Entegre Tesisinden elde edilmiştir. Tesis kapasite raporuna göre yıllık linyit kömürü tüketimi 7392 ton/yıl olarak bilinir. Linyit kömürü, 7 MW

(megawatt) elektrik enerjisi üretim kapasitesine sahip bir kömür kazanında yakılır ve KATK bu yakma işleminden yan ürün atığı olarak üretilir. Birikmiş KATK yığınının görünümü Fotoğraf 4.1 'de görülmektedir Fotoğraf 4.1'den görüldüğü gibi birikmiş KATK yığını çok sorunlu bir duruma neden olmuştur. Bu atık yığınının atılması çok karmaşık bir iştir. Bu nedenle, bu deneysel çalışma, bu çevresel sorunun çözümüne katkıda bulunmaya yönelik çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan KATK 300 μm büyüklüğünden elekten elenmiştir. Kullanılan çimento ve KATK dane boyutu dağılım eğrisi laboratuvar testi lazer saçılma tekniği ile bulunmuş Şekil 4.1 'de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan KATK ve Portland çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1 'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 4.1. Kazan Altı Taban Külünün (KATK) birikmiş yığınının görünümü



Şekil 4.1. Kazan altı taban külü (KATK) ve Portland çimentosu dane dağılım eğrisi

Çizelge 4.1. Kullanılan Portland çimentosu ve KATK 'nın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri

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

4.2.2 Karışım parametreleri ve test yöntemleri

Su/bağlayıcı (s/b) oranı genellikle çimento esaslı harç karışımlarının taze ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olan önemli parametrelerden biri olarak kabul edilir. Bu nedenle, bu çalışmada KATK 'nın çimento esaslı harç karışımları üzerindeki etkisini gözlemlemek için çeşitli s/b oranları (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) kullanılmıştır. Zemine veya kayaya yapılan enjeksiyon yöntemlerinden, jet-enjeksiyonu ve permeasyon enjeksiyonu, araştırma konusu olarak seçilmiş ve hazırlanan s/b oranları yaygın olarak kullanılan değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Raffle ve Greenwood, 1961; Bennett vd., 1993).

KATK 'nın çeşitli oranlarda etkisini araştırmak için yukarıda belirtilen 4 farklı s/b oranında toplam 28 çimento bazlı harç karışımı elde edilmiştir (bakınız Çizelge 4.2). Sonuç olarak KATK ve s/b oranı birlikte iki anlamlı değişken olarak tanımlanmıştır. Portland çimentosuna %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30'luk KATK ağırlıkça çimento yerine ikame edilmesi ile birleştirildi. Daha önce belirtilen tüm s/b oranlarında bazı karışımlar için kontrol amacıyla (M1, M8, M15, M22) herhangi bir KATK eklenmemiştir. Çizelge 4.2 'de KATK ve s/b oranlarının tüm oranlarına ve harç karışımlarının bazı yeni işlenebilirlik özelliklerine dayanan tüm karışım tasarım parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kazan altı taban külü (KATK) karışım oranları ve harç karışımlarının taze işlenebilirlik özellikleri (1 litrelik karışım için)

Karışım adı	s/b	KATK yüzde (%)	PC (g.)	KATK (g.)	Su (g.)	Yoğunluk (g/cm ³)	D _{yayılma} [*] (mm)	T _{akış} ^{**} (s)	T _{kohezyon} ^{***} (mm)
M1	0.75	0	927	0	696	1.623	194	32.3	0.06
M2	0.75	5	875	46	691	1.612	192	32.8	0.08
M3	0.75	10	824	92	686	1.602	191	32.4	0.08
M4	0.75	15	773	136	682	1.591	190	32.8	0.09
M5	0.75	20	723	181	678	1.582	189	32.0	0.09
M6	0.75	25	673	224	673	1.570	188	32.0	0.09
M7	0.75	30	624	268	669	1.561	187	32.8	0.10
M8	1.00	0	751	0	751	1.502	232	29.2	0.05
M9	1.00	5	710	37	747	1.494	230	29.2	0.05
M10	1.00	10	669	74	743	1.486	227	29.2	0.06
M11	1.00	15	629	111	740	1.480	225	29.15	0.06
M12	1.00	20	589	147	736	1.472	224	29.2	0.07
M13	1.00	25	549	183	732	1.464	220	29.13	0.08
M14	1.00	30	510	218	728	1.456	218	29.5	0.05
M15	1.25	0	632	0	789	1.421	227	28.0	0.04
M16	1.25	5	597	31	786	1.414	219	28.0	0.05
M17	1.25	10	563	63	782	1.408	217	28.4	0.05
M18	1.25	15	530	93	779	1.402	216	28.4	0.06
M19	1.25	20	496	124	776	1.396	215	29.2	0.06
M20	1.25	25	463	154	772	1.389	215	29.2	0.05
M21	1.25	30	430	184	769	1.383	213	29.3	0.06
M22	1.50	0	545	0	817	1.362	240	27.1	0.04
M23	1.50	5	515	27	814	1.356	237	27.4	0.05
M24	1.50	10	486	54	811	1.351	236	27.8	0.05
M25	1.50	15	458	81	808	1.347	235	27.8	0.05
M26	1.50	20	429	107	805	1.341	235	27.4	0.06
M27	1.50	25	401	134	802	1.337	234	27.3	0.05
M28	1.50	30	373	160	798	1.331	232	27.9	0.06

*Mini-slump yayılma çapı.

**Marsh-cone akış süresi.

***Plaka kohezyon

Tüm karışımlar, 5 litrelik hacim kapasiteli laboratuvar döner karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Numuneleri hazırlamak için, aynı karıştırma yöntemi uygulanmış ve bu karıştırma prosedürünün detayları şu şekilde belirtilmiştir: her şeyden önce, bağlayıcı olarak adlandırılan kuru malzemeler (çimento ve KATK) bir dakika boyunca bir karıştırıcı kullanılarak su ile karıştırılmıştır sonra homojen bir karışımı sağlanabilmesi amacıyla bir dakika boyunca elle karıştırma prosedürü uygulanmıştır. Daha sonra tekrar mikser kullanılarak 3 dakika daha karıştırıldıktan sonra karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Tüm testler sırasında ölçülen ortam nemi ve sıcaklığı sırasıyla %55-65 ve 23 ± 3 olarak kaydedilmiştir. Tüm testler için karıştırma prosedürü tamamlanır tamamlanmaz, işlenebilirlik ve viskozite testleri tüm karışımlar taze durumundayken gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik testleri, mini slump, marsh hunisi, akma süresi ve

plaka kohezyon testleri yapılmıştır. Numunelerin reolojik özelliklerine dayanan viskozite ölçüm testleri ortak eksenli Döner Silindir Reometre (Brookfield Viscometer DV2T) test makinesi kullanılarak yapılmıştır. Test sonuçlarını karşılaştırmak için, tüm numuneler aynı hazırlama yöntemi ve ortam koşulunda hazırlanmış ve numuneler iki kez test edilmiştir, bu nedenle tüm testlerin neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bu çalışmada tekrarlanan bu testlerden sadece biri sunulmuştur.



Fotoğraf 4.2. Koaksiyel Döner Silindir Reometresi (Brookfield Viskozimetre DV2T)



Fotoğraf 4.3. Test esnasında Brookfield'in ekranı DV2T



Fotoğraf 4.4. Marsh huni testi



Fotoğraf 4.5. Mini slump testi

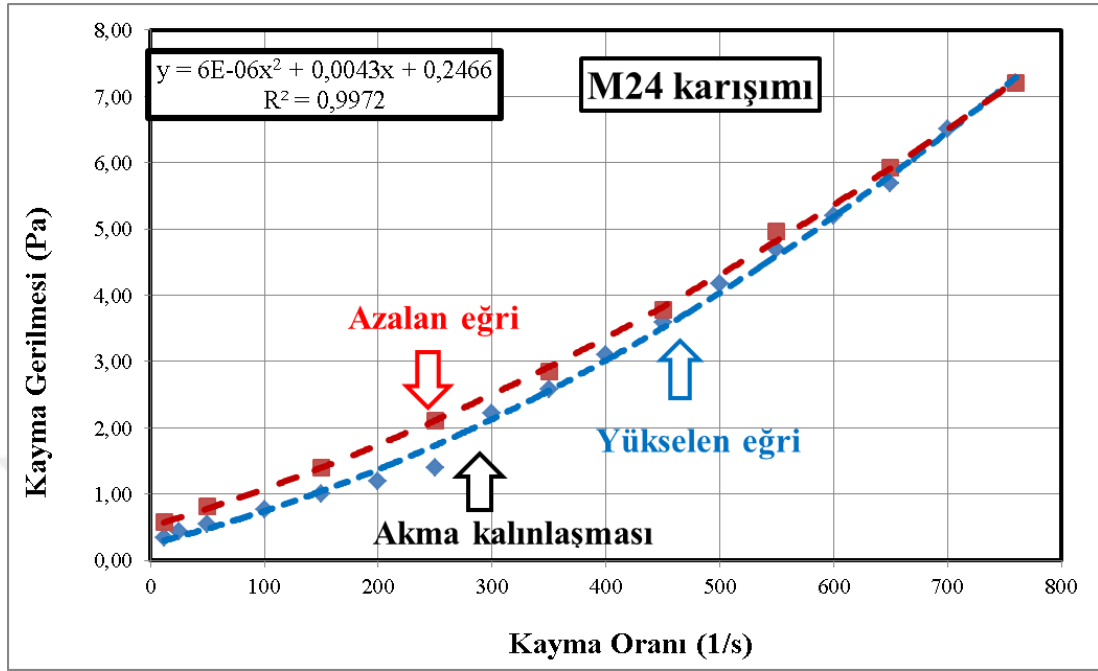
Marsh hunisi akış süresi, plaka kohezyonu ve mini slump, testleri, harç karışımları için işlenebilirlik testine dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve bunların toplam test süresi, bağlayıcılarla (çimento ve KATK) temas ettikten sonraki 8-12 dakika içinde tamamlanmıştır. Bu testler, çimento bazlı enjeksiyonların saha uygulama çalışmalarında ölçülmesinde akışkanlık davranışlarını tanımlamak için çok yaygın yöntemlerdir. Mini slump testi, bu harç karışımı koni şeklindeki kalıba döküldükten sonra bir pürüzsüz yüzeyinde harç karışımlarının yayılma prensibine dayanmaktadır. Bu testten ölçülen mini slump çapına, yayılmış harç karışımının çapı denir. Mini slump konisinin boyutları genellikle 57 mm yükseklik, taban çapı 38 mm ve üst çap 19 mm olarak tanımlanmaktadır(Kantro, 1980). Diğer çok faydalı işlenebilirlik testi olarak bilinen

marsh huni testinin prensibi, bu koniden belirli bir hacimde harç karışımının akmasıyla açıklanabilir. Bu sebeple geçen süre ölçülür ve bu süre marsh hunisi akış süresini saniye olarak gösterir. Bu test cihazının hacimsel kapasitesi 1500 ml olarak kabul edilir ve ayrıca iç delik çapı 5 mm olarak bilinir. Bu çalışmada, 1250 ml harç karışımları, alt çıkış sırasında yukarıda belirtilen huni test cihazına dökülmüştür. Daha sonra alt çıkış açılarak; akış süresi 1000 ml taze harç karışımının akışı boyunca ölçülmüştür. Ölçülen bu süre marsh hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması nedeniyle, bu teste dayalı su akış süresi 24 saniye olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Harç karışımlarının kohezyonu, işlenebilirlik testleri açısından Lombardi plaka kohezyon testi kullanılarak da ölçülmüştür. Bilindiği gibi bu test genellikle herhangi bir uluslararası standart kullanılmadan yapılır. Bununla birlikte, bu testin yapıldığı ve tanımlandığı birkaç çalışma vardır (Çelik ve Çanaklı, 2015; Weaver, 1990). Bu çalışmalarda plaka kohezyon ölçüm cihazının özellikleri ince çelik levha olarak sunulmuş ve boyutları 100 x 100 x 3 mm'dir. Plakanın iki tarafı da pürüzlü yüzeylere sahiptir. Bu plaka, çimento esaslı harç karışımlarına daldırıldıktan sonra, plakaya yapışan taze harç miktarı tartıldıktan sonra bu ölçüme dayanarak, harcın kohezyonu tahmin edilmiştir.

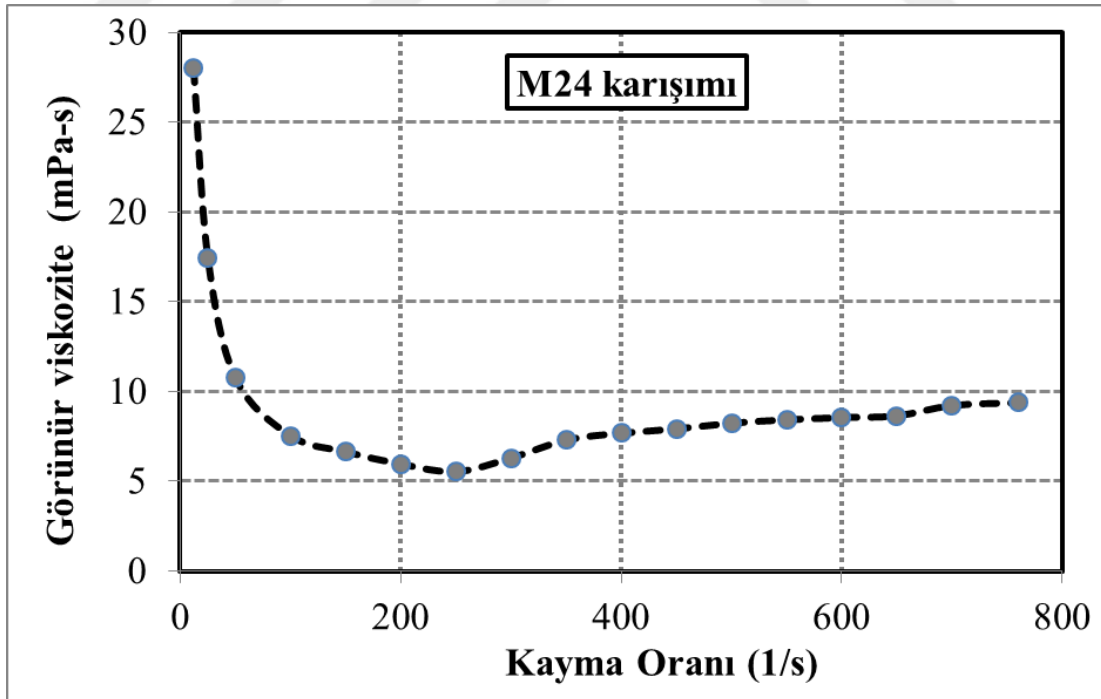
Bu çalışmada hazırlanan çimento bazlı harç karışımlarının viskoziteleri (görünen ve plastik viskozite) ve kohezyon (akma gerilimi) reolojik özelliklere göre ortak eksenli Döner Silindir Reometresi (Brookfield Viskozimetre DV2T) ile ölçülmüştür. Bazı araştırmacılar geçmiş çalışmalarda kaymayı düşük kayma hızında tartışmışlardır (Barnes, 1995; Saak vd., 2001). Ancak reolojik testler yapılırken gözlenen kayma etkileri bu çalışmada yüksek kesme oranı kullanıldığı için dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada kullanılan kesme oranları 12 s^{-1} ve 760 s^{-1} arasında geniş bir bantta yer almaktadır. Karışımlar için viskozite testleri yapılırken herhangi bir ön kesme prosedürü uygulanmamıştır. Herhangi bir kayma hızında eşzamanlı viskozite olan görünür viskozite, kayma hızının bir fonksiyonu olarak kabul edilmektedir (Çelik ve Çanaklı, 2015).

Bu çalışmadaki görünür viskozite-kayma hızı eğrileri esas alınarak, hazırlanan çimento esaslı harçların reolojik sıvı davranışları, akma kalınlaşması davranışı olarak gözlenmiştir (bakınız Şekil 4.2). Şekil 4.2 'teki M24 karışımına göre kayma gerilme-kayma hızı ilişkilerine dayanan artan ve azalan eğriler görülmüş ve bu eğriler

numunenin akma kalınlaşması davranışını göstermektedir. Diğer karışımlar için benzer akış davranışları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Kayma gerilmesi - kayma hızı ilişkisine dayalı artan ve azalan eğriler



Şekil 4.3. Görünür viskozite - kayma oranı eğri ilişkisi

Çimento esaslı harçların reolojik davranışları, literatürde verilen çeşitli analitik yaklaşımlarla tanımlanır. Bunlardan en yaygın olanı Bingham modeli olarak kabul edilir. Bu model kayma gerilme-kayma hızı eğrisinden ($\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$) elde edilen birinci derece doğrusal denklem olarak ifade edilmiştir (Yahia ve Khayat, 2001). Bu nedenle çimento esaslı harçların reolojik özellikleri akma gerilimi (τ_0) ve plastik viskozite (μ_p) ile kolayca ifade edilebilir. Bununla birlikte, gerçek akma gerilmesinin, dilatant (akma kalınlaşması) akış davranışı gösteren harç karışımı için Bingham akış modeli tarafından elde edilen akma gerilmesinden daha yüksek olması beklenmektedir (Çelik ve Çanaklı, 2015; Yahia ve Khayat, 2001). 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 (bkz. Şekil 4.2). Bu model genellikle ikinci dereceden polinom denklemi ile tanımlanmaktadır (Khayat ve Yahia, 1997). Bu denklem aşağıdaki gibi verilir;

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2 \quad (4.1)$$

Burada, τ = kayma gerilmesi (Pa), τ_0 = akma gerilmesi (Pa), μ_p = plastik viskozite (Pa.s), $\dot{\gamma}$ = kesme hızı (s^{-1}) ve c = sabit

4.2.3 Permeasyon enjeksiyonu 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 (bakınız Şekil 3.8 – Şekil 3.9). Tüm permeasyon harç parametreleri bu modeller kullanılarak tahmin edilebilir. Bu nedenle, mineral bazlı bir katkı maddesi olarak kazan altı taban külü kullanımının çimento esaslı permeasyon enjeksiyon yöntemi üzerindeki reolojik ve işlenebilirlik etkilerini araştırmak için bu çalışmada iki model kullanılmıştır. Bu modellere dayanarak, bazı matematiksel denklemler türetilmiş (Raffle ve Greenwood, 1961) ve aşağıdaki şekilde sunulmuştur:

$$P_e = \frac{Q_V}{C k_G} = \frac{Q_{VM}}{C k_{\mu_w}} \quad (\text{Küresel akış modeli için net basınç}) \quad (4.2)$$

$$t = \frac{4\pi n}{3Q} (R^3 - R_o^3) \quad (\text{Küresel akış modeli için akış süresi}) \quad (4.3)$$

$$P_e = \frac{Q\gamma\mu}{2\pi mk\mu_w} \ln\left(\frac{R}{R_o}\right) \quad (\text{Radyal akış modeli için net basınç}) \quad (4.4)$$

$$t = \frac{\pi mn}{Q} (R^2 - R_o^2) \quad (\text{Radyal akış modeli için akış süresi}) \quad (4.5)$$

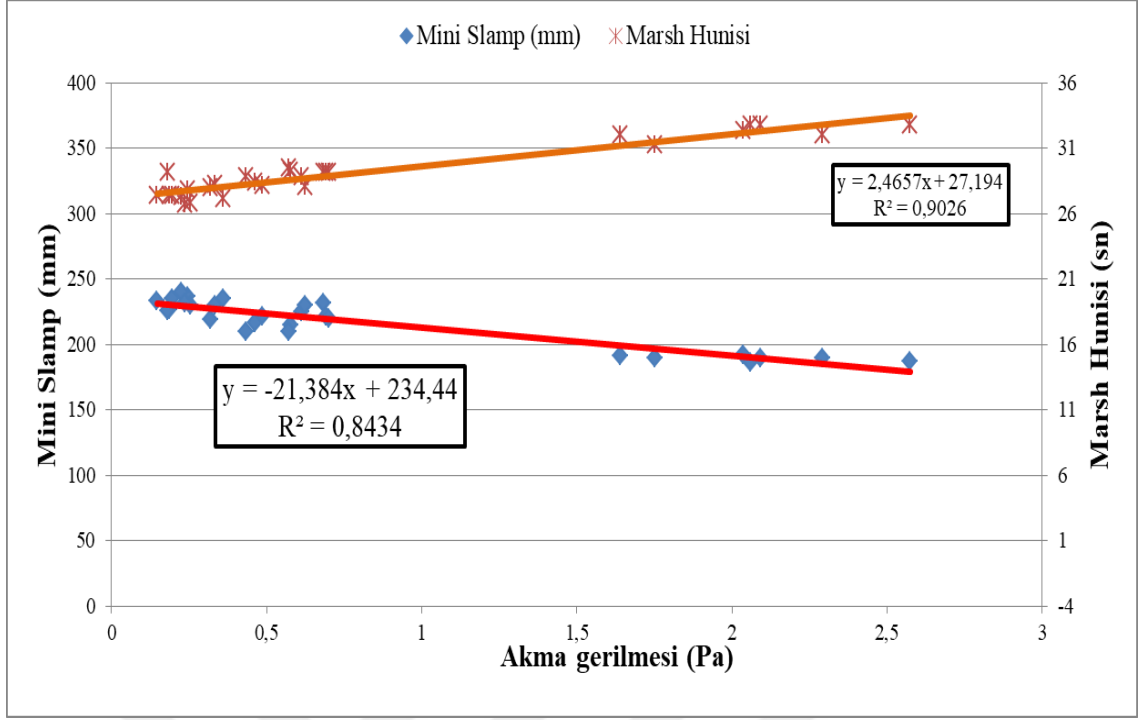
Burada;

Pe= net enjeksiyon basıncı (kPa), Q= enjeksiyon akış hızı (m³/sn), γ= harç birim hacim ağırlığı (kN/m³), C= 4πR_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.sn 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).

4.3 Test sonuçları ve tartışma

4.3.1 Harç karışımlarının akışkanlık (İşlenebilirlik) özellikleri

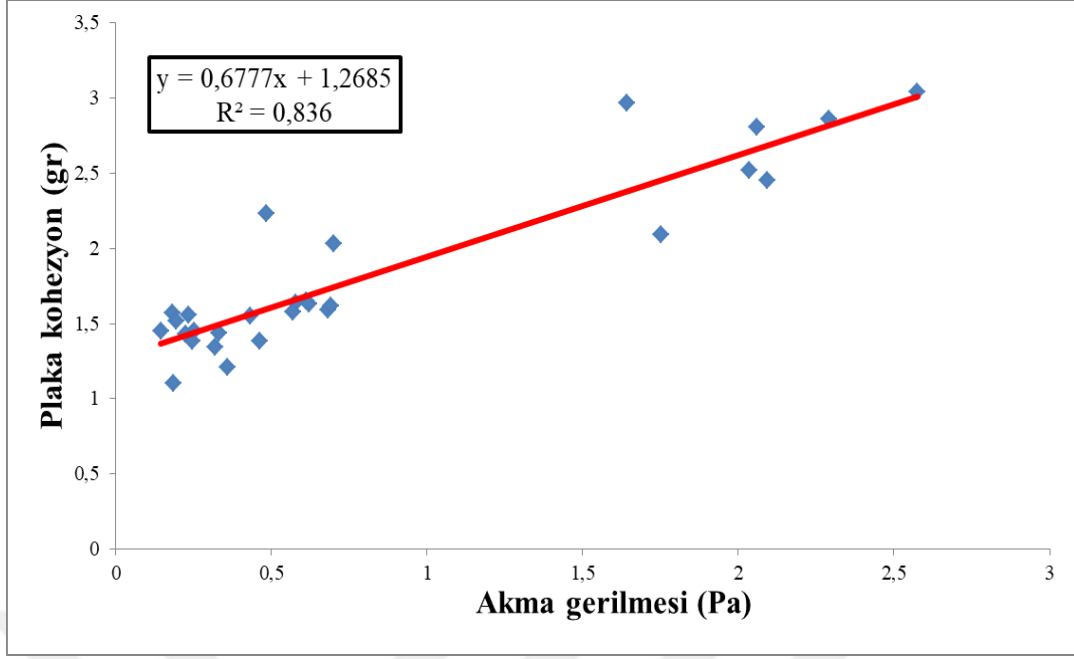
Bu çalışmada hazırlanan harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri olarak Marsh hunisi akış süresi, mini çökme yayılma çapı ve Lombardi plaka kohezyon ölçüm cihazı test edilmiş ve sonuçları Çizelge 4.2 'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, karışımlardaki KATK içeriği arttıkça, harç karışımlarının mini çökme yayılma çapı yavaş yavaş azalmıştır. Aynı zamanda, s/b oranı, harç karışımlarının mini çökme çapı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, harç karışımlarındaki s/b oranı değişikliğinin etkisi KATK içeriğinin sabit olduğu gözlemlendiğinde, karışımların mini slump yayılma çapı, s/b oranının artmasıyla artmıştır. Karışımların mini slump yayılma çapının artmasının anlamı, numunelerin akışkanlığının artmasıdır. Ayrıca, bu çalışmada hazırlanan çimento esaslı harç karışımlarının bir başka işlenebilirlik özelliği olan marsh hunisi akış süreleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Akma gerilmesinin mini slamp ve marsh hunisi arasındaki ilişki

Test sonuçları, çimento esaslı harçlardaki KATK miktarındaki artışın, karışımların çok fazla marsh hunisi akış süresini etkilemediğini göstermiştir. Farklı s/b oranları (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) için çeşitli KATK içeriklerinde karışımların ölçülen marsh hunisi akış süreleri, sırasıyla 32, 29, 28 ve 27 saniyelik genel aralıklar olarak tahmin edilmiştir (bakınız Şekil 4.4). Bu sonuçlar, s/b oranı arttıkça marsh hunisi akış süresinin azaldığını göstermiştir. Başka bir deyişle, s/b oranındaki artış, harç karışımlarının akışkanlığını beklediği gibi arttırmıştır. Marsh hunisi akış süresi, karışımlardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması için su için 24 saniye olarak ölçülmüştür.

Karışımlar için yapılan bir başka işlenebilirlik testi de Lombardi plaka kohezyon testidir (Çizelge 4.2'de görülmektedir). Bu çalışmada yapılan plaka kohezyon testine göre, KATK ilavesinin karışımlar için ölçülen plaka kohezyon değerleri üzerinde çok fazla etkisi olmadığını göstermiştir (Şekil 4.5). Bununla birlikte, s/b oranının artması, tüm karışımlar için plaka kohezyon değerlerini düşürmektedir. Karışımlardaki su miktarının artması nedeniyle, harcın plakanın yüzeyine yapışmasında azalmaya neden olur. Sonuç olarak, harç karışımlarında su miktarı arttıkça kohezyon azalmıştır.



Şekil 4.5. Akma gerilimi ile plaka kohezyon arasındaki ilişki

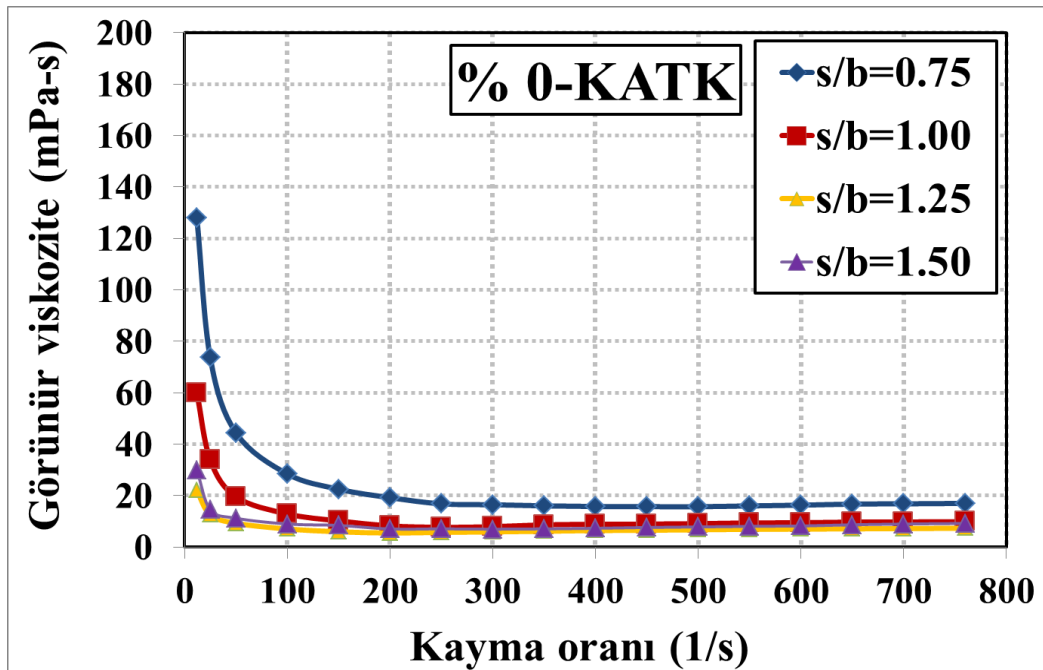
Tüm işlenebilirlik testi sonuçları değerlendirildiğinde, harç karışımlarına KATK miktarı ilavesinin, karışımların işlenebilirlik özellikleri üzerinde çok fazla etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Bu şu şekilde açıklanabilir:

(1) Çimentonun ($3750 \text{ cm}^2/\text{g}$) ve KATK 'nın ($3240 \text{ cm}^2/\text{g}$) Blaine yüzey alanları Çizelge 4.1'de gösterilen değerlerle hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Neredeyse aynı Blaine yüzey alanı nedeniyle, bağlayıcı yüzeylerin su emme miktarı çok değişmez. Bu nedenle, karışımlardaki çimento yerine KATK ikame edilmiş olsa bile Blaine yüzey alanları çok fazla değişmeyecektir. Bunun bir sonucu olarak, bu mineral katkı maddesinin (KATK) eklenmesi işlenebilirlik sonuçlarını önemli ölçüde etkilememiştir.

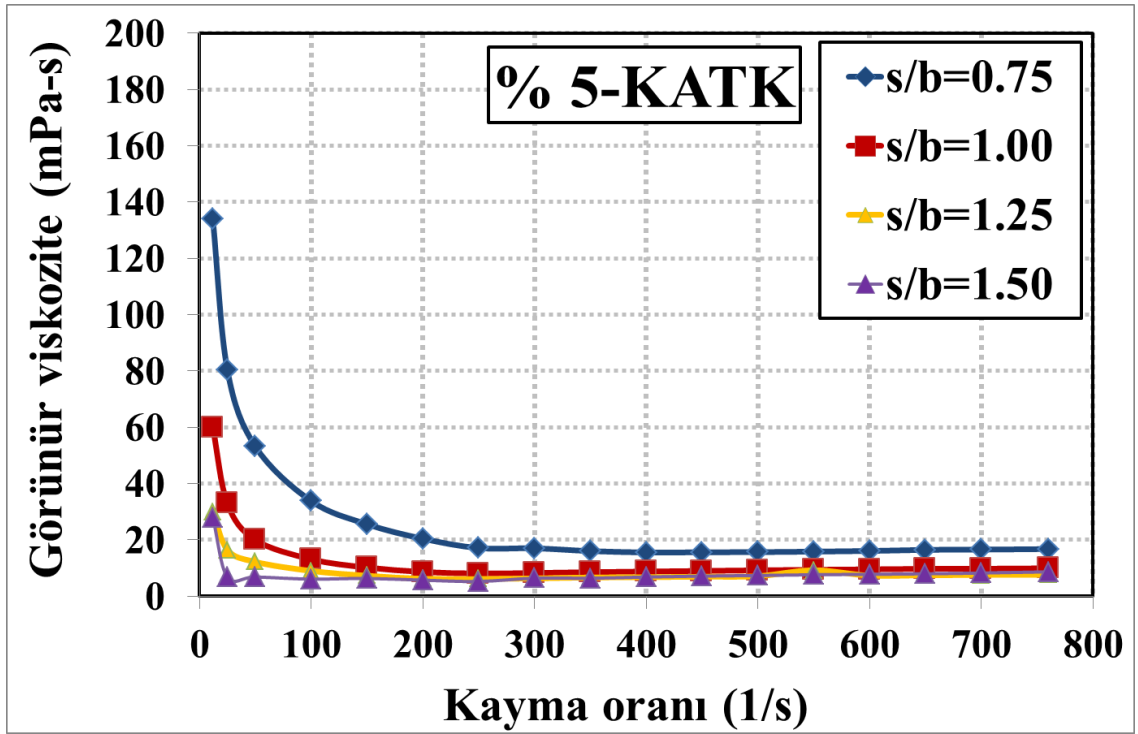
(2) PC ve KATK 'nın lazer saçılma tekniği ile çizilen parçacık boyutu dağılım eğrileri gözlendiğinde, çimento ve KATK 'nın parçacık boyutu derecelerinin hemen hemen aynı aralıkta olduğu kolayca görülebilir (bakınız Şekil 4.1). Bağlayıcıların parçacık boyutu derecelerinin çimento esaslı harç karışımlarının işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yaygın olarak bilinmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Habeeb ve Fayyadh, 2009). Bu çalışmada kullanılan hem çimento hem de KATK neredeyse aynı parçacık boyutu derecelerine sahip olduğundan, farklı oranlardaki karışımlarda çimento yerine KATK 'nın ikame edilmesi, işlenebilirlik testi sonuçlarını çok fazla etkilememiştir.

4.3.2 Harç karışımlarının reolojik özellikleri

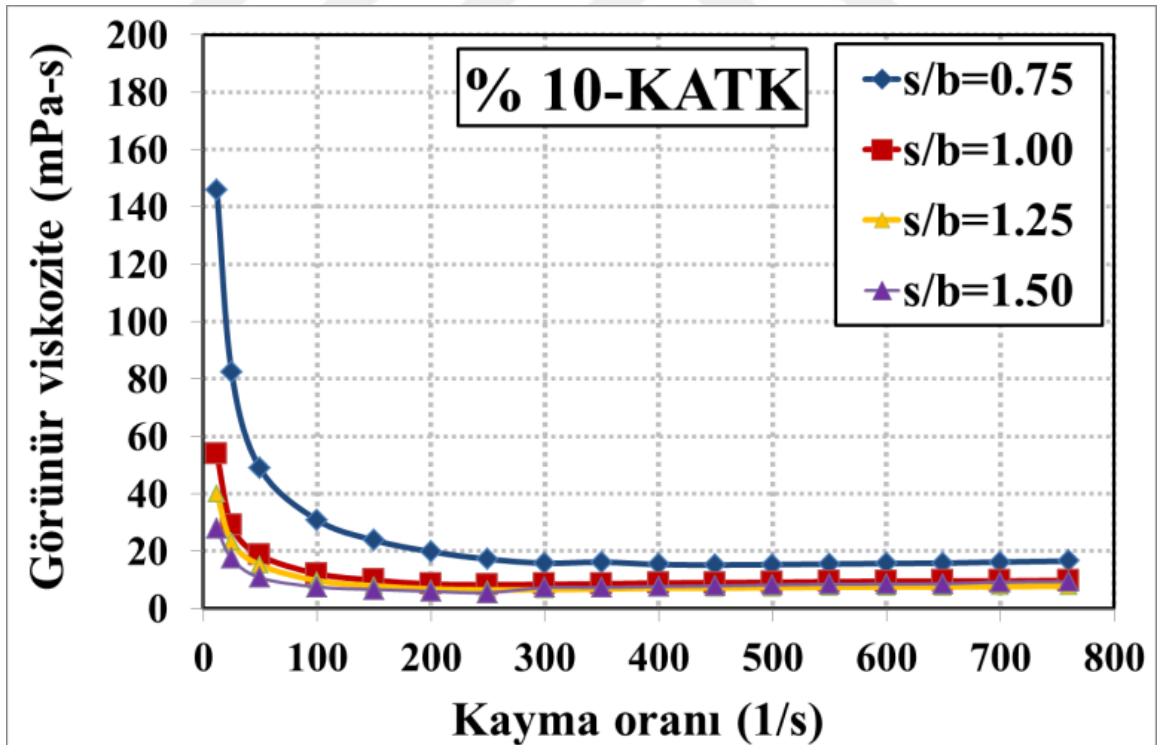
Plastik viskozite, akma gerilimi (kohezyon) ve görünür viskozite değerleri, hazırlanan çimento esaslı harç karışımlarının reolojik özellikleri açısından ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Harç karışımlarıyla ilgili tüm KATK içerikleri için çeşitli kayma hızı eğrilerine karşı görünür viskozite değerleri, Şekil 4.6-4.12 'te gösterilmektedir. Şekil 4.6-4.12'e göre, KATK ikamesi tüm karışım oranları için s/b oranı arttıkça, görünür viskoziteler tüm kayma oranlarında azalmıştır. Bu akış davranışı beklenen bir durumdur. Çünkü harç karışımlarındaki su miktarı arttıkça akışkanlık artar. Bununla birlikte, Şekil 4.6 'da açıkça görüldüğü gibi, eğer s/b oranı birden büyükse, KATK içeriklerinin tüm karışım oranları için görünen viskoziteler birbirine çok yakındır. Diğer taraftan, s/b oranı birden düşükse, KATK içeriğinin tüm karışım oranlarında s/b oranı birden (1.00) fazla olan örneklerle kıyasla daha yüksek görünür viskozite değerleri elde edilmiştir. Başka bir deyişle, daha yüksek s/b oranlarında (1.0 'dan büyük) harç karışımlarında KATK içeriklerinin ikamesi arttıkça, görünür viskozite harç karışımlarında çok fazla değişiklik göstermemiştir. Bu, çimentonun Blaine yüzey alanları ($3750 \text{ cm}^2/\text{g}$) ve KATK ($3240 \text{ cm}^2/\text{g}$) ile hemen hemen aynı değerlere ve hemen hemen aynı parçacık boyutu derecesine sahip olmaları ile açıklanabilir (Erdoğan, 2007; Habeeb ve Fayyadh, 2009).



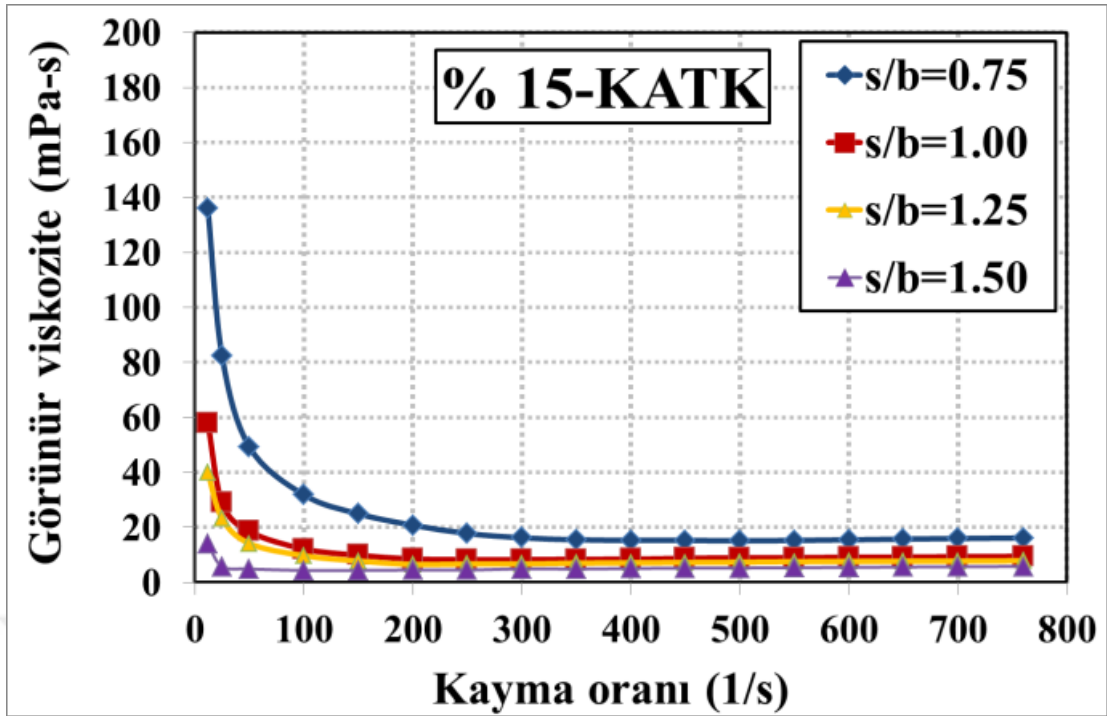
Şekil 4.6. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %0 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri



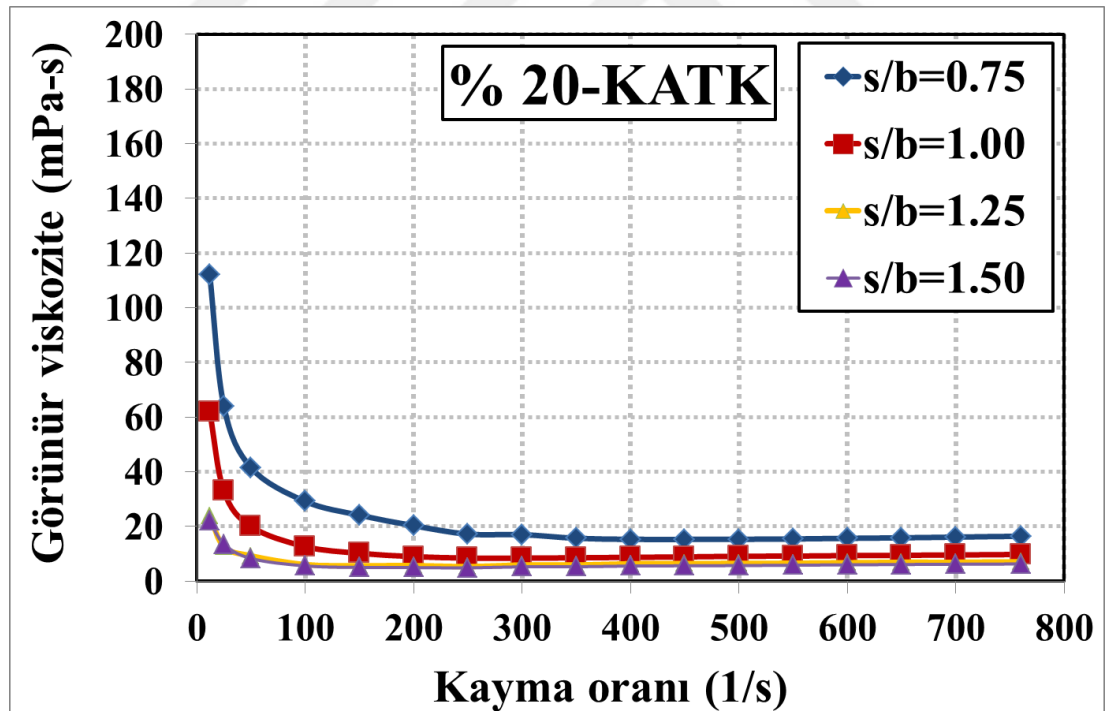
Şekil 4.7. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %5 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri



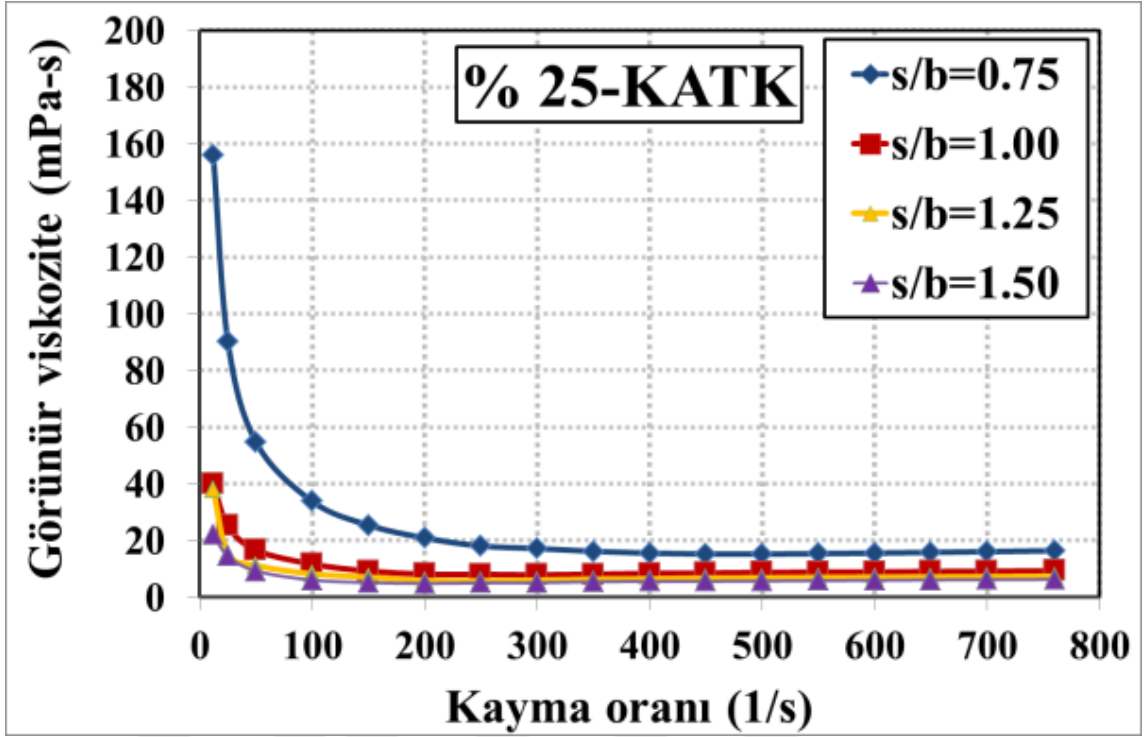
Şekil 4.8. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %10 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri



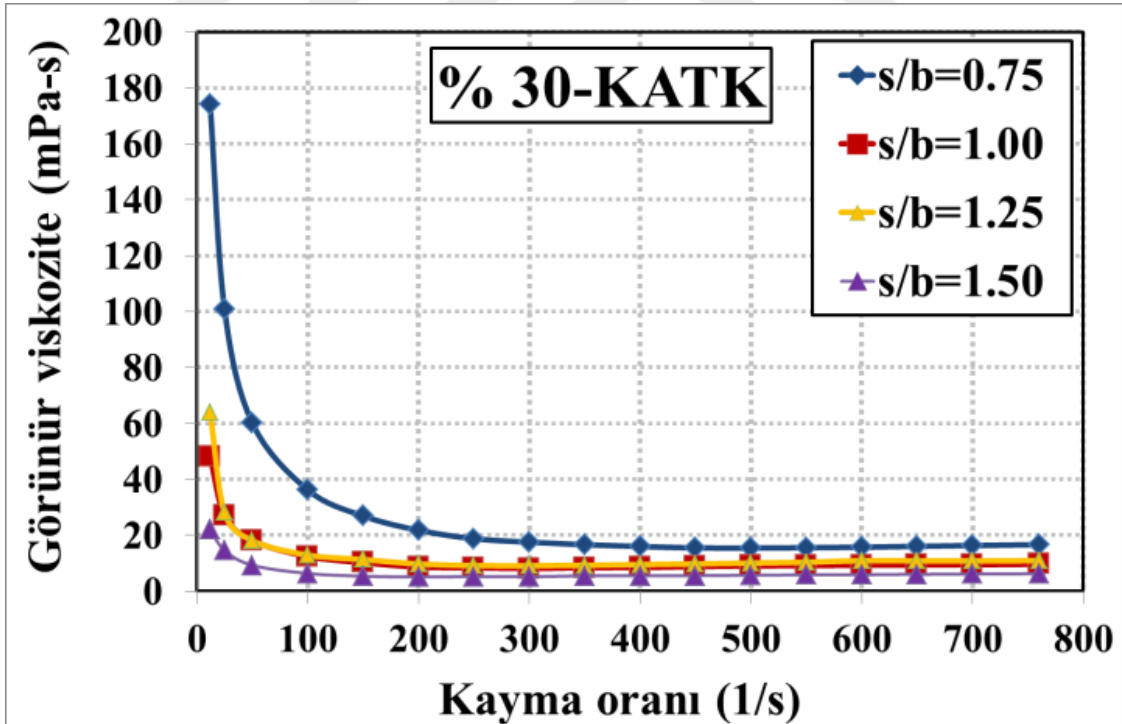
Şekil 4.9. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %15 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri



Şekil 4.10. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %20 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri

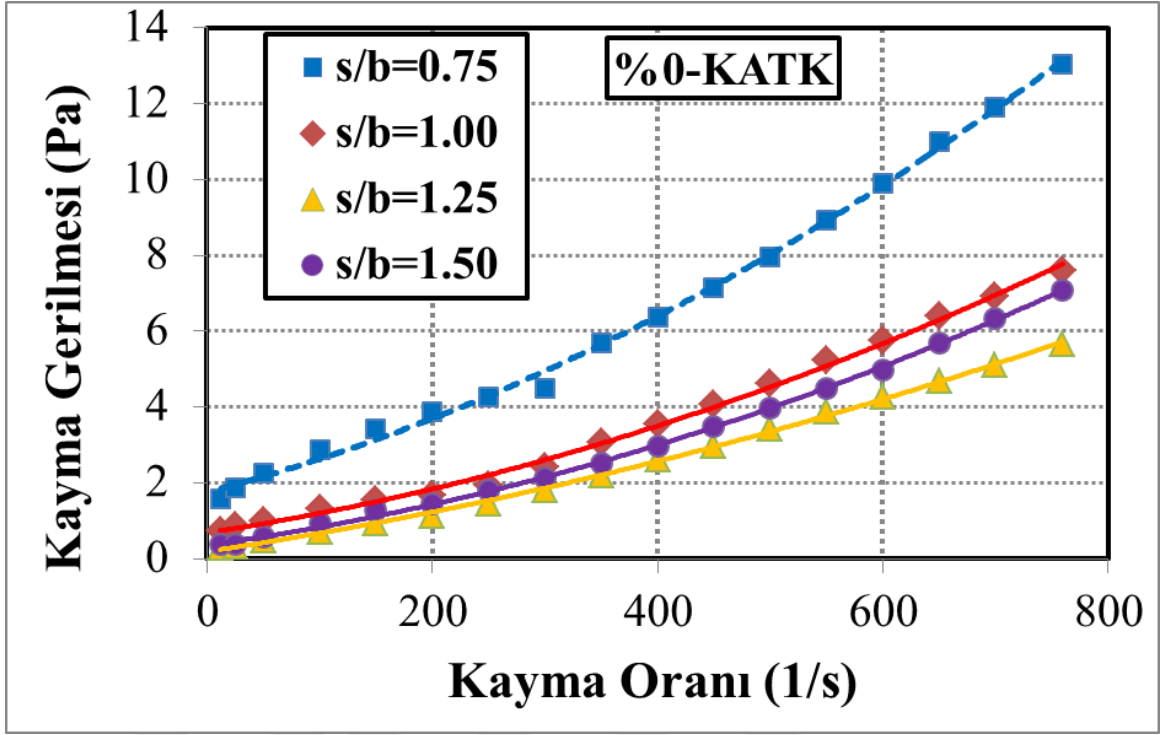


Şekil 4.11. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %25 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri

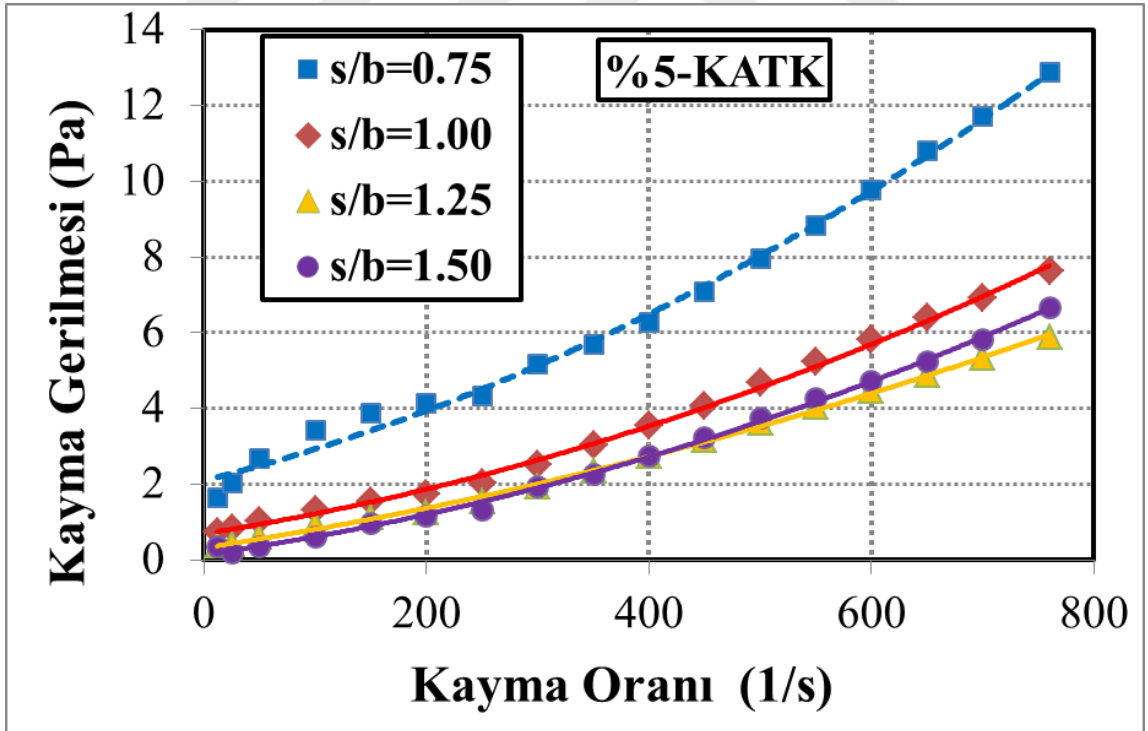


Şekil 4.12. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %30 ikameleri için görünür viskozite- kayma oranı eğrileri

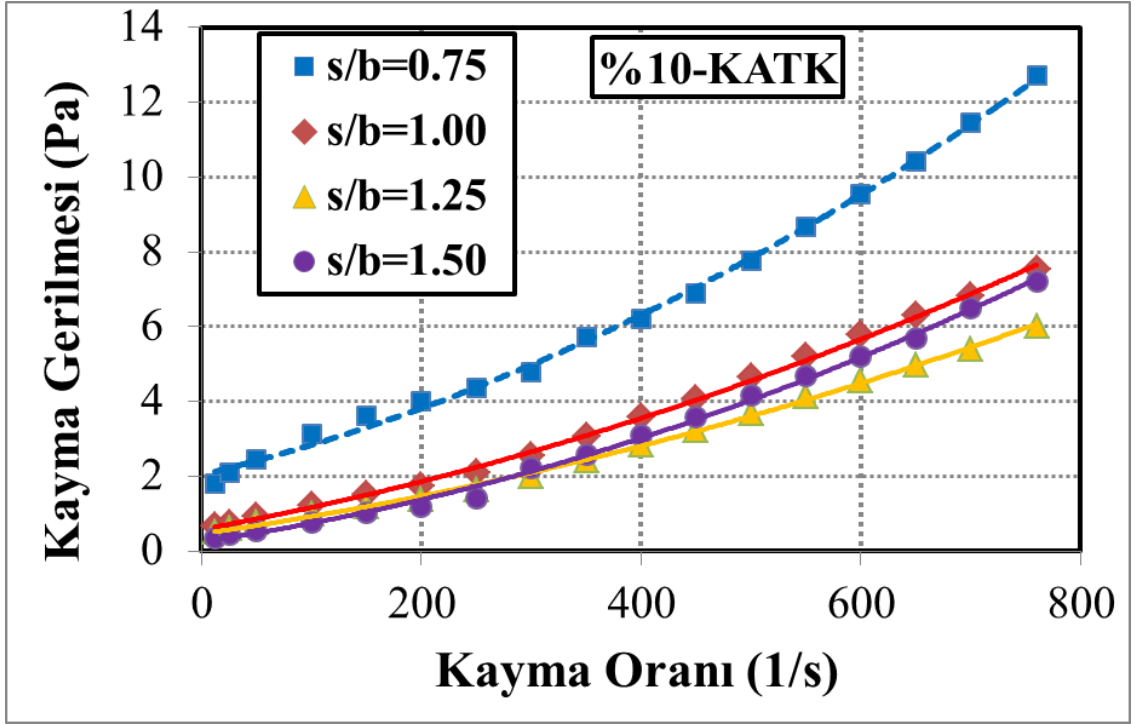
Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK (% 0-% 30) ikameleri için Modifiye Bingham Modeline dayalı kesme gerilimi ve kayma hızı akış eğrileri Şekil 4.13–4.19'de gösterilmektedir. Ayrıca, Modifiye Bingham Modeline dayanan harç karışımlarının tüm plastik viskoziteleri ve akma gerilimi değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Şekil 4.13-4.19'ye göre, KATK içeriklerinin ve s/b oranlarının tüm ikamesinde hazırlanan harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptanmıştır. Bu beklenen davranış bazı geçmiş araştırmalarda belirtilmiştir (Çelik ve Çanaklı, 2015; Yahia ve Khayat, 2001; Cry vd., 2000). Bu akış davranışı Hoffman tarafından önerilen düzen-bozukluk 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 Çanaklı, 2015). Bu nedenle, akışta kayma hızı arttıkça, bu çalışma için hazırlanan tüm karışımlarda dilatan 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, daha yüksek s/b oranlarında harç karışımlarının su içeriğinin artması nedeniyle bağlayıcı parçacıkların (bu çalışma için çimento ve KATK) kısmi bir flokülasyonu gözlemlenebilir. Bu kısmi flokülasyon daha yüksek kesme hızlarında gözlenen parçacıklar arasındaki hidrodinamik etkileşim ile tanımlanabilir (Çelik ve Çanaklı, 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).



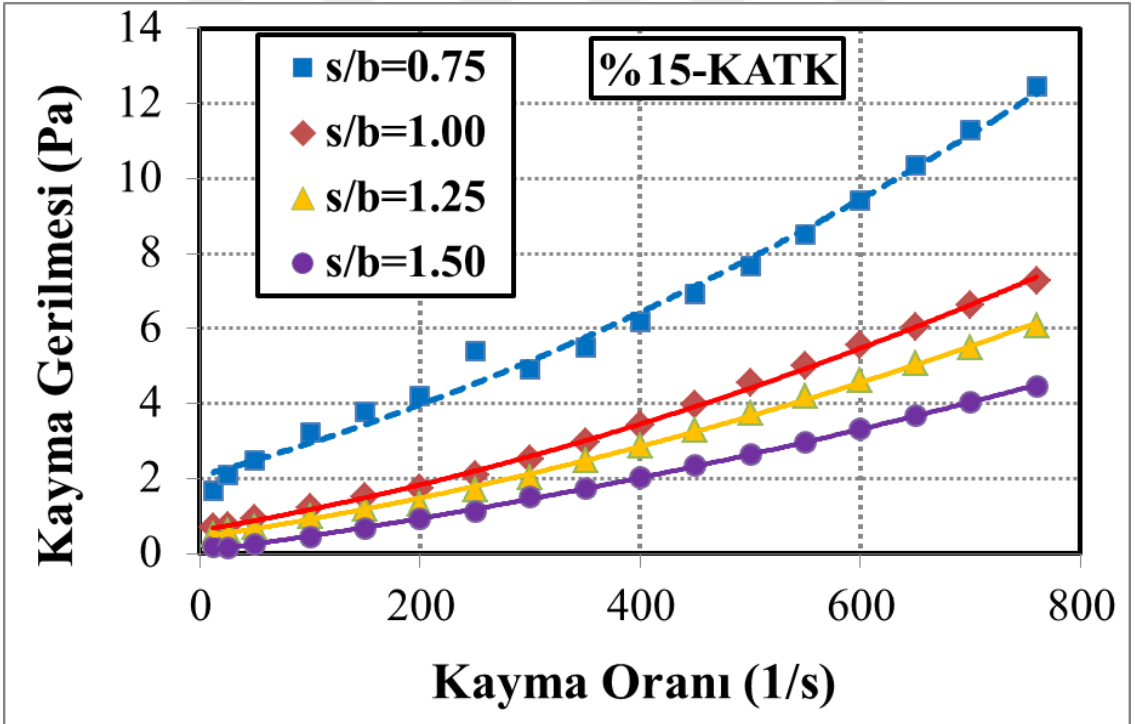
Şekil 4.13. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %0 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri



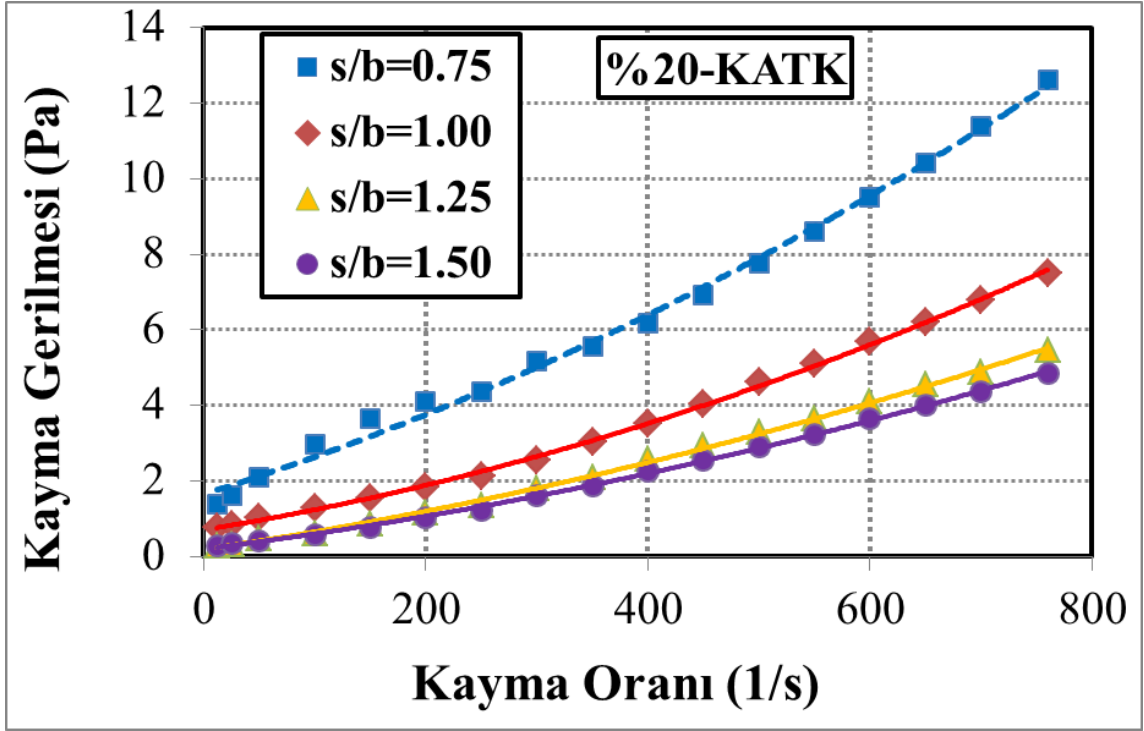
Şekil 4.14. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %5 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri



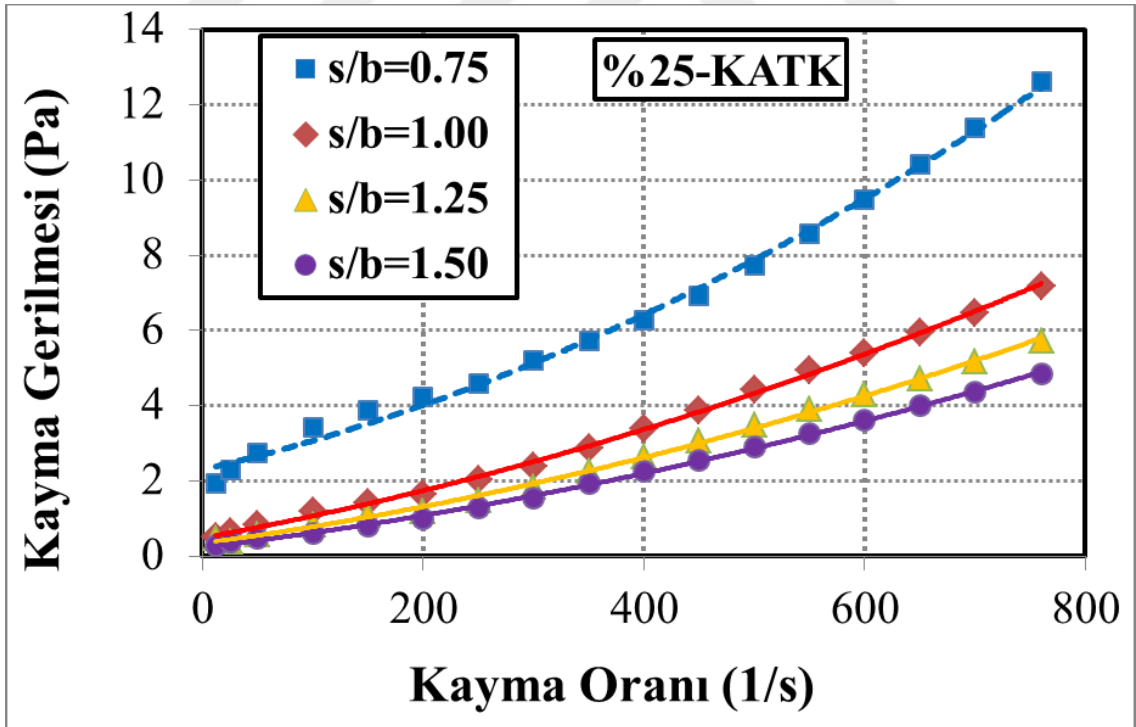
Şekil 4.15. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %10 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri



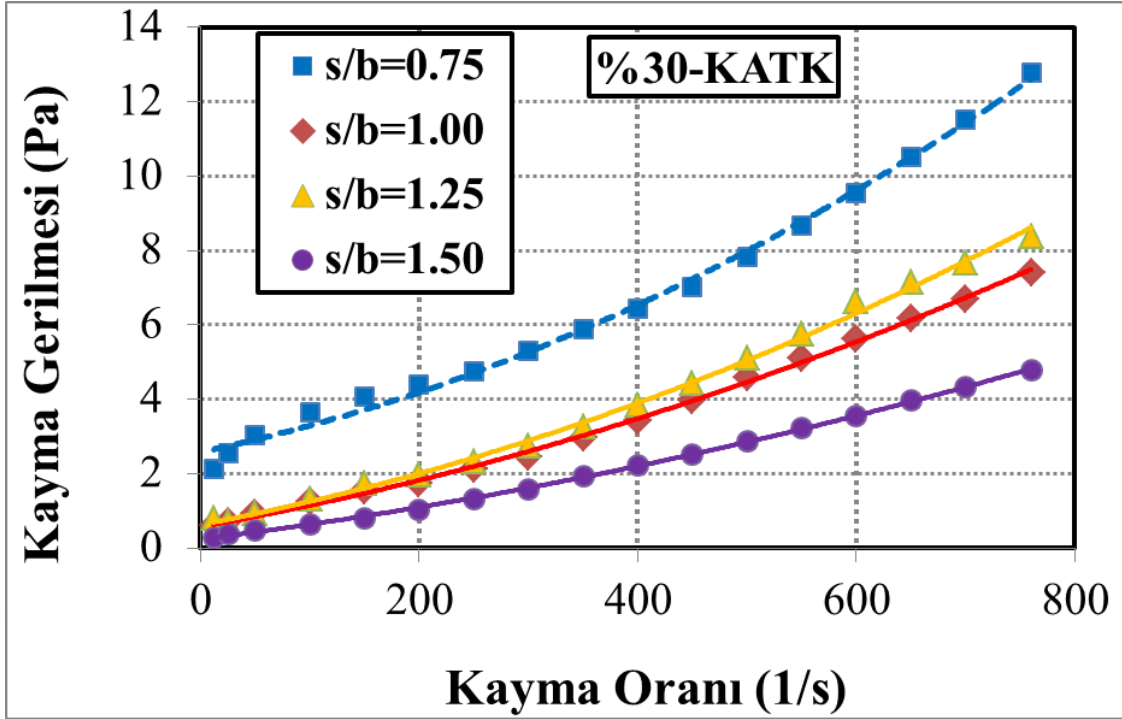
Şekil 4.16. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %15 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri



Şekil 4.17. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %20 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri



Şekil 4.18. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %25 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri



Şekil 4.19. Farklı s/b oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) tüm KATK %30 ikamesi için Modifiye Bingham Modeline dayalı Kayma gerilimi-kayma oranı akış eğrileri

Harç karışımlarının diğer önemli reolojik özelliği akma gerilimi (kohezyon) olarak bilinir. Akma gerilimi genellikle, bu değer aşıldığında herhangi bir harç karışımının akmaya başladığı limit gerilme olarak tanımlanır. Ortak görüşe göre, herhangi bir harç karışımının çökme değeri akma gerilimi ile ilişkilidir (Sahmaran vd., 2008). Başka bir deyişle, yerçekimi kuvveti harç karışımının akma geriliminden daha az olduğunda, harç karışımı akmaya başlayamaz ve yüzeye yapışmaya devam eder. Bu nedenle akma gerilimi değeri, harç karışımının çatlaklara ve boşluklara nüfuz etmesi ile doğrudan ilişkilidir (Sahmaran vd., 2008). Bu çalışma için hazırlanan harç karışımlarından elde edilen tüm akma gerilmesi değerleri Çizelge 4.3 'te sunulmuştur. Çizelge 4.3 'teki sonuçlardan açıkça anlaşıldığı gibi, akma gerilmesi değerleri tüm s/b oranlarında KATK 'nın ikame edilmesinden çok fazla etkilenmemiştir. KATK ikamesi ile akma gerilimi üzerinde küçük etkiler vardır. Bununla birlikte, s/b oranı arttıkça, akma gerilmesi değerleri tüm karışımlar için düşüş eğilimi göstermiştir. Bu daha yüksek s/b oranı nedeniyle harç karışımlarında su miktarı arttıkça, akışkanlığın arttığını ve harç karışımlarının (su gibi) Newton akışkanları gibi davranmaya başladığını göstermiştir (Ferraris vd., 2001; Rosquoee vd. 2003).

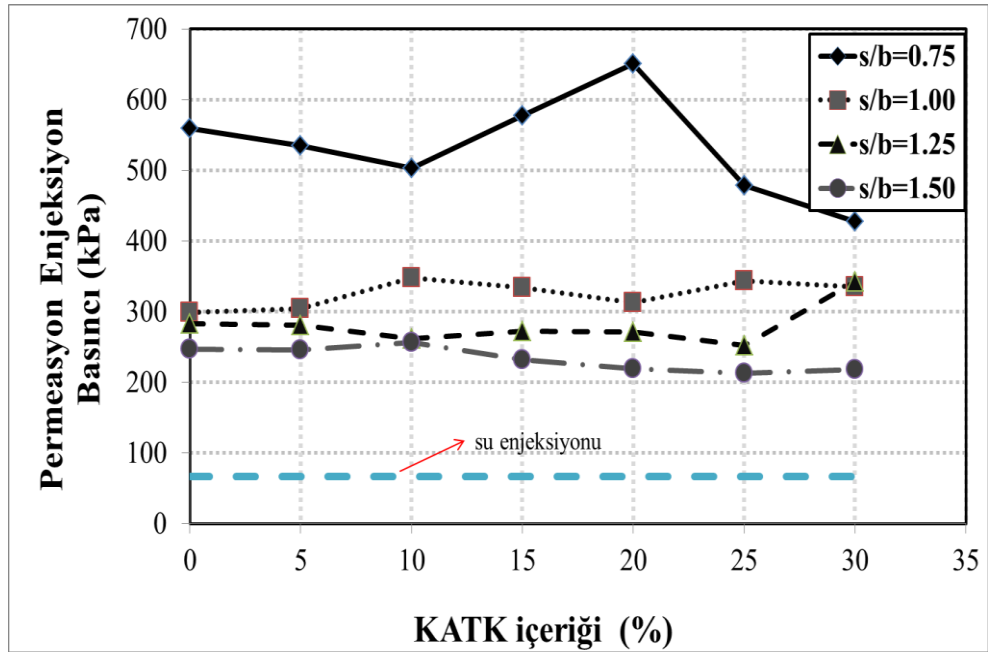
Çizelge 4.3. Modifiye Bingham Modeline dayanan harç karışımlarının plastik viskoziteleri ve akma gerilimi değerleri

Karışım adı	Akma gerilmesi τ_0 (Pa)	Plastik viskozite μ_p (Pa.s)	R^2
M1	1,7524	0,0078	0,9975
M2	2,0934	0,0075	0,9946
M3	2,0359	0,0071	0,9976
M4	2,0606	0,0082	0,9907
M5	1,6415	0,0093	0,9956
M6	2,2922	0,0069	0,9961
M7	2,5750	0,0062	0,9954
M8	0,6822	0,0045	0,9970
M9	0,6926	0,0046	0,9980
M10	0,5789	0,0053	0,9986
M11	0,6120	0,0051	0,9988
M12	0,6996	0,0048	0,9991
M13	0,4856	0,0053	0,9989
M14	0,5703	0,0052	0,9986
M15	0,1867	0,0045	0,9988
M16	0,3202	0,0045	0,9985
M17	0,4619	0,0042	0,9985
M18	0,4330	0,0044	0,9985
M19	0,1821	0,0044	0,9986
M20	0,3337	0,0041	0,9983
M21	0,6230	0,0056	0,9975
M22	0,3595	0,0041	0,9946
M23	0,1464	0,0041	0,9976
M24	0,2466	0,0043	0,9907
M25	0,2544	0,0039	0,9956
M26	0,1944	0,0037	0,9961
M27	0,2250	0,0036	0,9954
M28	0,2362	0,0037	0,9970

4.3.3 Permeasyon enjeksiyonu için küresel akış modeli

Küresel akış modeli için farklı s/b oranlarında permeasyon enjeksiyon basıncı ile KATK içeriği ilişkilerine karşı Şekil 4.20 'te gösterilmiştir. Küresel akış modeli ile ilgili tüm hesaplamalar denk. 4.2 kullanılarak yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken, bazı parametreler aşağıdaki gibi sabit tutuldu; enjeksiyon akış hızı (Q), enjeksiyon boru yarıçapı (R_o), zeminin su geçirgenliği (k), suyun viskozitesi (μ_w) sırasıyla 0.01 m³/s,

0.02 m, 0.006 m, 0.0015 Pa.s olarak kabul edilmiştir (bkz. Şekil 3.8). Hazırlan karışımların oranlarını belirlemek için kullanılan birim hacim ağırlığı, Çizelge 4.1 'de verilen değerler alınarak harç karışım oranları belirlendi. Tüm karışımlar için enjeksiyon basınçlarının tahmininde, her bir karışımın plastik viskozitesi, tüm s/b oranları için KATK 'nün ilavesinde baskın bir değişken olarak kullanılmıştır. Tüm varsayılan değerler, permeasyon enjeksiyonun dolgu tekniğinin pratik çalışmalarında genellikle kullanılan ortak değerler olarak kabul edilir. Şekil 4.20 'e göre s/b oranı, permeasyon enjeksiyonunun enjeksiyon basıncı üzerinde baskın bir etkiye sahip olan çok kritik bir parametredir. S/B oranı arttıkça, akışkanlığın artması nedeniyle enjeksiyon basıncı önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle enjeksiyon basıncındaki bu büyük düşüş, s/b oranı 1,0 değerini aştıktan sonra gözlenmiştir. Öte yandan, s/b oranı birden fazla olduğunda enjeksiyon basınçları hafifçe düşmüştür. Şekil 4.20 'te görüldüğü gibi, KATK 'nün harç karışımlarına ikamesinin, küresel akış modeli için permeasyon harcının enjeksiyon basıncı üzerinde çok fazla etkisi yoktur. Harç karışımlarının reolojik ve işlenebilirlik özellikleri ile ilgili geçmiş bölümlerde tartışıldığı gibi, bu çalışmada kullanılan KATK, bu çalışmada kullanılan Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında neredeyse aynı Blaine yüzey alanına ve parçacık derecelendirme boyutuna sahip olduğundan, karışımların akışkanlık özellikleri karışımlara KATK ilavesi ile çok fazla etkilenmemiştir.



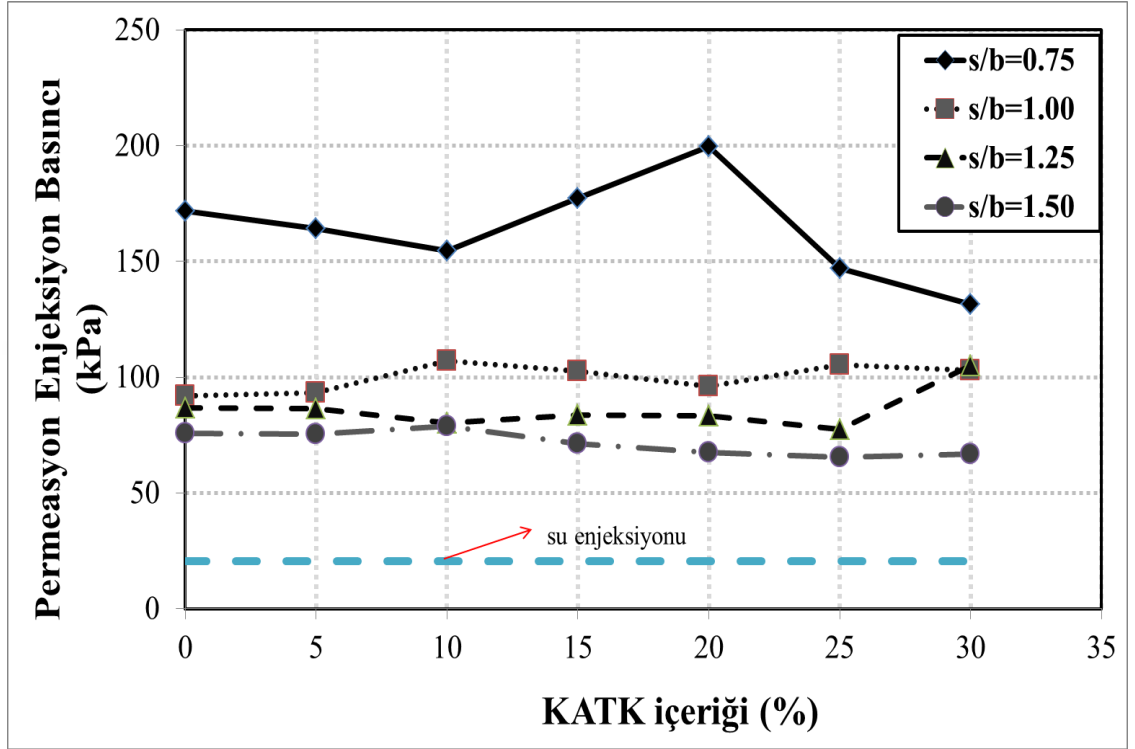
Şekil 4.20. Permeasyon enjeksiyon basıncı ile farklı s/b oranlarında KATK içeriği ilişkilerine karşı Küresel akış modeli

Bu nedenle, küresel akış modeline dayalı olarak bu çalışmada uygulanan nüfuz etme enjeksiyon yönteminin enjeksiyon basınçları, plastik viskozite ile ilgili olduğu için KATK 'nün karışımlara ikame edilmesinden de fazla etkilenmemiştir. Sonuçlar sadece su akışına dayalı sınır basıncı ile karşılaştırıldığında, s/b oranı için tüm KATK ikamelerinde harç karışımlarından elde edilen enjeksiyon basınçları (200 ve 350 kPa arasında) sadece su akışına bağlı olarak sınır basıncından (66 kPa) yaklaşık 3-5 kat daha fazladır.

4.3.4 Permeasyon enjeksiyonu için radyal (silindirik) akış modeli

Radyal akış modeli için farklı s/b oranlarında permeasyon enjeksiyon basıncı ile KATK içeriği ilişkilerine karşı Şekil 4.21 'e gösterilmektedir. Denk. 4.4, enjeksiyon basıncı değerini hesaplamak için kullanıldı. Küresel akış modeli için yapıldığı gibi, bazı parametreler aşağıdaki gibi sabit tutuldu; enjeksiyon akış hızı (Q), enjeksiyon boru yarıçapı (R_o), enjeksiyon noktasından uzaklık (R), enjekte edilen harç tabakasının kalınlığı (m), zeminin su geçirgenliği (k), suyun viskozitesi (μ_w), sırasıyla 0.01 m³/s, 0.02 m, 2.0 m, 0.6 m, 0.006 m/s ve 0.0015 Pa.s olarak kabul edilmiştir (bakınız Şekil 3.9). Harcın birim hacim ağırlığı, küresel akış modeline benzer şekilde Çizelge 4.1'de verildiği gibi her karışımın yoğunluğuna göre kullanılmıştır. Tüm karışımlar için enjeksiyon basınçlarının tahmininde, her bir karışımın plastik viskozitesi, tüm s/b oranları için tüm KATK ikamesinde baskın bir değişken olarak kullanılmıştır. Tüm varsayılan değerler, permeasyon enjeksiyon dolgu tekniğinin pratik çalışmalarında genellikle kullanılan ortak değerler olarak kabul edilir. Şekil 4.21 'te görüldüğü gibi, tüm karışımlar için permeasyon enjeksiyonunun enjeksiyon basınçları, küresel akış modelinde olduğu gibi s/b oranından baskın olarak etkilenmiştir. S/B oranı arttıkça, akışkanlığın artması nedeniyle enjeksiyon basıncı önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle enjeksiyon basıncındaki bu büyük düşüş, s/b oranı 1.0 değerini aştıktan sonra gözlenmiştir. Beklendiği gibi, s/b oranı küresel akış modelindekinden daha yüksek olduğunda enjeksiyon basınçları biraz düşmüştür. Şekil 4.21 'e göre, KATK 'nün harç karışımlarına ikamesinin, radyal akış modeli için permeasyon harcının enjeksiyon basıncı üzerinde çok fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, radyal akış modeline dayalı olarak bu çalışmada uygulanan permeasyon enjeksiyon yönteminin enjeksiyon basınçları, plastik viskozite nedeniyle KATK 'nün karışımlara ikame edilmesinden de fazla etkilenmemiştir. Sonuçlar sadece su akışına dayalı sınır basıncı

ile karşılaştırıldığında, s/b oranı için tüm KATK ikamelerinde harç karışımlarından elde edilen enjeksiyon basınçları (65 ila 110 kPa arasında) sadece küresel akış modeliyle aynı su akışına bağlı olarak sınır basıncından (20 kPa) yaklaşık 3-5 kat daha olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21. Permeasyon enjeksiyon basıncı ile farklı s/b oranlarında KATK içeriği ilişkilerine karşı Radyal(silindirik) akış modeli

BÖLÜM V

MINERAL OLARAK KATK KATKILI ÇİMENTO ESASLI KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.1 GİRİŞ

Enjeksiyon, zemin mühendisliğinde boşlukları veya çatlakları doldurmak için uygulanan bir işlemdir. Enjeksiyonun ana hedefleri daha güçlü, daha yoğun ve / veya daha az geçirgen bir zemin oluşturmaktır. Ayrıca başka türlü erişilemeyen ve zeminde veya bir yapıdan zemine yeterli gerilim transferini karşılamayan boşlukları doldurmak amacıyla yaygın olarak kullanılır. Jet enjeksiyon uygulamalarının zemine veya kayaya nüfuz etmesi için akışkan gibi davranması gerektiğinden, s/ç (su/çimento) oranı 0.6 ile 2 arasında değişmektedir (Moseley, 1993). Enjeksiyon esnasında zeminin boş hacmini doldurmak ve hava boşluklarının kaçmasına izin vermek için yeterince düşük viskoziteli harç olmalıdır (Lee vd., 2005). Tipik karışımlar, ağırlıkça 1:1 oranına sahiptir (Coulter ve Martin, 2006). Zeminlerin jet enjeksiyon uygulamasından çimento bulamacı ile karıştırılmasıyla elde edilen yapısal malzemelere soilcrete karışımları denilir (Andromalos vd., 1989).

Farklı katkı maddeleri kullanılarak hazırlanan jet grout zemin kolonları üzerinde birçok çalışma yapılmıştır (Clarke vd., 1992; De Paoli vd., 1992; Littlejohn, 1982; Lowe ve Standford, 1982; Schwarz ve Krizek, 1992). Harçlara farklı oranlarda mineral katkı malzemeleri eklenmesi, harçların mekanik ve reolojik özelliklerini değiştirmektedir. Literatürde farklı enjeksiyon uygulamaları için farklı katkı malzemeleri (uçucu kül, bentonit, silis dumanı, çimento fırını tozu ve metakaolin gibi) kullanılmıştır (Aitcin ve Ballivy, 1984; Bustamante vd., 1983; Deere, 1982; Ruggiero, 1984; Weaver vd., 1990). Literatürde bilindiği gibi, uçucu kül gibi bazı mineral katkılar sadece dayanıklılıkta değil aynı zamanda harç karışımının işlenebilirliği ve uzun vadeli performansında da bir artışa sahiptir (Sonebi, 2006). Sonuç olarak, harç uygulamalarında kullanılan mineral katkı maddeleri uygulama maliyetini azaltır, ancak akışkanlığı ve uzun vadeli kapasiteyi azaltır. Bununla birlikte, kazan altı taban külünün (KATK) farklı oranlarda çimento ile değiştirilmesinin mekanik ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi, daha yüksek s/ç oranları (s/ç= 0.75 ile 1.50 arası için) için ayrıntılı olarak araştırılmamıştır.

Kazan altı taban külü (KATK), beton üretiminde çimento bileşenlerini azaltmak için "yeşil" ve çevre dostu malzemeler olarak kabul edilir. KATK beton üretiminde atık malzemelerin kullanımı için İnşaat Sektörü Geliştirme Kurulu tarafından getirilen atık malzemelerden biridir (Dwikojuliardi, 2015). Kazan altı taban külü, termik santralde kömür yakılması sonucu üretilir ve uçucu külle birlikte büyük atık olarak kabul edilir. Silika oksit (SiO_2) ve Alümina oksit (Al_2O_3) varlığına atfedilen bir puzolanik aktiviteye sahiptir. Çimento hidratasyonu sırasında, kalsiyum hidroksit KATK ile reaksiyona girerek ilave Kalsiyum Alüminat Hidrat (CAH) ve Kalsiyum Silikat Hidrat ile sonuçlanır.

KATK 'nün neden olduğu çevresel problemler nedeniyle şimdiye kadar çimento esaslı harç uygulamalarında mineral katkı maddesi olarak kullanımı ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır.

Cheriaf vd., (1999) yeterli bir öğütmenin, KATK 'nün 6 saat boyunca öğütülmesinin 28 günde %28'e kadar KATK 'nün kuvvet aktivite indeksini arttırdığı KATK' nün puzolanik aktivitesini geliştirebileceğini belirtmiştir.

Bajare vd., (2013) öğütülmüş KATK 'nün, betonun basınç dayanımını azaltmadan çimentoyu %20'ye kadar etkili bir şekilde değiştirebileceği sonucuna varmıştır. Ayrıca, KATK öğütme periyodunun uzaması parçacık boyutu dağılımını değiştirdiği ve ince parçacıkların miktarını ve betonun yoğunluğunu arttırmıştır.

Pyo ve Kim, (2017) Ultra Yüksek Performanslı Betondaki silika tozunun yerini, işlenebilirlik ve güçte önemli kayıplar olmadan etkili bir şekilde KATK ve uçucu kül ile değiştirdiğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, Singh ve Siddique, (2016) ince agrega olarak kullanılan kömür dip külünün betonun işlenebilirliğini ve kusmanın azalttığını bulmuşlardır.

Bu nedenle, katı atıkları ve CO_2 emisyonlarını azaltabilen KATK 'nün doğal özelliklerini göz önünde bulundurarak, betonda KATK kullanımı daha fazla dikkat ve araştırma gerektirmiştir. Betonda aynı anda hem çimento hem de kumun yerine KATK kullanımı konusunda sınırlı araştırma çalışmaları yapılmıştır.

KATK 'nün faydalı etkileri yukarıda belirtildiği için, bu mineral, yapısal bir malzeme olarak grout numunenin mekanik davranışını ve uzun süreli dayanıklılığını geliştirmek için grout karışımın tasarımı için bir katkı maddesi olarak kullanılabilir.

Bu nedenle, bu çalışmada KATK 'nün zemin uygulamalarında harç olarak kullanılabilen bağlayıcıların sentezi için veya geoteknik uygulamalarda kullanılacak grout numunelerin üretimi için bir mineral katkı maddesi olarak olası kullanımını sunmaktadır.

KATK ilavesinin, farklı s/b oranlarında KATK ile birleştirilen mekanik (yani serbest basınç dayanımı, elastisite modülü, çökme, UPV testi ve eksenel yükleme esnasında oluşan kırılma kriterleri) özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve kontrol karışımları ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

5.2 Kullanılan Malzeme ve Yöntemler

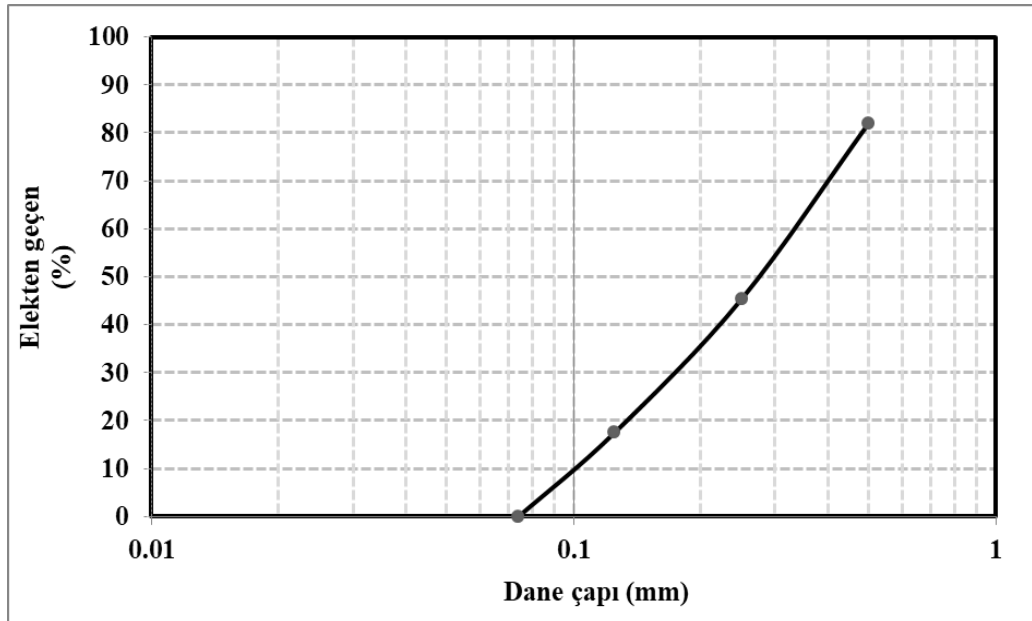
5.2.1 Bu çalışmada kullanılan malzemeler

Bu çalışmada ASTM C150/C150M Tip-I çimentoya uygun CEM I-42.5R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Mineral katkı maddesi olarak kazan altı taban külü (KATK) kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan KATK, Türkiye'de Ereğli Organize Sanayide kurulan Süt Entegre Tesisinden elde edilmiştir. Tesis kapasite raporuna göre yıllık linyit kömürü tüketimi 7392 ton/yıl'dır. Linyit kömürü, 7 MW (megawatt) elektrik enerjisi üretim kapasitesine sahip bir kömür kazanında yakılır ve KATK bu yakma işleminden yan ürün atığı olarak üretilir. Birikmiş KATK yığınının görünümü Fotoğraf 4.1 'de görülmektedir. Görüldüğü gibi, birikmiş KATK yığını çok sorunlu bir duruma neden olmuştur. Bu nedenle, bu deneysel çalışma bu çevresel sorunun çözümüne katkıda bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan öğütülmüş KATK 300 um büyüklüğünden elekten elenmiştir. Bu çalışmada kullanılan KATK ve Portland çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1 'de gösterilmiştir. Portland çimentosu ve KATK 'nün dane boyutu dağılım eğrilerini elde etmek için lazer saçılma tekniği kullanılmıştır (bakınız Şekil 4.1).

Bu çalışmada kullanılan kum, Türkiye'de Niğde şehrinden elde edilmiştir. Kullanılan kum öncelikle 24 saat etüvde bırakılarak kurutulmuştur. Kumun dane boyutu belirlenen elek çaplarından elenerek istenilen dane çapına sahip kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır (Şekil 5.1). Bu yapılacak deneylerde kullanılan kumun yapılacak deneyler üzerindeki etkisi standart hale getirip KATK 'nün etkisi incelenmiştir.



Fotoğraf 5.1. Kullanılan kötü derecelenmiş kum (SP)



Şekil 5.1. Kullanılan kumun (SP) gradasyon eğrisi

5.2.2 Karışım oranları ve hazırlanış

Harç karışımlarının mekanik ve reolojik özellikleri üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olan önemli parametrelerden biri su/bağlayıcı (s/b) oranıdır. Yukarıda belirtilen çalışmalarda kullanılan genel su/çimento oranı genellikle 0.25 ile 0.65 arasındadır. Bununla birlikte, zeminlere ve kayalara enjekte edilen enjeksiyon harcının su/çimento oranı 1.0 ile 1.5 arasında değişmektedir. Ayrıca jet grout enjeksiyonlarında kullanılan su/çimento oranı 2.0 'ye kadar ulaşılabilir. Bu nedenle, KATK 'nın harç karışım oranları üzerindeki etkisini araştırmak için farklı su/bağlayıcı oranları (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) seçilmiştir. KATK 'nın harçla karışımının farklı oranlarda etkisini gözlemlemek için ve çeşitli su/bağlayıcı oranlarında olmak üzere toplamda 28 (yirmi sekiz) farklı harç karışımı hazırlanmıştır (Çizelge 5.1). Hem KATK katkı miktarı hem de s/b oranı iki önemli değişken olarak seçilmiştir. KATK ile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 çimento yerine ikame edilerek hazırlanmıştır. Her bir s/b oranında üretilen harç karışımında (kontrol karışımı), KATK %0 (M1, M8, M15 ve M22) kontrol amacıyla herhangi bir KATK eklenmemiştir. Çizelge 5.1 'de gösterildiği gibi, KATK s/b oranı ve karışımların tüm tasarım parametreleri çizelge halinde verilmiştir. Kauchinger vd., (1992) göre jet enjeksiyonları %50'ye (çimento ağırlığının toplam karışım ağırlığına oranı) kadar çimento içeriğine sahip olabilir. Bu nedenle kum içeriği toplam karışım miktarının s/b oranına bağlı olarak %40 ile %20 arasında olacak şekilde seçilmiştir (Çizelge 5.1).

Tüm karışımlar için aynı karıştırma yöntemleri kullanılmıştır. Karışımları elde etmek için standart döner tipte 10 litre laboratuvar karıştırıcısı kullanılmıştır (Fotoğraf 5.2). Çalışmada uygulanan standart prosedür aşağıdaki gibidir: Portland çimentosu ve KATK içeren bağlayıcılar kuru halde iyice karıştırıldıktan sonra 1 dakika boyunca su ile karıştırılmıştır ve sonra karışımlar 1 dakika boyunca elle karıştırılmıştır. Daha sonra karışımlara kum ilave edilmiştir. Son olarak, kum ilavesinden sonra karıştırma işlemi 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışımlar hazırlanırken ve tüm testler yapılırken laboratuvarın nem oranı ve sıcaklığı sırasıyla % 55-65 ve 23 ± 3 olarak ölçülmüştür.



Fotoğraf 5.2. Kullanılan standart döner tip 10 litre laboratuvar mikseri

Çizelge 5.1. 1 kg için karışımların karışım oranları

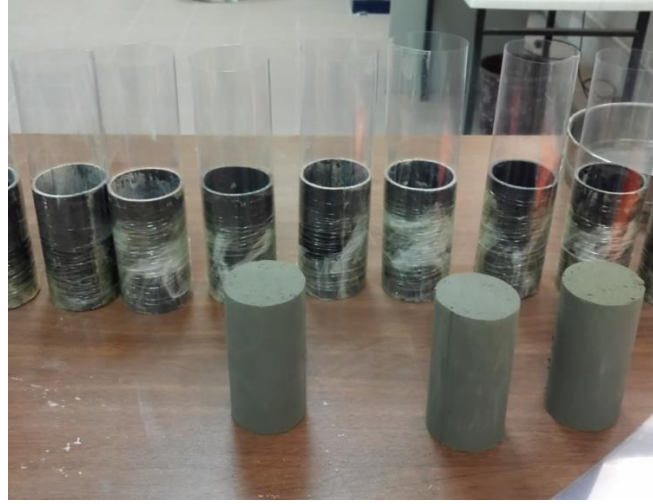
Karışım adı	s/b	KATK (%)	KATK (gr)	Çimento (gr)	Su (gr)	KUM (gr)
M1	0.75	0	0	400	300	300
M2	0.75	5	20	380	300	300
M3	0.75	10	40	360	300	300
M4	0.75	15	60	340	300	300
M5	0.75	20	80	320	300	300
M6	0.75	25	100	300	300	300
M7	0.75	30	120	280	300	300
M8	1.00	0	0	350	350	300
M9	1.00	5	18	333	350	300
M10	1.00	10	35	315	350	300
M11	1.00	15	53	298	350	300
M12	1.00	20	70	280	350	300
M13	1.00	25	88	263	350	300
M14	1.00	30	105	245	350	300
M15	1.25	0	0	311	389	300
M16	1.25	5	16	296	389	300
M17	1.25	10	31	280	389	300
M18	1.25	15	47	264	389	300

M19	1.25	20	62	249	389	300
M20	1.25	25	78	233	389	300
M21	1.25	30	93	218	389	300
M22	1.50	0	0	280	420	300
M23	1.50	5	14	266	420	300
M24	1.50	10	28	252	420	300
M25	1.50	15	42	238	420	300
M26	1.50	20	56	224	420	300
M27	1.50	25	70	210	420	300
M28	1.50	30	84	196	420	300

5.2.3 Serbest Basınç Dayanımı (SBD) Testi

ASTM D5102'ye (ASTM 2009b) takiben zemin ve çimento-KATK karışımlarından hazırlanan zemin numuneleri üzerinde tek eksenli serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm testler için kayma hızı 1 mm/dk olarak seçilmiştir (ASTM D5102). Zemin örnekleri oluşturmak için ASTM'de (1995) D2166-91'e göre yükseklik: çap oranı 2:1 olan 110 mm yüksekliğinde plastik kalıplar kullanılmıştır (Fotoğraf 5.3).

Çökelme (bleeding) sorunu, çoğunlukla ilk iki saat içinde meydana gelen kalıpların tepesine karton plastik yakalar takılarak giderilmiştir (Lee vd., 2005). Daha sonra bilezikli kalıplar, harç numunelerinde bulunan suyun kaçmasını önlemek için plastik torbalarla kaplanmıştır. Numuneler 24 saat sonra çıkarılarak kalıbın üstündeki fazla harçlar numunenin tepesinden tıraş edilerek kalıp seviyesine getirilmiştir. Daha sonra numune kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler streç ile sarılıp su tankında küre bırakılmıştır. Her bir karışım için 3, 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi için 3'er numuneden bir karışım için toplam 9 numune hazırlanmıştır. Numunede tek eksenli basınç dayanımı, UPV ve elastisite modülü ile çökelme deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma için kullanılan Tek Eksenli serbest basınç dayanımı test makinesi ve veri kayıt sistemi Fotoğraf 5.7 'te gösterilmektedir. Daha sonra bu değerler kontrol örnekleri ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Fotoğraf 5.3. Hazırlanan kalıp ve bu kalıplardan çıkan numuneler



Fotoğraf 5.4. Kalıplara dökülen soilcrete numuneler



Fotoğraf 5.5. Kalıplardan çıkartılıp traşlanan soilcrete numuneler



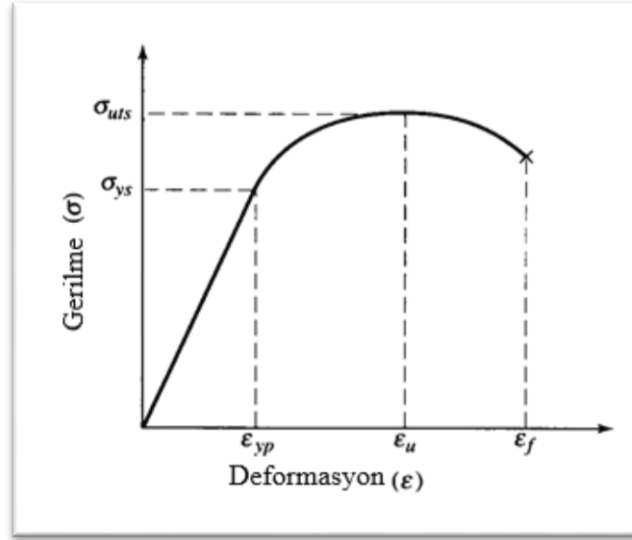
Fotoğraf 5.6. Numunelerin streç ile sarılıp su içinde küre bırakılması



Fotoğraf 5.7. Serbest Basınç Dayanım cihazı

5.2.4 Elastisite Modülü

Elastisite modülü, numunen gerilmesinin oluşan deformasyonun boyuna oranıdır. Bir malzeme yük altında şekil değişimi sonrası yük kaldırıldığında eski şekline dönüyorsa elastik dönmüyorsa plastik şekil değişimine uğramış demektir. Rijit cisimler mekaniğinin konusu olan bu durum elastik ile plastik şekil değiştirme arasında bir sınır olduğunu gösterir beton için bu durum Şekil 5.2 'da gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Gerilme-Şekil Değiştirme Eğri (Yaşar, 2019)

Betonun elastisite modülü yaklaşık olarak bilinmektedir. Elastisite modülü malzemenin dane büyüklüğünden, çimento hamurunun elastisite modülü gibi etkenlerden etkilenir. Elastisite modülünün bilinmesinden yola çıkarak deplasmanların ölçme ile teorik olarak gerilmeleri hesaplayabiliriz. Elastisite modülü genel olarak iki metod ile belirlenir (Yaşar, 2019).

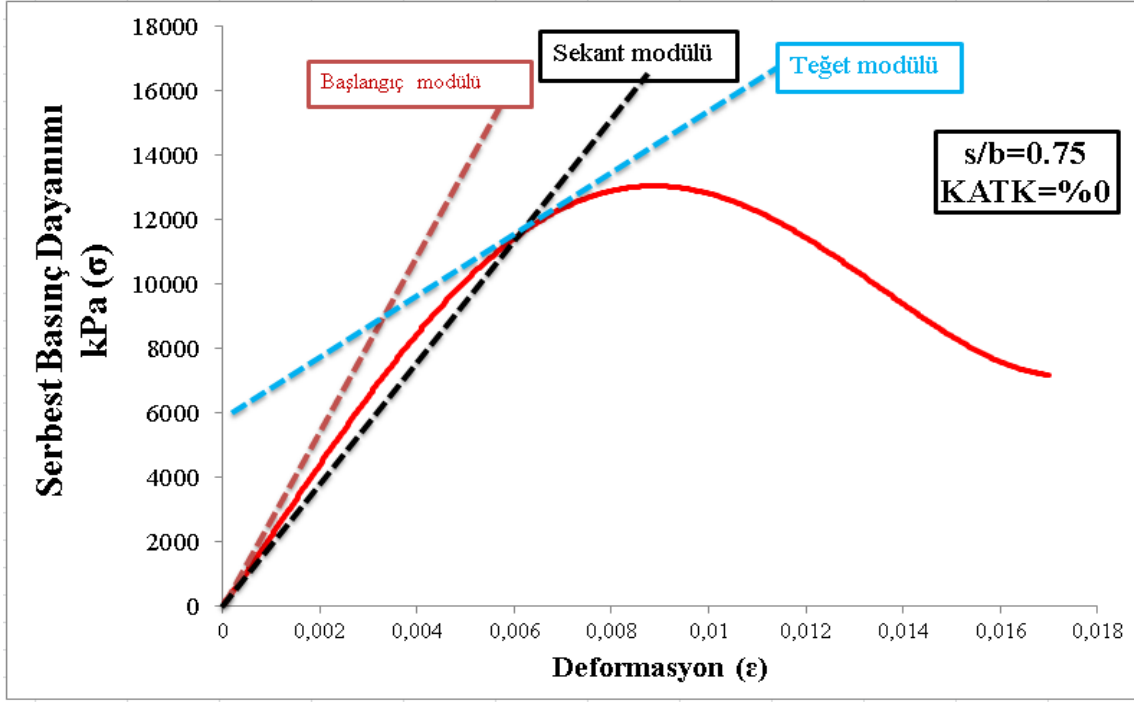
Bunlar;

Statik elastisite modülü(E_s): Başlangıç Modülü veya Başlangıç teğeti modülü, Sekant modülü, Teğet modülü(Şekil 5.3).

Dinamik elastisite modülü(E_d)'dür.

Başlangıç elastisite modülü gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıç noktasına çizilen teğetin eğimini $\tan \alpha$ değeri olarak tanımlanabilir. Beton çok düşük gerilmelere maruz ise, başlangıç modülü kullanılarak gerçekçi sonuçlar alınabilir. Sekant modülü, orijinden, eğriye herhangi bir gerilmeye tekabül eden noktaya çizilen sekantın eğimi olarak tanımlanır. Betonun, emniyet gerilmelerine yakın gerilmelere maruz olduğu durumlarda bu modül iyi sonuç verir. Genelde sekant modülü 0,5 f_c gerilmesine göre hesaplanır. Teğet modülü σ - ϵ eğrisine herhangi bir noktadan çizilen teğetin eğimidir. Pratikte bu teğet, yaklaşık olarak 0,4 f_c gerilmesi temel alınarak çizilir (Yaşar, 2019).

Dinamik elastisite modülü numuneye elastik sınırlar içinde kalacak şekilde yükleme boşaltma yapılarak aynı gerilme ve deformasyona maruz kalarak elastisite modülü hesap kısmının eğrisinin aslında başlangıç eğrisine eşit olduğu görülür. Böylece başlangıç modülü, dinamik elastisite modülü olarak tanımlanmaktadır (Yaşar, 2019).



Şekil 5.3. Elastisite modülü hesaplama metodları

5.2.5 Taze harçların stabilizasyonu (çökeltme-bleeding testi)

Çimento esaslı enjeksiyon süspansiyonlarının stabilitesi, standart bir cam silindirde 60 mm çapa sahip 1000 ml çimento harcı kullanılarak basit laboratuvar testleri (çökeltme testi) ile belirlenir (Fotoğraf 5.8). Süspansiyonun üstünde ayrılan temiz su hacmi (dV) olarak tanımlanan sedimantasyon(ayırışma) oranı (dV/V), toplam harç hacmine (yani V= 1000 ml) bölünerek bir süspansiyonun stabilitesini değerlendirmek için kaydedilir. Deere vd., (1985) göre süspansiyonun 2 (iki) saate kadar oluşan çökeltmenin (bleeding) oranının %5 'ten daha yüksek olmayan karışımlara "kararlı süspansiyon" olarak ifade etmiştir. Kutzner 'a (1996) göre bu %10 'dan daha yüksek olmayan oran olarak sınıflandırmıştır. Yüksek sedimantasyon oranı saf çimento harçları için tipiktir ve büyük pratik sonuçlara sahiptir, çünkü enjeksiyon sırasında katıların sedimantasyonu meydana gelirse, işlenen boşluklar ve enjeksiyon boru hatları tıkanabilir.



Fotoğraf 5.8. 1000 ml hacimli standart mezür

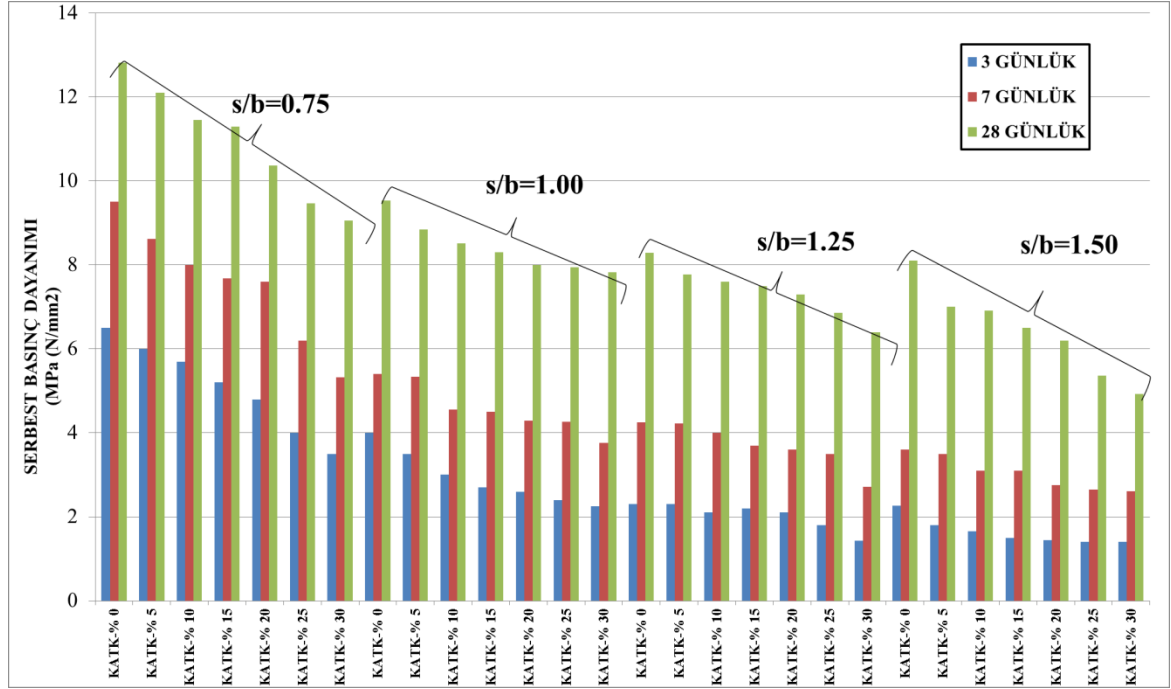
Helal ve Krizek, (1992) tarafından mikro ince çimento harcı kullanılarak gerçekleştirilen çimento harç kumunun gözenek yapısı üzerine yapılan araştırmaya göre, hidrasyon ürünleri ve çökeltme suyunun kapladığı harç ile dolmayan gözenek boşluğu yüzdesinin harç su/çimento oranının bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Su/çimento oranı (s/ç) 1.0 'i aşan daha kararsız harç için, sedimentasyon testinin ilk aşamasında %5 'in üzerinde sedimentasyon oranı gösteren ve çimento partiküllerinin birikmesi, biriken çökeltme suyuyla sabitlenmeden önce zemin boşluklarını doldurur, gözeneğin üst kısımlarını işgal eder ve zeminde anizotropik özelliklere neden olur (Çelik, 2016).

5.3 Test Sonuçları ve Tartışma

5.3.1 Serbest Basınç Dayanımı (SBD) test sonuçları

KATK ile %0, %5, %10, %15, % 20, %25 ve %30 oranlarında çimento yerine ikamelerini içeren 3, 7 ve 28 günlük zemin numunelerinin basınç dayanımı, farklı s/b

oranlarında (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) ağırlıkça karıştırılmıştır (Çizelge 5.1). Tüm farklı karışımlar için hazırlanan numunelerin ölçülen ortalama basınç dayanım değerleri, literatürde sadece zemin bazlı yapı elemanlarında değil, aynı zamanda enjeksiyon uygulamalarında ve iyileştirme amaçlı harçlarda bulunan benzer çalışmalarla benzerdir (Pavlovic vd, 2010a; Pavlovic vd., 2010b; Sonebi vd., 2013; Mikkelsen, 2002; Nikbakhtan ve Osanloo, 2009; Consoli vd., 2011; Yoon vd., 2009; Morel vd., 2007).

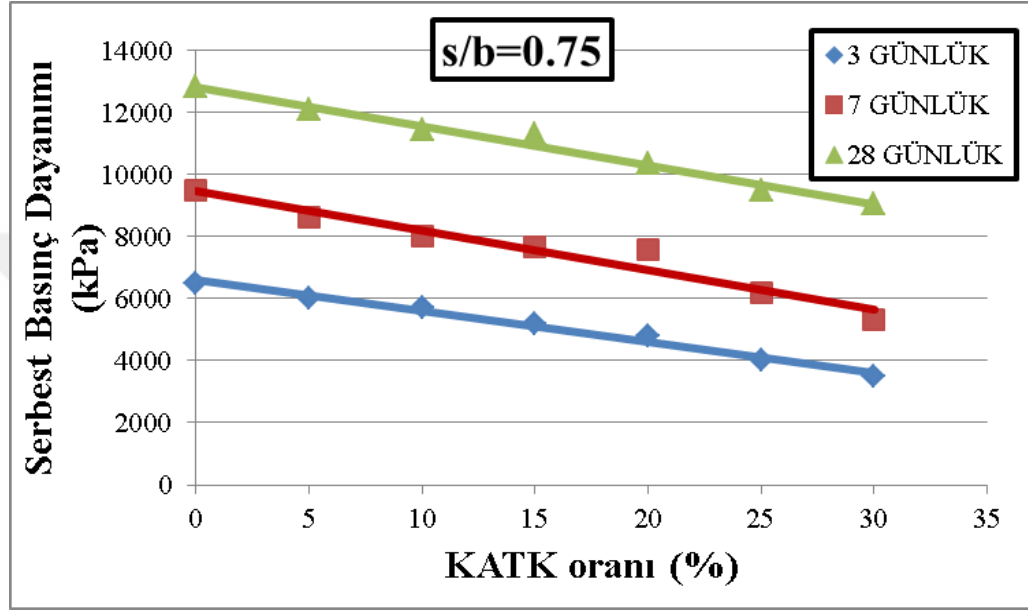


Şekil 5.4. Tüm karışım örneklerinin 3,7 ve 28. kür sürelerinde serbest basınç dayanımı (farklı s/b oranlarında; sırasıyla 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50).

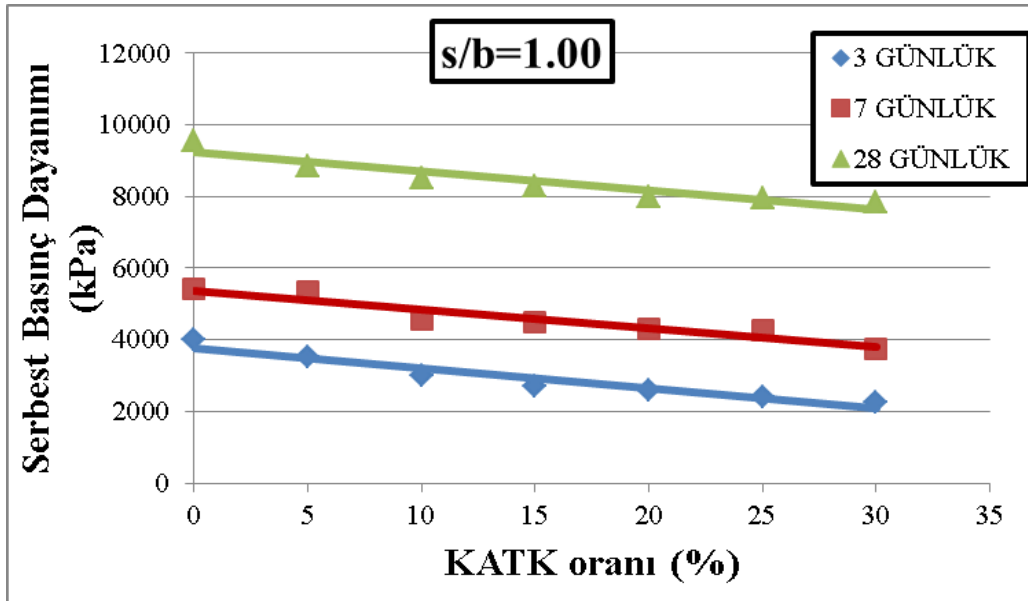
Şekil 5.4 'den görülebileceği gibi, daha düşük s/b oranı için, bağlayıcıya KATK eklenmesi, daha yüksek s/b oranlarına kıyasla daha yüksek değerlerle sonuçlanmıştır. S/B oranı arttığında, zemin çökeltilerinin SBD yavaş yavaş azalmıştır. Beklendiği gibi, s/b oranı ne kadar yüksek olursa, tüm kür sürelerinde karışım örneklerinin hesaplanan ortalama basınç dayanımındaki azalma o kadar yüksek olacaktır (Kolovos vd., 2013). Bağlayıcıya KATK eklenmesi, tüm kür sürelerinde zemin numunelerinin hesaplanan ortalama basınç dayanımı için referans numunelere (M1, M8 ve M15 ve M22) kıyasla daha düşük değerlerle sonuçlanmıştır.

Şekil 5.5 - 5.8 'da açıkça görüldüğü gibi, zemin numunelerinde artan KATK miktarı ile tüm zemin kalıntılarının Serbest basınç dayanım (SBD) değeri tüm kür sürelerinde ve s/b oranlarında azalmıştır.

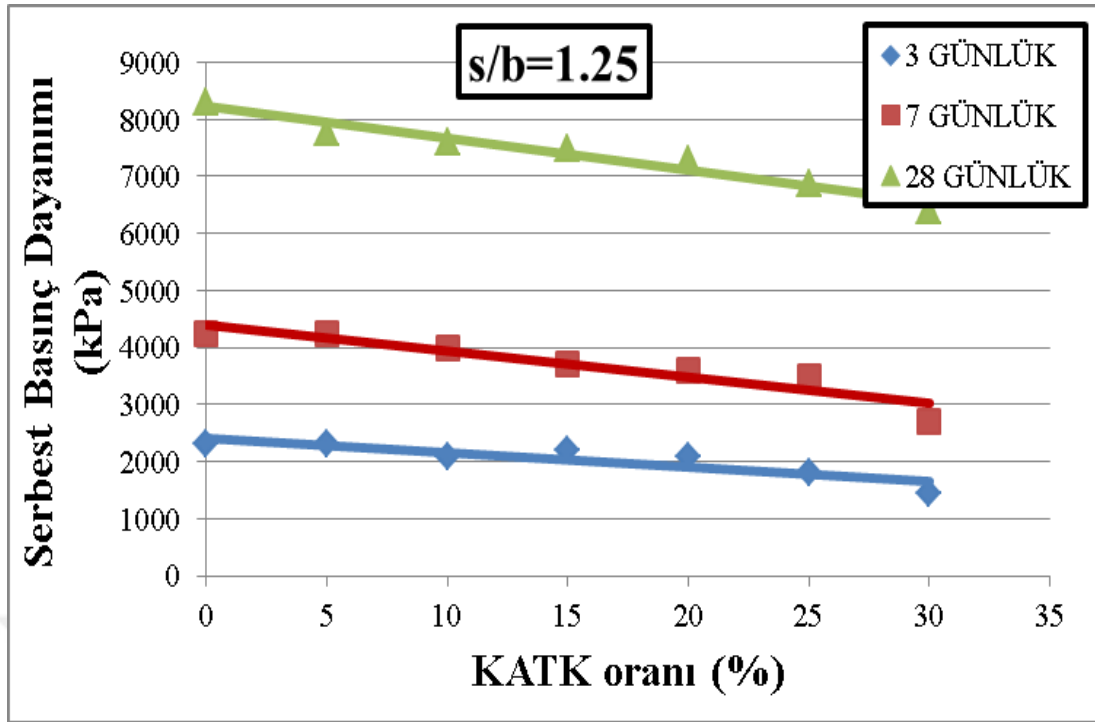
Puzolonlardan silika, PÇ 'nin hidrasyonunun yan ürünü olarak üretilen kireç ile reaksiyona girerek, sonraki kür sürelerinde bağlayıcı etkinliğini ve karşılık gelen mukavemet değerlerini arttıran ilave kalsiyum silikat-hidrat (C-S-H) oluşturur. KATK 'nün oluşumu $s/b = 0.75$ ve 28 kür sürelerinde %0 olduğunda, zemin numunelerinde maksimum SBD değeri 12,8 MPa olarak gözlenmiştir. Öte yandan numunelerin minimum SBD'si 5 MPa olarak belirlenmiştir.



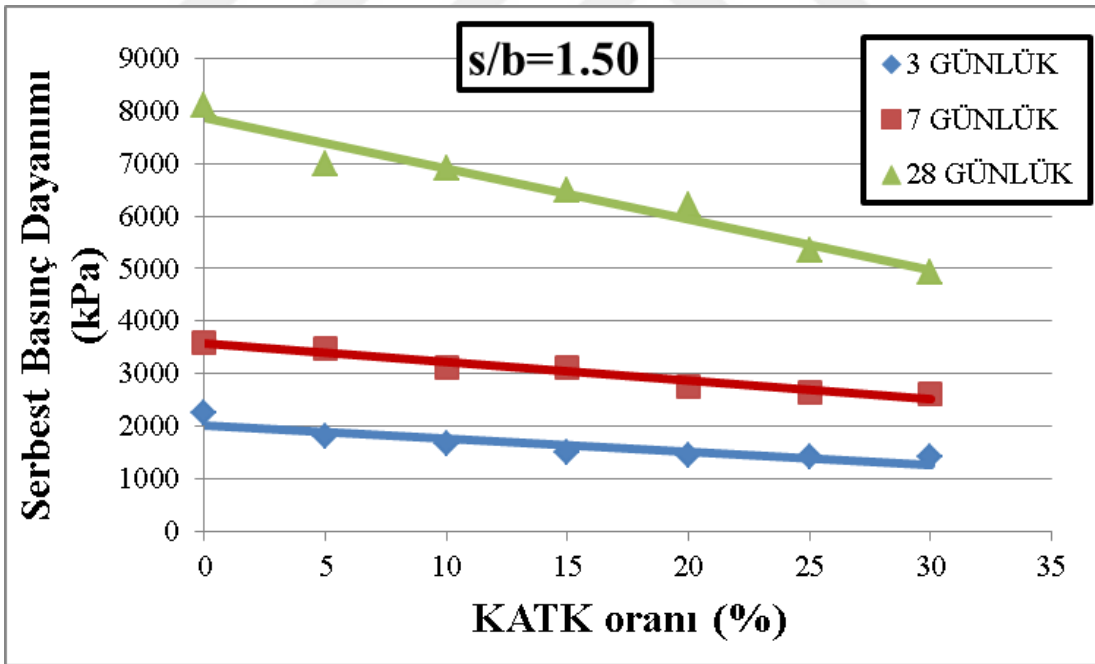
Şekil 5.5. Karışım numunelerinin $s/b = 0.75$ ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları



Şekil 5.6. Karışım numunelerinin $s/b = 1.00$ ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları

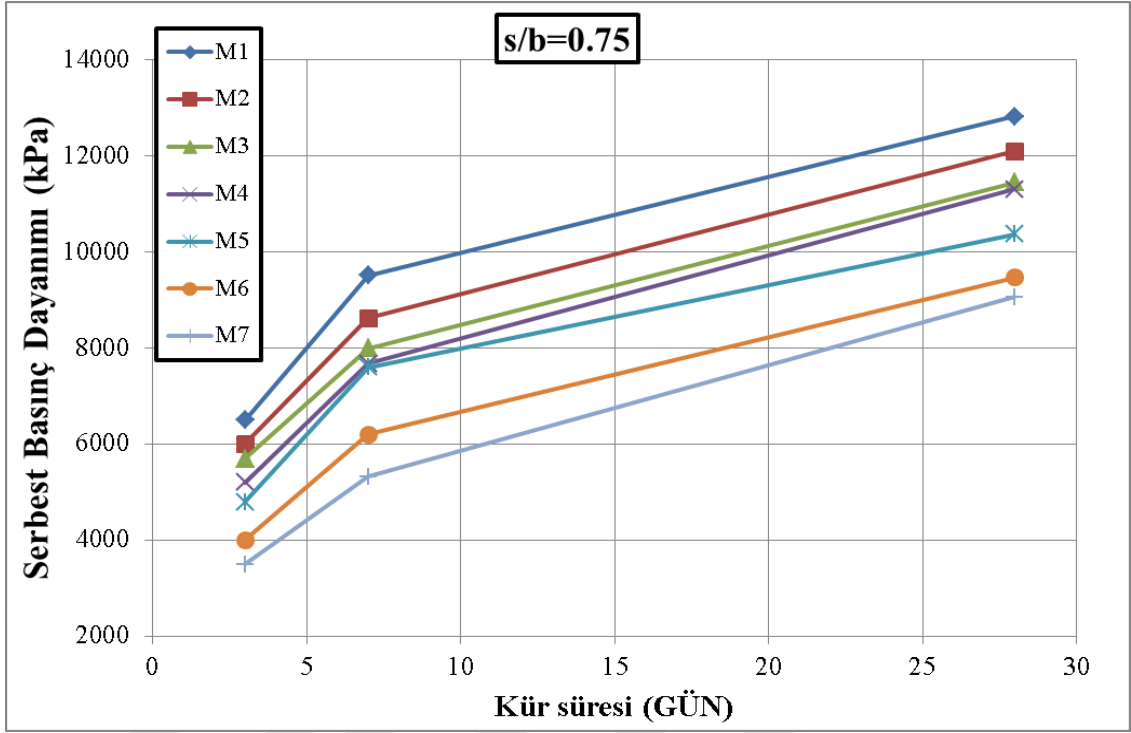


Şekil 5.7. Karışım numunelerinin $s/b = 1.25$ ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları

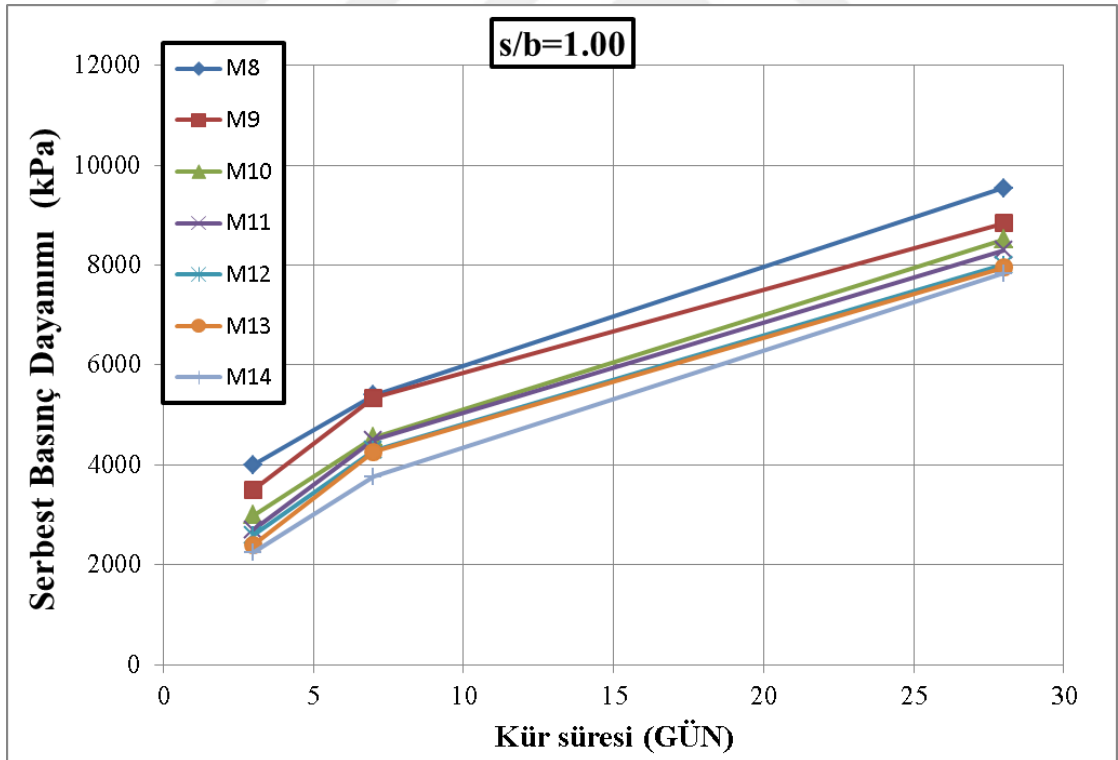


Şekil 5.8. Karışım numunelerinin $s/b = 1.50$ ve çeşitli KATK ikameleri için 3,7 ve 28 günlük kür süreleri için SBD sonuçları

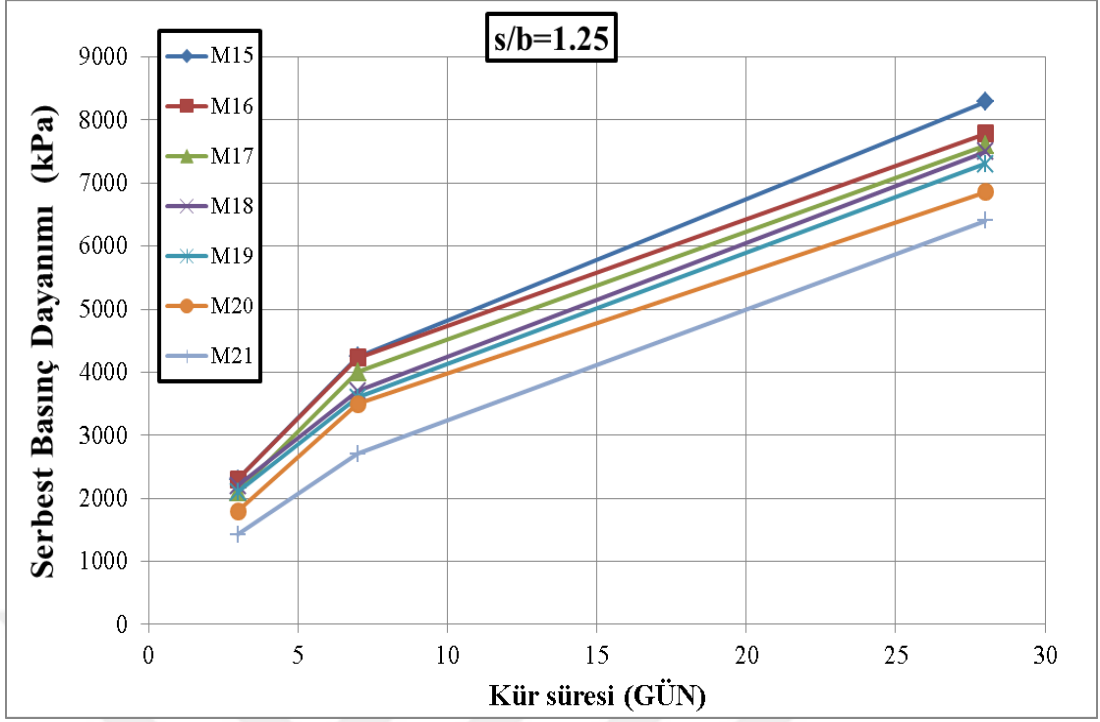
Bu çalışmada elde edilen karışım numunelerin basınç dayanımlarının, Şekil 5.9 - 5.12 'te gösterildiği gibi artan kür süresi ile önemli ölçüde arttığı bulunmuştur (Kawasaki vd., 1981; Uddin vd., 1997).



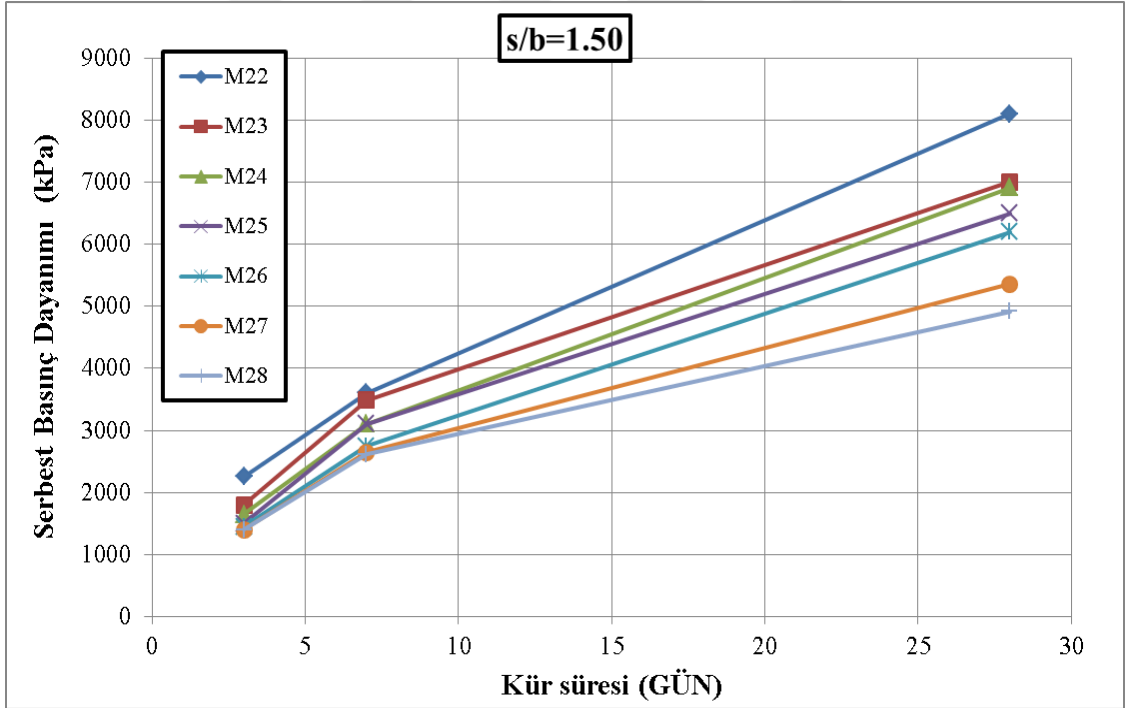
Şekil 5.9. S/b = 0.75 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri



Şekil 5.10. S/b= 1.00 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri



Şekil 5.11. S/b= 1.25 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri



Şekil 5.12. S/b= 1.50 için SBD ile kür süresi arasındaki ilişkileri

Beton numunelerin basınç dayanımındaki artış, kür süresinin başlarında hızlıdır ve daha sonra zaman içinde yavaşlar (Porbaha vd., 2000). 28 günlük kür süresinin tamamı için, tüm çökeltilerin SBD değerleri 5 MPa'dan fazladır (Şekil 5.9- 5.12). Zeminler için 5

MPa basınç dayanımı değeri geoteknik uygulamalarda oldukça yüksek bir değer olduğu kabul edilebildiği için (Hausmann, 1990), KATK 'nın sorunlu kumlu zeminlerin iyileştirilmesi için bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği açıkça görülmektedir.

Su/çimento oranı soilcrete karışımının SBD mukavemeti üzerinde genellikle belirli bir yüzdeye kadar arttırılmasıyla artar, daha sonra mukavemet artış hızı azalır (Uddin vd., 1997). Soilcrete numunelerin SBD tipik olarak doğal zeminlerin SBD 'nın 10 ila 50 kat daha fazladır.

Su/çimento oranı, çimento-kum karışımının mühendislik davranışını ve mukavemetini yöneten önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir (Miura vd., 2001). Kum-çimento karışımlarının serbest basınç dayanımı, doğal zeminin başlangıçtaki su içeriği arttıkça önemli ölçüde azalır. Daha yüksek bir su içeriği, karışımın stabilizasyonu sırasında önemli bir etki elde etmek için daha fazla çimento gerektirir. Genel bir eğilim olarak, kum-çimento karışımının su-çimento oranının artmasıyla serbest basınç dayanımı önemli ölçüde azalır (Miura vd., 2001; Hassan, 2009).

5.3.2 Ultrasonik Dalga Hızı (UPV)

Ultrasonik dalga hızı (UPV) yöntemleri, malzeme homojenliğinin incelenmesini mümkün kıldığından, beton yapıların değerlendirilmesi için en umut verici yöntemlerden biri olarak düşünülebilir. Ultrasonik hız dalgasının yayılma varyasyonlarının analizini kullanarak, betondaki uygunluğu doğrulamak veya heterojen bölgeleri tespit etmek mümkündür.

Genel olarak, bir malzemenin kalitesini analiz etmek için kullanılan temel özellik serbest basınç dayanımıdır. UPV testinden gelen ana yapısal parametre olan basınç dayanımını tahmin etme olasılığı çok caziptir. Bu nedenle, UPV ölçümleri ile basınç testi sonuçları arasında faydalı korelasyonlar oluşturulmasına sürekli ilgi duyulmaktadır. Sorun, bu korelasyonu etkileyebilecek birçok değişken olması. Örneğin su/çimento oranı, agregaların boyut dağılımı, nem ve çimento tipi basınç dayanımını ve yoğunluğunu etkiler.

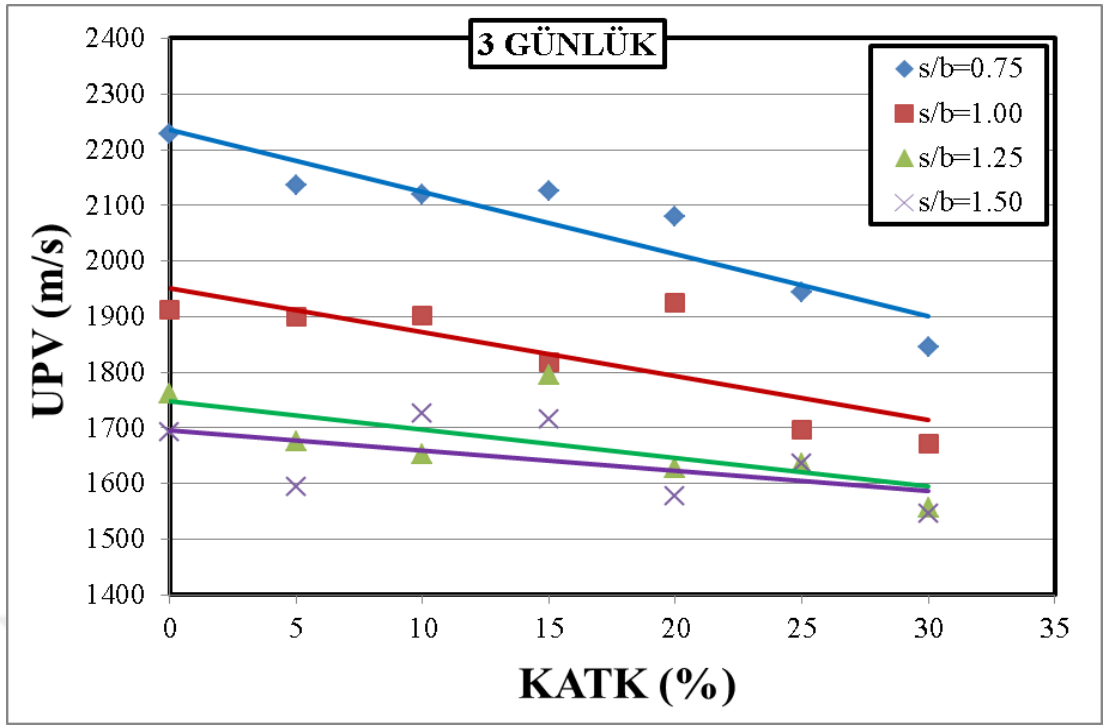
UPV yöntemleri, malzeme homojenliğinin incelenmesini mümkün kıldığında beton yapıları değerlendirmek için pratik yöntemlerden biri olarak düşünülebilir. Yapının tam kontrolü, zamanla özellik varyasyonlarını kullanarak da mümkündür. UPV hız dalga yayılım varyasyonlarını analiz ederek, yapının uygunluğunu doğrulamak veya heterojen bölgeleri tespit etmek mümkündür. Betondaki UPV test metotları ile yayılma süresinin, sıkıştırma mukavemeti ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerle ilişkili olabilecek malzemenin yoğunluğunu ifade etmesine dayanır (Popovics, 1998).



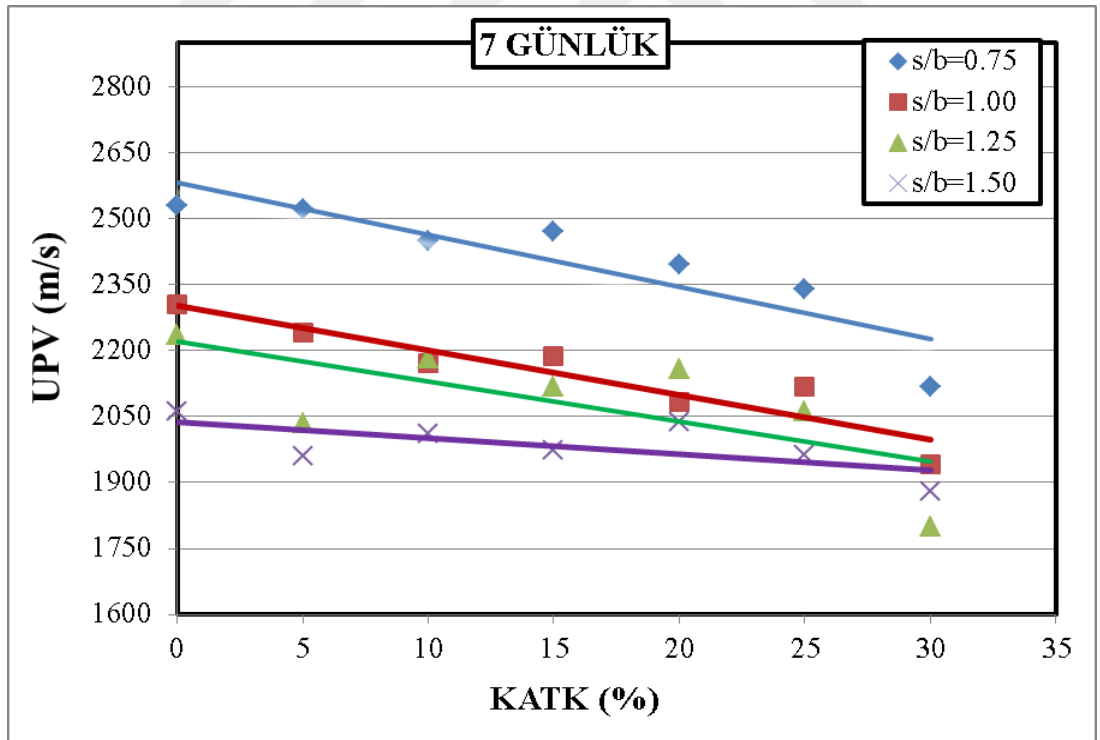
Fotoğraf 5.9. UPV test cihazı

Bu araştırmada iki farklı değişken dikkate alınmıştır: su/çimento oranı ve KATK 'nın oranı beton mukavemetinde doğrudan etkiye neden olan ana parametredir.

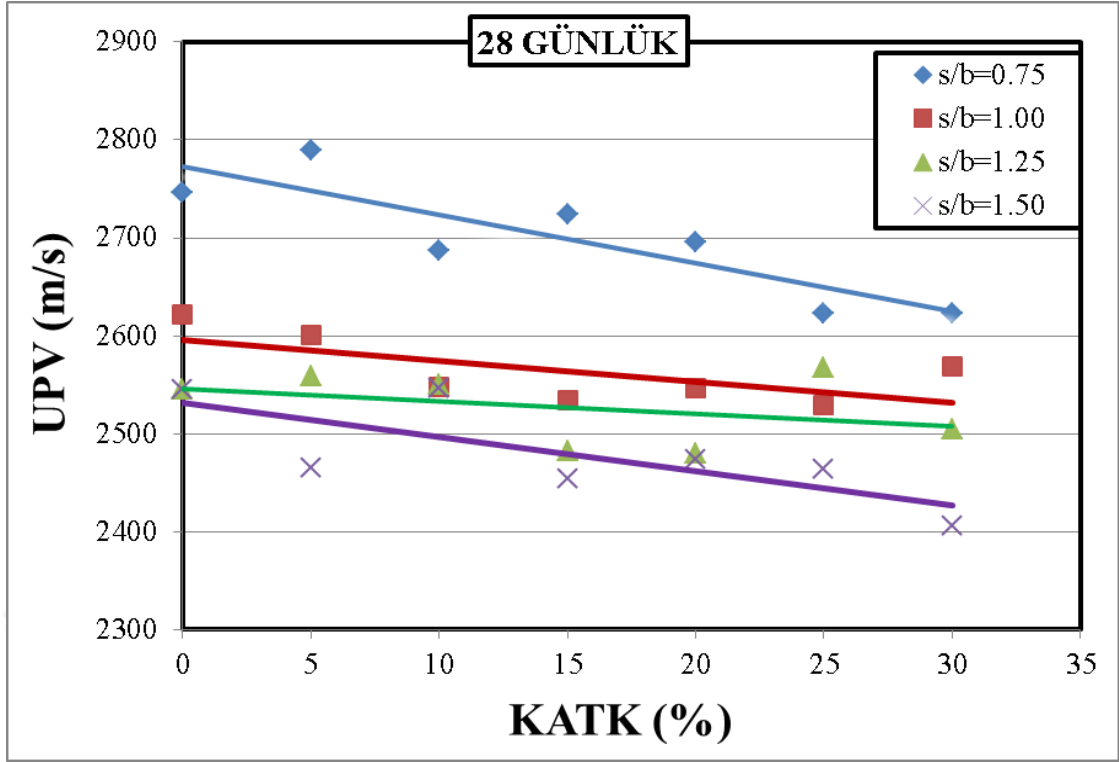
Kür süresi, çimento hidratasyonunun ilerlemesi göz önüne alındığında, beton mukavemeti açısından önemli bir değişkendir. UPV 'nin bu değişikliklere duyarlı olup olmadığını değerlendirmek için 3, 7 ve 28 kür süreleri dikkate alınarak silindir numunelerine UPV testleri yapılmıştır. UPV testi sonrasında, tek eksenli serbest basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Hazırlanan karışımlarda kür süresinin, s/b oranının ve KATK'nın UPV sonuçlarında değişikliklere neden olup olmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan UPV deney sonuçları kür sürelerine bağlı olarak Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te verilmiştir.



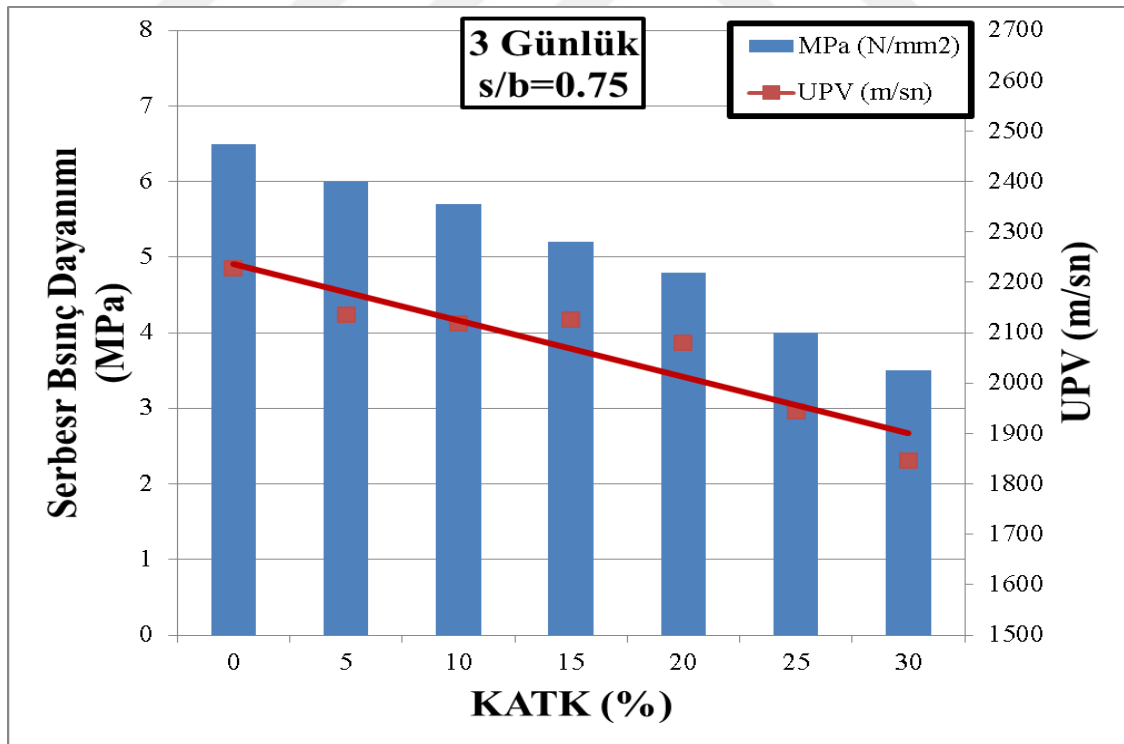
Şekil 5.13. Farklı s/b (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarının 3 Günlük kür süresinin UPV ve KATK arasındaki ilişki



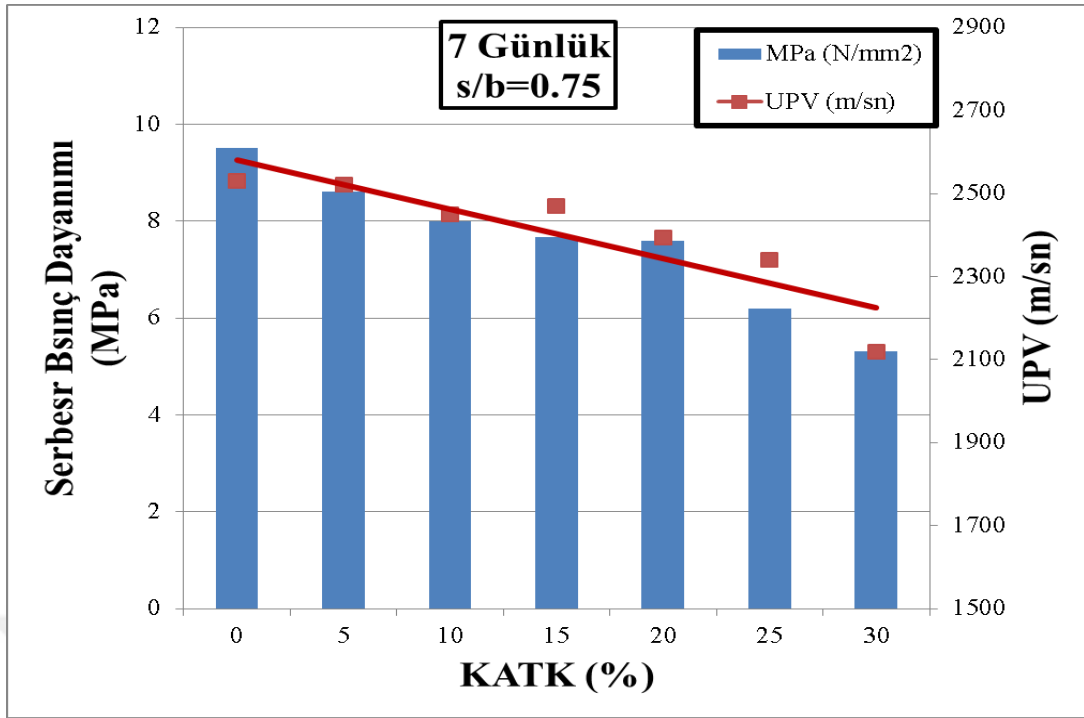
Şekil 5.14. Farklı s/b (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarının 7 Günlük kür süresinin UPV ve KATK arasındaki ilişki



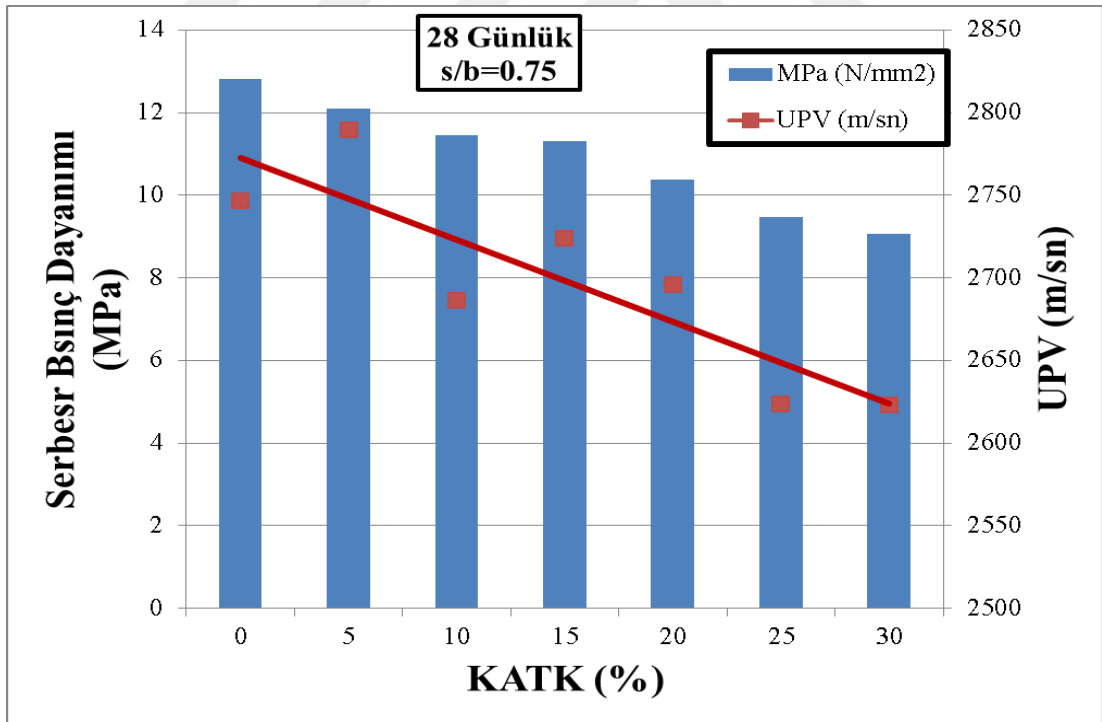
Şekil 5.15. Farklı s/b (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarının 28 günlük kür süresinin UPV ve KATK arasındaki ilişki



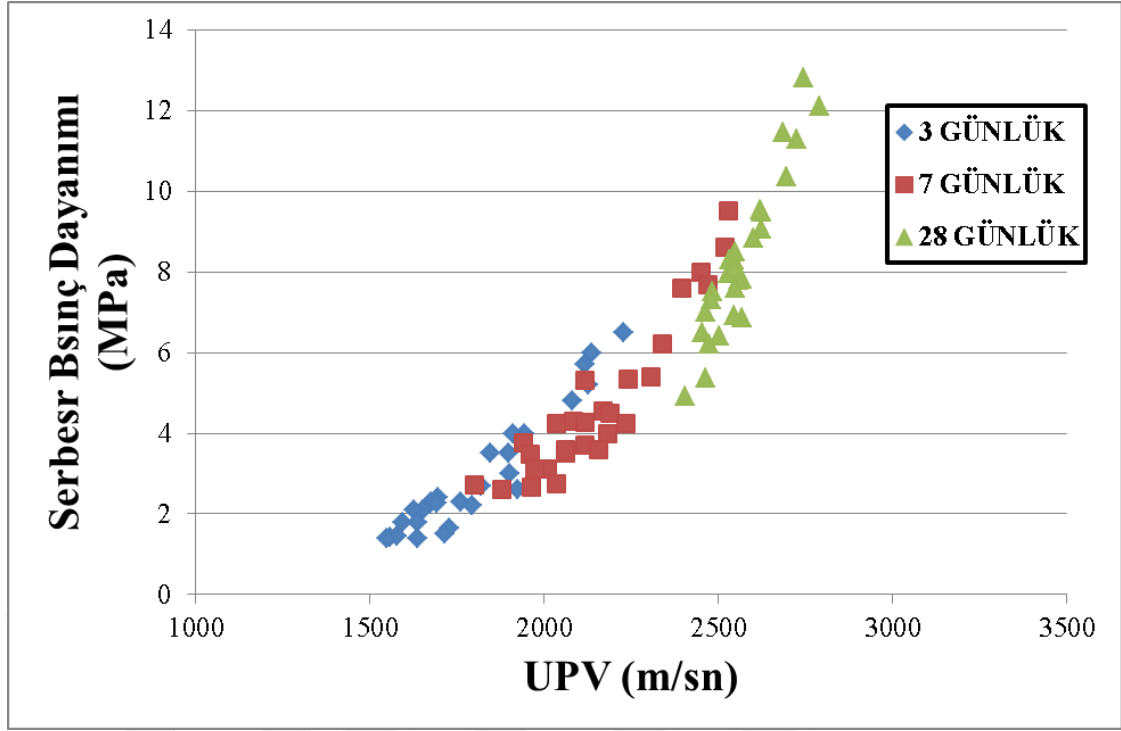
Şekil 5.16. S/b oranı 0.75 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 5.17. S/b oranı 0.75 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 5.18. S/b oranı 0.75 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



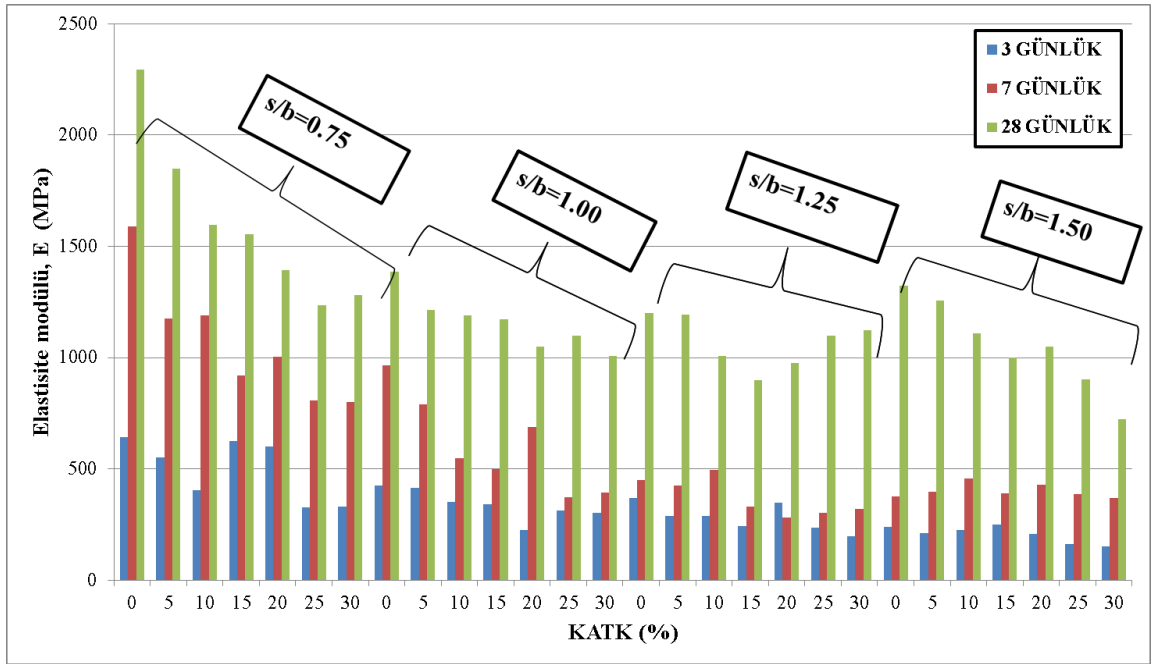
Şekil 5.19. UPV ve serbest basınç dayanımının kür süresine bağlı ilişkisi

5.3.3 Elastisite modülü

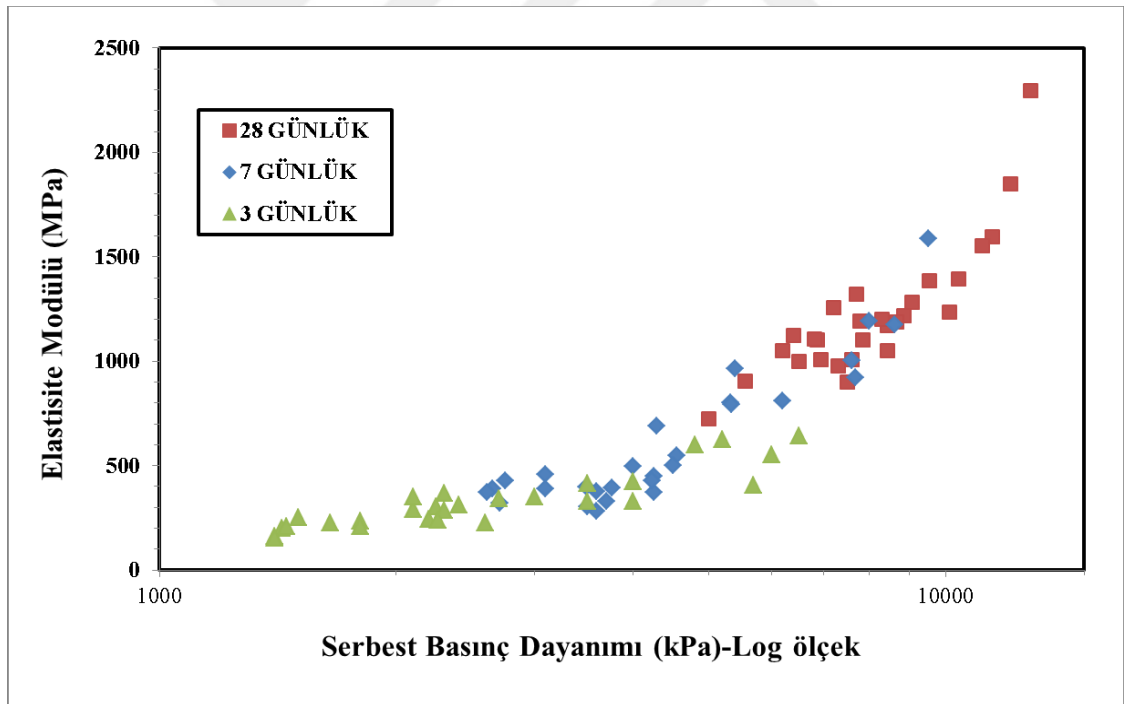
KATK ile %0, %5, %10, %15 %20 %25 ve %30 çimento ikameleri içeren 3,7 ve 28 günlük numunelerinin farklı s/b oranı ağırlıkça (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarındaki karışımların elastisite modülü hesaplanmıştır. Zemin-çimento numunelerinin tüm elastisite modülü değerleri, serbest basınç mukavemet testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilmiştir.

KATK 'nün harç karışımına ikamesinin, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin eğiminde ve dolayısıyla malzemenin elastisite modülünde bir azalmaya yol açabileceği görülebilir. Şekil 5.20'den görülebileceği gibi, daha düşük s/b oranı için, bağlayıcıya KATK eklenmesi, referans numunelere kıyasla elastisite modülü için daha düşük değerlerle sonuçlanmıştır.

Şekil 5.20'de açıkça görüldüğü gibi, numunelerin artan KATK miktarı ile tüm numunelerin elastisite modülü değeri tüm kür sürelerinde ve s/b oranlarında azalmıştır. S/b oranı 0.75 ve 28 günlük kür süresinde %0 olduğunda, numunelerin maksimum elastisite modülü değeri 2400 MPa olarak gözlenmiştir. Öte yandan numunelerin minimum elastisite modülü 200 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.20. 3,7 ve 28 günlük kür süresi için tüm numunelerin elastisite modülü sonuçları (farklı s/b oranlarında; sırasıyla 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50).



Şekil 5.21. Elastisite modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 5.21’de numunelerin, kür sürelerine bağlı olarak serbest basınç mukavemeti ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Görülebileceği gibi, en iyi uyum çizgisi etrafında bir miktar saçılma olmasına rağmen, bağlayıcı oranının etkisi daha az belirgindir. Bunun nedeni muhtemelen su/bağlayıcı oranının etkisidir. Çizelge 5.2 'te

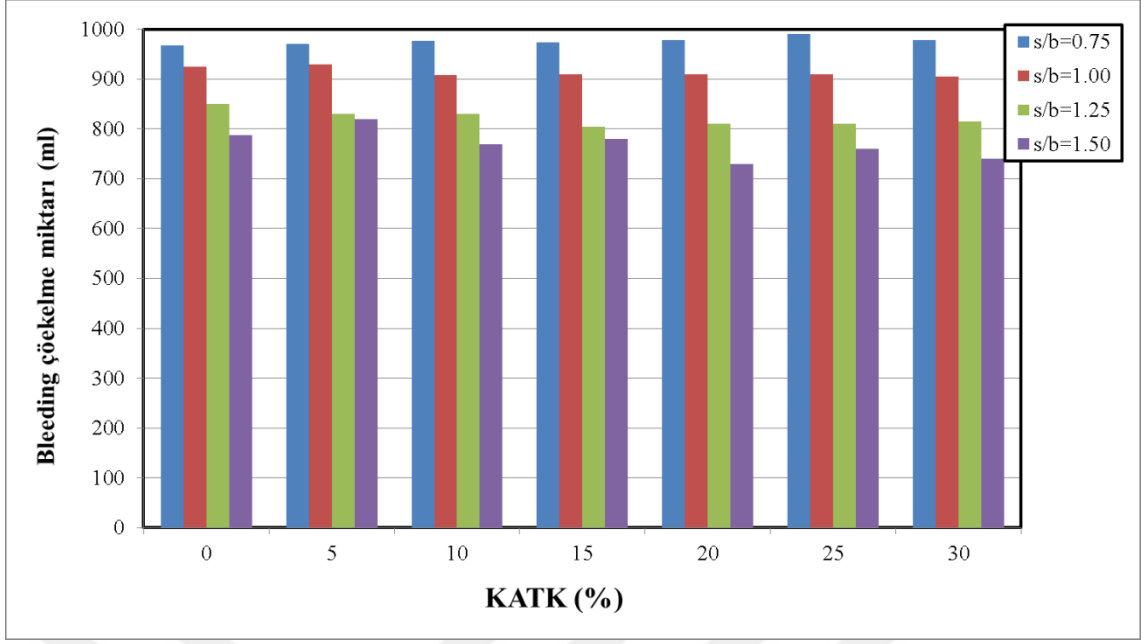
gösterildiği gibi, numunelerden alınan E/q_u oranının zemin-çimento karışımlarından karşılık gelen değerden düşük olmasıdır. Bu, jet grout yapılmış zeminin elastisite modülünün, s/ç oranının su içeriklerinde gerçekleştirilen testlerden elde edilen E/q_u oranları kullanılarak tahmin edilemediğini gösterir. Şekil 5.21'da açıkça görüldüğü gibi, bu çalışmada üretilen numunelerin tek eksenli serbest basınç dayanımının artmasıyla karışımların elastisite modülünün katlanarak arttığı görülmektedir. Karışımların serbest basınç dayanım değeri ile elastisite modülü arasında doğrudan bir ilişki vardır. Karışımların 3 günlük kür süresindeki E/q_u değerleri, s/b oranının artmasıyla artmıştır, ancak diğer kür sürelerinde için bu değer, özellikle 28 günlük kür süreleri için azalmıştır.

Çizelge 5.2. Su muhtevasına bağlı E/q_u oranları

s/b	E/q_u		
	3 GÜNLÜK	7 GÜNLÜK	28 GÜNLÜK
s/b=0.75	99	167	179
s/b=1.00	106	179	129
s/b=1.25	160	106	127
s/b=1.50	106	104	172

5.3.4 Çökelme testi (Kanama)

Tüm s/b oranlarındaki ve kür sürelerindeki tüm karışımların çökelme testi sonuçları Şekil 5.22'de açıkça görülmektedir. Test sonuçlarına göre, s/b oranındaki artış, karışımların çökmesini azaltmıştır. Öte yandan, karışımların çökelme değeri KATK ile bozulmayı azaltmıştır. Çimentoya kıyasla KATK 'nın daha yüksek yüzey alanına sahip olması nedeniyle, KATK çimentodan daha fazla su emebilir. Bu nedenle, karışımlardaki KATK miktarının arttırılması, karıştırıldıktan sonra zamana bağlı oluşan çökelmeyi azaltmaktadır.

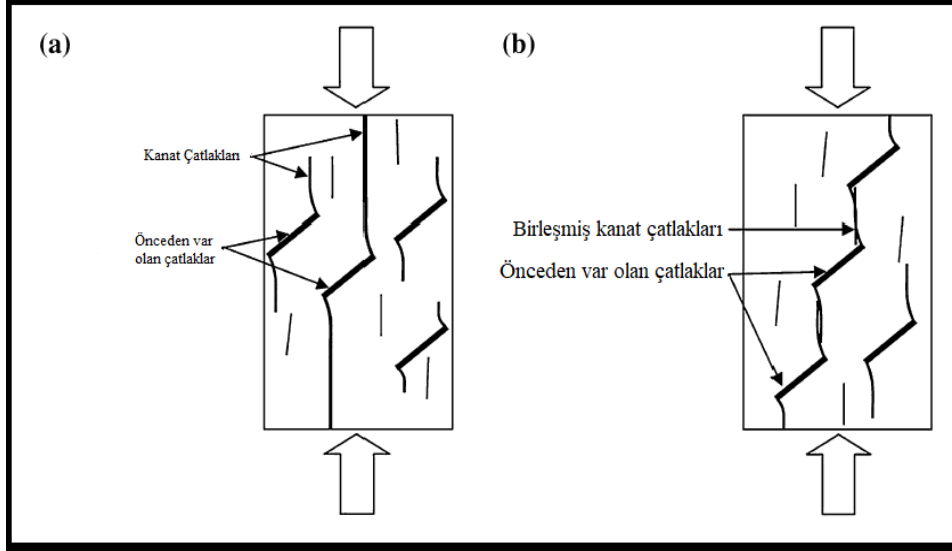


Şekil 5.22. Çökelme tüm s/b oranlarında farklı KATK yüzdesine göre değişimi

5.3.5 Tek eksenli serbest basınç dayanım testi sonucu oluşan kırılma modellerinin incelenmesi

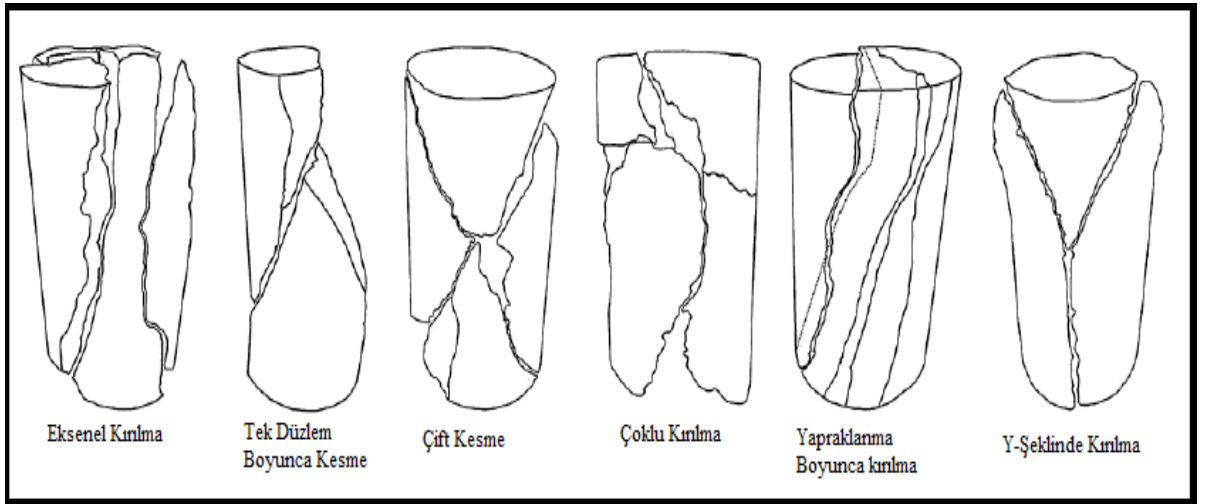
SBD testi altında çeşitli çimentolu malzemelerin numunelerin kırılmasını gözlemlemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (örn., Jaeger ve Cook, 1979; Santarelli ve Brown, 1989; Klein vd., 2001) ve bu araştırmaların bulguları büyük ölçüde birbiriyle uyumludur. Sıfır sınırlandırma basıncında (yani, SBD altında), çimentolu malzemeler genellikle eksenel yarılma ile göçme olur. SBD kapsamındaki kaya malzemelerinin kırılma modları, çeşitli mühendislik yapılarının güvenli ve ekonomik tasarımı için yararlı bilgiler sağlayabilir.

Bir numunenin mikro yapısı kanat çatlaklarının ilerlemesini engellemediğinde, eksenel kırılma modunda göçme olur (Şekil 5.23a). Bununla birlikte, mevcut mikro yapı nedeniyle kanat çatlaklarının maksimum ana gerilme boyunca yayılması kısıtlandığında, gerilme enerjisini serbest bırakmak için bitişik kanat çatlaklarının veya uygun şekilde yönlendirilmiş mikro çatlakların uçlarından üretilen kanat çatlaklarının birleşmesi gerçekleşir. Genellikle eksenel kırılma ile tasvir edilenden daha yüksek serbest basınç dayanımı ile sonuçlanan kesme kırılması oluşur (Şekil 5.23b).



Şekil 5.23. a) Kanat çatlağının tüm malzeme boyunca yayılmasına bağlı eksenel yarıлма. b) Bitişik kanat çatlaklarının veya yakın çevredeki kanat çatlaklarının birleşmesi nedeniyle kayma hatası (oklar sıkıştırma yönünü gösterir) (Çelik, 2016)

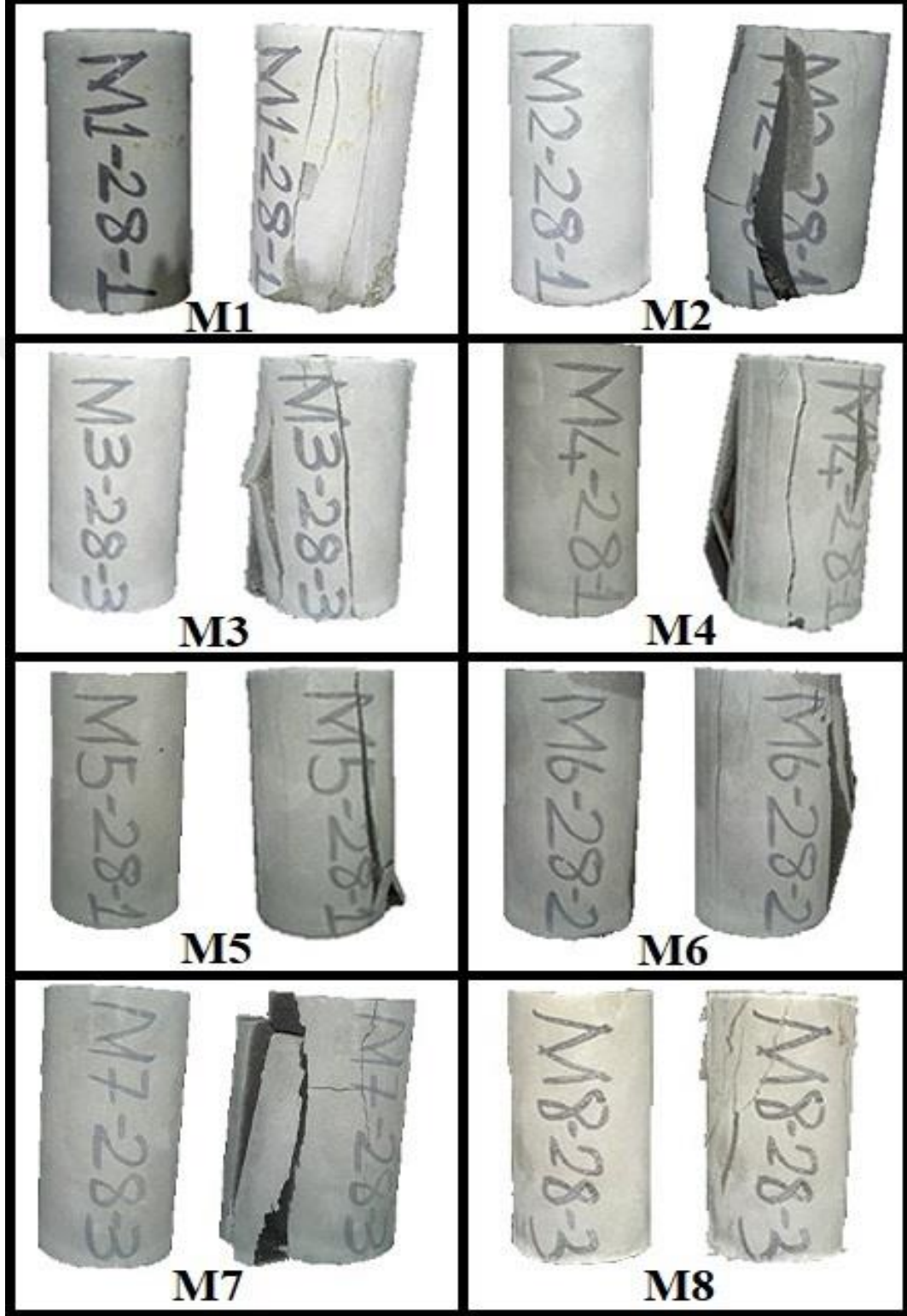
Şekil 5.22'de şematik olarak temsil edilen sıkıştırma yükleri altındaki malzemeler için (yani, eksenel yarıлма, tek bir düzlem boyunca kesme, çift kesme, yapraklanma boyunca çoklu kırılma ve Y-şeklinde kırılma) çeşitli kırılma davranışları vardır. Kırılma modlarının ayrıntılı analizi aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5.24. Tek eksenli yükleme altında farklı kırılma modlarının şematik gösterimi (Çelik, 2016)

Bu araştırmada toplam 252 adet numune serbest basınç dayanımı ile test edilmiştir. Numune örneklerinin çeşitli kırılma modelleri gözlenmiştir (Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.36). Test sonuçları, örneklerin çoğunun yapraklanma boyunca

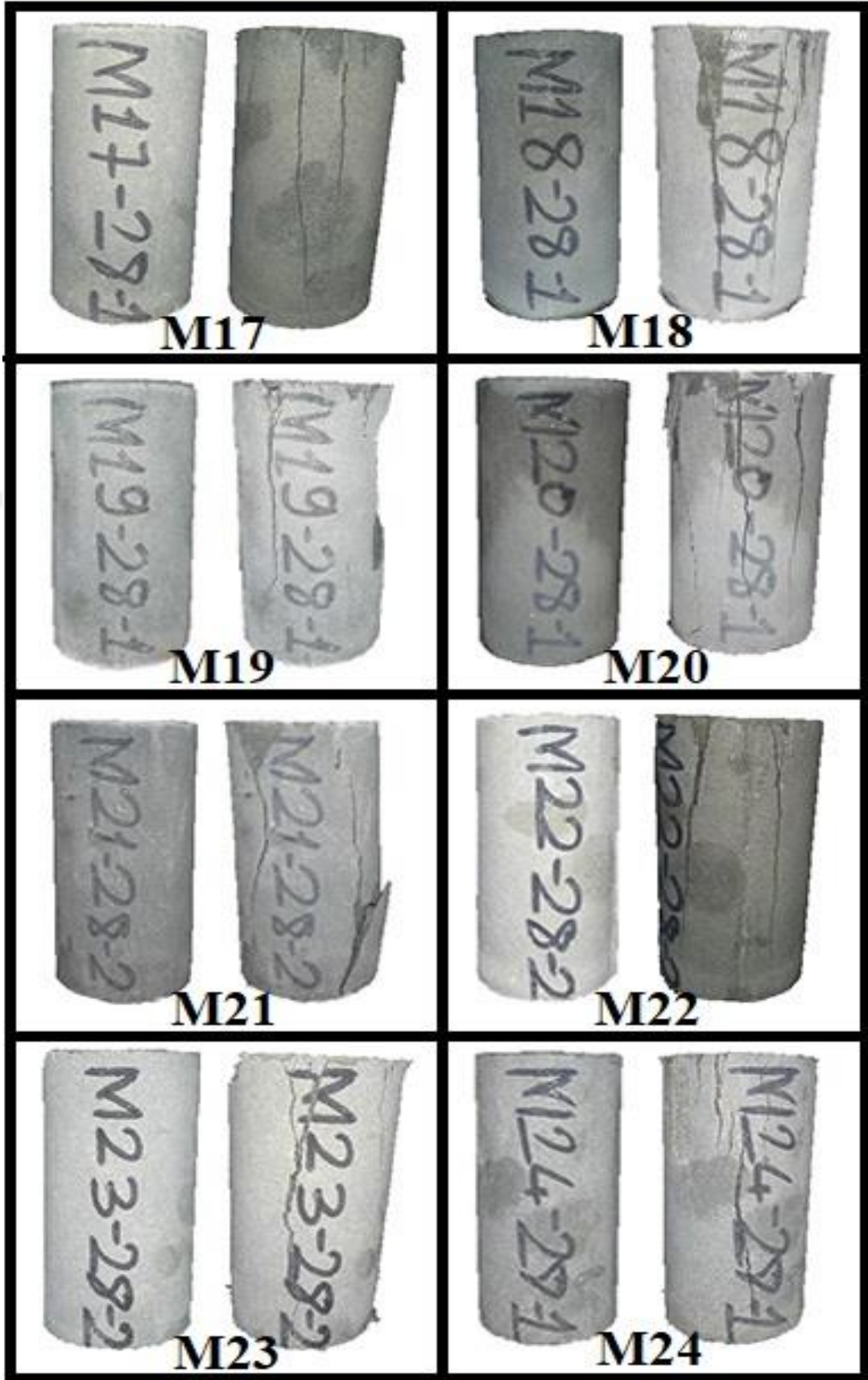
kırılma olduğunu göstermiştir (Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.36) Bu çalışmadaki tüm numune tiplerinde gözlenen benzer kırılma modları eksenel kırılma olarak gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.10. M1-M8 kırılma şekilleri



Fotoğraf 5.11. M9-M16 kırılma şekilleri



Fotoğraf 5.12. M17-M24 kırılma şekilleri



Fotoğraf 5.13. M125-M28 kırılma şekilleri

BÖLÜM VI

SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 SONUÇ

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar şu şekilde verilmiştir;

- Tüm işlenebilirlik testi sonuçları değerlendirildiğinde, harç karışımlarına KATK miktarı ilavesinin, karışımların işlenebilirlik özellikleri üzerinde çok fazla etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Bu şu şekilde açıklanabilir:
(1) Çimentonun Blaine yüzey alanları ($3750 \text{ cm}^2/\text{gr}$) ve KATK ($3240 \text{ cm}^2/\text{gr}$) neredeyse aynı değerlere sahiptir. Neredeyse aynı Blaine yüzey alanı nedeniyle, bağlayıcı yüzeylerin su emme miktarı çok fazla değişmez. Bu nedenle, karışımlardaki çimento yerine KATK ikame edilmiş olsa bile, Blaine yüzey alanları çok fazla değişmeyecektir. Bunun bir sonucu olarak, bu mineral katkı maddesinin (KATK) eklenmesi işlenebilirlik sonuçlarını önemli ölçüde etkilememiştir.
(2) PÇ ve KATK 'nün lazer saçılma tekniği ile çizilen dane boyutu dağılım eğrileri gözlemlendiğinde, çimento ve KATK 'nın dane boyutu derecelerinin hemen hemen aynı aralıkta olduğu kolayca görülebilir. Bağlayıcıların dane boyutu derecelerinin çimento esaslı harç karışımlarının işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılan hem çimento hem de KATK neredeyse aynı parçacık boyutu derecelerine sahip olduğundan, farklı oranlardaki karışımlarda çimento yerine KATK 'nün ikame edilmesi, işlenebilirlik testi sonuçlarını çok fazla etkilememiştir.
- KATK içeriklerinin ikamesi, daha yüksek s/b oranlarında (1.0 'dan büyük) harç karışımlarında arttıkça, görünür viskozite, harç karışımlarında çok fazla değişiklik göstermez. Bu, çimentonun Blaine yüzey alanları ($3750 \text{ cm}^2/\text{gr}$) ve KATK ($3240 \text{ cm}^2/\text{gr}$), akışkanlık özellikleriyle hemen hemen aynı değerlere ve hemen hemen aynı parçacık boyutu derecesine sahip olmalarından kaynaklanması olarak açıklanabilir.
- KATK içeriklerinin ve s/b oranlarının tüm ikamesinde hazırlanan harç karışımlarının reolojik parametrelerini değerlendirmek için çizilen eğrilerden dilatant (akma kalınlaşması) davranışı saptandı. Bu, bu tür harç karışımları için

daha yüksek kayma hızlarında daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. 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 kesme hızlarında daha fazla enerjiye ihtiyacı olabilir ve bu, görünür viskozite değerlerinde bir artışa neden olur.

- Sonuçlardan açıkça anlaşıldığı gibi akma gerilmesi değerleri, tüm s/b oranlarında KATK 'nın ikame edilmesinden çok fazla etkilenmemiştir. KATK ikamesi ile akma gerilimi üzerinde küçük etkiler vardır. Bununla birlikte, s/b oranı arttıkça, akma gerilmesi değerleri tüm karışımlar için düşüş eğilimi göstermiştir. Bu, daha yüksek s/b oranı nedeniyle harç karışımlarında su miktarı arttıkça, akışkanlığın arttığını ve harç karışımlarının su gibi Newton akışkanları gibi davranmaya başladığını gösterir.
- Su/bağlayıcı oranı (s/b), permeasyon enjeksiyonunun enjeksiyon basıncı üzerinde baskın bir etkiye sahip olan çok kritik bir parametredir. S/b oranı arttıkça, her iki akış modeli için akışkanlığın artması nedeniyle enjeksiyon basıncı önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle enjeksiyon basıncındaki bu büyük düşüş, s/b oranı 1.0 değerini aştıktan sonra gözlenmiştir. Öte yandan, s/b oranı birden fazla olduğunda enjeksiyon basınçları hafifçe düşmüştür. KATK 'nın harç karışımlarına ikamesinin, küresel akış modeli için permeasyon enjeksiyon harcının enjeksiyon basıncı üzerinde çok fazla etkisi yoktur.
- Tüm test sonuçları KATK ile birleştirilmiş çimento esaslı derzlerin reolojik parametrelerinin (özellikle plastik viskozite) ve işlenebilirlik özelliklerinin enjeksiyon basıncı gibi geçirgen derz dolgu tasarım parametrelerinin belirlenmesinde çok önemli olduğunu göstermiştir. Harç karışımlarına KATK ikamesi beklenen iyileşmeyi gösteremedi. Tüm test sonuçlarına göre, KATK ikamesinin karışımların reolojik ve akışkanlık özellikleri üzerinde çok fazla etkisi yoktur. Bununla birlikte, karışımlara yapılan bu atık mineral katkı maddesi mevcut durumu aşağı çekmemiştir. Bu, saha uygulamalarında permeasyon enjeksiyon yöntemi için mineral katkı maddesi olarak KATK kullanılarak çimento üretiminin ve kullanımının azaltılabileceği düşünülebilir. Bu durum, çevresel açıdan mühendislik uygulamalarına katkıda bulunabilir.

- Tüm farklı zemin beton numuneleri için ölçülen ortalama basınç dayanımı için mutlak değerler (aralık olarak 5000 kPa ile 12,8 MPa arasında), literatürde bulunan benzer çalışmalarda (1 ile 15 MPa arasında) sadece zemin bazlı yapı yapı elemanlarında değil, aynı zamanda enjeksiyon uygulamalarında da bulunan benzer çalışmalarda bildirilenlere benzerdi.
- Çalışmadan anlaşılabacağı üzere, daha düşük s/b oranı için, bağlayıcıya KATK eklenmesi, daha yüksek s/b oranlarına kıyasla daha yüksek SBD değerlere neden olmuştur. S/b oranı arttığında, numunelerin SBD giderek azalır. Beklendiği gibi, s/b oranı ne kadar yüksek olursa, tüm kür sürelerinde zemin beton numunelerinin hesaplanan ortalama basınç dayanımı için azalma o kadar yüksektir.
- Bağlayıcıya KATK eklenmesi, tüm kür sürelerinde numunelerinin hesaplanan ortalama basınç dayanımı için referans numunelere (M1, M8, M15 ve M22) kıyasla daha düşük değerlerle sonuçlanmıştır.
- Numune örneklerinde maksimum SBD değeri 12,8 MPa, s/b= 0.75 ve 28 günlük kür sürelerinde KATK oranı %0 iken gözlenmiştir. Öte yandan numunelerin minimum SBD 5000 kPa olarak belirlenmiştir.
- Bu çalışmada elde edilen numunelerin basınç dayanımının, artan kür süresi ile önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. Numunelerin basınç dayanımındaki artış, kür süresinin başlarında hızlıdır ve zamanla yavaşlar.
- 28 günlük kür süresinin tamamı için tüm SBD değerleri 1 MPa'dan büyüktür. Geoteknik uygulamalarda sorunlu zeminlerin stabilizasyonu için 1 MPa basınç dayanımı değerinin daha yüksek bir değer olarak varsayılabilmesi nedeniyle, KATK 'nın problemli kumlu zeminlerin iyileştirilmesi için katkı maddesi olarak kullanılabileceği açıkça görülmektedir.
- Bir kum-çimento karışımının basınç dayanımı genellikle artan çimento içeriği ile belirli bir yüzdeye kadar artar, bundan sonra dayanımdaki artış oranı azalır. Numunelerin SBD tipik olarak doğal zeminin SBD 'nın 10 ila 50 katı arasında değişmektedir.
- Test sonuçları, çimento içeriğinin, tüm s/b oranlarında ve sertleşme süresinde artan basınç mukavemeti nedeniyle önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Artan aralıklar, kür süresi ve s/b oranları için aynıdır.

- Bu teze göre, harç karışımlarının s/ç oranındaki artış, karışımlardan önceki bölümlerde belirtilen literatürle aynı basınç mukavemetini önemli ölçüde azaltmıştır.
- Su/çimento oranı 0.75'ten 1.50 'ye yükselirken, 28 günlük kür sonunda beton örneklerinin SBD'ı azalmış ve yüksek s/ç oranlarında SBD 'daki azalma aralığı hafifçe değişmeye başlamıştır. Bu, yüksek s/ç oranlarının harç karışımlarının basınç dayanımı üzerinde çok az etkisi olduğu anlamına gelir.
- Bu çalışmada,%0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 KATK ile çimento ikameleri içeren farklı s/b ağırlıkça (0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50) oranlarında 3,7 ve 28 günlük numunelerinin elastisite modülünün sonuçları incelemiştir.
- KATK 'nün harç karışımına eklenmesi, gerilme-deformasyon eğrilerinin eğiminde ve dolayısıyla malzemenin elastisite modülünde bir azalmaya yol açabilir. Çalışmadan anlaşılabileceği gibi, daha düşük s/b oranı için bağlayıcıya KATK ilavesi, referans örneklere kıyasla elastisite modülü için daha yüksek değerlerle sonuçlanmıştır. S/b oranına, kür süresine ve KATK miktarına göre elastisite modülü değişme aralığı, numunesinin SBD davranışına benzer.
- En düşük s/b ile karakterize edilen numuneler için gözlenen yüksek elastisite modülü değerleri, maksimum elastisite modülü (2400 MPa) 28 günlük kür süresinde M1 numunesi tarafından verilirken, en düşük olanı (200 MPa) 3 günlük kür süresinde M28 numunesi ile verilmiştir.
- Numunelerin artan KATK miktarı ile tüm numunelerin elastisite modülü değeri tüm kür sürelerinde ve s/b oranlarında azalmıştır. Farklı kür sürelerinde yapılan testlerden elde edilen elastisite modülü değerleri, özellikle s/b= 1.50 olmak üzere tüm s/b oranları için KATK 'nün ikame artışına bağlı olarak birbirine yaklaşmaktadır.
- Bu çalışmada elde edilen numunelerin elastisite modülünün, artan kür süresi ile önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. Numunelerin basınç dayanımındaki artış, kür süresinde döneminin başlarında hızlıdır ve zamanla yavaşlar.
- S/b oranı 0.75 'den 1.50 'ye artarken, tüm kür sürelerinde numune örneklerinin elastisite modülü katlanarak azalmış ve yüksek s/b oranlarında elastisite modülündeki azalma aralığı yavaşça değişmeye başlamıştır. Bu, yüksek s/b oranlarının numunelerin elastisite modülü üzerinde çok az etkisi olduğu anlamına gelir.

- Karışımların elastisite modülü, bu çalışmada öngörülen numunelerin serbest basınç dayanımının artmasıyla katlanarak artmaktadır. Karışımların serbest basınç dayanımı değeri ile elastisite modülü arasında doğrudan bir ilişki vardır.
- Test sonuçlarına göre, s/b oranının artması, karışımların çökme oranını artırmaktadır. Diğer taraftan karışımların çökme (bleeding) değeri KATK ile ilave edilmesiyle çok az miktarda azaldığı görülmüştür. Bu nedenle karışımlarda KATK miktarının artması, zamana göre karıştırma sonrası oluşan çökelmeyi azaltır.
- Test sonuçları, çoğu numunenin eksenel kırılma boyunca olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada tüm numune yüzeylerinde gözlemlenen benzer göçme modları yapraklanma boyunca kırılma olarak gözlemlenmiştir.

6.2 ÖNERİLER

Test sonuçları, KATK 'nün çimento esaslı harcı ikame etmek için puzolanik katkı maddesi olarak kullanılmasının önemli bir iş olduğunu göstermektedir. Bu deneysel çalışma, uygulama alanı çalışmasına bağlı olarak genişletilebilir. Herhangi bir geoteknik çalışmada, farklı s/b oranlarında KATK ile birleşen harçlarla gerçek jet grout kolonları üretilebilir. Ardından, jet grout kolonlarından numuneler alınabilir. Ayrıca mekanik özellikleri, yapılan laboratuvar testi ile karşılaştırılarak incelenebilir. Jet grout kolonlarının basınç dayanımı kapasitesi, sahada statik yük testi kullanılarak ölçülebilir. Ayrıca, farklı s/b oranlarında KATK ile karıştırılan harç karışımlarının reolojik özellikleri (özellikle viskozite ve işlenebilirlik) gözlemlenebilir ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

Aitcin, P. C., Ballivy, G. and Parizeau, R., “The use of condensed silica fume in grouts”, ***Special Publication***, 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.

Andromalos, K. B., and Gazaway, H. N. “Jet grouting to construct a soilcrete wall using a twin stem system”, ***ASCE Geotechnical and Construction Divisions Special Conference***, 1989.

Argiz, C., Moragues, A., and Menéndez, E., “Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments”, ***Journal of Cleaner Production***, 170, 25-33, 2018.

Asokan, P., Saxena, M., and Asolekar, S. R., “Coal combustion residues—Environmental implications and recycling potentials”, ***Resources, Conservation and Recycling***, 43(3), 239-262, 2005.

ASTM. American Society for Testing and Materials, Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures. D5102-09. West Conshohocken, PA, 2009b.

Bajare, D., Bumanis, G., and Upeniece, L., “Coal Combustion Bottom Ash as Microfiller with Pozzolanic Properties for Traditional Concrete”, ***Procedia Engineering***, 57, 149-158, 2013.

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

Barnes, H. A., “A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: Its cause, character, and cure”, ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, 56(3), 221-251, 1995.

Bell, F., Engineering Treatment of Soils, ***Department of Geology and Applied Geology, University of Natal, Durban***, 1993.

Bellendir, E. N., Aleksandrov, A. V., Zertsalov, M. G., and Simutin, A. N., “Building and Structure Protection and Leveling Using Compensation Grouting Technology”, ***Power Technology and Engineering***, 2(50), 142-146, 2016.

Bennett, C. L., Fixsen, D. J., Hinshaw, G., Mather, J. C., Moseley, S. H., Wright, E. L., Eplee, J., Gales, J., Hewagama, T., Isaacman, R. B., Shafer, R. A., and Turpie, K., “Morphology of the Interstellar Cooling Lines Detected by COBE”, ***The Astrophysical Journal***, 434, 587, 1994.

Bilir, T., “Effects of non-ground slag and bottom ash as fine aggregate on concrete permeability properties”, ***Construction and Building Materials***, 26(1), 730-734, 2012.

Bosoaga, A., Masek, O., and Oakey, J. E., “CO₂ Capture Technologies for Cement Industry”, ***Energy Procedia***, 1(1), 133-140, 2009.

Bustamante, M., “Grouting: a method improving the bearing capacity of deep foundation”, ***Improvement Of Ground. European Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering***, Helsinki, Rotterdam, vol. 1; pp. 131-134, 1983.

Celik, F., “An investigation of rheological and mechanical properties of cement base grout mixed with rice husk ash (RHA)”, “***University of Gaziantep Graduate School of Natural and Applied Sciences***”, 2016.

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

Celik, 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.

Chang, M., Mao, T., and Huang, R., “A study on the improvements of geotechnical properties of in-situ soils by grouting”, *Geomechanics and engineering*, 2016.

Cheriaf, M., Rocha, J. C., and Péra, J., “Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash”, *Cement and Concrete Research*, 29(9), 1387-1391, 1999.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U., “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers”, *Waste Management*, 29(2), 539-543, 2009.

Chotetanorm, C., Chindaprasirt, P., Sata, V., Rukzon, S., and Sathonsaowaphak, A., “High-Calcium Bottom Ash Geopolymer: Sorptivity, Pore Size, and Resistance to Sodium Sulfate Attack”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), 105-111, 2013.

Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., “Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete” *Construction and Building Materials*, 23(11), 3352-3358, 2009.

Clarke, W. J., Boyd, M. D., and Helal, M., “Ultrafine cement tests and dam test grouting”, *In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics* (pp. 626-638). ASCE, 1992.

Consoli, N. C., Rosa, D. A., Cruz, R. C., and Rosa, A. D., “Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil”, *Engineering Geology*, 122(3), 328-333, 2011.

Coulter, S., and Martin, C. D., “Single fluid jet-grout strength and deformation properties” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 690-695, 2006.

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

Cyr, 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(9), 1477-1483, 2000.

De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R., and Bruce, D. A., “Fundamental observations on cement based grouts (2): Microfine cements and the Cemill process”, In ***Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*** (pp. 486-499). ASCE, 1992.

Deere, D. U., “Cement-bentonite grouting for dams” In ***Grouting in Geotechnical Engineering*** (pp. 279-300). ASCE, February, 1982.

Deere, D. U., and Lombardi, G., Grout slurries thick or thin?. ***In Issues in Dam Grouting*** (pp. 156-164). ASCE, April, 1985.

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

Durgunoğlu H. T., “Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı”, ***Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi***, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 39-52, 2004.

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***, Nisan 2006.

Dwikojuliardi, R., “Malaysia and construction industry”, ***Malaysia construction research journal***, 2(1), 22-45, 2015.

Eisenbud, M., and Petrow, H. G., “Radioactivity in the Atmospheric Effluents of Power Plants That Use Fossil Fuels”, ***Science***, 144(3616), 288-289, 1964.

Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T. Y., “Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri”, *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 2. Oturum, s.264-275, Nisan, 2007.

Essler, R. D., Drooff, E. R. and Falk, E., Compensation grouting: concept, theory and practice., *In Advances in grouting and ground modification*, (pp. 1-15), 2000.

Fatehi, H., Abtahi, S. M., Hashemolhosseini, H., and Hejazi, S. M., “A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening”, *Construction and Building Materials*, 167, 813-821, 2018.

Ferraris, C. F., Olla, K. H., and Hill, R., “The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”, *Cement and Concrete Research*, 31(2), 245-255, 2001.

Gallavresi, F., “Grouting improvement of foundation soils”, *In Grouting, soil improvement and geosynthetics* (pp. 1-38). ASCE, February, 1992.

Gouvenot, D., “Injection des sols et législation relatives aux nappes phréatiques”, *In Collectivités territoriales et utilisation du sous-sol. Journées d'études internationales* (pp. 455-460), 1988.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., ve Mordoğan, H., “Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları”, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir*, 419-423, 2005.

Güler, İ., “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2005.

Güllü, H., “On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting”, *Construction and Building Materials*, 93, 891-910, 2015.

Güllü, H., “A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns”, *Soils and Foundations*, 57(3), 384-396, 2017.

Habeeb, G., and Fayyadh, M., “Rice Husk Ash Concrete: The Effect of RHA Average Particle Size on Mechanical Properties and Drying Shrinkage”, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3, 1616-1622, 2009.

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

Hassan, M., Engineering characteristics of cement stabilized soft finnish clay a laboratory study, *Helsinki University of Technology Faculty of Engineering and Architecture Department of Civil and Environmental Engineering*, Helsinki 72, 2009.

Hausmann, M. R., Engineering principles of ground modification, *Mc Graw Hill Publishing Company*, New York, 1990.

Hayward, D., and Baker D. P., “Serving Jesus with Integrity: Ethics and Accountability in Mission” *William Carey Library Publishers*, 2010.

Helal, M., and Krizek, R. J., “Preferred orientation of pore structure in cement-grouted sand”, *Geotechnical Special Publication*, 1(30), 526-540, 1992.

Hoffman, R. L., “Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions”, *Journal of Rheology*, 42(1), 111-123, 1998.

Hu, Y., Paternò, G. M., Wang, X.-Y., Wang, X.-C., Guizzardi, M., Chen, Q., Schollmeyer, D., Cao, X.-Y., Cerullo, G., Scotognella, F., Müllen, K., and Narita, A., “ π -Extended Pyrene-Fused Double, Carbohelicene as a Chiral Polycyclic Aromatic Hydrocarbon” *Journal of the American Chemical Society*, 141(32), 12797-12803, 2019.

Ichihashi, Y., Shibazaki, M., Kubo, H., Iji, M., and Mori, A., “Jet grouting in airport construction”, *In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics* (pp. 182-193). ASCE, 1992.

Idiman, F., and Okyay, Y., “Postimperative negative variation in psychiatric disorders”, ***In Neurophysiological Correlates of Relaxation and Psychopatholog***, (Vol. 16, pp. 191-198), 1987.

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.

Kauschinger, L. J., Hankour, R., and Perry, E. B., “Methods to estimate composition of jet grout bodies”, ***In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics***, (pp. 194-205). ASCE, 1992.

Kawasaki, T., “Deep mixing method using cement hardening agent”, ***Proc. of 10th Int. Conf. on SMFE***, 721-724, 1981.

Keller, The soilcrete- jet grouting process, s. 6-11, [http:// www.kellerasia.com.tr](http://www.kellerasia.com.tr), 2014.

Khayat, K. H., and Yahia, A., “Simple Field Tests to Characterize Fluidity and Washout Resistance of Structural Cement Grout”, ***Cement, Concrete and Aggregates***, 20(1), 145-156, 1998.

Kim, H. K., and Lee, H. K., “Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete”, ***Construction and Building Materials***, 25(2), 1115-1122, 2011.

Klein, E., Baud, P., Reuschlé, T., and Wong, T., “Mechanical behaviour and failure mode of bentheim sandstone under triaxial compression”, ***Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy***, 26(1), 21-25, 2001.

Kolovos, K. G., Asteris, P. G., Cotsovos, D. M., Badogiannis, E., and Tsivilis, S., “Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin”, ***Construction and Building Materials***, 47, 1026-1036, 2013.

Kutzner, C., Grouting of rock and soil, ***Consulting Geotechnical Engineer, Technical University Darmstadt***, Germany 6, 1996.

Küsin C., Jet grout yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, s. 54-57, 2009.

Lalit, B. Y., Ramachandran, T. V., and Mishra, U. C., “Radiation Exposures Due to Coal-Fired Power Stations in India”, **Radiation Protection Dosimetry**, 15(3), 197-202, 1986.

Lee, F.-H., Lee, Y., Chew, S.-H., and Yong, K.-Y., “Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 131(2), 178-186, 2005.

Littlejohn, G. S., “Design of cement based grouts”, **In Grouting in geotechnical engineering** (pp. 35-48). ASCE, February, 1982.

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

Lorenzo, G. A., and Bergado, D. T., “Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in Deep Mixing”, **Journal of Materials in Civil Engineering**, 18(2), 161-174, 2006.

Lowe, J., and Sandford, T. C., “Special Grouting at Tarbela Dam Project”, **In Grouting in Geotechnical Engineering** (pp. 152-171). ASCE., 1982.

Mikkelsen, P. E., “Cement-bentonite grout backfill for borehole instruments”, **Geotechnical Instrumentation**, 20(4), 38-42, 2002.

Mishra, U. C., “Environmental impact of coal industry and thermal power plants in India”, **Journal of Environmental Radioactivity**, 72(1), 35-40, 2004.

Mitchell, J. K., “Soil improvement-state of the art report”, **In Proc., 11th Int. Conf. on SMFE** (Vol. 4, pp. 509-565), 1981.

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

Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T. S., “Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content”, ***Soils and Foundations***, 41(5), 33-45, 2001.

Morel, J.-C., Pkla, A., and Walker, P., “Compressive strength testing of compressed earth blocks”, ***Construction and Building Materials***, 21(2), 303-309, 2007.

Moseley, M.P., Ground improvement, ***Blackie Academic and Professional***, Florida, 1993.

Nikbakhtan, B., and Osanloo, M., “Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations”, ***International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences***, 46(3), 498-505, 2009.

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

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., “Fundamentals of rock mechanics”, ***3rd edn. Chapman and Hall, London***, 1979.

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 volume of industrial by-products”, ***Construction and Building Materials***, 24(8), 1412-1417, 2010.

Park, C. K., Noh, M. H., and Park, T. H., “Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures”, ***Cement and Concrete Research***, 35(5), 842-849, 2005.

Pavlović, M. N., Cotsovos, D. M., Dedić, M. M., and Savidu, A., “Reinforced jet-grouted piles. Part 1: Analysis and design”, ***Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings***, 163(5), 299-308, 2010a.

Pavlović, M. N., Cotsovos, D. M., Dedić, M. M., and Savidu, A., “Reinforced jet-grouted piles. Part 2: Materials and tolerances”, ***Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings***, 163(5), 309-315, 2010b.

Popovics, S., *Strength and Related Properties of Concrete: A Quantitative Approach*, **Drexel University**, John Wiley and Sons, Philadelphia, 1998.

Porbaha, A., Shibuya, S., and Kishida, T., “State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization”, ***Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement***, 4(3), 91-110, 2000.

Pyo, S., and Kim, H.-K., “Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder”, ***Construction and Building Materials***, **131**, 459-466, 2017.

Rawlings, C. G., Hellawell, E. E., and Kilkenny, W. M., “Grouting for ground engineering, CIRIA C514”, ***Construction Industry Research and Information Association***, London 2000.

Raffle, J. F., and Greenwood, D. A., “The relation between the rheological characteristics of grouts and their capacity to permeate soil”, ***In Proceedings of the 5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering***, Paris (Vol. 2, p. 789), July, 1961.

Rosquoët, F., Alexis, A., Khelidj, A., and Phelipot, A., “Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation”, ***Cement and Concrete Research***, 33(5), 713-722, 2003.

Ruggiero, J. G., “Low Slump Compactive Tail Shield Grouting in Soft Ground”, Shield Driven Tunnels, ***Special Publication***, 83, 103-114, 1984.

Saak, A. W., Jennings, H. M., and Shah, S. P., “The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste”, ***Cement and Concrete Research***, 31(2), 205-212, 2001.

Santarelli, F. J., and Brown, E. T., “Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 26(5), 401-413, 1989.

Schwarz, L. G., Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts, *Northwestern University*, 1998.

Schwarz, Lois G., and Krizek, R. J., “Effects of mixing on rheological properties of microfine cement grout”, *Geotechnical Special Publication*, 1(30), 512-525, 1992.

Sha, F., Li, S., Liu, R., Li, Z., and Zhang, Q., “Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass”, *Construction and Building Materials*, 161, 282-291, 2018.

Singh, M., and Siddique, R., “Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete”, *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 20-32, 2013.

Singh, M., and Siddique, R., “Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand”, *Construction and Building Materials*, 68, 39-48, 2014.

Singh, M., and Siddique, R., “Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete” *Journal of Cleaner Production*, 112, 620-630, 2016.

Sio-Keong, K., “Properties of cement based permeation grout used in ground engineering”, *Department Of Civil Engineering*, 162, 2005.

Shroff, A. V., Joshi, N. H., and Shah, D. L., “Rheological properties of micro fine cement dust grouts”, *Grouting and Deep Mixing Balkema*, 1996.

Sonebi, M., Lachemi, M., and Hossain, K. M. A., “Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture”, *Construction and Building Materials*, 38, 126-138, 2013.

Sonebi, M., “Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash”, ***Cement and Concrete Research***, 36(9), 1609-1618, 2006.

Şahmaran, M., Özkan, N., Keskin, S. B., Uzal, B., Yaman, İ. Ö., and Erdem, T. K., “Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts”, ***Cement and Concrete Research***, 38(7), 930-937, 2008.

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

Togrol, E., and Cinicioglu, S. F., Stage construction of embankments on soft soils, ***In Symposium on developments in geotechnical engineering*** (pp. 401-407), 1994.

Topçu, İ. B. and Bilir, T., “Effect of Bottom Ash as Fine Aggregate on Shrinkage Cracking of Mortars”, ***ACI Materials Journal***, January-February, title no:107-M08, s. 48-56, 2010.

Tunçdemir, F., “Temel zeminlerinin enjeksiyon tekniğiyle iyileştirilmesi”, ***Türkiye Mühendislik Haberleri***, 430, 59-64, 2004.

Uddin, K., Balasubramaniam, A. S., and Bergado, D. T., “Effect of Welan Gum-High-Range Water Reducer Combinations on Rheology of Cement Grout”, ***ACI Materials Journal***, 94(5), 1997.

Vipulanandan, C. and Shenoy, S. “Properties of cement grouts and grouted sands with additives”, ***In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics***, pp. 500-511, 1992.

Vossoughi, S., “Flow of non-newtonian fluids in porous media”, ***In Rheology Series*** (Vol. 8, pp. 1183-1235). Elsevier, 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 and Sons**, Hoboken, New Jersey in Canada, 2004.

Weaver, K. D., Evans, J. C., and Pancoski, S. E., “Grout Testing for A Hazardous Waste Application”, **Concrete International**, 12(7), 45-47, 1990.

Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., and Bruce, D. A., Ground Control and Improvement, **John Wiley and Sons**, Canada, 1994.

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

Yaşar, B. A., Düşük dayanımlı betonlarda elastisite modülünün bulunması, Yüksek Lisans Tezi, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kahramanmaraş, s.17-18, 2019.

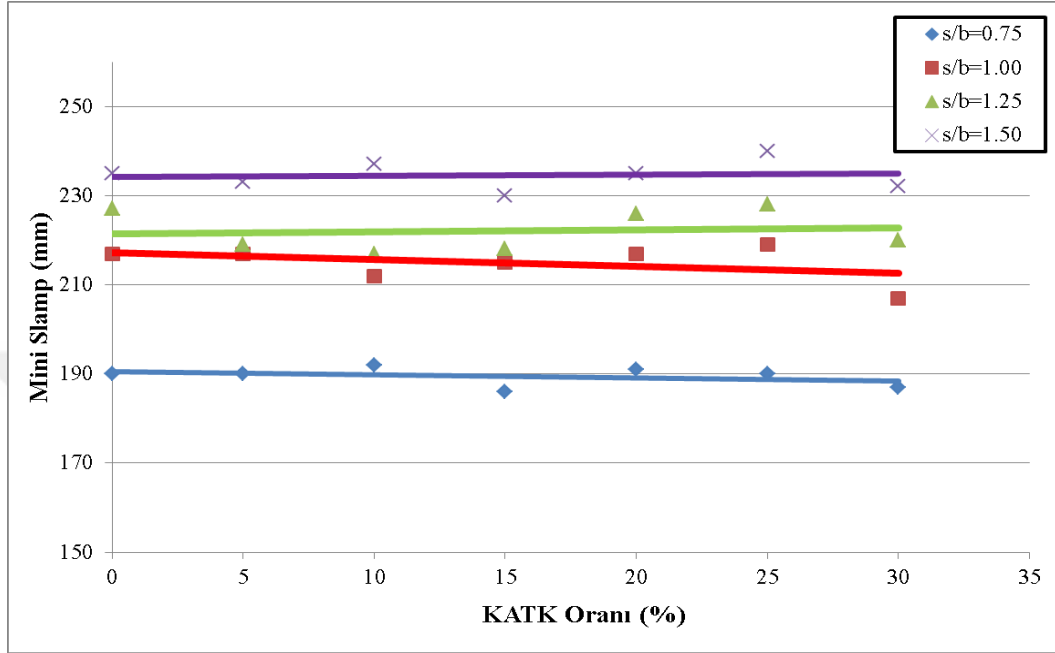
Yin, J.-H., and Zhou, W.-H., “Influence of Grouting Pressure and Overburden Stress on the Interface Resistance of a Soil Nail”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 135(9), 1198-1208, 2009.

Yoon, S., Balunaini, U., Yildirim, I. Z., Prezzi, M., and Siddiki, N. Z., “Construction of an Embankment with a Fly and Bottom Ash Mixture: Field Performance Study”, **Journal of Materials in Civil Engineering**, 21(6), 271-278, 2009.

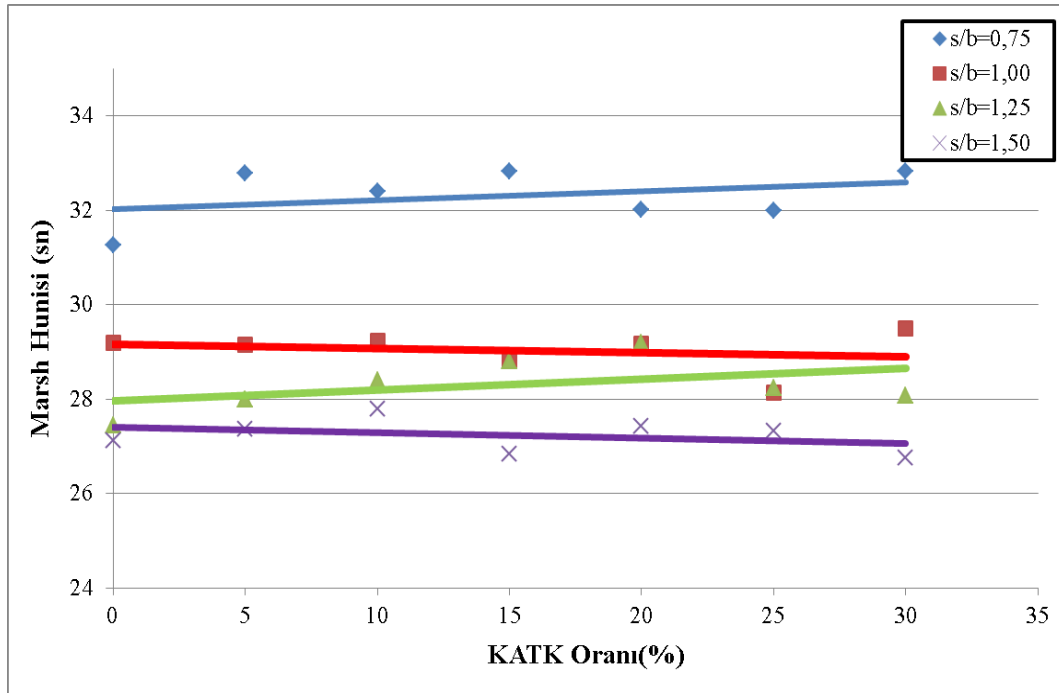
Zhang, J., Campbell, R. E., Ting, A. Y., and Tsien, R. Y., “Creating new fluorescent probes for cell biology”, **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, 3(12), 906-918, 2002.

EK A

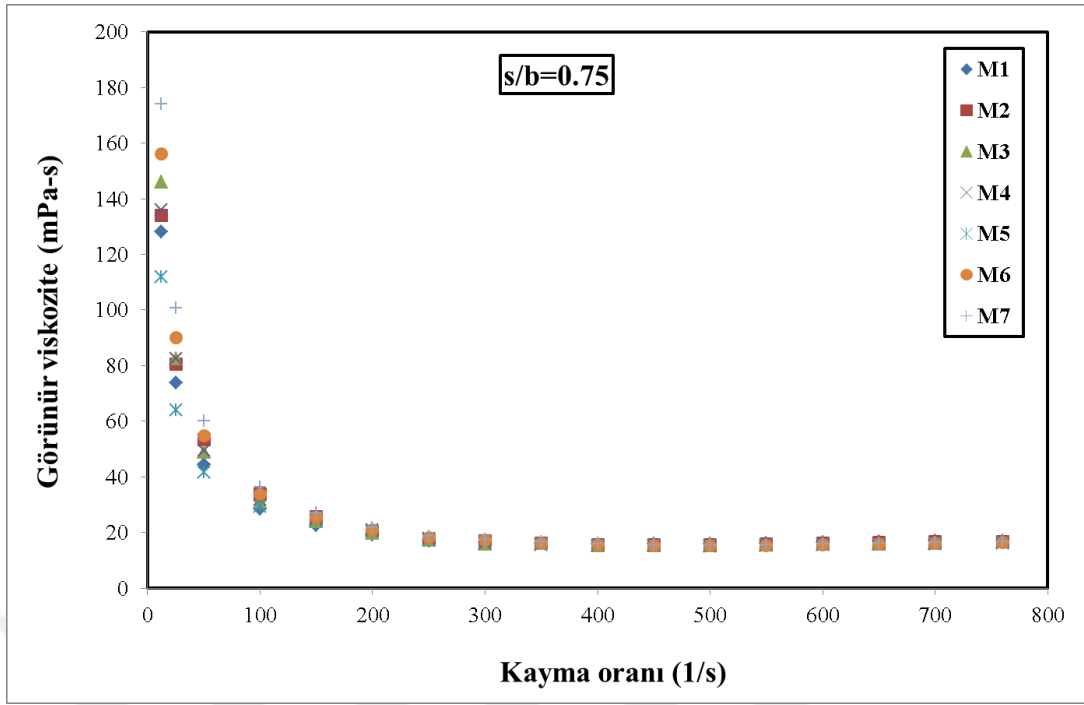
MİNERAL OLARAK KATK KATKILI ÇİMENTO ESASLI KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ



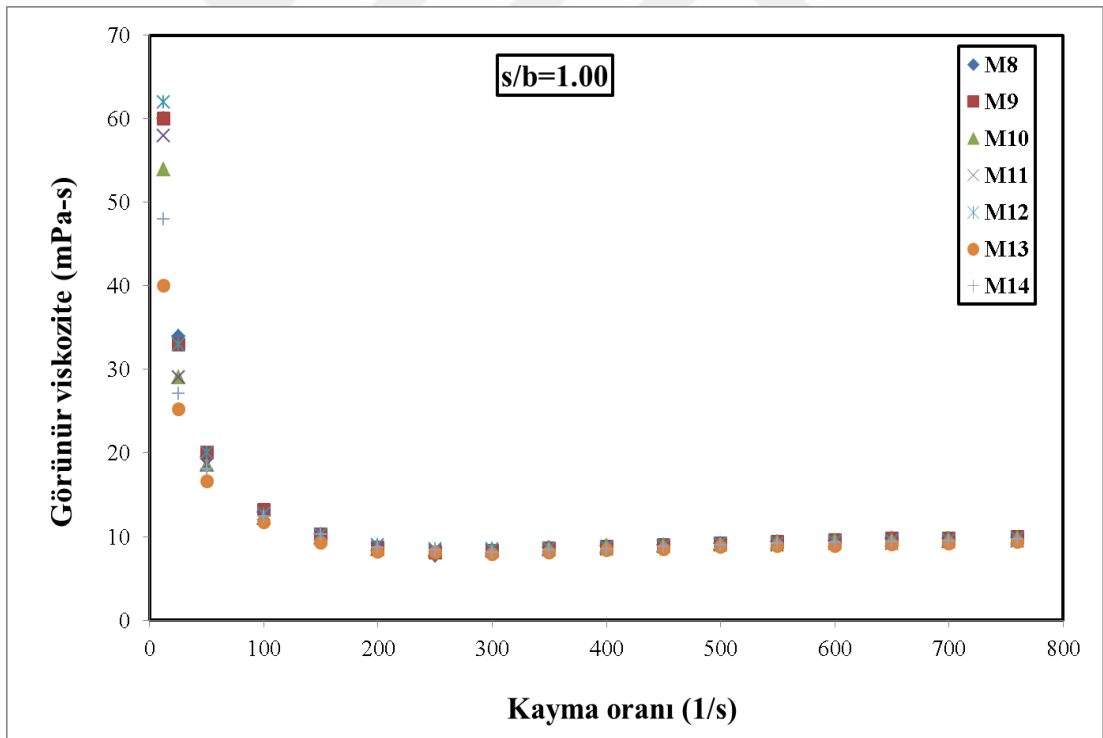
Şekil A.1. Tüm s/b ve KATK oranlarına göre mini slamp yayılma çapları



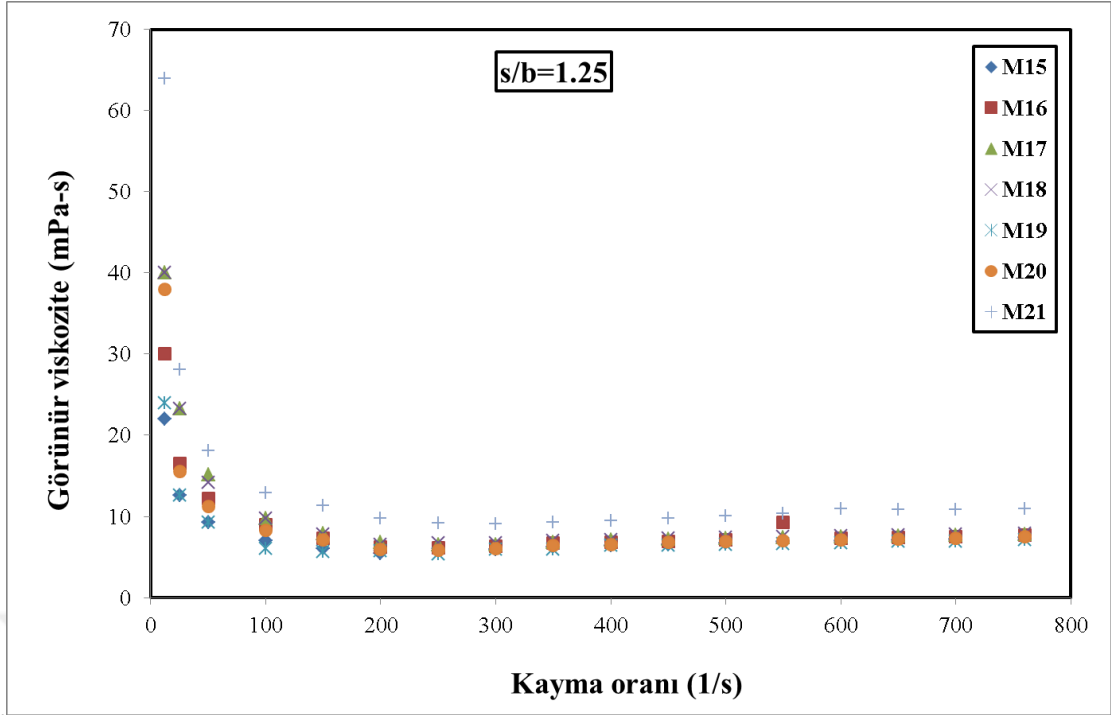
Şekil A.2. Tüm s/b ve KATK oranlarına göre marsh hunisi akma süreleri



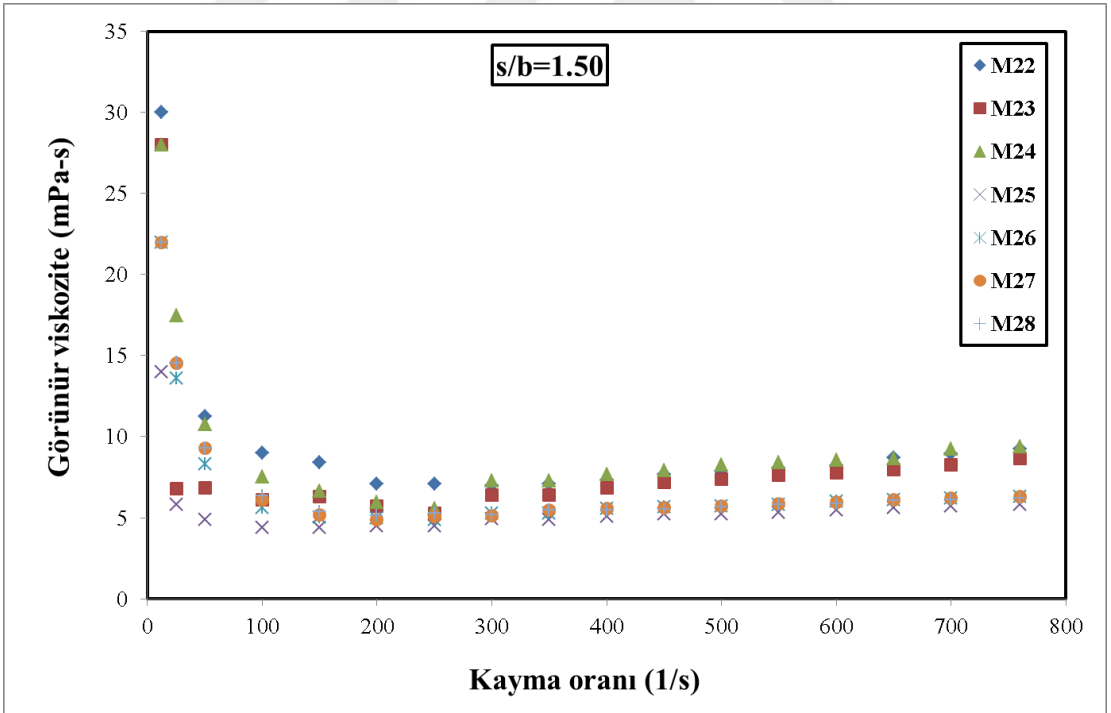
Şekil A.3. S/b=0.75 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi



Şekil A.4. S/b=1.00 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi



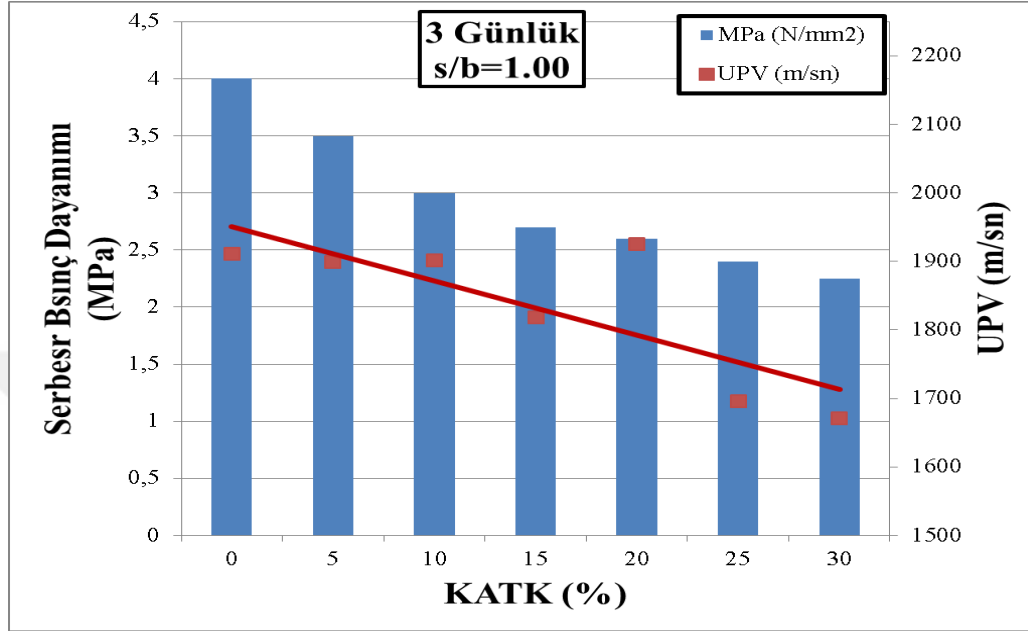
Şekil A.5. S/b=1.25 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi



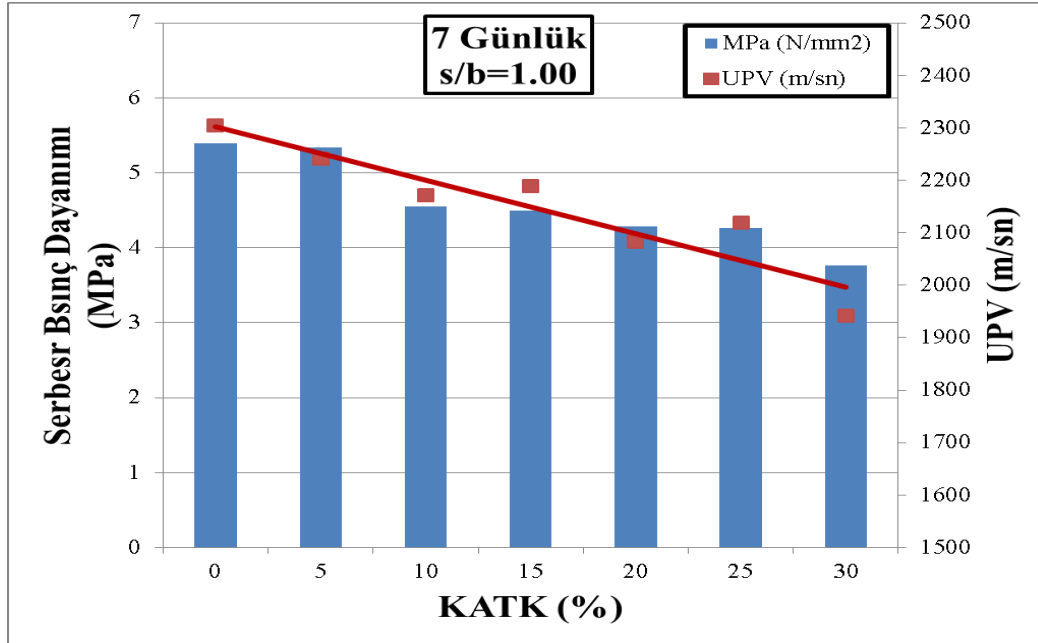
Şekil A.6. S/b=1.50 ile tüm KATK oranlarında görünür viskozite - kayma oranı eğrisi

EK B

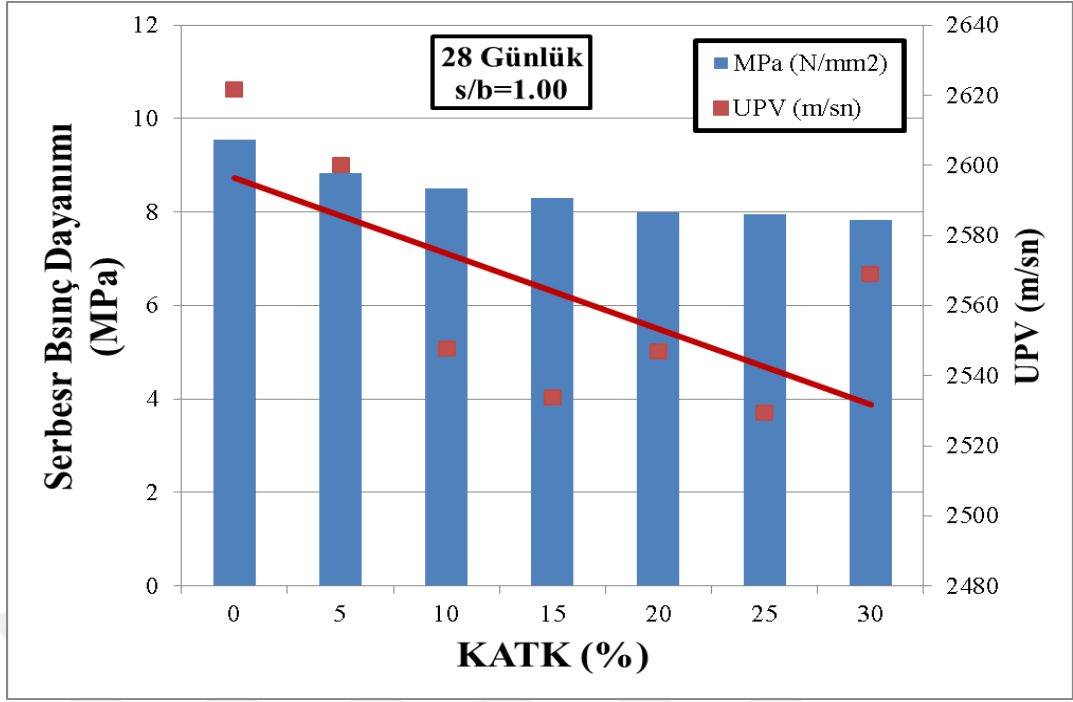
MİNERAL OLARAK KATK KATKILI ÇİMENTO ESASLI KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ



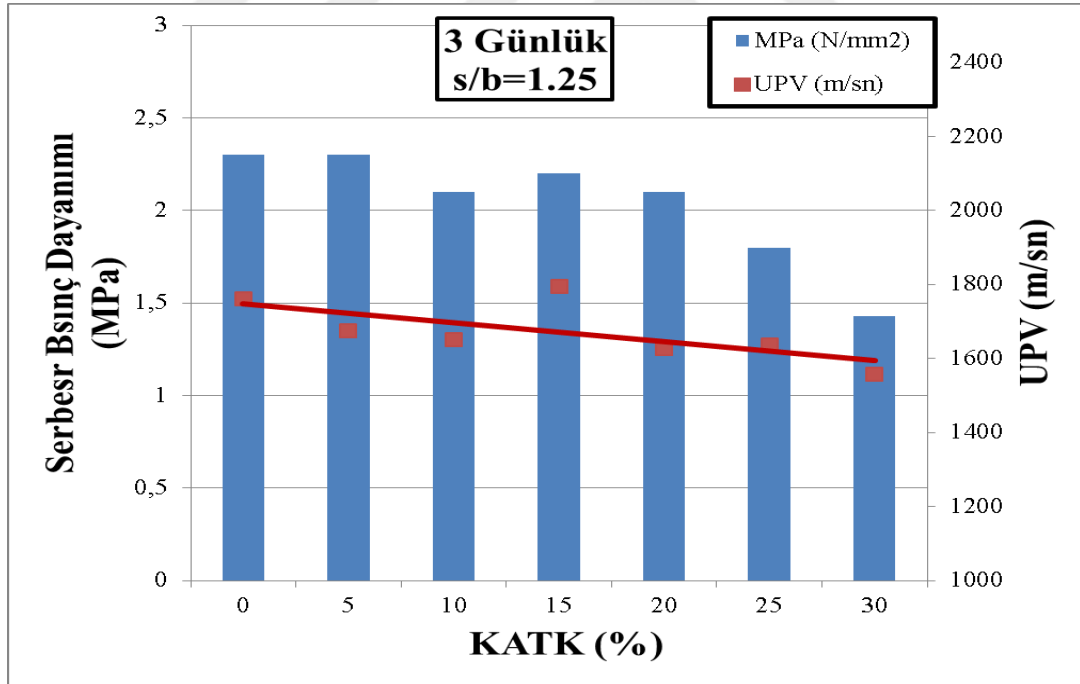
Şekil B.1. S/b oranı 1.00 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



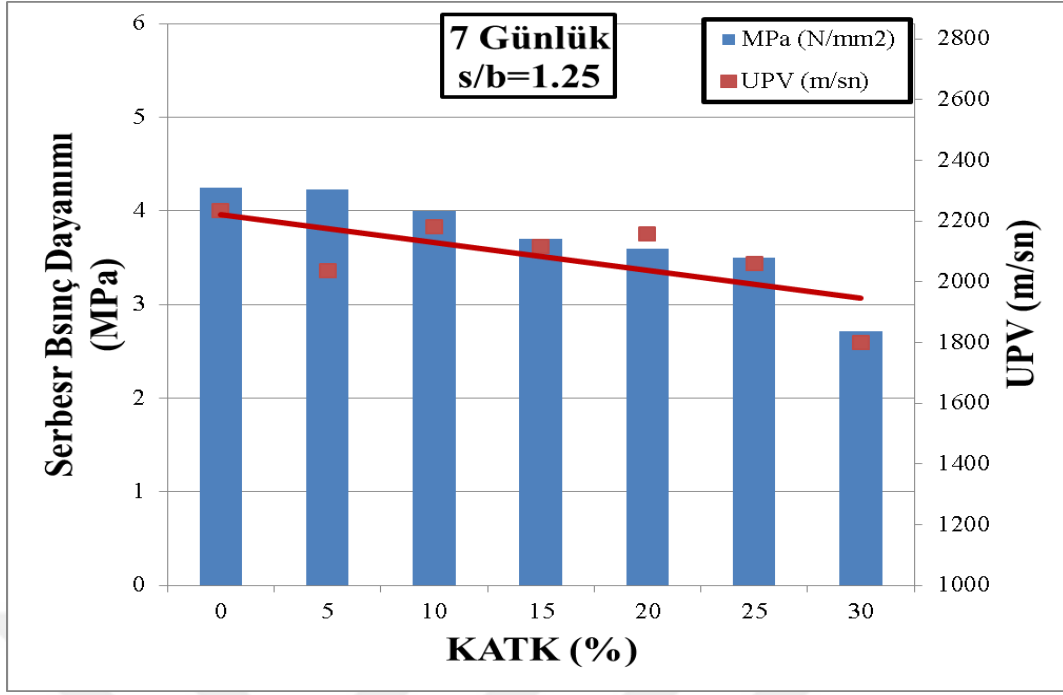
Şekil B.2. S/b oranı 1.00 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



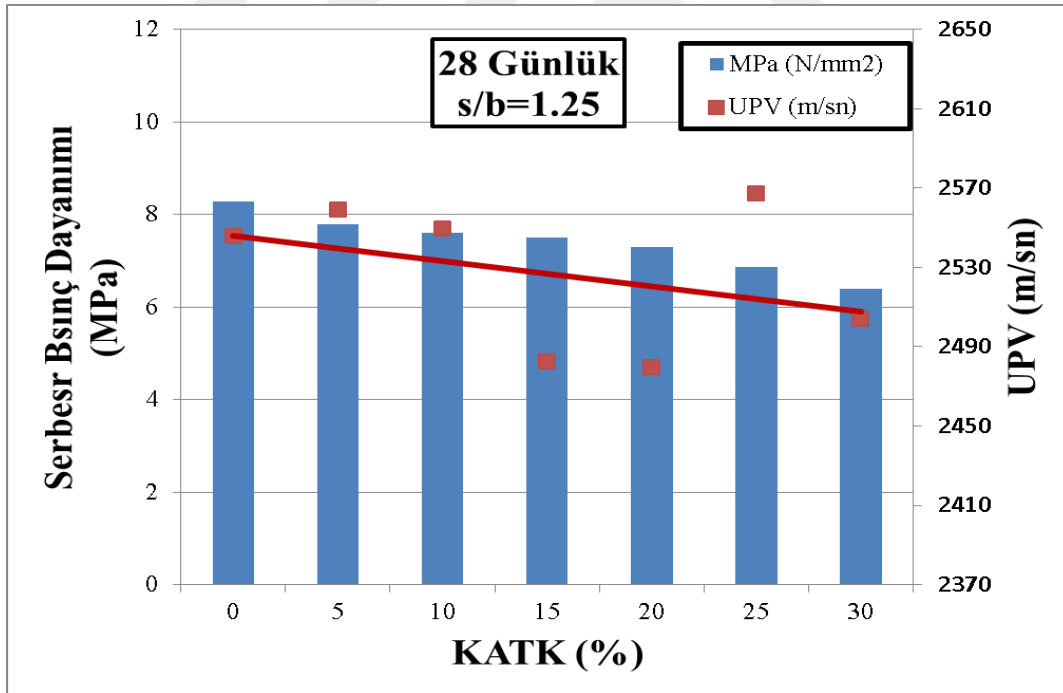
Şekil B.3. S/b oranı 1.00 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



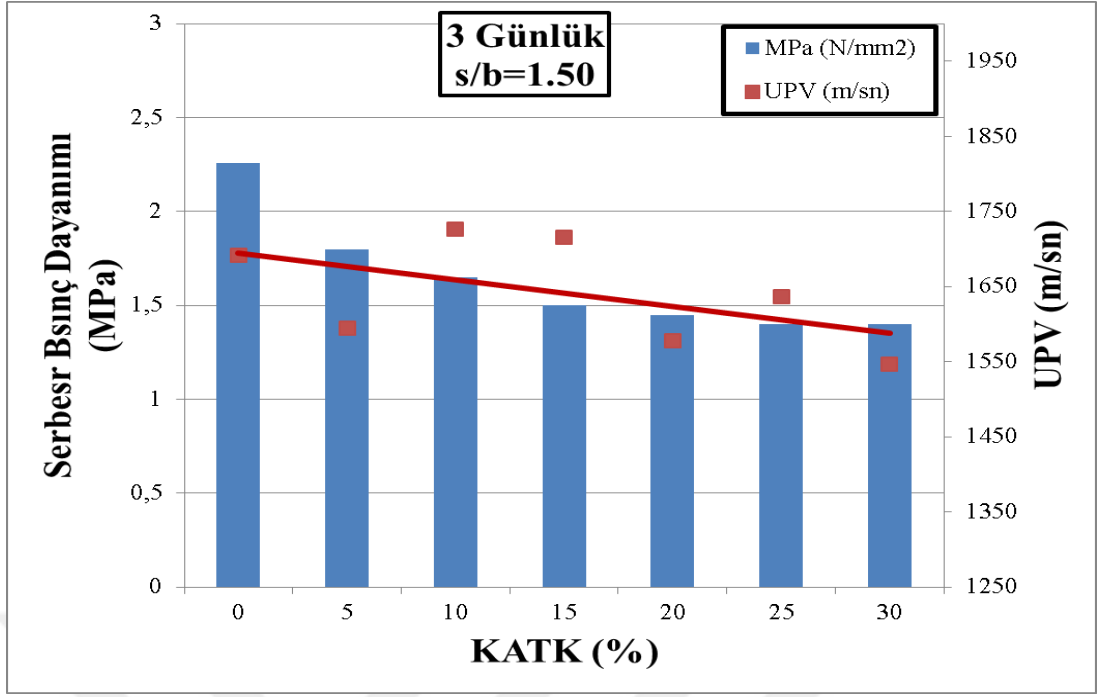
Şekil B.4. S/b oranı 1.25 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



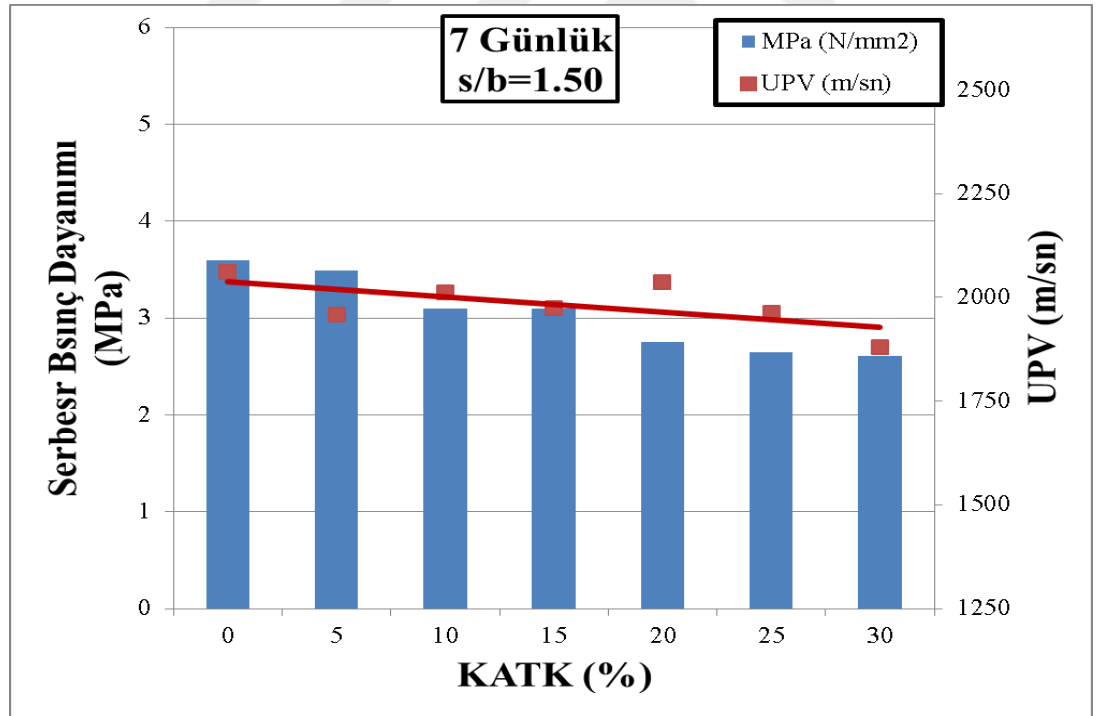
Şekil B.5. S/b oranı 1.25 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



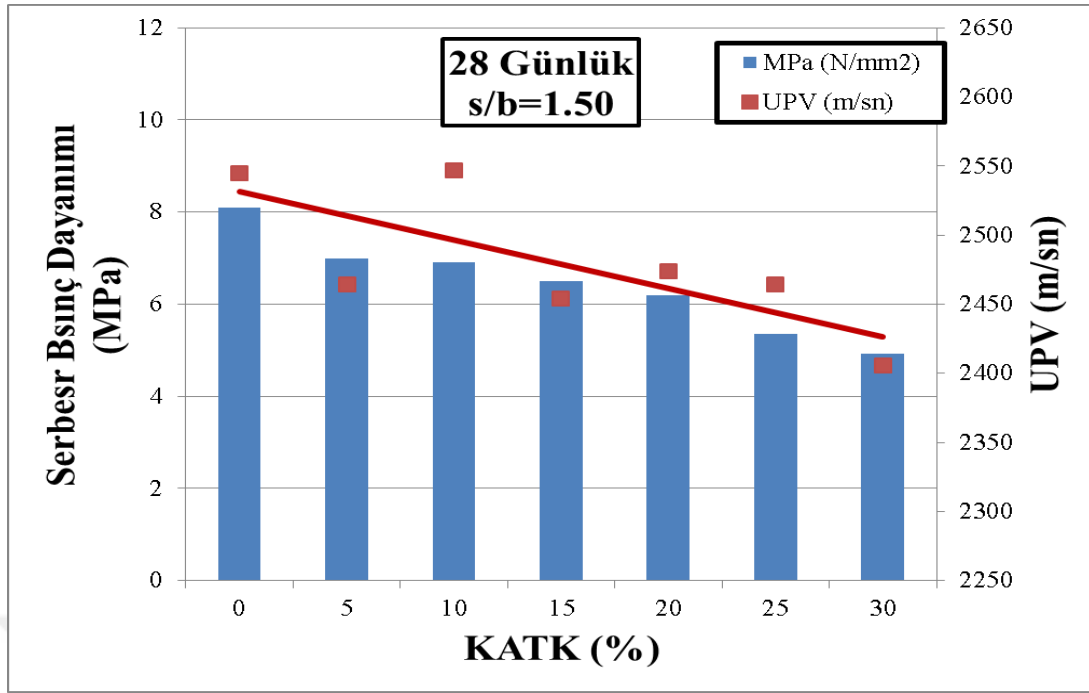
Şekil B.6. S/b oranı 1.25 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



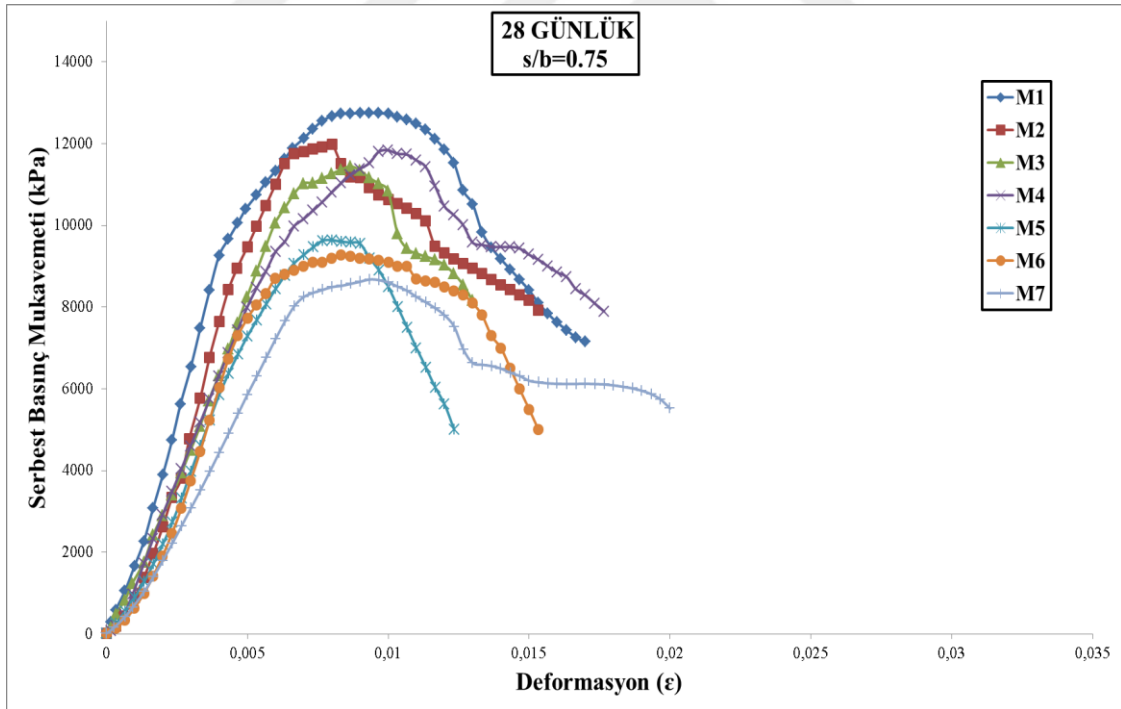
Şekil B.7. S/b oranı 1.50 için 3 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



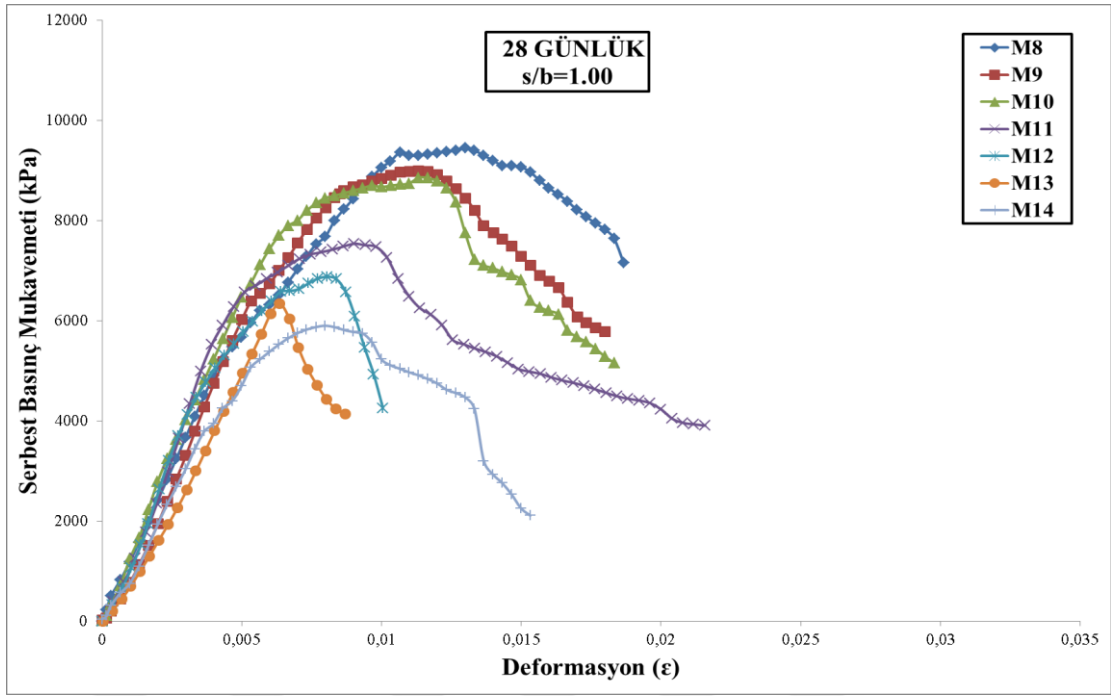
Şekil B.8. S/b oranı 1.50 için 7 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



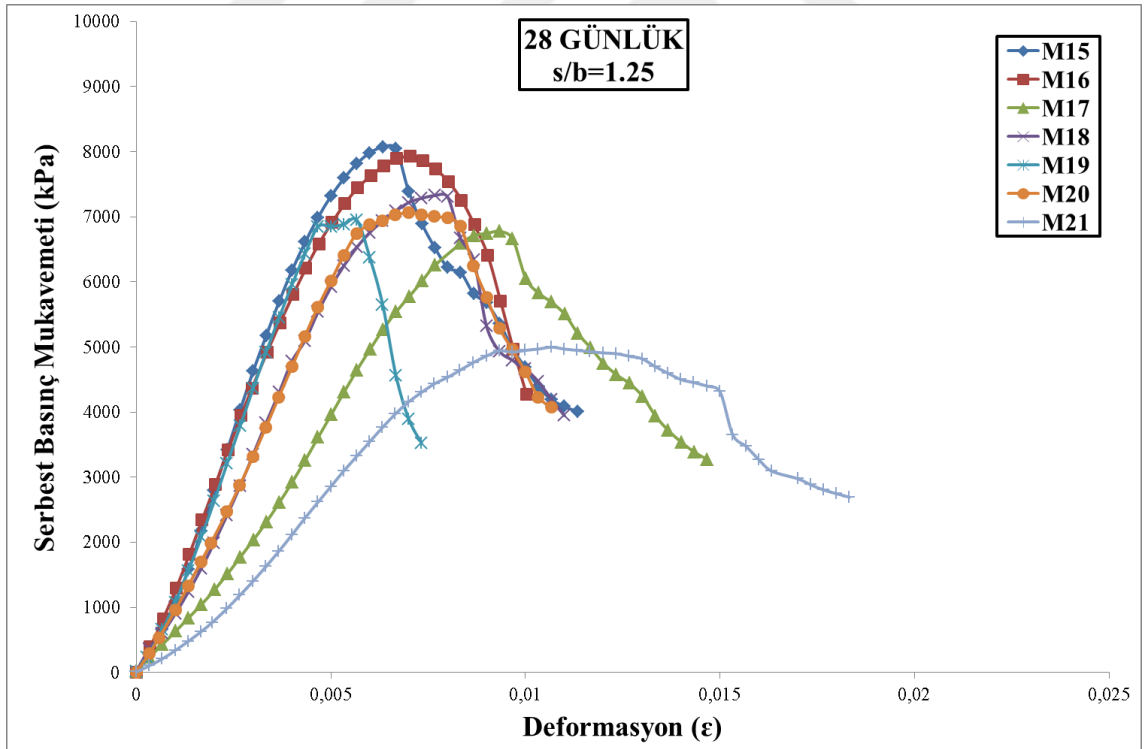
Şekil B.9. S/b oranı 1.50 için 28 günlük kür süresinin UPV ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



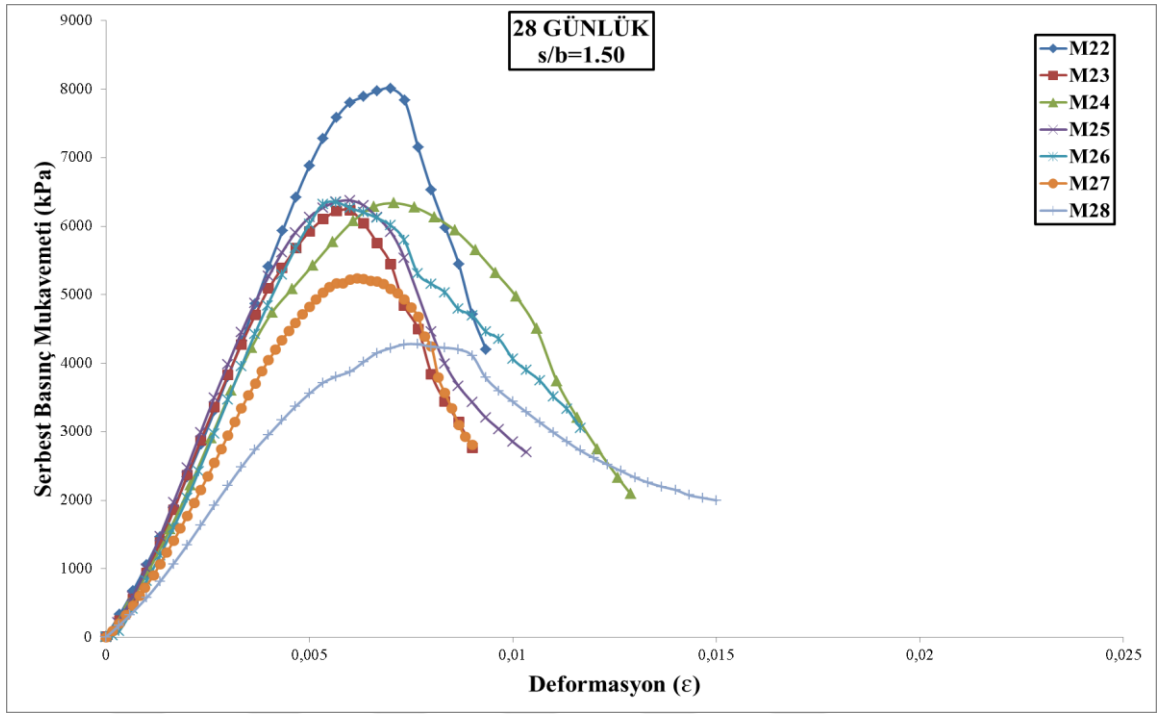
Şekil B.10. S/b oranı 0.75 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı



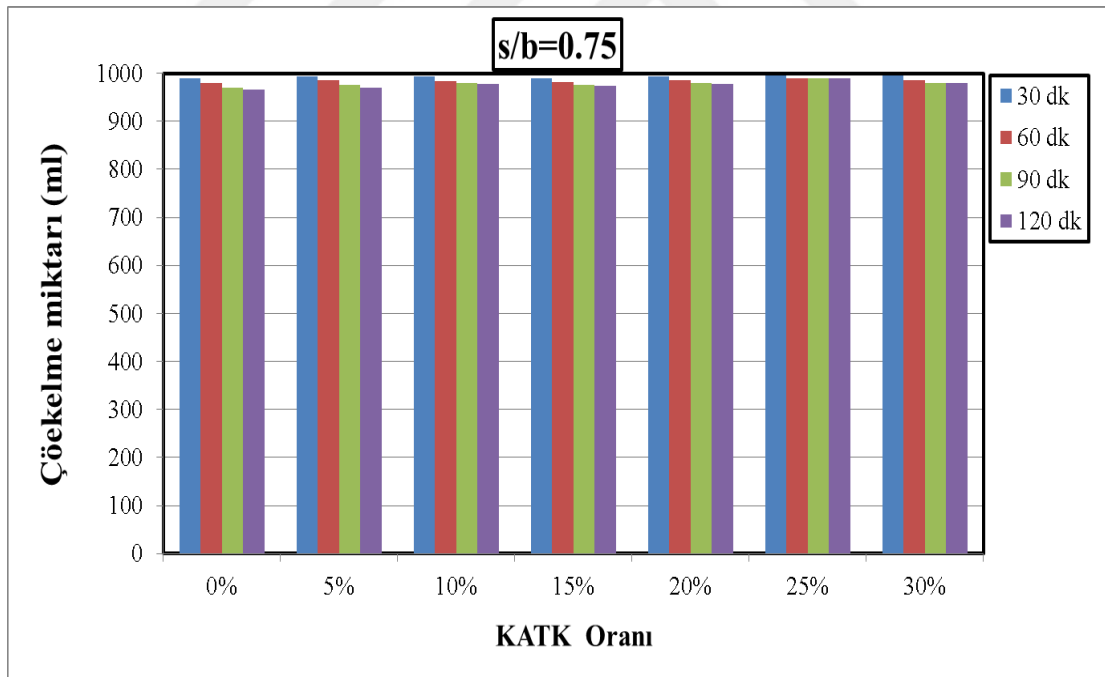
Şekil B.11. S/b oranı 1.00 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı



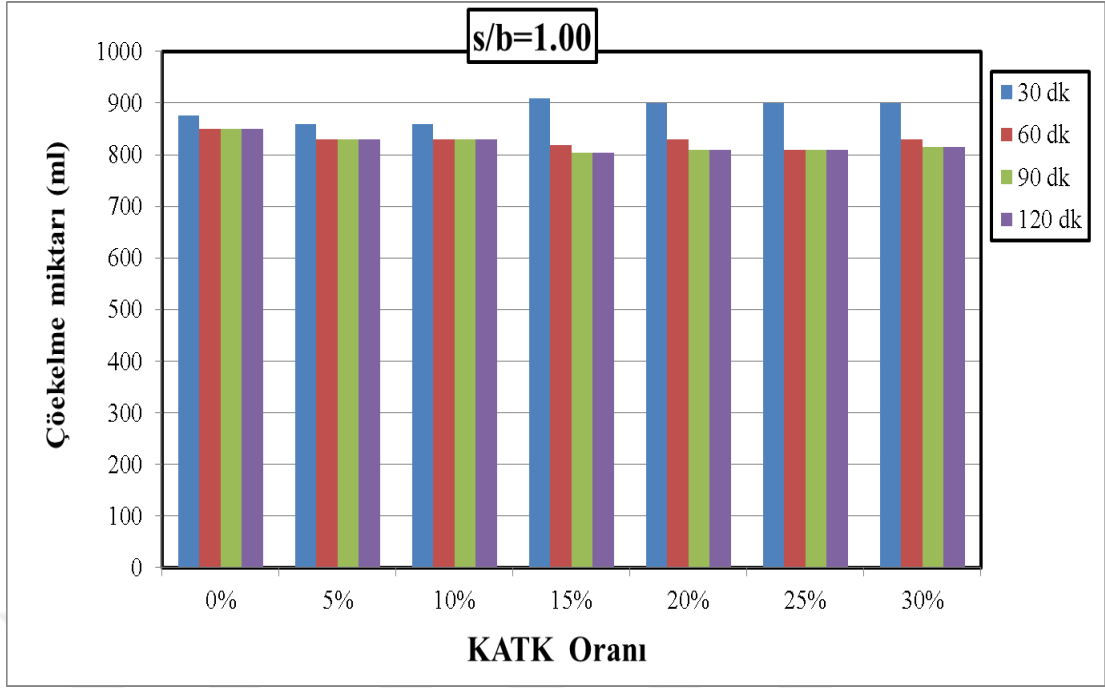
Şekil B.12. S/b oranı 1.25 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı



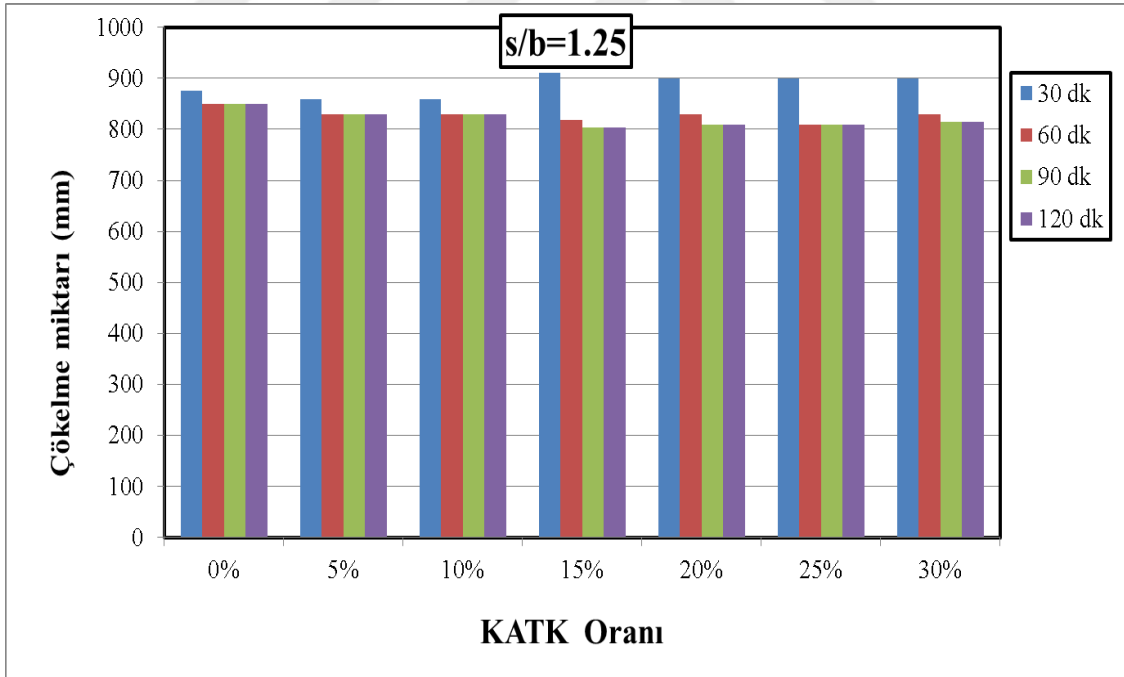
Şekil B.13. S/b oranı 1.50 ve tüm KATK oranları için 28 günlük kür süresinin serbest basınç dayanımı



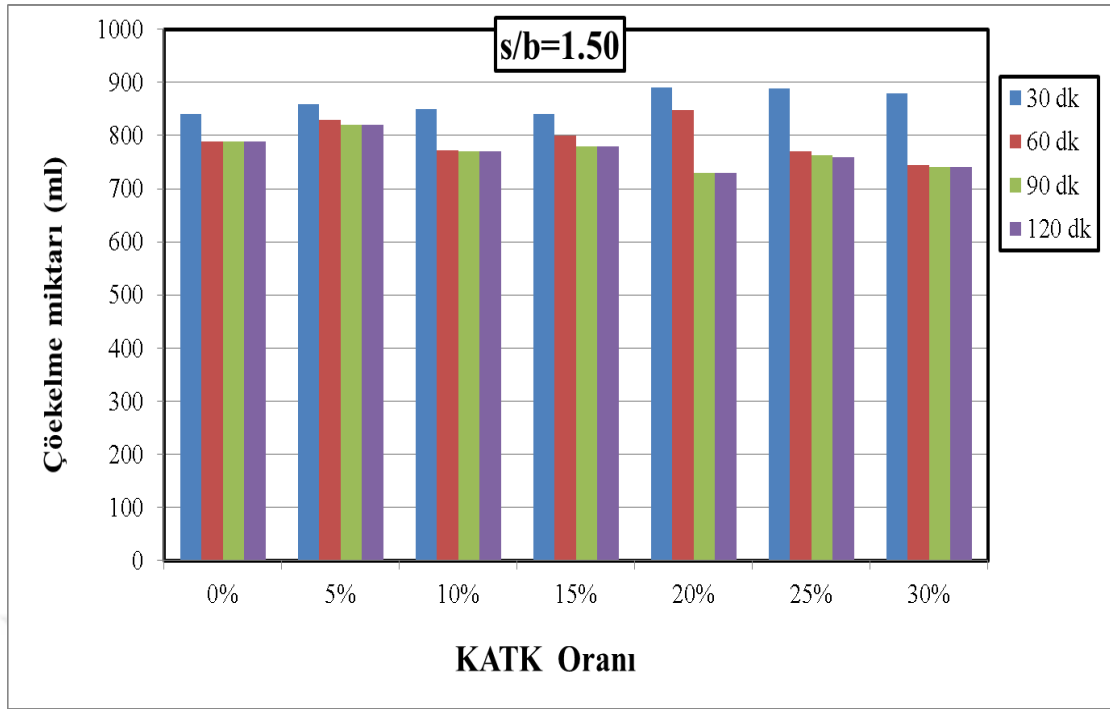
Şekil B.14. S/b=0.75 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı



Şekil B.15. S/b=1.00 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı



Şekil B.16. S/b=1.25 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı



Şekil B.17. S/b=1.50 için tüm KATK oranlarında zamana bağlı çökelme miktarı

ÖZ GEÇMİŞ

Osman AKÇURU 19.04.1995 tarihinde Muş'ta doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Muş'ta tamamladı. 2013 yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2017'de mezun oldu. 2018-2019 eğitim öğretim yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmektedir.



TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Celik, F., and Akcuru, O. “Rheological and workability effects of bottom ash usage as a mineral additive on the cement based permeation grouting method”, *Construction and Building Materials*, 263, 120186, 2020.

