



**KAYA TUZLARININ ENJEKSİYON
SIVILARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Elif AYIK KILIÇ

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU
2020**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAYA TUZLARININ ENJEKSİYON SIVILARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ
(Effects of Rock Salts on Injection Fluids)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif AYIK KILIÇ

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Erzurum
Aralık, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Elif AYIK KILIÇ tarafından hazırlanan “Kaya Tuzlarının Enjeksiyon Sıvıları Üzerindeki Etkileri” başlıklı çalışması 28/12/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ŞENOL
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Z. Neşe Kurt Albayrak
Atatürk Üniversitesi

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: **FYL-2020-8223**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU* danışmanlığında sunulan “Kaya Tuzlarının Enjeksiyon Sıvıları Üzerindeki Etkileri” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş ve Kuramsal Temeller	19	30
Yöntem	5	35
Bulgular	4	20
Tartışma ve Sonuç	0	20
Tezin Geneli	11	25

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Elif AYIK KILIÇ	Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU
6.1.2021	6.1.2021
İmza:	İmza:

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmada, değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, tezimin her aşamasında titizlikle yardımcı olan, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez kapsamında Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile ilgili bilgilerini ve yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal Bayrak'a, SEM-EDS ve XRD analizlerini yorumlarken bilgilerinden yararlandığım Prof. Dr. Remzi Şahin ve Doç. Dr. Meral Oltulu'ya, laboratuvar çalışmalarında beni yalnız bırakmayıp içtenlikle yardımcı olan Arş. Gör. Fatih ARTUK, Arş. Gör. Derya TURHAN ve Yük. İnş. Müh. Metin ÖZLEKLİ' ye, tez süreci boyunca yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Babak Karimi Ghalehjough ve Yük. İnş. Müh. Mahinur Sertkaya'ya, tez savunmama katılan değerli jüri üyelerine ve bu çalışmayı FYL-2020-8223 BAP proje numarası ile destekleyen Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim. Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim sevgili anneme ve babama, biricik kız kardeşlerime ve her daim yanımda olan değerli eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elif AYIK KILIÇ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAYA TUZLARININ ENJEKSİYON SIVILARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Elif AYIK KILIÇ

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAİMOĞLU

Amaç: Enjeksiyon yapılırken kaya tuzu formasyonu ile karşılaşılması muhtemeldir. Tez çalışmasında enjeksiyon sıvılarının reolojik ve mekanik özellikleri üzerinde, enjeksiyon esnasında zemin ortamında var olabilen kaya tuzlarının etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışmada su/çimento oranı, kum yüzdesi ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesi parametre olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin seviyeleri ise sırasıyla 0,8-1,0-1,2-1,4, %0-%25-%50-%100 ve %0-%25-%50-%100 olarak seçilmiştir. Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nde kullanılan standart L_{16} ortagonal dizine göre 16 farklı deney karışımı yapılmıştır. Her bir deney karışımının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Marsh hunisi, Çökeltme, Vicat iğnesi deneyleri ve bu karışımlardan elde edilen numunelerin mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla, serbest basınç (7, 14, 28 ve 90 gün) ve donma çözülme (0, 50, 100 çevrim) deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Taguchi Optimizasyon Yöntemi'ne göre yorumlanmıştır. Karışımların SEM-EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Ayrıca şeffaf kalıplara %65 rölatif sıklıkta yerleştirilen kaya tuzuna farklı su/çimento (0,8-1,0-1,2-1,4) oranlarında hazırlanan karışımlar enjekte edilmiştir. Elde edilen numunelerin 28 günlük (hava ve su kürü) serbest basınç dayanımları belirlenmiştir.

Bulgular: Deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve kaya tuzunun akma süresini artırdığı, çökmeyi azalttığı ve genellikle priz süresini artırdığı belirlenmiştir. Kaya tuzuna doygunluğun 2. seviyesinde (%25) bulunması erken dayanımları (7 ve 14 gün) artırmıştır. Bununla birlikte ileri yaşlarda (28 ve 90 gün) kaya tuzunun bulunması dayanımları düşürmüştür. Hazırlanan tüm enjeksiyon karışım numunelerinde su/çimento oranının artmasıyla dayanımlar düşmüştür. Enjeksiyonlu kaya tuzu numunelerinde en yüksek dayanım su/çimento oranı 0,8 olan karışımdan elde edilmiştir.

Sonuç: Elde edilen bulgulardan kaya tuzunun enjeksiyon karışımlarında akma süresini artırdığı, çökmeyi azalttığı, priz süresini genellikle artırdığı, nihai (28 ve 90 gün) dayanımlarda dayanımı azalttığı, donma çözülme çevrimlerinde genellikle dayanımı azalttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: enjeksiyon, kaya tuzu, kum, Taguchi Optimizasyon Yöntemi

Aralık 2020, 122 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECTS of ROCK SALTS on INJECTION FLUIDS

Elif AYIK KILIÇ

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Purpose: It is possible to encounter rock salt formation during injecting. In this thesis, it was aimed to determine the effects of rock salts that can be exist in the soil medium during injection on the rheological and mechanical properties of injection fluids.

Method: Water/cement ratio, percentage of sand and rock salt saturation percentage were selected as parameters in the study. The levels of these parameters were selected as 0,8-1,0-1,2-1,4, 0%-25%-50%-100% and 0%-25%-50%-100%, respectively. 16 different test mixtures were prepared according to the standard L_{16} orthogonal array used in Taguchi Optimization Method. Marsh funnel, Bleeding and Vicat needle experiments were tested in order to investigate the rheologic properties of the samples obtained from these mixtures and unconfined compressive (7, 14, 28 and 90 days) and freezeing-thawing (0, 50, 100 cycles) tests were performed to determine mechanical properties of each test mixture. The results obtained are interpreted according to the Taguchi Optimization Method. XRD, SEM-EDS analysis of mixtures were done. In addition, mixtures prepared in different water/cement ratios (0.8-1.0-1.2-1.4) were injected into the rock salt placed in transparent molds with a relative density of 65%. 28 days unconfined compresive strength of the obtained samples (air and water curing) was determined.

Findings: The results obtained from the tests were evaluated and it was determined that rock salt increased the flow time, decreased the bleeding and generally increased the setting time of injection fluids. Presence of rock salt in the 2nd saturation level (25%) increased the early strengths (7 and 14 days). However, the presence of rock salt in advanced ages (28 and 90 days) reduced the strength. Strengths decreased by increasing water/cement ratio in all prepared injection mixture samples. In the injected rock salt sample, the highest strength was obtained from the mixture with 0.8 of water/cement ratio.

Results: It has been determined from the findings that rock salt increases the flow time in injection mixtures, decreases the bleeding, generally increases the setting time, decreases the strength in the ultimate (28 and 90 days) strengths, and generally decreases the strength in freezing-thawing cycles.

Keywords: injection, rock salt, sand, Taguchi Optimization Method

Decemcser 2020, 122 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	2
Taguchi Optimizasyon Yöntemi	2
Taguchi felsefesi	2
Taguchi Optimizasyon Yönteminde Deney Tasarımı.....	2
Taguchi Optimizasyon Yöntemine göre sonuçların analizi	4
Enjeksiyon.....	5
Enjeksiyonun uygulama alanları	7
Enjeksiyon karışımları	7
Enjeksiyon teknikleri	9
Enjeksiyon ile ilgili diğer tanımlar.....	17
Arazide enjeksiyon uygulamaları.....	18
Enjeksiyon karışımı çeşitleri	19
Enjeksiyon karışımının seçimi	19
Enjeksiyon karışımlarının reolojisi	20
Enjeksiyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri.....	22
Donma Çözülme.....	22
Buz çözücü tuzların betona etkisi	23
XRD, SEM-EDS Analizleri	24
Konu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar	26
MATERYAL VE METOT.....	34
Materyal	34

Çimento	34
Kum.....	34
Kaya tuzu	35
Metot	36
Taguchi optimizasyon yöntemi	36
Enjeksiyon karışımları için yapılan deneyler	37
Enjeksiyon sistemi	43
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	48
Karışımların Reolojik Özellikleri Deney Sonuçları	48
Marsh Hunisi deney sonuçları.....	48
Çökelme deney sonuçları	52
Priz süresi deney sonuçları.....	56
Karışımların Mekanik Özellikleri Deney Sonuçları.....	59
Karışımların 7 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları	59
Karışımların 14 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları	63
Karışımların 28 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları	67
Karışımların 90 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları	71
Karışımların 0 çevrim serbest basınç dayanımı deney sonuçları	75
Karışımların 50 donma-çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı deney sonuçları	75
Karışımların 100 donma çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı deney sonuçları	79
SEM –EDS, XRD Sonuçları	83
Enjeksiyonlu Kaya Tuzu Numunelerinin Serbest Basınç Deney Sonuçları	99
SONUÇ ve ÖNERİLER	101
Öneriler	103
KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİŞ.....	107

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Ortogonal dizin $L_{16}(4^5)$	3
Tablo 2. Zemin enjeksiyon teknikleri	9
Tablo 3. Enjeksiyon sıvısının penetrasyon yeteneği.....	12
Tablo 4. Çimentoya ait bazı özellikler	34
Tablo 5. Kuma ait bazı fiziksel özellikler	35
Tablo 6. Kaya tuzuna ait bazı fiziksel özellikler	35
Tablo 7. Parametreler ve seviyeleri	36
Tablo 8. Ortogonal dizin L_{16}	36
Tablo 9. Parametreler ve parametre seviyelerine göre hazırlanan ortogonal dizin.....	37
Tablo 10. Kaya tuzlarına enjeksiyon için karışım oranları	45
Tablo 11. Akma süreleri deney sonuçları	48
Tablo 12. S/N Değerleri (Akma süresi)	49
Tablo 13. Ortalama S/N değerleri (Akma süresi)	50
Tablo 14. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (Akma süresi).....	50
Tablo 15. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Akma süresi)	52
Tablo 16. Çökelme deney sonuçları	52
Tablo 17. S/N değerleri (Çökelme yüzdesi)	53
Tablo 18. Ortalama S/N değerleri (Çökelme yüzdesi).....	54
Tablo 19. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (Çökelme yüzdesi)	54
Tablo 20. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Çökelme yüzdesi).....	55
Tablo 21. Priz süresi deney sonuçları	56
Tablo 22. S/N değerleri (Priz Süresi).....	57
Tablo 23. Ortalama S/N değerleri (Priz süresi)	58
Tablo 24. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (Priz Süresi)	58
Tablo 25. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Priz süresi).....	59
Tablo 26. Serbest basınç dayanım değerleri (7 günlük)	60
Tablo 27. S/N değerleri (7 günlük)	61
Tablo 28. Ortalama S/N değerleri (7 günlük)	61
Tablo 29. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (7 günlük).....	62
Tablo 30. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (7 günlük)	63
Tablo 31. Serbest basınç dayanım değerleri (14 günlük)	64

Tablo 32. S/N değerleri (14 günlük).....	65
Tablo 33. Ortalama S/N değerleri (14 günlük).....	65
Tablo 34. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (14 günlük).....	66
Tablo 35. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (14 günlük)	67
Tablo 36. Serbest basınç dayanım değerleri (28 günlük)	68
Tablo 37. S/N değerleri (28 günlük)	69
Tablo 38. Ortalama S/N değerleri (28 günlük)	69
Tablo 39. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (28 günlük).....	70
Tablo 40. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (28 günlük)	71
Tablo 41. Serbest basınç dayanımı deney sonuçları (90 günlük)	72
Tablo 42. S/N Değerleri (90 günlük)	73
Tablo 43. Ortalama S/N değerleri (90 günlük)	73
Tablo 44. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (90 günlük).....	74
Tablo 45. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (90 günlük)	75
Tablo 46. Serbest basınç dayanım değerleri (50 çevrim)	76
Tablo 47. S/N değerleri (50 çevrim)	77
Tablo 48. Ortalama S/N değerleri (50 çevrim)	77
Tablo 49. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (50 çevrim).....	78
Tablo 50. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (50 çevrim)	79
Tablo 51. Serbest basınç dayanımı deney sonuçları (100 çevrim)	80
Tablo 52. S/N Değerleri (100 çevrim)	81
Tablo 53. Ortalama S/N değerleri (100 donma çözülme çevrimi).....	81
Tablo 54. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (100 çevrim).....	82
Tablo 55. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (100 çevrim)	83
Tablo 56. Enjeksiyonlu kaya tuzu numunelerinin serbest basınç dayanımı sonuçları	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Permeasyon enjeksiyonu.....	10
Şekil 2. Çatlatma enjeksiyonu	13
Şekil 3. Kontak enjeksiyonu.....	13
Şekil 4. Tünellerde enjeksiyon uygulaması.....	14
Şekil 5. Kompaksiyon enjeksiyonu	15
Şekil 6. Perde enjeksiyonu	16
Şekil 7. Jet enjeksiyonu	17
Şekil 8. X- ışınının yansıma prensibi	25
Şekil 9. Örnek bir EDS analizi	26
Şekil 10. XRD analizi (Kaya tuzu).....	35
Şekil 11. Marsh hunisi.....	38
Şekil 12. Çökelme deneyi.....	39
Şekil 13. Vicat iğnesi deney aleti	40
Şekil 14. Serbest basınç deney aleti	40
Şekil 15. Kalıptaki enjeksiyon sıvıları	41
Şekil 16. Kalıptan çıkarılmış enjeksiyon sıvısı numuneleri	42
Şekil 17. Serbest basınç dayanımı deneyinde kırılan numuneler	42
Şekil 18. Donma çözülme çevrimine bırakılan numuneler	43
Şekil 19. Enjeksiyon deney düzeneği.....	44
Şekil 20. Enjeksiyon sistemi ve numune kalıpları	45
Şekil 21. Enjeksiyon işlemi	46
Şekil 22. Enjeksiyonlu kaya tuzu numuneleri	46
Şekil 23. Kırılan enjeksiyonlu kaya tuzu numuneleri	47
Şekil 24. Akma süreleri	49
Şekil 25. Parametreler ve seviyeleri - S/N Oranı ilişkisi (Akma süresi).....	51
Şekil 26. Çökelme yüzdeleri	53
Şekil 27. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (Çökelme).....	55
Şekil 28. Priz süreleri	57
Şekil 29. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (Priz süresi)	58
Şekil 30. 7 günlük serbest basınç dayanımı	60
Şekil 31. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (7 günlük)	62

Şekil 32. 14 günlük serbest basınç dayanımı	64
Şekil 33. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (14 günlük)	66
Şekil 34. 28 günlük serbest basınç dayanımı	68
Şekil 35. Parametrelerin basınç dayanımına etkileri (28 günlük)	70
Şekil 36. 90 günlük serbest basınç dayanımı	72
Şekil 37. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (90 günlük)	74
Şekil 38. 50 çevrim serbest basınç dayanımı	76
Şekil 39. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (50 çevrim)	78
Şekil 40. 100 çevrim serbest basınç dayanımı	80
Şekil 41. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (100 çevrim)	82
Şekil 42. SEM görüntüleri (1, 2, 3 ve 4 No.lu deney).....	84
Şekil 43. EDS analizi (1 ve 2 No.lu deney)	85
Şekil 44. EDS analizi (3 ve 4 No.lu deney)	86
Şekil 45. XRD analizi (1, 2, 3 ve 4 No.lu deney).....	87
Şekil 46. SEM görüntüleri (5, 6, 7 ve 8 No.lu deney).....	88
Şekil 47. EDS analizi (5 ve 6 No.lu deney)	89
Şekil 48. EDS analizi (7 ve 8 No.lu deney)	90
Şekil 49. XRD analizi (5, 6, 7 ve 8 No.lu deney).....	91
Şekil 50. SEM görüntüleri (9, 10, 11 ve 12 No.lu deney).....	92
Şekil 51. EDS analizi (9 ve 10 No.lu deney)	93
Şekil 52. EDS analizi (11 ve 12 No.lu deney)	94
Şekil 53. XRD analizi (9, 10, 11 ve 12 No.lu deney).....	95
Şekil 54. SEM görüntüleri (13, 14, 15 ve 16 No.lu deney).....	96
Şekil 55. EDS analizi (13 ve 14 No.lu deney)	97
Şekil 56. EDS sonuçları (15 ve 16 No.lu deney)	98
Şekil 57. XRD analizi (13, 14, 15 ve 16 No.lu deney).....	99
Şekil 58. Enjeksiyonlu kaya tuzu numunelerinin dayanımları.....	100

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

A°	: Angstrom
atm	:Atmosfer
C	: Kalsit (CaCO_3)
°C	: Santigrat Derece
C_c	: Derecelenme Katsayısı
C_u	: Üniformluluk Katsayısı
c/k	: Çimento/kum Oranı
d	: Atom Düzlemleri Arasındaki Uzaklık
D₁₀	: Zeminin Efektif Dane Çapı
D₁₅	: Granülometri Eğrisinde Geçen Zeminin %15'ine Karşılık Gelen Dane Çapı
D₃₀	: Granülometri Eğrisinde Geçen Zeminin %30'una Karşılık Gelen Dane Çapı
D₆₀	: Granülometri Eğrisinde Geçen Zeminin %60'ına Karşılık Gelen Dane Çapı
d₈₅	: Harcın Granülometri Eğrisinde %85 Geçene Karşılık Gelen Dane Çapı
d₉₀	: Harcın Granülometri Eğrisinde %90 Geçene Karşılık Gelen Dane Çapı
d₉₅	: Harcın Granülometri Eğrisinde %95 Geçene Karşılık Gelen Dane Çapı
D_r	: Rölatif Sıkılık
dk	: Dakika
E	: Etrenjit ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$)
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
e_{max}	: Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	: Minimum Boşluk Oranı
F	: Friedel Tuzu ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
FC	: Zeminin ince dane içeriği (0,6 mm elek altı) yüzdesi
H	: Halit (NaCl)
K	: Kum
k₁, k₂	: Katsayı
kPa	: Kilopaskal
KTD	: Kaya Tuzuna Doygunluk
KTDY	: Kaya Tuzuna Doygunluk Yüzdesi
KY	: Kum Yüzdesi

MPa	: MegaPascal
N, N_G, N_R	: Enjekte Edilebilirlik
NaCl	: Sodyum Klorür
NaSO₄	: Sodyum Sülfat
OA	: Ortagonal dizin
P	: Portlantid (Ca(OH) ₂)
P_e	: Enjeksiyon Basıncı
s	: Saniye
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
S/C	: Su/Çimento
S/N	: Signal/Noise (Sinyal/Gürültü)
SP	: Kötü Derecelenmiş Kum
t	: Zaman
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
V_p	: Boyuna Dalga Hızı
V_s	: Enine Dalga Hızı
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
γ_{kmak}	: Zeminin Maksimum Kuru Birim Ağırlığı
γ_{kmin}	: Zeminin Minimum Kuru Birim Ağırlığı
γ_n	: Doğal Birim Hacim Ağırlık
γ_s	: Dane Birim Ağırlığı
λ	: Dalga Boyu
θ	: Bragg Açısı
w/c	: Su/Çimento

GİRİŞ

Uygulamada tünel vb. yapılarda enjeksiyon işlemleri oldukça büyük öneme sahiptir. Ancak enjeksiyon işleminin yapıldığı formasyonlarda kaya tuzunun olması durumunda bu tuzun enjeksiyon sıvısının reolojik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri kesin olarak bilinmemektedir.

Bu kapsamda yapılan tez çalışması, enjeksiyon işlemi sırasında kaya tuzu formasyonu ile karşılaşılması durumunda kaya tuzunun, enjeksiyon sıvılarının (karışımlarının) reolojik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bunun için Taguchi Optimizasyon Yöntemi kullanılarak kaya tuzundan en az etkilenen optimum karışım oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca uygulamayı temsil etmek amacıyla silindirik şeffaf kalıplar içerisine %65 rölatif sıklıkta yerleştirilen kaya tuzu numunelerine farklı su/çimento (S/C) oranlarında hazırlanan enjeksiyon sıvıları 1 atm basınçta enjekte edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numuneler 28 gün uygun hava ve su kr şartlarında bekletilerek serbest basınç dayanımlarının belirlenmesi çalışmanın amaçları kapsamında yer almaktadır.

Çalışmadan elde edilecek olan sonuçların kaya tuzu ortamında yapılacak enjeksiyon işlemine ışık tutucu nitelikte olacağı düşünülmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Taguchi Optimizasyon Yöntemi

Taguchi felsefesi

Farklı parametrelerin bir deney ya da ürünün sonuçları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çeşitli yaklaşımlar ve yöntemler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler; tam faktöriyel tasarım ve kısmi faktöriyel tasarımıdır. Tam faktöriyel tasarımda deneyi ya da ürünü etkileyen tüm parametreleri ve seviyeleri kapsayan deneyler yapılarak sonuçlar bulunup değerlendirmeler yapılmaktadır. Parametre ve seviye sayısının az olduğu tasarımlarda yapılacak olan deney sayısı az olduğundan dolayı tam faktöriyel tasarım yapılabilir. Örnek verilecek olursa 3 seviyeli 2 parametrelili tasarlanan bir deney programında tam faktöriyel tasarımla toplam deney sayısı $3^2 = 9$ 'dur. Bu deney tasarımı nisbeten zaman, maliyet ve iş yükü açısından uygulanabilecek bir deney tasarımıdır. Ancak 4 parametrelili 5 seviyeli olarak tasarlanan bir deney programında tam faktöriyel tasarımla ise $5^4 = 625$ tane deney yapılmalıdır. Bu da maliyet, zaman ve iş yükü açısından oldukça zor bir deney sayısıdır. Bu gibi durumlarda deney sayısını azaltmak amacıyla başvurulan yöntemlerden birisi kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemidir. Bu yöntemde tüm faktörlerin dikkate alınıp tam faktöriyel ile oluşturulan deneylerden tüm deneyleri temsil etmesi amacıyla oldukça küçük bir grup seçilir ve bu grup üzerinde deneyler yapılır. Bu grup üzerinde yapılan deneylerle değerlendirmeler yapılır. Ancak bu yöntemde seçilen grubun tüm deneyleri yeterince temsil etmemesi ve de seçilen gruplar için farklı sonuçların çıkabilmesi dolayısıyla bu tez çalışmasında Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile deney tasarımı yapılmıştır.

Genichi Taguchi tarafından oluşturulan tasarım sayesinde hedef değerler veya tahmin edilen değerler, kontrol edilebilen parametreleri ve seviyelerini içeren ortogonal dizinler ile belirlenmektedir. Seçilen ortogonal dizin ile oldukça az sayıda deney veya çalışma yapılarak parametrelerin sonuca etkileri araştırılabilir. Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile kolayca sonuca ulaşmak ve değerlendirmeler yapabilmek amacıyla deney tasarımı standartlaştırılmıştır. Bu nedenle aynı deneysel çalışma için farklı araştırmacılar tarafından yapılan tasarımlarla benzer sonuçlar elde edilmektedir (Zaimoğlu 2003).

Taguchi Optimizasyon Yönteminde Deney Tasarımı

Hedef değerden sapma olarak tanımlanan varyasyon, tasarımlarda en aza indirilmeye çalışılır. Ürün ya da deney sonuçlarında amaç mümkün olduğunca hedefe yakın üretim

yapmaktır (Şirvanci 1997). Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile varyasyon en aza indirilmeye çalışılmış ve bu amaçla özel olarak ortogonal dizinler geliştirilmiştir. Bu tasarım tüm deneylerin bir örneğini oluşturmaktadır. Bu tasarım için ortogonal dizinler (OA) olarak bilinen standartlaştırılmış tablolar kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan 4 seviyeli 5 parametrelili $L_{16}(4^5)$ ortogonal dizisi Tablo 1’de verilmektedir.

Tabloda ki F1, F2, F3, F4, F5 seçilen parametreleri, her deney numarası satırındaki rakamlar ise çalışmadaki parametrelerin seviyelerini göstermektedir.

Tablo 1. Ortogonal dizin $L_{16}(4^5)$

Deney No.	Parametreler ve Deneylerin Yapılacağı Parametre Seviyeleri				
	F1	F2	F3	F4	F5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Tablo 1’de verilen dizin L_{16} simgesi ile temsil edilmekte olup Taguchi Optimizasyon Yöntemi’ne göre hazırlanmıştır. Bu tablonun 16 satırı ve 5 kolonu bulunmakla birlikte kolon sayısı parametre sayısına göre değişebilmektedir. Her satır verilen parametrelerin seviyelerine göre oluşturulacak deney tasarımını göstermektedir.

Düşey kolonlar parametre seviyelerini gösterip her kolonda 4 adet birinci, 4 adet ikinci, 4 adet üçüncü, 4 adet dördüncü seviye bulunmaktadır. Bu çalışmada 5 parametrelili 4 seviyeli tablo kullanılmış (L_{16}) ve 16 adet farklı deney karışımı oluşturulmuştur.

Taguchi Optimizasyon Yöntemine göre sonuçların analizi

Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nde sonuçların analizi; standart analiz ve S/N (signal to noise) olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Analizlerin 3 tane yapılma amacı vardır.

Bunlar;

En iyi veya optimum durumun belirlenmesi

Faktörlerin ayrı ayrı sonuca etkilerinin tahmin edilmesi

Optimum koşullar altındaki durumun tahmin edilmesi

Genichi Taguchi varyasyonu azaltmak amacıyla, sinyal/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir (Şirvancı 1997). S/N analizinde temel olarak değişim indeksi olarak bilinen S/N oranı kullanılmaktadır. S/N analizleri sonuçlar içerisindeki değişkenlerden en doğru (operating) şartlarından belirlenir. S/N oranı, deneylerdeki verilerin tekrarlanması ile elde edilir. S/N oranı ile dış koşulların veya kontrol edilemeyen değişkenlerin etkileri sonuçlar üzerinde görülebilmektedir. S/N değeri büyüdükçe hedef değere daha çok yaklaşılabilmektedir.

Bu etkiyi ortalama bir değerle temsil etmek yerine; S/N ile temsil edip alınacak sonucun hedef değer etrafındaki değişimi minimize edilerek amaç fonksiyonu belirlenir. Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nde kullanılan S/N oranı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$S/N = -\log_{10}(MSD)$$

Bağıntıda MSD (Mean Square Deviation): Ortalama değerlerden ziyade hedef değer etrafındaki sapma karelerinin ortalaması olarak tanımlanmaktadır. MSD değeri hedef değerin en büyük, en küçük ve optimum olması durumları için aşağıdaki bağıntılarla belirlenmektedir.

Hedef değerin maksimum olması için;

$$MSD = \left(\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right) / n$$

Hedef değerin minimum olması için;

$$MSD = \left(\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \right)$$

Hedefin bilinen belirli bir değer olması için;

$$MSD = \left[\frac{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + (Y_n - Y_0)^2}{n} \right]$$

Burada Y1. Y2. Yn: Deney sonuçları, n: Bir deneydeki tekrar sayısı, Y0: Bilinen belirli hedef değerdir.

Bu yönteme göre yapılmış bir deney tasarımında. optimum deney koşullarında beklenen hedef değerler ile deneylerin yapılmadığı durumlar için beklenen değerler (Y_{exp}) tahmin edilebilir. Bu değer, optimum koşullardaki faktör seviyelerinin ortalama S/N değerleri ve bütün tasarımın ortalama S/N değeri göz önüne alınarak belirlenmektedir.

$$Y_{beklenen} = \sqrt{\frac{1}{MSD}}$$

Deney sonuçlarının güvenilirliğini ve parametrelerin sonuca etki derecelerinin belirlenmesi için analizler yapılmalıdır. Bunun için varyans analizi (ANOVA) olarak bilinen standart istatistiksel teknik kullanılmaktadır. Bu teknik ile veriler doğrudan analiz edilemez. Fakat verilerin değişkenliği belirlenebilmektedir. Sonuçların güven düzeyleri varyanstan ölçülmektedir. ANOVA analizi ile ortogonal dizinde bulunan her parametrenin sonuç üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

S/N analizleri ile en iyi veya optimum durum belirlendikten sonra sonuçların güvenirliğinin tartişılması ayrıca parametrelerin sonuçlara etki derecelerinin belirlenmesi gerekir. ANOVA analizleri ile belirlenen güven aralıklarında sonuçların güvenilirlikleri ve sonuçların parametreler üzerindeki etki dereceleri belirlenmektedir (Zaimoğlu 2003).

Enjeksiyon

Düşük mukavemete, yüksek ge irirnililiğe, sıvılaşma ve büyük düşey deformasyon potansiyeline sahip zeminler temel zemini veya kazı projeleri için istenilen zeminler değillerdir. Bu tür zeminleri istenilen özelliklere getirmek için zemin iyileştirilmesi yapılır.

Zemin iyileştirmesi zemin türüne göre kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin iyileştirilmesi ve uygulama bölgesinin zemin yüzeyine uzaklığına bağlı olarak y zeyssel veya derin zeminlerin iyileştirmesi şeklinde sınıflandırılmaktadır (Mitchell 1981).

Enjeksiyon tekniği derin ve sığ zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden birisidir. Enjeksiyon bir katkılı stabilizasyon yöntemi olup, boşlukların, çatlakların ya da gözeneklerin içerisine karışımların enjeksiyonu veya zemin- imento birleşimini oluşturmak için zemin içerisine yüksek basınçla  imento karışımlarının enjekte edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Kim and Lee 2000). Baraj gövdesi altında geçirimsiz zon oluşturmak, temel zemininin taşıma gücünü artırmak, diyafram duvarlar oluşturmak, ankraj çubuklarının çevresini doldurmak, evsel ve endüstriyel atık depoları oluşturmak başlıca enjeksiyon uygulamalarındandır ( inicioğlu 1997). Geoteknik mühendisliğinde enjeksiyon tek başına

kullanıldığı gibi diğer bazı zemin iyileştirme yöntemlerini desteklemek amacı ile de (kazık temel sistemlerinde ve zemin ankrajlarında taşıma kapasitelerini artırmak, derin kazılarda yanal gerilmeleri karşılamak) kullanılabilir (Warner 2004).

Enjeksiyon karışımları başlıca süspansiyonlar ve kimyasal eriyikler olarak ikiye ayrılır. Süspansiyonlar, çimento+su, kum+çimento+su, kil+su vb. olabilirken kimyasal enjeksiyon karışımları, silikatlı maddeler+su vb. şeklinde olmaktadır (Uzuner 2007).

Enjeksiyonda kullanılan enjeksiyon karışımlarının özellikleri uygulamanın amacına göre değişmektedir. Örnek olarak mukavemeti artırmak amacıyla kullanılan karışımların mukavemeti önem arzederken geçirimsizlik için kullanılan enjeksiyon karışımlarının mukavemetinin yüksek olması önemli değildir (Çinicioğlu 1997).

Enjeksiyon karışımları, arazi koşullarına ve enjeksiyonun amacına göre birçok yolla birleştirilen birkaç bileşen içerir (Anagnostopoulos 2005). Günümüzde enjeksiyon malzemesi olarak; çimento, çimento-kum, kil-çimento, alçı-çimento, epoksi-polimer, kil-asfalt, ufalanmış yakıt külü ve çok sayıda kolloid ve düşük viskoziteli kimyasallar dahil olmak üzere kullanılmaktadır (Hussin *et al.* 2007).

Bu yöntemle istenilen enjeksiyon malzemeleri ile hazırlanan enjeksiyon karışımının başlangıçta akışkan olup doldurulmak istenilen boşluklara basınçla nüfuz etmesi sağlanır. Başlangıçta akışkan olan enjeksiyon karışımı zamanla sertleşerek arzu edilen özelliklere gelmesi sağlanır.

Enjeksiyon işleminin başarılı olması karışımın özellikleri ile bu karışımların zemine gönderilme yöntemlerinin her yönü ile karşılaştırmalı olarak bilinmesine bağlıdır. Ayrıca enjeksiyon yapılmadan önce enjekte edilecek zeminin etüd çalışmasının detaylı bir şekilde yapılması gerekmektedir (Çinicioğlu 1997).

Enjeksiyon işleminin birçok avantajları vardır. Bunlar;

- Genellikle çoğu zemin şartlarına uygulanabilir.
- Enjeksiyon işlemi titreşime sebep olmaz ve mevcut yapılar altındaki temellerde var olan hasarların giderilmesi için uygulanabilir.
- Uygulamada mevcut yapıda ilave edilemeyen bağlantıların yapılmasında uygun çözüm sunabilir (Zaimoğlu 2003).

Enjeksiyonun uygulama alanları

Giderek kullanımı ve kullanım alanları yaygınlaşan enjeksiyonun inşaat mühendisliğinde birçok uygulama alanı vardır. Enjeksiyonun başlıca uygulama alanları şunlardır;

- Tünel kazımı esnasında gevşek zeminlerin ve parçalı kayaların stabilizasyonunda, tünel inşası esnasında kayalarda var olan çatlakların doldurulmasında
- Tünel kazımı sırasında yüzeydeki veya yakın alanlardaki yapılarda meydana gelebilecek oturmaların engellenmesinde
- Tünellerde kazı esnasında destek elemanları oluşturmada (püskürtme beton, enjeksiyonlu bulon uygulaması ve çelik hasır)
- Tünel yüzey betonu ile kaya arasındaki boşlukları doldurmada
- Sondaj ve numune alma esnasında su problemlerinin çözümünde
- Zemin içerisindeki boşlukların doldurularak aşırı oturmaların engellenmesinde
- Hem mevcut hemde yeni inşa edilecek yapıların zemin emin taşıma güçlerinin artırılmasında ve bununla birlikte oluşabilecek deformasyonların engellenmesinde
- Gevşek suya doymuş ince daneli granüler zeminlerde deprem gibi dinamik yükler etkisi altında meydana gelebilecek sıvılaşmanın önlenmesinde
- Baraj inşaatlarında geçirimsizlik oluşturmada
- Şev stabilitesini artırmada
- Ankraj çubuklarının sabitletmesinde
- Derin kazı gibi suyun bulunmasının problem olduğu inşaat işlerinde su sızıntılarını engellemede
- Derin temel inşaatlarında taşıma gücünün artırılmasında
- Mevcut yapılarda farklı oturmada dolayı meydana gelen eğikliğın düzeltilmesinde (Tunçdemir 2004).

Enjeksiyon karışımları

Zemin enjeksiyonu birçok farklı amaç için yapılmaktadır. Yukarıda bahsedilen bu amaçlar doğrultusunda tüm enjeksiyon uygulamalarında aynı enjeksiyon malzemeleri ve parametreleri (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjekte edilen hacim) kullanılmamaktadır. Bu malzeme ve parametreler; zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, rölatif sıkılık, geostatik gerilmeler vb.) ve uygulama amacına göre seçilmelidir.

Enjeksiyon karışımlarına ilişkin parametreler şunlardır.

- Su/çimento oranı
- Kullanılan katkı malzemeleri ve miktarları
- Segregasyon (Karışım içerisindeki katı taneciklerin zamanla çökmesi ve karışım suyundan ayrılması)
- Filtrasyon oranları (Karışım içerisindeki danelerin zemin daneleri tarafından tutulması ve enjeksiyonun engellenmesi)
- Viskozite (akmaya karşı direnç) ve zamanla değişimi
- İlk ve son priz zamanları (Ergun 2007).

En genel haliyle enjeksiyon karışımları çimento (Binghamian karışımları) ve kimyasal enjeksiyon (Newtonian) karışımları olarak iki gruba ayrılabilir.

a) Çimentolu enjeksiyon karışımları (Binghamian karışımları)

Bu karışım türünde rijit bir kütle oluşturmak üzere temelde daneli süspansiyonlar oluşturan çimento ve su kullanılmaktadır. Çimento olarak portlant çimentosu kullanılabildiği gibi ince daneli çimentolarda bu karışımlarda kullanılabilmektedir. Çimentolu enjeksiyon karışımları farklı S/C oranlarında hazırlanarak zeminlere veya kayalara enjekte edilir. S/C oranları 0,5/1 ile 6/1 ara değerlerinde olabilecek şekilde kullanılmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006). Yüksek S/C oranlarında enjeksiyon rahat yapılabilenlikle bununla birlikte çökme artmakta ve dayanım düşmektedir. Bu karışımların düşük maliyet, kolay uygulanabilirlik ve yüksek elastisite modülü gibi avantajları olmakla birlikte düşük penetrasyon kapasitesi, gevrek kırılması, uzun priz süresi ve yıkanabilirliğinin olmaması gibi dezavantajları da mevcuttur. Maliyeti düşürmek, küçük boşlukları doldurmak, penetrasyonu kolaylaştırmak, çimentonun topaklaşmasını engellemek, priz alma süresini kontrol etmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Kullanılan katkı malzemelerine, akışkanlaştırıcılar veya süperakışkanlaştırıcılar, priz hızlandırıcılar, killer, silis dumanı, uçucu kül ve mineral katkılar örnek olarak verilebilir.

b) Kimyasal enjeksiyonlar (Newtonian karışımları)

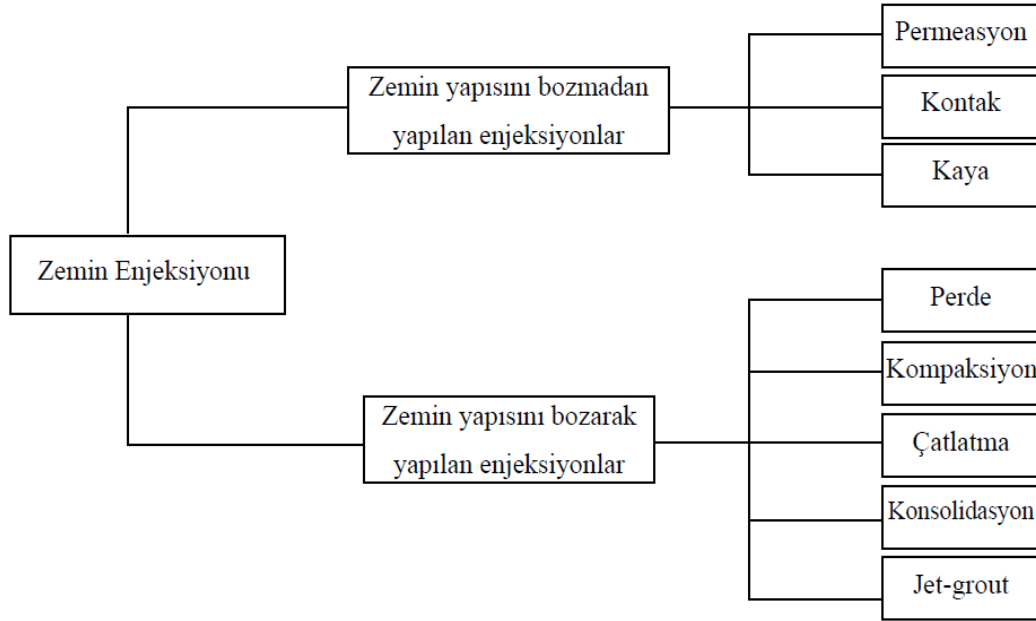
Kimyasal enjeksiyon, çimento enjeksiyonunun yapılamadığı daha küçük dane boyutuna sahip olan zeminlere uygulanır. Çimento enjeksiyonlarına göre, yüksek penetrasyon kapasitesi, daha düşük viskozite, daha iyi priz süresi kontrolü, daha düşük elastisite modülü gibi avantajları vardır. Ancak diğer taraftan teknolojileri daha kompleks ve maliyetleri daha yüksektir. En çok kullanılan kimyasal enjeksiyon türleri silikatlar, reçineler, polimerler, epoksiler, akrilikler olarak sıralanabilir. Bu enjeksiyon karışımları içerisinde günümüzde en

çok kullanılanları silikatlardır. Diğerlerinin toksik olma, korozyona ve kansere yol açma, pahalı olma gibi sebeplerden dolayı kullanımları sınırlıdır. Silikatlar ile hazırlanan enjeksiyon karışımları, sodyum silikat (Na_2SiO_3), su ve reaktif madde gibi malzemelerden oluşur. %25 ile %30 silikat içerikli enjeksiyon karışımları su geçirmezlik uygulamaları için kullanılır. Yüksek dayanımların istendiği yerlerde, %40 ile %60 silikat konsantrasyonları kullanılmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006).

Enjeksiyon teknikleri

Enjeksiyon teknikleri karışımın zemin içerisine verilmiş şekline ve zemin yapısında sebep olacağı davranış değişikliğinin gerçekleşmesine göre sınıflandırılır (Çinicioğlu 1997). Zemin yapısında sebep olacağı davranışa göre enjeksiyon sınıflandırması Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Zemin enjeksiyon teknikleri (Mutman 2007)

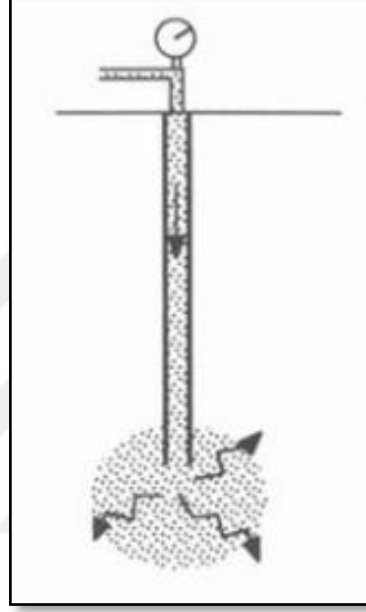


a) Permeasyon Enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu ile zemin boşlukları arasında var olan su ve hava ile enjeksiyon karışımı yer değiştirir. Bu yöntem ile düşük basınçlarda zemin formasyonunun orijinal yapısı bozulmadan enjeksiyon işlemi yapılır. Harcın viskozitesi zemin boşluklarına girebilecek şekilde olmalıdır. Boşluklara emdirilen enjeksiyon harcı zamanla sertleşerek zeminin özelliklerini değiştirmektedir. Bu tip enjeksiyonun ana amacı gevşek zemin içerisindeki boşlukları harç ile doldurup zeminin mukavemetini ve geçirimsizliğini arttırmaktır (Andrus and Chung 1995). Ayrıca permeasyon enjeksiyonu yapılarak zeminlerde sıvılaşmaya karşı önlemlerde alınmaktadır. Bu enjeksiyon tekniğinde zeminlerin boşlukları düşük basınçla doldurulmaktadır. Bu nedenle enjeksiyon yapılacak olan zeminin

geçiririmsizliği enjeksiyonun başarılı olabilmesi için büyük önem arz etmektedir. Permeasyon enjeksiyonu geçirimsizliği diğer zeminlere nispeten yüksek olan orta ve iri daneli kumlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. (Mollamahmutoğlu ve Babuccu 2006). Bu enjeksiyon tekniğinde uygulamada kabarmaları önlemek amacıyla enjeksiyon basıncının o noktadaki örtü yükü eşdeğerinden (σ_0) büyük olmaması istenir (Önalp vd 2006).

Permeasyon enjeksiyonunda hem süspansiyon türünde olan çimento şerbeti hem de koloit yapıdaki saf kimyasal çözeltiler kullanılabilir (Tunçdemir 2004). Permeasyon enjeksiyonu Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Permeasyon enjeksiyonu (Tunçdemir 2004)

Zemin enjeksiyonu için enjekte edilebilirlik oranları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$N = \frac{D_{15}}{d_{85}}$$

D_{15} : Zeminin granülometri eğrisinde %15 geçene karşılık gelen dane çapıdır.

d_{85} : Enjeksiyon materyallerinin granülometri eğrisinde %85 geçene karşılık gelen çaptır.

$N > 24$ olduğunda enjeksiyonun mütemadiyen mümkün

$N < 11$ olduğunda ise enjeksiyon mümkün değil

Enjekte edilebilirliğe kılavuzluk etmek amacıyla farklı bir oran daha verilmiştir.

$$N_c = \frac{D_{10}}{d_{95}}$$

D_{10} : Zeminin granülometri eğrisinde %10 geçene karşılık gelen dane çapıdır.

d_{95} : Enjeksiyon materyallerinin granülometri eğrisinde %95 geçene karşılık gelen çaptır.

$N_c > 11$ olduğunda enjeksiyon mütemadiyen mümkün

$N_c < 6$ olduğunda enjeksiyon mümkün değil

Partikül enjeksiyon türleri ve partikül boyutu ile ilgili ilave kılavuz bilgiler şunlardır.

Tip I ve II portlant çimentosu, 0,60 mm'den iri boyutlu zeminler için uygundur.

Tip III portlant çimentosu, 0,42 mm den iri boyutlu zeminler için uygundur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006).

Akbulut ve Sağlamer (2002) tarafından enjekte edilebilirlik için önerilen diğer bir bağıntı ise şöyledir.

$$N = \frac{D_{10}}{d_{90}} + k_1 * \frac{\frac{w}{c}}{FC} + k_2 * \frac{P_e}{D_r}$$

N: Enjekte edilebilirlik

D_{10} : Zeminin granülometri eğrisinde %10 geçene karşılık gelen dane çapıdır.

d_{90} :Harcın granülometri eğrisinde %90 geçene karşılık gelen dane çapıdır.

k_1 ve k_2 : Deney tecrübesine bağlı katsayılar

w/c: su/çimento oranı

FC: Zeminin ince dane içeriği (0,6 mm elek altı) yüzdesi

P_e : Enjeksiyon basıncı

D_r : Zeminin rölatif sıkılığı

Bu bağıntı için $N > 28$ olduğunda enjeksiyonun başarılı olacağı belirtilmiştir.

Son yıllarda çimento enjeksiyonları ile ilgili yapılan çalışmalarda mikro daneli çimentolar, orta-ince boyutlu kumlara enjekte olabilmektedir (Mollamahmutoğlu 2003). Yapılan bir başka çalışma da ise çok ince daneli RHEOCEM 900 çimentosu ile içerisinde belli yüzdelerde ince dane bulunduran zeminlerde enjeksiyonun gerçekleştiği görülmektedir (Tekin ve Mollamahmutoğlu 2010). Enjeksiyon sıvılarının (karışımlarının) zemin türlerine göre penetrasyon yeteneği Tablo 3' de verilmektedir.

Tablo 3. Enjeksiyon sıvısının penetrasyon yeteneği (Önalp vd 2006)

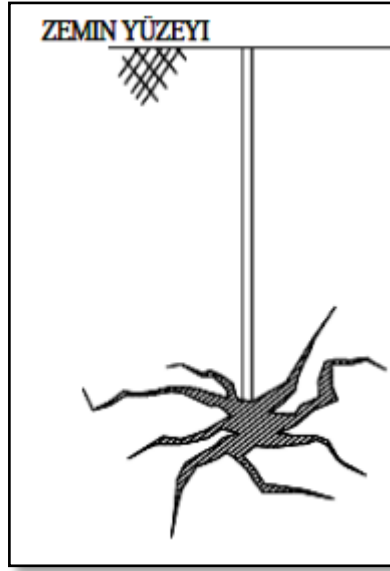
ENJEKSİYON SIVISI		ÇAKIL	KUM			SİLT	KİL
			kaba	orta	ince		
Çimentolayıcılar	ultra ince çimento						
	çimento						
	bentonit						
	sodyum silikat						
Kimyasallar	lignin						
	üre bazlı reçine						
	akrilamid						
dane boyutu (mm)		2	0,5	0,25	0,74	0,005	
geçirimsizlik katsayısı (cm/s)		10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵

b) Çatlatma Enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu genellikle permeasyon enjeksiyonunun uygulanmadığı geçirimsizliği düşük zeminlerde uygulanır. Bu yöntemle düşük viskoziteye sahip enjeksiyon harcı yüksek basınçlarla (genellikle 20-40 bar) zemine gönderilir. Zeminin bu yüksek basınçla çatlatılması sağlanır. Bu çatlaklar enjeksiyon basıncı ile dolarak ağaç dallarına benzer bir yapı oluşturulur (Şekil 2).

Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi, tünel veya kazı aktiviteleri sırasında meydana gelen oturmaları önlemek veya telafi etme amacına dayanmaktadır.

Litratürde çatlatma enjeksiyonunda kullanılan S/C oranları yüksek kullanılmış ve karışımın stabilitesini artırmak amacıyla bentonit gibi katkıları kullanılmıştır. Bu özelliği kompaksiyon enjeksiyonundan ayrılmaktadır (Ergun 2007).

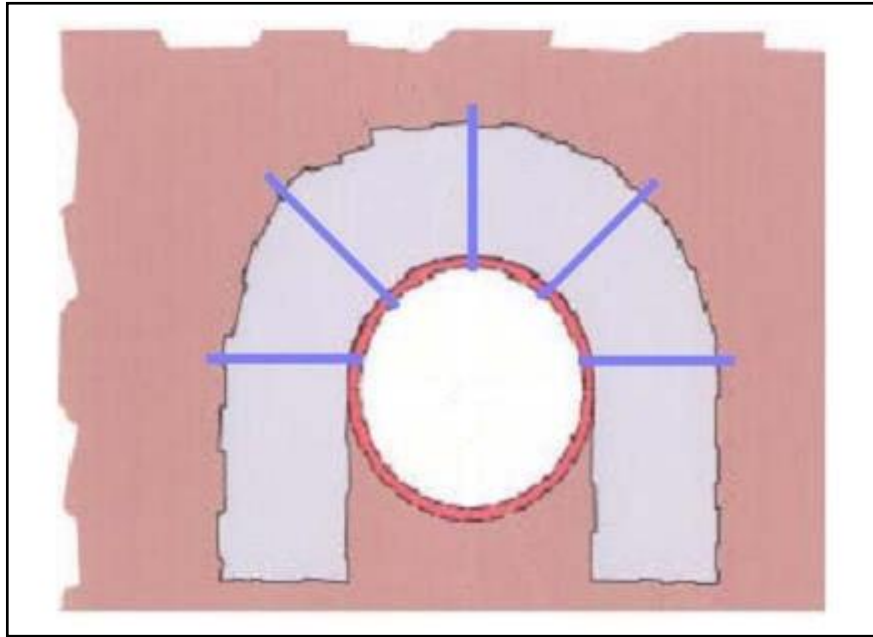


Şekil 2. Çatlatma enjeksiyonu (Bektas and Ozgan 2011)

c) **Kontak Enjeksiyonu**

Tünellerde ve barajlarda yaygın olarak kullanılan bu yöntemde mevcut yapı ile zemin arasındaki boşlukları doldurmak amacıyla enjeksiyon yapılmaktadır. Tünellerde yapılan kontak enjeksiyonu uygulamasına örnekler Şekil 3 ve Şekil 4’de gösterilmektedir.

Enjeksiyon basıncının büyüklüğü, kayanın karakterine, zeminin özelliklerine ve yapının mukavemetine göre değişmektedir. Kontak enjeksiyonunda enjeksiyon basıncı en fazla 200 kPa olarak alınmaktadır. Enjeksiyon basıncını yüksek tutmak tünel hattında veya başka bir yapıda göçmelere neden olabilmektedir (Mutman 2007).



Şekil 3. Kontak enjeksiyonu (Mutman 2007)



Şekil 4. Tünellerde enjeksiyon uygulaması (Anonim a)

d) Kompaksiyon Enjeksiyonu

Kompaksiyon enjeksiyonu en çok kumlarda ve plastik olmayan siltlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemle aşırı oturma problemi olan zeminlerin iyileştirilmesi, yumuşak zeminlerin sıkıştırılarak dayanımlarının artırılması, farklı oturma yapan yapıların rehabilitasyonu ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesi için uygulanmaktadır. Kompaksiyon enjeksiyonuna örnek Şekil 5’de gösterilmektedir.

Başarılı bir enjeksiyon için enjeksiyon karışım kıvamı oldukça önemli olup genellikle düşük viskoziteye sahip karışımlar kullanılır. Ancak kompaksiyon enjeksiyonunda çok katı enjeksiyon karışımı (0-25 mm arası slampa sahip) zemine yüksek basınç altında (2 ile 4 MPa’dır, ancak her bir metrede ortalama 2700 kN/m²’lık basınç yaygın olarak kullanılmaktadır.) enjekte edilir. Enjeksiyonda zemin daneleri karışımın içerisine girmez aynı zamanda karışım da zemin boşluklarında ilerlemez. Zemine enjekte edilen karışım zeminde ilerlemeden enjeksiyon yapılan bölgede giderek büyüyerek bir kütle haline gelir. Enjeksiyon karışımı çok kıvamlı olduğundan çevreleyen zemini deplasmana zorlayarak sıkıştırır. Böylelikle zemine nüfuz edilemeyen enjeksiyon karışımı ampül şeklinde yığılma yaparak katışalır. Enjeksiyon ampülünün boyutu ve şekli, zeminin rijitliği ile dayanımından ve ayrıca enjeksiyon malzemesinin verilme hızından etkilenir.

Kompaksiyon enjeksiyonu sıvısının karışım materyalleri, siltli kum (%10 ile %30’ u 200 No.lu elekten geçen), çimento, uçucu kül, katkı maddesi (akışkanlaştırıcılar, hızlandırıcılar) ve sudan ibarettir. Kompaksiyon enjeksiyonu, zemin türü ve yapısına göre genellikle 2m ile 4m aralığında uygulanmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006).



Şekil 5. Kompaksiyon enjeksiyonu (Anonim b)

e) Konsolidasyon Enjeksiyonu

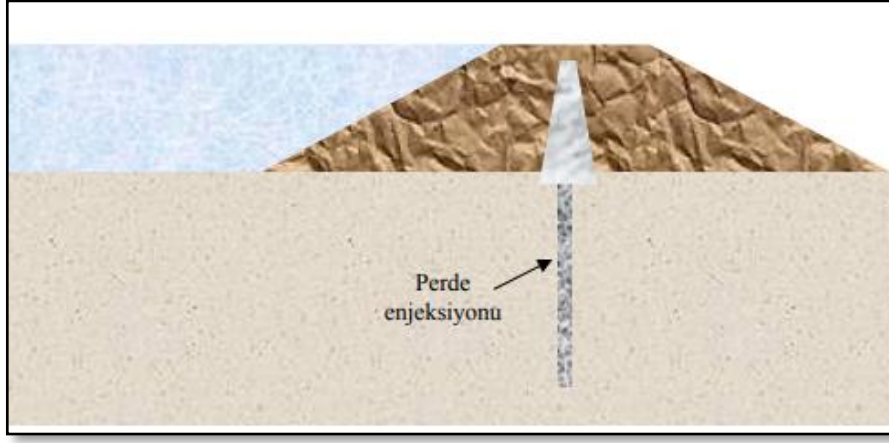
Konsolidasyon enjeksiyonunun başlıca amacı beton çevresindeki kayaçların deformasyonunu azaltarak stabilitesinin sağlanmasıdır. Konsolidasyon enjeksiyonu, kontakt enjeksiyonu tamamlandıktan sonra delinecek araştırma kuyularından alınan karotların değerlendirilmesi sonucunda zayıf kaya koşulları ve sızma problemleri olan bölgelerde yapılması öngörülür (Yeşilnacar 2003).

f) Kaya Enjeksiyonu

Kaya içerisinde bulunan çatlak veya kırıkların enjeksiyon karışımı ile tamamen veya kısmen doldurulması için kullanılan enjeksiyon tekniğidir. Bu tür enjeksiyonlar da kayada yeni çatlaklar oluşturulmaz. Kaya enjeksiyonu ortamın geçirimsizliğini ve rijitliğini artırmak için kullanılır (Mutman 2007).

g) Perde Enjeksiyonu

Perde enjeksiyonu baraj gövdesinin altında ve eksende veya eksene yakın bölgelerde, göllerde, su, petrol ve doğalgaz depolarında sızıntıyı önlemek ve baraj gibi su yapılarında sızma boyunun uzatmak amacıyla yapılan enjeksiyon çeşididir. Baraj gövdesinin altında sızdırmazlık sağlamak amacıyla yapılan enjeksiyona örnek Şekil 6'da gösterilmektedir.



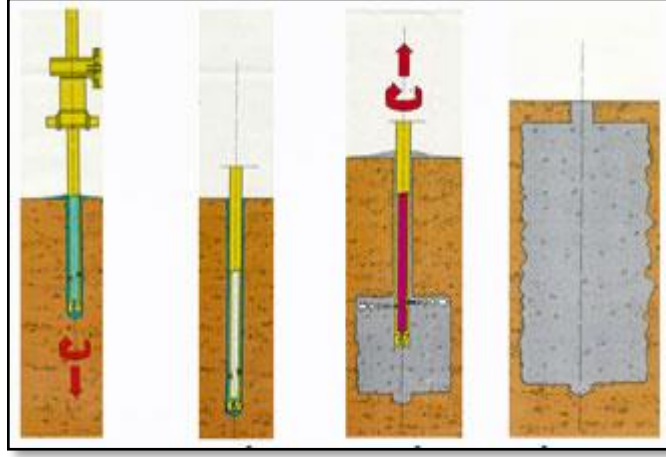
Şekil 6. Perde enjeksiyonu (Mutman 2007)

h) Jet Enjeksiyonu

Jet grout yöntemi 1970’li yılların başında Japonya’da denenmiş ve ülkemizdeki ilk uygulaması da 1980’li yıllarda yapılmıştır (Furuncu 2019). Jet enjeksiyonu diğer enjeksiyon yöntemlerine göre oldukça yeni olmasına karşın çok farklı zemin koşullarında uygulanmakta ve kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamayla zemin iyileştirilmesi ve yapı yüklerinin daha derin tabakalara aktarılması sağlanmaktadır.

Uygulama yapılmadan önce yapıdan gelen yükleri daha sağlam zemine aktarmak için derinlik tasarımı yapılır. Tasarlanan derinliğe indirilen tijlerin ucundaki nozullardan yüksek basınçla (en az 30 MPa) enjeksiyon karışımı (genellikle çimento ve su) zemine enjekte edilirken yüksek basınçlı harç etkisiyle zeminin doğal yapısını bozarak karıştırır. Bu enjekte işlemi ile zemin ile enjeksiyon harcı (karışımı) karışır. Karışım işlemine yardımcı olması bakımından sadece basınçlı hava veya hava ile su enjekte edilebilir. Enjeksiyon sırasında tijler belli bir hızla döndürülerek aşağıdan yukarıya doğru çekilir. Böylelikle zemin harç karışımı silindirik kolonlar oluşturulur (Şekil 7). Oluşturulan kolonun çapı, zemin şartlarına ve jet enjeksiyonunun uygulanış şekline bağlıdır. İri daneli zeminlerdeki kolon çapı ince daneli zeminlerdeki kolon çapına göre genellikle daha büyüktür. Şerbet prizlenmeden önce kolonları örtüştürmek suretiyle, yeraltında duvarlar veya diyaframlar inşa edilebilmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006).

Jet enjeksiyonu ile yapıların altındaki zeminleri iyileştirme, geçirimsizlik sağlayarak hidrolik eğim ve kabarma problemlerini engelleme, şev stabilitesi ve kazı desteği sağlama ve özellikle mevcut temellerin altına girilerek taşıma gücünün artırılması gibi kullanım alanları vardır.



Şekil 7. Jet enjeksiyonu (Anonim c)

Enjeksiyon ile ilgili diğer tanımlar

Enjeksiyon işlemi için yukarıda açıklanan terim ve tekniklere ek olarak uygulama ve literatür de farklı tanımlamalar mevcuttur. Mevcut tanımlar aşağıda yapılmıştır (Anonim 2016).

Dolgu Enjeksiyonu: Tünel, galeri, denge bacası, shaft gibi yapılarda kaplama betonu ile temel kaya arasındaki boşlukları, beton ile çelik kaplama ara yüzeyindeki muhtemel boşlukları, göçük boşluklarını ve TDM ile açılan tünellerde yapılan çeper enjeksiyonu sonrası kalabilecek boşlukları basınçlı enjeksiyonla doldurmaktır.

TDM: Tünel Delme Makinesi (Tunnel Boring Machine-TBM)

Çeper Enjeksiyonu: TDM ile açılan tünellerde segment kaplama ile kaya arasındaki halka şeklindeki boşluğun kalın harçlı karışımla veya ince çakıl ve uygun karışımla doldurulması ya da söz konusu boşluğa konan ince çakıl gercin (5-12 mm) mukavemetini artırmak amacı ile yapılan enjeksiyondur.

Konsolidasyon (Sağlamlaştırma) Enjeksiyonu: Tünel, galeri, denge bacası çevresindeki ve herhangi bir yapının oturacağı temel kayanın iyileştirilmesi amacı ile yapılan enjeksiyondur.

Kapak Enjeksiyonu: Gövde sıyırma kazıları sırasında örselenen temel kayanın iyileştirilmesi amacıyla yapılan enjeksiyondur.

Perde Enjeksiyonu: Baraj, gölet ve regülatör gibi su yapılarında memba-mansap yönünde ve göl alanında olabilecek su kaçaklarını önlemek ve/veya sızma boyunu uzatmak amacı ile yapılan enjeksiyondur.

Bağ Enjeksiyonu: Enjeksiyon galerileri ile bölünmüş perde enjeksiyonlarının birbirlerine bağlanması amacıyla yapılan enjeksiyondur.

Dikiş Enjeksiyonu: Kaplama (beton veya kil blanket) yapılan bölgelerin sınırında enjeksiyon perdesi ile bütünlüğü sağlamak amacıyla yapılan enjeksiyondur.

Derz Enjeksiyonu: I. ve II. faz betonları arasındaki boşlukların doldurulması amacıyla yapılan enjeksiyondur.

Kimyasal Enjeksiyon: Bir veya daha fazla organik (uzun zincirli karbonlar) kimyasal bileşenin hava ve/veya su ile teması sonucunda hacminin birkaç katı şişerek yapılan enjeksiyondur.

Deneme Enjeksiyonu: Bir projede enjeksiyona başlamadan önce, planlanan enjeksiyonun delikler arası mesafe, kademe boyu, enjeksiyon basınçları, karışım oranlarını ve katkı maddelerini belirlemek için yapılan enjeksiyondur.

Kademe: Efektif bir enjeksiyonun yapılabilmesi için kuyu derinliğinin belirli aralıklara bölünmesidir.

Ano: Enjeksiyon işlerinde genellikle her 24 m'lik bölüm ano olarak adlandırılır. Ano boyları proje karakteristikleri ve jeolojik/jeoteknik özelliklere bağlı olarak azaltılabilir veya artırılabilir.

Enjeksiyon Basıncı (Efektif Basıncı): Kademe orta noktasında uygulanması gereken basınçtır.

Manometre Basıncı: Enjeksiyon basıncını elde etmek için kuyu başı manometresinden okunması gereken basınçtır.

Refü: Enjeksiyonu yapılan bir kademenin enjeksiyonuna son vermek için bu kademenin enjeksiyon basıncında ve kabul edilebilen miktarda veya daha az şerbeti yemesi halidir.

Arazide enjeksiyon uygulamaları

a) Yukarıdan Aşağıya Doğru İnen Kademeler Metodu İle Enjeksiyon

Başlangıçta delik kademe boyu kadar delini, yıkanır, basınçlı su deneyi ve enjeksiyonu yapılır. Çimento tam priz almadan delik yıkanır ve takım dışarı alınır. Deliği çevreleyen kayadaki şerbet prizini aldıktan sonra, aynı deliğin ikinci kademesi delinir ve bir yukarıdaki kademede yapılan işlemler tekrarlanır. Böylece kuyunun son kademesine kadar işlemler devam eder (Zaimoğlu 2003).

b) Aşağıdan Yukarı Doğru Çıkan Kademeler Metodu İle Enjeksiyon

Bu metotta delik, projede belirtilen derinliğe kadar delinir, yıkanır ve varsa her kademelerin basınçlı su deneyleri yapılır. Bundan sonra tıkaç en alttaki kademeyi enjekte etmek üzere yerleştirilir ve en alttaki kademelerin enjeksiyonu yapılır. Sonra tıkaç, bir üstteki kademeyi enjekte etmek üzere yukarıya alınır ve aşağıdan yukarıya doğru ikinci kademelerin enjeksiyonu yapılır. Bu işleme kuyu ağzına kadar devam edilir (Zaimoğlu 2003).

c) Çok Safhalı Enjeksiyon

Bu metotta delik, projede belirtildiği üzere delinirken yıkıntı oluyor veya devirdaim suyunun %70 ve daha fazlası kaçıyorsa delme işi durdurulur, bu kısımların üstlerinden lastik tutturularak enjeksiyonları yapılır. Priz müddeti sonunda, delik delme işlemine devam edilir. Aynı durumlar tekrar meydana gelirse, delme işlemi durdurulup o kısımların da enjeksiyonları yapılır. Deliğin projede belirtilen derinliğe kadar delme işlemi bittikten sonra, aşağıdan yukarıya doğru çıkan kademeler metodu ile enjeksiyonu yapılır (Zaimoğlu 2003).

Enjeksiyon karışımı çeşitleri

Enjeksiyon çeşitleri karışımların faz durumlarına göre üç şekilde hazırlanabilir. Enjeksiyon karışımları; süspansiyonlar, emülsiyonlar ve eriyikler olmak üzere üçe ayrılır.

a) Süspansiyonlar: Katı taneciklerin herhangi bir sıvı içerisinde çözünmeden asılı kalmasıyla oluşur. Örneğin çimentolu karışımlar, suda dağıtılmış kil ve kum bu gruba örnek verilebilir.

b) Emülsiyonlar: Birbiri içinde çözünmeyen iki sıvının heterojen dağılması ile oluşur. Bitüm ve su emülsiyonu bu karışıma örnek verilebilir.

c) Eriyikler: İki veya daha çok fazlı maddenin moleküler karışımı ile oluşmuş homojen karışımlardır. Solüsyonlar homojen dağıldığı için içerisinde katı tanecikler yoktur. Eriyik olarak oluşturulmuş karışımların elastisite modülleri (rijitlikleri) sıfırdır. Enjeksiyon türlerinden kimyasal enjeksiyonlar da bu gruba girer. Eriyikler genel olarak iki gruba ayrılır.

- Kolloidal eriyikler: Silika ve lignokrom jel
- Saf eriyikler: Fenolik ve akrilik reçineler, aminoplastlar (Zaimoğlu 2003).

Enjeksiyon karışımının seçimi

Littlejohn (1985) tarafından belirlenen enjeksiyon karışımlarının seçiminde etkili olan parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Geçirimsizlik ve porozite bakımından zemin araştırmaları ve yeterlilik derecesi

- Uygulanacak olan enjeksiyon yöntemi ve enjeksiyon yapılacak sondaj deliğinin tip ve şekli
- Karışımı oluşturan malzemelerin çeşitlilik derecesi ve bulunabilme imkanı
- Karışımın viskozitesinin ısıya ve zamana karşı duyarlılığı
- Arazide istenen stabilitenin sağlanması için yeterli stabilite
- Uygulama esnasında karışımın suya doygunluk derecesi ve buna bağlı olarak karışımın kuruma etkisi ve risk derecesi
- Uygulama esnasında karışımın dayanıklılık özelliği
- Karışımın kimyasal bileşenlerinin çevre ve ekipman bakımından incelenmesi ve toksisite etkisi
- Enjeksiyonlu zeminin uzun süre dayanımı ve geçirimsizliği
- Arazide sağlanan kontrol ve danışmanlık hizmetlerinin yetkinlik derecesi
- Yer altı suyunun kimyasal bileşimi
- Enjeksiyon uygulaması için malzeme temini, depolama, karıştırma ve enjeksiyon gibi işlemleri kapsayan maliyet analizi ile toplam maliyetin belirlenmesi.

Enjeksiyon karışımlarının reolojisi

Genel olarak katı malzemelerin deformasyon, sıvı malzemelerin ise akma özelliklerini ele alan çalışmaların bütünü reoloji adını alır. Enjeksiyon uygulamasının başarılı olması doğrudan karışımların reolojik özellikleri ile ilgilidir. Enjeksiyon karışımlarının reolojik özelliklerini belirleyen başlıca özellikler; karışımların viskozitesi, stabilitesi ve priz süresidir (Zaimoğlu 2003).

a) Viskozite

Viskozite sıvıların akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Zemin boşluklarında ve borularda karışımın akışını etkileyen en önemli iki özellik viskozite ve rijitliktir. Bu özelliklerden karışımın viskozitesi arttıkça karışımların küçük boşluklara girebilme yeteneği ve zeminde katettiği mesafe azalır. Tersine karışımların viskozitesi azaldıkça enjeksiyon basıncı azalmakta ve daha küçük boşluklara nüfuz edip zeminde daha uzak mesafelere gidebilmektedir.

Akışkan çimento esaslı karışım titreşim olmadan tam olarak sıkıştırılabildiğinden, işçilik ve makina maliyetlerini azaltabilir, sıkışmayı (kompaksiyonu) artırabilir ve böylece bir yapısal elemanın kritik kaplama bölgesinin dayanıklılığını artırabilir (Lim *et al.* 2013).

Enjeksiyonda karışımların viskozitesini yansıtan akma sürelerini bulmak için basit bir yöntem olan Marsh hunisi (konisi) ile akma süresi tayin edilmektedir. Bu yöntemde

hazırlanan karışımların, Marsh konisi adı verilen bir kapla ilk 1000 ml geçmesi için geçen süre ölçülür. Temiz su için bu süre 27-28 saniye, dengeli bir karışım için ise yaklaşık 40 saniyedir (Zaimoğlu 2003).

b) Stabilité (Sedimentasyon)

Bir karışımda; katı taneciklerin çökmeye karşı direnç gösterip askıda kalma özelliğine stabilité denir. Sedimentasyon olayı Stokes Yasası ile açıklanabilir. Stokes Yasası küresel danelerin bir sıvı içerisinde çökelmelerinin hızını verir. Bu yasaya göre danelerin sıvı içerisindeki çökme hızı; sıvının birim ağırlığına, viskozitesine, danelerin çapına ve çöken danelerin birim ağırlıklarına göre değişir. Danelerin çapı büyüdükçe çökme hızı da artmaktadır.

Bir karışımın stabilitesi basit bir laboratuvar deneyi ile belirlenebilir. Bunun için hacim ölçekli silindirik kaba konan karışım yaklaşık iki saat dinlendirilir. Çökme tamamlandıktan sonra içerisinde katı tanecik olmayan su kolonu ölçülerek başlangıçtaki hacme oranlanır ve yüzde çökme bulunmuş olur. Karışımlardaki çökme olayı; terleme, kuma, kanama gibi terimlerle de ifade edilmektedir.

Enjeksiyon sırasında karışımın ulaşması için tasarlanan mesafe boyunca karışım içindeki daneler süspansiyon içinde kalıyorsa bu tür karışımlara dengeli karışım denir. Aksine karıştırıcıda harekete geçildikten hemen sonra veya borularda ki türbülans etkisinden kurtulur kurtulmaz çökme başlıyorsa bu tür karışımlara dengesiz karışım adı verilir. Örneğin saf çimento karışımları dengesiz özelliğe sahip olup boru içerisinde yeterice türbülans sağlanamadığı zaman karışımdaki katı tanecikler boruda birikir. Enjeksiyon karışımlarının stabilitesini iyileştirmek için bentonit gibi katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

c) Katılma Süresi

Katılma süresi, karışımlar için akışkanlıklarını kaybettiği süre olarak tanımlanır.

Priz başlama süresi: Çimento ve suyun birleştiği an (sıfır zamanı) ile karışımın katılmaya (plastiklik özelliğini kaybetmeye) başladığı zaman arasında geçen zaman olarak tanımlanır.

Priz sona erme süresi: Çimento ve suyun birleştiği an ile karışımın tamamen katıldığı zaman arasında geçen süre olarak tanımlanır.

Enjeksiyonlu zeminin mukavemetinin artması ve yeraltı suyunun basıncıyla karışımın zeminden uzaklaştırılmasının engellenmesi için karışımlar, uygulamadan sonra belli süre için katılıp dayanım sağlayacak şekilde tasarlanırlar.

Enjeksiyon karışımlarının priz süreleri; zeminde yeraltı suyunun varlığı ile yıkanıp gitmemesi ve tüm boşluklara enjeksiyon materyalinin ulaşması açısından önemlidir. Bu yüzden koşullar ve amaçlara göre optimum priz süresi belirlenmelidir.

Priz sürelerini etkileyen parametreler arasında sıcaklık, rutubet, su/çimento oranı ve katkı maddeleri vardır. Sıcaklığın düşmesi ve su/çimento oranının artması ile priz süresi artmakta, rutubet ile priz gecikmekte ve priz süresi uzamaktadır. Katkı maddelerinin kullanılması ile priz süresi de değişmektedir. Priz süresi Vicat İğnesi deneyi ile belirlenmektedir.

Enjeksiyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri

Çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi istenilen zeminlerde yapılan enjeksiyonun ne derecede başarılı olduğunu belirlemek amacıyla zeminlerin birtakım mühendislik bilgilerinin elde edilmesi gerekir. Aşağıda kısaca bu bilgilerin neler olduğu verilmektedir.

- Karışımların zeminde oluşturduğu değişikliklerin değerlendirilmesi
- Enjeksiyonlu zeminlerin dayanımları
- Enjeksiyonlu zeminlerin geçirimsizlikleri
- Enjeksiyonlu zeminlerin akma özellikleri
- Enjeksiyon karışımının zeminden uzaklaştırılma direnci
- Enjeksiyonlu zeminin dayanıklılığı
- Enjeksiyonlu zeminin çevreye olan etkisi bakımından değerlendirilmesi
- Kaya zeminlerde karışım enjeksiyonunun etkisi (Zaimoğlu 2003).

Donma Çözülme

Dünyada ve ülkemizde pekçok bölgelerde soğuk iklim koşulları etkili olmaktadır. Bu bölgelerde beton, harç, zemin ve kayalar çeşitli fiziksel etkilere maruz kalmaktadırlar. Bu etkiler içinde dayanıklılığa büyük miktarda etki eden tesirlerden biri de donma-çözülmedir. Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemlerin hemen hepsinde ana faktör, su ve beton bünyesindeki boşluklar ile çatlaklar içindeki taşınımdır (Baradan ve Aydın 2013). Donma çözülme olayında en etkili madde sudur. Suyun donması olayı hava sıcaklığının 0 °C'nin altına düşmesi durumunda meydana gelir. Hava sıcaklığının 0 °C'nin üzerine çıkması ile de donan su erimeye başlar. Bu donma-çözünme olayı bir çevrim olarak adlandırılır. Beton, harç, zemin, ve kayaların kılcal boşluklarında bulunan su donma olayı ile yaklaşık olarak hacimce %9 artar. Hacimce genleşen su daha fazla genişleyecek yer bulamayacağı için çevresine basınç yapar. Bu basınç eğer beton, zemin ve kayaların çekme dayanımından daha büyük ise bulunduğu ortamda kılcal çatlakların oluşmasına sebep olur.

Zamanla donma-çözünme çevrimi devam ettikçe yeni kılcal çatlaklar oluşup varolan çatlaklarda büyür.

Serbest su normal şartlar altında 0 °C’de donar. Ancak beton içerisinde bulunan suların tamamı 0 °C’de donmamaktadır. Betondaki suların bünyesinde eriyik olarak bulunabilen tuzlar suyun donma noktasını düşürüp daha düşük sıcaklıklarda donmasına sebep olmaktadır. Betondaki suyun daha düşük sıcaklıklarda donmasına sebep olan bir diğer faktör ise suların bulunduğu boşluk çapıdır. Büyük boşluklarda donan su 0 °C veya 0 °C’ye yakın sıcaklıklarda donarken çok küçük kapiler boşluklarda bulunan su -15 °C veya -20 °C gibi sıcaklıklarda donmaktadır. Jel boşlukları çok küçük oldukları için bu boşluklarda bulunan sular -78 °C gibi çok daha düşük sıcaklıklarda donmaktadırlar. Dolayısıyla betonun içerisinde bulunan suların tek bir donma noktası yoktur (Erdoğan 2007).

Donma-çözülme olayı ile ilk zamanlar betonlarda yüzeydeki agregalar sıyrılırken, kayalarda taş benzeri küçük yapılar ayrılır. Donma-çözülme çevrimi arttıkça artık beton tamamen işlev göremez hale gelebilir. Donma-çözülme çevrim süreci ile taş yüzeyinden bazen küçük parçalar ayrılmakla birlikte, esas etkisi süreç; uzun periyotlar boyunca tekrarlandığında, kayaların parçalanmasına neden olmasıdır. Daha da ilerleyen aşamalarda, kayaçların kalıntı zemine (toprağa) dönüşmesine kadar devam edecektir (İnce 2013).

Yapının servis ömrü boyunca işlevselliğini koruyabilmesi, maruz kalacağı yıpratıcı etkilerin türünün ve şiddetinin tasarım aşamasında belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınmasıyla mümkündür. Donma-çözülme hasarına karşı; yapıyı şiddetli iklim koşullarında su emmeyecek şekilde korumak ve beton dökümünü betonun yapının kurummasına izin verecek şekilde kış mevsiminden önce yapmak gibi basit önlemler alınabilir (Baradan ve Aydın 2013).

Buz çözücü tuzların betona etkisi

Kış aylarında beton yollarda ve kaplamalarda buzlanmayı kaldırmak için sık sık tuzlama yapılmaktadır. Ancak bu tuzlar betona tek başına donma etkisinden daha çok zarar vermektedir. Bu hasar kimyasal mekanizmadan ziyade fiziksel bir mekanizmadan kaynaklıdır. Tuzlama yapıldığında betonun üst kısımları tarafından tuz emilir ve o bölgelerde osmotik basıncın oluşmasına sebep olur. Osmotik basıncın artmasıyla birlikte üst bölgelere doğru bir su akımı başlar. Dolayısıyla tuz donma çözülme etkisini oldukça artırmaktadır. Tuzların bu etkisinin yanında, buz tabakasının üzerinde bulunan tuzlar buz tabakasının erimesiyle önemli derecede termal şok etkisi yaratır. Yüzeyde ve iç bölgede meydana gelen sıcaklık farkından dolayı yüzey çatlakları meydana gelir. Tuz konsantrasyonunun beton derinliğince farklı olması farklı zamanlarda donma çözülme olayına sebep olur. Böylelikle betonda tabaka veya

kabuk halinde bozulmalara sebep olur (Yalçınkaya 2009). Betonda boşluk çaplarının küçültülerek daha geçirimsiz ve dolayısıyla donma çözülme hasarına karşı daha dayanıklı beton üretmek amacıyla hava sürükleyici katkıları kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında kaya tuzlarının enjeksiyon sıvılarına etkisi yanında donma çözünme faktörü ile kaya tuzunun enjeksiyon karışımlarının dayanımlarına olan etkileri incelenmiştir.

XRD, SEM-EDS Analizleri

a) XRD Analizi

Conrad Röntgen tarafından 1895 yılında keşfedilen X ışını keşfedildiği dönemde özellikleri bilinmediğinden dolayı 'X' ışını olarak adlandırılmış ve günümüzde de yine aynı isimle anılmaktadır. Bu ışınlar ışını keşfeden bilim adamının adına itafen Röntgen ışınları da denilmektedir.

Portlantid, hidrate olmamış çimento gibi kristal fazların belirlenmesinde kullanılan X ışınları yaklaşık 0,02 Å ile 100 Å arasında dalga boylarına sahiptir (Gaitero *et al.* 2005).

XRD analizi ile etrenjit, CH (kalsiyum hidroksit), kalsit ve CSH (kalsiyum silikahidrat) gibi farklı hidratasyon ürünleri bu yöntem ile belirlenebilmektedir (Ramachandran 1995).

X ışını kırınımı kristal bir malzeme üzerine gönderilen X ışınlarının kristalin kendine özgü atom düzlemlerine çarparak karakteristik bir düzen içerisinde kırılması esasına dayanan hasarsız analiz yöntemidir.

Kırınım olayı X ışınları ile atomlar arasında meydana gelen bir etkileşim değil bir saçılma olayıdır (Şavaşkan 2007).

Kristal fazlarda meydana gelen kırınım profilleri parmak izi gibi o kristalleri tanımlamaktadır. X-ışınları teknikleri ile bir mineralin kristal sınıfı, birim hücre parametreleri, kristal yapıdaki çeşitli atomların pozisyonları belirlenebilmektedir.

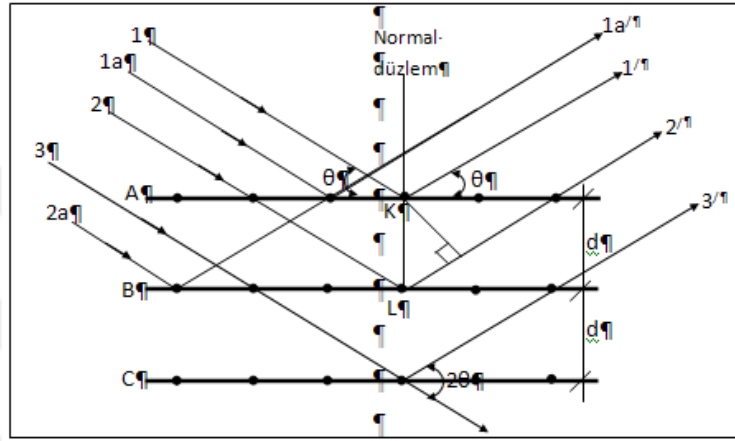
X-Işını Kırınım cihazıyla kayaçların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir.

X ışını demetinin atom düzlemlerine Bragg açısı (Θ) olarak bilinen belirli bir açı ile çarpması durumunda ise yansıyan ışınlar tarafından alınan yol, dalga boyunun (λ) tam katlarına eşit olacağından ışınlar aynı faza sahip olur. Kırınımına uğrayan, yani atom düzlemlerinden yansıyan X ışınlarının aynı fazda olması durumunda ise kırınım deseni oluşur. Dolayısıyla yansıyan ışınların birbirini söndürmemesi için gereken koşul aşağıdaki

bağıntıda verilmiştir. Bu bağıntı Bragg Denklemi ya da Bragg Kanunu olarak adlandırılmaktadır.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Bu bağıntıda n bir tam sayı, θ Bragg açısı (gelen X ışınlarıyla atom düzlemlerinin yaptığı açı), λ kullanılan X ışınının dalga boyu, d atom düzlemleri arasındaki uzaklığı temsil etmektedir. Her bir mineral/kristal için d değeri ile bir düzlemdeki atomların sayısı ve türü aynıdır. X ışınının yansıma prensibi Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. X- ışınının yansıma prensibi (Cullity 1966)

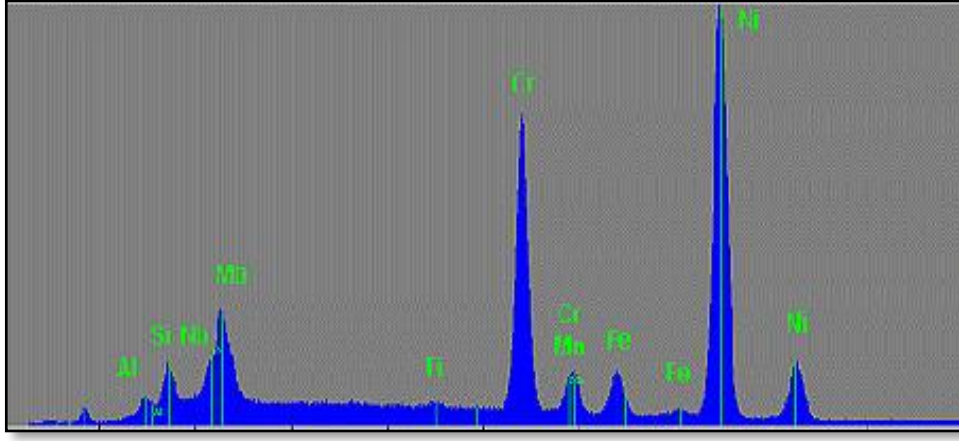
Bragg Denklemi ile farklı minerallerin kimyasal yapılarının bu yöntemle araştırılması ile edinilen tecrübeler sonucunda XRD piklerinin değişken olduğu belirlenmiştir.

Genellikle, yüksek simetrik kristal yapıya sahip malzemeler nisbeten “az sayıda piki olan güçlü yapılar” gösterirken, zayıf kristal simetriye sahip olan malzemeler “çok sayıda piki olan zayıf yapılar” göstermeye meyillidirler (Chatterjee 2001).

b) SEM-EDS Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek enerjili elektronlar ile numune yüzeyinin taranması prensibiyle çalışır. Bu SEM cihazı günümüzde birçok alanda malzemelerin iç yapısına dair bilgi elde etmek amacıyla görüntü almada kullanılan bir cihazdır. Bu çalışmada betonun hidratasyon gelişimine dair bilgi edinebilmek için bu yöntem kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile harç, sıva, taş, seramik, ahşap, kağıt, tekstil, cam, metal ve boya gibi birçok malzemenin analizi yapılır.

EDS analizi ise SEM’e eklenmek suretiyle, elementlerin enerjilerinden faydalanarak kantitatif kimyasal analiz yapmakta kullanılır. Analizlerde EDS analizinde oluşturulan grafiklerden yararlanılır (Şekil 9).



Şekil 9. Örnek bir EDS analizi (Emrem 2015)

Numune içindeki elementlerin yüzdeleri, elementlerin piklerinin altındaki alanlarla orantılıdır.

Konu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Konu ile ilgili Wakeley ve Burkes (1986) tarafından yapılan çalışmada; tuza doymun saf enjeksiyon harcı ile saf kaya tuzu (>%90 halit) ve anhidrit ile oluşturulan numuneler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Numunelerin taşıma mukavemetleri, karışım ve kaya tuzu (halit) veya anhidrit arasında kimyasal bağın oluşup oluşmadığı, enjeksiyon karışımında, arayüzeylerde ve yan kenarlarda klor hareketinin olup olmadığı araştırılmıştır. Çalışmada enjeksiyon karışımlarında çimento, uçucu kül, katkı maddesi, kırılmış tuz, köpük kesici ajan, silika unu ve kum kullanılmıştır. Çalışmada yarı grout yarı saf kaya tuzu ve yarı grout yarı anhidrit ile oluşturulmuş silindir numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler düşey yönde kayalar üzerine yük yüklenerek kırılmıştır. Daha sonra bulunan yük değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada iyon dağılımlarını belirlemek için SEM (Taramalı elektron mikroskobu) ve EDS (X-ray spektrometresi ile enerji dağılımı) analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda halit ve harç ile yapılan numunenin anhidrit ve harç ile yapılan numuneden daha fazla kesme dayanımı verdiği gözlenmiştir. Bu sonuç dikkate alındığında halit ve tuza doymun harç arasında kısmen kimyasal bir bağ olduğu belirtilmiştir. SEM ve EDS analizleri sonucunda halit kayası ile temas yakınlarında yüksek Cl (klor) seviyesi ve arayüzeylerden uzak kısımlarda yüksek Ca (kalsiyum) seviyesi görülmüştür. Harçta arayüzeylere yakın kısımlarda Cl (klor) daha fazladır. Sonuç olarak çalışmada numunelerde iyon göçünün meydana geldiği belirtilmektedir.

Gökdemir (1999) tarafından yapılan bir çalışmada; mikro daneli çimento ile hazırlanan enjeksiyon karışımlarının düşük poroziteli ayırık daneli zeminlere enjekte edilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla farklı oranlarda kum ve çakıl ihtiva eden zemin örnekleri silindirik

kaplara hazırlanmıştır. Bu örneklere farklı S/C oranlarında mikro daneli çimento, bentonit ve akışkanlaştırıcı ihtiva eden enjeksiyon karışımları farklı basınçlar altında enjekte edilmiştir. Enjeksiyon numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda S/C oranı arttıkça dayanımın düştüğü belirtilmiştir. Enjeksiyon basıncının gereğinden az kullanıldığında karışımın iletiminin geciktiği, fazla kullanıldığında ise kelepçelerden su kaçağı olduğu gözlemlendiği ifade edilmiştir. İncelik derecesi fazla olan çimento enjeksiyonlarının basınç dayanımlarının daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Akbulut ve Sağlamer (2002) tarafından yapılan çalışmada; granüler zeminlerin enjekte edilebilirliğinin tahmini için çeşitli parametreler göz önüne alınarak (s/c , P_e (enjeksiyon basıncı), ince dane içeriği, rölatif sıklık) amprik bir formül oluşturmak amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada SP kumu farklı rölatif sıklıklarda hazırlanarak, farklı ince dane içeriklerinde, farklı S/C oranlarında ve farklı basınçlarda çimento bazlı enjeksiyon yapılmaya çalışılmıştır. Deneyler ile enjeksiyon karışımlarının enjekte edilebilirliğine, geçirimsizliklerine ve mukavemetlerine bakılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda bahsedilen parametrelerle enjekte edilebilirliği tahmin etmek için amprik bir formül geliştirilmiştir. N enjekte edilebilirliği göstermek üzere; $N=N_1+k_1N_2+k_2N_3$ yani $[N=D_{10}/d_{90} +k_1*(s/c)/FC+k_2*P_e/D_r]$ şeklinde bir amprik bağıntı oluşturulmuştur. k_1 ve k_2 ye sabitler verildiğinde $N>28$ olması durumunda enjeksiyonun gerçekleşeceği belirtilmektedir. Deneyler sırasında zeminin N'sinin; rölatif sıklığa (D_r), zeminin dane boyutuna (D_{90}), çimento dane boyutuna (d_{90}), enjeksiyon harcının s/c oranına, ince tane içeriğine (FC) (0,6 mm elek altı) ve enjeksiyon basıncına (P_e) bağlı olduğu görülmüştür. Zeminde ki dane büyüklüğü azaldıkça enjeksiyon zorlaşmış hatta imkansız hale geldiği görülmüştür. P_e ve S/C oranındaki artış zeminin N'ni (enjekte edilebilirliğini) artırdığı görülmüştür. Ayrıca S/C oranındaki artış enjeksiyonlu zeminin mukavemetini düşürmüş, yeterince sertleşme sağlayamadığı için zemin numuneleri kalıptan çıkarılamamıştır. S/C oranı arttıkça geçirimsizliğin artmış olduğu görülmüştür. Zemindeki ince dane içeriği arttıkça zeminin N'ini azalmış ve P_e 'nin de arttığı görülmüştür.

Yesilnacar (2003) tarafından yapılan çalışmada GAP' da (Güneydoğu Anadolu Projesi) yer alan Şanlıurfa tünelinin kazı, yapım ve enjeksiyon aşamaları araştırılmıştır. Bu aşamalarda karşılaşılan sorunlar ve çözümleri ile elde edilen tecrübeler de bu çalışma kapsamında yer almaktadır. Araştırma sonucunda tünellerde çimento enjeksiyonunun yerinde uygulamaları ile edinilen tecrübeler sunulmuştur. Çalışma sonucunda tünel yapım esnasında aydınlatmanın iyi bir şekilde yapılması gerektiği belirtilmiştir. Tünel inşaatında delme ve enjeksiyon yapılırken oluşan birikintilerin grout (enjeksiyon karışımı) akışını tıkamaması için grout akışı deliğin aşağı kısmından yukarı kısmına doğru yapılması gerektiği açıklanmıştır.

Ayrıca grout karışımının yoğunluğu ve viskozitesi belirli aralıklarla ölçülmesi gerektiği belirtilmiştir. Enjeksiyon işleminin önce zemin deliklerinde başlatılması daha sonra taç ve yan duvarlara geçilmesi gerektiği açıklanmıştır. Enjeksiyon esnasında en az 500 m yakınlıkta patlatma yapılmaması ifade edilmiştir.

Tan ve Zaimoğlu (2004) tarafından yapılan çalışmada; çimento enjeksiyonu karışımlarının akma süresi ve çökelmeleri üzerinde bentonit, uçucu kül ve silis dumanının etkileri araştırılmak istenmiştir. Bu amaçla belirlenen su/katı oranı için çimento enjeksiyon karışımlarına farklı yüzdelerde bentonit, uçucu kül ve silis dumanı eklenmiştir. Bu karışımlara Marsh hunisi ve çökeltme deneyleri yapılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesi için Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nden faydalanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; bentonit ve silis dumanı arttıkça çökeltme yüzdesinde azalma olduğu görülmüştür. Çökeltme yüzdesi üzerinde en etkili parametrenin silis dumanı olduğu belirtilmiştir. Bentonit ve silis dumanı enjeksiyon karışımlarının akma süresi üzerinde artırıcı yönde etki ediyorken uçucu kül oranının arttıkça akma süresinin azaldığı görülmüştür.

Anagnostopoulos (2005) tarafından yapılan bir çalışmada akrilik reçine ve metil metakrilat ko-polimer emülsiyonunun çimento bazlı enjeksiyon karışımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı S/C oranlarında enjeksiyon karışımlarına, farklı oranlarda kil, akrilik reçine ve metil metakrilat eklenmiştir. Bu karışımların priz süresi, akma süresi, stabilitesi, dayanımı (7, 28, 90 gün), sülfat direnci, elastisite modülü ve ıslak kuru çevrimleri (5-10-15 çevrim) incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kauçukların (akrilik reçine, metil metakrilat) eklenmesi ile enjeksiyon sıvılarının akma sürelerinde çok az bir azalma görülmüştür. Enjeksiyon karışımlarında kauçuklar, tüm S/C oranlarında priz süresinin artmasına ve erken dayanımın azalmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Genel olarak, latekslerin (kauçukların) eklenmesi, basınç dayanımı, stabilite (çökeltme), ıslak-kuru döngülere karşı ve sülfat saldırılarına karşı direnci arttırmaktadır. Saf enjeksiyon karışımlara göre kauçuk modifiye edilmiş karışımların elastisite modülü genellikle daha düşük olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon karışımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde metil metakrilatın etkisinin akrilik reçinenin etkisinden daha belirgin olduğu ifade edilmiştir.

Mutman (2007) tarafından konu ile ilgili benzer bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında laboratuvarında, farklı rölatif sıklıklarda hazırlanan GP ve SP sınıfı zeminlere 100, 150 ve 200 kPa basınçlar ile çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Enjeksiyon da 0,7, 1,0 ve 1,5 olmak üzere üç farklı S/C oranında enjeksiyon karışımları kullanılmıştır. 7 ve 28 gün boyunca kür edilen numunelerin serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda enjeksiyon basıncı değişiminin numunelerin serbest basınç dayanımını etkilemediği

belirtilmiştir. Deneylerde S/C oranının artmasıyla dayanımların düştüğü gözlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise 3 farklı arazinin SPT, CPT ve sismik kırılma deneyleri ile geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Bu 3 araziye S/C oranı 1 olan enjeksiyon harcı, derinliğe bağlı olarak 100, 150 ve 200 kPa basınç ile enjekte edilmiştir. Enjeksiyondan 28 gün sonra arazilerde tekrar zemin incelemesi yapılarak geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Arazilerin V_p ve V_s hızlarında sırasıyla %64 ve %36 artışlar gözlenmiştir. Bu artışlar dikkate alındığında enjeksiyon uygulanan tabakaların yerel zemin sınıfları bir sınıf yükselmiştir.

Tekin ve Mollamahmutoğlu (2010) tarafından yapılan çalışmada ince daneli çimento ile hazırlanmış enjeksiyon karışımlarının enjekte edilebilirliğine bakılmıştır. Ayrıca çalışmada enjekte edilebilirlik ile ilgili literatürde var olan bağıntılar kıyaslanmıştır. Çalışmada farklı S/C oranlarında ince daneli çimento süspansiyonu %30 rölatif sıklığa sahip iri, orta ve ince gradasyona sahip kum numunelerine enjekte edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda S/C oranının azalması ve ince kum yüzdesinin artması ile enjekte edilebilirliğin azaldığı görülmüştür. De-Beer, İncecik ve Ceren, Akbulut ve Sağlamer'e göre verilen bağıntılarda en başarılı sonuç veren bağıntı Akbulut ve Sağlamer'in bağıntılarının olduğu yapılan deneyler ile belirlenmiştir.

Konu ile ilgili yapılan bir başka çalışmada ise beton numuneleri üzerinde sülfat ve klorür (Na_2SO_4 , $NaCl$) tuzlarının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada farklı S/C oranlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler, 60 gün kür süresi sonunda sodyum ve sülfat tuzları etkisi altında eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonucunda sülfat saldırılarına karşı düşük S/C oranlarında ki numunelerin daha iyi direnç gösterdiği belirtilmiştir. Sülfat saldırıları ile numunelerde mikro ve makro çatlakların meydana geldiği ifade edilmiştir. Çözeltideki sülfat iyonlarının konsantrasyonunun arttıkça ortaya çıkabilecek hasarın daha şiddetli olacağı belirtilmiştir. Hem sülfat hem de klorür saldırısına maruz kalan betonda, tek başına sülfat saldırısından daha az zarar verildiği belirtilmiştir. Betondaki klor iyonları, sülfat iyonlarının neden olduğu beton bozulmalarını azaltabileceği ve/veya geciktirebileceği söylenmiştir. Genel olarak dış eğilme yükünün, betonun bozulmasını hızlandıracağı ifade edilmiştir (Yang and Luo 2012).

Özarslan (2012) tarafından yapılan bir çalışmada ince daneli çimento olan ULTRAFİN 12 ile hazırlanan çimento bazlı enjeksiyon karışımlarında katkı malzemesi olarak sodyum bentonit ve silis dumanının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada farklı S/C oranlarında katkılı ve katkısız enjeksiyon karışımları hazırlanmıştır. Karışımlarda sodyum bentonit çimento ağırlığının %1'i kadar, silis dumanı ise çimento ağırlığının %10'u kadar kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar farklı rölatif sıklıktaki iri ve ince kum zemin örneklerine

enjekte edilmek istenmiştir. Enjeksiyonun başarılı olduğu karışımların reolojik özelliklerine, başarılı enjeksiyon numunelerinin mukavemetlerine (1, 3, 7, 14, 28, 56 gün) ve geçiririmsizlik özelliklerine bakılmıştır. Katkısız karışımlarda düşük S/C oranlarında karışımlar stabil olurken yüksek S/C oranlarında stabil olmadıkları belirtilmiştir. Silis dumanının harçlarda çökmeyi engellediği ve sodyum bentonitli karışımların tamamının stabil olduğu belirtilmiştir. Priz sürelerinin silis dumanının eklenmesi ile arttığı, sodyum bentonitin eklenmesi ile azaldığı ifade edilmiştir. Karışımların viskozitelerini silis dumanının genellikle artırdığı, sodyum bentonitin ise oldukça artırdığı açıklanmıştır. Deneylerde enjekte edilebilirlik, S/C oranı arttıkça artmış ve zemin örneklerinin rölatif sıkılığı ve ince dane oranı arttıkça azalmış olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon numunelerinin mukavemet değerlerinin ise silis dumanı ile arttığı gözlenmiştir. Başarılı olan enjeksiyon numunelerinin 1 ay boyunca geçiririmsizlik deney düzeneğinde bekletilmiştir. Bekletilen bu numunelerden hiçbir su çıkışı gözlenmemiş olduğu için numuneler geçirimsiz kabul edilmiştir.

Lim *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada; kum gradasyonunun çimentolu enjeksiyon karışımlarının akma süresi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada enjeksiyon karışımları, farklı S/C oranlarında (0,61, 0,63, 0,65, 0,67), çeşitli elek altı kumlar (1,18 mm, 0,90 mm, 0,60 mm) ile hazırlanmıştır. Karışımlar da sabit çimento/kum oranı (c/k:1) kullanılmıştır. Karışımlar farklı kür sürelerinde (7, 28, 56, 90, 120 gün) hava da ve su da kür edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda S/C oranı arttıkça akma süresinin azaldığı ancak aynı S/C oranlarında kumun dane gradasyonu küçüldükçe akma süresinin arttığı belirtilmiştir. Düşük S/C oranlarında (0,61, 0,63) daha iri gradasyona sahip kumlar ile hazırlanan enjeksiyon karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının daha yüksek elde edildiği belirtilmiştir. Bununla beraber daha yüksek S/C oranlarında (0,65, 0,67) daha ince gradasyona sahip kumlar ile hazırlanan enjeksiyon karışımlarının ise uzun vade de serbest basınç dayanımlarının eğilme ve yarmada çekme mukavemetlerinin yüksek olduğu belirtilmiştir.

Tan vd (2014) tarafından yapılan bir çalışmada çimento bazlı enjeksiyon karışımlarında bentonit, uçucu kül ve silis dumanının katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda bentonit, uçucu kül ve silis dumanı katkılı enjeksiyon karışımları belli bir rölatif sıklıktaki zemin örneklerine enjekte edilmiştir. Enjeksiyon numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları belirlenerek sonuçlar Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda katkılı enjeksiyon karışımlarının saf çimento ve su ile hazırlanan karışımlardan daha yüksek basınç mukavemeti verdiği görülmüştür. Karışımlarda en etkili parametre silis

dumanı olup miktarının arttıkça numunelerin basınç dayanımlarında artış meydana geldiği belirlenmiştir. Enjeksiyon karışımlarında uçucu kül miktarı arttıkça dayanımlarda düşüş gözlenmiştir. Dayanımlar üzerinde en az etkili parametre olarak ise bentonit olduğu belirlenmiştir.

Chegbeleh *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada nükleer atıkların bertarafı için oluşturulan bariyer sistemlerinde oluşan mikro çatlakların enjeksiyonu için farklı konsantrasyonlarda Ethanol-bentonit ve %4 derişik NaCl-bentonit bulamaçları hazırlanmıştır. Hazırlanan bulamaçlar da dane boyutu, geçirimsilik, viskosite ve penetre edilebilirliğe bakılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; tuzun bentonitin şişme özelliğini baskıladığı söylenebilir. Ethanolun enjeksiyon karışımlarının viskozitenin azalmasına sebep olduğu görülmektedir. Bentonitin dane boyutu incelendiğinde tuzlu bulamaçtaki bentonitin dane boyutu ethanollu bulamaca göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Bir başka deyişle tuzlu bulamaçta küçük bentonit parçacıklarının daha fazla dağılmış olduğu ifade edilmiştir. Bunun nedeni ise tuzun etanole kıyasla bentonitin şişme özelliğini bastırmada daha etkili olduğu olarak açıklanmıştır. Hem ethanollu bulamaç hemde NaCl tuzlu bulamaç viskozite deneyinde Newtonyen olmayan özellik göstermişlerdir. Genel olarak bulamaçtaki bentonit miktarı arttıkça bulamacın viskozitesinde artış meydana gelmektedir. NaCl-bentonit bulamacının viskozitesi, ethanol-bentonit bulamacının viskozitesine göre daha az olduğu görülmüştür. Her iki bulamaç mikroçatlaklara enjekte edilse bile NaCl-bentonit bulamacı daha yoğun kıvamda bile enjekte edilebilme kabiliyetinin daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

İnal (2015) tarafından yapılan bir çalışmada; %40, %60, %80 rölatif sıklığa sahip dere kumu ve kırmataş ile hazırlanan zemin örneklerine S/C oranı 0,8, 1,0 ve 1,5 olan enjeksiyon karışımları ile enjeksiyon yapılmıştır. 7 ve 28 gün küre tabi tutulan numunelerin serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin kayma ve basınç dalga hızları kullanılarak elastisite modülleri hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda genel olarak dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numuneleri, kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinden daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon numunelerinde rölatif sıklığın artması ve S/C oranının azalması ile elastisite modülleri değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Hem dere kumu hemde kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin serbest basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasında lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Çelik (2017) tarafından yapılan bir çalışmada; kırmızı çamur atığının çimento bazlı enjeksiyon karışımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımlar hazırlanırken; çimento ağırlığının %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %100'ü oranlarında kırmızı çamur atığı

kullanılmıştır. Enjeksiyon karışımları SP zemin sınıfına ait zemin örneklerine enjekte edilmiştir. Enjeksiyon karışımları ve enjeksiyon numunelerinin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. 28 günlük kür süresi sonunda saf enjeksiyon karışımlarının XRD, SEM VE TG/DTG analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda hem saf enjeksiyon karışımlarının hemde enjeksiyonlu numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarında kırmızı çamur atığı %15 e kadar yükseldikçe dayanımlarının da arttığı görülmüştür. Bu orandan sonra dayanımların azaldığı belirtilmiştir. 28 günlük hidratasyon sonucunda groutlarda (enjeksiyon sıvılarında) XRD, SEM ve TG/DTG analizi sonucunda karışımlarda kırmızı çamur atığı miktarı arttıkça (%20 hariç) portlandit miktarının azaldığı görülmüştür.

Zhang *et al.* (2018) tarafından yapılan çalışmada çimentolu enjeksiyon harçlarının özellikleri üzerinde kilin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla farklı S/C oranlarında çimento ağırlığının farklı yüzdeleri ile kil kullanılarak çimento karışımları hazırlanmıştır. Karışımlar üzerinde çökeltme, viskozite, gerçigenlik, hacimsel rötre, serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Çalışmada kilin katılmasıyla tüm karışımlarda çökeltmenin ve hacimsel rötrenin azaldığı bununla beraber geçirimsizlik, akıcılık ve mukavemetin düştüğü açıklanmaktadır. Çökeltme üzerinde kil dozajının etkisi S/C oranının etkisinden daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Konu ile ilgili yapılan bir başka çalışmada ise enjeksiyon karışımları üzerinde uçucu kül, bentonit, süperakışkanlaştırıcı ve cam suyunun etkileri araştırılmıştır. Çalışmada karışımların su/katı oranı 1 olarak alınmıştır. Karışımlar hazırlanırken öncelikle farklı oranlarda (çimento ağırlığının yüzdesi olarak) uçucu kül (%0-40), bentonit (%0-15) ve süperakışkanlaştırıcı (%0,7) kullanılarak çimento süspansiyonu hazırlanmıştır. Süspansiyon hazırlandıktan sonra ise çimento süspansiyonu ve cam suyu farklı oranlarda (1:1, 2:1 ve 3:1) eklenerek karışımlar tamamlanmıştır. Bu karışımlar üzerinde akışkanlık, yayılma yeteneği, çökeltme, priz süresi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı gibi özellikler araştırılmıştır. Numuneler eğilme ve basınç deneyleri için 28 ve 91 gün küre tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcının taze karışım özelliklerinde yayılma ve akışkanlık yeteneğini artırırken stabiliteyi azalttığı belirlenmiştir. Bentonitin ise taze enjeksiyon karışımlarının yayılma ve akıcılık yeteneğini azaltırken stabilitesini artırdığı gözlenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda sertleşmiş groutların eğilme dayanımları basınç dayanımlarının yanında çok düşük olduğu belirtilmiştir. Numunelerde bentonitin ilavesi ile eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür. Karışımlarda uçucu kül ve bentonit ilavesi numunelerin 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır (Sha *et al.* 2018).

Karadeniz vd (2019) tarafından yapılan bir çalışmada farklı rölatif sıklığa sahip SP zeminlere çimentolu harç yerine sıvı kükürt enjekte edilmiştir. Bu enjeksiyon numunelerinin 1, 7 ve 28 günlük dayanımları ölçülmüştür. Çalışmada sıvı kükürtün enjekte edilmesi ile iyi bir dayanımın elde edildiği açıklanmıştır. Deneylerde rölatif sıklıkla dayanımın pek fazla değişmediği, bu sebeple uygulamada kolaylık sağlanacağı açıklanmıştır. Ayrıca kükürtün hızlı priz almasından dolayı hızın ve dayanımın önemli olduğu inşaat projelerinde kükürt enjekte edilmesinin avantaj sağlanabileceği belirtilmiştir. Tüm numunelerde 28 günlük dayanımların düştüğü açıklanıp bunun sebebinin ısı değişimi ile genleşme büzülme olduğu ifade edilmiştir.

Konu ile ilgili bir başka çalışmada farklı S/C oranlarında kum ve naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak çimento enjeksiyonu karışımları hazırlanmıştır. Karışımlar ile 0,45 ve 0,55 rölatif sıklıkta tanklara yerleştirilmiş olan zeminlerde jet grout kolonları oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda genellikle S/C oranı 1,0 ve 1,5 olan enjeksiyon harçları zemine enjekte edilebilirken, kullanılan naftalin sülfonat esaslı yapı kimyasalının süper akışkanlaştırıcı özelliği ile enjeksiyon harcının işlenebilirliği arttırılmıştır. Buna bağlı olarak S/C oranı 0,60 olan yüksek dozajlı enjeksiyon harcı ile enjeksiyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Kolonların imalatından 28 gün sonra kolonlar zemin içerisinden çıkarılmış ve kolonların boyut analizleri yapılmıştır. Boyut analizi yapılan kolonların homojen olan kısımlarından yeterli sayıda karot numuneleri alınarak mukavemet analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde; S/C oranı aynı olan ve içerisine katkı maddesi konulan kolonların çap ve yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Ancak katkı maddesi kullanımı ile enjeksiyon harcı ile birleşen kum tanelerinin miktarı ve içerisindeki boşluk oranı arttığından, standart basınç deneyi sonucunda kolonların maksimum taşıma kapasitesinin düştüğü görülmüştür (Furuncu 2019).

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çimento

Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosu Erzurum Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Kullanılan çimentoya ait üretici firmadan alınan bazı özellikler Tablo 4'de verilmiştir. Çimento içeriği % 95 portland çimento klinkeri + % 5,0 kalker + % 5 alçıtaşıdır.

Tablo 4. Çimentoya ait bazı özellikler (CEM I 42,5 R)

Standart Kimyasal Özellikler	
Kükürt Trioksit (SO ₃)	≤ % 4,0
Klorür (Cl ⁻)	≤ % 0,1
Kızdırma kaybı	≤ % 5,0
Çözünmeyen kalıntı	≤ % 5,0
Standart Fiziksel Özellikler	
Priz Başlama Süresi	≥ 60 dakika
Genleşme	≤ % 10 mm
2 Günlük Dayanım	≥ 20,0 MPa
28 Günlük Dayanım	≥ 42,5 MPa ≤ % 62,5 MPa
Diğer Özellikler	
Özgül Yüzey (Blaine)	3400 – 3900 cm ² /gr
Yoğunluk	3,00 - 3,15 gr / cm ³

Kum

Deneylerde Erzurum Horasan Kum Ocağı'ndan temin edilen kullanılmıştır. Kum, DSİ Temel Sondaj ve Enjeksiyon Şartnamesi'ne uygun olarak 1,19, 0,29, 0,074 mm elek çaplarına sahip eleklerden elenmiştir.

Kum zeminin fiziksel özellikleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Zemin Mekaniği Laboratuvarında belirlenmiştir. Kullanılan kuma ait bazı fiziksel özellikler Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kuma ait bazı fiziksel özellikler

Fiziksel Özellikleri	Değer	Fiziksel Özellikleri	Değer
γ_s (gr/cm ³)	2,8	D ₃₀ (mm)	0,39
γ_{kmax} (gr/cm ³)		D ₆₀ (mm)	0,62
γ_{kmin} (gr/cm ³)	1,43	C _u	1,59
e _{max} (%)	0,96	C _c	0,94
e _{min} (%)		Zemin Sınıfı *	SP
D ₁₀ (mm)	0,26		

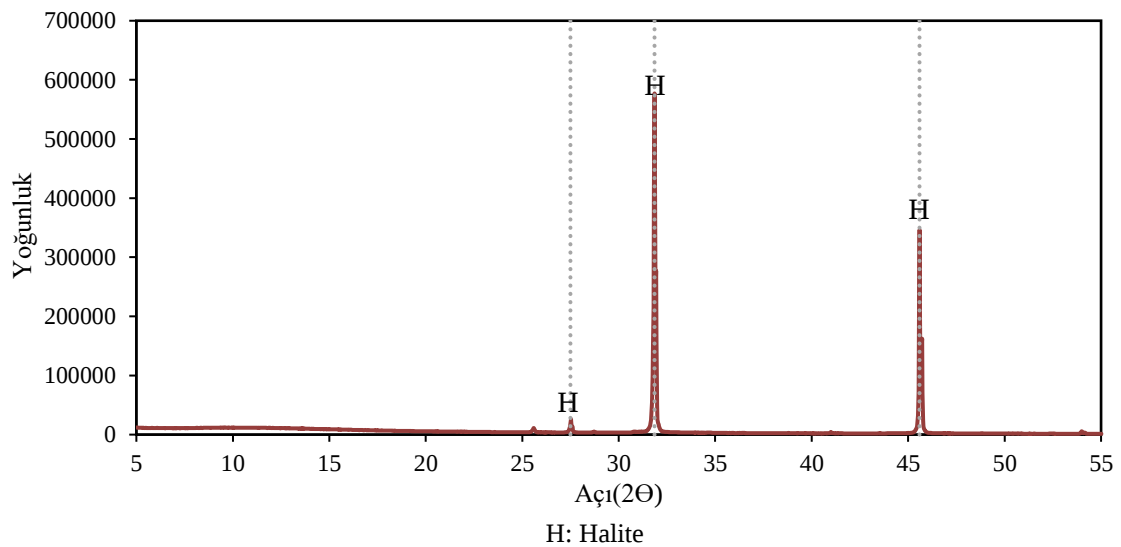
*Birleştirilmiş zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS' ye) göre

Kaya tuzu

Deneylerde kullanılan kaya tuzu Erzurum ilinde faaliyet gösteren özel bir firmadan temin edilmiştir. Kaya tuzunun doygunluğu ASTM D632'ye uygun olarak 36/100 g/ml olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon işleminde kullanılan kaya tuzuna ait bazı fiziksel özellikler Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Zemin Mekaniği Laboratuvarında belirlenmiş olup Tablo 6'da verilmiştir. Deneylerde kullanılan kaya tuzuna ait XRD grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Kaya tuzuna ait bazı fiziksel özellikler

Fiziksel Özellikleri	Değer
γ_s (gr/cm ³)	2,0
γ_{kmax} (gr/cm ³)	1,33
γ_{kmin} (gr/cm ³)	1,11
e _{max} (%)	0,81
e _{min} (%)	0,5

**Şekil 10.** XRD analizi (Kaya tuzu)

Metot

Taguchi optimizasyon yöntemi

Tez çalışmasında su/çimento (S/C) oranı, kum yüzdesi (KY) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesi (KTDY) parametre olarak seçilmiştir. Her bir parametrenin seviyeleri sırasıyla ise 0,8-1,0-1,2-1,4, %0-%25-%50-%100 ve %0-%25-%50-%100 olarak belirlenmiştir. Burada KY kullanılan çimentonun ağırlıkça yüzdesi, KTDY ise karışım suyunun kaya tuzuna doygunluk yüzdesidir. Seçilen parametreler ve seviyeleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Parametreler ve seviyeleri

Seviye	Parametreler		
	F1	F2	F3
	S/C	KY	KTDY
1	0,8	0	0
2	1,0	25	25
3	1,2	50	50
4	1,4	100	100

Çalışmada seçilen parametre ve seviyelerine uygun olan 3 parametrelili 4 seviyeli standart L_{16} ortogonal dizin Tablo 8’de verilmiştir. Bu parametre ve parametre seviyelerine göre hazırlanan ortogonal dizin ise Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 8. Ortogonal dizin L_{16}

L_{16} TAGUCHİ			
Deney No	F1	F2	F3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

Tablo 9. Parametreler ve parametre seviyelerine göre hazırlanan ortogonal dizin

L₁₆ TAGUCHİ			
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)
1	0,8	0	0
2	0,8	25	25
3	0,8	50	50
4	0,8	100	100
5	1,0	0	25
6	1,0	25	0
7	1,0	50	100
8	1,0	100	50
9	1,2	0	50
10	1,2	25	100
11	1,2	50	0
12	1,2	100	25
13	1,4	0	100
14	1,4	25	50
15	1,4	50	25
16	1,4	100	0

Bu ortogonal dizine göre hazırlanan her bir deney karışımının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Marsh hunisi, Vicat iğnesi, Çökelme ve Priz süreleri deneyleri yapılmıştır. Yine bu karışımlardan elde edilen numunelerin mekanik özelliklerini araştırmak için, serbest basınç ve donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme çevrim sayıları 0, 50 ve 100 olarak seçilmiştir. Serbest basınç deneyi donma-çözölmeye çevrimine maruz kalan ve kalmayan farklı kür sürelerindeki (7, 14, 28 ve 90 gün) numuneler için yapılmıştır.

Bahsedilen deneyler yapıldıktan sonra deney sonuçları kullanılarak S/N analizleri ile en iyi veya optimum durum belirlenmiştir. Sonuçların güvenilirliğinin tartışılması ve parametrelerin sonuçlara etki derecelerinin belirlenmesi için varyans (ANOVA) analizleri yapılmıştır. S/N analizleri ve varyans (ANOVA) analizleri, Qualitek-4 isimli bilgisayar programında yapılmıştır.

Enjeksiyon karışımları için yapılan deneyler

Tez çalışmasında deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

Marsh Hunisi deneyi

Enjeksiyon karışımlarının reolojik özelliklerinden olan akma süresi karışımların viskozitesini yansıtan bir özelliktir. Karışımların akma sürelerini belirlemek amacıyla standart Marsh hunisi kullanılmaktadır. Marsh hunisine ait görsel Şekil 11’de gösterilmiştir. Karışımların akma sürelerini (akışkanlığını) ölçmek için alt çapı 5 mm, üst çapı 150 mm, yüksekliği 355 mm, 1750 ml hacme sahip olan standart Marsh hunisi aleti kullanılmıştır. Karışımlar mixerde ASTM C 305-06’ ya uygun olarak hazırlandıktan sonra huni deney düzeneğine sabitlenir. Huninin alt kısmına hacmi 1000 ml olan ölçekli kap yerleştirilir. Huninin alt ucu kapatılır ve huniye torlu kısmından karışım dökülür. Daha sonra huninin alt ucu açılır ve kronometre ile 1000 ml lik hacim doluncaya kadar geçen süre ölçülür. Deney üç kez tekrarlanarak hesaplamalarda aritmetik ortalaması kullanılır. Deney ASTM C939-16 a’ya uygun olarak L_{16} ortogonal dizindeki tüm deney karışımları için yapılmıştır.



Şekil 11. Marsh hunisi

Çökelme (Sedimentasyon) deneyi

Bu deney ile enjeksiyon karışımlarının çökelme yüzdesi (ÇKY) belirlenir. Deney için hazırlanan karışım, düz ve titreşimsiz bir zeminde bulunan 1000 ml’lik hacim bölmeli silindirik cam kaba dökülür. Daha sonra ilk hacim ve zaman not edilir. Belirli zaman aralıklarında karışım içerisindeki çökelen partiküllerin hacimleri ölçülür. Artık herhangi bir hacim değişiminin olmadığı zaman deney sonlandırılır. Çökelme deneyine ait bir görsel Şekil 12’de gösterilmektedir. Çökelme yüzdesi aşağıda verilen formül yardımıyla belirlenir. Deney ASTM C940-16’ya uygun olarak, ortogonal tabloda yer alan her bir deney karışımı için tekrarlanmıştır.

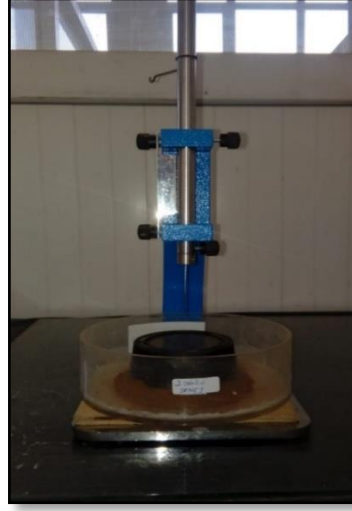
$$\text{ÇKY (\%)} = \frac{V_{ilk} - V_{son}}{V_{ilk}} * 100 \quad (1)$$



Şekil 12. Çökelme deneyi

Vicat iğnesi deneyi

Enjeksiyon karışımlarının priz sürelerini belirlemek için üst çapı 65 mm, alt çapı 75 mm ve yüksekliği 40 mm olan, kesik konisi 300 gr ağırlığında 10 mm çapında Vicat sondası bulunan standart 1 mm çapa sahip Vicat iğnesi deney aleti kullanılmıştır. Vicat iğnesi deney aletine ait görsel Şekil 13’de gösterilmiştir. Hazırlanan harç vakit kaybetmeden vicat kalıbına doldurulduktan sonra spatula yardımıyla düzlenir. Standart iğne düzlenen yüzeye temas haline getirilir ve gösterge sıfır olarak ayarlanır. Karışım kalıba doldurulduktan sonra standart iğnenin 40 mm yükseklikten serbest bırakılarak belli zaman aralıklarında karışıma batma miktarı ölçülür. Bu ölçümler not edilir ve priz başlangıç süresi olarak iğnenin tabandan 3-5 mm yukarıda olduğu an, priz bitiş süresi ise numune yüzeyinde iğnenin iz bıraktığı an (39 mm batma) kabul edilir. Deney ASTM C191’e uygun olarak, ortogonal tablodaki her bir deney karışımı için tekrarlanmıştır.



Şekil 13. Vicat iğnesi deney aleti

Serbest basınç deneyi

Ortogonal tablodaki her bir deneye ait enjeksiyon karışımlarından hazırlanan silindirik numunelerin serbest basınç dayanımlarının belirlenmesi için Atatürk Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan, yükleme hızının ayarlanabildiği, 20 ton kapasiteye sahip, serbest basınç deney aleti kullanılmıştır (Şekil 14). Deney esnasında numunelerde meydana gelebilecek düşey deformasyonları belirlemek için serbest basınç deney aletine deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Deneylerde yükleme hızı 0,8 mm/dk alınmıştır.



Şekil 14. Serbest basınç deney aleti

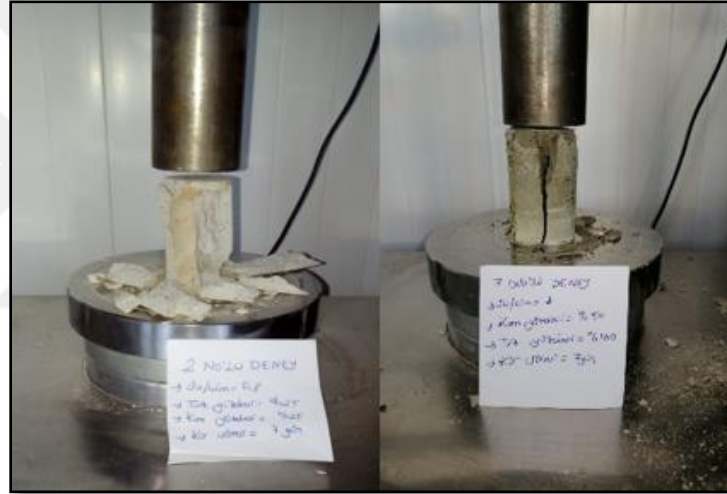
Ortogonal dizin tablosunda bulunan her bir deney için hazırlanan enjeksiyon karışımlarının dayanımlarını belirlemek için 3,8 cm çapında, 7,6 cm yüksekliğinde ve 2 mm kalınlığında çelikten imal edilmiş kalıplar kullanılmıştır. Kalıplarda enjeksiyon karışımları döküldükten sonra su sızmasını önlemek için streç film ve takviye bandı kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda meydana gelebilecek çökelmelerden dolayı oluşacak boy kısılmasını engellemek amacıyla kalıpların üst kısımlarına 3-4 cm yüksekliğinde asetat kağıdı yapıştırılmıştır. Numuneler 2 gün kalıpta bekletilerek prizlerini almaları sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında hava kürüne bırakılmışlardır. Her bir deney karışımından üçer adet numune üretilerek hesaplamalarda ortalamaları kullanılmıştır. Farklı kür süreleri ve donma-çözülme çevrimleri için toplamda 350 adet numune hazırlanmıştır. Kalıptaki enjeksiyon sıvıları Şekil 15’ de prizini alarak kalıptan çıkarılmış numuneler Şekil 16’ da gösterilmiştir. Serbest basınç dayanımında kırılan numunelere örnek Şekil 17’dedir.



Şekil 15. Kalıptaki enjeksiyon sıvıları



Şekil 16. Kalıptan çıkarılmış enjeksiyon sıvısı numuneleri



Şekil 17. Serbest basınç dayanımı deneyinde kırılan numuneler

Donma çözülme deneyi

Taguchi L₁₆ standart tablosuna göre hazırlanan enjeksiyon karışımlarının donma çözülme davranışlarını belirlemek için karışım numuneleri 0, 50 ve 100 donma çözülme çevrimlerine bırakılmışlardır. Deneylerde Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan tamamen otomatik donma-çözülme kabini kullanılmıştır. Donma-çözülme kabini 110 cm x 55 cm x 55 cm boyutlarında olup minimum sıcaklığı -25 °C maksimum sıcaklığı +60 °C olan ve programlanma özelliğine sahip deney aletidir. Çevrim için hazırlanan karışımlar, öncelikle 28 gün hava kürüne bırakılmış ardından donma çözülme kabininde 2 saat -18°C’de donma ve 2 saat +4°C de çözülmeye tabi tutulmuştur. Literatürdeki çalışmalara paralel olarak bu süre, sıcaklıklar ve çevrim sayıları seçilmiştir (Riberio *et al.* 2010; Çavdar 2014; Borinaga-Trevino *et al.* 2014). Numuneler

donma çözülme kabinine bırakılmadan önce su muhtevalarını kaybetmemeleri için vazelinli alüminyum folyo ile sarılmıştır. Donma-çözülme çevrimine bırakılan numuneler Şekil 18’de gösterilmiştir. Çevrim sürelerini tamamlayan enjeksiyon karışım numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 18. Donma çözülme çevrimine bırakılan numuneler

XRD, SEM-EDS analizleri

Enjeksiyon karışım numuneleri, analizleri yapılmak için öğütülerek toz haline getirilmiştir. Toz numunelerin XRD, SEM-EDS analizleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) kurumunda yaptırılmıştır.

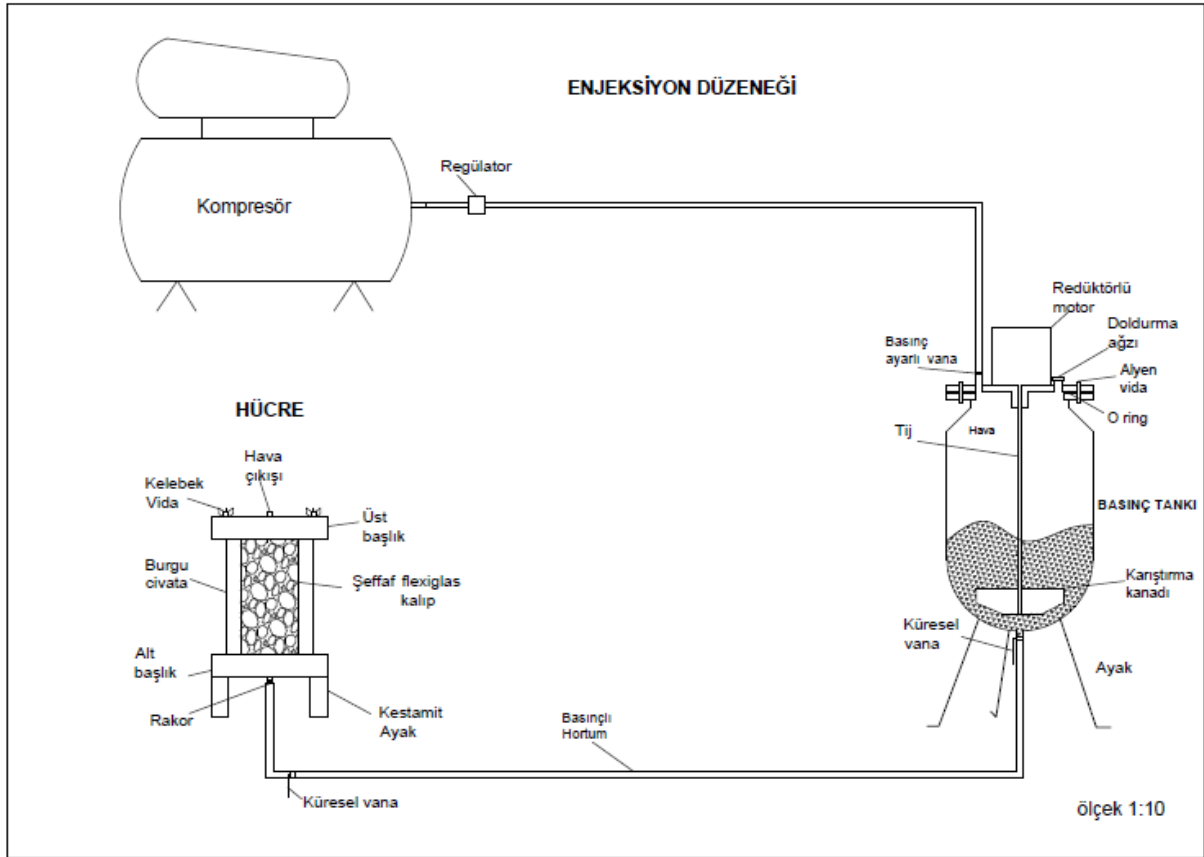
XRD analizlerinde, $-111 < 2\theta < 168^\circ$ ölçüm aralığında, $0,0001^\circ$ açısı ile ölçüm alınan, 4 kW (max 60 kV, max 100 mA) enerji aralığına ve $0,026^\circ$ açısal çözünürlüğe sahip cihaz kullanılmıştır.

SEM-EDS analizlerinde ise, 100 ns/pixel tarama hızında, hızlandırma potansiyeli 0,02-30 kV aralığında değişen, 2-133 Pa aralığında vakum yapabilen, $10\times-1.000.000\times$ kat görüntü büyütme özelliğine sahip cihaz kullanılmıştır.

Enjeksiyon sistemi

Deneylerde Atatürk Üniversitesi BAP-FYL-2020-8223 No.lu proje kapsamında özel olarak yaptırılan enjeksiyon sistemi kullanılmıştır. Enjeksiyon sistemi; kompresör, basınçlı mikser tankı, 12 kanal dağıtıcısı ve hücrelerden oluşmaktadır. Sistemde yer alan kompresör 5 bar basınç kapasitesine sahiptir. Basınçlı mikser 15 bar basınca dayanıklı olup 15 lt kapasiteye sahip, alaşımlı çelik borudan imal edilmiştir. Basınçlı tank içerisinde yer alan mikserin hızı ayarlanabilir olup enjeksiyon işlemi süresince tanka doldurulan karışımın homojen olmasını sağlamaktadır. Sistemdeki 12 kanal dağıtıcısı ile aynı anda 12 numunenin enjekte edilebilmesine imkan tanımaktadır. Sistemde bulunan 12 adet kalıplar 100 mm çapında ve

200 mm yüksekliğinde 3 mm kalınlığa sahip şeffaf flexiglas, kalıplarının alt ve üst başlıkları 200 mm çapında ve 40 mm et kalınlığına sahip olan kestamit malzemesinden basınca dayanıklı olarak imal edilmiştir. Başlıkların örneği daha rijit bir şekilde tutması için dört kenarından 9 mm çapında kelebek vidalar ile sabitlenmiştir. Alt ve üst başlıklara temas eden kısımlarından enjeksiyon sırasında hava ve sıvı sızıntısını önlemek için her iki başlığın iç yüzeylerine 4 mm kalınlıklı lastik contalar yerleştirilmiştir. Sistemi birbirine bağlayan ve enjeksiyon harcının iletimini sağlayan hortumun çapı 2 cm den az tutularak enjeksiyon sırasında oluşabilecek ayrışma önlenmeye çalışılmıştır. Enjeksiyon sistemine şematik çizimi ve fotoğrafı sırasıyla Şekil 19 ve Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 19. Enjeksiyon deney düzeneği



Şekil 20. Enjeksiyon sistemi ve numune kalıpları

Enjeksiyon numunelerinin hazırlanması

Enjeksiyon numuneleri çapı 10cm yüksekliği 20 cm olan silindirik şeffaf kalıpların içerisine %65 rölafte sıkılıkta yerleştirilen kaya tuzunun içerisine ortogonal dizin tablosunda bulunan her bir deney karışımının (enjeksiyon sıvısı) kaya tuzu olmaksızın 1 atm basınç ile ayrı ayrı enjekte edilmesi ile hazırlanması planlanmıştır. Ancak yapılan ön deneyler sonucunda kumun varlığı enjeksiyon sisteminde tıkanmaya sebep olduğu görülmüştür. Bu yüzden enjeksiyon sıvıları farklı oranlarda yalnızca su ve çimentodan oluşturulmuştur. Seçilen oranlar Tablo 10’da verilmiştir. Enjeksiyon işlemine ait bir görsel Şekil 21’de gösterilmiştir. Karışımları enjekte etmek için 1 atm basınç kullanılmıştır. Enjekte edilen kaya tuzu numuneleri kalıplardan çıkarılarak hava ve suda kür edilmiştir. Her bir karışımdan dört numune hazırlanmıştır (Şekil 22). Hava kürüne bırakılan numuneler ortam sıcaklığında (24 °C) 28 gün bekletilmiştir. Su kürüne bırakılan numuneler ise Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan kirece doymuş, çevrim pompalı, sıcaklığı 23 ± 2 °C’de sabit tutan su kürü havuzunda 28 gün bekletilmiştir.

Tablo 10. Kaya tuzlarına enjeksiyon için karışım oranları

KARIŞIM NO.	1.K	2.K	3.K	4.K
S/C	0,8	1,0	1,2	1,4



Şekil 21. Enjeksiyon işlemi



Şekil 22. Enjeksiyonlu kaya tuzu numuneleri

Enjeksiyon numuneleri prizini aldıktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Bu numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra serbest basınç dayanımlarını belirlemek için numunelerin üst yüzeyi kükürt ile başlıklanmıştır. Başlıklama yapıldıktan sonra numuneler Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan kapasitesi 300 ton olan ELE marka Autotest 300 modelli pres makinesi ile dayanım testine tabi tutulmuştur. Çalışmada kırılan numuneler Şekil 23’de gösterilmektedir.



Şekil 23. Kırılan enjeksiyonlu kaya tuzu numuneleri

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Karışımların Reolojik Özellikleri Deney Sonuçları

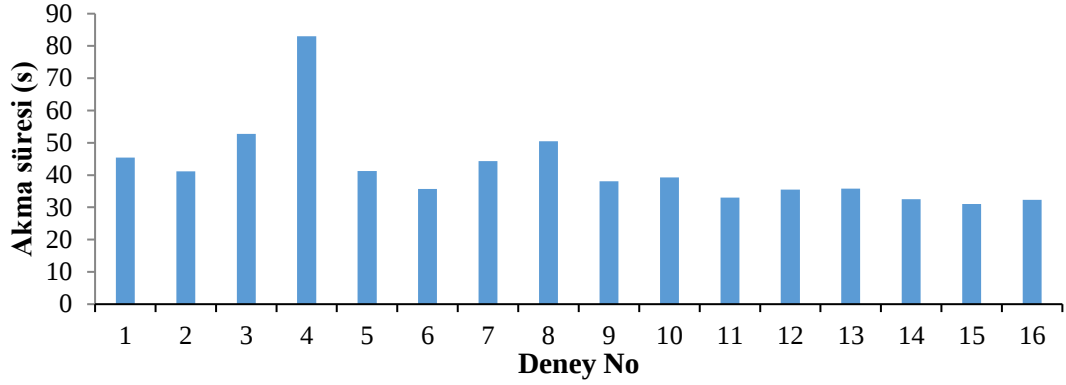
Çalışmada enjeksiyon karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek için Marsh hunisi, Çökelme yüzdesi, Vicat iğnesi deneyleri yapılmış elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Marsh Hunisi deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L_{16} ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımları için elde edilen ortalama akma süreleri deney sonuçları Tablo 11’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 11’de verilen akma süreleri kullanılarak çizilen grafik Şekil 24’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Akma süreleri deney sonuçları

Taguchi Deney Tasarımı (L_{16})				Akma Süresi (s)
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	45,44
2	0,8	25	25	41,15
3	0,8	50	50	52,79
4	0,8	100	100	83,00
5	1,0	0	25	41,29
6	1,0	25	0	35,66
7	1,0	50	100	44,30
8	1,0	100	50	50,47
9	1,2	0	50	38,11
10	1,2	25	100	39,31
11	1,2	50	0	33,04
12	1,2	100	25	35,47
13	1,4	0	100	35,83
14	1,4	25	50	32,54
15	1,4	50	25	31,08
16	1,4	100	0	32,35



Şekil 24. Akma süreleri

Tablo 11 ve Şekil 24 birlikte incelendiğinde en az akma süresi 31,08 sn ile su/çimento oranı 1,4 (4. seviye), kum yüzdesi %50 (3. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin %25 (2. seviye) olduğu 15 No.lu deneyde, en yüksek akma süresinin ise 83 sn ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY'nin %100 (4. seviye) ve KTDY'nin %100 (4. seviye) olduğu 4 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 11'de verilen akma süreleri deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri ve parametrelerin ortalama S/N değerleri sırasıyla Tablo 12 ve Tablo 13'de verilmiştir. S/N oranı, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranıdır (Pınarbaşı 2020). S/N oranı büyüdükçe hedef değere daha çok yaklaşılabacaktır.

Tablo 12. S/N Değerleri (Akma Süresi)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	-33,15
2	0,8	25	25	-32,29
3	0,8	50	50	-34,45
4	0,8	100	100	-38,38
5	1,0	0	25	-32,32
6	1,0	25	0	-31,04
7	1,0	50	100	-32,93
8	1,0	100	50	-34,06
9	1,2	0	50	-31,62
10	1,2	25	100	-31,89
11	1,2	50	0	-30,38
12	1,2	100	25	-31
13	1,4	0	100	-31,08
14	1,4	25	50	-30,25
15	1,4	50	25	-29,85
16	1,4	100	0	-30,2
Ortalama	S/N	Oranı		-32,18

Tablo 13. Ortalama S/N değerleri (Akma süresi)

	Ortalama S/N Etkileri		
	S/C	K	KTD
1. Seviye	-34,57	-32,04	-31,19
2. Seviye	-32,59	-31,37	-31,36
3. Seviye	-31,22	-31,90	-32,60
4. Seviye	-30,35	-33,41	-33,57

Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nde en kısa akma süresinin en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 12 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -29,85 ve -38,38 olarak elde edilmiştir.

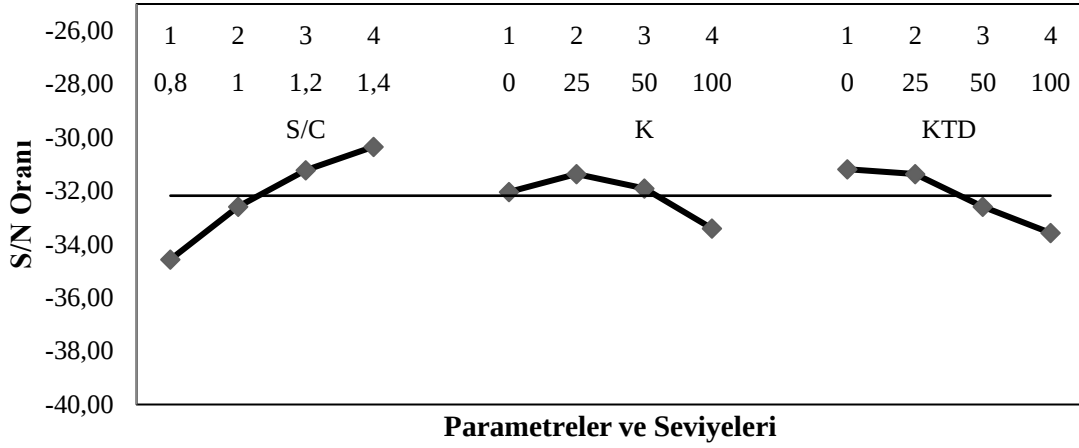
Akma süresine su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (Akma süresi)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	40,60	13,53	17,53	38,28	55,24
K	3	9,07	3,02	3,92	6,75	9,75
KTD	3	15,00	5,00	6,48	12,68	18,30
Diğer	6	4,63	0,77			16,71
Toplam	15	69,30				100,00

Tablo 14'de yer alan 'Diğer' satırı deneylerde kontrol edilemeyen etkenlerin tümünün etki değerini ifade etmektedir. Tablo 14'de ki P oranları incelendiğinde akma süresi üzerinde en etkili parametrenin %55,24 değeri ile S/C'nın, en az etki eden parametrenin ise %9,75 değeri ile K'nın olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin akma süresi üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 25'de gösterilmiştir.



Şekil 25. Parametreler ve seviyeleri - S/N Oranı ilişkisi (Akma süresi)

Tablo 14 ve Şekil 25' in birlikte değerlendirilmesi sonucunda deney karışımlarının akma süreleri üzerindeki en etkili parametrenin S/C oranının olduğu görülmektedir. Parametrelerin akma süresi üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla S/C, KTD ve K'dır.

Şekil 25' den karışımlarda S/C oranının artmasıyla akma süresinde önemli derecede azalmanın olduğu diğer bir deyişle akışkanlığının arttığı veya viskozitenin azaldığı gözlenmektedir. Benzer sonuçlara Gökdemir (1999) ve Özarslan (2012) yapmış olduğu çalışmalarda belirtmektedir. Gökdemir ve Özarslan yapmış oldukları çalışmalarında su/çimento oranının artmasıyla viskozitenin azaldığını ifade etmişlerdir. Deney karışımlarında akma süresi üzerinde kumun 2. seviyesine (%25) kadar olumlu etki gösterirken bu seviyeden sonra genel olarak akma süresi üzerinde artış yönünde etki gösterdiği Şekil 25'de görülmektedir. Bu sonuca kum partikül boyutunun küçük olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Lim *et al.* 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada kum dane çapının küçüldükçe akış süresinin arttığı yönünde bilgi aktarmışlardır. Genel olarak KTDY'nin artmasının karışımların akma süresi üzerinde artırıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Bu sonuca yazarlar kaya tuzu içerisinde olması muhtemel kil partiküllerinin neden olabileceğini düşünmektedir (Anonim 2020).

Optimum akma süresinin belirlenmesi

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum akma süresinin S/C'nin 4. seviyesi, KY'nin 2. seviyesi ve KTDY'nin 1. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen akma süresi 26,75 s olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve akma süresi 30,9 s olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum akma süresi için elde edilen karışım oranları, beklenen akma süresi, doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 15'de verilmiştir.

Tablo 15. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Akma süresi)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Akma Süresi (sn)	%90 güven Aralığı (sn)	Doğrulama Deney Sonucu (sn)
S/C	KY	KTDY			
1,4	25	0	26,75	23,23-30,79	30,9

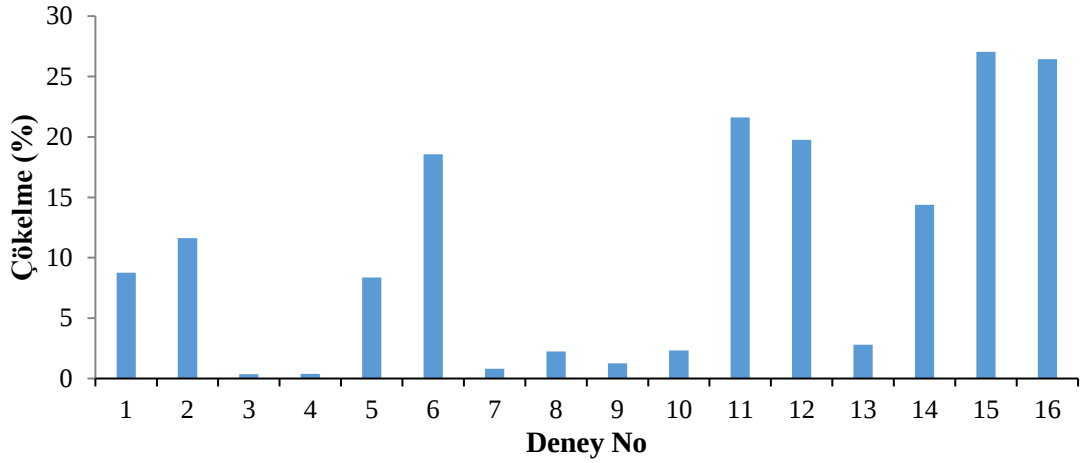
Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde optimum koşullarda beklenen akma süresinin, bu şartlarda yapılan doğrulama deneylerine ait akma süresine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan akma süresi tahmininin (beklenen değer) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir (Zaimoğlu 2003).

Çökelme deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L₁₆ ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımları için elde edilen ortalama çökelme deney sonuçları Tablo 16’da toplu olarak verilmiştir. Tablo 16’da verilen çökelme yüzdeleri kullanılarak çizilen grafik Şekil 26’da gösterilmiştir.

Tablo 16. Çökelme deney sonuçları

Taguchi Deney Tasarımı (L ₁₆)				Çökelme (%)
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	8,75
2	0,8	25	25	11,63
3	0,8	50	50	0,37
4	0,8	100	100	0,38
5	1,0	0	25	8,37
6	1,0	25	0	18,56
7	1,0	50	100	0,81
8	1,0	100	50	2,25
9	1,2	0	50	1,25
10	1,2	25	100	2,31
11	1,2	50	0	21,62
12	1,2	100	25	19,77
13	1,4	0	100	2,81
14	1,4	25	50	14,38
15	1,4	50	25	27,04
16	1,4	100	0	26,44



Şekil 26. Çökeltme yüzdeleri

Tablo 16 ve Şekil 26 birlikte değerlendirildiğinde en az çökeltme yüzdesi 0,37 ile su/çimento oranı 0,8 (1. seviye), kum yüzdesi %50 (3. seviye), kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin %50 (3. seviye) olduğu 3 No.lu deneyde, en büyük çökeltme yüzdesinin ise %27,04 ile S/C oranı 1,4 (4. seviye), KY'nin %50 (3. seviye) ve KTDY'nin %25 (2. seviye) olduğu 15 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 16'da verilen çökeltme deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 17'de parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 17. S/N değerleri (Çökeltme Yüzdesi)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	-18,84
2	0,8	25	25	-21,32
3	0,8	50	50	8,64
4	0,8	100	100	8,40
5	1,0	0	25	-18,46
6	1,0	25	0	-25,37
7	1,0	50	100	1,83
8	1,0	100	50	-7,04
9	1,2	0	50	-1,94
10	1,2	25	100	-7,27
11	1,2	50	0	-26,7
12	1,2	100	25	-25,96
13	1,4	0	100	-8,98
14	1,4	25	50	-23,16
15	1,4	50	25	-28,64
16	1,4	100	0	-28,45
Ortalama	S/N	Oranı		-13,95

Tablo 18. Ortalama S/N değerleri (Çökelme yüzdesi)

	Ortalama S/N Etkileri		
	S/C	K	KTD
1. Seviye	-5,78	-12,05	-24,87
2. Seviye	-12,26	-19,28	-23,58
3. Seviye	-15,48	-11,22	-5,88
4. Seviye	-22,30	-13,25	-1,50

Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nde en küçük çökelme yüzdesinin en iyi durum olduğu düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 17 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -28,64 ve 8,64 olarak elde edilmiştir.

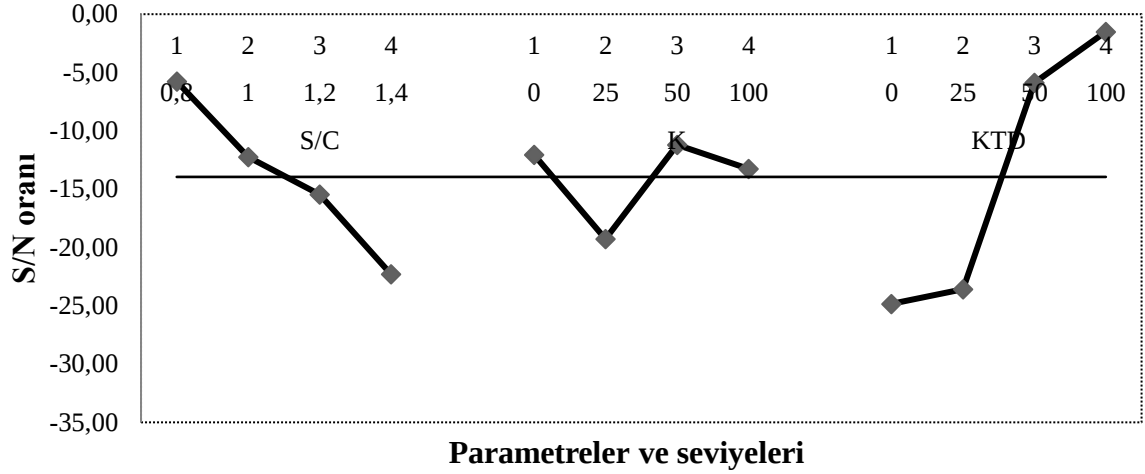
Çökelme miktarına su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 19'da verilmiştir.

Tablo 19. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (Çökelme yüzdesi)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	545,27	181,76	9,71	489,10	19,88
K	3	151,58	50,53	2,70	95,41	4,023
KTD	3	1653,52	551,17	29,44	1597,35	65,07
Diğer	6	112,34	18,72			11,02
Toplam	15	2462,70				100,00

Tablo 19'da ki P oranları incelendiğinde çökelme yüzdesi üzerinde en etkili parametrenin KTD (%65,07), az etkili olan parametrenin ise K'nın (%4,023) olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin çökelme yüzdesi üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 27. Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (Çökeltme)

Tablo 19 ve Şekil 27'nin birlikte incelenmesi sonucunda deney karışımlarının çökeltme yüzdesi üzerindeki en etkili parametrenin KTDY'nin olduğu görülmektedir. Parametrelerin çökeltme yüzdesi üzerindeki etki önem sırası KTD, S/C ve K şeklindedir. Deney karışımlarında su/çimento oranının artmasıyla çökeltmenin arttığı gözlenirken, kaya tuzuna doygunluğun artmasıyla çökeltme yüzdesinin azaldığı Şekil 27'den anlaşılmaktadır. Zang *et al.* tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada enjeksiyon harçlarında S/C oranının düşük olması ve kil oranının artmasının harcın stabilitesini artırdığı belirtilmiştir. Zhang *et al.*'ın ifade etmiş oldukları bu sonuç tez çalışma sonucu ile paralellik arz etmektedir. Deney karışımlarında kum yüzdesinin 2. seviyesine (%25) kadar çökeltmenin arttığı bu seviyeden sonra genel olarak azaldığı görülmektedir.

Optimum çökeltme yüzdesinin belirlenmesi

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum çökeltme yüzdesinin S/C'nin 1. seviyesi, KY'nin 3. seviyesi ve KTDY'nin 4. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen çökeltme yüzdesi %0,37 olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve çökeltme yüzdesi %0,34 olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum çökeltme yüzdesi için elde edilen karışım oranları, beklenen çökeltme yüzdesi, doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Çökeltme Yüzdesi)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Çökeltme (%)	%90 güven Aralığı (%)	Doğrulama Deney Sonucu (%)
S/C	KY	KTDY			
0,8	50	100	0,37	0,19-0,75	0,34

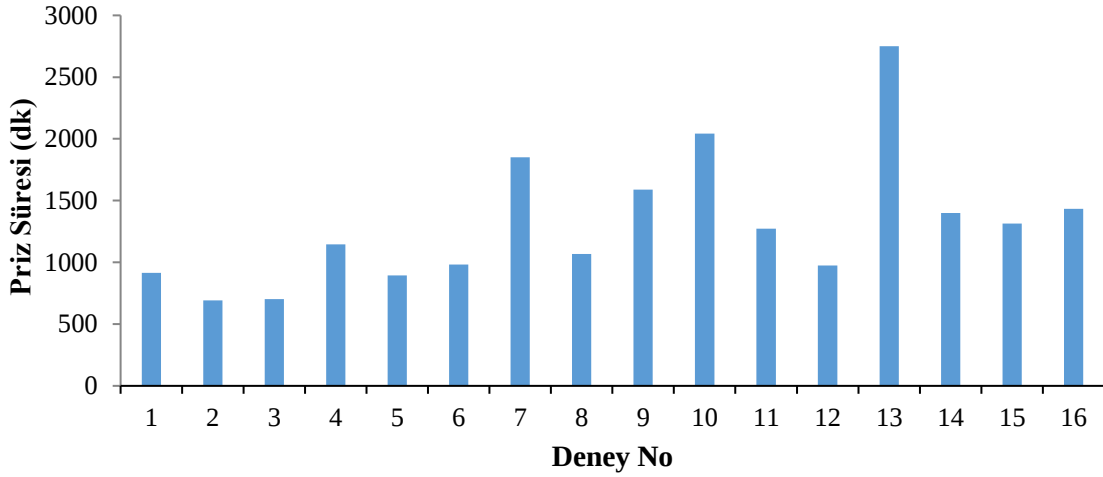
Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde optimum koşullarda beklenen çökelme yüzdesinin, bu şartlarda yapılan doğrulama deneylerine ait çökelme yüzdelerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan çökelme yüzdesi tahmininin (beklenen değerin) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.

Priz süresi deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L_{16} ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımları için elde edilen ortalama priz süresi değerleri Tablo 21’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 21’de verilen priz süresi değerleri kullanılarak çizilen Priz süreleri grafiği Şekil 28’de gösterilmiştir.

Tablo 21. Priz süresi deney sonuçları

Taguchi Deney Tasarımı (L_{16})				Priz Süresi (dk)
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	914
2	0,8	25	25	693
3	0,8	50	50	702
4	0,8	100	100	1147
5	1,0	0	25	894
6	1,0	25	0	982
7	1,0	50	100	1851
8	1,0	100	50	1067
9	1,2	0	50	1589
10	1,2	25	100	2042
11	1,2	50	0	1273
12	1,2	100	25	975
13	1,4	0	100	2751
14	1,4	25	50	1400
15	1,4	50	25	1313
16	1,4	100	0	1434



Şekil 28. Priz süreleri

Tablo 21 ve Şekil 28 incelendiğinde en düşük priz süresi 693 dk ile su/çimento oranı 0,8 (1. seviye), kum yüzdesi %25 (2. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin % 25 (2. seviye) olduğu 2 No.lu deneyde, en büyük priz süresi ise 2751 dk ile S/C oranı 1,4 (4. seviye), K'nın bulunmadığı (% 0) (1. seviye) ve KTDY'nin %100 (4. seviye) olduğu 13 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 21'de verilen priz süreleri deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 22'de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 23'de verilmiştir.

Tablo 22. S/N değerleri (Priz Süresi)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	-59,22
2	0,8	25	25	-56,81
3	0,8	50	50	-56,93
4	0,8	100	100	-61,19
5	1,0	0	25	-59,03
6	1,0	25	0	-59,84
7	1,0	50	100	-65,35
8	1,0	100	50	-60,56
9	1,2	0	50	-64,02
10	1,2	25	100	-66,2
11	1,2	50	0	-62,09
12	1,2	100	25	-59,78
13	1,4	0	100	-68,79
14	1,4	25	50	-62,92
15	1,4	50	25	-62,36
16	1,4	100	0	-63,13
Ortalama	S/N	Oranı		-61,77

Tablo 23. Ortalama S/N değerleri (Priz süresi)

	Ortalama S/N Etkileri		
	S/C	K	KTD
1. Seviye	-58,54	-62,76	-61,07
2. Seviye	-61,19	-61,44	-59,50
3. Seviye	-63,02	-61,68	-61,11
4. Seviye	-64,30	-61,17	-65,38

Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nde en kısa priz süresinin en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 22 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -68,79 ve -56,81 olarak elde edilmiştir.

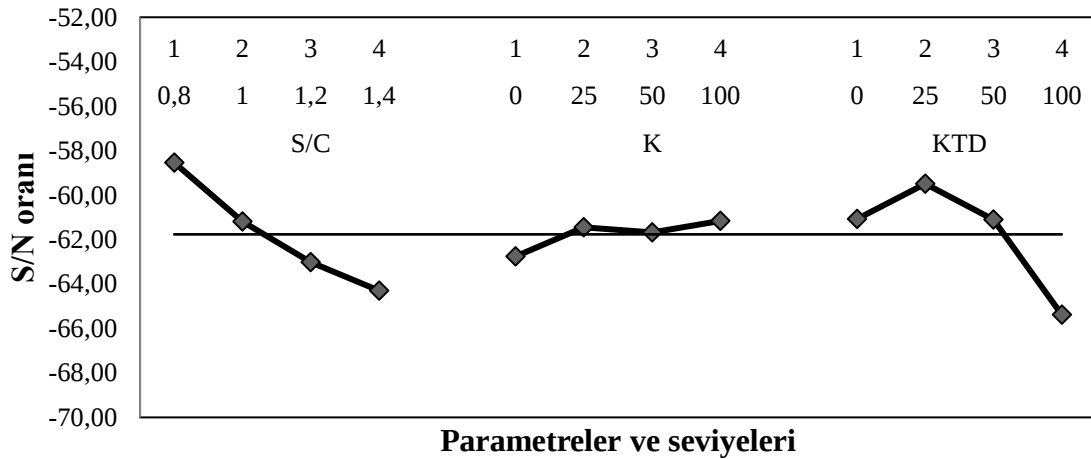
Priz süresine su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 24'de verilmiştir.

Tablo 24. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (Priz Süresi)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	75,06	25,02	33,74	72,83	44,97
K	3	5,87	1,96	2,64	3,64	2,25
KTD	3	76,57	25,52	34,42	74,35	45,91
Diğer	6	4,45	0,74			6,87
Toplam	15	161,94				100,00

Tablo 24'de ki P oranları incelendiğinde priz süresi üzerinde en etkili ve en az etkili olan parametrelerin sırasıyla KTD (%45,91), K'nın (%2,25) olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin priz süresi üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 29'da gösterilmiştir.

**Şekil 29.** Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (Priz süresi)

Tablo 24 ve Şekil 29'un birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışımların priz süreleri üzerinde en etkili parametrenin KTDY'nin olduğu görülmektedir. Parametrelerin priz süresi üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla KTD, S/C ve K' dır.

Deney karışımlarında S/C oranının artmasıyla priz süresinde önemli artmanın olduğu Şekil 29'da açıkça gözlenmektedir. Benzer sonuca Özarıslan (2012) yapmış olduğu çalışmada su/çimento oranının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş sürelerinin artış gösterdiğini ifade ederek ulaşmıştır. Aynı şekilden karışımlarda K'nın eklenmesiyle genel olarak priz süresinin azaldığı anlaşılmıştır. KTDY'nin 2. seviyesinden (%25) sonra artmasının karışımların priz sürelerinin artırdığı görülmektedir.

Optimum priz süresinin belirlenmesi

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum priz yüzdesinin S/C'nin 1. seviyesi, KY'nin 4. seviyesi ve KTDY'nin 2. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen priz süresi 607 dk olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve priz süresi 669 dk olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum priz süresi için elde edilen karışım oranları, beklenen priz süresi, doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 25'de verilmiştir.

Tablo 25. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (Priz süresi)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Priz Süresi (dk)	%90 güven Aralığı (dk)	Doğrulama Deney Sonucu (dk)
S/C	KY	KTDY			
0,8	100	25	607	529 - 697	669

Tablo 25 incelendiğinde optimum karışım oranları kullanılarak elde edilen priz sürelerinin, bu koşullarda beklenen priz sürelerine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan priz süresi deneylerinden beklenen değerin doğru olduğunu ve parametreler arasında önemli bir iç etkileşimin olmadığını belirtmektedir.

Karışımların Mekanik Özellikleri Deney Sonuçları

Çalışmada enjeksiyon karışımlarının mekanik özelliklerini belirlemek için 7, 14, 28 ve 90 günlük serbest basınç dayanımı deneyleri ile 0, 50 ve 100 donma çözülme çevrimi sonrası serbest basınç deneyleri yapılmış elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

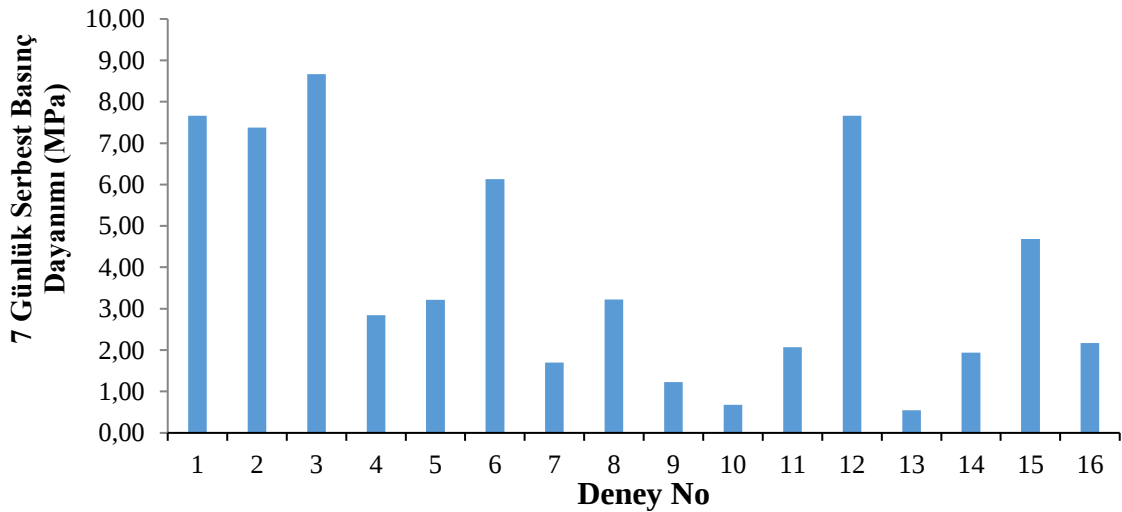
Karışımların 7 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L₁₆ ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımları için elde edilen 7 günlük ortalama serbest basınç deney sonuçları Tablo 26'da

toplu olarak verilmiştir. Tablo 26’da verilen serbest basınç dayanımları (7 günlük) kullanılarak çizilen grafik Şekil 30’da gösterilmiştir.

Tablo 26. Serbest basınç dayanım değerleri (7 günlük)

Deney No	Taguchi Deney Tasarımı (L16)			Serbest Basınç Dayanımı (MPa)
	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	7,67
2	0,8	25	25	7,38
3	0,8	50	50	8,67
4	0,8	100	100	2,85
5	1,0	0	25	3,21
6	1,0	25	0	6,13
7	1,0	50	100	1,70
8	1,0	100	50	3,22
9	1,2	0	50	1,23
10	1,2	25	100	0,68
11	1,2	50	0	2,07
12	1,2	100	25	7,66
13	1,4	0	100	0,54
14	1,4	25	50	1,94
15	1,4	50	25	4,68
16	1,4	100	0	2,17



Şekil 30. 7 günlük serbest basınç dayanımı

Tablo 26 ve Şekil 30 beraber incelendiğinde en küçük serbest basınç dayanımının 0,54 MPa ile su/çimento oranı 1,4 (4. seviye), kum yüzdesi %0 (1. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin % 100 (4. seviye) olduğu 13 No.lu deneyde, en büyük serbest basınç dayanımının ise 8,67 MPa ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY %50 (3. seviye) ve KTDY’nin %50 (3. seviye) olduğu 3 No.lu deneyde elde edilmiştir.

Tablo 26’da verilen serbest basınç dayanımı deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 27’de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 27. S/N değerleri (7 günlük)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	17,69
2	0,8	25	25	17,35
3	0,8	50	50	18,76
4	0,8	100	100	9,08
5	1,0	0	25	10,14
6	1,0	25	0	15,4
7	1,0	50	100	4,6
8	1,0	100	50	10,16
9	1,2	0	50	1,77
10	1,2	25	100	-3,45
11	1,2	50	0	6,31
12	1,2	100	25	17,67
13	1,4	0	100	-5,29
14	1,4	25	50	5,57
15	1,4	50	25	13,39
16	1,4	100	0	6,71
Ortalama	S/N	Oranı		9,12

Tablo 28. Ortalama S/N değerleri (7 günlük)

Ortalama S/N Etkileri			
	S/C	K	KTD
1. Seviye	15,72	6,08	11,59
2. Seviye	10,13	8,78	14,64
3. Seviye	5,57	10,76	9,06
4. Seviye	5,09	10,90	1,24

Taguchi Optimizasyon Yöntemi’nde en yüksek serbest basınç dayanımının en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 27 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -5,29 ve 18,76 olarak elde edilmiştir.

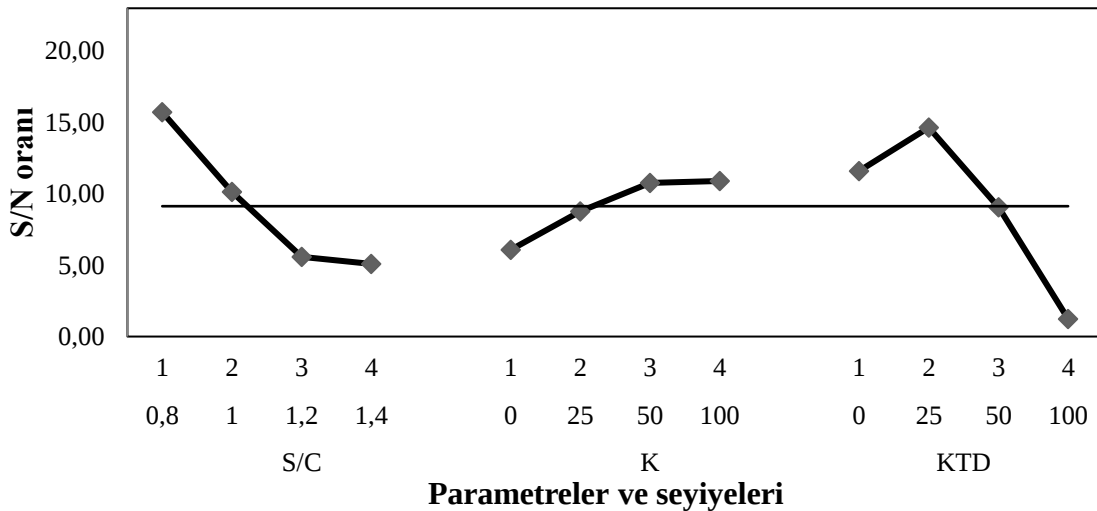
7 günlük serbest basınç dayanımına su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 29’da verilmiştir.

Tablo 29. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (7 günlük)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	293,33	97,78	6,73	249,74	29,87
K	3	61,01	20,34	1,40	17,42	2,08
KTD	3	394,64	131,55	9,05	351,05	41,98
Diğer	6	87,18	14,53			26,07
Toplam	15	836,17				100,00

Tablo 29’da ki P oranları incelendiğinde 7 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin %41,98 değeri ile KTD’nin, en az etki eden parametrenin ise %2,08 değeri ile K’nın olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin 7 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 31’de gösterilmiştir.

**Şekil 31.** Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (7 günlük)

Tablo 29 ve Şekil 31’in birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışımların 7 günlük serbest basınç dayanımları üzerinde en etkili parametrenin KTD’nin olduğu görülmektedir. Parametrelerin 7 günlük serbest basınç dayanımları üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla KTD, S/C ve K’dır.

7 günlük serbest basınç dayanımında su/çimento oranının artmasıyla azalmanın meydana geldiği Şekil 31’den anlaşılmaktadır.

Gökdemir (1999) yapmış olduğu çalışmada su/çimento oranının artmasıyla serbest basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar çalışmanın sonucuyla benzerlik arz etmektedir. Yine aynı şekilden deney karışımlarında KY’nin artmasıyla serbest basınç

dayanımında genel olarak artma olduğu anlaşılmaktadır. Lim *et al.* 2013’de yüksek işlenebilirlikte olan enjeksiyon karışımlarının ince agregaların kullanılması durumunda daha yüksek dayanım verdiğini belirtmiştir. Bu sonucun çalışma sonucuyla paralellik arzettiği görülmektedir. Öte yandan 7 günlük serbest basınç dayanımının KTDY’nin 2. seviyesine (%25) kadar artma bu seviyeden sonra ise azalma eğiliminde olduğu Şekil 31’den anlaşılmaktadır. Buna sebep KTDY’nin 2. seviyesine kadar (%25) hidratasyonu hızlandırması, bu seviyeden sonra azaltması gösterilebilir. Mohammed *et al.* ‘ın 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada deniz suyu ile üretilen betonlarda erken dayanımın musluk suyu ile üretilen betonların dayanımından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun deniz suyunun hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırması olarak açıklamışlardır. Çalışmanın sonucu ile bu sonuç paralellik göstermektedir.

Optimum serbest basınç dayanımının belirlenmesi (7 günlük)

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile 7 günlük serbest basınç dayanımının S/C’nin 1. seviyesi, KY’nin 4. seviyesi ve KTDY’nin 2. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen 7 günlük serbest basınç dayanımı 14,11 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve 7 günlük serbest basınç dayanımı 10,44 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum 7 günlük serbest basınç dayanımı için elde edilen karışım oranları, beklenen serbest basınç dayanımı (7 günlük), doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 30’da verilmiştir.

Tablo 30. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (7 günlük)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Basınç Dayanım (MPa)	%90 güven Aralığı (MPa)	Doğrulama Deney Sonucu (MPa)
S/C	KY	KTDY			
0,8	100	25	14,11	7,66-26,00	10,44

Tablo 30 incelendiğinde optimum deney koşulları ile oluşturulan numunelerin 7 günlük serbest basınç dayanım sonuçları ile optimum koşullardan beklenen değerlerin yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan serbest basınç dayanımı tahmininin doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşimin olmadığını göstermektedir.

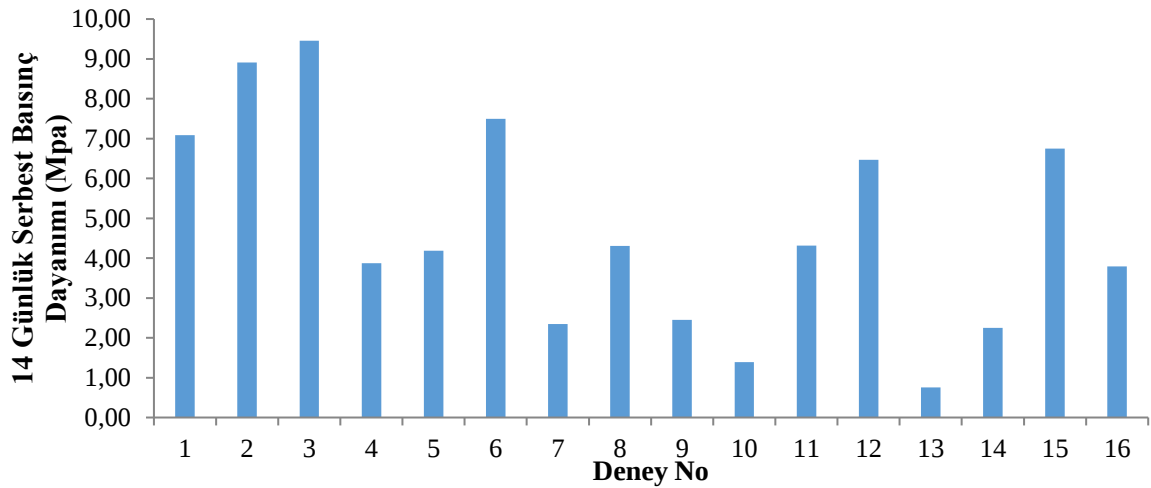
Karışımların 14 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L₁₆ tablosuna göre hazırlanan karışımlar için elde edilen 14 günlük ortalama serbest basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 31’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 31’de verilen serbest basınç dayanımları (14 günlük) kullanılarak çizilen serbest basınç grafiği Şekil 32’de gösterilmiştir.

Tablo 31. Serbest basınç dayanım değerleri (14 günlük)

Deney No	Taguchi Deney Tasarımı (L16)			Serbest Basınç Dayanımı (MPa)
	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	7,09
2	0,8	25	25	8,91
3	0,8	50	50	9,45
4	0,8	100	100	3,87
5	1,0	0	25	4,19
6	1,0	25	0	7,49
7	1,0	50	100	2,35
8	1,0	100	50	4,30
9	1,2	0	50	2,45
10	1,2	25	100	1,39
11	1,2	50	0	4,31
12	1,2	100	25	6,47
13	1,4	0	100	0,76
14	1,4	25	50	2,25
15	1,4	50	25	6,75
16	1,4	100	0	3,80



Şekil 32. 14 günlük serbest basınç dayanımı

Tablo 31 ve Şekil 32 birlikte incelendiğinde en düşük serbest basınç mukavemetinin 0,76 MPa ile su/çimento oranı 1,4 (4. seviye), kum yüzdesi %0 (1. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin % 100 (4. seviye) olduğu 13 No.lu deneyde, en yüksek serbest basınç dayanımı ise 9,45 MPa ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY’nin %50 (3. seviye) ve KTDY’nin %50 (3. seviye) olduğu 3 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 31’de verilen serbest basınç dayanımı deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 32’de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 33’de verilmiştir.

Tablo 32. S/N değerleri (14 günlük)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	17
2	0,8	25	25	18,9
3	0,8	50	50	19,51
4	0,8	100	100	11,75
5	1,0	0	25	12,39
6	1,0	25	0	17,48
7	1,0	50	100	7,42
8	1,0	100	50	12,67
9	1,2	0	50	7,8
10	1,2	25	100	2,78
11	1,2	50	0	12,65
12	1,2	100	25	16,22
13	1,4	0	100	-2,42
14	1,4	25	50	6,83
15	1,4	50	25	16,56
16	1,4	100	0	11,57
Ortalama	S/N	Oranı		11,82

Tablo 33. Ortalama S/N değerleri (14 günlük)

Ortalama S/N Etkileri			
	S/C	K	KTD
1. Seviye	16,79	8,69	14,68
2. Seviye	12,49	11,50	16,02
3. Seviye	9,86	14,03	11,70
4. Seviye	8,13	13,05	4,88

Taguchi Optimizasyon Yöntemi’nde maksimum serbest basınç dayanımının en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 32 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -2,42 ve 19,51 olarak elde edilmiştir.

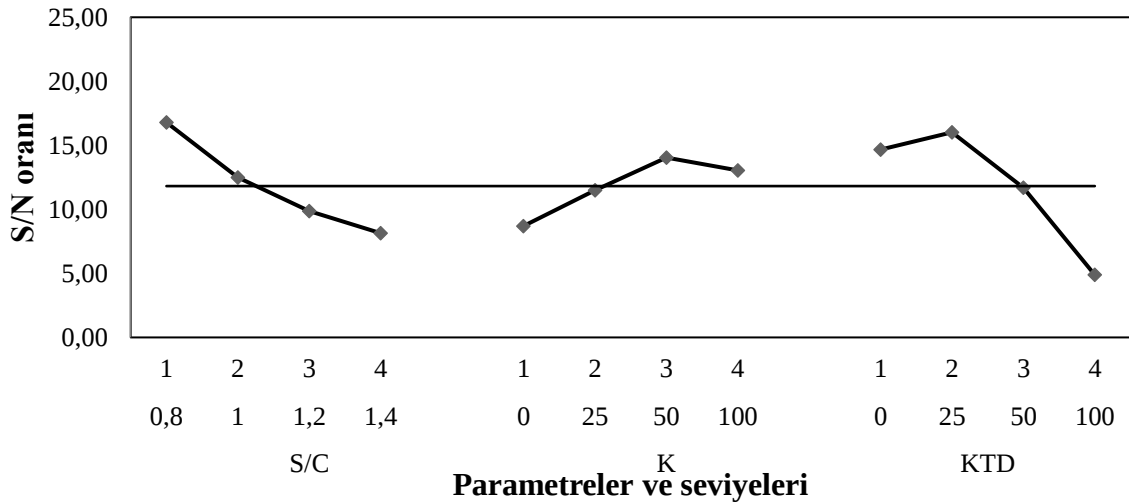
14 günlük serbest basınç dayanımına su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 34’de verilmiştir.

Tablo 34. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (14 günlük)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	170,37	56,79	13,34	157,60	28,30
K	3	65,28	21,76	5,11	52,51	9,44
KTD	3	295,66	98,55	23,16	282,90	50,80
Diğer	6	25,54	4,26			11,46
Toplam	15	556,84				100,00

Tablo 34’de ki P oranları incelendiğinde 14 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin %50,80 değeri ile KTD’nin, en az etki eden parametrenin ise %9,44 değeri ile K’nın olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin 14 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 33’de gösterilmiştir.

**Şekil 33.** Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (14 günlük)

Tablo 34 ve Şekil 33’ün birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışım numunelerinin 14 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin KTD’nin olduğu görülmektedir. Parametrelerin 14 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla KTD, S/C ve K’ dır.

Şekil 33’den karışım numunelerinde S/C oranının artmasıyla 14 günlük serbest basınç dayanımında azalmanın olduğu görülmüştür. Aynı şekilde karışımlarda KY’nin artmasıyla 14 günlük serbest basınç dayanımı genel olarak artmıştır. Genel olarak KTDY’nin artmasının karışım numunelerinin 14 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde azaltıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Diğer taraftan 14 günlük serbest basınç dayanımının KTDY’nin 2. seviyesine

(%25) kadar artma bu seviyeden sonra ise azalma eğiliminde olduğu Şekil 33'den anlaşılmaktadır. Wegian (2010) çalışmasında deniz suyu ile üretilen ve küre tabi tutulan numunelerde 14 günlük dayanımların yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu sonuç çalışmanın sonucu ile benzerlik göstermektedir.

Optimum karışım oranının belirlenmesi (14 günlük)

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum 14 günlük serbest basınç dayanımının S/C'nin 1. seviyesi. KY'nin 3. seviyesi ve KTDY'nin 2. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen 14 günlük serbest basınç dayanımı 14,46 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve 14 günlük serbest basınç dayanımını 10,5 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum serbest basınç dayanımı (14 günlük) için elde edilen karışım oranları, beklenen serbest basınç dayanımı, doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 35'de verilmiştir.

Tablo 35. Optimum deney koşulları ve beklenen değerler (14 günlük)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Basınç Dayanımı (MPa)	%90 güven Aralığı (MPa)	Doğrulama Deney Sonucu (MPa)
S/C	KY	KTDY			
0,8	50	25	14,46	10,39-20,12	10,5

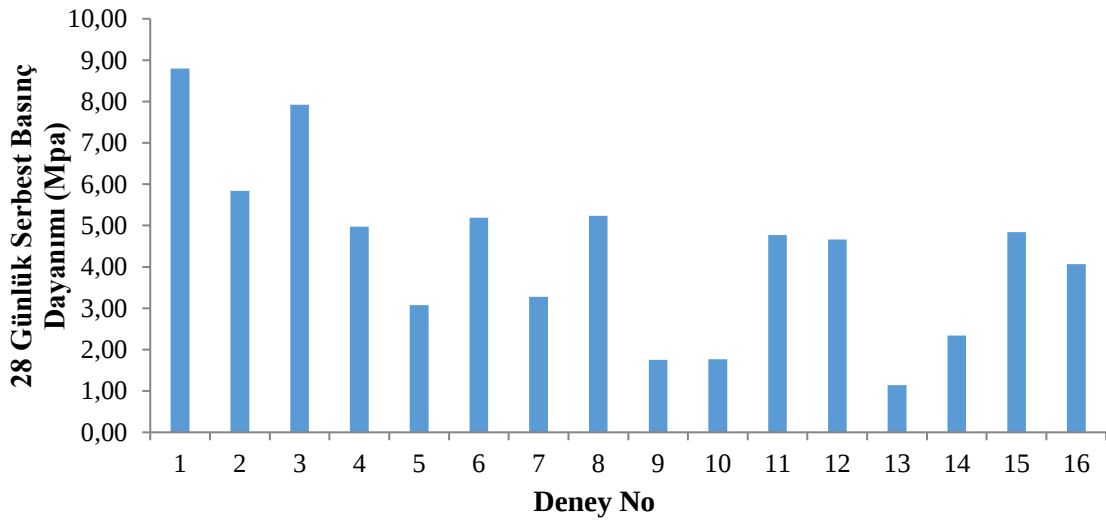
Tablo 35 incelendiğinde optimum deney koşulları ile oluşturulan numunelerin 14 günlük serbest basınç dayanım sonuçları ile optimum koşullardan beklenen değerlerin yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan serbest basınç dayanımı (14 günlük) tahmininin doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşimin olmadığını göstermektedir.

Karışımların 28 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L_{16} ortagonal tablosuna göre hazırlanan karışım numuneleri için elde edilen 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 36'da toplu olarak verilmiştir. Tablo 36'da verilen serbest basınç dayanımları kullanılarak çizilen 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği Şekil 34'de gösterilmiştir.

Tablo 36. Serbest basınç dayanım değerleri (28 günlük)

Deney No	Taguchi Deney Tasarımı (L ₁₆)			Serbest Basınç Dayanımı (MPa)
	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	8,79
2	0,8	25	25	5,84
3	0,8	50	50	7,92
4	0,8	100	100	4,97
5	1,0	0	25	3,07
6	1,0	25	0	5,19
7	1,0	50	100	3,28
8	1,0	100	50	5,24
9	1,2	0	50	1,75
10	1,2	25	100	1,77
11	1,2	50	0	4,77
12	1,2	100	25	4,67
13	1,4	0	100	1,14
14	1,4	25	50	2,34
15	1,4	50	25	4,84
16	1,4	100	0	4,06

**Şekil 34.** 28 günlük serbest basınç dayanımı

Tablo 36 ve Şekil 34 birlikte incelendiğinde en düşük serbest basınç dayanımı 1,14 MPa ile su/çimento oranı 1,4 (4. seviye), kum yüzdesi %0 (1. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin % 100 (4. seviye) olduğu 13 No.lu deneyde, en yüksek serbest basınç dayanımı ise 8,79 MPa ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY %0 (1. seviye) ve KTDY'nin %0 (1. seviye) olduğu 1 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 36 da verilen serbest basınç deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 37’de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 38’de verilmiştir.

Tablo 37. S/N değerleri (28 günlük)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	18,88
2	0,8	25	25	14,87
3	0,8	50	50	17,9
4	0,8	100	100	13,92
5	1,0	0	25	9,45
6	1,0	25	0	14,09
7	1,0	50	100	10,32
8	1,0	100	50	14,38
9	1,2	0	50	4,86
10	1,2	25	100	4,94
11	1,2	50	0	13,58
12	1,2	100	25	13,38
13	1,4	0	100	1,12
14	1,4	25	50	7,37
15	1,4	50	25	13,64
16	1,4	100	0	12,04
Ortalama	S/N	Oranı		11,55

Tablo 38. Ortalama S/N değerleri (28 günlük)

Ortalama S/N Etkileri			
	S/C	K	KTD
1. Seviye	16,39	8,58	14,65
2. Seviye	12,06	10,32	12,83
3. Seviye	9,19	13,86	11,13
4. Seviye	8,54	13,43	7,57

Taguchi Optimizasyon Yöntemi’nde maksimum serbest basınç dayanımının en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 37 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla 1,12 ve 18,88 olarak elde edilmiştir.

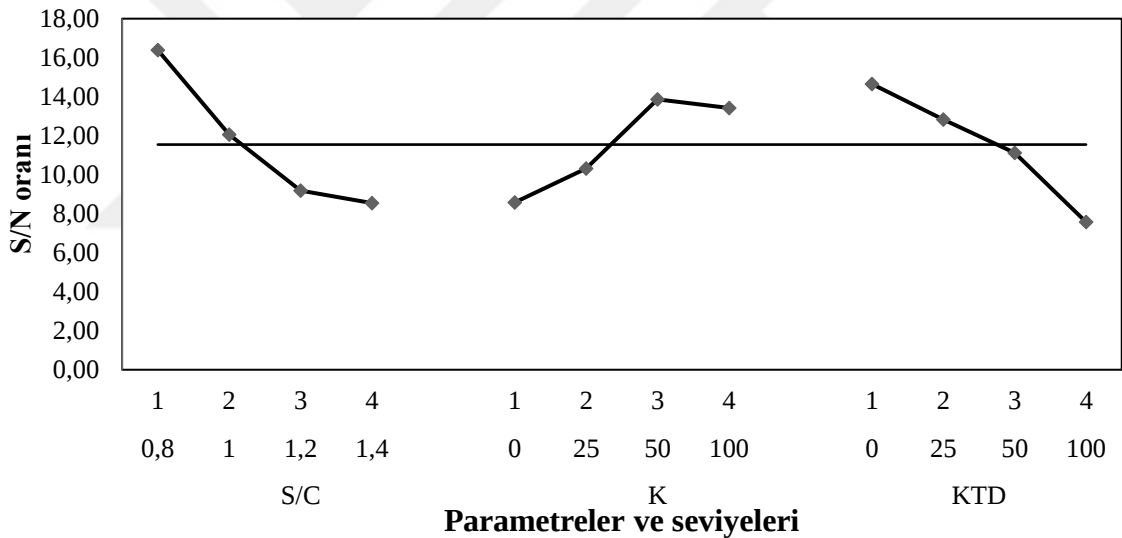
28 günlük serbest basınç dayanımına su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 39’da verilmiştir.

Tablo 39. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (28 günlük)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	153,21	51,07	16,32	143,82	40,21
K	3	76,81	25,60	8,18	67,42	18,85
KTD	3	108,90	36,30	11,60	99,51	27,82
Diğer	6	18,78	3,13			13,13
Toplam	15	357,70				100,00

Tablo 39'da ki P oranları incelendiğinde 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin %40,21 değeri ile S/C oranının, en az etki eden parametrenin ise %18,85 değeri K'nın olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 35'de gösterilmiştir.

**Şekil 35.** Parametrelerin basınç dayanımına etkileri (28 günlük)

Tablo 39 ve Şekil 35'in birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışım numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin S/C oranının olduğu görülmektedir. Parametrelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla S/C, KTD ve K'dır.

Şekil 35'den karışım numunelerinde S/C oranının artmasıyla 28 günlük serbest basınç dayanımında azalmanın olduğu görülmüştür. Benzer sonucu İnal (2015) yapmış olduğu çalışmasında elde etmiştir. Yine aynı şekilden karışımlarda KY'nin artmasıyla 28 günlük serbest basınç dayanımı genel olarak artmıştır. Karışımlarda KTDY'nin artmasının karışım numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde azaltıcı yönde etki ettiği

görülmektedir. Wegian (2010) çalışmasında deniz suyu ile üretilen ve küre tabi tutulan numunelerde ileriki yaşlarda (28 ve 90 günlük) dayanımların azaldığı belirtilmiştir. Bu sonuç çalışmanın sonucu ile benzerlik göstermektedir.

Optimum karışım oranının belirlenmesi (28 günlük)

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum serbest basınç dayanımının (28 günlük) S/C'nin 1. seviyesi. KY'nin 3. seviyesi ve KTDY'nin 1. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen serbest basınç dayanımı (28 günlük) 12,31 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve 28 günlük serbest basınç dayanımı 11,48 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum serbest basınç dayanımı (28 günlük) için elde edilen karışım oranları, beklenen akma süresi, doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 40'da verilmiştir.

Tablo 40. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (28 günlük)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Basınç Dayanımı (MPa)	%90 güven Aralığı (MPa)	Doğrulama Deney Sonucu (MPa)
S/C	KY	KTDY			
0,8	50	0	12,31	9,27-16,34	11,48

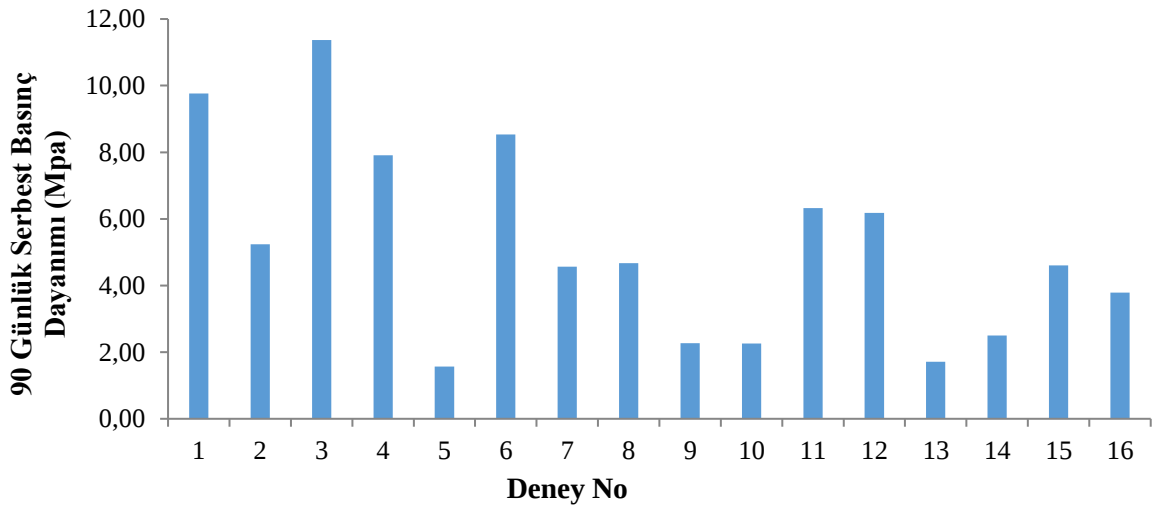
Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde optimum koşullarda beklenen 28 günlük serbest basınç dayanımının, bu şartlarda yapılan doğrulama deneylerine ait serbest basınç dayanımlarına yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan 28 günlük serbest basınç dayanımı tahmininin (beklenen değer) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.

Karışımların 90 günlük serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L₁₆ ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımları için elde edilen 90 günlük ortalama serbest basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 41'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 41'de verilen serbest basınç dayanımları kullanılarak çizilen 90 günlük serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 36'da gösterilmiştir.

Tablo 41. Serbest basınç dayanımı deney sonuçları (90 günlük)

Deney No	Taguchi Deney Tasarımı (L ₁₆)			Serbest Basınç Dayanımı (MPa)
	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	9,76
2	0,8	25	25	5,24
3	0,8	50	50	11,37
4	0,8	100	100	7,91
5	1,0	0	25	1,56
6	1,0	25	0	8,54
7	1,0	50	100	4,56
8	1,0	100	50	4,67
9	1,2	0	50	2,27
10	1,2	25	100	2,26
11	1,2	50	0	6,32
12	1,2	100	25	6,18
13	1,4	0	100	1,71
14	1,4	25	50	2,50
15	1,4	50	25	4,61
16	1,4	100	0	3,79

**Şekil 36.** 90 günlük serbest basınç dayanımı

Tablo 41 ve Şekil 36 beraber değerlendirildiğinde en düşük serbest basınç dayanımının 1,56 MPa ile su/çimento oranı 1,0 (2. seviye), kum yüzdesi %0 (1.seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin % 25 (2. seviye) olduğu 5 No.lu deneyde, en yüksek serbest basınç dayanımının ise 11,37 MPa ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY'nin %50 (3.seviye) ve KTDY'nin %50 (3. seviye) olduğu 3 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 41’de verilen serbest basınç deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 42’de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 43’de verilmiştir.

Tablo 42. S/N Değerleri (90 günlük)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	19,79
2	0,8	25	25	14,32
3	0,8	50	50	21
4	0,8	100	100	17,97
5	1,0	0	25	3,73
6	1,0	25	0	18,35
7	1,0	50	100	13,18
8	1,0	100	50	13,39
9	1,2	0	50	7,08
10	1,2	25	100	7,06
11	1,2	50	0	16,02
12	1,2	100	25	15,67
13	1,4	0	100	4,6
14	1,4	25	50	7,91
15	1,4	50	25	13,26
16	1,4	100	0	11,56
Ortalama	S/N	Oranı		12,80

Tablo 43. Ortalama S/N değerleri (90 günlük)

Ortalama S/N Etkileri			
	S/C	K	KTD
1. Seviye	18,27	8,80	16,43
2. Seviye	12,16	11,91	11,74
3. Seviye	11,46	15,86	12,34
4. Seviye	9,33	14,65	10,70

Taguchi Optimizasyon Yöntemi’nde maksimum serbest basınç dayanımının en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 42 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla 4,60 ve 21,00 olarak elde edilmiştir.

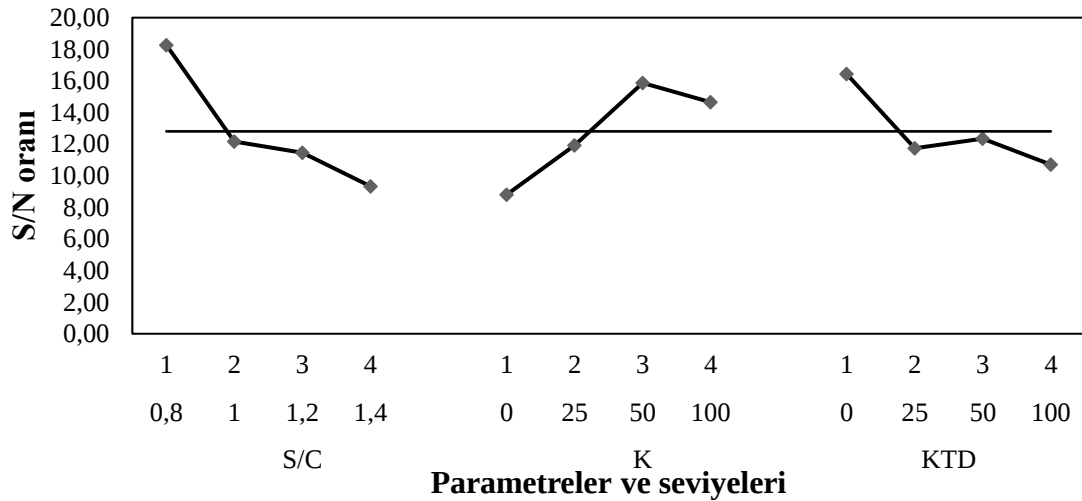
90 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 44’de verilmiştir.

Tablo 44. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (90 günlük)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	176,44	58,81	5,40	143,78	33,00
K	3	118,36	39,45	3,62	85,70	19,67
KTD	3	75,62	25,21	2,32	42,95	9,86
Diğer	6	65,32	10,89			37,47
Toplam	15	435,74				100,00

Tablo 44’de ki P oranları incelendiğinde 90 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin %33 değeri ile S/C oranının, en az etki eden parametrenin ise %9,86 ile KTD’nin olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin 90 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 37’de gösterilmiştir.

**Şekil 37.** Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (90 günlük)

Tablo 44 ve Şekil 37’nin birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışımların 90 günlük serbest basınç dayanımları üzerinde en etkili parametrenin S/C oranının olduğu görülmektedir. Parametrelerin 90 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla S/C, K ve KTD’dir.

Şekil 37’den karışımlarda S/C oranının artmasıyla 90 günlük serbest basınç dayanımında azalmanın olduğu gözlenmektedir. Karışımlarda K’nin artmasıyla genel olarak dayanımın arttığı, KTD’nin artmasıyla ise genel olarak dayanımların azaldığı Şekil 37’den görülmektedir. Bu sonuca kaya tuzunun ileri yaşlardaki hidrasyonu engellemesinden kaynaklandığını düşünmektedir. Wegian 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada deniz

suyunun numunelerin 90 günlük dayanımını azalttığını belirtmektedir. Bu sonuç çalışmanın sonucu ile benzerlik göstermektedir.

Optimum karışım oranlarının belirlenmesi (90 günlük)

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum serbest basınç dayanımının (90 günlük) S/C'nin 1. seviyesi, KY'nin 3. seviyesi ve KTDY'nin 1. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen serbest basınç dayanımı (90 günlük) 17,68 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve serbest basınç dayanımı (90 günlük) 12,14 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum serbest basınç dayanımı (90 günlük) için elde edilen karışım oranları, beklenen serbest basınç dayanımı, doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 45'de verilmiştir.

Tablo 45. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (90 günlük)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Basınç Dayanımı (MPa)	%90 güven Aralığı (MPa)	Doğrulama Deney Sonucu (MPa)
S/C	KY	KTDY			
0,80	50	0	17,68	10,42-30	12,14

Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde optimum koşullarda beklenen 90 günlük serbest basınç dayanımlarının, bu şartlarda yapılan doğrulama deneylerine ait 90 günlük serbest basınç dayanımına yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan 90 günlük serbest basınç dayanımı tahmininin (beklenen değer) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.

Karışımların 0 çevrim serbest basınç dayanımı deney sonuçları

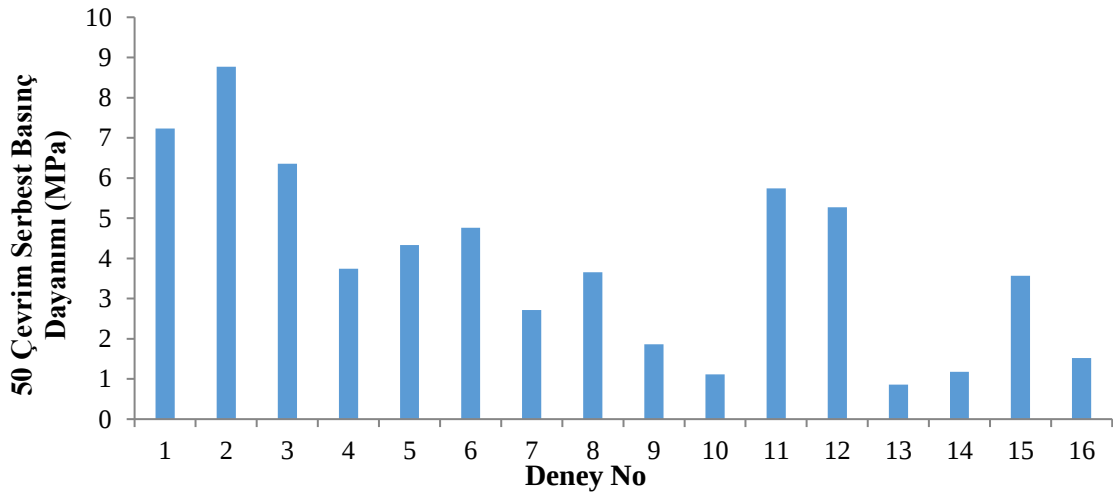
L₁₆ ortagonal dizine göre hazırlanan her bir deney karışımları öncelikle 28 gün hava kürüne bırakılmış ardından dayanımları ölçülmüştür. 0 çevrim için dayanım değerleri 28 günlük basınç değerleri ile aynı olduğundan S/N oranları, ortalama S/N oranları, ANOVA sonuçları ve beklenen değerler için ayrıca hesap yapılmamış değerler önceki bölümlerde verilmiştir.

Karışımların 50 donma-çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L₁₆ ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımları için elde edilen 50 donma çözülme çevrimi sonrası ortalama serbest basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 46'da toplu olarak verilmiştir. Tablo 46'da verilen serbest basınç dayanımları kullanılarak çizilen 50 çevrim serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 38'de gösterilmiştir.

Tablo 46. Serbest basınç dayanım değerleri (50 çevrim)

Taguchi Deney Tasarımı (L16)				Serbest Basınç Dayanımı (MPa)
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	7,23
2	0,8	25	25	8,77
3	0,8	50	50	6,35
4	0,8	100	100	3,75
5	1,0	0	25	4,33
6	1,0	25	0	4,76
7	1,0	50	100	2,72
8	1,0	100	50	3,66
9	1,2	0	50	1,86
10	1,2	25	100	1,11
11	1,2	50	0	5,75
12	1,2	100	25	5,27
13	1,4	0	100	0,86
14	1,4	25	50	1,18
15	1,4	50	25	3,57
16	1,4	100	0	1,52



Şekil 38. 50 çevrim serbest basınç dayanımı

Tablo 46 ve Şekil 38'in birlikte değerlendirilmesiyle en düşük serbest basınç dayanımı 0,86 MPa ile su/çimento oranı 1,4 (4. seviye), kum yüzdesi %0 (1. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin % 100 (4. seviye) olduğu 13 No.lu deneyde, en yüksek serbest basınç dayanımının ise 8,77 MPa ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY %25 (2. seviye) ve KTDY'nin %25 (2. seviye) olduğu 2 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 46’da verilen serbest basınç dayanımı deney sonuçları (50 donma çözülme çevrimi) kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 47’de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 48’de verilmiştir.

Tablo 47. S/N değerleri (50 çevrim)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	17,17
2	0,8	25	25	18,77
3	0,8	50	50	15,96
4	0,8	100	100	11,46
5	1,0	0	25	12,7
6	1,0	25	0	13,51
7	1,0	50	100	8,67
8	1,0	100	50	11,27
9	1,2	0	50	5,41
10	1,2	25	100	0,83
11	1,2	50	0	14,92
12	1,2	100	25	14,38
13	1,4	0	100	-1,31
14	1,4	25	50	1,39
15	1,4	50	25	11,02
16	1,4	100	0	3,64
Ortalama	S/N	Oranı		9,99

Tablo 48. Ortalama S/N değerleri (50 çevrim)

Ortalama S/N Etkileri			
	S/C	K	KTD
1. Seviye	15,84	8,49	12,31
2. Seviye	11,54	8,63	14,22
3. Seviye	8,89	12,64	8,51
4. Seviye	3,69	10,19	4,91

Taguchi Optimizasyon Yöntemi’nde maksimum serbest basınç dayanımının (50 donma çözülme çevrimi) en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 47 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -1,31 ve 18,77 olarak elde edilmiştir.

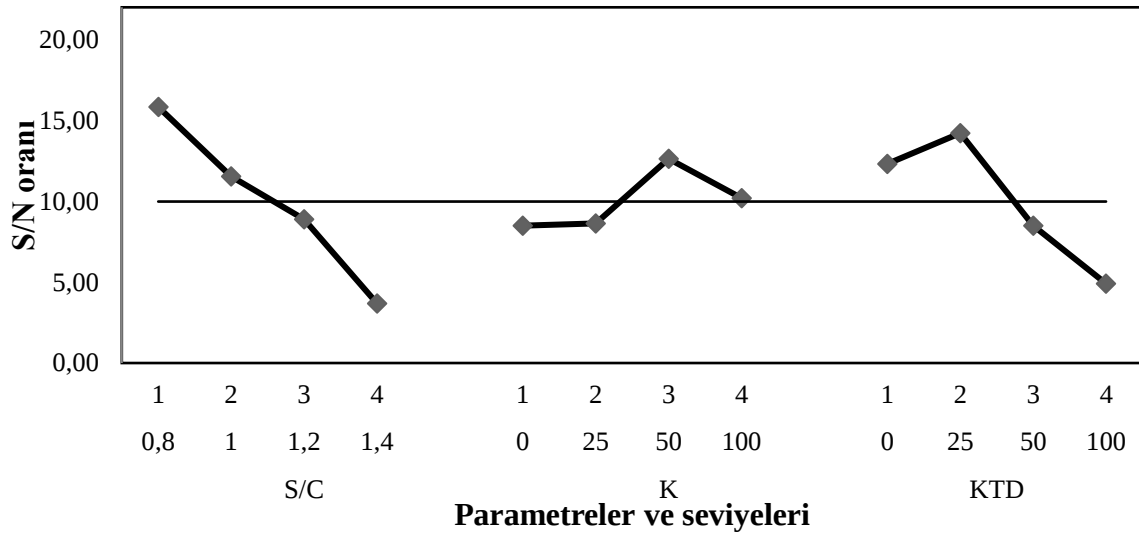
50 çevrim serbest basınç dayanımına su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 49’da verilmiştir.

Tablo 49. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (50 çevrim)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	310,19	103,40	29,47	299,67	51,57
K	3	44,70	14,90	4,25	34,18	5,88
KTD	3	205,09	68,36	19,49	194,57	33,49
Diğer	6	21,05	3,51			9,06
Toplam	15	581,03				100,00

Tablo 49’da ki P oranları incelendiğinde akma süresi serbest basınç dayanımı (50 çevrim) üzerinde en etkili parametrenin %51,57 değeri ile S/C’nın, en az etki eden parametrenin ise %5,88 değeri ile K’nın olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin 50 donma çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 39’da gösterilmiştir.

**Şekil 39.** Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (50 çevrim)

Tablo 49 ve Şekil 39’un birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışımların 50 çevrim serbest basınç dayanımları üzerinde en etkili parametrenin S/C oranının olduğu görülmektedir. Parametrelerin 50 donma çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla S/C, KTD ve K’dır.

Şekil 39’dan karışımlarda su/çimento oranının artmasıyla 50 donma çözülme çevrimi serbest basınç dayanımında azalmanın olduğu gözlenmektedir. Karakoç 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada beton numunelerinde S/C oranının arttıkça donma çözülme dayanımının azaldığını ifade etmiştir. Bu sonuç çalışma sonucu ile benzerlik göstermektedir. Karışımlarda

kum yüzdesinin 3. seviyesine kadar (%50) artmasıyla dayanımın arttığı, KTDY'nin 2. seviyesinden (%25) sonra artmasıyla dayanımın azaldığı görülmektedir.

Optimum karışım oranlarının belirlenmesi (50 donma çözülme çevrimi)

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum serbest basınç dayanımının (50 çevrim) S/C'nin 1. seviyesi, KY'nin 3. seviyesi ve KTDY'nin 2. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen serbest basınç dayanımı (50 çevrim) 13,69 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve serbest basınç dayanımı 10,86 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum serbest basınç dayanımı için elde edilen karışım oranları, beklenen serbest basınç dayanımı (50 çevrim), doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 50'de verilmiştir.

Tablo 50. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (50 çevrim)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Basınç Dayanımı (MPa)	%90 güven Aralığı (MPa)	Doğrulama Deney Sonucu (MPa)
S/C	KY	KTDY			
0,80	50	25	13,69	10,14-18,48	10,86

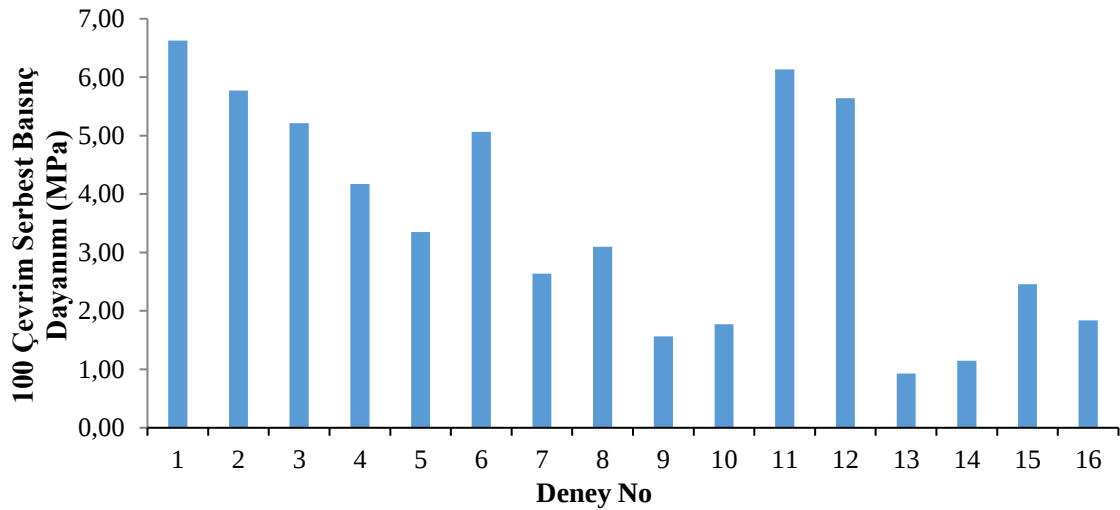
Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde optimum koşullarda beklenen 50 çevrim serbest basınç dayanımının, bu şartlarda yapılan doğrulama deneylerine ait serbest basınç dayanımlarına (50 çevrim) yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan 50 donma çözülme çevrimi sonrası serbest basınç dayanımı tahmininin (beklenen değerin) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.

Karışımların 100 donma çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı deney sonuçları

Çalışmada seçilen standart L₁₆ ortagonal tablosuna göre hazırlanan her bir deney karışımı için elde edilen 100 donma çözülme çevrimi ortalama serbest basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 51'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 51'de verilen serbest basınç dayanımları (100 donma çözülme çevrimi) kullanılarak çizilen 100 çevrim serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 40'da gösterilmiştir.

Tablo 51. Serbest basınç dayanımı deney sonuçları (100 çevrim)

Deney No	Taguchi Deney Tasarımı (L ₁₆)			Serbest Basınç Dayanımı (MPa)
	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	
1	0,8	0	0	6,63
2	0,8	25	25	5,77
3	0,8	50	50	5,21
4	0,8	100	100	4,17
5	1,0	0	25	3,35
6	1,0	25	0	5,07
7	1,0	50	100	2,64
8	1,0	100	50	3,10
9	1,2	0	50	1,56
10	1,2	25	100	1,77
11	1,2	50	0	6,13
12	1,2	100	25	5,64
13	1,4	0	100	0,93
14	1,4	25	50	1,15
15	1,4	50	25	2,46
16	1,4	100	0	1,84

**Şekil 40.** 100 çevrim serbest basınç dayanımı

Tablo 51 ve Şekil 40 beraber incelendiğinde en düşük serbest basınç dayanımı 0,93 MPa ile su/çimento oranı 1,4 (4. seviye), kum yüzdesi %0 (1. seviye) ve kaya tuzuna doygunluk yüzdesinin %100 (4. seviye) olduğu 13 No.lu deneyde, en büyük serbest basınç dayanımı ise 6,63 MPa ile S/C oranı 0,8 (1. seviye), KY %0 (1. seviye) ve KTDY'nin %0 (1. seviye) olduğu 1 No.lu deneyde belirlenmiştir.

Tablo 51’de verilen 100 çevrim deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmış ve analiz sonucunda deneylere ait S/N değerleri Tablo 52’de, parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 53’de verilmiştir.

Tablo 52. S/N Değerleri (100 çevrim)

Parametre ve Seviyeleri				
Deney No	F1 (S/C)	F2 (KY)	F3 (KTDY)	S/N Değerleri
1	0,8	0	0	16,42
2	0,8	25	25	15,23
3	0,8	50	50	14,34
4	0,8	100	100	12,41
5	1,0	0	25	10,50
6	1,0	25	0	14,08
7	1,0	50	100	8,41
8	1,0	100	50	9,81
9	1,2	0	50	3,87
10	1,2	25	100	4,95
11	1,2	50	0	15,75
12	1,2	100	25	15,02
13	1,4	0	100	-0,64
14	1,4	25	50	1,21
15	1,4	50	25	7,80
16	1,4	100	0	5,28
Ortalama	S/N	Oranı		9,65

Tablo 53. Ortalama S/N değerleri (100 çevrim)

Ortalama S/N Oranı			
	S/C	K	KTD
1. Seviye	14,60	7,54	12,89
2. Seviye	10,70	8,87	12,14
3. Seviye	9,90	11,57	7,31
4. Seviye	3,41	10,63	6,28

Taguchi Optimizasyon Yöntemi’nde maksimum serbest basınç dayanımının en iyi olduğu durum düşünülerek S/N değerleri hesaplanmıştır. Tablo 52 incelendiğinde en düşük S/N değeri ve en yüksek S/N değeri S/C oranının dördüncü ve birinci seviyelerinde sırasıyla -0,64 ve 16,42 olarak elde edilmiştir.

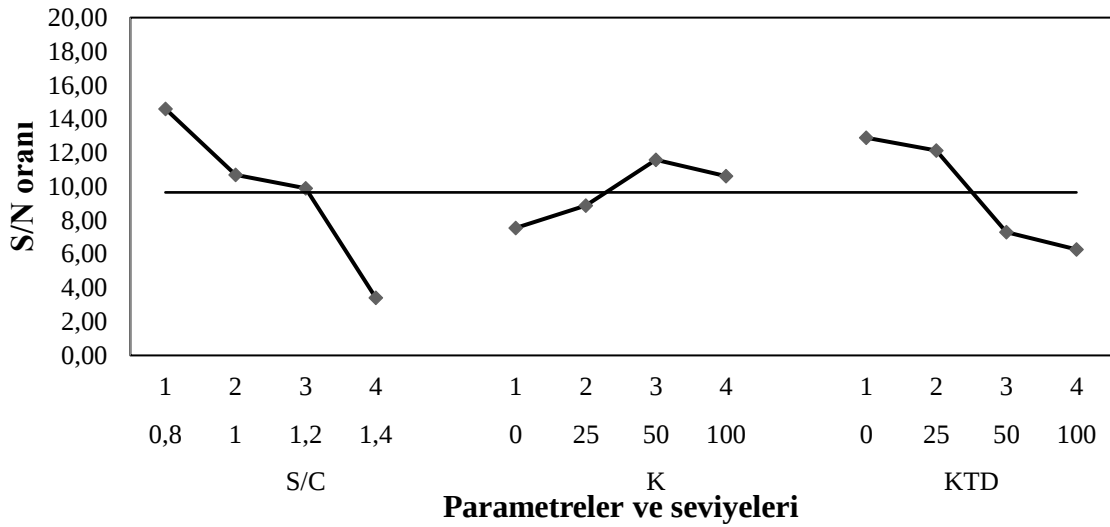
100 donma çözülme çevrim sonrası serbest basınç dayanımına su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluğun etkilerini belirlemek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 54’de verilmiştir.

Tablo 54. Varyans (ANOVA) analizi tablosu (100 çevrim)

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (S)	Varyans (V)	Varyans Oranı (F)	Net Toplam (S')	Oran P (%)
S/C	3	258,28	86,09	27,80	248,99	55,36
K	3	38,96	12,99	4,19	29,67	6,60
KTD	3	133,92	44,64	14,41	124,63	27,71
Diğer	6	18,58	3,10			10,33
Toplam	15	449,75				100,00

Tablo 54’de ki P oranları incelendiğinde 100 donma çözülme çevrimi üzerinde en etkili parametrenin %55,36 değeri ile S/C’nın, en az etki eden parametrenin ise %6,60 değeri ile K’nın olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranı, kum ve kaya tuzuna doygunluk parametrelerinin 100 çevrim sonrası serbest basınç dayanımları üzerindeki etkilerini gösteren Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi Şekil 41’de gösterilmiştir.

**Şekil 41.** Parametreler ve seviyeleri – S/N oranı ilişkisi (100 çevrim)

Tablo 54 ve Şekil 41’ in birlikte değerlendirilmesi sonucunda karışımların 100 donma çözülme çevrimleri üzerinde en etkili parametrenin S/C oranınının olduğu görülmektedir. Parametrelerin 100 çevrim üzerindeki etki sıralamaları sırasıyla S/C, KTD ve K’dır.

Şekil 41’den karışımlarda S/C oranının artmasıyla 100 çevrim serbest basınç dayanımında azalmanın olduğu görülmektedir. Aynı şekilden karışımlarda KY’nin artmasıyla genel olarak dayanımın arttığı, KTDY’nin artmasıyla dayanımın azaldığı anlaşılmaktadır.

Optimum karışım oranlarının belirlenmesi (100 donma çözülme çevrimi)

Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile optimum serbest basınç dayanımının (100 çevrim) S/C'nin 1. Seviyesi, KY'nin 3. seviyesi ve KTDY'nin 1. seviyesi ile hazırlanacak karışımda elde edileceği belirlenmiştir. Bu karışımın beklenen dayanımı (100 çevrim) 9,72 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemin doğruluğunu belirlemek amacıyla doğrulama deneyi yapılmış ve serbest basınç dayanımı 9,05 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonucun %90 güven aralığında kaldığı gözlenmiştir. Optimum serbest basınç dayanım (100 çevrim) için elde edilen karışım oranları, beklenen serbest basınç dayanımı (100 çevrim), doğrulama deney sonucu ve güven aralığı toplu olarak Tablo 55'de verilmiştir.

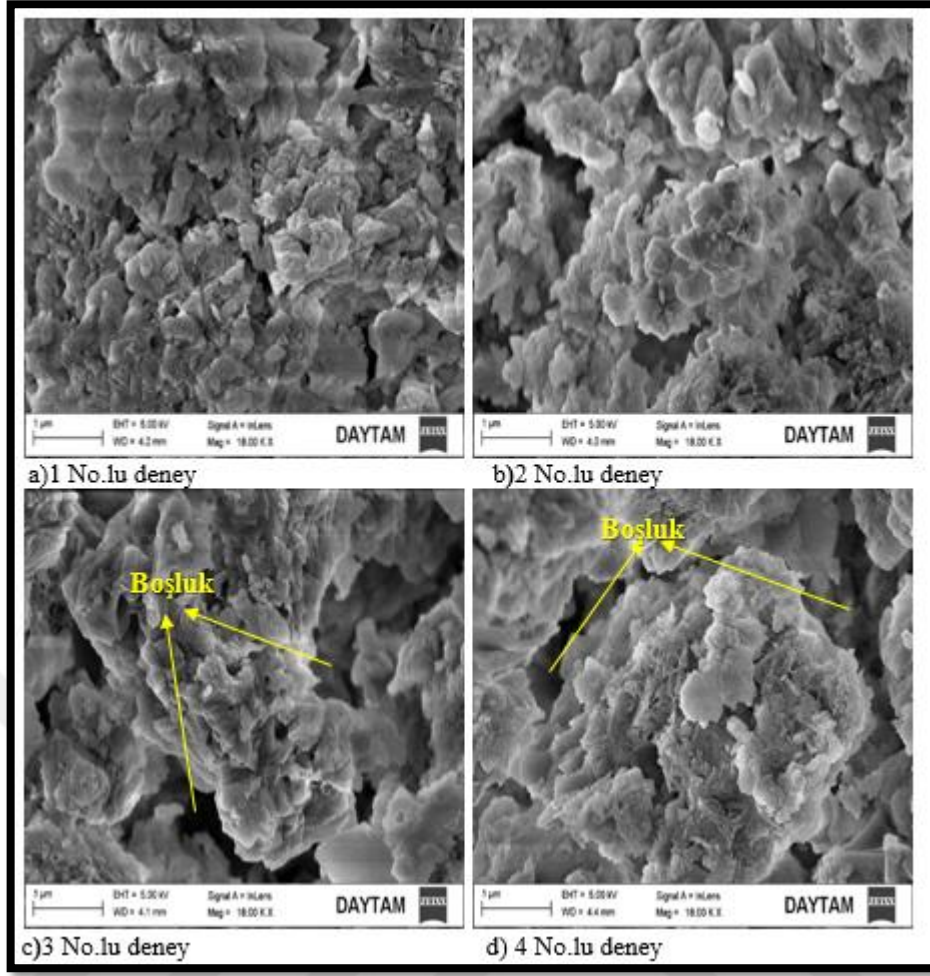
Tablo 55. Optimum deney şartları ve beklenen değerler (100 çevrim)

Optimum Koşullardaki Parametre Seviyeleri			Beklenen Basınç Dayanımı (MPa)	%90 güven Aralığı (MPa)	Doğrulama Deney Sonucu (MPa)
S/C	KY	KTDY			
0,80	50	0	9,72	7,33-12,88	9,05

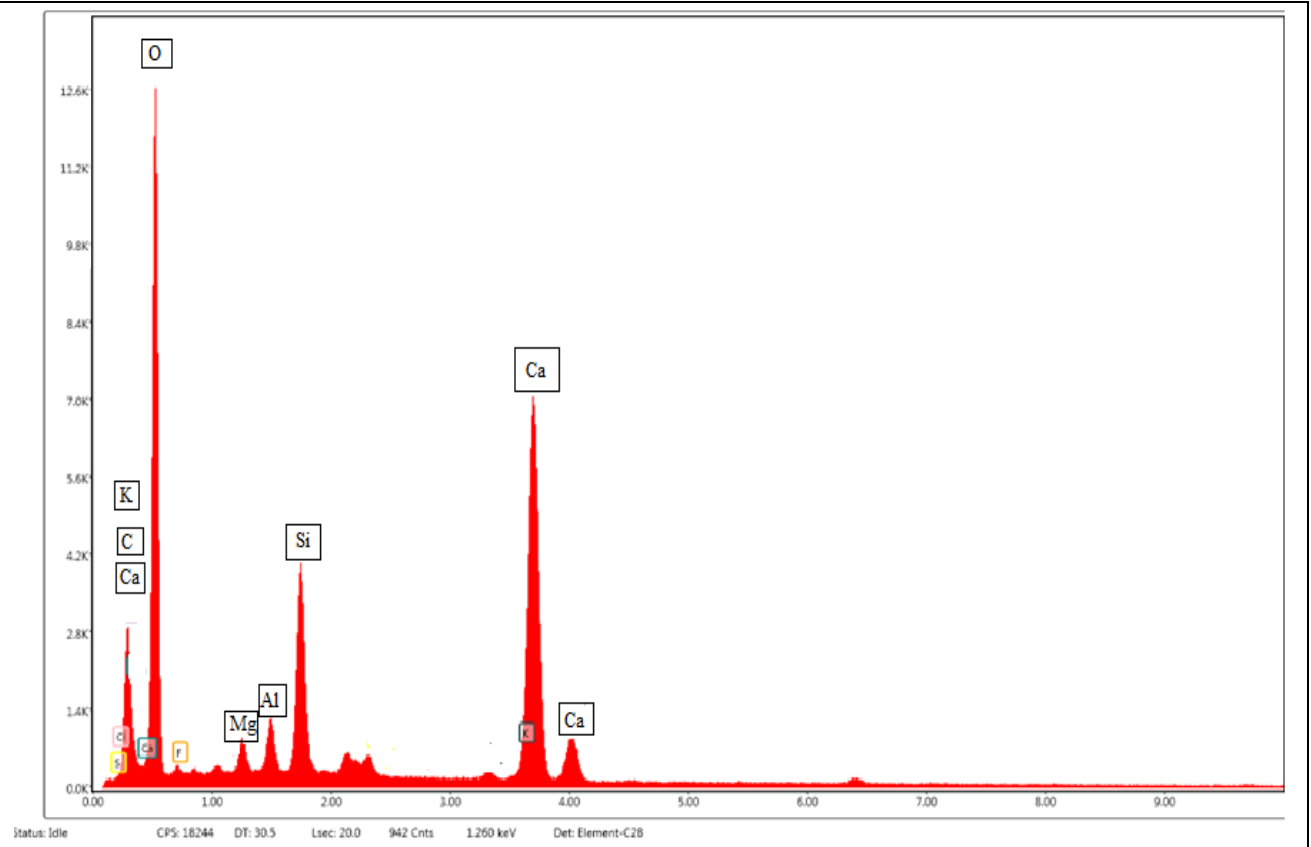
Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde optimum koşullarda beklenen 100 donma çözülme çevrimi serbest basınç dayanımı, bu şartlarda yapılan doğrulama deneylerine ait serbest basınç dayanımına yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile yapılan 100 çevrim serbest basınç dayanımı tahmininin (beklenen değer) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.

SEM –EDS, XRD Sonuçları

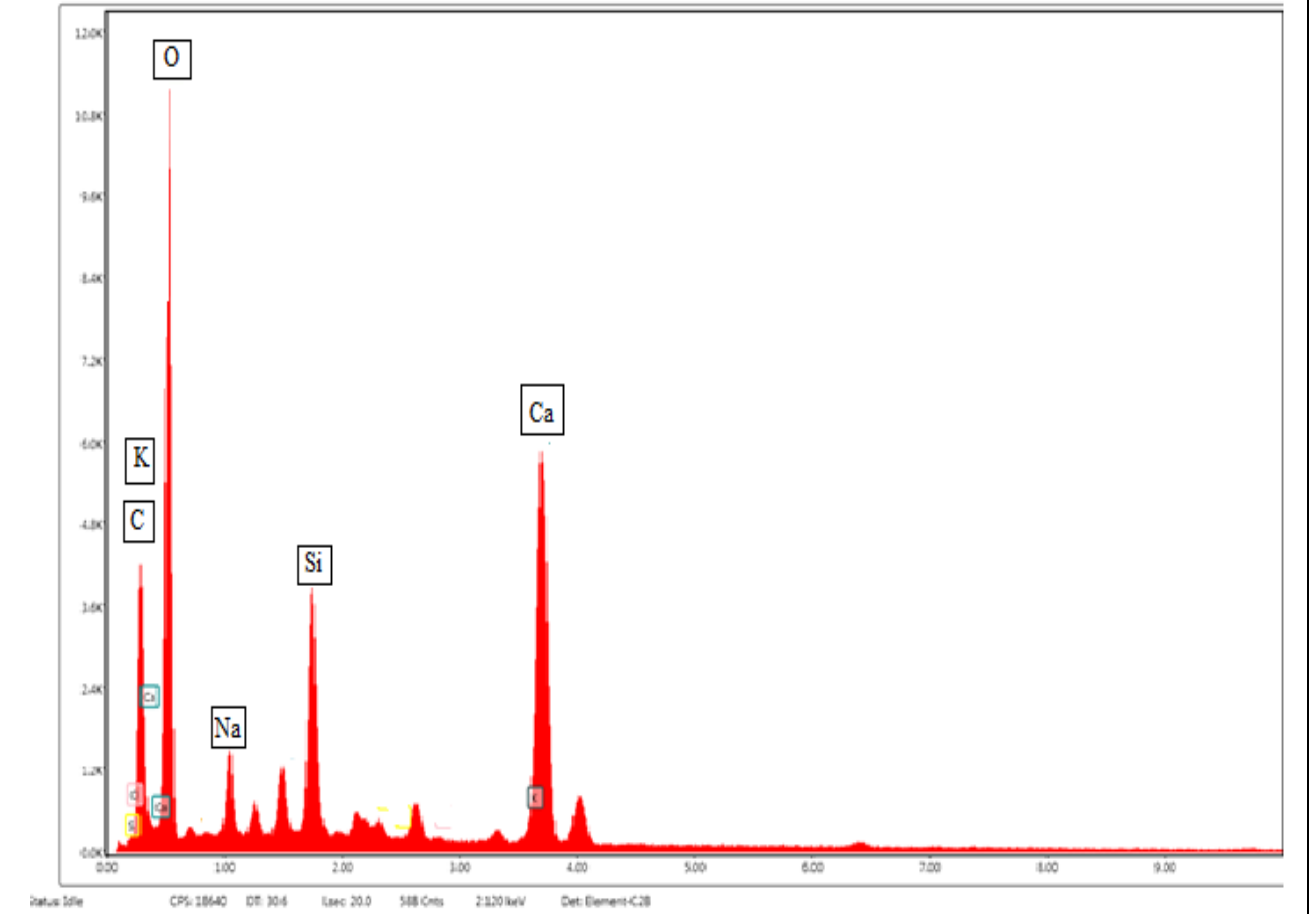
Tez çalışmasında verilen ortogonal deney tablosundaki her bir deney karışımından elde edilen numuler üzerinde sırasıyla SEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. 1, 2, 3 ve 4 No.lu deney numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 42, EDS grafikleri Şekil 43 ile Şekil 44 ve XRD analiz grafikleri Şekil 45'de gösterilmiştir.



Şekil 42. SEM görüntüleri (1, 2, 3 ve 4 No.lu deney)

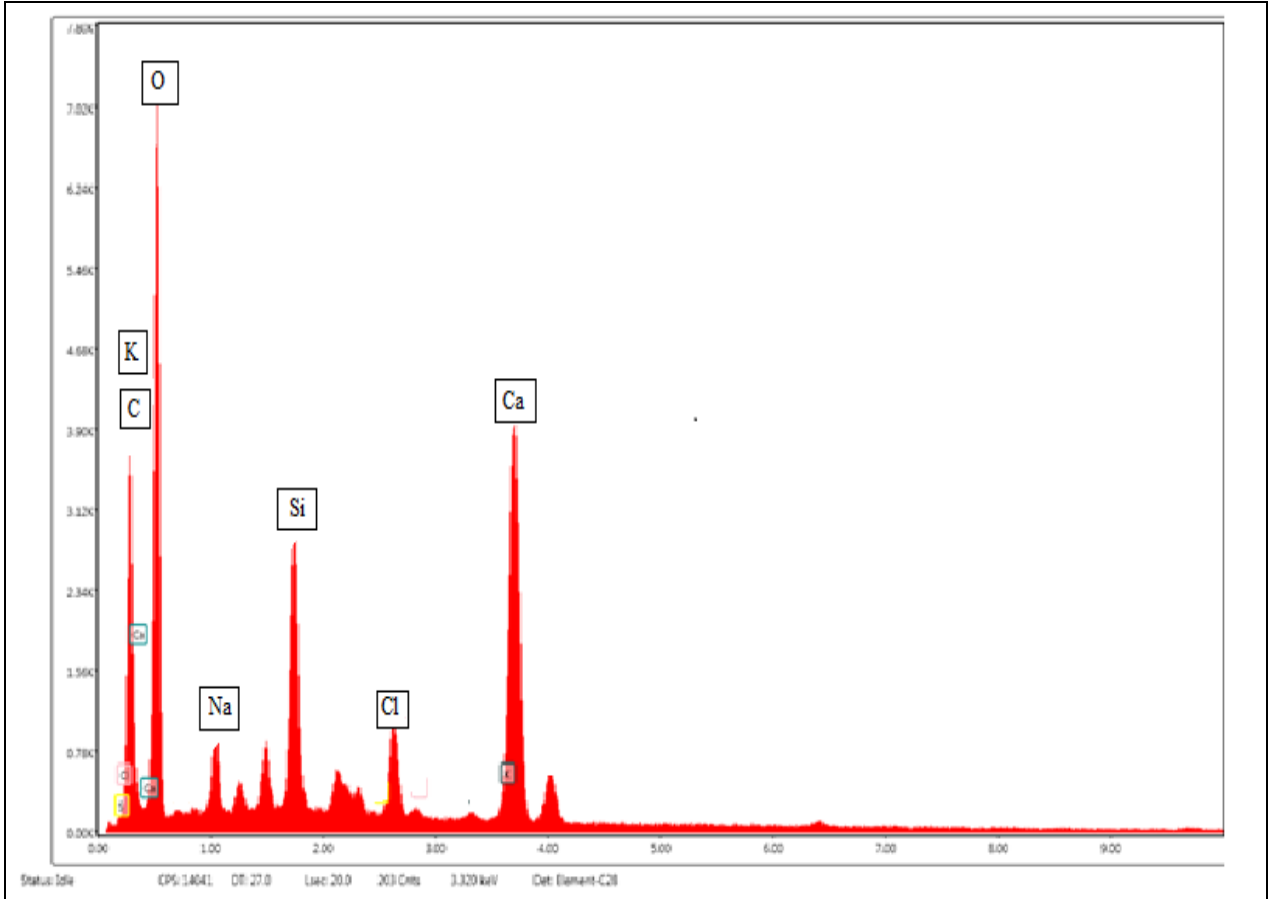


a) 1 No.lu deney

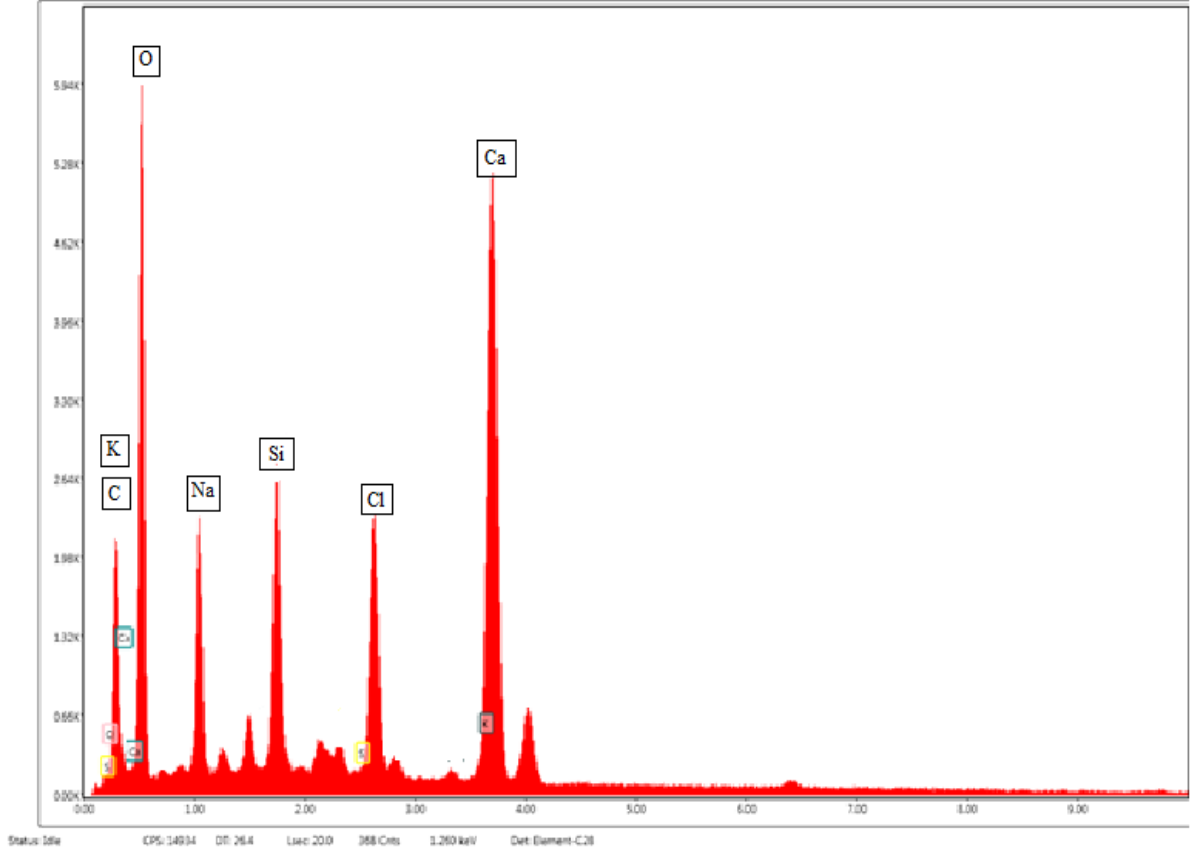


b) 2 No.lu deney

Şekil 43. EDS analizi (1 ve 2 No.lu deney)

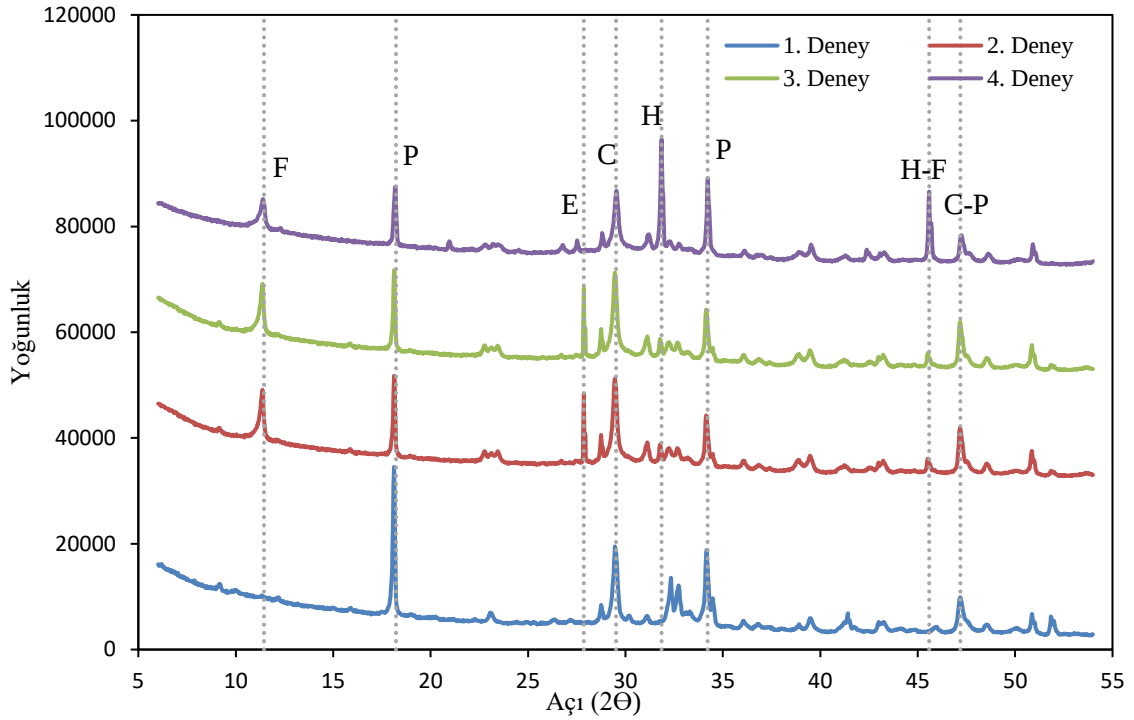


a) 3 No.lu deney



b) 4 No.lu deney

Şekil 44. EDS analizi (3 ve 4 No.lu deney)

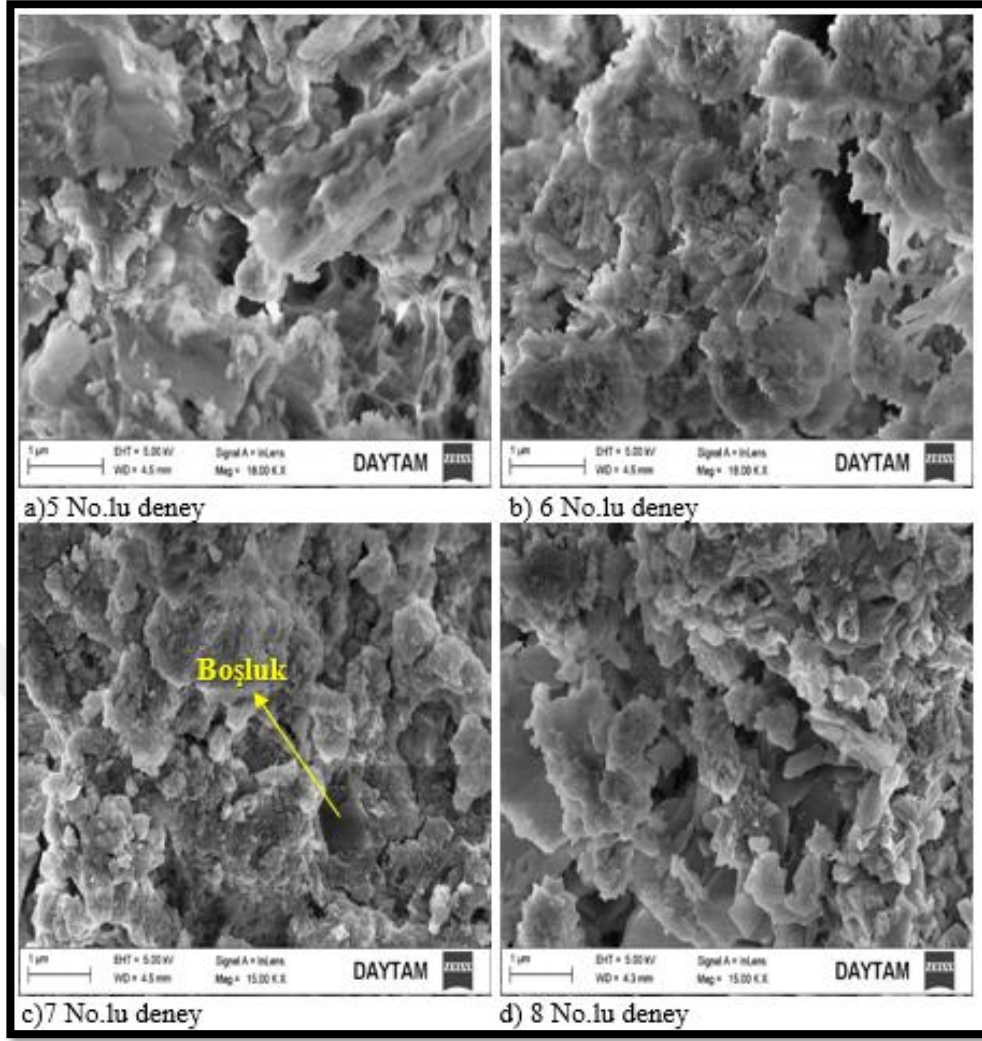


C: Kalsit, E: Etrenjit, F: Friedel tuzu, H: Halit, P: Portlantid

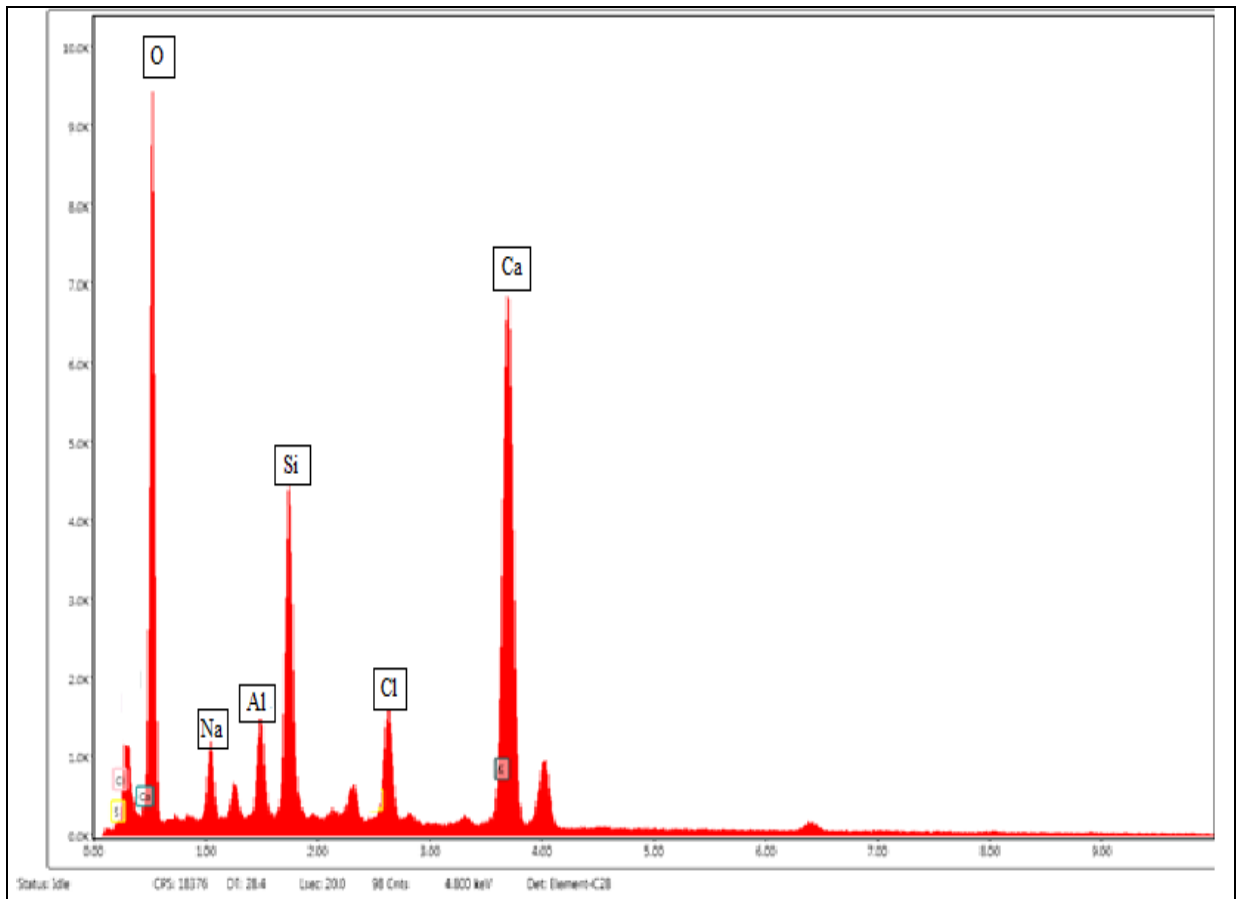
Şekil 45. XRD analizi (1, 2, 3 ve 4 No.lu deney)

Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44 birlikte değerlendirildiğinde 3 No.lu ve 4 No.lu deney karışım numunelerinde boşlukların olabileceği düşünülmektedir. Şekil 45 incelendiğinde 1, 2, 3 ve 4 No.lu deney karışım numunelerinde P (portlantid), C (kalsit) oluşumu gözlenmektedir. Kaya tuzu içeren 2, 3 ve 4 No’lu deney numunelerinde ise F (Friedel tuzu) ve H (Halit) minerallerinin meydana geldiği analiz sonucundan belirlenmiştir. Etrenjitin en fazla 2 ve 3 No.lu deney numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir. 1. ve 4. deney karışım numunelerinde ise etrenjitin farklı formlara dönüştüğü düşünülmüştür. H bileşeni kaya tuzuna doygunluğun %100 olduğu 4 numaralı deney karışımında daha belirgindir.

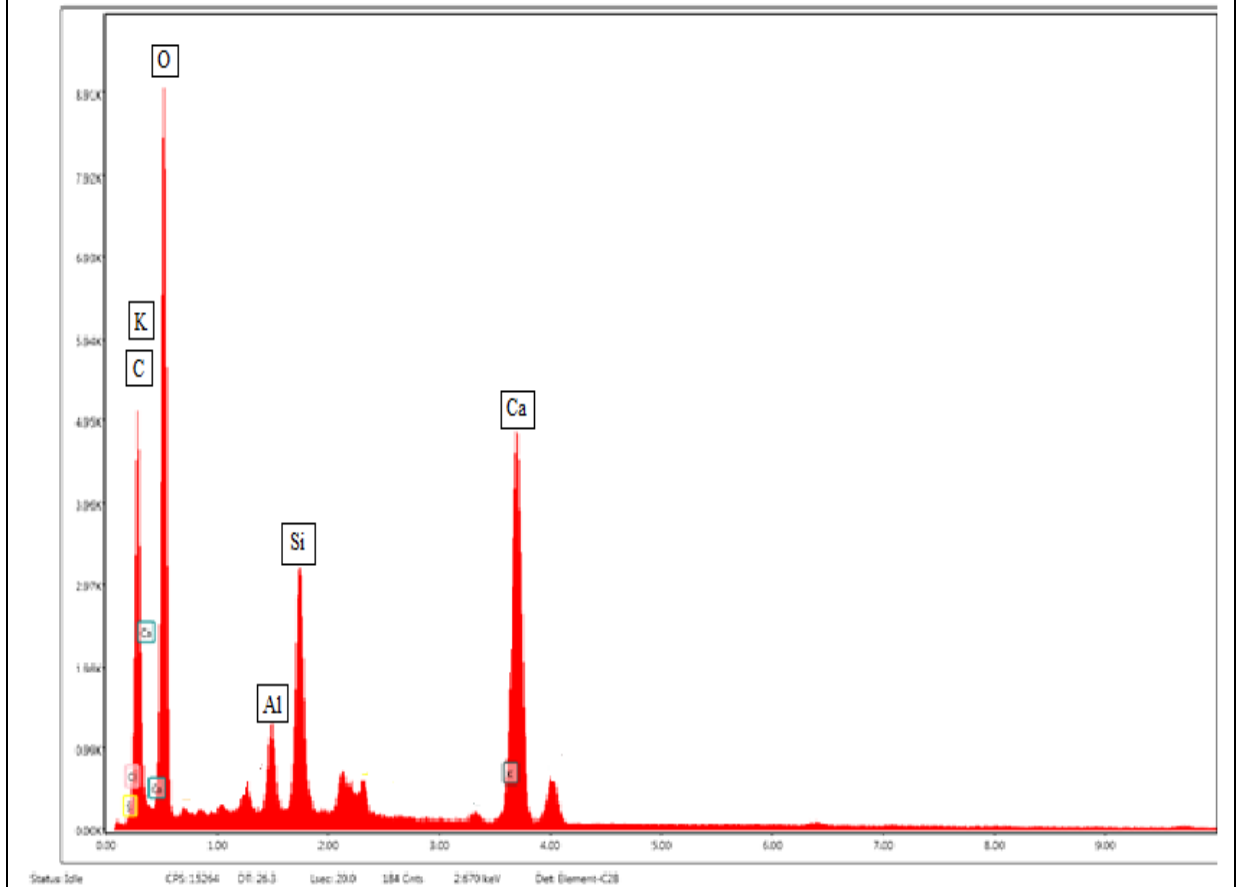
5, 6, 7 ve 8 No.lu deney numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 46, EDS grafikleri Şekil 47, Şekil 48, XRD analizleri Şekil 49’da gösterilmiştir.



Şekil 46. SEM görüntüleri (5, 6, 7 ve 8 No.lu deney)

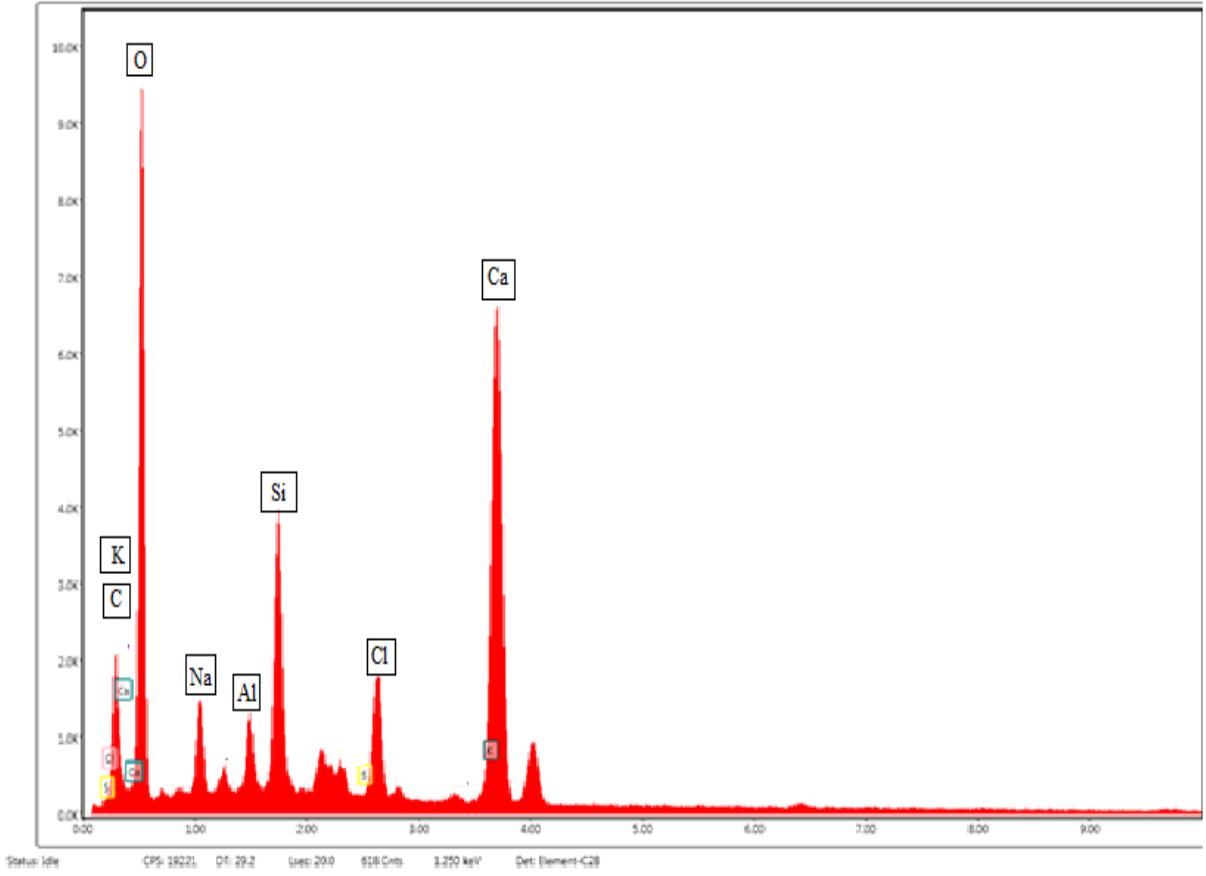


a) 5 No.lu deney

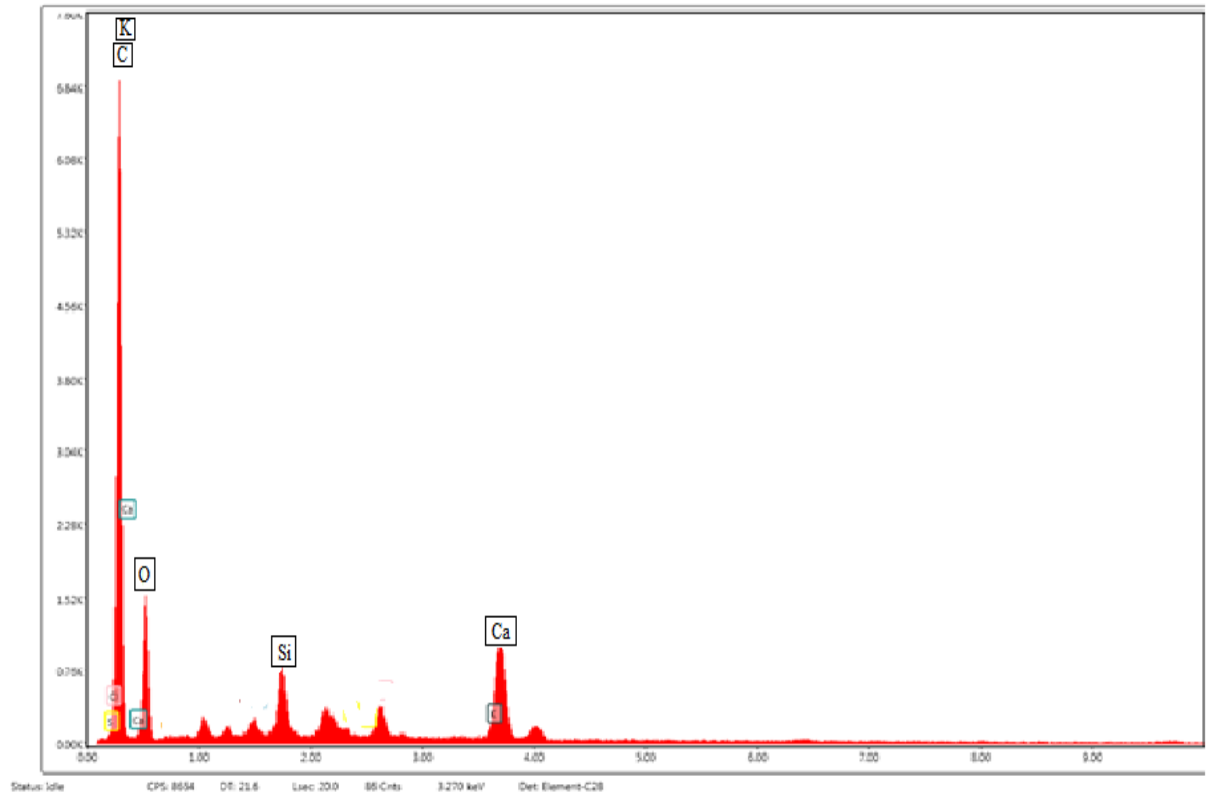


b) 6 No.lu deney

Şekil 47. EDS analizi (5 ve 6 No.lu deney)

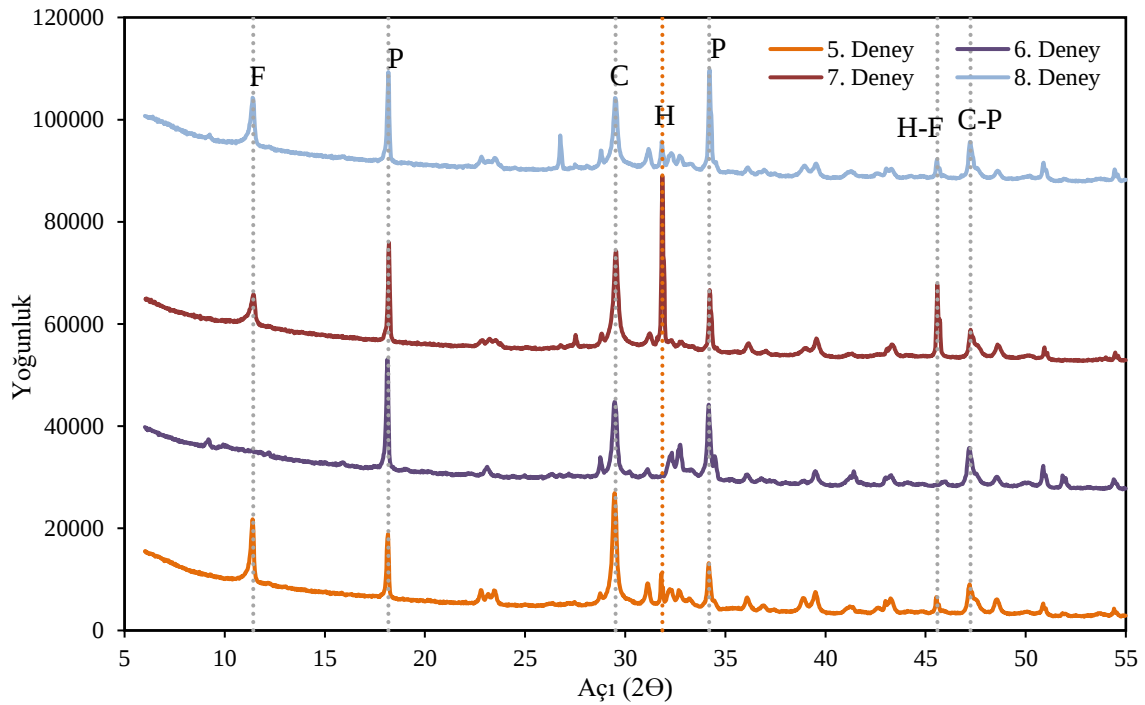


a) 7 No.lu deney



b) 8 No.lu deney

Şekil 48. EDS analizi (7 ve 8 No.lu deney)

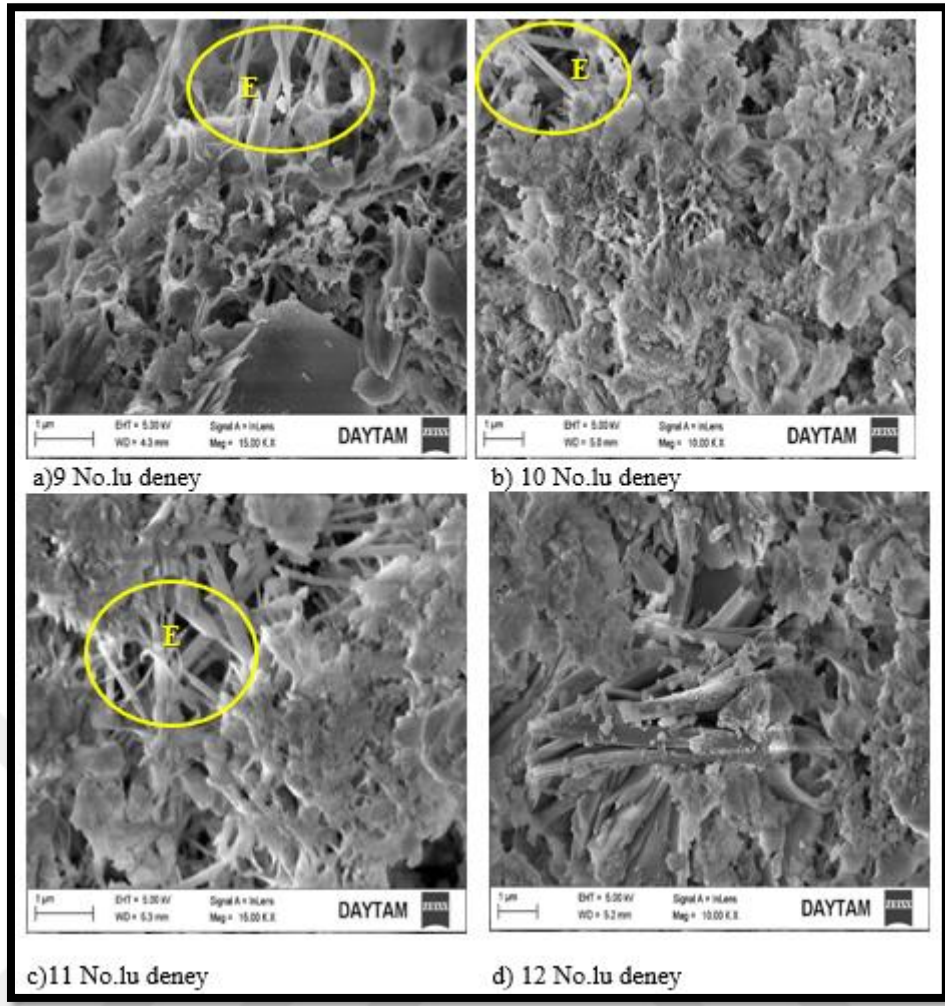


C: Kalsit. F: Friedel tuzu. H: Halit. P: Portlantid

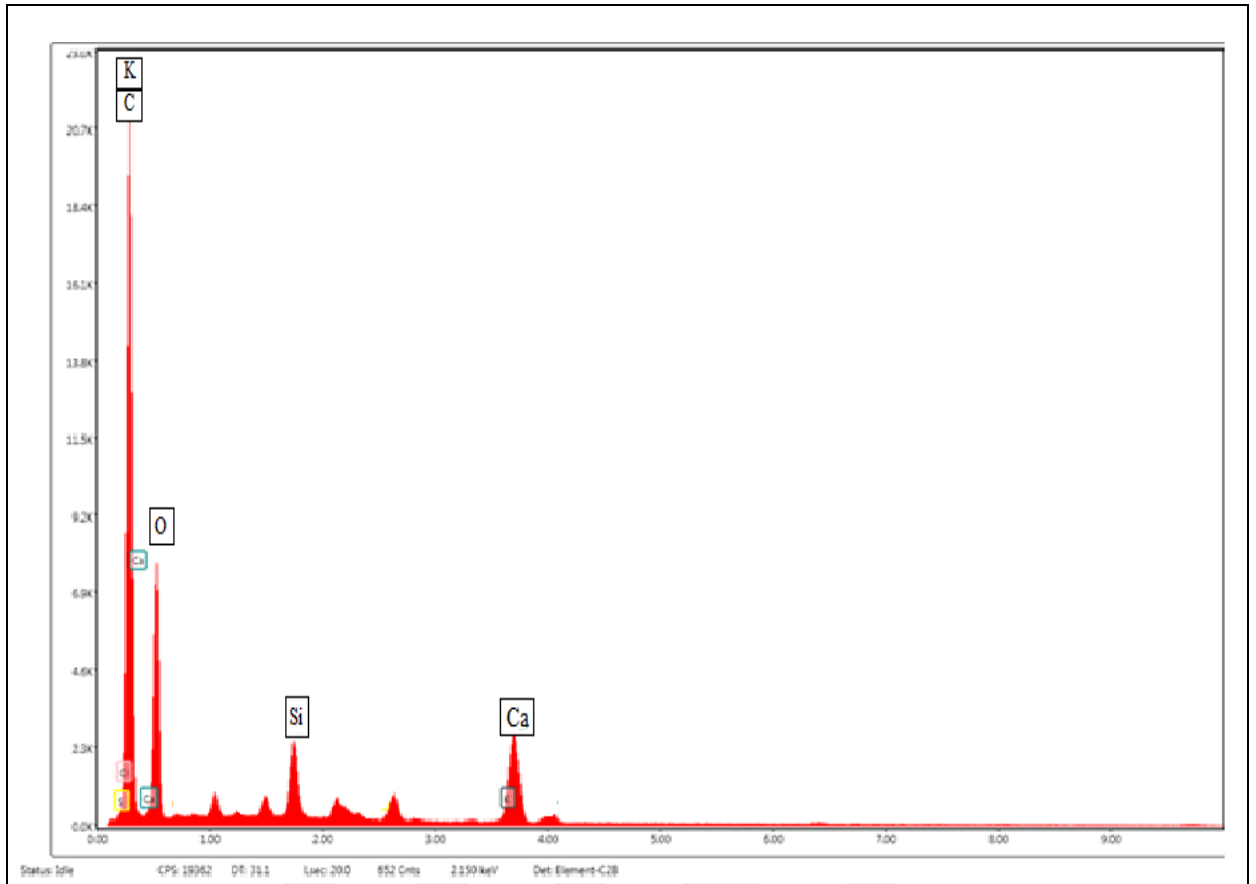
Şekil 49. XRD analizi (5, 6, 7 ve 8 No.lu deney)

Şekil 46, Şekil 47 ve Şekil 48 birlikte değerlendirildiğinde 7 No.lu deney numunesinde boşluk yapılarının oluştuğu öngörülmüştür. 5, 6, 7 ve 8 No.lu deney karışım numunelerinde P (portlantid), C (kalsit) oluşumu Şekil 49'dan gözlenmektedir. Kaya tuzu içeren deney karışımlarında F (Friedel tuzu) ve H (Halit) minerallerinin meydana geldiği Şekil 49'dan anlaşılmaktadır. H bileşeni kaya tuzuna doygunluğun %100 olduğu 7 numaralı karışımda daha belirgindir.

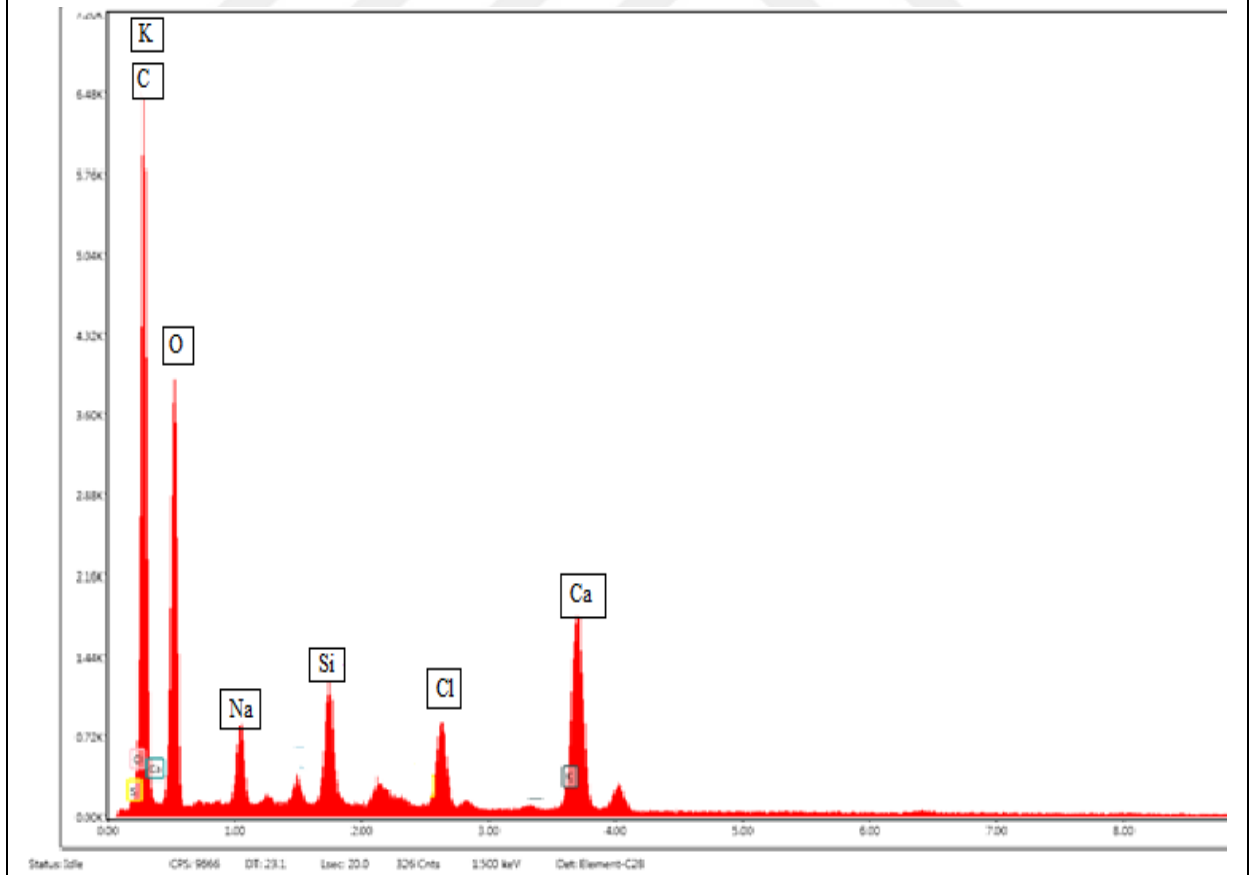
9, 10, 11 ve 12 No.lu deney numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 50, EDS grafikleri Şekil 51 ve Şekil 52 ve XRD analizi Şekil 53'de gösterilmiştir.



Şekil 50. SEM görüntüleri (9, 10, 11 ve 12 No.lu deney)

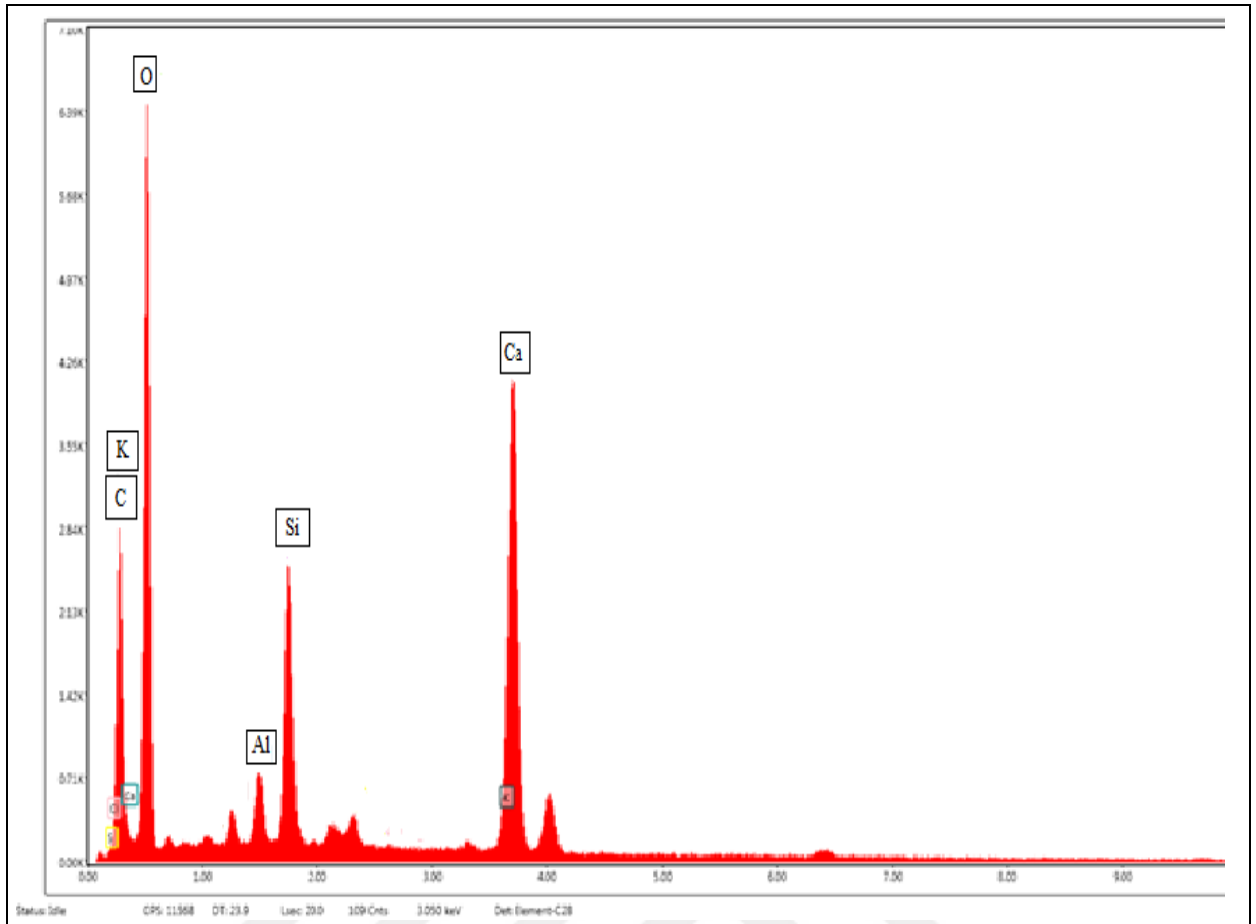


a) 9 No.lu deney

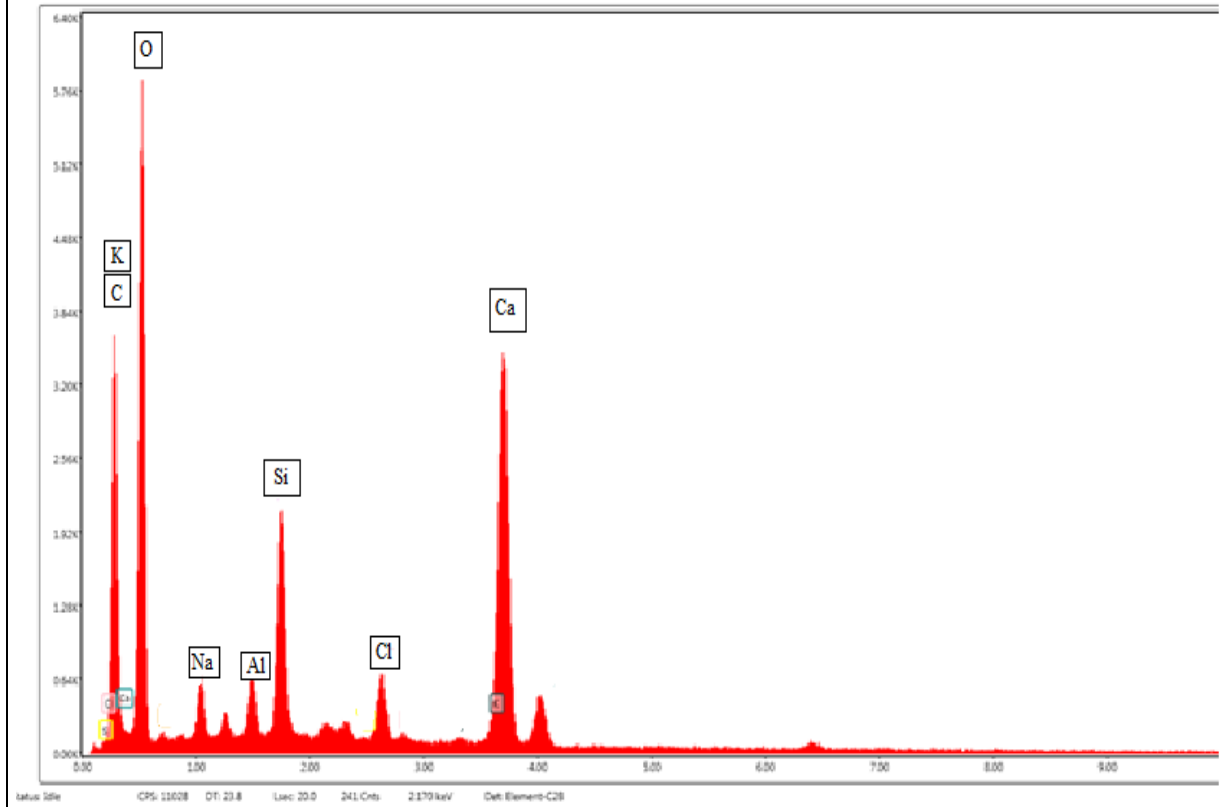


b) 10 No.lu deney

Şekil 51. EDS analizi (9 ve 10 No.lu deney)

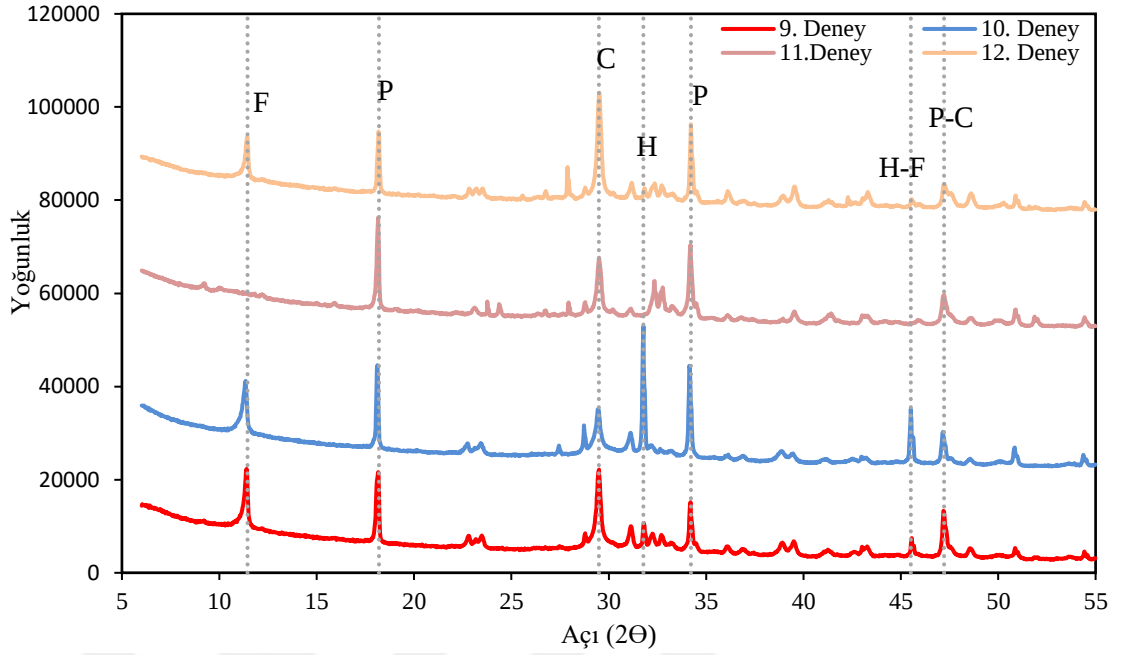


a) 11 No.lu deney



b) 12 No.lu deney

Şekil 52. EDS analizi (11 ve 12 No.lu deney)

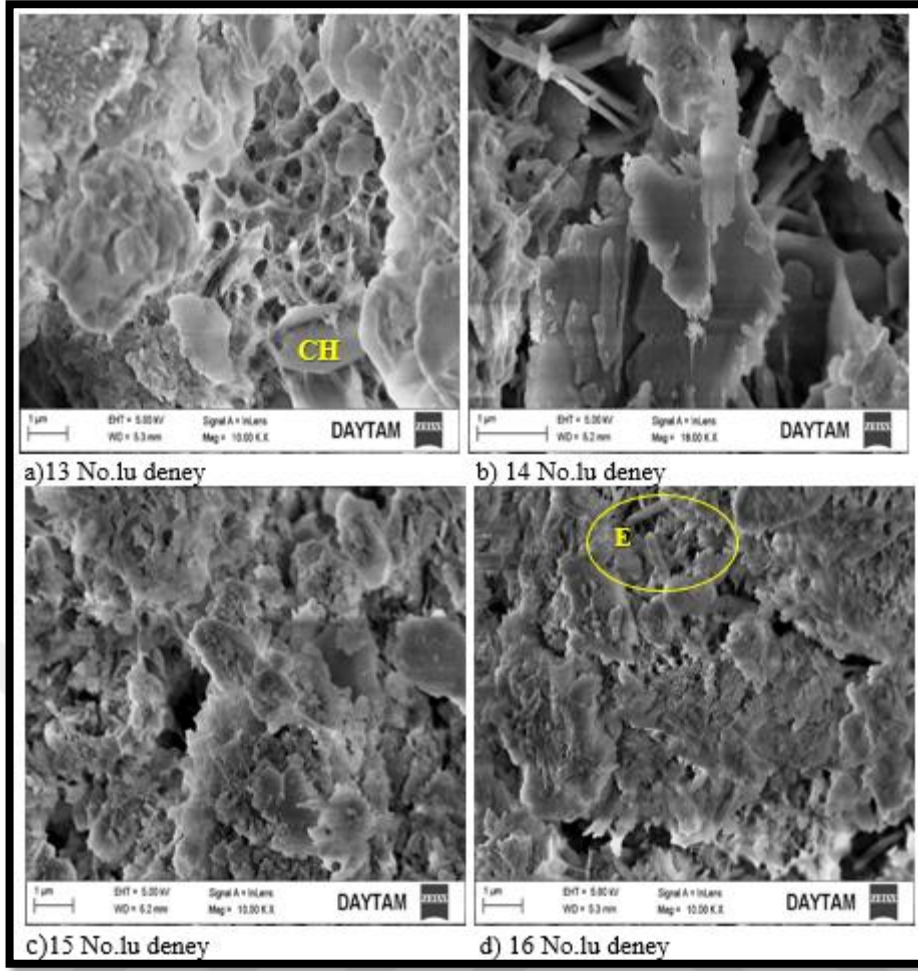


C: Kalsit, F: Friedel tuzu, H: Halit, P: Portlantid

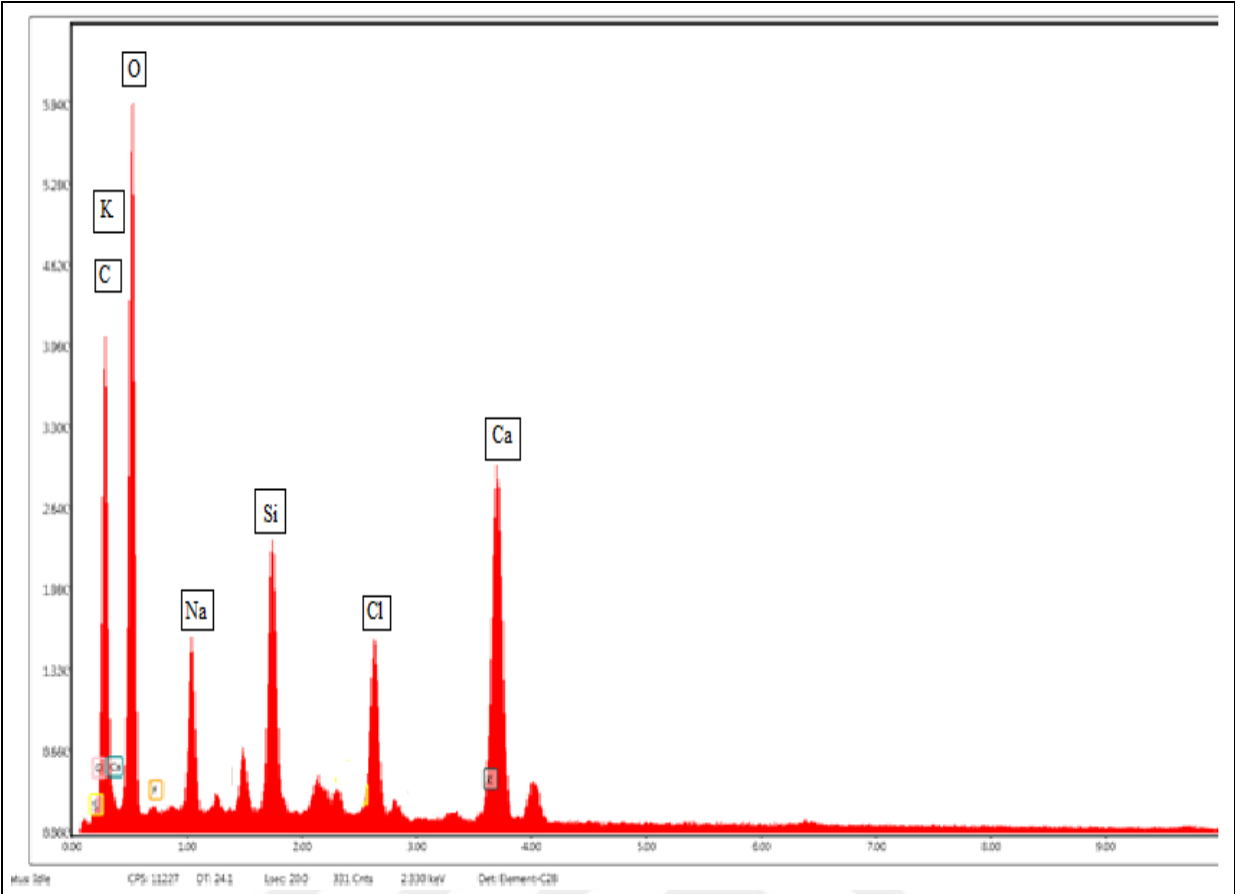
Şekil 53. XRD analizi (9, 10, 11 ve 12 No.lu deney)

Şekil 50, Şekil 51 ve Şekil 52 birlikte incelendiğinde 9, 10 ve 11 No.lu deney numunelerinde etrenit bileşenlerinin varolduğu öngörülmüştür. Şekil 53' den 9, 10, 11 ve 12 No.lu deney karışım numunelerinde P (portlantid), C (kalsit) oluşumu gözlenmektedir. Kaya tuzu içeren deney karışımlarında F (Friedel tuzu) ve H (Halit) minerallerinin meydana geldiği analiz sonucundan belirlenmiştir. H bileşeni kaya tuzuna doygunluğun %100 olduğu 10 numaralı karışımda daha belirgindir.

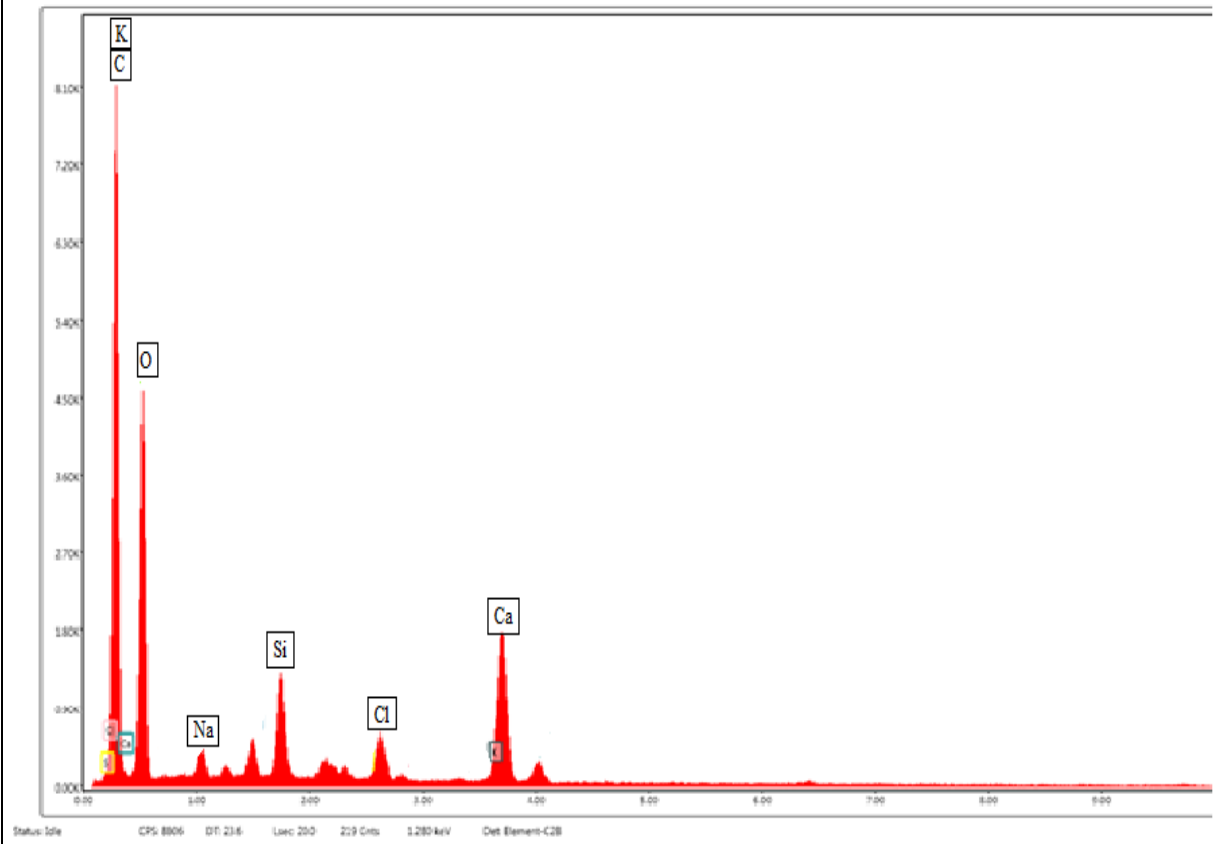
13, 14, 15 ve 16 No.lu deney numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 54. EDSgrafikleri Şekil 55 ve Şekil 56 ve XRD analizi Şekil 57'de gösterilmiştir.



Şekil 54. SEM görüntüleri (13, 14, 15 ve 16 No.lu deney)

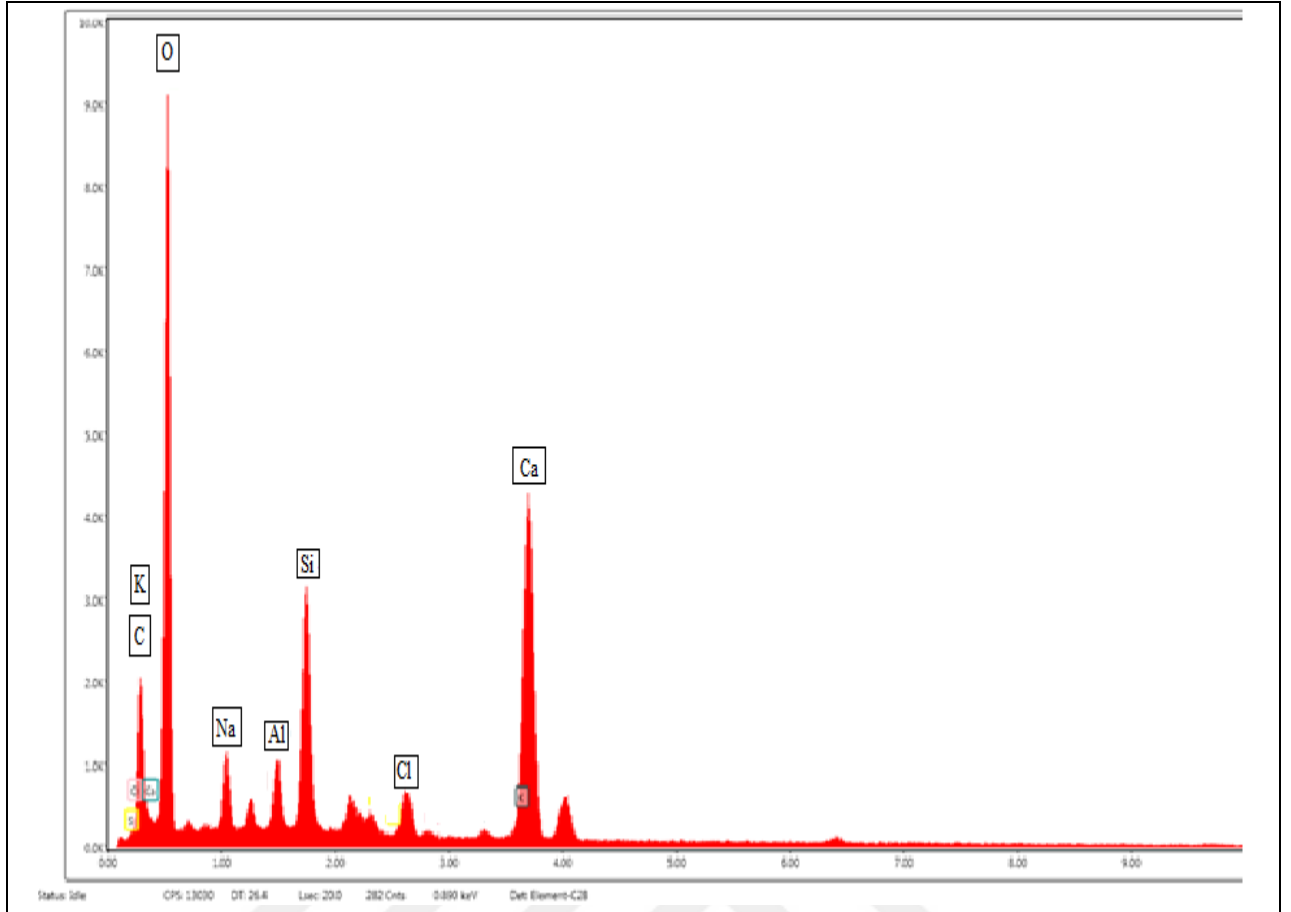


a) 13 No.lu deney

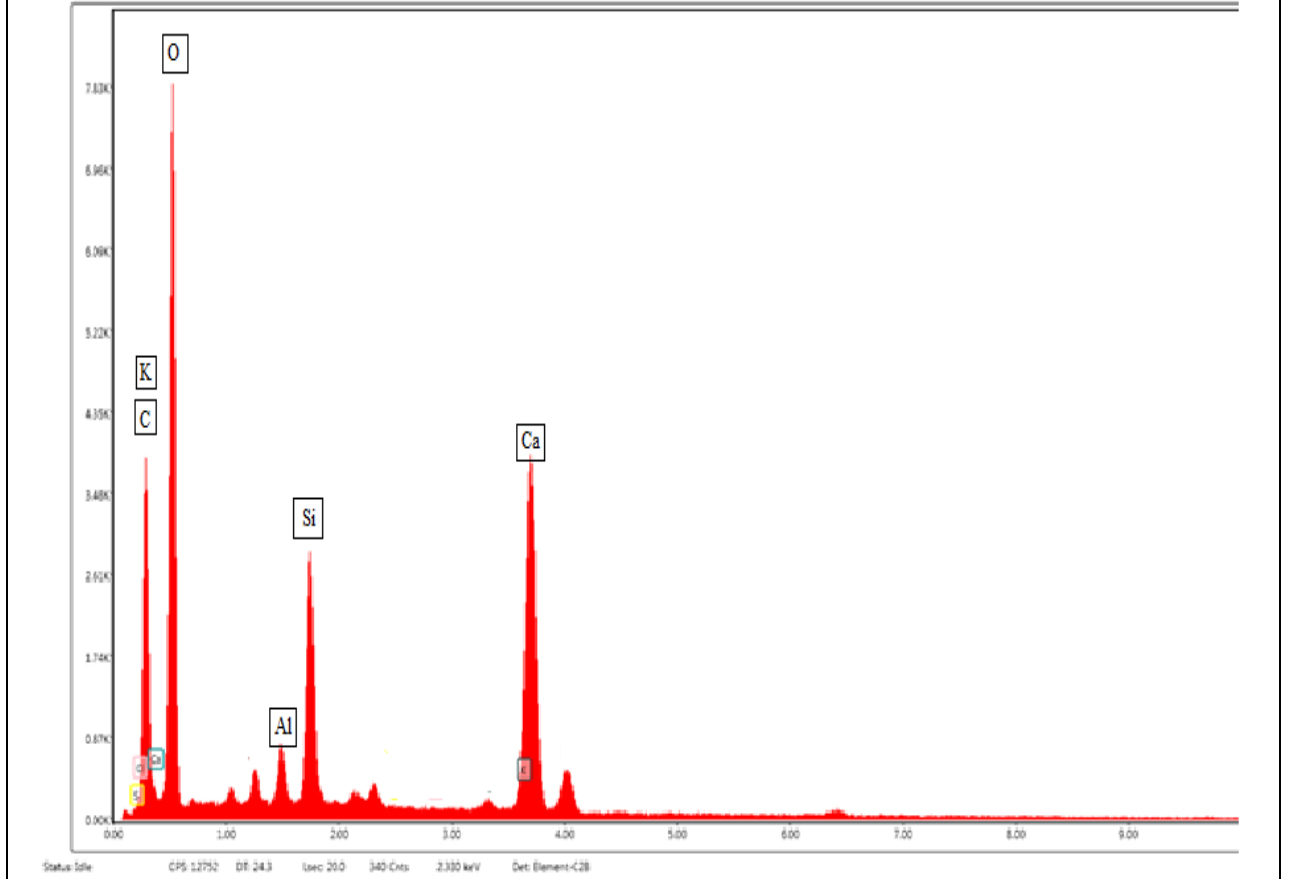


b) 14 No.lu deney

Şekil 55. EDS analizi (13 ve 14 No.lu deney)

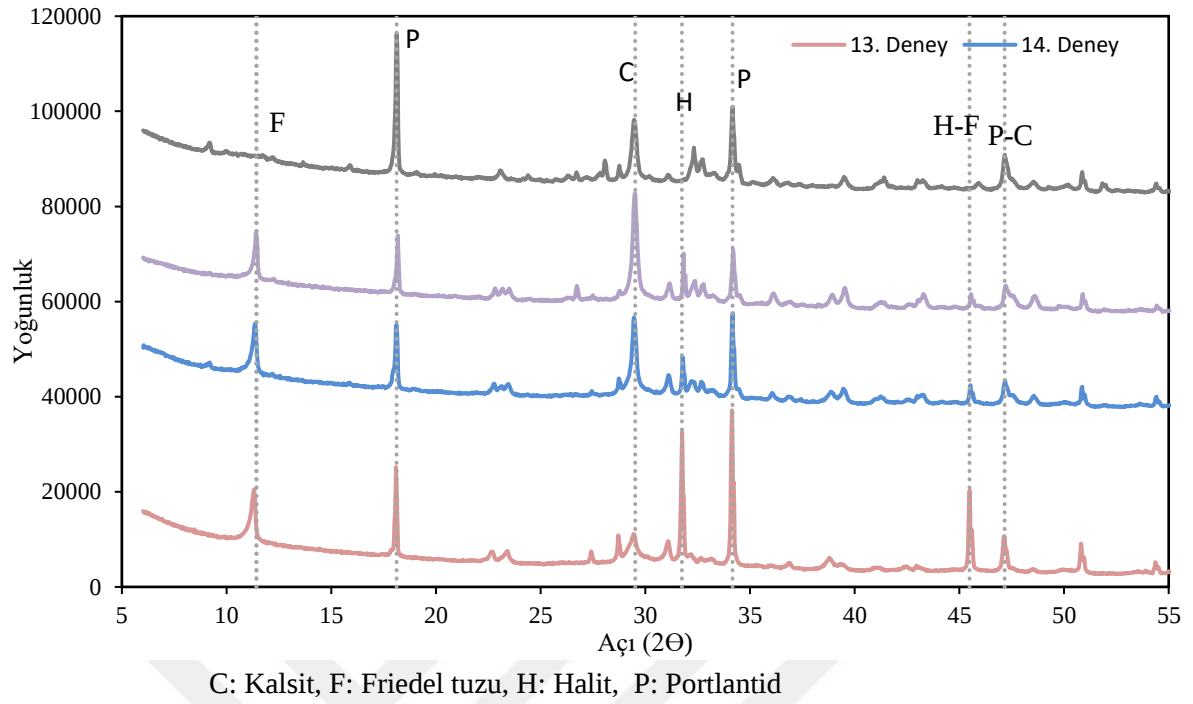


a) 15 No.lu deney



b) 16 No.lu deney

Şekil 56. EDS sonuçları (15 ve 16 No.lu deney)



Şekil 57. XRD analizi (13, 14, 15 ve 16 No.lu deney)

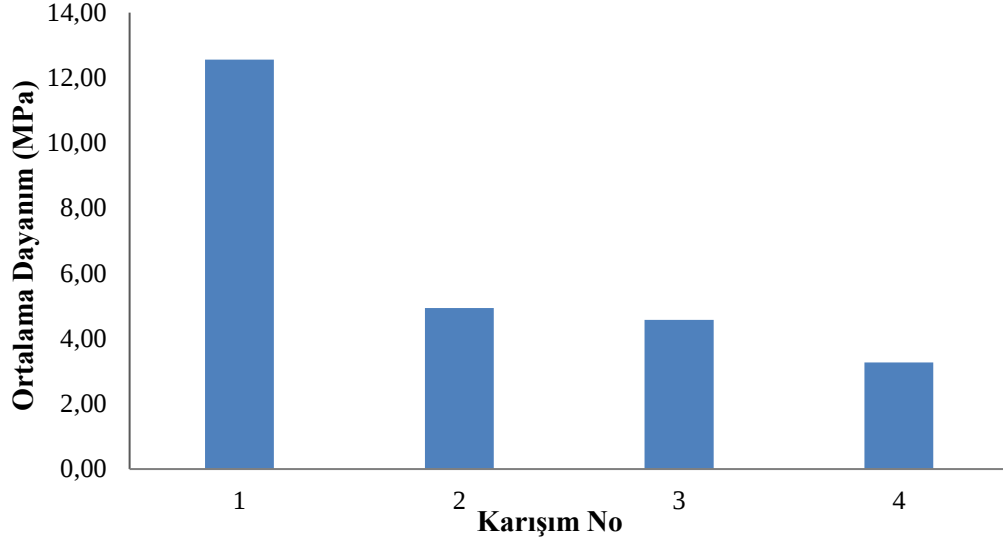
Şekil 54, Şekil 55 ve Şekil 56 incelendiğinde 13 No.lu deney numunesinde CH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yapısının, 16 No.lu deney numunesinde etrenjit bileşenlerinin varolduğu öngörülmüştür. Şekil 57 incelendiğinde 13, 14, 15 ve 16 No.lu deney karışım numunelerinde P (portlantid), C (kalsit) oluşumu gözlenmektedir. Kaya tuzu içeren deney karışımlarında F (Friedel tuzu) ve H (Halit) minerallerinin meydana geldiği analiz sonucundan belirlenmiştir. H bileşeni kaya tuzuna doygunluğun %100 olduğu 13 numaralı karışımda daha belirgindir.

Enjeksiyonlu Kaya Tuzu Numunelerinin Serbest Basınç Deney Sonuçları

Rölatif sıklığı %65 olarak hazırlanan kaya tuzu içerisine enjeksiyon yapılarak elde edilen numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucunda su küründe bekletilen numunelerde dayanım elde edilememiştir. Hava kürüne bırakılan numunelerden elde edilen serbest basınç deney sonuçları Tablo 56'da verilmiştir. Tablo 56'da ki değerler kullanılarak elde edilen ortalama serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 59'da gösterilmiştir.

Tablo 56. Enjeksiyonlu kaya tuzu numunelerinin serbest basınç dayanımı sonuçları

Karışım No	S/C	Basınç Dayanımı (MPa)		
		1. numune	2. numune	Ortalama
1K	0,80	12,81	12,31	12,56
2K	1,00	4,38	5,49	4,94
3K	1,20	4,36	4,80	4,58
4K	1,40	3,32	3,21	3,27



Şekil 58. Enjeksiyonlu kaya tuzu numunelerinin dayanımları

Tablo 56, ve Şekil 58 birlikte değerlendirildiğinde incelendiğinde en yüksek dayanım S/C oranının en düşük seviyesi olan 1 numaralı karışımda 12,56 MPa elde edilirken, en düşük dayanım ise 3,27 ile 4 numaralı karışımdan elde edilmiştir. S/C oranının artmasıyla serbest basınç dayanımını genel olarak azaldığı görülmektedir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında birtakım laboratuvar deneyleri yapılarak, S/C oranı, K ve KTD'nin enjeksiyon karışımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde sonuçların literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüş ve Taguchi Optimizasyon Yöntemi'nin inşaat mühendisliğinde uygulanabilir olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, aşağıda verilmiştir.

- Enjeksiyon sıvılarının akma süresi üzerinde en etkili parametre S/C oranı olup bu oran arttıkça akma süresi azalmaktadır. En az etkili parametre ise KY'dir ve yüzdesi arttıkça genel olarak akma süresi artmaktadır. KTD arttıkça akma süresi artmaktadır. Akma süresi için optimum karışım oranları S/C, KY ve KTDY parametreleri için sırasıyla 1,4, %25, %0 seviyeleridir. Bu karışımdan elde edilen akma süresi ise 30,9 s olarak bulunmuştur.
- Karışımların (enjeksiyon sıvılarının) çökelme yüzdesi üzerinde en etkili parametre, KTDY olup miktarı arttıkça çökelme azalmaktadır. En az etkili parametre ise KY'dir. Çökelme yüzdesi için S/C oranının 0,8, KY'nin %50 ve KTDY'nin %100 olduğu karışım optimum karışım oranıdır. Bu karışımın çökelme yüzdesi ise %0,34'tür.
- KTDY, priz süresi üzerinde en etkili parametre olup miktarı arttıkça genellikle priz süresi uzamaktadır. En az etkili parametre ise KY olup miktarının artmasıyla priz süresi kısalmaktadır. Priz süresi için, S/C oranının 0,8, KY'nin %100 ve KTDY'nin %25 olduğu karışım optimum karışım oranıdır. Bu karışımın priz süresi ise 669 dk'dır.
- Enjeksiyon sıvısı numunelerinin 7 günlük serbest basınç dayanımları üzerinde en etkili parametre KTDY olup 2. seviyeye (%25) kadar bulunması dayanımları artırmış bu seviyeden sonra bulunması ise dayanımları azaltmıştır. Dayanımlar üzerinde en az etkili parametre ise KY olup yüzde miktarının artmasıyla dayanımlar artmıştır. 7 günlük serbest basınç dayanımı için S/C oranının 0,8, KY'nin %100 ve KTDY'nin %25 olduğu karışım oranı optimum karışım oranıdır. Bu karışımdan elde edilen 7 günlük basınç dayanımı ise 10,44 MPa'dır.
- KTDY enjeksiyon sıvısı numunelerinin 14 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametre olup 2. seviyeye (%25) kadar bulunması

dayanımları artırmıştır. En az etkili parametre ise kum yüzdesi olup yüzdesinin artmasıyla dayanımlar genel olarak artmıştır. 14 günlük serbest basınç dayanımı için S/C oranının 0,8, KY'nin %50 ve KTDY'nin %25 olduğu karışım oranı optimum karışım oranıdır. Bu karışımın 14 günlük dayanımı 10,5 MPa olarak elde edilmiştir.

- Enjeksiyon karışım numunelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımları üzerinde en etkili parametre S/C oranı olup bu oran arttıkça dayanımlar azalmıştır. En az etkili parametre ise KY olup miktarının artmasıyla dayanım genel olarak artmaktadır. 28 günlük serbest basınç dayanımı için S/C oranının 0,8, KY'nin %50 ve KTDY'nin %0 olduğu karışım oranı optimum karışım oranıdır. Bu karışımın 28 günlük basınç dayanımı ise 11,48 MPa'dır.
- S/C oranı, enjeksiyon sıvısı numunelerinin 90 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametre olup bu oranın artmasıyla dayanımlar azalmıştır. En az etkili parametre ise KTDY olup miktarının artmasıyla dayanımlar azalmıştır. 90 günlük serbest basınç dayanımı için S/C oranının 0,8, KY'nin %50 ve KTDY'nin %0 olduğu karışım oranı optimum karışım oranıdır. Bu karışımın 90 günlük dayanımı ise 12,14 MPa olarak elde edilmiştir.
- Enjeksiyon sıvısı numunelerinin 50 donma çözülme çevrim sonrası serbest basınç dayanımları üzerinde, en etkili parametre S/C oranı olup bu oran arttıkça dayanımlar azalmıştır. En az etkili parametre ise kum yüzdesi olup 3. seviyeye (%50) kadar artmasıyla dayanım genel olarak artmaktadır. 50 çevrim sonrası serbest basınç dayanımı için S/C oranının 0,8, KY'nin %50 ve KTDY'nin %25 olduğu karışım oranı optimum karışım oranıdır. Bu karışımın 50 çevrim sonrası dayanımı ise 10,86 MPa'dır.
- S/C oranı 100 donma çözülme çevrim sonrası serbest basınç dayanımları üzerinde en etkili parametre olup bu oran arttıkça dayanımlar düşmektedir. Kum yüzdesi dayanımlar üzerinde en az etkili parametre olup miktarının artmasıyla genel olarak dayanımlar artmaktadır. 100 çevrim sonrası serbest basınç dayanımı için S/C oranının 0,8, KY'nin %50 ve KTDY'nin %0 olduğu karışım oranı optimum karışım oranıdır. Bu karışımın 100 çevrim sonrası dayanımı 9,05 MPa olarak elde edilmiştir.
- Enjeksiyonlu kaya tuzu numunelerinde su kürü numuneleri için dayanım elde edilmemiştir. Hava kürü numunelerinde en yüksek dayanım, en düşük S/C oranında (0,8) 12,56 MPa elde edilmiştir. Enjeksiyonlu numunelerde su

küründe dayanım elde edilemediği için uygulamada kaya tuzunun bulunduğu ortamlarda enjeksiyonlu ortamın su ile temas etmemesi gereklidir.

Öneriler

Farklı kaya tuzları ve farklı kaya tuzuna doygunluk yüzdeleri kullanılarak, kaya tuzunun enjeksiyon sıvılarının reolojik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilir.



KAYNAKLAR

- Akbulut, S. and Saglamer, A., 2002. Estimating the groutability of granular soils: a new approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(4), 371-380.
- Anagnostopoulos, C.A., 2005. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 20 (6). 525-533.
- Andrus, R.D. and Chung. R.M., 1995. *Ground Improvement Techniques For Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines*. US National Institute of Standards and Technology.
- Anonim, Temel Sondaj ve Enjeksiyon Teknik Şartnamesi, 2016. DSİ Jeoteknik Hizmetler ve YAS Dairesi Başkanlığı. Ankara.
- Anonim, a., <https://www.deltayapi.net/hizmetler/enjeksiyon/> (15.12.2020).
- Anonim, b., <http://www.zeminarastirma.com/bina-icin-de-portatif-delgi-makinesi-ile-cimento-enjeksiyonu-ve-zemin-iyilestirme/temel-altina-cimento-enjeksiyonu/> (15.12.2020).
- Anonim, c., Malzeme İlave Ederek Zemin Islah Yöntemleri <http://www.zetas.com.tr/index.php?id=224000&dil=TR> (27.12.2020).
- Anonim, 2020a., Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kaya-tuzu>.
- ASTM C191, 1992. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, 164-166.
- ASTM C305-06, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
- ASTM C939-16a, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).
- ASTM C940-16, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.
- ASTM D632, 2020. Standard Specification for Sodium Chloride.
- Baradan, B. ve Aydın, S., 2013. Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, 265-288.
- Bektas, S. and Ozgan, E., 2011. An experimental study on the effects of different injection materials on consolidation settlement. *International Journal of Physical Sciences*, 6 (35), 7985-7990.
- Borinaga-Treviño, R., Pascual-Muñoz, P., Calzada-Pérez, M.A., Castro-Fresno, D., 2014. Freeze-thaw durability of cement-based geothermal grouting materials. *Construction and Building Materials*, 55(2014), 390-397.
- Chatterjee, A.K., 2001. X-Ray Diffraction. Chapter 8, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*, Ramachandran, V.S.,
- Chegbeleh, L.P., Yidana. S.M., Nishigaki, M. and Achampong. F., 2014. Comparative study on the application of ethanol-bentonite slurry and salt-bentonite slurry as effective injection materials for barrier sealing. *Applied clay science*, 87, 40-45.
- Cullity, B.D., 1966. X-Ray Diffraction (Translator: Ali SÜMER). *Teknik Üniversite Matbaası*, 546s, İstanbul (In Turkish).
- Çavdar, A., 2014. Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Composites: Part B*. 58, 463-472
- Çelik, S., 2017. An experimental investigation of utilizing waste red mud in soil grouting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (4), 1191-1200.
- Çinicioğlu, F.Ö., 1997. *Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu*. İ.Ü. Basımevi ve Film Merkezi, 172, İstanbul.

- Furuncu, O., 2019. Naftalin sülfonat esaslı yapı kimyasallarının jet grout kolonların performansı üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi.
- Gaitero, J.J., Ibarra, Y.S., Erkizia, E. and Campillo, I., 2005. Characterisation and Reduction by Nano- Additions of The Effect of Ca-Leaching in Cement Pastes. 2nd Inter. Symp. on Nanotechnology in Construction, RILEM Proceedings pro045: Nanotechnology in Construction, Spain.
- Emrem, E., 2015. Elektron mikroskobuna genel bakış. <https://www.slideshare.net/ErayEmrem/elektron-mikroskobuna-genel-bak>. (16.12.2020)
- Erdoğan, T.Y., 2007. Beton, Ankara: ODTU yayıncılık.
- Ergun, U., 2007. Temel Enjeksiyonu Yöntemleri. <https://docplayer.biz.tr/9633888-Temel-enjeksiyonu-yontemleri.html> (07.06.2020)
- Gökdemir, A., 1999. Mikro daneli çimento enjeksiyonu uygulanmış kum örneklerinin inceliğe bağlı mekanik ve dayanım özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde Üniversitesi, Niğde.
- Hussin, M. W., Lim S.K. and Zakaria F., 2007. Engineering properties of high volume slag cement grout in tropical climate. Malaysian Journal of Civil Engineering, 19(1), 42–54.
- İnal, E., 2015. Zeminlerin taşıma gücünün çimento enjeksiyonu ile iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi.
- İnce, İ., 2013. Donma-çözülme döngüsünün kayaçların mühendislik parametreleri üzerine etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi.
- Lim, S.K., Tan C.S., Chen K.P., Lee M.L. and Lee W.P., 2013. Effect of different sand grading on strength properties of cement grout. Construction and Building materials, 38, 348-355.
- Littlejohn, G., 1985. Chemical grouting-1. Ground Engineering, 18 (2).
- Karadeniz, M. ve Mutman, U., 2019. İri daneli zeminlerde kükürt enjeksiyonu ile zemin özelliklerinin incelenmesi. 8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu.
- Karakoç, M.B., 2010. Hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin yüksek dayanımlı betonun donma-çözülme dayanıklılığına etkisinin incelenmesi ve modellenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Kim, T., Lee C., 2000. Deformation behavior changes of jointed rocks by cement milk grouting. ISRM International Symposium, Melbourne, Australia.
- Mitchell, J. K., 1981. Soil improvement State-of- Art -Report. Proc. 10th International Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.
- Mohammed, T.U., Hamada. H. and Yamaji. T., 2004. Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment. Cement and Concrete Research, 34 (4), 593-601.
- Mollamahmutoglu, M., 2003. Treatment of medium to coarse sands by Microcem H900 as an alternative grouting to silicate-ester grouts. Grouting and Ground Treatment, 1235-1242.
- Mollamahmutoglu, M. ve Babuçcu, F., 2006. Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri. Gazi Kitabevi, 263 s, Türkiye.
- Mutman, U., 2007. Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu İle Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kocaeli Üniversitesi.
- Önalp, A., Arel. E. ve Sert, S., 2006. Geoteknik bilgisi. Birsan Yayınevi.
- Özarlan, M., 2012. Katkılı ince taneli çimento şerbetinin ve enjekte edildiği ince ve orta taneli kumların bazı mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Selçuk Üniversitesi.
- Pınarbaşı, A., 2020. Taguchi Metodu nedir. Mühendis Beyinler. <https://www.muhendisbeyinler.net/taguchi-metodu-nedir/>. (02 .01.2021).

- Ramachandran, V.S., 1995, Concrete Admixtures Handbook, Chapter 11: Antifreezing admixtures, pp. 740–797 and Chapter 5: Accelerators, pp 246-273.
- Riberio, M.C.S., Juvandes, L.F.P., Rodrigues, J.D., Ferreira, A.J.M., Marques, A.T., 2010. Behaviour of Cement and Polymer Mortar Materials to Rapid FreezeThaw Cycling. Materials Science Forum, 636-637 (2010), 1329-1335.
- Savaşkan, T., 2012. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 378 s, Trabzon.
- Sha, F., Li S., Liu R., Li Z. and Zhang. Q., 2018. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash. bentonite. superp.lasticizer and water glass. construction and Building materials, 161, 282-291.
- Şirvancı, M., 1997. Kalite İçin Deney Tasarımı "Taguchi Yaklaşımı". Literatür Yayınları No: 23, 110 s, ABD.
- Tan, O., Gungormus. G. and Zaimoglu, A.S., 2014. Effect of Bentonite. Fly Ash and Silica Fume cement injections on uniaxial compressive strength of granular bases. KSCE Journal of Civil Engineering, 18 (6), 1650-1654.
- Tan, Ö. and Zaimoğlu. A.Ş., 2004. Investigation of effects to the rheological properties of additive materials which are used on cement enjections. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 10 (2), 275-281.
- Tekin, E. ve Mollamahmutoğlu, M., 2010. Çok ince taneli çimento (rheocem 900) enjeksiyonu ile farklı gradasyona sahip kumların enjektte edilebilirliği. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25 (3).
- Tunçdemir, F., 2004. Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi. Türkiye Mühendislik Haberleri, 430.
- Uzuner, B.A., 2007. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği. Derya Kitabevi, 560 s, Türkiye.
- Wakeley, L.D. and Burkes, J.P., 1986. Distribution of chloride in a salt-saturated grout in contact with halite rock. Cement and Concrete Research, 16 (3), 267-274.
- Warner, J., 2004. Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures. John Wiley and Sons, 691 s, Canada.
- Wegian, F.M., 2010. Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 3 (4), 235-243.
- Yalçınkaya, Ç., 2009 Mineral katkıları kendiliğinden yerleşen lifli betonun mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Yang, D.y. and Luo, J.-j., 2012. The damage of concrete under flexural loading and salt solution. construction and Building materials, 36, 129-134.
- Yesilnacar, M.I., 2003. Grouting applications in the Sanliurfa tunnels of GAP, Turkey. Tunnelling and Underground Space Technology, 18 (4), 321-330.
- Zaimoğlu, A., 2003. Bentonit Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Çimento Enjeksiyonu Karışımlarında Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- Zhang, C., Yang J., Ou X., Fu J., Xie, Y. and Liang, X., 2018. Clay dosage and water/cement ratio of clay-cement grout for optimal engineering performance. Applied clay science, 163, 312-318.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Elif Ayık Kılıç
Doğum tarihi:	15 Mayıs 1995
Doğum Yeri:	Erzurum
Medeni Hali:	Evli
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Tel:	444 5 388 / 2703
Faks:	-
E-mail:	elif.ayik@erzurum.edu.tr
Eğitim	
Lise:	Erzurum Mecidiye AL
Lisans:	Atatürk Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İMO	
İlgi Alanları ve Hobiler	